Testo
Whitepaper
testo 340 und testo 350

Be sure. testo

Einfluss- und Messgrößen bei Brenner- und Kesselanlagen und ihre Bedeutung für die Optimierung von Wirkungsgrad und Emissionen.



www.testo.de

Wärmeerzeugung in Brenner- und Kesselanlagen

Bei der Stromerzeugung, bei der Beheizung von Gebäuden, bei der Herstellung von Zement und Glas und bei vielen weiteren industriellen Anwendungen stellen Kesselanlagen die benötigte thermische Energie zur Verfügung. Mit Brennstoffen wie Kohle, Öl oder Gas sind sie in der Lage, große Energiemengen mit einem guten Gesamtwirkungsgrad zu erzeugen. Da bei der Wärmeerzeugung große Mengen an Brennstoff eingesetzt werden und durch die Verbrennung große Mengen an Abgasen entstehen, kommt es bei der Einstellung von Kesselanlagen auf einen hohen Wirkungsgrad bei möglichst niedrigen Schadstoffemissionen an – besonders, weil die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte für Schadstoffe wie NO_X, CO und CO_2 immer strenger werden.

Aus diesem Grund werden bei der Inbetriebnahme und Wartung von Kesseln und Brennern sowie bei offiziellen Messungen die Emissionswerte ermittelt. Anhand dieser Daten kann die Wirtschaftlichkeit der Anlage und die Einstellung des Brenners umfassend beurteilt werden. Um die Effizienz der Kesselanlage zu optimieren und um die Emissionen an die gesetzlichen Anforderungen anpassen zu können, ist es wichtig, die Grundprinzipien des Verbrennungsprozesses zu kennen und den Einfluss der einzelnen Mess- und Regelgrößen auf Leistung und Schadstoffausstoß zu verstehen.



Abb. 1: Kesselanlagen liefern die notwendige thermische Energie für zahlreiche Prozesse in der Energieerzeugung, in der Gebäudeklimatisierung und in der chemischen Industrie.

Der Verbrennungsprozess in Brenner- und Kesselanlagen

Für die Wärmeerzeugung in Heizkesselsystemen werden Kohlenstoff oder Kohlenwasserstoff-Verbindungen mit dem Sauerstoff der Luft verbrannt. Die Verbrennung findet in einem abgeschlossenen Feuerraum statt. Mittels eines Wärmetauschers wird die entstehende thermische Energie an ein Wärmeträgermedium übertragen und an ihren Bestimmungsort geleitet. Feste Brennstoffe werden in einem Festbett, einem Wirbelbett oder in einer Flugstaubwolke verbrannt, flüssige Brennstoffe werden über einen Brenner als Nebel in den Feuerraum gesprüht, und gasförmige Brennstoffe werden bereits im Brenner mit der Verbrennungsluft gemischt.

Die übrigen Anlagenkomponenten sorgen für die Zuführung und Verteilung des Brennstoffs, für die Übertragung und Ableitung der Wärme sowie für die Abführung von Verbrennungsgasen und Verbrennungsrückständen wie Asche und Schlacke.
Bei der Verbrennung entstehen zahlreiche Substanzen, die als Abgas aus dem Feuerraum abgeleitet werden. Den größten Teil des Abgases oder Rauchgases machen Wasserdampf und Kohlendioxid (CO_2) aus, die als Reaktionsprodukte von Brennstoff und Verbrennungsluft entstehen. Daneben enthält das Rauchgas je nach Luftzufuhr Stickoxide (NO_X) oder Kohlenmonoxid (CO) und unvollständig verbrannte Brennstoffanteile. Durch Verunreinigungen der Brennstoffe können auch Schwefelwasserstoff, Schwefeloxide, Flusssäure (HF) und Salzsäure (HCl) im Rauchgas enthalten sein, zudem sind Ruß, Schwermetalle und Stäube häufig zu finden.

