



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 al 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 guía práctica, siempre que estos no hayan sido por dolo o imprudencia temeraria.

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 gas 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 guía 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 guía 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 m³ 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°C y no de $+15^{\circ}\text{C}$ 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 cierto 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 (H₂), oxígeno (O₂) y cantidades mínimas de azufre (S), nitrógeno (N₂) y agua (H₂O).
- 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, H₂ e hidrocarburos) y no inflamables. Hoy en día se utiliza con frecuencia el gas natural cuyo componente principal es el hidrocarburo metano (CH₄).

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 SO₂ y SO₃ 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 (N_2), oxígeno (O_2), 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 la combustión (a excepción del oxígeno utilizado en la misma) también se encuentran en los gases de la combustión.

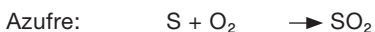
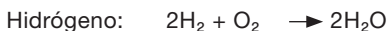
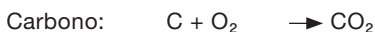
Componente	Contenido en volumen [%]
Nitrógeno	78,07
Oxígeno	20,95
Dióxido de carbono	0,03
Hidrógeno	0,01
Argón	0,93
Neón	0,0018

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

1.4.1 Combustión ideal, coeficiente de proporción 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.

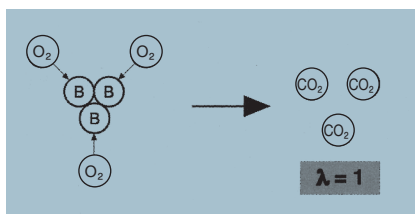


Fig. 1: Modelo de una combustión ideal

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 la combustión.
- Si la cantidad de exceso de aire escogida es muy pequeña, además de un bajo rendimiento de utilización del combustible, esto incrementará la carga medioambiental nociva producida por los residuos no quemados en los gases de la combustión.

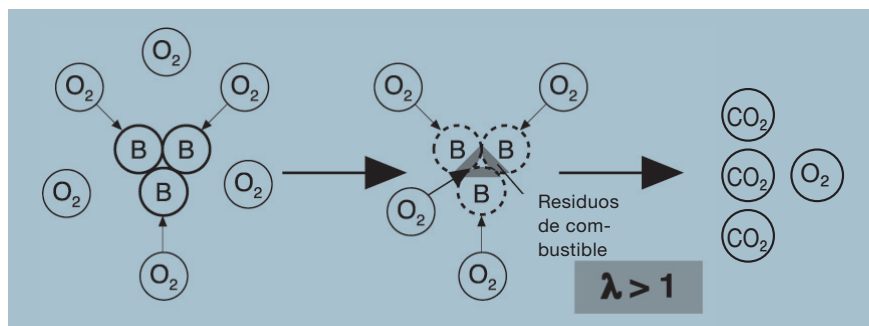


Fig. 2: Modelo de una combustión con exceso de aire

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

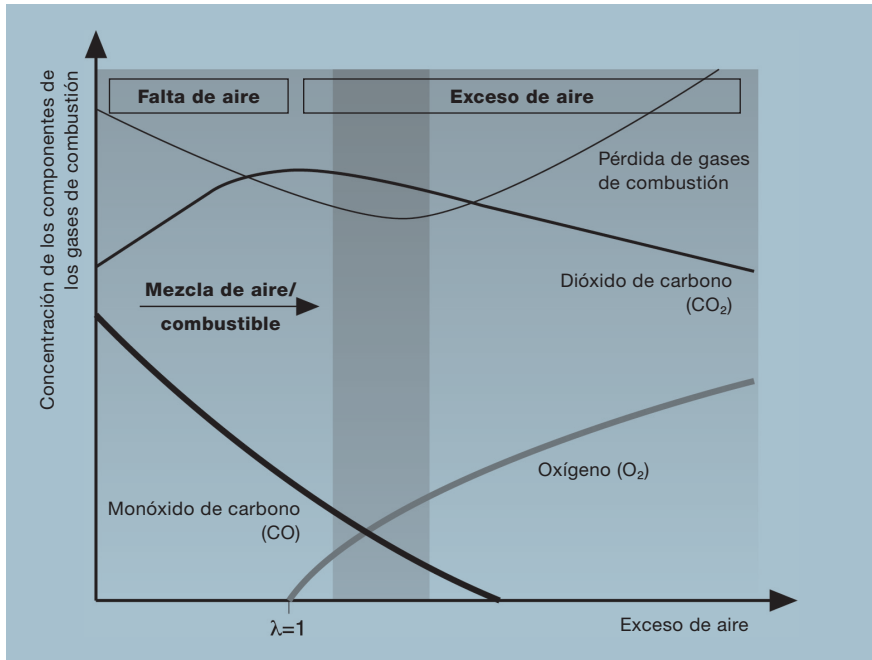


Fig. 3: Diagrama de combustión

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)

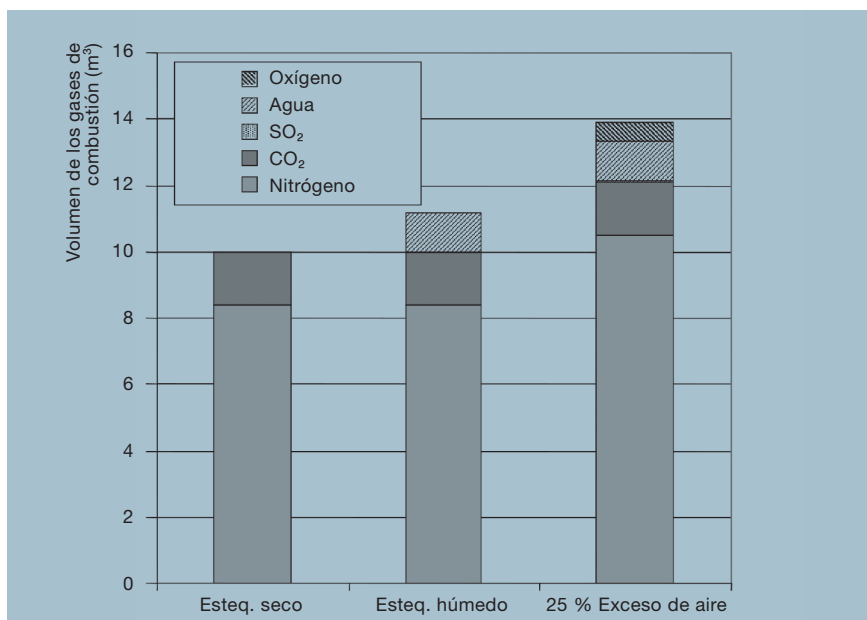


Fig. 4: Efecto de dilución del contenido de humedad y exceso de aire

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 la combustión.

Nitrógeno (N_2)

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 (CO_2)

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 (H_2O). Dependiendo de la temperatura de los gases de combustión (TG) este aparece como humedad del gas de

1. El proceso de combustión

combustión (a TG elevada) o como agua condensada (a TG baja) junto con el agua del combustible y del aire 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 la 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 NOX)

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 (H_2SO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4); 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 (H_2S)

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico que huele mal incluso en concentraciones mínimas (aprox. $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 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 H_2S de los gases de combustión se usan diversos métodos incluyendo la combustión para formar SO_2 , 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 (CH_4), butano (C_4H_{10}) y benceno (C_6H_6) 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.

1. El proceso 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.

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 "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 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 la 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 fijo, la suma de todas las energías suministradas a la instalación debe ser igual a la suma de las energías emitidas por la instalación (ver 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 O₂ o CO₂ 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 la combustión.

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

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

- TG:

TA:

A2, B:

21:

O₂:

KK:
- Temperatura del gas de combustión

Temperatura del aire de combustión

Factores específicos del combustible (véase la tabla)

Contenido de oxígeno en el aire

Concentración medida de O₂

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

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

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 efectúa una medición con un instrumento sin preparadora del gas, la temperatura del punto de rocío del gas corresponde aproximadamente a la temperatura ambiente, es decir, 25 °C, p.ej. 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.

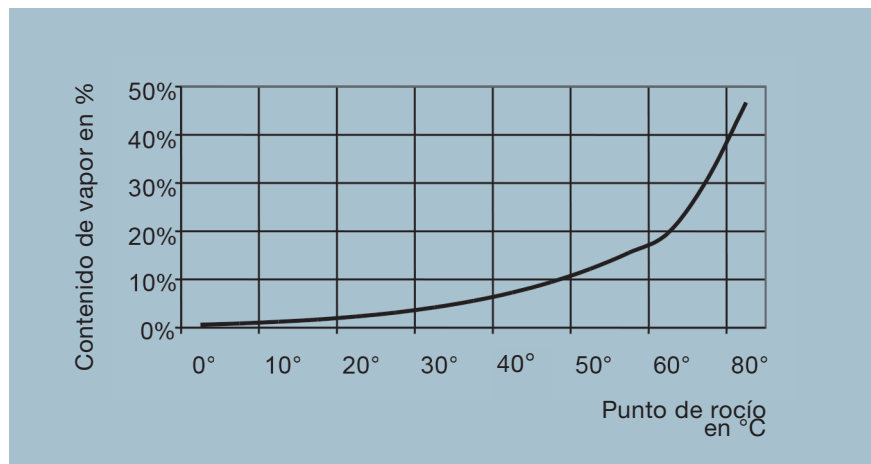


Fig. 5: Contenido de vapor en función del punto de rocío (presión del aire 1013 mbar)

Conductos calentables, refrigerador para el gas a medir

Los gases de la 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

1. El proceso de combustión

húmedos. Por consiguiente, el 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.

2. Razones para el análisis de gases en la combustión industrial

El análisis de gases (se refiere a la tecnología de medición para determinar la composición de los gases) es una herramienta imprescindible para una ejecución rentable y segura del proceso en casi todos los sectores industriales. En este sentido, los procesos de combustión ocupan el primer plano aunque se debe considerar que este término genérico reúne muchos

métodos diferentes. En la figura 6 se representa la secuencia de un proceso de combustión en secciones, empezando (izquierda) con la entrada de combustible y aire de combustión en una cámara de combustión, pasando por la combustión como tal y los distintos procesos ejecutados hasta llegar a la limpieza de los gases de combustión y, por último, al control de emisiones.

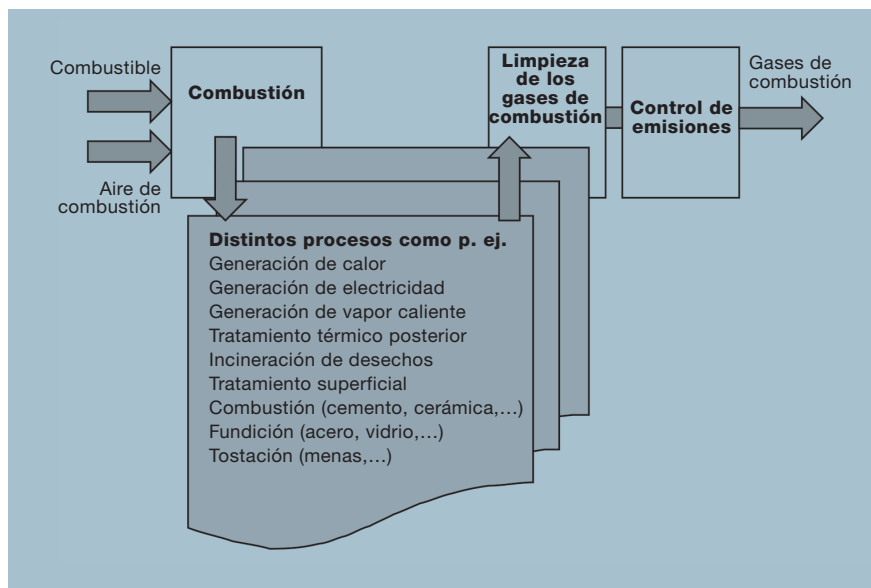


Fig. 6: Variedad y etapas de los procesos de combustión

2. Razones para el análisis de gases en la combustión industrial

El análisis de gases proporciona información sobre la composición de los gases de combustión y de los gases de escape en todas las etapas de esta cadena de proceso. Por consiguiente, es una herramienta imprescindible para el funcionamiento rentable y seguro de la instalación en conformidad con la reglamentación oficial y, al mismo tiempo, para la calidad y eficiencia de la producción.

Los analizadores de combustión son utilizados por varios fabricantes en distintos modelos y tomado como

base diversos principios de medición; encontrará información más detallada en el capítulo de 3 de esta guía.

Los analizadores de combustión Testo se usan ampliamente para analizar gases de combustión en la industria y en ninguna forma se limita su empleo al campo específico de la supervisión de emisiones. Se puede hacer una distinción, con un cierto solapamiento, entre los siguientes campos de aplicación:

1. Trabajos de ajuste y servicio para

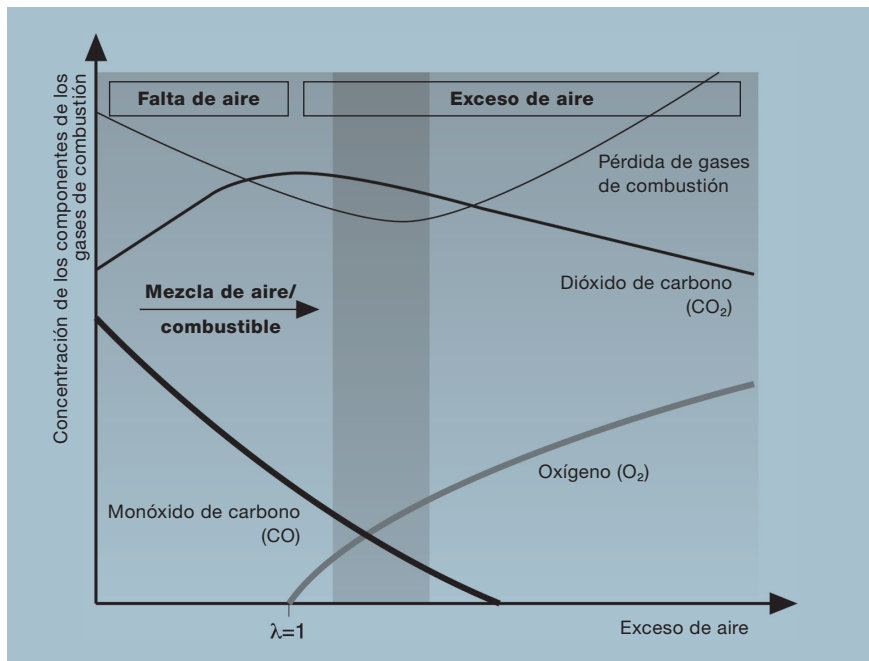


Fig. 7: Diagrama de combustión

- la revisión general, por ejemplo después del mantenimiento de la instalación, para la búsqueda de errores en caso de procesos inestables, en la preparación para mediciones oficiales, después de reparaciones, etc.
2. Mediciones de proceso del combustible, el aire de combustión, quemador y en la cámara de combustión para optimizar la combustión con el fin de ahorrar combustible, mejorar el grado de rendimiento y prolongar la vida útil de la instalación. Estas mediciones también están vinculadas a las mediciones de las emisiones (puntos 4 y 5, a continuación) ya que una combustión optimizada también logra una reducción de los valores de las emisiones.
 3. Mediciones de proceso para supervisar una atmósfera gaseosa definida en la cámara de combustión, en cámaras de combustión especiales o en hornos durante procesos tales como la incineración, tostación, el tratamiento de la superficie, etc.
 4. Mediciones de proceso y emisiones para supervisar el funcionamiento correcto de los equipos de limpieza de los gases de la combustión.
 5. Mediciones de emisiones para supervisar el cumplimiento de los valores límite para sustancias contaminantes en los gases de combustión delante de la chimenea o en la chimenea.

2.1 Análisis de gases para optimizar la combustión

Los factores esenciales para optimizar la combustión son

- la composición del combustible y el aire de combustión (campo de aplicación del análisis de gases),
- el comportamiento de ignición y la temperatura de combustión,
- el diseño del quemador y de la cámara de combustión así como
- la relación combustible / aire de combustión (campo de aplicación del análisis de gases).

La relación óptima entre el combustible y la cantidad de aire de combustión (coeficiente de exceso de aire λ) para una instalación dada y un combustible dado, se puede determinar a partir de los valores medidos del análisis de gases usando el llamado diagrama de combustión (véase figura 7). Los perfiles de concentración de los componentes del gas CO , CO_2 y O_2 se muestran como función del coeficiente de exceso de aire. La línea de combustión ideal con exceso de aire 0 ($\lambda = 1$) está en el centro del diagrama, a su derecha el volumen de exceso de aire aumenta y a su izquierda aumenta el rango de insuficiencia de aire (¡insuficiencia de aire también significa insuficiencia de oxígeno!).

Los perfiles de concentración mostrados proporcionan la siguiente información:

Rango izquierdo con $\lambda < 1$ (insuficiencia de aire)

- En caso de insuficiencia de aire hay CO ya que falta oxígeno para la oxidación completa de CO a CO_2 . ¡Este CO presente en caso de insuficiencia de aire es extremadamente peligroso cuando sale de la instalación debido a su toxicidad!
- A medida que disminuye la insuficiencia de aire, es decir, aumenta la concentración de O_2 y el volumen de CO_2 desciende como consecuencia de la oxidación para formar CO_2 . Este proceso finaliza, si $\lambda = 1$ o un poco más, el CO tiende a ser cero y el CO_2 alcanza su nivel máximo.
- En este rango no hay oxígeno o no es posible medirlo ya que el oxígeno suministrado se consume inmediatamente debido a la oxidación del CO .

Rango derecho con $\lambda > 1$ (exceso de aire)

- En el rango de $\lambda > 1$, el O_2 aumenta, ya que el oxígeno suministrado a medida que aumentaba la insuficiencia de aire ya no se

consume para la oxidación debido a la ausencia de CO. Sin embargo, en la práctica, siempre se requiere una cierta cantidad de exceso de aire para garantizar la combustión completa, ya que la distribución del oxígeno en la cámara de combustión no es uniforme. El tamaño de las partículas del combustible también es significativo: entre más pequeñas sean las partículas, es mayor el contacto con el oxígeno y menor la cantidad de exceso de aire requerido.

- Por el contrario, el CO_2 baja en relación a su valor más elevado a $\lambda=1$, aunque no como resultado de una reacción química, sino como un efecto de dilución debido al incremento de la cantidad de aire de combustión la cual casi no suministra CO_2 .

Conclusión

La combustión perfecta se alcanza si hay un exceso de aire suficiente, y por consiguiente de oxígeno, para quemar completamente el CO (rango de λ = desde 1,0 hasta aprox. 1,3) pero, al mismo tiempo si se limita el exceso de aire de modo que se expulse innecesariamente hacia la atmósfera la menor cantidad de gases de combustión calientes, y por ende de energía calorífica.

El rango óptimo de λ para una

instalación de combustión por lo que respecta a la energía (también depende de los datos específicos de la instalación) se puede determinar midiendo los dos componentes CO_2 y CO (CO_2 por sí solo es ambiguo ya que el perfil de su curva se extiende más allá de su límite máximo) o midiendo solamente el O_2 . Hasta el momento se ha impuesto la medición del O_2 .

Dependiendo de la instalación y de su operador, los puntos de medición o de muestreo de gases pueden estar ubicados en varios puntos de la cámara de combustión.

Las correlaciones mostradas en el diagrama entre el coeficiente de exceso de aire, el exceso de aire y el contenido típico de oxígeno en los gases de combustión secos se indican en cifras en la tabla 8 para la combustión de hulla.

Coeficiente de exceso de aire λ	Exceso de aire en %	Contenido de oxígeno en %
0,9	Falta de aire	Insuficiencia de oxígeno
1,0	0	0
1,1	10 %	2
1,2	20 %	3,5
1,3	30 %	4,8
1,4	40 %	6,2

Tabla 8: Correlación entre el exceso de aire y el contenido de oxígeno en los gases de combustión secos de una combustión de hulla

Significado económico

Además de reducir las emisiones, la optimización de una combustión tiene como finalidad principal la reducción de costes mediante el ahorro de combustible haciendo funcionar una instalación con el menor exceso de aire posible.

Un valor empírico típico y documentado en la literatura predice que si la cantidad de exceso de oxígeno se reduce en un punto porcentual (no en 1 % en términos relativos), por ejemplo, del 4,5 % al 3,5 %, el rendimiento de una instalación de combustión aumenta un 1 % y los costes de combustible también disminuyen respectivamente.

¡Con unos costes mensuales de combustible de 15 millones de dólares para una central eléctrica mediana, el ajuste de 0,2 % puntos para acercarse a la cantidad óptima de exceso de aire para el funcionamiento habitual de la central, gracias a un análisis de gases, significaría un ahorro mensual de 30.000 dólares! Se puede obtener un ahorro similar si se identifican y corrigen rápidamente las desviaciones transitorias del punto de funcionamiento óptimo a través de un análisis de gases.

2.2 Análisis de gases para el control de procesos

2.2.1 Instalación para procesos de combustión

A diferencia de las instalaciones de combustión convencionales (instalaciones de calderas de combustión), una instalación de combustión de proceso se caracteriza por el contacto directo entre la combustión o los gases de la combustión calientes y un producto a tratar térmicamente lo que desencadena una serie de etapas del proceso. La fabricación de clínker de cemento es un ejemplo que servirá para ilustrar otros procesos similares (más detalles en el capítulo 4.3.1):

- La materia prima húmeda se tritura y se seca con gases de combustión calientes.
- La harina bruta expulsada se calienta aproximadamente a 800 °C mediante el gas caliente al desplazarse a contracorriente.
- En el calcinador se expulsa el CO₂ aprox. a 950 °C por medio de un proceso de combustión de varios niveles (se neutraliza el material).
- La harina bruta, en combinación con todos los agregados se incineran (sinterizan) en el horno a unos 1.400 °C.

El análisis de gases permite evaluar dichas etapas del proceso por lo que respecta al exceso de aire, calcular corrientes de aire exterior y equilibrar por separado las distintas partes de la instalación. Por ejemplo, esto es importante para el calcinador (medición de CO_2 y O_2) ya que una calcinación insuficiente puede desencadenar perturbaciones significativas en el funcionamiento del horno.

En procesos de esta clase, es posible que lleguen sustancias a los gases de combustión provenientes del producto procesado, incrementando las emisiones generadas por la instalación de combustión. Sin embargo, en determinados casos, los contaminantes también pueden pasar desde el gas al producto procesado o a sustancias especialmente designadas (escoria). Un ejemplo de esto es la industria cementera o de cal, en las que el azufre combustible se convierte en un componente del producto como óxido de azufre, en el proceso de combustión. A la inversa, durante la fabricación de vidrio o ladrillos, los óxidos de azufre se liberan del producto incrementando considerablemente la concentración en los gases brutos. Hay una analogía con el incremento de las emisiones de

CO durante procesos que se realizan a contracorriente de la materia prima y los gases de combustión (p. ej., los hornos rotativos). En estos hornos, la cantidad de oxígeno en zonas alejadas del centro de la combustión puede ser insuficiente, generando una combustión incompleta con aumento de la concentración de CO. Los metales pesados pueden infiltrarse en el producto que se incinera (cemento, cal) y también ser expulsados por el producto hacia los gases de combustión (industria metalúrgica, fabricación de vidrio).

Las emisiones generadas por el proceso se pueden reducir significativamente a través de medidas relacionadas con el proceso tales como el diseño de la cámara de combustión, la gestión de la llama, la temperatura del producto que se incinera y de la cámara de combustión, el suministro de aire de combustión, etc. El análisis de gases proporciona la información necesaria para ello.

2.2.2 Calderas industriales

Con el término Caldera industrial se hace referencia a las instalaciones de combustión usadas en la industria para producir vapor y agua caliente y/u otros portadores de calor. Aquí también se incluyen las instalaciones de combustión para convertir sustancias en refinerías u hornos de coque, por ejemplo. El rendimiento calorífico de las calderas industriales está en general, en el rango de los megavatios. En el contexto de la reglamentación de emisiones dentro del ámbito de la regulación TA Luft, en pocos casos (potencia > 50 MW o > 100 MW en cámaras de combustión de gas) es válido el reglamento para instalaciones de combustión de grandes dimensiones (13. BImSchV).

Las tareas del análisis de gases están orientadas en este caso a la optimización de la combustión, el control de la limpieza de los gases de combustión y la supervisión del cumplimiento de los valores límite.

2.2.3 Tratamiento superficial termoquímico

Esta es una forma de tratamiento térmico en la cual la composición química de una pieza de trabajo o su superficie se modifica directamente absorbiendo o expulsando determinados elementos de la atmósfera de gases. Esto se utiliza sobre todo para el endurecimiento de acero así como también para hornear vidriados y pinturas en la industria cerámica. Estos procesos utilizan virtualmente solo vidrio como medio de tratamiento (en pocos casos también polvo) y difieren en naturaleza y concentración de los elementos introducidos por absorción (p. ej., nitrógeno en la nitruración, cromo en la cromización) y en las temperaturas de proceso (aprox. 400 - 1.100 °C). Hay diversos modelos de hornos continuos y por lotes.

En todos los casos el análisis de gases requerido para garantizar el funcionamiento óptimo de la instalación (reducción de costes y seguridad) así como para controlar la atmósfera de gases específica del proceso (calidad de producto, incluida la documentación de acuerdo con ISO 9000 s.). Los componentes más importantes a medir son O₂, CO, CO₂

y SO₂. Para obtener más información al respecto consulte el ejemplo de aplicación en el capítulo 4.4.6.

2.2.4 Mediciones de seguridad

En las aplicaciones del análisis de gases en procesos también se incluyen mediciones diseñadas para proteger a las personas y a la instalación. Esto aplica a los gases tóxicos pero, sobre todo, a los inflamables y explosivos, particularmente al monóxido de carbono CO. De este modo, el riesgo de incendios sin llama en los silos de polvo de carbón e instalaciones trituradoras de carbón puede ser identificado controlando el CO y se puede evitar la formación de una mezcla de gas explosiva en los filtros electrostáticos. Asimismo, el control de concentraciones peligrosas de metano u otros gases explosivos, particularmente en instalaciones químicas, puede ayudar a prevenir situaciones peligrosas.

Límites de explosividad

Las mezclas de sustancias inflamables con aire u oxígeno son inflamables en determinadas concentraciones. Hay un límite de inflamación inferior y superior para cada mezcla. Estos valores dependen de la presión y de

la temperatura: indican la parte del componente inflamable para ambos límites a una determinada temperatura

Sustancias inflamables	Fórmula	Límites de ignición en el aire en vol.% para T=20 °C y p=1 bar	
		Inferior	Superior
Amoniaco	NH ₃	15,0	28,0
Monóxido de carbono	CO	12,5	74
Hidrógeno	H ₂	4,0	75,6
Metano	CH ₄	5,0	15,0
Propano	C ₃ H ₈	2,1	9,5
butano	C ₄ H ₁₀	1,5	8,5
Acetileno	C ₂ H ₂	1,5	82,5

Tabla 9: Límites de ignición (zona de explosión) de los gases inflamables

y una determinada presión (generalmente 20 °C y 1 bar) en vol. % o en g/m³. El rango de inflamación o de explosión se ubica entre estos dos límites, véase la tabla 9.

Para analizar los componentes inflamables de las mezclas de gas se utiliza el principio de "oxidación catalítica" (véase el capítulo 3.2.2) aunque aquí se determina la suma de todos componentes inflamables. Por consiguiente, el rango de medición del dispositivo debe basarse en el componente con el límite de explosividad más bajo cuando ejecuta un control del límite de explosividad inferior de una mezcla.

2. Razones para el análisis de gases en la combustión industrial

2.3 Análisis de gases para el control de emisiones

El funcionamiento de las instalaciones industriales de todo tipo (grandes centrales de energía, plantas de acero, fábricas de cemento, fábricas de vidrio, plantas químicas y muchos otros), pasando por instalaciones municipales, hasta llegar a las pequeñas instalaciones de fabricación, está sujeto a regulaciones estrictas en la mayoría de los países, en lo que respecta a las emisiones de gases de combustión hacia la atmósfera. A través de medidas apropiadas debe garantizarse y demostrarse periódicamente que los componentes de los gases de la combustión definidos como contaminantes no superen determinados valores límites. Cada país ha aprobado leyes y reglamentos en este campo, y de gran alcance en algunos casos; en Alemania existe la Ley Federal de Control de Inmisiones (BImSchG), mientras que en los EE.UU. existe la Ley de Limpieza del Aire. Para toda Europa o toda Asia aún no existe una reglamentación estándar. Por consiguiente, muchos países basan sus reglamentaciones nacionales, en las prescripciones de la BImSchG o la Ley de Limpieza del Aire.

El análisis de la combustión juega un papel fundamental en la ejecución y la supervisión de las medidas requeridas para limitar las emisiones.

Emisión

Las contaminaciones del aire, ruidos, vibraciones, calor, etc. que salen de una instalación (fuente).

Inmisión

Las contaminaciones del aire, ruidos, vibraciones, etc. que influyen sobre las personas, animales, instalaciones, suelo, edificios, etc.

2.3.1 Fundamentos legales para la emisión/inmisión en la República Federal de Alemania

Los fundamentos legales para la protección del medio ambiente en Alemania los conforman

- la Ley Federal de Control de Inmisiones (BImSchG) para la protección del medio ambiente en su edición de 2017; en esta se basan
- distintos reglamentos legales (BImSchV) para la ejecución de la ley y, por último,
- la regulación TA Luft como un manual de instrucciones especial para las autoridades con las prescripciones concretas con respecto a la autorización y la supervisión de instalaciones según la 4. BImSchV.

La ley alemana BImSchG está dividida en los siguientes apartados:

1. Prescripciones generales §§ 1 - 3
2. Construcción y funcionamiento de instalaciones §§ 4 – 31
3. Composición de instalaciones, sustancias, productos, combustibles, carburantes y lubricantes; reducción del efecto invernadero en combustibles §§ 32 – 37g
4. Composición y funcionamiento de vehículos, construcción y modificación de carreteras y vías férreas §§ 38 – 43
5. Supervisión y mejora de la calidad del aire, planificación para la limpieza del aire, planes para la reducción de ruido §§ 44 – 47
6. Planificación para la reducción de ruido §§ 47a – 47f
7. Prescripciones conjuntas §§ 48 – 62
8. Prescripciones finales §§ 66 - 73

2. Razones para el análisis de gases en la combustión industrial

Hasta el día de hoy se han sancionado un total de 42 prescripciones legales. La tabla 10 muestra una selección de estas prescripciones resaltando las cinco prescripciones más relevantes para las instalaciones de combustión. La figura 8 muestra la asignación de determinadas prescripciones con

respecto a los tipos de instalaciones (combustible utilizado y rendimiento de la instalación).

1. BImSchV	Instalaciones de combustión pequeñas
3. BImSchV	Contenido de azufre del gasóleo ligero
4. BImSchV	Instalaciones que requieren autorización
9. BImSchV	Fundamentos del procedimiento de autorización
11. BImSchV	Declaración de emisiones
13. BImSchV	Instalaciones de combustión de grandes dimensiones
17. BImSchV	Instalaciones de combustión para desechos
27. BImSchV	Instalaciones para cremación

Tabla 10: Reglamentos legales referentes a la ley alemana sobre inmisiones (selección)

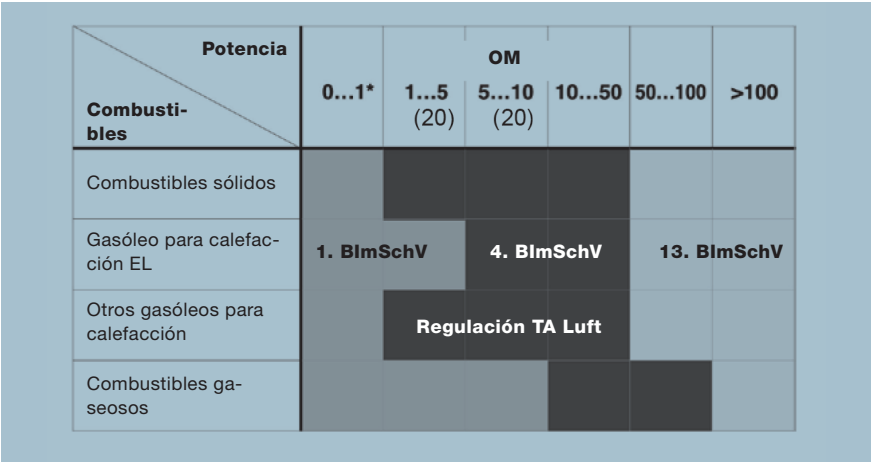


Fig. 8: Asignación de los tipos de instalación y reglamentos

Valor de emisión y valor límite de las emisiones

- Los valores de emisión son estándares por debajo de la tolerancia de los valores límite de las emisiones; estos están establecidos para el rango de la limpieza del aire en la regulación TA Luft. En este sentido "el exceso de estos valores debe evitarse de acuerdo al estado actual de la técnica".
- Los valores límite de las emisiones son estándares para las emisiones con carácter de normas legales y son obligatoriamente vinculantes para los afectados. Estos valores están definidos en la 1. BImSchV, 4. BImSchV/regulación TA Luft así como la 13., 17. y 27. BImSchV

2.3.2 Prescripciones de la BImSchG para Alemania (selección)

Reglamento sobre las instalaciones de combustión pequeñas (1. BImSchV)

Este reglamento es válido para todas las instalaciones de combustión hasta una potencia de hasta 1, 5 o 10 MW que no requieren una autorización (según el combustible, véase figura 8). El deshollinador es el encargado oficial para la supervisión

de estas instalaciones. Aquí es necesario determinar anualmente si los requerimientos exigidos a las instalaciones de calefacción se cumplen con respecto a la limitación de las emisiones.

En instalaciones para combustibles sólidos se determinan emisiones en forma de polvo y, en ciertos casos, también monóxido de carbono (CO). En instalaciones de combustión de gas y fuel oil se determina la pérdida de gases de combustión como un parámetros a partir de la medición del contenido de oxígeno o de dióxido de carbono así como de la diferencia entre la temperatura de los gases de combustión y la temperatura ambiente (la temperatura del aire de combustión equivale aproximadamente a la temperatura del aire interior). En las instalaciones de combustión de fuel oil también se calcula la opacidad.

Nota:

Más detalles sobre este tema y especialmente sobre el uso de la tecnología de medición de Testo en este sector se encuentran en la guía Testo "Tecnología de medición para calefacción".

Reglamento sobre las instalaciones que requieren autorización (4. BImSchV)

Este reglamento contiene una lista de aprox. 150 clases de instalaciones con rendimientos caloríficos nominales en el rango inferior de megavatios, las cuales requieren una autorización. Las clases de instalaciones se resumen en grupos, véase la tabla 11. La prescripción para la ejecución de la 4. BImSchV es el llamado "Manual técnico para la limpieza del aire", conocido como regulación TA Luft, véase el apartado siguiente.

Grupo	Industrias primarias
1	Generación de calor, minería, energía
2	Piedras y minerales, vidrio, cerámica, materiales de construcción
3	Acero, hierro y otros metales incluyendo el procesamiento
4	Productos químicos, medicamentos, refinería mineral y procesamiento posterior
5	Entre otros el procesamiento de plásticos
6	Madera, celulosa
7	Alimentos, estimulantes y piensos, productos agrícolas
8	Reciclaje y eliminación de desechos y otros materiales
9	Almacenamiento, carga y descarga de materiales y mezclas
10	Otras instalaciones

Tabla 11: Clasificación de grupos de las clases de instalaciones en la 4. BImSchV

La regulación TA Luft (manual técnico para la limpieza del aire)

La regulación TA Luft es una prescripción administrativa adicional a la BImSchG. Esta contiene prescripciones que deben tenerse en cuenta desde la solicitud de construcción de una instalación hasta la supervisión durante el funcionamiento. El área de aplicación se extiende solamente a las instalaciones que requieren autorización mencionadas en la 4. BImSchV.

- La regulación TA Luft se divide en cuatro partes:
- Parte 1: Reglamentaciones sobre el área de aplicación
 - Parte 2: Prescripciones generales para la limpieza del aire
 - Parte 3: Requisitos para la limitación y la determinación de las emisiones
 - Parte 4: Saneamiento de instalaciones antiguas

La parte 3 de la regulación TA Luft es especialmente relevante para la tecnología de análisis de gases ya que contiene las prescripciones fundamentales para la limitación de emisiones en instalaciones que requieren autorización.

En el apartado 2.1 se mencionan los reglamentos generales con una clasificación en cuatro clases de las sustancias según su efecto nocivo: el valor límite de las sustancias más peligrosas (clase I, p. ej. arsano o fosgeno) es de 1 mg/m^3 , mientras que el valor límite para los óxidos de azufre y nitrógeno (clase IV) es de 500 mg/m^3 . Estas prescripciones tienen una validez general. Sin embargo, en casos concretos detallados en el apartado 2.3, se sustituyen por requisitos especiales acentuados.

El apartado 2.2 trata del procedimiento de medición y supervisión de emisiones y define, entre otras cosas, que

- al autorizar las instalaciones se deben definir puntos adecuados para la extracción de muestras y lugares que permitan una medición de las emisiones representativa y correcta en términos de la tecnología de medición;
- mediante las primeras mediciones individuales y periódicas se definan las emisiones de las sustancias que contaminan el aire para las cuales se han establecido límites en la resolución de autorización;
- en caso de un caudal másico especialmente alto de las sustancias con limitación de emisiones, éstas se deban supervisar mediante

mediciones continuas y

- se debe efectuar un cálculo frecuente de los valores individuales para las sustancias muy peligrosas cuya medición continua es preferible, pero que técnicamente sería muy engorrosa.

Mediciones individuales según la regulación TA Luft (medición según § 26, 28 BImSchG)

Antes de efectuar la medición individual se realiza una primera medición por parte de uno de los centros técnicos autorizados tras una reinstalación o una modificación fundamental de la instalación. Esta primera medición puede considerarse como una aprobación de la instalación y se efectúa dentro de 3 - 12 meses tras la puesta en marcha. Después, la medición individual se realiza cada 3 años. Aquí se calculan las concentraciones de los gases tóxicos con la obligatoriedad de obtener un valor medio durante una medición de media hora y se revisan el cumplimiento de los valores límite. En instalaciones con las mismas condiciones de funcionamiento se deben ejecutar como mínimo 3 mediciones, de lo contrario 6 mediciones. Antes de la medición, el operador de la instalación debe ajustar el funcionamiento óptimo de la combustión.

Medición continua según la regulación TA Luft

Durante el funcionamiento diario de la instalación se genera cada media hora el "valor medio de media hora" a partir de los datos de medición calculados. Basándose en estos valores se generan los "valores medios diarios", se almacenan y se valoran de forma estadística teniendo en cuenta que los valores límites definidos para la instalación no deben excederse.

- Las mediciones individuales oficiales según la regulación TA Luft solo pueden ejecutarse con instrumentos de medición que hayan aprobado la prueba de aptitud según la regulación TA Luft.
- Para las mediciones continuas solo se deben utilizar mecanismos de medición estacionarios luego de superar la prueba de aptitud según la regulación TA Luft.
- Los analizadores de Testo son aptos para las mediciones individuales como para las mediciones continuas.

Por último, el apartado 2.3 contiene reglamentos especiales para determinados tipos de instalaciones, considerando que varios sectores de la industria pueden verse afectados, véase la tabla 12.

Capítulo en la regulación TA Luft	Tipo de instalación tratada
3.3.1	Generación de calor, minería y energía
3.3.2	Piedras y minerales, vidrio, cerámica, materiales de construcción
3.3.3	Acero, hierro y otros metales
3.3.4	Productos químicos, medicamentos, refinerías
3.3.5	Tratamiento superficial con materiales orgánicos, producción de láminas, procesamiento de plásticos
3.3.6	Madera, celulosa
3.3.7	Alimentos, estimulantes y piensos, productos agrícolas
3.3.8	Incineración de desechos (regulada actualmente por la 17. BImSchV), plantas de compostaje
3.3.9	Almacenamiento, carga y descarga de materiales
3.3.10	Otros
Caso especial	Las centrales eléctricas, plantas de cogeneración y centrales térmicas >50 MW (con combustión de gas > 100 MW) no están reglamentadas en la regulación TA Luft, sino en la 13. BImSchV

Tabla 12: Clasificación de la regulación TA Luft (apartado 3.3) según los tipos de instalaciones

Nota:
Los valores límite válidos para determinados tipos de instalaciones se indican en el capítulo 4 de esta guía en los ejemplos de aplicación respectivos.

Reglamento sobre las instalaciones de combustión de grandes dimensiones (13. BImSchV)

Aquí se ven afectadas las instalaciones de combustión con un rendimiento calorífico de > 50 MW utilizando combustibles sólidos y líquidos y de > 100 MW utilizando combustibles gaseosos. Estas instalaciones no se consideran en la 4. BImSchV o la regulación TA Luft.

Los límites de emisiones se definen en función del rendimiento calorífico y el tipo de instalación para el polvo, los materiales que contienen polvo, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono y los compuestos gaseosos de cloro y flúor. Algunos de estos valores están sujetos al principio de la dinamización lo que significa que los valores se pueden reducir tan pronto lo permita el avance de la tecnología.

Sustancia nociva	Valor límite para las sustancias nocivas en mg/m³ según la 13. BImSchV			
	Combustible			
	Sólido	Combustible orgánico	Líquido	Gaseoso
Polvo	10	10	10	5 - 10
CO	150 - 200	150 - 250	80	50 - 250
NO, NO ₂	150 - 400	150 - 250	100 - 250	50 - 200
SO ₂ , SO ₃	150 - 400	150 - 200	150 - 350	5 - 350
Mercurio	0,03	0,03	-	-

Tabla 13: Valores límite para las sustancias nocivas según la 13. BImSchV (extracto)

Reglamento sobre las instalaciones de incineración de desechos (17. BImSchV)

Las instalaciones de incineración de desechos se usan para el tratamiento térmico de basuras sólidas, líquidas o pastosas (desechos domésticos y hospitalarios, aguas residuales, neumáticos viejos y pinturas, lacas así como disolventes) con la finalidad

de reducir la cantidad y el potencial tóxico de los desechos. Los gases de combustión que surgen de esta combustión están sujetos al reglamento especial vigente para la combustión de desechos con respecto a los valores límites permitidos para las sustancias nocivas (17. BImSchV); la tabla 14 muestra una selección de los valores allí definidos.

	Valores límite para las sustancias nocivas en mg/m³ según la 17. BImSchV	
Sustancia nociva	Valor promedio diario máx.	Valor promedio cada media hora máx.
Total de polvo	5	20
Total de carbono	10	20
Cloruro de hidrógeno	10	60
Fluoruro de hidrógeno	1	4
SO ₂ y SO ₃	50	200
NO, NO ₂	150	400
Mercurio	0,03	0,05
Monóxido de carbono CO	50	100
NH ₃	10	15

Tabla 14: Valores límite para las sustancias nocivas según la 17. BImSchV (selección)

Reglamento sobre instalaciones para cremación (27. BlmSchV)

Aquí se definen las medidas que deben tomarse con respecto a la supervisión de emisiones para la cremación. (véase también el capítulo 4.6.1)

Analizadores para la supervisión de emisiones según BlmSchG

Los métodos de análisis utilizados de acuerdo a la BlmSchG para la supervisión de emisiones se ejecutan según los mismos principios físicos y químicos utilizados en otros sectores del análisis de gases. Sin embargo, los requisitos hacia los dispositivos se especifican de forma especial con la obligación de comprobar el cumplimiento de las especificaciones con una prueba de aptitud.

La cantidad de los componentes presentes en los gases de combustión requiere una selectividad suficiente de los métodos o dispositivos así como sensibilidades a las interferencias bajas y cuantitativamente conocidas. Los métodos de medición tienen que ser fiables, reproducibles y tener la capacidad de calibración. Además se exige tener una disponibilidad alta y estar exentos de mantenimiento en su mayor parte.

Las tareas de medición exigen requerimientos especiales a la toma de muestras debido a las altas temperaturas de los gases de combustión, los altos contenidos de humedad y polvo así como los componentes agresivos de los gases de combustión. Además, para la toma de muestras se debe tener en cuenta que la extracción es representativa para la instalación. Por este motivo es necesario ejecutar mediciones de red o proporcionar puntos de medición individuales distribuidos en instalaciones con una gran variedad temporal y/o local de las sustancias nocivas.

Prueba de aptitud para los instrumentos de medición

Para la supervisión de la limpieza del aire según las prescripciones de la BlmSchG solo se deben utilizar instrumentos de medición que hayan demostrado la aptitud para esta finalidad de uso mediante la aprobación de un examen definido.

Con este principio se debe garantizar una calidad suficiente, la posibilidad de comparar las mediciones así como un procedimiento único para la supervisión de las instalaciones. La ejecución de la prueba de aptitud

se lleva a cabo según las directivas indicadas (requerimientos mínimos) y su cumplimiento se ratifica mediante exámenes de laboratorio y una prueba de campo a través de los pocos institutos de pruebas autorizados específicamente. El respectivo certificado o la publicación de los resultados a través del ministerio responsable, en el denominado diario ministerial, demuestran que la prueba de aptitud ha sido ejecutada con éxito.

El analizador testo 350 ha pasado la prueba de aptitud para O₂, CO, NO, NO₂ y SO₂ para las tareas de medición definidas en el marco de la 13. y 17. BImSchV así como la regulación TA Luft.

2.3.3 Supervisión de las emisiones en EE.UU.

1. La base para la supervisión de las emisiones en EE.UU. es la Clean Air Act (Ley de Limpieza del Aire) o los suplementos a la misma (Clean Air Act Amendments (Enmiendas a la Ley de Limpieza del Aire), CAAA) publicadas en 1991. La CAAA es una ley federal. Aplicando esta ley, la EPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente) aprobó una reglamentación marco para reducir y controlar las emisiones. En particular, esto marcó la transición desde la supervisión de fuentes de emisiones extremadamente grandes al control de pequeñas fuentes (títulos 5 y 7, véase a continuación).

2. La CAAA divide las fuentes de emisiones en 7 secciones (títulos) de acuerdo a su tamaño, de las que tres son especialmente importantes para el uso de los dispositivos de Testo:

Título 4: Centrales eléctricas (Power Plants)

Título 5: Fuentes industriales (Industrial Sources)

Título 7: Fuentes pequeñas (Smaller Sources)

Una fuente de emisión se evalúa según diversos criterios, p. ej., según el rendimiento calorífico o basándose en su potencial para calcular cantidades determinadas de contaminantes específicos, p. ej., 100 t NO_x/año. Otras clasificaciones se ocupan de los valores límite permitidos para determinados tipos de instalaciones (partes) y las normas / directivas para los instrumentos de medición (métodos).

3. La transición hacia instalaciones más pequeñas también tiene consecuencias para la tecnología de medición. Los sistemas de medición continua en las instalaciones (CEMs - control de emisiones continuo) han sido y siguen siendo predeterminados para controlar grandes fuentes de emisión; esto implica una inversión de varios cientos de miles de dólares con costes de mantenimiento anual de 30.000 dólares o más. Estos costes no pueden ser acarreados por las fuentes de emisión más pequeñas, por lo que la EPA ha abierto el camino para otros equipos de medición más pequeños (véase el punto 7).

4. En EE.UU., hay un reparto de la responsabilidad entre las autoridades federales y las autoridades de cada estado. El título 4 está generalmente bajo la responsabilidad del gobierno federal, el título 7 bajo la responsabilidad de los estados; con el título 5 se concede la responsabilidad a los estados solo si demuestran poseer las actividades apropiadas para la ejecución. Para ejercer su responsabilidad, hay autoridades (Departamentos de Calidad Ambiental, DEQ) en cada estado facultados para introducir la norma establecida por la EPA o imponer una reglamentación más estricta. La DEQ en California (llamada South Coast Air Quality Management District, SCAQMD) emplea a 2.400 personas y ha introducido varios reglamentos y métodos de medición específicos, tales como permitir el uso de dispositivos móviles para medir los NO_x.

5. Se ha definido un procedimiento especial para las fuentes de emisión menores de acuerdo con el título

7. Las autoridades de cada estado deben evaluar aprox. 34.000 instalaciones afectadas basándose en la reglamentación relativamente amplia (control de aseguramiento del cumplimiento, CAM) según sus propios criterios con respecto a las medidas necesarias. ¡Los métodos de medición no están especificados ni expresamente prohibidos! Esto ha abierto un campo para nuevos procesos y dispositivos.
6. La EPA no inspecciona ni certifica equipos, pero sí define métodos de prueba que describen el uso de una determinada tecnología de los dispositivos para ciertas tareas de medición. Un ejemplo de ello es el método para medir determinados componentes del gas con sensores electroquímicos: Generalmente, aquí se permite el uso de O_2 , la SCAQMD ya ha otorgado la autorización para NO_x , para SO_2 no se ha excluido el uso y aún está pendiente la decisión para CO.
7. El testo 350 cumple con los métodos de prueba 1 (para el flujo de gas), 3 (para CO_2 y O_2), 6c (para SO_2) y 7e en combinación con el llamado método de prueba condicional - Conditional Test Method 022 (para NO_x).

2.3.4 Procedimiento para la limpieza de los gases de combustión

La emisión de los contaminantes del aire contenidos en los gases de combustión pueden reducirse considerablemente mediante medidas o piezas de la instalación adecuadas.

- La emisión de partículas se reduce o incluso se evita mediante un aspirador de polvo.
- La emisión de gases nocivos puede limitarse, por un lado, gracias al uso de combustibles libres de contaminantes. Sin embargo, la reducción decisiva se logra gracias a la optimización de la combustión y la limpieza de los gases de combustión generados a través de reacciones de absorción o adsorción o mediante una combustión posterior. ¡El análisis de gases para la supervisión y la optimización de las medidas juegan un papel muy importante en ese método!

Método de extracción de polvo

Las instalaciones para la extracción de polvo de los flujos de gas (aspirador de polvo) trabajan de acuerdo a principios diferentes:

- **Extracción mediante la fuerza centrífuga o de gravedad**

Aquí se conducen las partículas a zonas ubicadas por fuera del flujo de los gases de combustión mediante la fuerza de gravedad o la fuerza centrífuga. Aquí se conocen los aspiradores de fuerza centrífuga, llamados ciclón, en los cuales las partículas se arremolinan gracias a una abertura para la entrada de gas especialmente diseñada que transporta las partículas a una cámara de extracción. Desde allí son trasladadas a un colector de polvo.

- **Extracción mediante fuerzas eléctricas en filtros electrostáticos**

Los filtros electrostáticos usan el efecto de la fuerza sobre las partículas cargadas en un campo eléctrico para la extracción de polvo. Primero, las partículas de polvo se cargan mediante la acumulación de iones negativos y luego, debido a esta carga, se conducen a un electrodo recolector en el campo eléctrico. Allí se acumula una capa de polvo; mediante golpes sobre

los electrodos esta capa se desprende (limpieza) y el polvo se transporta a una recámara. Los filtros electrostáticos se emplean principalmente para limpiar grandes volúmenes de gas en centrales eléctricas, empresas metalúrgicas y siderúrgicas o fábricas de cemento.

En los filtros electrostáticos existe el peligro de una explosión debido a la formación de una mezcla explosiva de gases dentro del campo eléctrico. Por eso se recomienda controlar el transcurso de la concentración de CO antes del filtro para brindar una protección eficiente.

- **Extracción mediante fuerzas adhesivas en filtros de tela, por ejemplo**

Aquí, la extracción de las partículas se lleva a cabo en el interior o en la superficie de ciertos medios de filtro transportados en el flujo del gas (membranas, tejidos, granos). Los filtros de manguera o de bolsa son los filtros elaborados de fibra más comunes. Entre los filtros de profundidad se encuentran los filtros de relleno. Aquí, la extracción se lleva a cabo en la superficie mediante granos que fluyen como una capa a través del gas.

2. Razones para el análisis de gases en la combustión industrial

- **Extracción mediante la formación de gotas en adhesivas en filtros de tela, por ejemplo en torres de lavado**

Aquí se unen las partículas a un líquido de lavado incluido en la corriente de gas que luego se extrae junto a las partículas. La desventaja de este método es que se genera un líquido de lavado contaminado.

Método de desnitrificación

Para la desnitrificación de los gases de combustión (para ser más exactos: para retirar los óxidos nítricos NO y NO₂) se usan medidas primarias y/o secundarias de forma alternativa.

- Las medidas primarias son métodos de suministro de aire por etapas, la combustión de lecho fluido así como quemadores especiales. En todos los casos se reduce notablemente la formación de óxidos nítricos durante la combustión.
- En las medidas secundarias (estas intervienen en los gases de combustión luego de salir de la cámara de combustión) se ha impuesto ampliamente el método SCR (Selective Catalytic Reduction). Aquí se enriquecen los gases de combustión con una mezcla de amoníaco (NH₃) y aire en la cual los óxidos nítricos se convierten en

nitrógeno y agua en una reacción química. En lenguaje técnico, estas instalaciones también se conocen con la abreviación DENOX.

Combustión de lecho fluido

En la combustión de lecho fluido se introduce el combustible de grano fino por encima de un suelo provisto de toberas. El aire de combustión fluye a través de las toberas desde abajo de modo que las partículas de combustible formen un lecho fluido. Las partículas no incineradas o incineradas parcialmente se vuelven a introducir en la cámara de combustión mediante medidas adecuadas desde el flujo de los gases de combustión; se forma un lecho fluido circulante. El método de lecho fluido ofrece ventajas considerables: El contacto de las partículas de combustible con el oxígeno del aire de combustión es bastante intenso y la combustión casi completa. La temperatura de combustión es de 900 °C de modo que no surgen óxidos nítricos térmicos; al mezclar cal en el combustible se puede llevar a cabo una desulfuración incluso durante la combustión.

Suministro de aire por etapas

El suministro de aire por etapas

también es una medida primaria efectiva ya que evita la formación del NO del combustible y del NO térmico. Aquí se reduce el suministro de aire directamente en el quemador (aire primario), el coeficiente de exceso de aire es de <1 , la formación de CO aumenta, el contenido de NO_x sigue siendo bajo y se reduce aún más gracias a la formación de moléculas estables de N_2 . Por encima del quemador se suministra nuevamente aire de combustión (aire de incineración) en otra etapa que se encarga de otra combustión. De este modo se reduce el CO considerablemente, pero no se forma NO debido a que el nitrógeno está presente como moléculas estables de N_2 .

Quemadores de **NO_x reducido**

Estos quemadores trabajan de forma similar al suministro de aire por etapas en la cámara de combustión con un suministro de aire distribuido en varios puntos dentro del quemador así como con una alimentación de retorno interna del aire. De este modo se logra una combustión completa con una formación reducida de óxidos de nitrógeno.

Método de desulfuración

El lavado en húmedo con cal/caliza (método secundario) se ha impuesto ampliamente entre los diferentes métodos para la desulfuración de los gases de combustión. En una torre de lavado se rocían los gases de combustión con una solución de lavado (caliza finamente molida en agua) la cual une el dióxido de azufre (SO_2) mediante una reacción química. En primera instancia, el SO_2 gaseoso se conduce a una solución antes de aglutinarse en forma de dihidrato de sulfato de calcio (yeso). La gran cantidad de yeso producida puede reutilizarse parcialmente como material de construcción. En lenguaje técnico se usa la abreviación FGD (planta de desulfuración de los gases de combustión) para esta clase de instalaciones.

Postcombustión térmica

Para obtener más información al respecto consulte el ejemplo de aplicación 4.2.3.

3. Tecnología del análisis de gases

3.1 Términos sobre la tecnología de análisis (selección)

3.1.1 Información sobre la concentración

El término "concentración" se refiere a la proporción de una sustancia en una mezcla sólida, gaseosa o líquida, p.ej. alcohol en la cerveza u oxígeno en el aire. Para brindar información sobre la concentración se utilizan distintas magnitudes como

- Concentración másica (referencia a la masa de un material) con la dimensión [g de material/m³ volumen del gas]
- Concentración volumétrica (referencia al volumen de un material) con la dimensión [cm³ de material/m³ volumen del gas]
- Concentración de partículas (referencia a las partículas de un material) con la dimensión [número de partículas de material/cantidad total de las partículas]

En la tecnología de emisiones e inmisiones se utilizan por separado las unidades de concentración másica y la concentración de partículas. La unidad utilizada para la masa es el

gramo o sus subdivisiones, para la concentración de partículas se usa comúnmente el término ppm (part per million, una partícula por un millón de partículas). Según la concentración se utilizan las subdivisiones de estas unidades, véase las tablas 15 y 16.

Es decir, la cantidad de sustancias nocivas se indica

- en g (mg o fg, etc.) con referencia a un determinado volumen de gas, generalmente con respecto a un metro cúbico (m³), p. ej. 200 mg/m³
- o en ppm sin referencia alguna, p. ej. 140 ppm

Denominación	Escritura	
Gramo	g	
Miligramo	mg	10 ⁻³ g
Microgramo	µg	10 ⁻⁶ g
Nanogramo	ng	10 ⁻⁹ g
Picogramo	pg	10 ⁻¹² g
Femtogramo	fg	10 ⁻¹⁵ g

Tabla 15: Unidad de la masa g con subdivisiones

Denominación	Escritura	
Parts per billion	0,001 ppm	0,0000001 %
Parts per million	1 ppm	0,0001 %
	10 ppm	0,001 %
	100 ppm	0,01 %
	1000 ppm	0,1 %
	10000 ppm	1 %

Tabla 16: Concentraciones de partículas ppm y % con subdivisiones

Nota

Debido a la dependencia general de un volumen de gas con respecto a su temperatura y su presión, también es necesario durante el uso de la concentración másica para la claridad de un valor medido

- la información de los valores actuales presentes en la medición para la presión y la temperatura del gas o
- la conversión de valor medido actual a las llamadas condiciones normalizadas, véase el capítulo siguiente. Tras realizar una conversión como esta se lleva a cabo la indicación del volumen en metros cúbicos normalizados (denominación Nm³ o m³N).

Condiciones normalizadas; volumen normalizado de un gas (VN)

El volumen de un gas depende de su temperatura y la presión a la que está sometido.

Con el fin de ejecutar comparaciones se ha definido un volumen normalizado: un gas obtiene su volumen normalizado, si la temperatura y la presión tienen el valor definido de 273 K como condición normalizada (correspondiente a 0 °C) y 1013 mbar (hPa).

Conversiones de datos de concentración

Conversión de un valor medido a las condiciones normalizadas

La conversión de un valor medido actual (estado 1) a las condiciones normalizadas (estado 2) se ejecuta con la fórmula

$$C_2 = C_1 \times \frac{T_1 \times P_2}{T_2 \times P_1}$$

en donde los parámetros en la fórmula tienen el siguiente significado:

Estado 1: Estado de medición	T ₁ : Temperatura del gas durante la medición (273 K + temperatura actual en °C) P ₁ : Presión del gas durante la medición en hPa C ₁ : Concentración medida
Estado 2: Estado normalizado	T ₂ : Temperatura normalizada (=273 K) P ₂ : Presión normalizada (=1013 hPa) C ₂ : Concentración convertida a las condiciones normales

Ejemplo:

200 mg/m³ a 35 °C y 920 hPa dan como resultado luego de la conversión 248,4 mg/Nm³ en condiciones normalizadas

3. Tecnología del análisis de gases

Conversión de ppm a una concentración másica [mg/Nm³]

ppm (abreviación para parts per million) es una unidad de concentración de uso frecuente con la forma de una relación de mezcla; la unidad común de concentración másica está enfrente de esta.

Una información en [ppm] puede convertirse en la concentración másica respectiva en [mg/Nm³] usando la densidad normal del gas en cuestión como factor según las siguientes fórmulas. En este sentido se debe considerar la "dilución" de los gases de combustión a través del aire (a partir del exceso de aire así como de una provisión de aire adicional o posibles fugas

de la instalación). Por esta razón, los valores medidos tienen que convertirse por norma general a una determinada proporción de oxígeno (denominada referencia de O₂). ¡Solo pueden compararse directamente los datos el valor de referencia del oxígeno! De este modo, además de las sustancias contaminantes, en las prescripciones oficiales también se indican adicionalmente los valores de referencia del oxígeno. Asimismo se requiere la proporción de oxígeno medida realmente para la conversión (O₂ en el denominador de la fórmula) ya que esta es una medida para la dilución real.

Las fórmulas de conversión para los gases CO, NO_x y SO₂ son las siguientes:

$$\text{CO (mg/m}^3\text{)} = \left[\frac{21 - \text{O}_2 - \text{Referencia}}{(21 - \text{O}_2)} \right] \times \text{CO (ppm)} \times 1,25$$

$$\text{SO}_2 \text{ (mg/m}^3\text{)} = \left[\frac{21 - \text{O}_2 - \text{Referencia}}{(21 - \text{O}_2)} \right] \times \text{SO}_2 \text{ (ppm)} \times 2,86$$

$$\text{NO}_x \text{ (mg/m}^3\text{)} = \left[\frac{21 - \text{O}_2 - \text{Referencia}}{(21 - \text{O}_2)} \right] \times (\text{NO (ppm)} + \text{NO}_2 \text{ (ppm)}) \times 2,05$$

Nota

El factor del número utilizado en las fórmulas (1,25 etc.) corresponde a la densidad normal del respectivo gas en mg/m^3 . Se debe tener en cuenta que:

- para SO_2 se indican en la documentación valores de la densidad normal en el rango entre 2,86 y 2,93 kg/m^3 (diferencia entre el comportamiento del gas ideal y real del SO_2)
- para NOX con 2,05 se usa la densidad normal de NO_2 ya que solo está combinación es estable (luego de generarse, el NO se une rápidamente con el oxígeno formando NO_2)
- para H_2S se debe utilizar el factor 1,52 en caso de una fórmula sin modificaciones

Si se debe ejecutar la conversión sin relación al contenido de oxígeno, la fórmula se simplifica quitando la expresión entre paréntesis para CO y se ve así

$$\text{CO en } [\text{mg}/\text{m}^3] = \text{CO en } [\text{ppm}] \times 1,25$$

Para los demás gases se aplica respectivamente.

3. Tecnología del análisis de gases

Conversión de ppm a unidades con relación a la energía

Para representar la concentración de sustancias tóxicas en las dos unidades relacionadas a la energía g/GJ o mg/kWh (1 kWh = 3,6 MJ) se requieren conversiones con factores específicos

del combustible (FBr), consulte las siguientes fórmulas y la tabla 17 para el factor FBr.

La conversión de ppm a g/GJ se ejecuta según las siguientes fórmulas:

$$\text{CO (mg/kWh)} = \frac{21}{21 - \text{O}_2 \text{ medido}} \times \text{CO (ppm)} \times \text{FBr} \times 1,25$$

$$\text{NO}_x \text{ (mg/kWh)} = \frac{21}{21 - \text{O}_2 \text{ medido}} \times \text{NO}_x \text{ (ppm)} \times \text{FBr} \times 2,05$$

$$\text{SO}_2 \text{ (mg/kWh)} = \frac{21}{21 - \text{O}_2 \text{ medido}} \times \text{SO}_2 \text{ (ppm)} \times \text{FBr} \times 2,86$$

Gasóleo para calefacción EL	0,2434
Gasóleo para calefacción S	0,2460
Gas natural	0,2525
Gas licuado	0,2332
Gas de coque	0,2220

Gas ciudad	0,2238
Briqueta	0,2685
Lignito	0,2661
Hulla	0,2643
Coque, madera	0,2633

Tabla 17: Factor FBr para diversos combustibles

Para la conversión de ppm a mg/kWh se debe considerar adicionalmente el factor válido 3,6 en caso de fórmulas sin modificaciones:

$$\text{CO (mg/kWh)} = \frac{21}{21 - \text{O}_2 \text{ medido}} \times \text{CO (ppm)} \times \text{FBr} \times 3,6 \times 1,25$$

$$\text{NO}_x \text{ (mg/kWh)} = \frac{21}{21 - \text{O}_2 \text{ medido}} \times \text{NO}_x \text{ (ppm)} \times \text{FBr} \times 3,6 \times 2,05$$

$$\text{SO}_2 \text{ (mg/kWh)} = \frac{21}{21 - \text{O}_2 \text{ medido}} \times \text{SO}_2 \text{ (ppm)} \times \text{FBr} \times 3,6 \times 2,86$$

3. Tecnología del análisis de gases

3.1.2 Toma de muestras, preparación del gas

Toma de muestras por extracción

En la mayoría de métodos del análisis de gas se extrae el gas a medir del gas de proceso, en lo posible, como una cantidad representativa (por eso el nombre de métodos por extracción, por otra parte se encuentran los métodos in situ), se condiciona y se introduce al analizador. Condicionar, también conocido como preparación de muestras, significa la limpieza del gas mediante un filtro y especialmente la refrigeración y, por consiguiente, el

secado del gas a un valor definido y constante. Las ventajas del concepto de medición son

- la separación entre la sensible tecnología de analizadores y las condiciones arduas en el flujo de proceso,
- la posibilidad de llevar al gas de muestra a un estado practicable y constante (y de este modo comparable) gracias al acondicionamiento
- y además la posibilidad de manejar varios analizadores en una toma de muestras o un analizador (a través de un conmutador) en varios lugares de extracción.

Extracción y preparación del gas

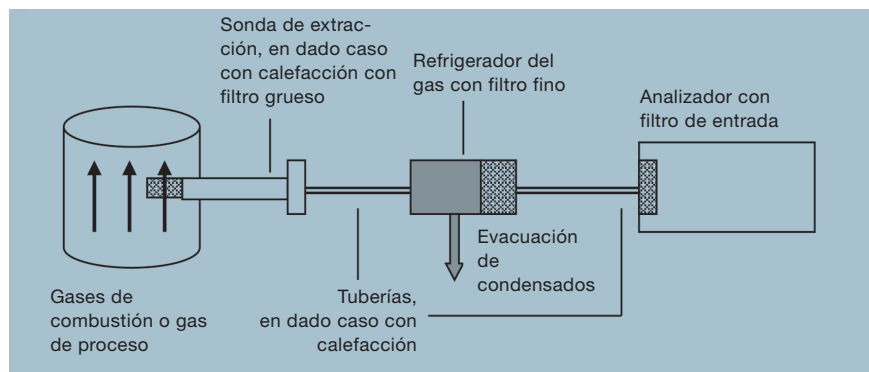


Fig. 9: Extracción y preparación de la muestra (esquema)

Los dispositivos para la extracción y la preparación de gases son unidades separadas o se agrupan en una o dos unidades compactas. En resumen, las funciones son las siguientes:

- La extracción de gases se lleva a cabo mediante una sonda de muestreo de gases con o sin calefacción de varios materiales y para varios rangos de temperatura (hasta más de 1200 °C). En el cabezal de la sonda hay un filtro grueso de cerámica y en algunas sondas (p. ej. la sonda multifuncional de Testo) adicionalmente sensores para la medición de presión y temperatura.

- El refrigerador del gas a medir se encuentra entre la sonda y el analizador.

Los gases de humos y de proceso tienen principalmente cierta proporción de agua presente en temperaturas altas (sobre el punto de rocío) en forma de vapor de agua y en temperaturas bajas (por debajo del punto de rocío) como gotas de agua. En ambos casos se distorsiona el resultado de medición por reacciones químicas de los demás componentes del gas a medir con el agua. Además, debido a la reacción de, por ejemplo, SO₂ con agua surgen soluciones agresivas que pueden perjudicar o destruir

el dispositivo de medición. Los refrigeradores del gas a medir se utilizan para eliminar el vapor de agua (humedad) presente en el gas a medir a través de la refrigeración a un valor fijo, por ejemplo de 4 °C y para mantener constante y de modo comparable la humedad restante mediante una temperatura constante. Generalmente, el condensado obtenido se elimina a través de bombas de manguera y de membrana.

- Los conductos o las mangueras del gas a medir no tienen calefacción (para los gases no críticos y temperaturas externas muy altas) o sí tienen calefacción para mantener el gas por encima del punto de rocío y de este modo impedir la generación de condensado.
- Según el fabricante, el analizador tiene otro filtro de gas y en algunos casos incluso un separador de condensados o una calefacción interna.

3. Tecnología del análisis de gases

El contenido de humedad del gas es un parámetro bastante crítico en dos aspectos:

- Como vapor diluye los gases de combustión y en las divergencias de humedad también oscilan esa dilución y por consiguiente los valores medidos.
- Como agua se une con determinados componentes del gas, modifica su concentración y de este modo los valores medidos.

Soluciones:

- ¡La humedad se debe medir siempre simultáneamente como un parámetro importante!
- ¡La humedad se debe llevar a un estado definido y comparable mediante un refrigerador de gases a medir!
- ¡La generación de condensado sobre las piezas o todo el aparato de medición se debe impedir por lo general mediante una calefacción continua!

3.1.3 Sensibilidad de interferencia

La sensibilidad de interferencia de un sistema de detección es la consecuencia de su alta resolución específica no arbitraria. Por eso, el sistema de detección, por lo general, no solo es sensible para los componentes de medición en cuestión, sino también en cierto modo para otros componentes en el gas a medir (componentes asociados). Los cambios de concentración de estos componentes asociados influyen sobre el valor medido de los componentes de medición reales lo que se debe corregir en el instrumento o posteriormente. Para ello también se deben medir los componentes asociados. Una sensibilidad de interferencia se expresa mediante la influencia (ascenso o descenso), que asume un componente asociado con respecto al valor medido de los componentes de medición. La dimensión de la sensibilidad de interferencia depende del tipo de sistema de detección (por eso es específica para cada instrumento) y la concentración de los componentes asociados. Véase la tabla 18 para el instrumento testo 350.

Sensibilidades de interferencia

La tabla sólo es aplicable a sensores nuevos con filtros sin usar y para concentraciones de gases de interferencia en el rango de ppm (hasta unas pocas miles ppm). El valor "0" significa: sensibilidad de interferencia <1 %.

Gas objetivo	Gas de interferencia									
	CO	NO	SO ₂	NO ₂	H ₂ S	H ₂	Cl ₂	HCl	HCN	CO ₂
O ₂	0	0	0 ⁸	0	0	0	0	0 ⁸	0	véase ⁹
CO(H ₂)	-	0 ⁵	0 ⁵	0 ⁵	0	0 ¹⁰	0	0	0	0
CO(H ₂) _{bajo}	-	0 ⁵	0 ⁵	0 ⁵	0	0 ¹⁰	0	0	0	0
NO	0	-	0 ⁵ (w) ⁶	6 % ⁷	0	0	0	0	0	0
NO _{bajo}	0	-	0 ⁵	<5 % ⁷	0	0	0	0	0	0
NO ₂	0	0	<-2 %	-	-20 % ⁷	0	100 %	0	0	0
SO ₂	<5 % ⁷	0	-	-110 % ⁷	0 ⁵	<3 %	-80 %	0 ⁵	30 %	0
SO _{bajo}	<5 % ⁷	0	-	-110 % ⁷	0 ⁵	<3 %	-80 %	0 ⁵	30 %	0
C _x H _y	35 % ⁵	0 ⁵	0 ⁵	0 ⁵	0	130 % ¹¹	se desco- noce	se desco- noce	se desco- noce	0
H ₂ S	<2 % ⁷	<15 % ⁷	<20 % ⁷	-20 % ⁷	-	0	<10 %	0	0	0

⁵ Con filtro sin saturar.

⁶ w = filtro recambiable

⁷ Se compensa en caso de que el gas de interferencia también se mida en el aparato (es decir, en caso de que el aparato tenga montado el correspondiente sensor).

⁸ Sin efecto hasta algunas 1000 ppm; para concentración de interferencia en rango % de 0,3 % O₂ por 1 % SO₂ / HCl.

⁹ 0,3 % O₂ por 1 % CO₂; se compensa tras la compensación de H₂

¹¹ Se compensa con indicación H₂ del sensor de CO(H₂).

Tabla 18: Sensibilidades de interferencia en el analizador testo 350

- ningún signo previo significa una influencia positiva (ascenso del valor medido)
- signo menos "-" significa una influencia negativa (descenso del valor medido)
- CO₂ y NH₃ así como los hidrocarburos saturados no provocan sensibilidades de interferencia
- Los hidrocarburos no saturados en concentraciones más elevadas pueden provocar una deriva de punto cero y una intensidad de respuesta reducida, sobre todo en la célula de medición de CO y NO.
- Altas concentraciones de gases agresivos como HCN, HCl o fluoruros pueden atacar los conductos del gas o la carcasa del sensor.

Otras indicaciones referentes a las influencias de los componentes asociados:

3. Tecnología del análisis de gases

3.1.4 Calibración, ajuste

Calibración

Calibrar significa en el ámbito de la tecnología de medición según la norma DIN 1319, parte 1 el proceso de definir y comprobar la divergencia de medición presente en el instrumento terminado y listo para el funcionamiento. A través de la calibración, en los instrumentos de medición con visualización se calcula la divergencia entre la visualización y el valor correcto o el valor que se supone es correcto del parámetro de medición y se comprueba a través de factores y funciones. A diferencia del ajuste, durante la calibración no hay un acceso al instrumento de medición.

La calibración es un elemento esencial de la garantía de calidad en la supervisión de emisiones. Para ello se utilizan materiales de referencia con una composición bastante conocida dentro de determinados límites. Para el análisis de gases se usan los gases de calibración (también conocidos como gases de verificación)

Ajuste

Ajustar (compensar) significa en el ámbito de la tecnología de medición según la norma DIN 1319, parte 1 el proceso de configurar un instrumento

de medición de modo que la divergencia de medición sea lo más mínima posible. Este proceso está enlazado con una intervención del instrumento.

Calibración oficial

El proceso de calibración oficial de un instrumento de medición es muy similar a la calibración, sin embargo solo puede ser ejecutado por instancias oficiales. La calibración oficial es un concepto legalmente definido y protegido para un control de calidad oficial con la respectiva identificación.

Gas patrón

Un gas con una composición bien conocida justificado con certificados. Los gases patrón se utilizan para calibrar analizadores de gases.

Gas cero

Gas patrón que sirve para ajustar el punto cero de un analizador de gases. No puede contener el componente de medición (gas de proceso sin el componente de medición o, por ejemplo, nitrógeno).

Gas asociado

Gas a medir sin el componente de medición

3.2 Analizadores de combustión

3.2.1 Conceptos y uso

Análisis de proceso

El análisis de proceso describe, a diferencia del análisis de laboratorio, los métodos de medición más constantes empleados para calcular los estados físicos o químicos o la concentración de los componentes químicos en los medios de procesos en una instalación.

Sus aplicaciones más frecuentes se localizan en las instalaciones industriales del sector químico, petroquímico, la generación de energía, el sector metalúrgico y mineral, en los alimentos y los productos estimulantes, el papel y celulosa, piedras y minerales, pero también en la construcción de motores así como la investigación y el desarrollo. En el caso de los medios gaseosos del proceso (tales como los gases de combustión, gases de proceso y el aire) se habla del análisis del gas de proceso.

Los lugares de medición con la extracción de pruebas continua y los instrumentos de medición (analizadores de gases) se ubican dispersos en las instalaciones (en

la caldera, la chimenea, el horno de cemento, delante del filtro electrostático, en una torre de destilación, etc.) bajo condiciones de servicio muy arduas. A partir de esto se evidencian las diferencias con respecto al análisis de laboratorio en el cual las muestras extraídas del proceso de forma discontinua se examinan de forma centralizada en un laboratorio bajo condiciones controladas y estables.

Los resultados de las mediciones sirven para

- controlar el proceso mediante la medición de aditivos y la optimización de la secuencia de procesos,
- asegurar la instalación mediante controles de mezclas de gas explosivas,
- garantizar la calidad del producto mediante la supervisión de las secuencias de proceso y las especificaciones del producto y
- proteger el medio ambiente mediante el control de los gases de combustión garantizando el cumplimiento de los límites de emisividad admisibles de las sustancias tóxicas.

3. Tecnología del análisis de gases

Analizadores

El núcleo de cada analizador son los sensores o los sistemas de sensores específicos para la sustancia. Su función se basa en los principios físicos o químicos tales como la absorción, adsorción, transmisión, ionización, la oxidación catalítica o las propiedades paramagnéticas o electroquímicas. Los sensores reaccionan a un cambio del parámetro de medición con una modificación correspondiente de sus propiedades (p. ej. una absorción elevada de luz o la reducción de la conductividad), permitiendo la generación de una señal de medición.

Con respecto a los modelos de los instrumentos se distingue entre

- analizadores portátiles, ligeros y móviles para mediciones momentáneas en diversos lugares y
- analizadores instalados de forma estacionaria en la instalación para mediciones continuas durante meses y años así como entre
- analizadores que miden directamente en el flujo del proceso (dispositivos "in situ") y
- analizadores a los que se les introduce una muestra extraída y preparada a partir del flujo del proceso para su medición (dispositivos "extractivos").

Gracias a los últimos avances se dispone de instrumentos que combinan movilidad y medición estacionaria a largo plazo: Un ejemplo de esto es el analizador testo 350, que es fácilmente transportable y sin embargo es adecuado y está aprobado para mediciones a largo plazo durante varias semanas.

Áreas de aplicación

El uso de los analizadores del gas de proceso se concentra principalmente en tres áreas:

1. Optimización de procesos de combustión para reducir los costes operativos, protección de las instalaciones y reducción de las emisiones de sustancias tóxicas (optimización de la combustión)
2. Generación y control de una composición determinada de gases dentro de un proceso de producción para lograr y respetar la calidad de los productos (control de procesos).

3. Supervisión del funcionamiento de las instalaciones para limpiar los gases de combustión y controlar los gases de combustión expulsados a la atmósfera con respecto al cumplimiento de las concentraciones de sustancias tóxicas legalmente admisibles (control de emisiones).

La tabla 19 muestra estas tres áreas de aplicación y sus objetivos referentes a la técnica de medición en relación a los campos de aplicación comunes.

Áreas de aplicación y objetivos del análisis de gases			
	1	2	3
	Optimización de una combustión	Control de una atmósfera de gas definida con respecto a su composición	Control de funcionamiento de instalaciones para la limpieza de gases así como la supervisión de los gases de combustión con respecto a sustancias tóxicas gaseosas
	Reducción de los costes operativos y la emisión de sustancias tóxicas	Generación y garantía de una calidad del producto definida	Cumplimiento de las prescripciones legales
	Optimización de la combustión	Control del proceso	Control de emisiones
Aplicaciones			
Piedras/tierras/vidrio	X	X	X
Generación de metales	X		X
Tratamiento de metales	X	X	X
Generación de calor	X		X
Eliminación de desechos	X		X
Investigación y desarrollo	X	X	X
Química, petroquímica	X		X

Tabla 19: Áreas de aplicación y objetivos del análisis de gases

3. Tecnología del análisis de gases

Sensores

Los sensores, formalmente, son todos los tipos de dispositivos que proporcionan información acerca de un parámetro físico o químico. Un sensor está compuesto por la sonda de medición real (también conocida como elemento sensor) y un transmisor. La sonda de medición debe tener una propiedad, p. ej., la conductividad, que también varíe con la variación del parámetros a medir, tal como una temperatura. Esta "reacción" de la sonda de medición se convierte luego en una señal de medición eléctrica por el transmisor (normalmente un amplificador). Los principales grupos de sensores son

- Sensores para determinar la temperatura
- Sensores para determinar la presión
- Sensores para determinar el flujo
- Sensores para determinar las concentraciones y las propiedades de sustancias (tecnología de análisis)

Nota: El término sensor se usa con frecuencia de forma coloquial en la tecnología de análisis, solamente para aquellas sondas de medición que tienen unas dimensiones especialmente pequeñas, mientras que los sensores grandes se denominan "analizadores".

Algunos de los sensores que se usan con frecuencia para determinar los componentes de los gases se muestran en la tabla 20.

Tipo de sensor / Principio de medición	Efecto de medición
Sensores semiconductores	Cambios de conductividad
Sensores de electrolito sólido Sensores de electrolito líquido	Interacción entre la energía de una reacción química y la energía eléctrica
Sensores ópticos	Cambio de las propiedades ópticas
Sensores calorimétricos	Calor de reacción durante la interacción con gases
Sensores fotométricos (dispositivos)	Absorción de radiación infrarroja (NDIR) o ultravioleta (UV)
Sensores paramagnéticos (dispositivos)	Propiedades paramagnéticas del oxígeno
Sensores quimioluminiscentes (dispositivos)	Reacción química con generación de radiación luminiscente
Ionización de llama (FID) (dispositivos)	Ionización en una llama con medición de la corriente
Biosensores	Reacciones biológicas

Tabla 20: Tipos de sensores comunes (selección)

Instrumentos portátiles

Los requisitos hacia los analizadores portátiles en la industria de proceso representan un reto particular para los fabricantes de instrumentos. En el arduo ambiente de medición, la exactitud necesaria y la fiabilidad de la medición exigida, junto con las dimensiones pequeñas y el poco peso del instrumento, componen un perfil de requisitos que, hasta hace pocos años, no se podían cumplir. El desarrollo del testo 350 y los modelos previos ha marcado nuevos hitos conformados a través del aval de las aprobaciones oficiales de estos instrumentos.

El testo 350 es un instrumento portátil que mide de forma extractiva y, debido a sus propiedades especiales (refrigerador del gas a medir, calibración automática y otras), también puede usarse en aplicaciones fijas durante un período de tiempo determinado.

Por consiguiente abre nuevos campos de aplicación y le ofrece al usuario una solución muy rentable para diversas tareas. Idealmente, los sensores electroquímicos de gases, que son apropiados para instrumentos portátiles debido a su peso liviano, necesidades de espacio y consumo de energía, se usan como sensores. Sin embargo, su principio de funcionamiento requiere un nivel de experiencia considerable para garantizar la exactitud, fiabilidad, duración y funcionalidad mediante el diseño del entorno correcto del sensor.

3. Tecnología del análisis de gases

3.2.2 Principios de medición para verificar gases (selección)

Se utilizan diversos principios de medición para verificar los diferentes gases en mezclas de gases. La tabla 21 muestra un resumen con la referencia a los principios empleados por Testo.

Sensores electroquímicos (potenciometría)

Los sensores electroquímicos adecuados para determinar el contenido de oxígeno y los componentes tóxicos tales como CO, SO₂ o NO_x funcionan basándose en el principio de la potenciometría sensible a los iones. Los sensores están llenos con un electrolito

Principio de medición	Componentes de medición						
	SO ₂	CO	CO ₂	NO _x	H ₂ S	O ₂	OC
Conductimetría	•	•					
NDIR	•	•	X	•			•
NDUV	•			•			
Paramagnetismo						•	
Quimiolumiscencia				•			
Oxidación catalítica		•					X
Ionización de llama							•
Potenciometría	X	X		X	X	X	
Electrolito sólido						X	

• Principios de medición apropiados X usado por Testo KW hidrocarburos

Tabla 21: Componentes a medir y principios de medición apropiados para verificarlos

acuoso, específico para la tarea, en el que están dispuestos dos o tres electrodos, igualmente combinados específicamente, entre los que hay un campo eléctrico. Los sensores están sellados de cara al exterior mediante membranas permeables al gas. Para ello consulte las imágenes 10 y 11. El diseño específico y el funcionamiento de los sensores difieren según el componente del gas a medir, como se

muestra en los dos ejemplos.

Ejemplo 1: Sensor de oxígeno (sensor de dos electrodos)

Los gases de combustión y las moléculas de oxígeno contenidas en ellos penetran a través de la membrana permeable al gas hasta el cátodo. Debido a su composición material, tiene lugar una reacción química en el cátodo con la formación de iones OH^- (los iones son partículas cargadas). Estos iones migran al ánodo a través del electrolito, creando un flujo de corriente proporcional a la concentración de O_2 .

La caída de tensión desarrollada en una resistencia situada en el circuito sirve luego como señal de medición que se utiliza para el procesamiento electrónico posterior.

La resistencia incorporada con coeficiente de temperatura negativo (NTC) se usa para compensar los efectos de la temperatura, garantizando así el comportamiento sensible del sensor a la temperatura.

La duración de un sensor de oxígeno de este tipo es de aprox. 3 años.

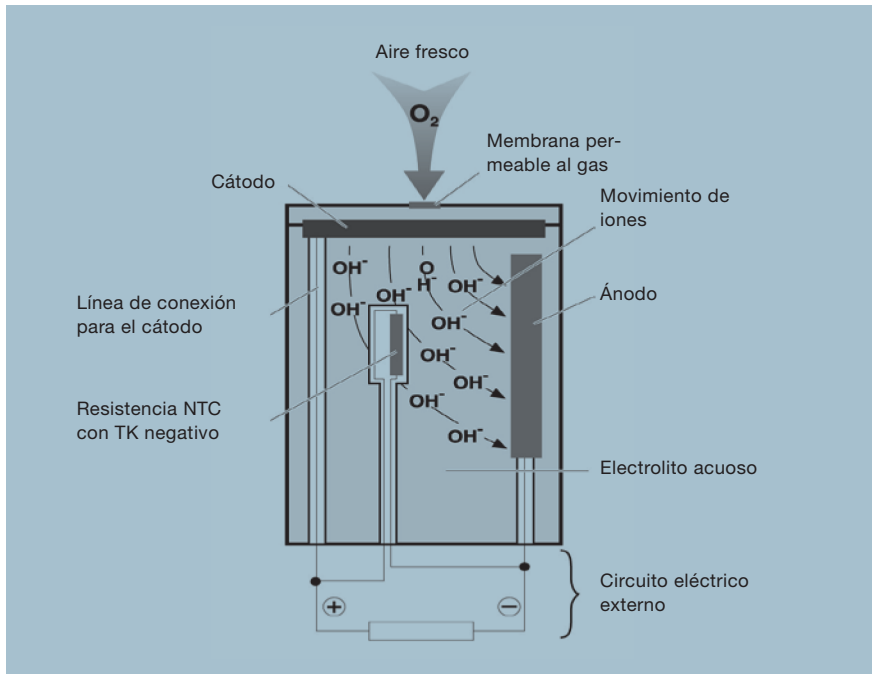


Fig. 10: Sensor de oxígeno (esquema)

3. Tecnología del análisis de gases

Ecuaciones de reacción del sensor de oxígeno:

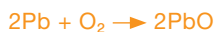
En el cátodo:



En el ánodo:



Balance total:



Ejemplo 2: Sensores para CO, SO₂ y NO_x (sensor de tres electrodos)

Para componentes del gas tales como CO, SO₂ o NO_x se usan sensores con tres electrodos. El funcionamiento se explica con base en un sensor de CO; cómo se aplica esto a los otros componentes se visualiza a partir de

las ecuaciones de reacción.

Las moléculas de monóxido de carbono (CO) pasan, a través de la membrana permeable al gas hasta el electrodo de trabajo donde se forman iones H⁺ como consecuencia de una reacción química. Estos migran en el campo eléctrico al contraelectrodo, donde se genera un flujo de corriente en el circuito externo mediante otra reacción química desencadenada por el oxígeno (O₂) del aire puro, también aportado. El tercer electrodo (electrodo de referencia) sirve para estabilizar la señal del sensor. La duración de este tipo de sensor es de aproximadamente 2 años.

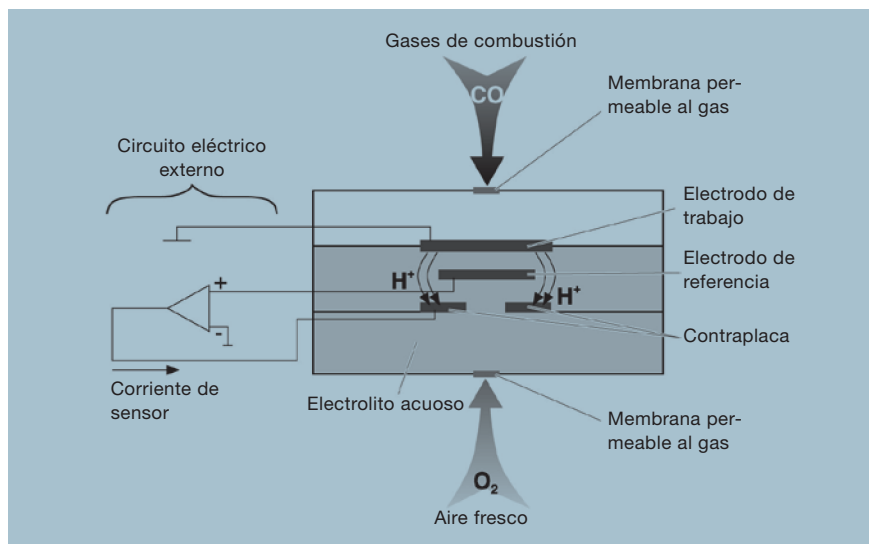


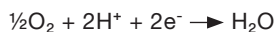
Fig. 11: Sensor para CO y otros gases (esquema)

Ecuaciones de reacción para el CO

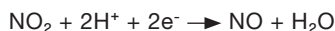
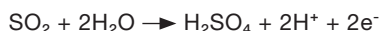
Ánodo:



Cátodo:



Otras ecuaciones de reacción



Absorción infrarroja (proceso IR)

La radiación infrarroja es absorbida por gases tales como el CO, CO₂, SO₂ o NO, con una longitud de onda típica de cada componente (rango de longitud de onda de algunas μm). La atenuación de un determinado rango de radiación infrarroja al pasar por un volumen de gas es, por consiguiente, una medida para la concentración del componente gaseoso en el gas a medir que ha sido traspasado. Hay dos métodos para incidir en solo un componente:

en el método dispersivo, la radiación se descompone espectralmente mediante prismas o redes de difracción antes de traspasar el volumen de gas, luego se conduce únicamente la radiación con la longitud de onda típica del componente en cuestión a medir a través del volumen de gas (cámara de medición). Este principio se usa en particular en los dispositivos de laboratorio. En el método no dispersivo (método NDIR)

se prescinde de la descomposición espectral descrita anteriormente, y una radiación de banda ancha, modulada con una rueda obturadora en todo el recorrido, si es necesario, pasa a través de la cámara de medición.

Para comprobar la absorción hay dos métodos:

- El propio componente a medir se usa en forma de un detector lleno con el mismo, de tal forma que el detector está lleno con el componente a medir y se mide la radiación residual aún presente después de que ha pasado a través de la cámara de medición, donde sea pertinente, en comparación con la radiación sin atenuar. Las fluctuaciones de presión que se producen (debidas a las fluctuaciones en el calentamiento del volumen del gas como consecuencia de la absorción) se registran mediante un condensador de membrana o un sensor de micro-flujo y se convierten en una señal eléctrica.
- O, de forma opcional, la radiación pasa a través del trayecto de absorción y luego se contrae al rango de longitud de onda requerido para el CO₂; p.ej., se verifica por medio de un filtro de interferencia usando un detector de radiación IR. A medida que aumenta la concentración del gas, se absorbe más radiación y la señal del detector se reduce respectivamente.

3. Tecnología del análisis de gases

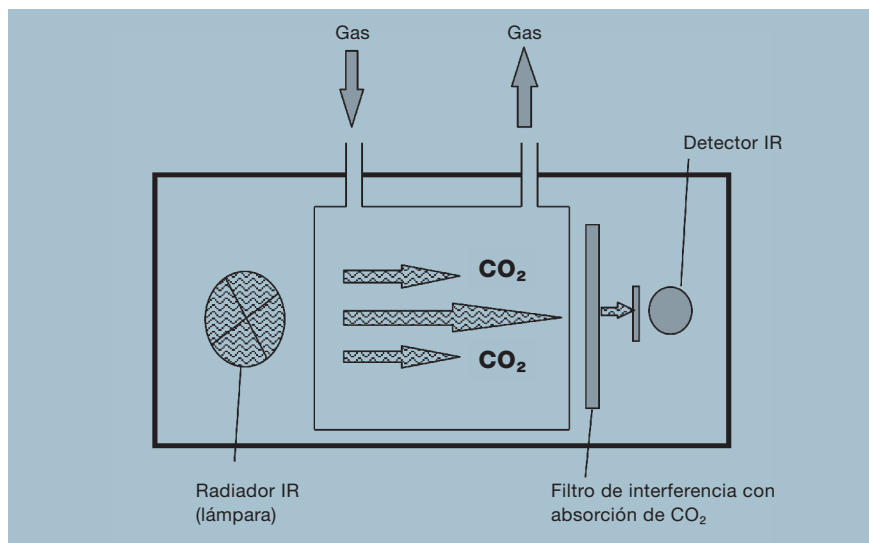


Fig. 12: Sensor NDIR (diseño compacto) para la medición de CO_2

Absorción ultravioleta (proceso UV)

La radiación ultravioleta también se absorbe específicamente desde distintos componentes de gas, por ejemplo, SO_2 o NO . El método UV compite con el método NDIR y tiene la ventaja, entre otras, de que no presenta una sensibilidad de interferencia frente al vapor. Sin embargo, las fuentes de luz son más dispendiosas que en el método NDIR. Por eso, el método UV se emplea únicamente para aplicaciones especiales.

Método de quimioluminiscencia (método CLD)

Este método desarrollado especialmente para el comprobante sensible del NO utiliza la propiedad del NO , con el fin de enviar una radiación característica (quimioluminiscencia) para la reacción con ozono (O_3) cuya intensidad es proporcional a la concentración másica del NO . Los dispositivos CLD son comunes para la comprobación selectiva de bajas concentraciones de NO , por ejemplo, en los gases de combustión de motores. Estos contienen un

generador de ozono, una cámara de enriquecimiento y de reacción así como un fotomultiplicador como detector.

Paramagnetismo

El oxígeno es el único gas con un gran paramagnetismo, es decir, las moléculas de oxígeno son atraídas fuertemente por un campo magnético. Este efecto se usa para calcular la concentración de oxígeno. Principalmente en los dispositivos modernos se distinguen dos modelos: En los dispositivos de mancuerna hay una mancuerna con dos esferas de vidrio colgadas llenas de nitrógeno con posibilidad de giro en la cámara de medición que a su vez está alineada en un campo magnético no homogéneo. Si hay oxígeno en el gas a medir, las moléculas de O_2 se atraen hacia el campo magnético ejerciendo una fuerza sobre la mancuerna. Esta fuerza se compensa mediante un resorte de actuación contraria generando así un parámetro de medición útil.

En los dispositivos de presión diferencial se utiliza este efecto con el fin de que surja una diferencia de presión entre los dos gases con propiedades magnéticas diferentes cuando se expone la superficie

límite de los dos gases a un campo magnético. Esta propiedad se utiliza para calcular el oxígeno en un gas a medir en interacción con un gas de referencia libre de oxígeno, p. ej. nitrógeno. La diferencia de presión generada provoca un flujo de gas que se detecta mediante una sonda de velocidad y se transforma en una señal de medición.

Conductividad térmica

Los analizadores de conductor térmico (detectores de conductividad térmica comunes, TCD) utilizan la conductividad térmica diferente de los gases a medir y de referencia. Un puente de hilo de medición a resistencias está rodeado en secciones por el gas a medir y por un gas de referencia con una conductividad térmica apropiada para la tarea de medición. La refrigeración diferente de los hilos de la resistencia produce un desequilibrio del puente, que se utiliza como el efecto a medir.

Oxidación catalítica

Este principio de medición se basa en el calor de evaporación de los componentes inflamables del gas a medir. Estos se convierten catalíticamente en un cuerpo precalentado eléctricamente (alambre o pastilla) y a medida que se queman

3. Tecnología del análisis de gases

aumenta la temperatura del cuerpo, provocando una modificación de su resistencia eléctrica. El requisito para este principio de medición es un contenido de oxígeno suficiente en el gas a medir para la combustión.

El cambio de resistencia es una medida para el contenido de (¡todos!) los componentes inflamables en el gas a medir. En particular estos son hidrocarburos (abreviados como HC y también conocidos como CXHY), también como CO o H₂. Por consiguiente, existen sensibilidades de interferencia entre estos componentes que deben observarse durante la medición o la evaluación de los valores medidos.

Ejemplo:

El valor medido del hidrocarburo metano aumenta, debido al CO también presente en el gas a medir, un 0,27 % en vol. por cada 1 % en vol. de CO. Para el hidrógeno, el incremento análogo es del 1,5 % en vol. por cada 1 % en vol. de H₂.

Además, hay una sensibilidad de interferencia contra el vapor de agua.

El módulo usado por Testo en algunos de sus dispositivos para medir hidrocarburos se basa en este

principio. Su estructura se visualiza en forma de esquema en la imagen 13. Una corriente fluye a través de un hilo de platino, que calienta el hilo y el material catalítico aproximadamente a 500 °C. Los componentes inflamables del gas a medir se queman en la superficie (en la medida que haya oxígeno suficiente para ello), elevando la temperatura del convertidor

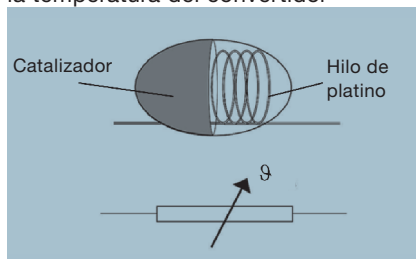


Fig. 13: Sensor según el principio de la oxidación catalítica

catalítico y del hilo de platino lo cual, a su vez, modifica la resistencia eléctrica del hilo y produce una señal de medición en un "circuito puente de Wheatstone".

Se debe prestar mucha atención cuando se utilice el módulo Testo HC debido a sus sensibilidades de interferencia y al posible deterioro de su funcionamiento por sustancias presentes en el gas a medir tales como H₂S, silicona o hidrocarburos sulfurados. El manual de instrucciones del dispositivo proporciona la información respectiva.

Detector de ionización de llama (FID)

Los compuestos orgánicos de carbono contenidos en el gas a medir se conducen al interior de una llama (normalmente hidrógeno / helio), donde se queman y se ionizan en el proceso. Los iones generados se miden como una corriente de iones que, en primera aproximación, es proporcional a los átomos de carbono orgánico involucrados en el proceso. La distinta sensibilidad de este método en lo que respecta a los diferentes compuestos orgánicos se tiene en cuenta mediante factores de respuesta.

Sensor de electrolito sólido

Un principio de medición especial, pero ampliamente utilizado, para medir oxígeno en condiciones operativas arduas, utiliza un electrolito sólido de cerámica dopada con óxido de circonio, con capas conductoras de electrodos montadas en superficies enfrentadas como electrodos. Como propiedad específica, este electrolito sólido contiene huecos de oxígeno en su red cristalina que facilitan la conductividad de los iones de oxígeno a temperaturas elevadas. Las moléculas de oxígeno (O_2) en el gas de proceso a medir se convierten en iones de oxígeno cuando entran en

contacto con el material del electrodo; si el electrolito está a una temperatura suficientemente elevada ($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$), estos iones de oxígeno producen una corriente a través del electrolito. Si la concentración de oxígeno es la misma en ambos lados, estos efectos aumentan, pero si las concentraciones son diferentes, se genera una corriente eléctrica aprovechable. Si hay un gas de referencia con una concentración conocida de O_2 en un lado, el contenido de O_2 del gas a medir se puede determinar a partir de esta señal.

Los dispositivos que funcionan basándose en este principio se conocen como "sondas de óxido de circonio" o "sondas de oxígeno". Generalmente se instalan directamente en los gases de combustión calientes (principio in situ) y, por consiguiente, miden el gas en sus condiciones originales, es decir, con su humedad. Sin embargo, como la humedad tiene un efecto de dilución sobre los otros componentes del gas, los valores medidos de O_2 de las sondas de esta clase son, por lo general, inferiores a los valores medidos de O_2 obtenidos en los mismos gases de combustión pero a temperaturas del gas inferiores, es decir, gases de combustión más secos, independientemente del

3. Tecnología del análisis de gases

método de medición utilizado.

Los valores medidos de oxígeno de las sondas de circonio son, generalmente, inferiores a los valores obtenidos en el mismo gas mediante otros métodos, pero los dos valores son correctos. La diferencia es atribuible a los diferentes grados de dilución (temperaturas) del gas durante la medición; si los valores se basan en las mismas temperaturas del gas (es decir, los mismos grados de dilución) estos serán idénticos.

Testo utiliza este efecto en algunos de sus analizadores para medir la humedad en los gases de combustión usando el siguiente procedimiento:

- Medición del contenido de oxígeno en los gases de combustión húmedos usando un sensor de ZrO_2
- Refrigeración y secado de los gases de combustión en un refrigerador de gas
- Medición del contenido de oxígeno en los gases de combustión seco usando un sensor electroquímico

El contenido de humedad original de los gases de combustión se puede calcular a partir de la diferencia entre las dos lecturas y la temperatura del refrigerador.

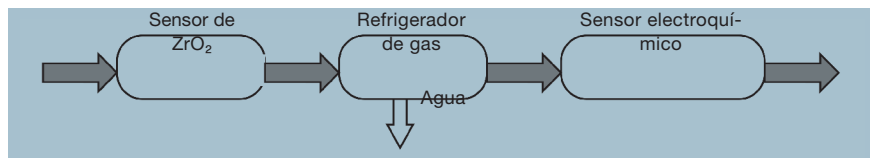


Fig. 14: Orden de la medición de humedad en los gases de combustión

4. Ejemplos de aplicación

Nota preliminar

- Las aplicaciones descritas a continuación del análisis de gases deben considerarse como un ejemplo. Estas pretenden mostrar de forma estricta la diversidad de procesos y métodos así como las posibilidades de uso del análisis de gases (razones, ventajas). En este sentido es posible que las respectivas instalaciones y métodos solo se representen de modo esquemático y de forma parcialmente resumida. En la práctica se presentan siempre divergencias debido a la diversidad de métodos, los constructores de instalaciones, las condiciones locales y los deseos específicos de

los operadores. Lo mismo es válido para las ubicaciones indicadas de los puntos de medición.

- Además, los componentes a medir se indican con los típicos rangos de concentración y también algunos valores límite según las prescripciones válidas en Alemania. Estos ejemplos solo pretenden brindar puntos de referencia basados en las experiencias prácticas en el uso de analizadores de gases de Testo considerando que no siempre se han medido todos los componentes posibles. Dependiendo de esto, la información acerca de los valores medidos y los rangos de medición no están completas en algunas representaciones, en pocos casos se ha prescindido en su totalidad.
- En casos individuales prácticos siempre se debe hacer referencia a la situación real.

4. Ejemplos de aplicación

4.1 Generación de energía

4.1.1 Instalaciones de combustión de sólidos

Las instalaciones de combustión de sólidos son instalaciones para la generación de calor mediante la combustión de combustibles sólidos como la hulla, el lignito, entre otros. Generalmente, los combustibles se trituran, el carbón molido en forma de polvo de carbón se introduce a la cámara de combustión y allí se quema en un lecho compacto, un lecho fluidizado o una nube de polvo de combustión. El suministro del aire de

combustión se lleva a cabo mediante sopladores fuertes, parcialmente mezclado con polvo de carbón. Los gases de combustión están sujetos a las normas de la regulación TA Luft con respecto a la concentración de sustancias tóxicas, en instalaciones con un rendimiento calorífico superior a los 50 MW (ver 13. BImSchV).

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Ajuste óptimo de la turbina de gas
- Creación del balance energético
- Control del cumplimiento de los valores límite en los gases de combustión

Esquema de la instalación y puntos de medición

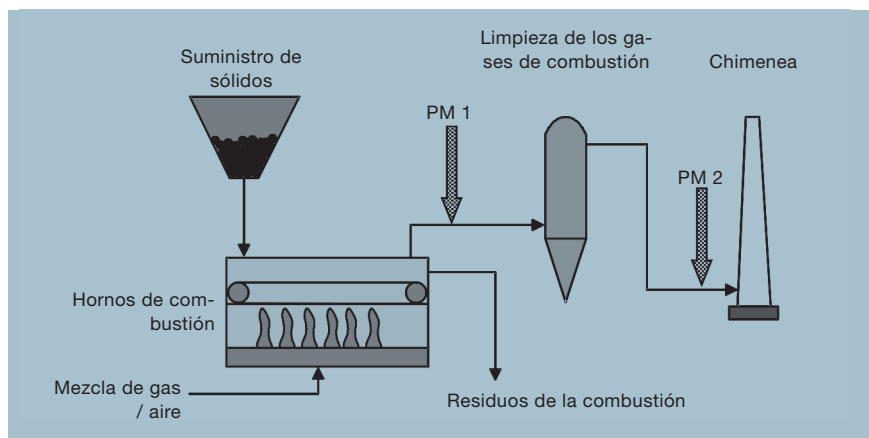


Fig. 15: Esquema de la instalación de una combustión de sólidos con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- Punto de medición PM 1 en la salida de la caldera para un ajuste perfecto del quemador (ahorro de combustible, rentabilidad), búsqueda de nidos de CO, seguridad operativa
- Punto de medición PM 2 del gas puro en la chimenea para controlar el cumplimiento de los valores límite

Parámetro de medición	Valores comunes	Valores límites
	PM 1	PM 2
CO	150 ... 170 mg/m ³	Valores límite según las prescripciones nacionales
NO		
NO ₂		
NO _x (como NO ₂)	650 ... 750 mg/m ³	
SO ₂	25 ... 35 mg/m ³	
O ₂	7 %	
Temperatura del gas	250 °C	

Tabla 22: Valores comunes y valores límite de una combustión de sólidos

Indicaciones sobre esta aplicación:

1. En los gases de combustión pueden aparecer altos contenidos de hollín
2. En una incineración completa hay fluctuaciones muy alta de CO
3. Según el combustible, el contenido de SO₂ puede variar notablemente y adicionalmente pueden generarse también HCl y HF

4. Ejemplos de aplicación

4.1.2 Cámaras de combustión de gas

Las cámaras de combustión de gas son instalaciones para generar calor mediante la incineración de combustibles gaseosos como el gas natural, el gas industrial, el gas de tragante, ente otros. Estos permiten una combustión libre de residuos y ampliamente sin contaminantes. El suministro de combustibles y aire se ejecuta en instalaciones pequeñas mediante sopladores de gas, en instalaciones grandes mediante un

quemador de presión alta. Los gases de combustión están sujetos a las normas de la regulación TA Luft con respecto a la concentración de sustancias tóxicas, o bien aquellas de la 13. BImSchV.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Ajuste óptimo de la turbina de gas
- Creación del balance energético
- Control del cumplimiento de los valores límite en los gases de combustión

Esquema de la instalación y puntos de medición

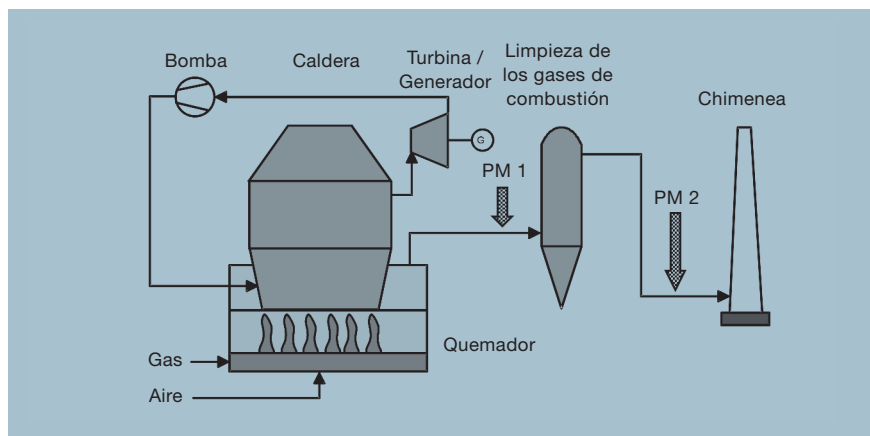


Fig. 16: Esquema de la instalación de una combustión de gases con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- Punto de medición PM 1 en la salida de la chimenea para un ajuste perfecto del quemador
- Punto de medición PM 2 en la chimenea para controlar el cumplimiento de los valores límite

Parámetro de medición	Valores comunes	Valores límites
	PM 1	PM 2
CO	0 ... 5 ppm	Valores límite según las prescripciones nacionales
CO ₂	9 ... 11 % (factor de control)	
NO	30 ... 50 ppm	
NO ₂	0 ... 2 ppm	
NO _x		
SO ₂	5 mg/m ³ (gas líquido) 1700 mg/m ³ (gas de petróleo)	
O ₂	2 ... 3 %	
Temperatura del gas	180 °C	

Tabla 23: Valores comunes y valores límite de una combustión de gases

4. Ejemplos de aplicación

4.1.3 Instalaciones de turbinas a gas

Las turbinas de gas estacionarias tienen su origen en el desarrollo de turbinas de aviones y sirven, principalmente, para impulsar generadores o máquinas procesadoras. Estas se utilizan generalmente para generar corriente en el rango de carga pico, frecuentemente con una caldera de recuperación postconectada para la generación de calor. Los gases de combustión corresponden a aquellos en las instalaciones de combustión de gases o gasóleo y están sujetos

a los valores límite de las sustancias tóxicas de la regulación TA Luft. En este sentido se aplica la cláusula de dinamización para las emisiones de NOX que sugieren una combustión libre de NOX y la inyección de agua en la cámara de combustión. Además del gas natural, también se usan como combustible gases de vertedero, grisú o biogás.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Control de la emisión de la turbina
- Supervisión del cumplimiento de los valores límite en los gases de combustión

Esquema de la instalación y puntos de medición

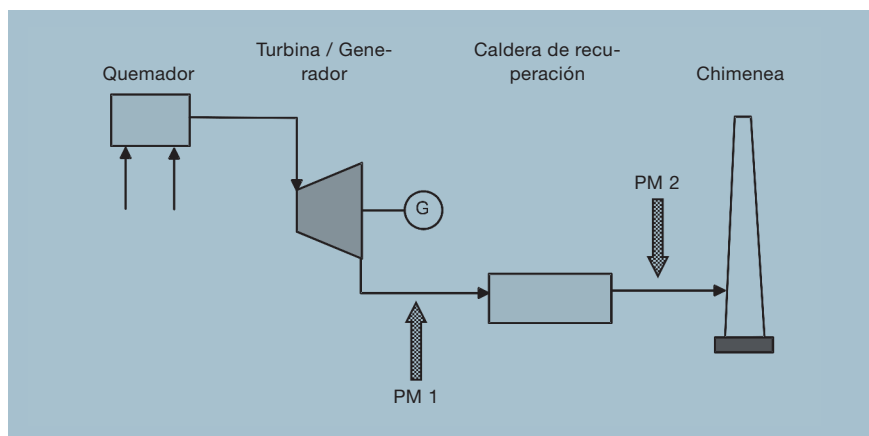


Fig. 17: Esquema de la instalación de turbinas de gas con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- Punto de medición PM 1 detrás de la turbina para calcular las emisiones de la turbina
- Punto de medición PM 2 después de la caldera de recuperación para controlar el cumplimiento de los valores límite.

Parámetro de medición	Valores comunes	Valores límites
	PM 1	PM 2
O ₂	15 ... 18 %	Valores límite según las prescripciones nacionales
NO _x	25 ... 60 ppm	
CO	0 ... 30 ppm	
Temperatura del gas	300 ... 400 °C	

Tabla 24: Valores comunes y valores límite de una instalación de turbinas de gas

Indicaciones sobre esta aplicación:

1. En el punto de muestreo del PM 1 predomina una subpresión dinámica. Por este motivo, el punto de muestreo tiene que hermetizarse obligatoriamente ya que, de lo contrario, el aire ambiente también se succionaría y mediría.

4. Ejemplos de aplicación

4.1.4 Instalaciones de combustión de gasóleo

Las instalaciones de combustión de gasóleo son plantas generadoras de calor mediante la combustión de gasóleos de diferente calidad. El combustible y el aire de combustión se suministran a través del quemador en forma de niebla fina a la cámara de ignición. Los gasóleos se queman sin dejar residuos, la cantidad de polvo de combustión también es mínima. Los gases de combustión están sujetos a las normas de la regulación TA Luft

con respecto a la concentración de sustancias tóxicas, en instalaciones con un rendimiento calorífico superior a los 100 MW aquellas de la 13. BImSchV.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Ajuste óptimo de la turbina de gas
- Creación del balance energético
- Control del cumplimiento de los valores límite en los gases de combustión

Esquema de la instalación y puntos de medición

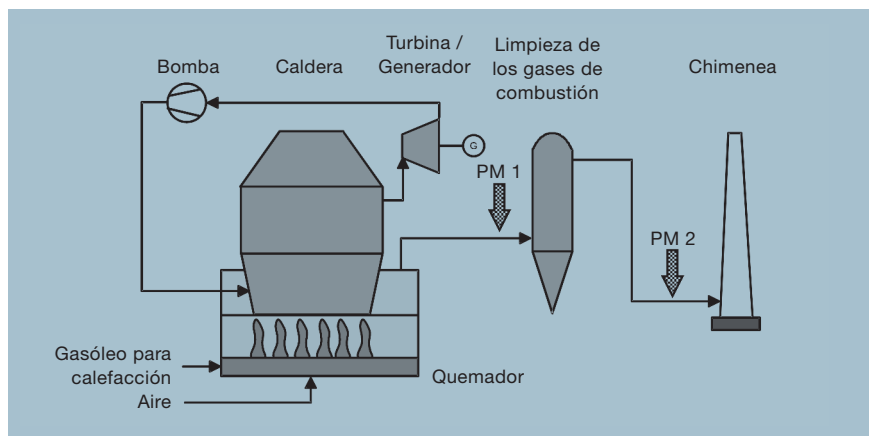


Fig. 18: Esquema de la instalación de una combustión de gasóleo con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- Punto de medición PM 1 en la salida de la caldera para un ajuste perfecto del quemador (ahorro de combustible, rentabilidad), balance de la instalación
- Punto de medición PM 2 del gas puro en la chimenea para controlar el cumplimiento de los valores límite

Parámetro de medición	Valores comunes	Valores límites
	PM 1	PM 2
O ₂	2,5 ... 3,5 %	Valores límite según las prescripciones nacionales
CO	0 ... 5 ppm	
CO ₂	13 ... 15 %	
NO	50 ... 150 ppm	
NO ₂	0 ... 5 ppm	
NO _x (como NO ₂)		
SO ₂	50 ... 100 ppm	
Temperatura del gas	200 °C	

Tabla 25: Valores comunes y valores límite de una combustión de gasóleo

4. Ejemplos de aplicación

4.1.5 Central térmica de carbón

Las centrales térmicas de carbón pertenecen a las plantas térmicas en las cuales se genera electricidad como energía secundaria a partir del carbón como energía primaria. Como combustible se utiliza hulla y lignito.

El carbón se tritura de forma gruesa y se muele finamente en un molino de carbón. En combinación con el aire precalentado en el intercambiador de calor rotativo (LUVO) se sopla hacia el interior de la cámara de combustión de la caldera como una mezcla de aire y polvo y se quema a una temperatura de aprox. 1000 °C. El generador de vapor rodea la cámara de combustión con su sistema de tuberías por el que circula el agua de alimentación de la caldera. El agua se calienta hasta convertirse en vapor vivo con una presión de aprox. 200 bar accionando la turbina de este modo. Los gases de combustión se escapan hacia arriba, pasan por todas las instalaciones de limpieza de gases y se expulsan por la chimenea. El vapor relajado y enfriado tras pasar por la turbina se vuelve líquido en el condensador gracias a una refrigeración adicional y luego se introduce de nuevo al circuito en forma de agua.

En Alemania, los gases de combustión de las centrales térmicas de carbón están sujetas a las normativas de la regulación TA Luft con respecto a su proporción de sustancias tóxicas aún permitidas dependiendo del rendimiento calorífico o lo que ocurre en la mayoría de los casos, con >50 MW aquellas prescripciones en la 13. BImSchV.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Ajuste perfecto de la combustión (limitación de combustibles y emisiones)
- Comprobación de funcionamiento de las instalaciones para la limpieza de gases de combustión
- Supervisión con respecto al cumplimiento de los valores límite de emisión
- Seguridad de las personas e instalaciones (peligro de incendio y explosión)

Esquema de la instalación y puntos de medición

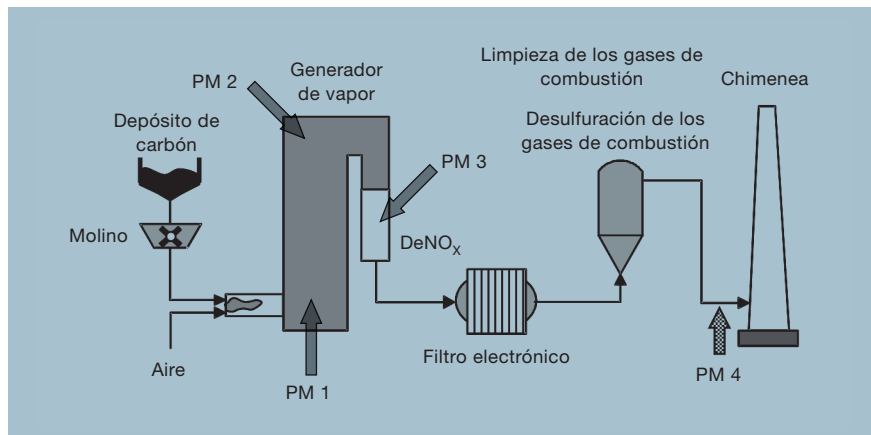


Fig. 19: Esquema de la instalación de una central térmica de carbón con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- PM 1 en la caldera para controlar la combustión homogénea y el coeficiente de exceso de aire, para la búsqueda de nido de CO y la supervisión de la seguridad operativa
- PM 2 en la salida de la caldera para controlar el proceso de combustión (rentabilidad)
- PM 3 en la instalación de desnitrificación para controlar el funcionamiento de esta instalación
- PM 4 en la chimenea para controlar el cumplimiento de los valores límite de las emisiones

4. Ejemplos de aplicación

Parámetro de medición	Valores comunes			Valores límites
	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4
O ₂	5 ... 9 %	5 ... 9 %		Valores límite según las prescripciones nacionales
CO	10 ... 5000 ppm	10 ... 5000 ppm		
CO ₂		15 ... 18 %		
NO _x		500 ... 600 ppm		
SO ₂		500 ... 2000 ppm		
Polvo		2 ... 20 g/m ³		
Temperatura de los gases de combustión	Aprox. 1000 °C	Aprox. 1000 °C		
Humedad		10 ... 15 %		

Tabla 26: Valores comunes y valores límite de una central térmica de carbón

Indicaciones sobre esta aplicación:
para las mediciones después del filtro electrostático, la sonda se debe poner a tierra obligatoriamente.

4.1.6 Planta de cogeneración

Las plantas de cogeneración son instalaciones eléctricas con una estructura modular relativamente pequeñas y por este motivo se ubican en la cercanía de un consumidor para generar simultáneamente energía eléctrica y calor. Para la generación de energía se usan generadores accionados por motores de combustión o turbinas de gas, la generación de calor es el resultado del aprovechamiento del calor resultante de las máquinas motrices (calor del agua a refrigerar y/o de los gases de combustión). Aquí se habla también de la generación de energía a través de cogeneración. A parte del gasóleo, un

combustible preferible es el gas (gas natural, biogas), el rendimiento de la planta de cogeneración se encuentra en el rango de 15 KW hasta 30 MW.

Los gases de combustión de las máquinas motrices (motores diésel, motores a gas, turbinas de gas) están sujetos a las respectivas normas de la regulación TA Luft haciendo necesario el uso de catalizadores.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Ajuste óptimo de la máquina motriz
- Comprobación de funcionamiento del catalizador
- Supervisión con respecto al cumplimiento de los valores límite de emisión

Esquema de la instalación y puntos de medición

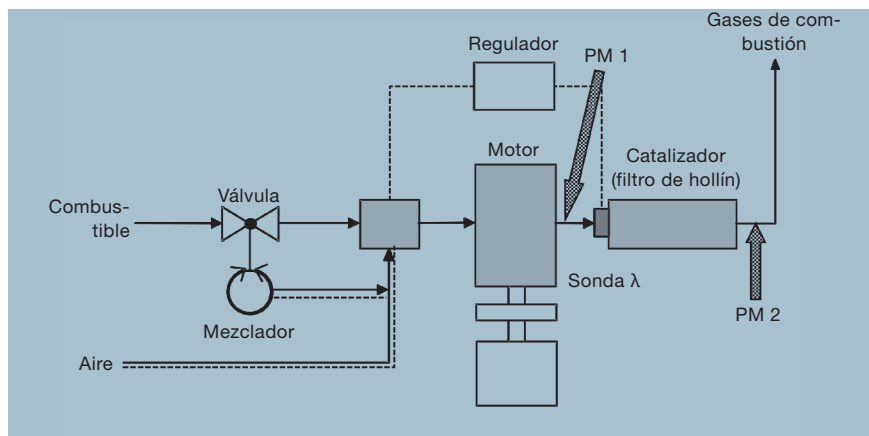


Fig. 20: Esquema de la instalación de una planta de cogeneración

4. Ejemplos de aplicación

Puntos y tareas de medición

- PM 1 antes del catalizador para la comprobación de efectividad y el ajuste del motor
- PM 2 después del catalizador para la comprobación de efectividad, el ajuste del motor y el cumplimiento de las prescripciones legales

Parámetro de medición	PM 1		
	Valores comunes con distintos combustibles		
	Gas natural	Gases de vertedero	Gasóleo para calefacción
O2	8 %	5 ... 6 %	8 ... 10 %
NO	100 ... 300 ppm	100 ... 500 ppm	800 ... 1000 ppm
NO2	30 ... 60 ppm	90 ... 110 ppm	10 ... 20ppm
CO	20 ... 40 ppm	350 ... 450 ppm	450 ... 550 ppm
CO2	10 %	13 %	7 ... 8 %
SO2		30 ppm	30 ... 50 ppm

Tabla 27: Valores medidos comunes en una planta de cogeneración (punto de medición 1)

Parámetro de medición	Tipo de motor	PM 2 Valores límites
CO	Gas natural	Valores límite según las prescripciones nacionales
NO+NO ₂	Autoignición <3 MW	
NO+NO ₂	Autoignición >3 MW	
NO+NO ₂	Otros 4 ciclos	
NO+NO ₂	Otros 2 ciclos	
O ₂	Valor de referencia	
SO ₂	Según DIN 51603	

Tabla 28: Valores límite para los gases de combustión de una planta de cogeneración para diversos motores (punto de medición 2)

Indicaciones sobre esta aplicación:

1. En motores regulados λ es posible que se dañe la célula de medición de CO en caso de valores extremos de H₂.

4.1.7 Planta de ciclo combinado (planta de gas y vapor de agua)

En las plantas de ciclo combinado se incineran combustibles sólidos para la generación de energía gracias a la combinación ideal de un proceso de turbina de gas y un proceso de turbina de vapor con un alto grado de eficiencia y valores de emisión relativamente bajos. Hay varias posibilidades de combinación; generalmente primero se acciona una turbina de gas con gas natural o gasóleo cuyos gases de combustión calientes generan vapor de agua

bajo una presión elevada con el fin de accionar una turbina de vapor. En otros casos, los gases de combustión calientes de una planta de combustión de carbón accionan una turbina de gas postconectada.

Los gases de combustión de la planta combinada están sujetos a las respectivas normas TA Luft.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Ajuste óptimo del quemador
- Supervisión con respecto al cumplimiento de los valores límite de emisión

Esquema de la instalación y puntos de medición

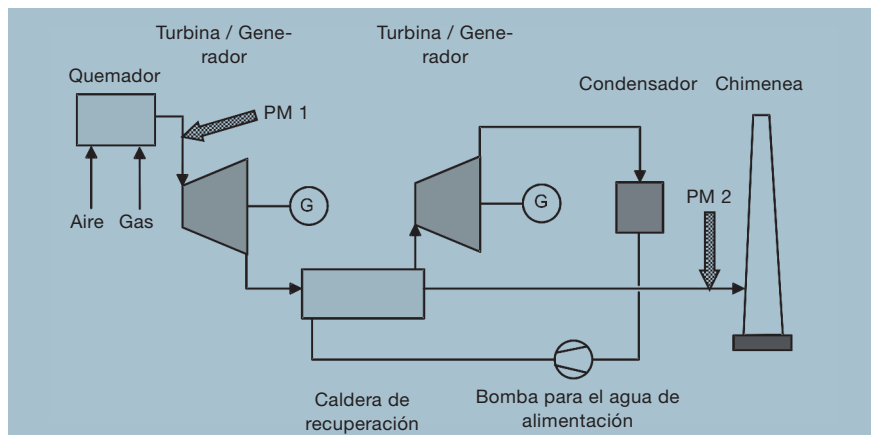


Fig. 21: Esquema de la instalación de una planta de ciclo combinado con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- PM 1 en la salida del quemador para la optimización de la combustión
- PM 2 del gas puro en la chimenea para controlar el cumplimiento de las prescripciones legales

4. Ejemplos de aplicación

4.2 Eliminación de desechos

4.2.1 Incineración de desechos

Hoy en día, los desechos sólidos, líquidos y pastosos como la basura doméstica, desechos especiales e industriales, lodos, neumáticos antiguos y similares se eliminan por lo general mediante el tratamiento térmico (pirólisis, combustión) aprovechando la energía liberada en lugar de acumularlos en vertederos de basura. En las plantas de pirólisis (véase el capítulo 4.2.2) se descomponen los desechos en ausencia de oxígeno, aunque también se genera un gas de pirólisis para su uso posterior. Las instalaciones de combustión de desechos son más frecuentes en las

cuales los desechos se incineran a temperaturas de hasta 1200 °C en hornos rotativos, hornos de mufla u hornos de lecho fluido. Los gases de combustión generados se limpian en diversas etapas antes de expulsarlos a la atmósfera. La carga de sustancias tóxicas permitidas está regulada en Alemania por la 17. BImSchV.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Entrega controlado de desechos (carga de filtrado y valores de emisiones reducidos)
- Constancia del valor de combustión
- Control de funcionamiento de las etapas de limpieza
- Cumplimiento de los valores límite de emisión

Esquema de la instalación y puntos de medición

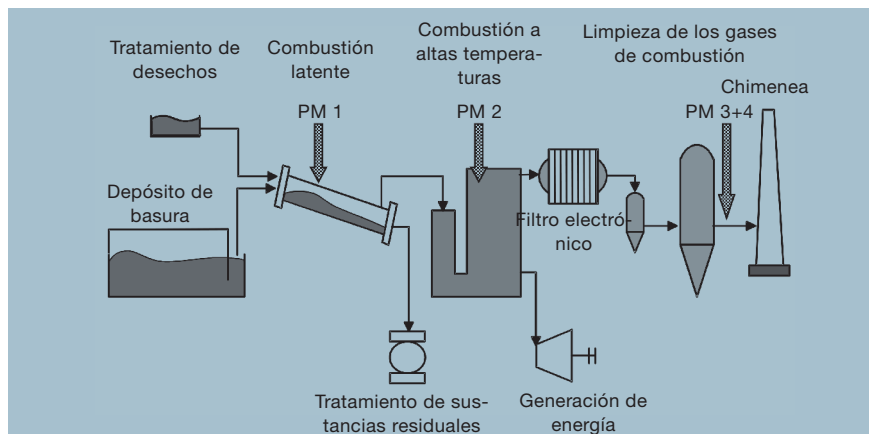


Fig. 22: Esquema de la instalación de una planta de incineración de desechos con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- PM 1 y PM 2 en el horno o la caldera para una entrega optimizada de desechos (carga mínima de los filtros y valores de emisiones reducidos) así como el control de un valor de combustión constante
- PM 3 luego de las etapas de limpieza de los gases de combustión para controlar su efectividad
- PM 4 en la chimenea para controlar el cumplimiento de los valores límite y como copia de seguridad de la tecnología de medición fija

Parámetro de medición	Valores comunes		Valores límites
	PM 1 y 2 en el gas de entrada	PM 3 y 4 en el gas puro	
O ₂	8 ... 11 %	7 ... 9 %	Valores límite según las prescripciones nacionales
NO	150 ... 200 ppm		
NO _x	10 ... 40 ppm	50 ... 70 mg/m ³	
CO	15 ... 25 ppm	11 ... 17 mg/m ³	
CO ₂	10 ... 12 %		
SO ₂	40 ... 60 ppm	5 ... 11 mg/m ³	
HCl	... 500 ppm		
HF	... 30 ppm		
Polvo	2 ... 3 g/m ³		
Temperatura del gas	300 °C		

Tabla 29: Valores comunes y valores límite de una planta de incineración de desechos

Indicaciones sobre esta aplicación:

1. En el gas de entrada (antes de las etapas de limpieza) se encuentran en su mayoría componentes asociados agresivos como HCl, HF y HCN. Para ello se debe utilizar un sistema de extracción con calefacción. Además es necesario considerar la sensibilidad de interferencia del sensor de SO₂ con respecto a Cl₂ (80 %) y HCl (15 %).
2. La composición del combustible (basura) varía con frecuencia según el suministro. Esto también puede ocasionar divergencias considerables de los valores medidos.
3. Para las mediciones después del filtro electrostático, la sonda se debe poner a tierra obligatoriamente.
4. ¡En instalaciones en donde solo se quema una parte de los desechos se deben emplear los valores límite de la 17. BImSchV solo a la parte respectiva del flujo de gases de combustión! Como resultado se obtienen valores límite notablemente bajos con respecto a todo el flujo de gas los cuales tienen

4. Ejemplos de aplicación

que ser respetados y comprobados mediante la tecnología de medición.

4.2.2 Combustión latente de desechos (pirólisis de desechos)

La combustión latente de desechos por pirólisis es un método para descomponer sustancias orgánicas (en las basuras) en ausencia de oxígeno. Las sustancias empleadas ideales son principalmente plásticos, neumáticos antiguos, caucho aunque también basura doméstica. Entre los productos reactivos generados se tiene el gas y el coque de pirólisis que pueden emplearse nuevamente de forma energética. Las ventajas de este método en comparación con la combustión de desechos son los volúmenes reducidos de gases de

Esquema de la instalación y puntos de medición

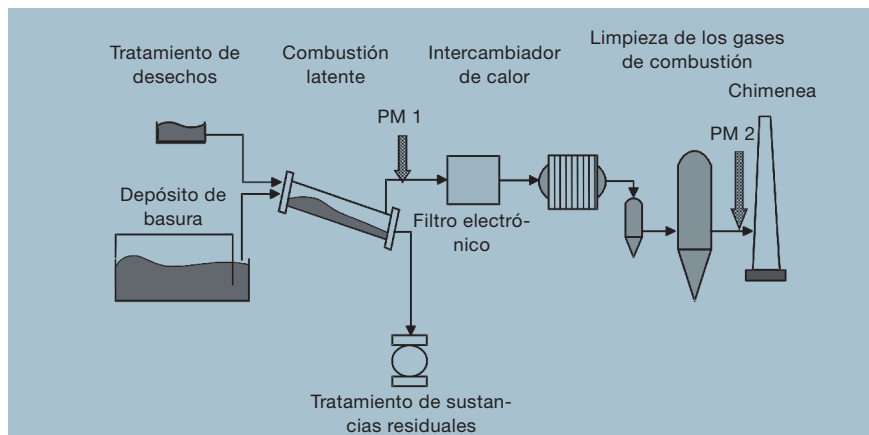


Fig. 23: Esquema de la instalación de una planta de combustión latente de desechos con puntos de medición

combustión (¡sin aire de combustión!) y las dimensiones más pequeñas de las instalaciones. Sin embargo, estas instalaciones han tenido algunas dificultades durante el servicio.

Las instalaciones de pirólisis de desechos están sujetas a los valores límite determinados en la regulación TA Luft que son comparables con aquellos de la 17. BImSchV, pero con un valor de referencia del oxígeno reducido un 3 %.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Control de funcionamiento de las etapas de limpieza
- Cumplimiento de los valores límite de emisión

Puntos y tareas de medición

- PM 1 en los gases de combustión del horno de pirólisis para supervisar la entrega óptima de desechos y del proceso de pirólisis
- PM 2 en la chimenea para controlar el cumplimiento de los valores límite según las prescripciones nacionales

4. Ejemplos de aplicación

4.2.3 Postcombustión térmica

En la postcombustión térmica, también conocida como limpieza térmica de los gases de combustión, se incineran las sustancias tóxicas inflamables del aire contenidas en los gases de combustión con el oxígeno del aire a temperaturas entre 700 y 900 °C. Aquí surgen CO y agua, aunque también SO₂, HCl, entre otros. La postcombustión térmica debe distinguirse de la combustión con llamas que trabaja a una temperatura de 1300 °C así como de la combustión catalítica que trabaja a 250-500 °C.

Por lo general, las postcombustiones térmicas tienen una demanda de energía elevada (combustiones auxiliares) y por este motivo se emplean en lugares en los que otros métodos no tienen un grado de eficiencia suficiente o en donde se tienen que destruir sustancias especiales.

En la mayoría de instalaciones se limitan las emisiones mediante las normativas de la regulación TA Luft.

Esquema de la instalación y puntos de medición

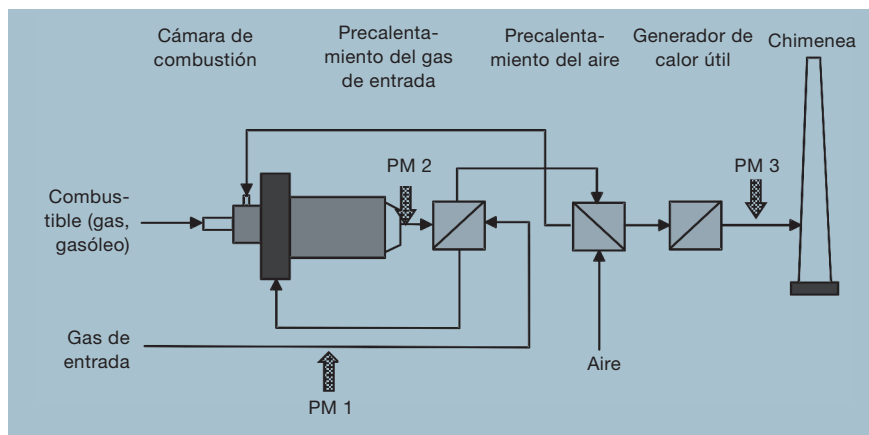


Fig. 24: Esquema de la instalación de postcombustión térmica con puntos de medición

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Supervisión del gas de entrada
- Optimización de la combustión
- Cumplimiento de los valores límite

Parámetro de medición	Valores comunes
O ₂	
NO _x	10 ... 100 mg/m ³
CO	10 ... 100 mg/m ³
CO ₂	
SO ₂	
C _{total}	5 ... 20 mg/m ³

Tabla 30: Valores comunes de una postcombustión térmica

Puntos y tareas de medición

- PM1 para supervisar el gas de entrada entrante
- PM 2 para la optimización de la combustión
- PM 3 para controlar el cumplimiento de los valores límite

4. Ejemplos de aplicación

4.3 Industria minera

4.3.1 Producción de cemento

El material denominado cemento es un clínker de cemento molido y mezclado con yeso que surge al final de un proceso de combustión en un horno de cemento. Como materia prima se tienen caliza (CaCO_3) y aditivos como barro, cenizas o arena. Como combustibles se usan polvo de carbón, gasóleo y sustancias residuales como aceite usado y neumáticos antiguos. Los pasos fundamentales del procedimiento o las partes de la planta son:

Molienda de las materias primas,
secado de la molienda (aquí surge la harina en bruto), calentamiento de la

harina en bruto y expulsión del CO_2 (calcinador), combustión en un horno rotativo, refrigeración, mezcla con yeso y molienda. Antes de la expulsión a la atmósfera, los gases de la combustión pasan por un refrigerador de evaporación así como por las etapas necesarias de limpieza, sobre todo un filtro electrostático.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Optimización del funcionamiento del refrigerador de evaporación
- Cálculo del grado de eficiencia del filtro electrostático
- Control de la posición de las sondas del analizador estacionario
- Cumplimiento de los valores límite de emisión

Esquema de la instalación y puntos de medición

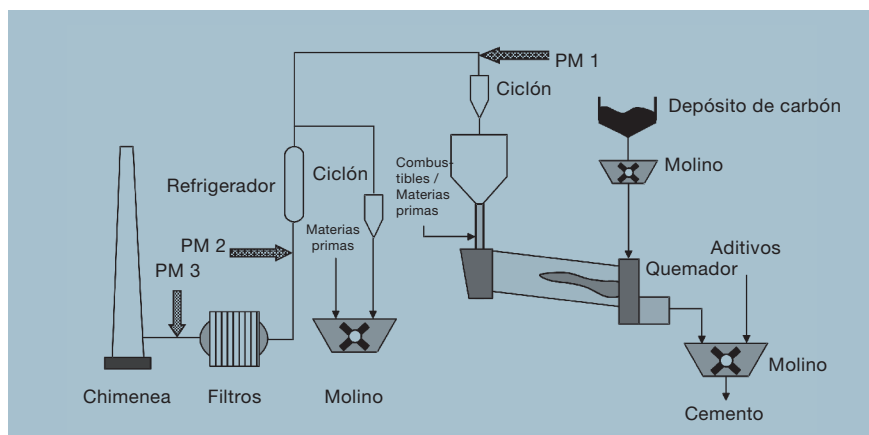


Fig. 25: Esquema de la instalación para la producción de cemento con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- PM 1 entre el calcinador y el refrigerador de evaporación para crear el balance de la instalación
- PM 2 antes del filtro electrostático

para crear un balance de la instalación y registrar el grado de eficiencia

- PM 3 en el gas puro para supervisar el cumplimiento de los valores límite de las emisiones

Parámetro de medición	PM 1 en el gas de entrada		PM 3 y 4 en el gas puro		Valores límites
	Valores comunes	Rango de medición (RM avanzado)	Valores comunes	Rango de medición (RM avanzado)	
O ₂	Hasta 10 %	0 ... 21 %	Como el gas de entrada		Valores límite según las prescripciones nacionales
CO	100 ... 10000 ppm	0 ... 10000 ppm (0,1 ... 20 %)	Como el gas de entrada		
CO ₂	Aprox. 20 ... 40 %	0 ... 25 % (0,1 ... 100 %)	Como el gas de entrada		
SO ₂			bajo	0 ... 5000 ppm	
NO _x			200 ... 700 ppm	0 ... 5000 ppm	
Polvo	Hasta 100 g/m ³	hasta 100 mg/m ³			
Temperatura	300 ... 400 °C		100 ... 150 °C		

Tabla 31: Valores comunes y valores límite en la producción de cemento

Indicaciones sobre esta aplicación

1. Carga de polvo demasiado alta en el gas de entrada y, en dado caso, el aire ambiente
2. Concentraciones de CO₂ altísimas, por fuera del RM.
3. ¡El sensor de O₂ es sensible a las interferencias en caso de concentraciones altas de CO₂!
4. La medición de caudal no es posible en caso de una carga elevada de polvo y altas velocidades del gas

5. ¡Es obligatorio poner a tierra la sonda en chimeneas mamposteadas!
6. Dependiendo del combustible se tienen que observar también los valores límite del plomo (en forma de polvo) así como del talio y del cadmio

4. Ejemplos de aplicación

4.3.2 Producción de cerámica/porcelana

La cerámica son productos solidificados por combustión (no mediante el secado ambiental) de barro y sustancias aditivas. Las materias primas son caolín (una clase de barro con una composición determinada), cuarzo (SiO_2) y feldespato (piedra compuesta por diversos silicatos). Estos materiales se preparan a través de molinos, instalaciones de lodo y sistemas de filtrado así como coladores y mezcladores, atraviesan el proceso de formación y luego se queman en varios pasos. En este sentido se distingue la preincineración a aprox. 900 °C para

solidificar y la incineración ardua a aprox. 1400 °C para obtener una sinterización completa (acristalamiento). Los colores se cocen durante la incineración ardua o en una tercera etapa de combustión. La temperatura de combustión y la composición de toda la atmósfera durante el proceso de combustión son esenciales para la calidad (solidificación, apariencia) del producto final. Antes de la expulsión a la atmósfera, los gases de combustión del horno pasan por algunas etapas de limpieza, parcialmente devolviendo el material en forma de polvo al proceso. La composición de los gases de combustión está sujeta a las normas de la regulación TA Luft.

Esquema de la instalación y puntos de medición

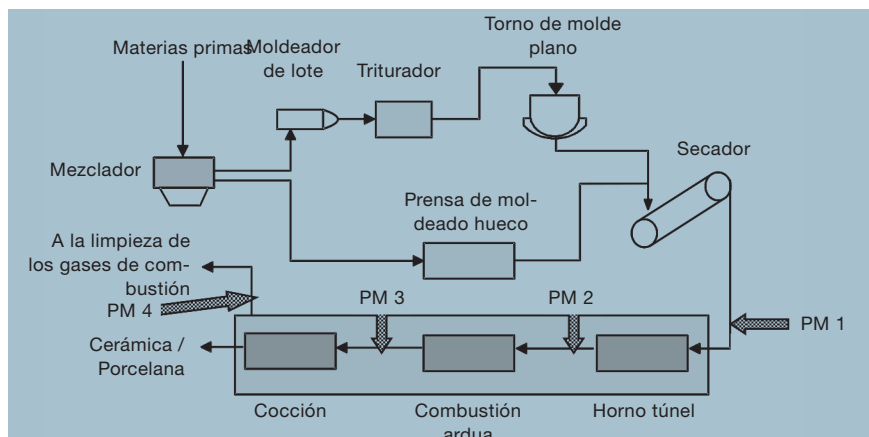


Fig. 26: Esquema de la instalación para la producción de cerámica/porcelana con puntos de medición

Aplicación del análisis de gases para la producción de cerámica por ejemplo para

- Ajuste perfecto del quemador
- Garantía de la calidad del producto (composición de los gases)
- Supervisión del procedimiento (grado de secado)
- Supervisión del cumplimiento de los valores límite de las emisiones

Puntos y tareas de medición

- PM 1-3 en el gas de entrada en las estaciones de combustión para un ajuste perfecto del quemador, calidad del producto excelente y constante (apariciencia) y cálculo del grado de secado
- PM 2 en el gas puro para el control de funcionamiento de las etapas de limpieza y la supervisión del cumplimiento de los valores límite de las emisiones.

Parámetro de medición	Valores comunes		Valores límites
	PM 1-3 en el gas de entrada	PM 4 en el gas puro	
O ₂	13 ... 16 %	13 ... 16 %	Valores límite según las prescripciones nacionales
NO _x	30 ... 40 ppm	30 ... 40 ppm	
NO			
NO ₂			
CO	40 ... 60 ppm	40 ... 60 ppm	
CO ₂			
SO ₂	700 ... 1300 ppm	450 ... 900 ppm	
Humedad	10 ... 14 %	10 ... 14 %	

Tabla 32: Valores comunes y valores límite en la producción de cerámica

Indicaciones sobre esta aplicación:

¡En los gases de combustión pueden aparecer componentes agresivos (HF, HCl)! Por eso se recomienda el uso de un sistema de muestreo de gases con calefacción.

4. Ejemplos de aplicación

4.3.3 Fabricación de ladrillos

Ladrillos es el término general para los materiales de construcción elaborados de barro que se fabrican por lo general directamente en el lugar en donde está presente la materia prima. Las materias primas se preparan mediante el mezclado, triturado y ajuste de la humedad, atraviesan el proceso de formación y un proceso de secado antes de colocarse en un carro en el que se hornean en hornos túnel de trabajo constante entre 900 °C y 1300 °C (cocción de sinterización).

Los gases de combustión contienen principalmente polvo aunque también óxidos de azufre y nitrógeno y, en dado caso, fluoruro de hidrógeno HF.

Aplicación del análisis de gases para la producción de ladrillos por ejemplo para

- Ajuste perfecto del quemador (ahorro de energía)
- Garantía de la calidad del producto
- Registro del grado de secado
- Control del cumplimiento de los valores límite

Esquema de la instalación y puntos de medición

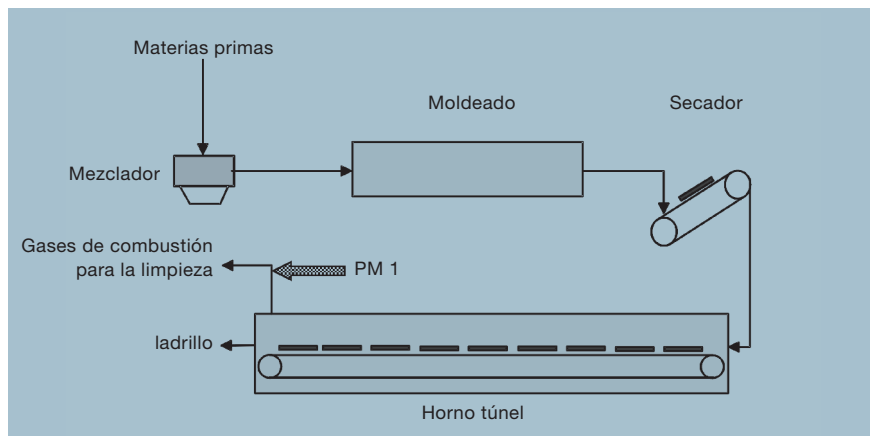


Fig. 27: Esquema de la instalación para la producción de ladrillos con punto de medición

Puntos y tareas de medición

- PM 1 en el horno túnel para un ajuste perfecto del quemador, calidad del producto excelente y constante (apariencia) y cálculo del grado de secado
- PM 2 en el gas puro (no está indicado en la imagen) para el control de funcionamiento de las etapas de limpieza y la supervisión del cumplimiento de los valores límite de las emisiones.

4. Ejemplos de aplicación

4.3.4 Producción de vidrio

La producción de vidrio se divide a una gran cantidad de productos diferentes, en primer plano está el vidrio hueco (para recipientes y objetos de uso de cualquier tipo) y vidrio plano que por lo general se refina a productos de alta calidad.

Según el producto varían las materias primas considerablemente, entre las más importantes están la arena, sosa y cal a las cuales se les agregan sustancias específicas (p. ej. óxidos metálicos). Además se ha propagado también el uso de vidrio usado. Las materias primas se trituran, se mezclan y se introducen como un conglomerado en el horno de fusión.

Aquí se diferencian los hornos de crisoles en relación a los hornos de cuba o túnel para el servicio continuo, generalmente las temperaturas de fusión se encuentran alrededor de los 1500 °C. Según la aplicación los detalles de los hornos y de la combustión son diferentes. Como fuentes de energía se utilizan gas natural, gasóleo para calefacción y corriente. Para homogeneizar la fusión se usan aditivos tales como el ácido nítrico.

Principalmente, los gases de combustión contienen polvo, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno (una consecuencia de las altas temperaturas) así como las aleaciones de flúor y azufre a partir de las

Esquema de la instalación y puntos de medición

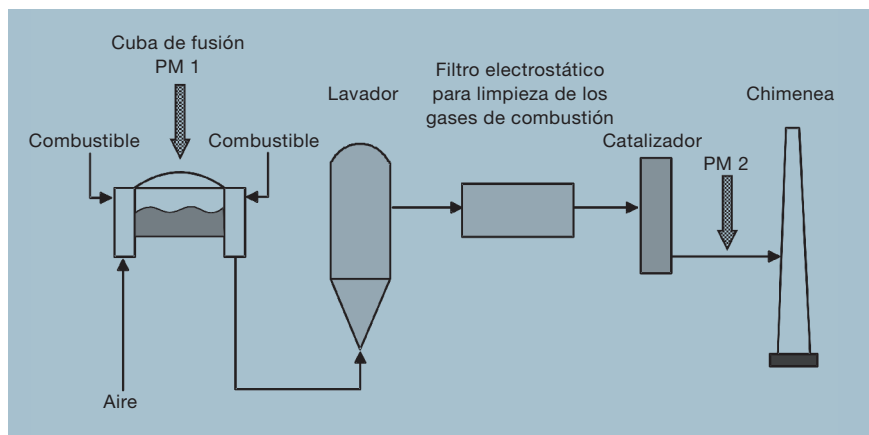


Fig. 28: Esquema de la instalación para una producción de vidrio con puntos de medición

materias primas o el vidrio usado.

Antes de la expulsión a la atmósfera, los gases de combustión deben pasar por diversas etapas de limpieza, su composición está sujeta a las normas de la regulación TA Luft.

Aplicación del análisis de gases para la producción de vidrio por ejemplo para

- Ajuste perfecto del quemador (ahorro de energía)
- Garantía de la calidad del producto
- Aumento de la durabilidad de la instalación
- Control del cumplimiento de los valores límite

Puntos y tareas de medición

- PM 1 en el horno de fusión para aumentar la durabilidad de la instalación, calidad del producto excelente y constante, reducción del consumo de energía, control de la adición de sulfatos
- PM 2 en el gas puro luego del filtrado para controlar el funcionamiento de las etapas de limpieza y la supervisión del cumplimiento de los valores límite de las emisiones.

Parámetro de medición	Valores comunes	Valores límites
	PM 1 en el horno túnel	PM 2 luego de los filtros
O ₂	0 ... 9 %	Valores límite según las prescripciones nacionales
NO _x	30 ... 40 ppm	
NO	800 ... 3000 ppm	
NO ₂	0 ... 100 ppm	
CO	0 ... 1000 ppm	
CO ₂	35 ... 45 %	
SO ₂	0 ... 5000 ppm	
Combinaciones de cloro		
Combinaciones de flúor		
Polvo		
Temperatura del gas	1400 ... 1600 °C	

Tabla 33: Valores comunes y valores límite en la producción de vidrio

4. Ejemplos de aplicación

Indicaciones prácticas sobre esta aplicación:

1. Los gases de combustión pueden ser muy húmedos con la consecuencia de que se presenten evaporaciones repentinas en la sonda de extracción. ¡Por eso se debe utilizar obligatoriamente un sistema de muestreo de gases con calefacción!
2. Las concentraciones de CO_2 son muy altas y por este motivo se encuentran por fuera del rango de medición.
3. El contenido de oxígeno en el entorno de la instalación puede reducirse más allá de los 21. Por eso, la manguera de aire fresco debe tenderse hacia fuera.
4. La temperatura en el entorno de la instalación puede ascender hasta $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por eso se debe utilizar obligatoriamente una manguera de extracción con calefacción.
5. Generalmente, el contenido de polvo en el gas de entrada es de grano fino y puede alcanzar hasta 400 mg/m^3

4.3.5 Producción de cal

El concepto "cal" en sí no es específico y se utiliza para denominar diversos materiales. Aquí se hace referencia a la cal cocida (CaO) que surge mediante la combustión de calcita (carbonato cálcico, CaCO_3) a 700-900 °C. Para la calcinación de cal se utilizan hornos de trabajo continuo de distintas clases de construcción (hornos verticales, hornos de cuba anulares, hornos giratorios) que se distinguen en la carga con calcita y combustible (coque y gas) y en la formación de las cámaras de combustión. La cal calcinada se usa como aditivo en la industria siderúrgica, la industria química, de papel y la industria de los materiales de construcción y también para la protección del medio ambiente para

la limpieza de gases de combustión (desulfuración).

Antes de la expulsión a la atmósfera, los gases de combustión de los hornos pasan por algunas etapas de limpieza, entre otras, por un lavador. Su composición está sujeta a las normas de la regulación TA Luft.

Aplicación del análisis de gases para la producción de cal por ejemplo para

- Optimización del método mediante el análisis de gases de combustión (ahorro de coque en hornos verticales, ahorro de gas natural en hornos de cuba anulares)
- Control de los altos valores de CO dependiendo del método
- Supervisión con respecto al cumplimiento de los valores límite de las emisiones

Esquema de la instalación y puntos de medición

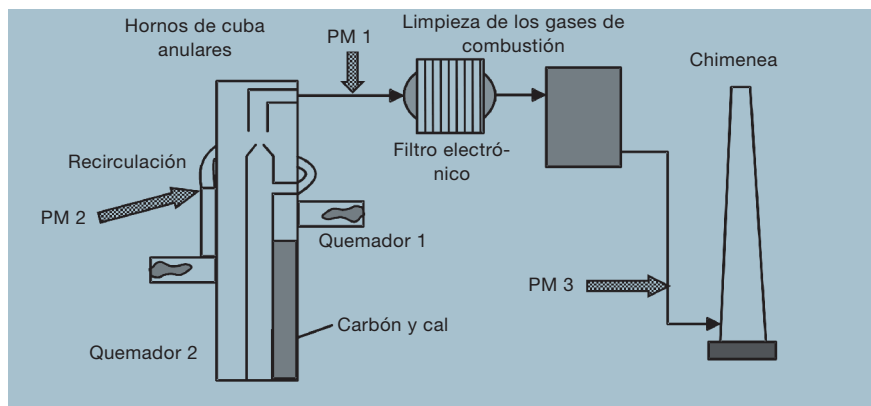


Fig. 29: Esquema de la instalación de una producción de cal con puntos de medición

4. Ejemplos de aplicación

Puntos y tareas de medición

- PM 1 en el lado del gas de entrada para comprobar la efectividad (reducción de costes) y protección del medio ambiente (altas concentraciones de CO)
- PM 2 en el lado del gas de entrada en la recirculación para el balance de la instalación
- PM 3 en el lado del gas puro para controlar las etapas de limpieza y el cumplimiento de los valores límite.

Parámetro de medición	Valores comunes		Valores límites
	PM 1 y 2 antes de la limpieza de los gases de combustión		PM 3 en la chimenea
Tipo de horno	Horno vertical	Horno de cuba anular	Valores límite según las prescripciones nacionales
Combustible	Div. coques	Gas natural	
O ₂ seco	5 ... 6 %	5,5 ... 6 %	
O ₂ húmedo	2 ... 3 %	5 ... 5,5	
CO	6 ... 7 %	1,5 ... 2 %	
CO ₂	28 ... 32 %	24 ... 26 %	
SO ₂	300 ppm	100 ppm	
NO _x	200 ppm	200 ppm	
HF			
Humedad	5 ... 8 %	5 ... 8 %	
Polvo			

Tabla 34: Rango de medición y valores límite en la producción de cal

Indicaciones prácticas sobre esta aplicación:

1. Observar la carga alta de polvo en el aire ambiente
2. Pueden producirse altas temperaturas de radiación que requieren un apantallamiento del dispositivo.

4.4 Industria del metal / mena

4.4.1 Preparación de menas (sinterizado)

Los metales se extraen de las distintas menas de metales mediante la reducción. En primera instancia, estas menas tienen que prepararse. Un método utilizado con frecuencia es el sinterizado o la producción de pellets, (aglomerados de la mena sinterizada). Aquí se muelen primero las materias primas (menas) y se mezclan con aditivos para formar finalmente los pellets. Estos pasan por un horno de incineración con temperaturas superiores a los 1000 °C que se hornean generando piezas fijas mediante una fundición superficial. De esta forma, la mena es apta para su procesamiento posterior, por ejemplo,

en un alto horno para la extracción de hierro. En el proceso de sinterizado se generan emisiones gaseosas y en forma de polvo, considerando que el polvo puede contener materiales adicionales como zinc, plomo o cadmio. Para las emisiones gaseosas son importantes sobre todo el SO_2 y el NO_x aunque también los compuestos de flúor y cloro.

Las plantas de sinterizado están sujetas a las normas de la regulación TA Luft con respecto a los valores límite de las sustancias tóxicas.

Uso de los analizadores de gases por ejemplo para

- Gestión de producción óptima (costes de energía)
- Control del cumplimiento de los valores límite

Esquema de la instalación y puntos de medición

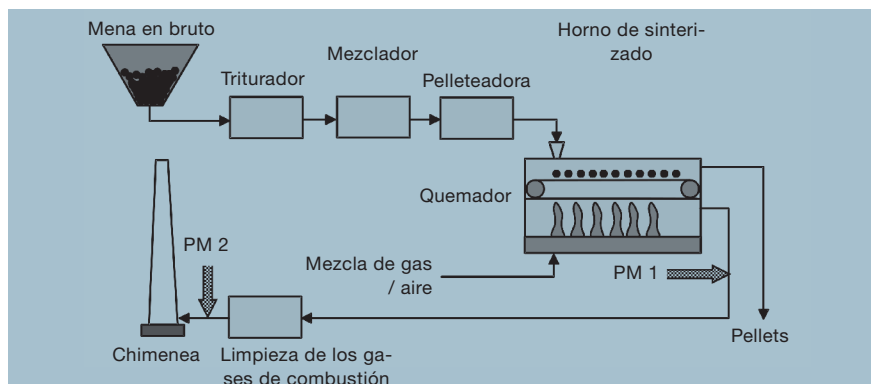


Fig. 30: Esquema de la instalación para la producción de pellets (sinterizado) con puntos de medición

4. Ejemplos de aplicación

Puntos y tareas de medición

- PM 1 en el gas de entrada después del horno para la optimización del horno
- PM 2 en el gas puro en la chimenea para controlar el funcionamiento de las etapas de limpieza de los gases de combustión y la supervisión de los valores límite

Parámetro de medición	Valores comunes	Valores límites
	PM 1	PM 2
SO ₂	500 ... 3000 mg/m ³	Valores límite según las prescripciones nacionales
NO _x	150 ... 350 mg/m ³	
Combinaciones de flúor	2 ... 10 mg/m ³	
Combinaciones de cloro	20 ... 60 mg/m ³	
Polvo	hasta 3000 mg/m ³	
Temperatura	1000 ... 1200 °C	

Tabla 35: Valores comunes y valores límite de una instalación de sinterizado

4.4.2 Producción de arrabio (alto horno)

El arrabio se obtiene mediante reducción (eliminación de oxígeno) del mineral de hierro en un alto horno, o mediante reducción directa. Como agentes reductores se utiliza coque, gas natural o carbón. En el proceso de alto horno, se carga desde la parte superior (en la garganta) la mena tratada (pellets, sinterizado) y los aditivos, junto con el coque. Desde abajo se suministra “viento caliente” como otra fuente de energía. La mezcla de viento caliente y gases de reducción asciende hacia arriba, en dirección contraria a la de los materiales, que descienden, siendo

extraída en la garganta como gas de tragante. El arrabio líquido se acumula en el fondo del horno junto con la escoria, y es extraído de allí a intervalos regulares. Generalmente se lo utiliza para alimentar una fábrica de acero en su posterior procesamiento. Los gases de combustión (llamado aquí gas de tragante) contienen un alto grado de CO y están cargados de polvo y se utilizan, luego del proceso de desempolvado, para la producción de viento caliente y para la calefacción de hornos de acería o se incineran en centrales eléctricas. Apenas después de este uso se expulsan a la atmósfera considerando que están sujetas a las normas de la regulación TA Luft.

Esquema de la instalación y puntos de medición

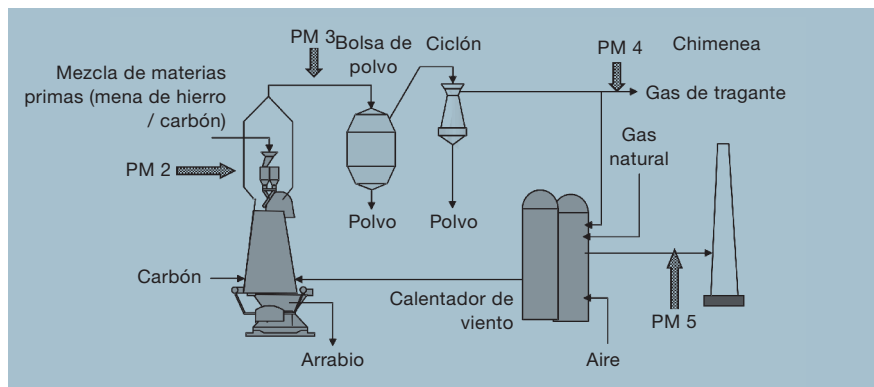


Fig. 31: Esquema de la instalación de una producción de arrabio (alto horno) con puntos de medición

4. Ejemplos de aplicación

Aplicación del análisis de gases para la producción de arrabio por ejemplo para

- Gestión de producción óptima (uso de energía y materias primas)
- Composición del gas de tragante para su uso posterior
- Supervisión de la instalación con respecto a la emisión de CO
- Control del cumplimiento de los valores límite

Puntos y tareas de medición

- PM 1 (no está contenido en la figura) en la zona interna de la nave del lecho de fusión para supervisar el CO

- PM 2 en el tubo de alimentación del alto horno como factor de control para la operación del horno
- PM 3 en el tubo descendente antes de la bolsa de polvo para el equilibrio de la planta y para prevenir el peligro de incendio debido al CO en la bolsa de polvo
- PM 4 en la emisión de gas de tragante después de la bolsa de polvo para la composición del gas de tragante (equilibrio de la planta, uso posterior del gas de tragante)
- Punto de medición PM 5 en la chimenea para supervisar el cumplimiento de los valores límite

Parámetro de medición	Valores comunes				Valores límites
	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5
	0 ... 50 ppm	0 ... 50 %	0 ... 50 %	0 ... 50 %	Valores límite según las prescripciones nacionales
CO ₂		0 ... 30 %	0 ... 30 %	0 ... 30 %	
CH ₄		0 ... 4 %	0 ... 1 %	0 ... 1 %	
H ₂		0 ... 15 %	0 ... 10 %		
Polvo			50 ... 100 g/m³	1 ... 10 g/m³	
Temperatura		Hasta 1300 °C	100 ... 500 °C	100 ... 150 °C	

Tabla 36: Valores comunes y valores límite en la producción de arrabio (alto horno)

Nota: En el punto de medición 2 existen requerimientos extremos de temperatura y condicionados al polvo hacia el muestreo de gases (fabricante especial)

4.4.3 Producción de acero bruto

El acero bruto se genera en la primera etapa de acabado del arrabio a través de la mezcla (descarburar) con oxígeno en convertidores. El carbono aún contenido en el arrabio con aprox. 4 % se reduce con oxígeno a menos del 1 %. Durante el proceso de descarburado surge el gas de convertidor, un gas de combustión con un alto contenido de CO que se sigue utilizando en la fábrica de acero luego de la extracción del

polvo. Apenas después de este uso se expulsan a la atmósfera considerando que están sujetas a las normas de la regulación TA Luft.

Aplicación del análisis de gases para la producción de acero bruto por ejemplo para

- Gestión de producción óptima del convertidor
- Composición del gas de convertidor para su uso posterior
- Control del cumplimiento de los valores límite

Esquema de la instalación y puntos de medición

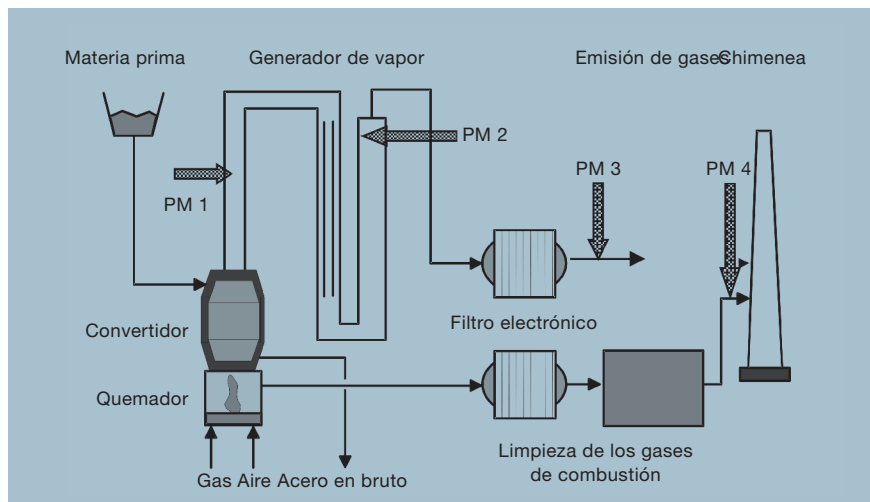


Fig. 32: Esquema de la instalación para la producción de acero en bruto con puntos de medición

4. Ejemplos de aplicación

Puntos y tareas de medición

- PM 1 detrás del convertidor para optimizar el funcionamiento
- PM 2 después del intercambiador de calor para optimizar el funcionamiento
- PM 3 antes de la emisión de gases para la composición de los gases
- Punto de medición PM 4 en la chimenea para supervisar el cumplimiento de los valores límite

Parámetro de medición	Valores comunes			Valores límites
	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4
CO	0 ... 80 %	0 ... 80 %	0 ... 80 %	Valores límite según las prescripciones nacionales
CO ₂	0 ... 40 %	0 ... 20 %	0 ... 20 %	
SO ₂				
H ₂	0 ... 10 %	0 ... 10 %	0 ... 10 %	
O ₂	0 ... 1 %	0 ... 1 %	0 ... 1 %	
Polvo	10 ... 50 g/m ³	10 ... 50 mg/m ³	20 ... 50 mg/m ³	
Temperatura del gas	Aprox. 1600 °C	Aprox. 150 °C		

Tabla 37: Valores comunes y valores límite en la producción de acero en bruto

4.4.4 Hornos de coque

Los hornos de coque son plantas de procesamiento de carbón de piedra, en las cuales éste se calienta a por lo menos 800 °C en destilación seca en ausencia de aire (pirólisis). El objetivo de esta carbonización es la producción de coque para uso industrial, especialmente en la metalurgia. El coque se distingue por un muy elevado contenido de carbón (<97 %) y muy pocos ingredientes volátiles. En el proceso se genera gas de horno de coque, que se sigue utilizando.

El carbón especialmente adecuado es destilado en seco (“cocido”)

en el horno de coque durante aproximadamente 15 horas, y luego sometido a un proceso de enfriamiento. La extinción húmeda que se usaba anteriormente ha sido sustituida en gran medida por un enfriamiento en seco en un enfriador de pozo. Éste permite una recuperación de calor mediante una caldera recuperadora y una reducción de las emisiones contaminantes. Como sustancias tóxicas se presentan, además de polvo, sobre todo SO_2 , NO_x así como componentes orgánicos. Los gases de combustión están sujetos a las normas de la regulación TA Luft con respecto a los valores límite admisibles.

Esquema de la instalación y puntos de medición

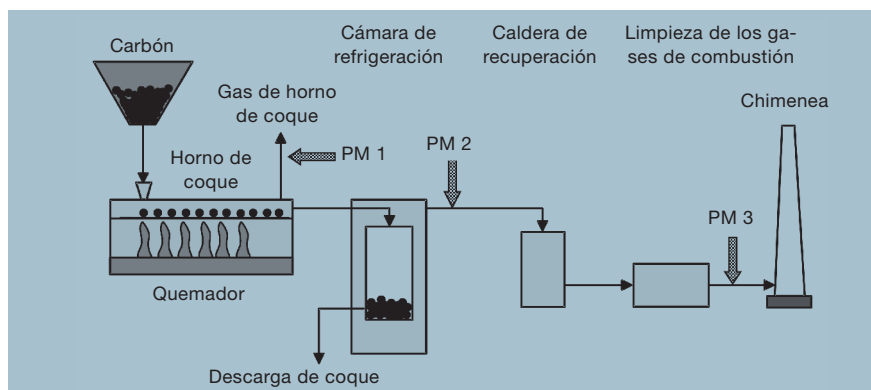


Fig. 33: Esquema de la instalación de una coquería con puntos de medición

4. Ejemplos de aplicación

Uso de los analizadores de gases por ejemplo para

- Optimización del proceso de carbonización
- Análisis del gas de coque antes del uso posterior
- Control del funcionamiento de la limpieza de los gases de combustión y supervisión del cumplimiento de los valores límite

Puntos y tareas de medición

PM 1 en la emisión de gases para valorar el gas de coque

PM 2 luego de la cámara de refrigeración para la optimización del seco de coque

PM 3 en la chimenea para controlar el cumplimiento de los valores límite

4.4.5 Producción de aluminio

La producción de aluminio a partir del óxido de aluminio se efectúa de forma electrolítica. El óxido de aluminio se disuelve en una fundición de criolita caliente alrededor de 950 °C en los que se sumergen ánodos de carbono. Al colocar una corriente continua, el óxido de aluminio se desintegra en aluminio y oxígeno. El aluminio se acumula en el suelo de la cuba, se retira y se refina nuevamente en hornos de fusión. A continuación se funde creando barras. Hay diversos hornos de electrólisis, los más comunes ahora son los hornos completamente encapsulados. Durante

la electrólisis se forma principalmente polvo y combinaciones de flúor así como SO_2 CO al incinerar los electrodos de carbono. Generalmente, las cenizas se suministran a un uso posterior.

Las emisiones admisibles están sujetas a las normas TA Luft

Aplicación del análisis de gases para la producción de aluminio por ejemplo para

- Gestión de producción óptima del horno
- Supervisión del reactor de sorción
- Control del cumplimiento de los valores límite

Esquema de la instalación y puntos de medición

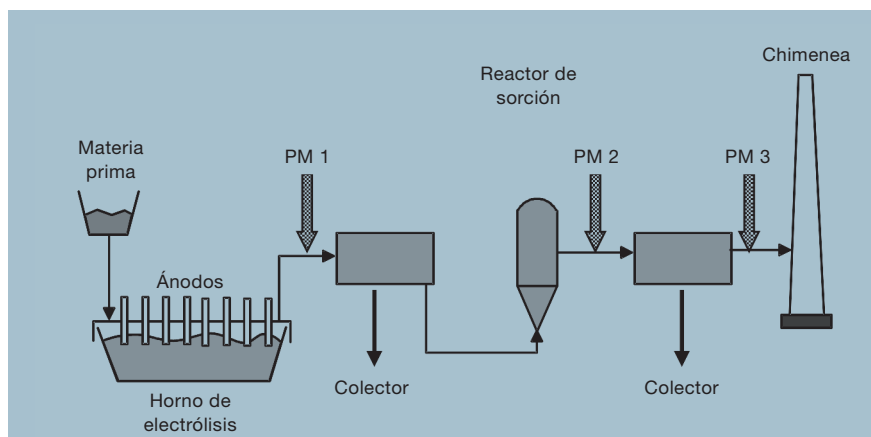


Fig. 34: Esquema de la instalación de una generación de aluminio con puntos de medición

4. Ejemplos de aplicación

Puntos y tareas de medición

- PM 1 detrás de la cuba de fusión para la optimización de la instalación
- PM 2 luego del reactor de sorción
- Punto de medición PM 3 en la chimenea para supervisar el cumplimiento de los valores límite

4.4.6 Tratamiento térmico superficial

El tratamiento de calor o tratamiento térmico es un concepto general para todos los métodos en los cuales las piezas de trabajo metálicas están sujetas a un cambio de temperatura para lograr determinadas propiedades de la piezas de trabajo y especialmente de su superficie (estructura cristalina). En este sentido, la composición de la atmósfera circundante es de suma importancia:

- En algunos procesos se debe prevenir una oxidación de la superficie mediante O_2 , CO_2 o H_2O durante el tratamiento térmico (templado, endurecido). Esto se logra mediante una atmósfera gaseosa neutra y controlada que no suerte efecto oxidante ni reductor.
- Además, en otros procesos también se debe influir específicamente la propiedad de la superficie mediante una composición determinada de la atmósfera para el tratamiento térmico. Por ejemplo, para la carbonización se utiliza directamente carbono en la superficie, para la carbonitruración se agrega adicionalmente nitrógeno. Para

determinadas tareas también se requiere una reducción del carbono de la superficie mediante la descarburación.

El tratamiento térmico se ejecuta en hornos con funcionamiento por lotes o tandas (cinta sinfín) a 800-1200 °C con una expulsión de las piezas tratadas hacia un baño de enfriamiento.

Para el funcionamiento correcto de la instalación es importante la hermeticidad del horno (retorta) en relación a la cinta transportadora, el suministro del gas de tratamiento definido y la supervisión de la instalación con respecto a la permeabilidad.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo para

- Supervisión de la atmósfera del horno
- Análisis del gas de tratamiento y el gas de calefacción

4. Ejemplos de aplicación

Esquema de la instalación y puntos de medición

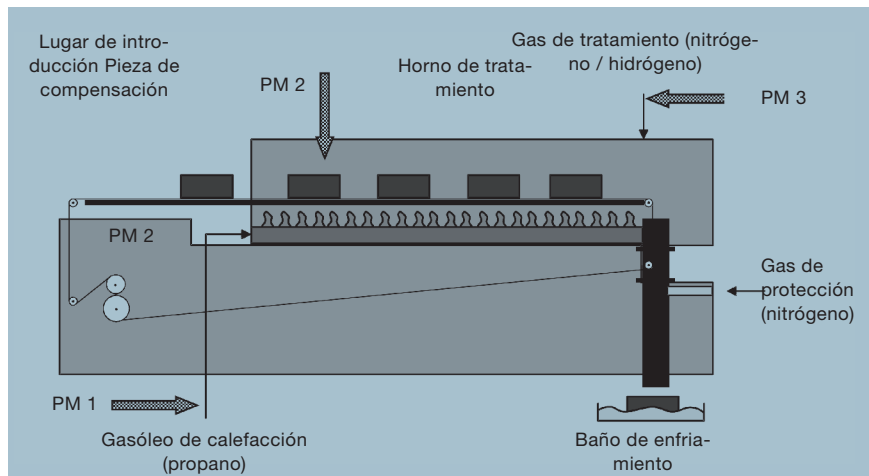


Fig. 35: Esquema de un horno para el tratamiento superficial con puntos de medición

Puntos y tareas de medición

- PM 1 en la alimentación del gasóleo de calefacción para controlarlo
- PM 2 en el horno para la supervisión de la atmósfera del horno
- PM 3 en la alimentación del gas de tratamiento para su ajuste y supervisión

Los componentes de medición más frecuentes son O_2 , CO , CO_2 y CH_4 .

4.5 Industria química

4.5.1 Instalación de combustión de proceso (Process Heater)

En casi todas las instalaciones de la química y la petroquímica se requieren altas temperaturas para la fabricación de productos y productos intermedios utilizando generalmente vapor caliente. Las instalaciones de combustión necesarias se denominan instalaciones de combustión de proceso o process heater. La siguiente figura muestra una instalación de estas en forma de esquema, considerando que en un process heater se genera vapor caliente utilizado en un reactor de dos

capas para alcanzar la temperatura de reacción.

Estas combustiones están sujetas a las normas de la regulación TA Luft o aquellas de la 13. BImSchV.

Aplicación del análisis de gases por ejemplo

- para el ajuste perfecto del quemador (limitación de combustibles y emisiones)
- para la optimización de la combustión
- para la supervisión con respecto al cumplimiento de los valores límite de las emisiones

Esquema de la instalación y puntos de medición

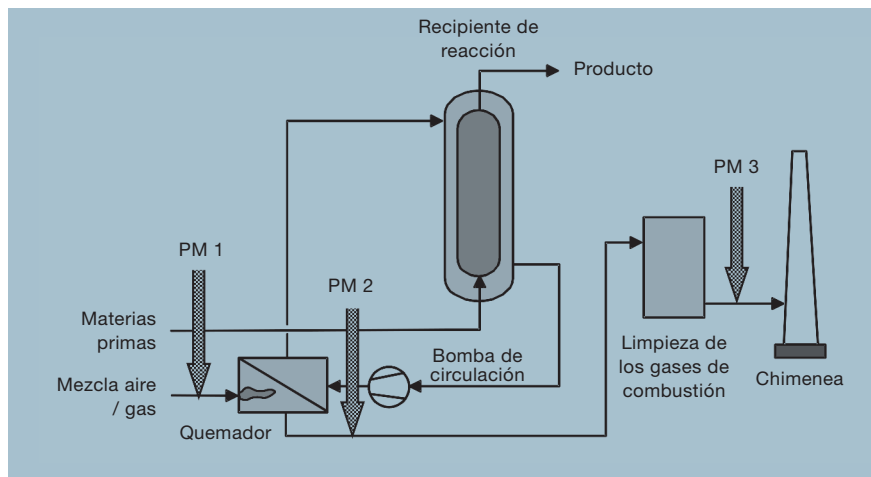


Fig. 36: Esquema de una instalación de combustión de proceso con puntos de medición

4. Ejemplos de aplicación

4.5.2 Refinerías

En las refinerías (en concreto en las refinerías de derivados del petróleo) se reúne una cantidad de instalaciones de proceso en las que se generan por etapas productos derivados del petróleo comunes del mercado como gasolina, diésel, plásticos, fibras, detergentes, disolventes y muchos más. Las etapas del procesamiento se ejecutan a altas temperaturas lo que hace necesario el uso de diversas combustiones (véase 4.5.1).

El procesamiento del petróleo crudo comienza con una destilación bajo una presión atmosférica aprox. a 350 °C, generando por ejemplo gasolina, petróleo y gasóleo (diésel); como residuos quedan los componentes utilizables como combustibles pesados o que pueden usarse en una destilación en vacío a 400 °C, por ejemplo, lubricantes o betunes.

Sin embargo, la diversidad de los productos requeridos en el mercado no se puede representar por ningún motivo mediante la destilación. Para ello se utilizan métodos especiales que separan los destilados del petróleo pesados generados en hidrocarburos más ligeros a través

de un procedimiento posterior (instalaciones de craqueo) que luego se refinan (instalaciones de reforma). Estos dos métodos operan bajo la utilización de catalizadores con temperaturas que oscilan alrededor de los 500 °C aunque generalmente se utilizan métodos de lecho fluido. La figura siguiente muestra las torres de destilación en forma de esquema, la extracción de los productos terminados y en bruto así como el tratamiento de los gases de combustión (gas de cola) mediante la combustión y la limpieza.

Las refinerías forman una fuente de emisiones de sustancias tóxicas como SO₂, NOX, H₂S, polvos y muchos hidrocarburos. Las emisiones provienen de fuentes difusas y puntuales (sobre todo las combustiones). Una reducción de las emisiones se alcanza usando combustibles libres de sustancias tóxicas, medidas relacionadas con la combustión e instalaciones de limpieza de los gases de combustión.

En Alemania, las refinerías o sus instalaciones individuales están sujetas a las normas TA Luft, especialmente las instalaciones de combustión pueden localizarse en

el área de la 13. BImSchV según el rendimiento calorífico.

Aplicación del análisis de gases en refinерías por ejemplo para

- Ajuste perfecto de la combustión (limitación de combustibles y

emisiones)

- Comprobación de funcionamiento de las instalaciones para la limpieza de los gases de combustión
- Supervisión con respecto al cumplimiento de los valores límite de las emisiones

Esquema de la instalación y puntos de medición

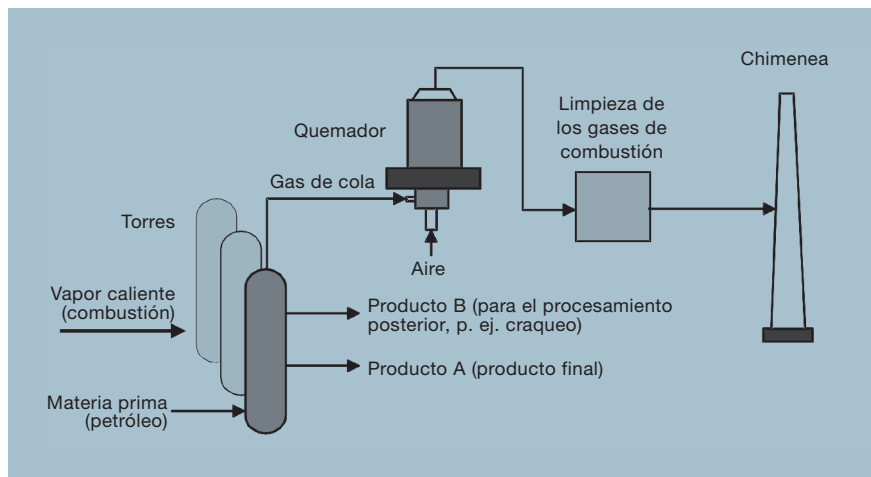


Fig. 37: Esquema de la instalación de un refinерía (sin puntos de medición)

- Seguridad de las personas e instalaciones (peligro de incendio y explosión)

Tareas de medición

Debido a la particular diversidad de cada instalación en una refinерía no se brindarán puntos ni datos de medición

concretos.

Sin embargo se hace referencia a las diversas instalaciones de combustión para la generación de vapor y combustión de residuos que funcionan en una refinерía y las múltiples tareas para el análisis de gases.

4. Ejemplos de aplicación

4.5.3 Antorchas

Las antorchas sirven para ejecutar combustiones seguras de gases de combustión en fuentes de petróleo, refinерías y otras instalaciones petroquímicas y químicas o en vertederos de basuras. Se distinguen antorchas de funcionamiento frecuente y aquellas que se utilizan como instalaciones de seguridad para emergencias cuando es necesario desviar rápidamente los gases inflamables en caso de averías del proceso (prevención de explosiones). Por lo general, las antorchas poseen dispositivos auxiliares como la inyección de vapor para evitar la generación de humo o calefacciones

adicionales para la combustión de los llamados gases débiles. Un aspecto crítico es la posible penetración de aire debido a problemas de estanqueidad o por la desembocadura de la antorcha porque se pueden producir explosiones en el sistema. El problema puede solucionarse mediante un gas de lavado o un desviador de aire en la desembocadura de la antorcha.

Uso de los analizadores de gases por ejemplo para

- Composición de los gases de la combustión
- Detección de fugas

Esquema de la instalación y puntos de medición

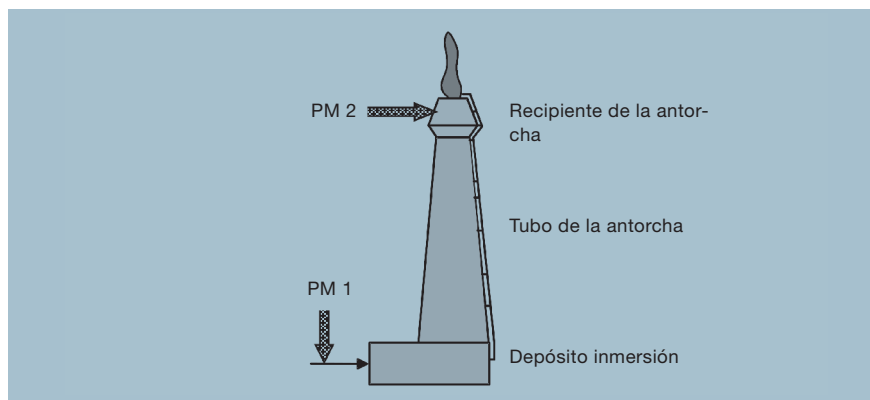


Fig. 38: Estructura de una instalación de antorcha

4.5.4 Combustión de residuos

En muchos procesos industriales, por ejemplo en el sector químico, se generan residuos y desechos líquidos o gaseosos en una composición cuya eliminación segura solo es posible a través de la combustión. En este sentido se utilizan instalaciones de combustión de residuos que incineran los residuos en hornos giratorios a temperaturas entre 900 y 1300 °C hasta convertirlos en cenizas o escorias. Estas instalaciones son muy similares a las de combustión de desechos. A este respecto véase el ejemplo de aplicación 4.2.1.

Los gases de combustión generados tienen que pasar por unas etapas adecuadas para la limpieza de gases, su composición aún admisible para la emisión hacia la atmósfera está sujeta en Alemania a las normas de la 17. BImSchV.

Uso de los analizadores de gases por ejemplo para

- Optimización del proceso de combustión
- Supervisión de las instalaciones de limpieza de los gases de combustión
- Supervisión del cumplimiento de los valores límite

Esquema de la instalación y puntos de medición

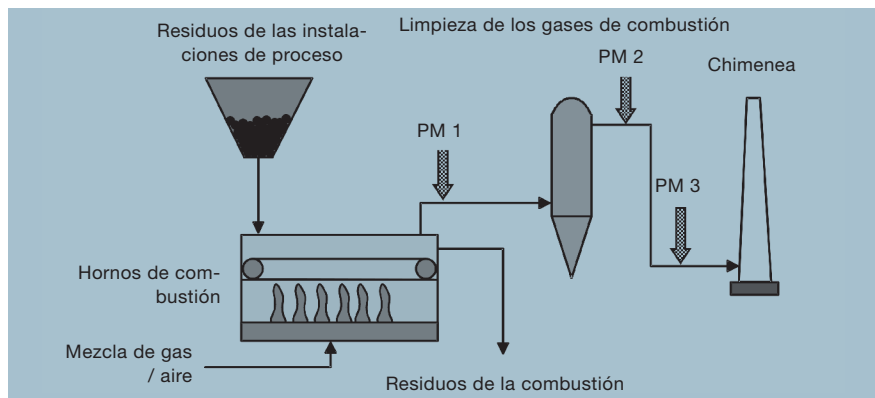


Fig. 39: Esquema de una instalación de combustión de residuos con puntos de medición

4. Ejemplos de aplicación

Tareas de medición

- PM 1 en la caldera para la entrega optimizada del material y las condiciones de combustión
- PM 2 en o entre las instalaciones para la limpieza de gases de combustión para su comprobación del funcionamiento
- PM 3 en la chimenea para controlar el cumplimiento de los valores límite

Indicaciones sobre esta aplicación

- En el gas de entrada (antes de las etapas de limpieza) se encuentran en su mayoría componentes asociados agresivos como HCl, HF y HCN. Para ello se debe utilizar un sistema de extracción con calefacción. Además es necesario considerar la sensibilidad de interferencia del sensor de SO₂ con respecto a Cl₂ (80 %) y HCl (15 %).
- La composición del combustible (residuos) varía con frecuencia según el suministro. Esto también puede ocasionar divergencias considerables de los valores medidos.
- Para las mediciones después del filtro electrostático, la sonda se debe poner a tierra obligatoriamente.

4.6 Otras

4.6.1 Instalaciones para cremación

En el año 1997 se han definido los valores límite para las instalaciones de cremación indicados en la siguiente tabla estipulados en la 27. BImSchV.

Parámetro de medición	Valores límites
CO	50 mg/m ³
C _{total}	20 mg/m ³
Polvo	10 mg/m ³
Dioxinas y furanos	0,1 ng/m ³
O ₂ (valor de referencia)	11 %

Tabla 38: Valores límite en instalaciones para cremación

4. Ejemplos de aplicación

4.6.2 Bancos de pruebas de motores

Los bancos de pruebas de motores sirven para desarrollar y ensayar motores nuevos así como para pruebas de rendimiento y durabilidad. Se distinguen entre bancos de pruebas para motores de vehículos y aquellos para motores estacionarios.

Los motores estacionarios se utilizan generalmente como instalaciones generadoras de energía y en plantas de cogeneración. Los motores estacionarios presentan una gama de emisiones similar de los gases de combustión a los motores de vehículos; los principales componentes son NO_x , SO_2 , CO e

hidrocarburos, en los motores diésel también se encuentra partículas de hollín. Estos motores están obligados a ser autorizados según la 4. BImSchV por encima de una potencia de 1 MW (sin limitaciones para motores que funcionan con aceite usado y gas de vertedero), las prescripciones respectivas están contenidas en la regulación TA Luft. En 1991 se intensificaron los valores límite aplicando la cláusula de dinamización.

Uso de los analizadores de gases por ejemplo para

- Mediciones en el marco de los trabajos de desarrollo
- Mediciones de las pruebas continuas
- Mediciones en el marco de las homologaciones

Esquema de la instalación y puntos de medición

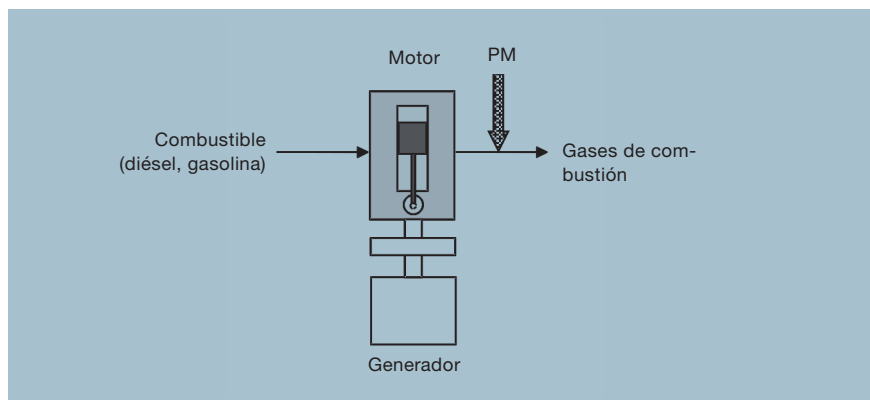


Fig. 40: Esquema de la instalación de un banco de pruebas del motor con puntos de medición

5. Tecnología del análisis de gases

Testo

5.1 La empresa



Medición electrónica de parámetros físicos y químicos con instrumentos portátiles.

Esta es la actividad del grupo empresarial Testo en Lenzkirch, en la Selva Negra desde hace más de 60 años. Testo SE & Co. KGaA se ha dedicado desde su fundación en el año 1957 al desarrollo, la producción y la distribución a nivel mundial de sondas e instrumentos de medición portátiles para

- Temperatura y humedad
- Velocidad y presión
- Componentes en los gases (análisis de gases)
- Análisis en líquidos
- Luz, sonido y revoluciones
- Parámetros de medición eléctrica

Gracias a esta amplia gama de aplicaciones, Testo está presente en diversos sectores como la climatización y la refrigeración, el sector alimentario, de calefacción, generación de energía, el sector de la minería, sector químico y la tecnología de procesos para profesionales en dichos sectores y autoridades oficiales así como en la industria. En todo sentido, Testo se ha convertido en un partner de gran prestigio gracias al rendimiento, calidad y orientación hacia el usuario de sus productos.

A diferencia de los instrumentos de medición portátiles, los instrumentos de medición estacionarios se encuentran en el lugar de la tarea de medición en instrumentos instalados fijamente. Las diferencias esenciales son evidentes:

- Para los instrumentos fijos es posible diseñar el entorno para el funcionamiento del dispositivo (carcasa climatizada o contenedor de análisis, alimentación de red estable, entre otras), además, los instrumentos pueden desarrollarse sin limitaciones considerables con respecto al peso y las dimensiones brindando la máxima exactitud, seguridad operativa y facilidad de uso.

5. Tecnología del análisis de gases de Testo

- Por el contrario, los instrumentos portátiles funcionan bajo condiciones ambientales rudas y en constante cambio, tienen que funcionar generalmente son una alimentación de red y tienen que cumplir con las exigencias de peso y dimensiones para la portabilidad. Esto implica un desafío especial para el desarrollo y la producción.

Debido a estas condiciones contrarias para el desarrollo y la instalación de los dispositivos han surgido diversos campos de aplicación para los instrumentos portátiles y estacionarios principalmente en el análisis de la combustión. Estos campos se complementan perfectamente y que hasta el momento no interfieren entre sí.

Sin embargo, gracias a un trabajo de desarrollo consecuente, Testo ha logrado últimamente fabricar instrumentos portátiles eficientes sin pérdidas de "movilidad" avanzando en algunos campos de aplicación de los dispositivos fijos. Este progreso radica en los conductos de gas con calefacción, refrigeradores del gas a medir, las sondas de muestreo de gases con opción de soplado automático, la calefacción y refrigeración de los instrumentos y el uso de ordenadores portátiles y tecnologías de bus para el

manejo, el procesamiento de datos y la comunicación.

Así, Testo ofrece analizadores de combustión portátiles autorizados para las mediciones a largo plazo y que han aprobado exitosamente las pruebas de aptitud exigentes como por ejemplo aquellas para la 17. BImSchV en Alemania o las pruebas de homologación en EE.UU. Por esta razón, los instrumentos han recibido un campo de aplicación mucho más amplio, en comparación con los años anteriores, el cual puede describirse perfectamente como "mediciones en gases de la combustión en la mayoría de sectores industriales." El capítulo 4 de esta guía ofrece diversos ejemplos en este sentido.

Las siguientes páginas brindan un resumen sobre la gama actual de analizadores de combustión Testo. El objetivo es exponer la diversidad de instrumentos y sus propiedades con el fin de brindarle apoyo al usuario en el momento de elegir el producto correcto para sus tareas de análisis.

Sin embargo, para obtener información más detallada se debe acudir siempre a la documentación específica del instrumento.

5.2 Propiedades típicas

Generalidades

Desde hace más de 30 años, los analizadores de combustión Testo han demostrado su eficiencia a nivel mundial en la industria, la administración legal y en el sector de la construcción. Más de 200.000 dispositivos se encuentran en uso y



Fig. 41: Sensor electroquímico

justifican diariamente la eficiencia de esta moderna tecnología de medición. Principalmente los analizadores de combustión Testo utilizan sensores de medición electroquímicos (figura 41) como comprobante de los componentes de gas. Testo ha puesto a disposición esta tecnología económica, ahorradora de espacio, y al mismo tiempo exigente con respecto a las condiciones operativas gracias a la propia investigación y desarrollo para la tecnología de medición cotidiana empleada en condiciones operativas

arduas. Esto recae sobre los mismos sensores de medición y su entorno, como la optimización de los conductos de gas, el cálculo correcto de las sensibilidades de interferencia, la preparación segura del gas a medir y la sencilla posibilidad de sustitución por parte del usuario.

Testo integra una velocidad de innovación muy alta en su tecnología de medición: el 70 % del volumen de ventas resulta de los productos con una antigüedad inferior a 3 años.

Esta fuerza innovadora está respaldada con una apuesta por la calidad bien marcada. Ya en 1992 Testo obtuvo el certificado de calidad ISO 9001 que fue confirmado nuevamente en 1997.

Los analizadores de combustión Testo pueden caracterizarse del siguiente modo:

- Los instrumentos son dispositivos manuales o tienen el tamaño de un pequeño maletín con posibilidad de transporte manual o con un carro de transporte. Los instrumentos ejecutan mediciones continuamente.
- La gama de productos es bastante amplia y ofrece instrumentos para cualquier finalidad de uso con el equipamiento adecuado y los respectivos datos de rendimiento. Hay instrumentos para la determinación de un componente de gases u otros para

5. Tecnología del análisis de gases de Testo

la determinación simultánea de varios componentes de gases.

- Los instrumentos han aprobado exitosamente diversas pruebas de homologación y de aptitud, entre ellas la prueba conocida con una exigencia especial con respecto a la 17. BlmSchV.
- Los instrumentos son notablemente más económicos en comparación con otros analizadores de combustión
- Los instrumentos no requieren mucho mantenimiento y por consiguiente económicos en su servicio. El usuario puede ejecutar de forma autónoma varios pasos de mantenimiento.
- Los instrumentos se entregan con una documentación bien detallada. Además, Testo apoya a los usuarios facilitando información especializada (por ejemplo, esta guía).

Eficiencia

El testo 350 ha demostrado la alta eficiencia de la tecnología de los instrumentos Testo gracias a varias pruebas de aptitud aprobadas exitosamente.

- La prueba de aptitud para mediciones de emisiones continuas se ha ejecutado en una instalación de combustión de desechos para los componentes NO, NO₂, SO₂, CO y O₂. Como resultado se ha certificado la aptitud ilimitada del testo 350

para instalaciones de la 13. y 17. BlmSchV y la regulación TA Luft en funcionamiento constante (intervalo de mantenimiento de 14 días).

- La prueba de aptitud según la norma DIN EN 50379-1 y -2 para instrumentos de medición portátiles para la medición de instalaciones con regulación TA Luft. Esta prueba también ha sido aprobada sin limitaciones para los combustibles como el carbón, gas natural, gas de fermentación, gasóleo, madera y basura doméstica en los tipos de instalaciones con caldera de vapor, motores a gas y diésel, turbinas a gas y combustión de desechos.
- En EE.UU. testo 350 cumple con las performance specifications para la medición de NO_x, CO y O₂ así como los requerimientos del conditional test method CTM-030 y 034. Además está autorizado para el empleo como instrumento de copia de seguridad en caso de fallo de un dispositivo de medición fijo.

La exactitud de medición según la prueba del instituto TÜV para la norma DIN 33962 se garantiza para todos los componentes por debajo del 1,5 % del valor final del RM (tab. 39) y de esta forma con el factor 3 aún mayor que lo requerido en la norma DIN 33962, es decir (5 %).

5.3 Vista general de los analizadores industriales de combustión Testo

La gama de instrumentos para las aplicaciones industriales abarca en este momento tres tipos:

1) testo 340 –

Analizador portátil

El testo 340 es un analizador portátil manual para el análisis industrial de los gases de la combustión.

Un diseño compacto ofrece una excelente movilidad y es ideal para

usos internacionales, la puesta en marcha y las mediciones de control de las instalaciones de combustión y generación de energía gracias a la tecnología fiable. Además de un sensor de O_2 es posible dotar otros tres sensores (CO , CO_{bajo} , NO , NO_{bajo} , NO_2 o SO_2) según sus exigencias prácticas. El testo 340 tiene una medición integrada de caudal / presión diferencial, dilución individual (factor x 5) y dilución de todos los sensores (factor x 2).



Figura 42: testo 340 – Analizador de combustión para la industria con accesorios

2) testo 350 – Sistema portátil de instrumentos de medición

El testo 350 es un sistema portátil de instrumentos de medición para el análisis de la combustión industrial. Está compuesto de hasta 16 cajas analizadoras y una Unidad de Control. La(s) caja(s) analizadora(s) testo 350 pueden monitorearse con la Unidad de Control testo 350, pero también con un PC (vía USB, Bluetooth o CANCase) o una App Android. El testo 350 se ha desarrollado especialmente para las exigencias prácticas en la medición de emisiones industriales por ejemplo para la medición de emisiones en motores

industriales, quemadores, turbinas de gas, procesos térmicos, etc. Además de un sensor de O_2 es posible dotar otros cinco sensores (CO , CO_{bajo} , CO_2 , NO , NO_{bajo} , NO_2 , SO_2 , H_2S o C_xH_y) según sus exigencias prácticas.

Asimismo, el testo 350 tienen una medición integrada de caudal / presión diferencial, entrada para sonda de temperatura tipo K NiCr-Ni y tipo S, Pt10Rh-Pt, batería, una sonda de aire de combustión integrada (NTC), una entrada para disparador, dilución individual factor ($\times 2$, $\times 5$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 40$) y dilución de todos los sensores (factor $\times 5$).

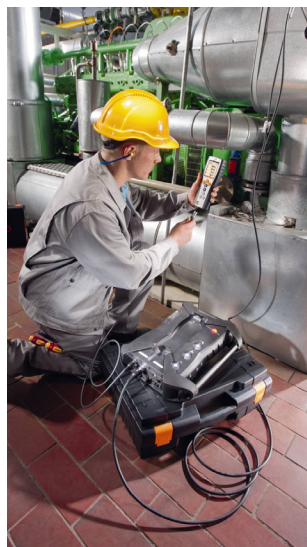


Figura 43: testo 350 – Sistema de analizadores de combustión para la medición industrial de emisiones

3) **testo 350 MARITIME – Analizador de combustión para motores diésel de embarcaciones**

El testo 350 MARITIME es una analizador de combustión portátil, apto para el uso marítimo y certificado¹⁾ para la medición de emisiones en motores diésel de embarcaciones. El testo 350 MARITIME puede utilizarse para los siguientes exámenes de verificación a bordo según el NO_x Technical Code 2008:

- Para la medición directa y la supervisión abordo (p. ej. exámenes periódicos e intermedios), para

procedimientos de revisión y medición simplificados cuando se han ejecutado cambios como reajustes en el motor.

- Comprobación de los valores límite de NO_x fijados en MARPOL anexo VI. Estos se revisan, por ejemplo, en controles de NO_x oficiales. Además, la medición de NO_x también sirve para demostrar la reducción de NO_x requerida en zonas especiales regionales con diversas obligaciones tributarias para NO_x (como en Noruega).

El testo 350 MARITIME está equipado con seis sensores de gas (O₂, CO,



Figura 44: testo 350 MARITIME – Analizador de combustión para motores diésel de embarcaciones



5. Tecnología del análisis de gases de Testo

CO₂-(IR), NO, NO₂, SO₂) y también incluye una preparación de gas, una ampliación del rango de medida para contacto único SO₂, válvula de aire fresco para la medición continua, sensor de presión diferencial, entrada para la sonda de temperatura tipo K NiCr-Ni y tipo S Pt10Rh-Pt, conexión de bus de datos Testo, batería, sonda de aire de combustión integrada (NTC), entrada de disparador, memoria

de datos de medición e interfaz USB.

1) Certificado: Certificado Germanischer Lloyd (DNV GL) n° 37811 - 12 HH, según el convenio internacional MARPOL anexo VI y Código Técnico sobre los NOx 2008 y certificado Nippon Kaiji Kyokai (Class NK) n° 14DD001B. Además, el testo 350 MARITIME cumple con la normativa sobre equipación de embarcaciones y tiene la distinción de la marca de conformidad MED (Maritime Equipment Directive) 0098/12.

Componente del gas	testo 340	testo 350	testo 350 MARITIME
O ₂	0 ... +25 vol. %	0 ... +25 vol. %	0 ... +25 vol. %
CO _{bajo}	0 ... 500 ppm	0 ... 500 ppm	
CO	0 ... 10 000 ppm	0 ... 10 000 ppm	0 ... 3 000 ppm
CO _{alto}	700 ppm ... 20 000 ppm	2 500 ... 50 000 ppm	
CO ₂ (IR)		0 ... 50 vol. %	0 ... 40 vol. %
SO ₂	0 ... 10 000 ppm	0 ... 25 000 ppm	0 ... 3 000 ppm
H ₂ S		0 ... 1 500 ppm	
NO _{bajo}	0 ... 300 ppm	0 ... 300 ppm	
NO	0 ... 8 000 ppm	0 ... 20 000 ppm	0 ... 3 000 ppm
NO ₂	0 ... 1 000 ppm	0 ... 2 500 ppm	0 ... 500 ppm
C _x H _y			
Metano		100 ... 40 000 ppm	
Propano min		100 ... 21 000 ppm	
Butano min		100 ... 18 000 ppm	
Número de sensores	2 hasta 4	2 hasta 6	6

Tabla 39: Rango de medición y grados de exactitud

5.4 Resumen de los accesorios

Con los accesorios correspondientes, el analizador (instrumento de medición manual o caja analizadora) se convierte en un dispositivo de medición apto para el funcionamiento. La siguiente tabla muestra las diferentes categorías como los accesorios que abarcan desde la extracción de muestras inevitable pasando por las posibilidades adicionales para la emisión de datos hasta las ampliaciones y los complementos para el servicio bajo condiciones especiales.

Los accesorios son, en parte, específicos para determinados tipos de instrumentos; pero también para todo tipo de aplicaciones. Para más detalles se debe consultar la documentación del analizador.

Accesorios para la extracción y la preparación de muestras

La extracción y la preparación de muestras son decisivas para la veracidad y exactitud de los resultados de medición y para la vida útil del instrumento de medición. Principalmente se deben excluir dos fuentes de errores:

- el deterioro del instrumento de medición causado por los componentes de los gases de la combustión (componentes agresivos y suciedad) y
- la distorsión de los resultados de medición debido a la distancia indefinida de los componentes de gas a través de reacciones con la humedad de los gases de la combustión antes de la medición

Para ello consulte las explicaciones en el capítulo 3.1.2.

5. Tecnología del análisis de gases de Testo

Sondas de combustión

Según los campos de aplicación, Testo SE & CO. KGaA ha desarrollado sondas de combustión innovadoras que pueden emplearse en combinación con los analizadores de combustión testo 340 y testo 350 a temperaturas bastante elevadas, con condensados agresivos, altas concentraciones de polvo o grandes cargas mecánicas.

Sonda de muestreo de gases estándar modular



Las sondas de muestreo de gas estándares están disponibles para diferentes rangos de temperatura (500 °C/1.000 °C), en varias longitudes (335 mm/700 mm) y también con un prefiltro para gases de la combustión polvorientos.

Sonda de combustión para motores industriales



La sonda de combustión para motores industriales son ideales para

la medición en motores industriales fijos (p. ej. motores de gas / motores diésel). Estas se han fabricado completamente con metal para prevenir la fundición de la empuñadura debido al calor irradiado.

Sonda de SO₂ bajo



El set con o sin calefacción de SO₂ bajo es ideal especialmente para la medición después de tratamientos posteriores de gases de la combustión (p. ej. en lavadores) para poder determinar la eficiencia de la reducción de las concentraciones de SO₂. De esta forma se mide la concentración de SO₂ en el gas de entrada y en el gas puro, por ejemplo.

Sonda industrial de muestreo de gases



La sonda industrial de muestreo de gases calentable y no calentable se utiliza para mediciones con altas temperaturas, cargas de polvo elevadas o en gas de combustión húmedo. Mediante accesorios, las sondas pueden adaptarse

individualmente a la tarea de medición.

Preparación de gas

En las mediciones en gases de la combustión húmedos, los valores medidos de SO_2 y NO_2 serían muy bajos sin las medidas adecuadas. La causa de esto es la reacción de estos componentes como el agua que surge debido a la condensación de la humedad de los gases de la combustión durante el enfriamiento. En este condensado están contenidas algunas proporciones significativas e indefinidas (!) del SO_2 y NO_2 las cuales

no pueden medirse en el gas.

Para la prevención o la cuantificación de este efecto se utiliza la preparación compacta de gas (figura 45) o los refrigeradores integrados en los instrumentos, los cuales enfrían el gas mediante un refrigerador Peltier y lo secan al mismo tiempo. A través del condensado se pierde aún una parte de SO_2 y NO_2 , pero este está definido por la temperatura de refrigeración ocasionando que la próxima medición del gas (seco) suministre los valores reales con respecto a la temperatura de refrigeración.

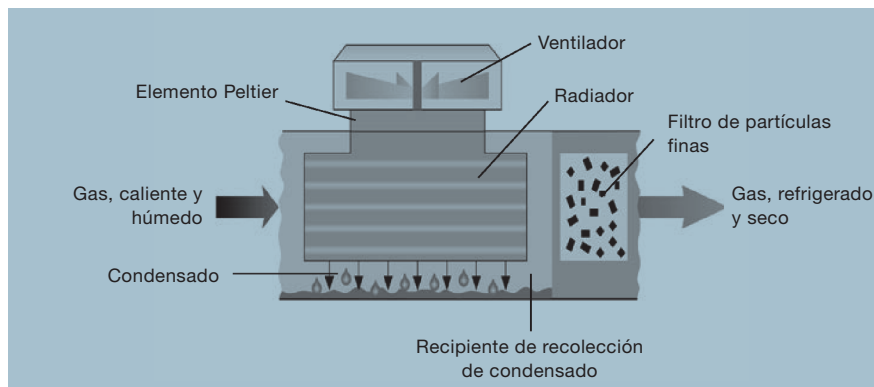


Fig. 45: Preparación de gas de Testo, esquema

Tuberías de gas especiales

La formación de condensado y, por consiguiente, la influencia de las concentraciones de SO_2 y NO_2 también depende del tiempo disponible para una reacción. Altas velocidades de flujo ejercen una influencia positiva en este sentido. Para ello, Testo ha desarrollado y patentado una novedad para la que no se necesita una calefacción de la manguera. La manguera conductora de gas tiene un diámetro pequeño que provoca altas velocidades del gas. El material utilizado es PTFE conocido por sus absorciones mínimas.

Soluciones de sistema

Un sistema completo para la extracción y la preparación de muestras está compuesto por una sonda de muestreo de gases, tuberías de gas (tubos o mangueras), filtros gruesos y finos así como un dispositivo de refrigeración. Testo ha acondicionado sus accesorios ente sí para la extracción de muestras de modo que se puedan diseñar soluciones de sistema perfectas mediante la combinación de módulos. En parte, los instrumentos ya vienen con unidades para la preparación de gas como el testo 350 con su refrigerador de gases a medir incorporado.

Sede principal de Testo

Testo SE & Co. KGaA
Testo-Strasse 1, D-79853 Lenzkirch,
Alemania
Tel.: +49 7653 681-700
Fax: +49 7653 681-701
info@testo.de
www.testo.com

Filial en España

Instrumentos Testo S.A.
Zona Industrial, c/B, número 2
D-08348 Cabrils (Barcelona)
Tel.: 93 753 95 20
Fax: 93 753 95 26
info@testo.es
www.testo.es

Encontrará las direcciones las filiales
y distribuidores en todo el mundo en
www.testo.com

Índice alfabético

Aire de combustión	8, 11, 16	Cremación	47
Amoniaco	22, 37, 52	Descongestión térmica	98
Análisis de proceso	65	Diagrama de combustión	15, 31
Analizador de gases, general	65 s.	Dióxido de azufre	20
Analizadores de gases (Testo)	135 s.	Dispositivos extractivos	66
Antorchas	126	Dispositivos in situ	77
Aplicaciones	79 s.	Instrumentos portátiles	69
Atmósfera reducida	13	EE.UU., legislación	48 s.
Balance energético	24	Efecto de dilución	17
Bancos de pruebas de motor	130	Efecto invernadero	7
BlmSchG, BlmSchV	39 s.	Electrolito sólido	68, 70, 77
Calibración	64	Emisión, control de emisiones	29, 38
Carbono total (C total)	21	Exactitud de medición, Testo	138
Central térmica de carbón	88 s.	Fabricación de ladrillos	104 s.
Clean Air Act	38, 48	Formas de energía	5
Coeficiente de exceso de aire, exceso de aire	11f s., 14	Fórmula Siegert	25
Combustible, también composición	10	Gas cero	64
Combustión	5 s.	Gas de prueba	64
Combustión de desechos	21, 44, 94 s.	Gases de combustión	8, 19 s.
Combustión de gas	82 s.	Gases de combustión	19 s.
Combustión de lecho fluido	52	Grado de eficiencia	23 s.
Combustión de residuos	127	Hidrocarburos	21, 76
Combustión ideal	11	Información sobre la concentración	54 s.
Combustión industrial	35	Inmisión	38
Combustión latente de desechos	97 s.	Instalación de combustión de proceso	34, 123
Combustiones de gasóleo	86 s.	Instalación de combustión de sólidos	80 s.
Condensado	26	Instalación de turbinas de gas	84 s.
Condiciones estequiométricas	11, 16	Instalaciones de combustión	8 s.
Condiciones normalizadas	55	Instalaciones de combustión de grandes dimensiones	45
Conductos calentables	27 s.	Instalaciones de combustión pequeñas	41
Contenido de energía	6	Insuficiencia de aire	15, 31 s.
Contenido de humedad	17, 26, 62	Límite de explosión	37
Control del proceso	34	Límite de ignición	37
Conversiones, de concentraciones	55 s.	Limpieza de los gases de combustión	50
Coquerías	117 s.		

Medición continua	43 s.	Prueba de aptitud	47, 132 s.
Medición de humedad	78	Punto de rocío	26ff
Medición individual	43	Refinerías	124 s.
Mediciones de seguridad	37	Refrigerador de gases a medir	27, 61, 69, 142
Método de conductividad térmica	75	Refrigerador Peltier	28, 141
Método de desnitrificación	52	Regulación TA Luft	41 s.
Método de desulfuración	53	Rentabilidad	12
Método de extracción de polvo	51	Sensibilidad de interferencia	62 s.
Método de infrarrojos	73	Sensor, sistema de sensores	65
Método de ionización de llama (FID)	68, 77	Sensores electroquímicos	70
Método de oxidación catalítica	37, 75 s.	Sonda de óxido de circonio	77
Método de quimioluminiscencia	74	Sondas de muestreo de gases	140
Método paramagnético	75	Sulfuro de hidrógeno	21
Método SCR	20, 22, 52	Suministro de aire por etapas	20, 52
Método UV	74	Supervisión de las emisiones (EE.UU.)	48
Nitrógeno, óxidos de nitrógeno	19ff	Testo, datos de instrumentos	138
Optimización de la combustión	31 s.	Testo, la empresa	131
Oxidación	7	Testo, vista general de instrumentos	135 s.
Óxidos de carbono	19 s.	Testo, vista general de los accesorios	139
Pérdida de gases de combustión	23 s.	Toma de muestras	60 s.
Planta de ciclo combinado	93	Tratamiento superficial	36, 121
Planta de cogeneración	91	Tratamiento térmico superficial	36, 121
Plantas de sinterización	111	Valor calorífico, caldera de condensación	23 s.
Poder calorífico	23	valor de emisividad	41
Polvo	8 s., 22	Valor de referencia	16, 18
ppm	54 s.	Valor referente a la concentración máxima	19 s.
Preparación de menas	111	Velocidad de flujo	27, 142
Principios de medición para gases	70 s.	Volumen del gas	16
Producción de acero	115 s.		
Producción de aluminio	119 s.		
Producción de cal	109 s.		
Producción de cemento	100 s.		
Producción de cerámica/porcelana	102 s.		
Producción de hierro	113 s.		
Producción de vidrio	106 s.		

Instrumentos Testo S.A.
Zona Industrial, c/B, nº 2 · 08348 Cabrils
(Barcelona)
Teléfono 93 753 95 20
Fax 93 753 95 26
E-Mail info@testo.es

Síganos en:

www.testo.es