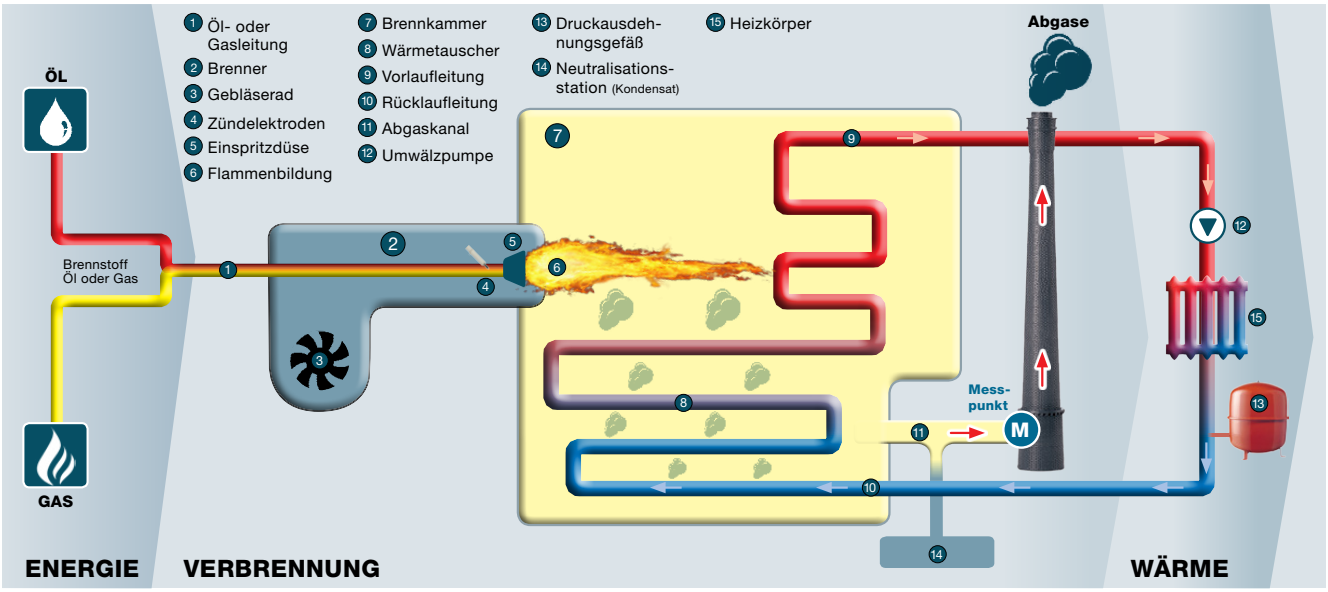


Abb. 2: Der typische Verbrennungsprozess in einer Kesselanlage.

Chemische Reaktionen beim Verbrennungsprozess
Bereits die Verbrennungsluft setzt sich aus mehreren Substanzen zusammen. Sie enthält vor allem Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2), einen veränderlichen Anteil an Wasserdampf sowie Spuren von Kohlendioxid (CO_2), Wasserstoff (H_2) und Edelgasen. Mit Ausnahme des Sauerstoffs und geringer Teile des Stickstoffs finden sich diese Bestandteile auch im Abgas wieder.

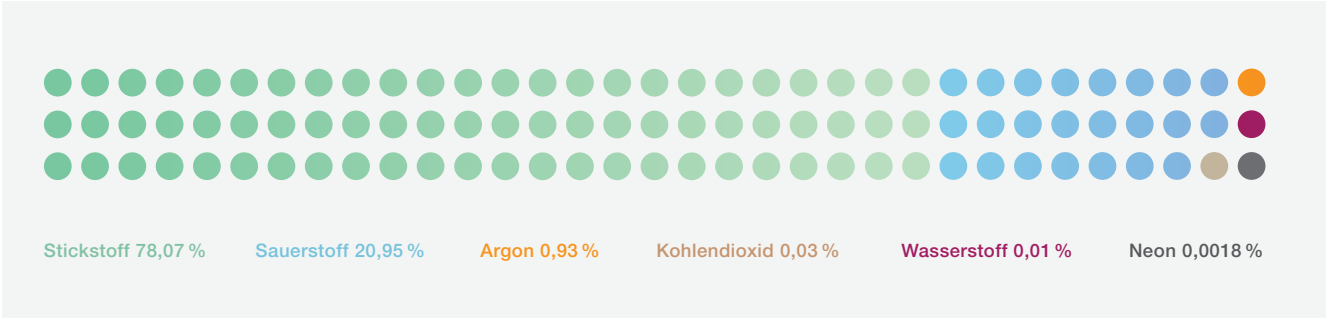


Abb. 3: Die Zusammensetzung reiner, trockener Luft auf der Erdoberfläche.

Wie viel Sauerstoff benötigt wird, um einen bestimmten Energieträger zu verbrennen, lässt sich nach den Rechenregeln der Stöchiometrie genau berechnen. Ein Beispiel: Für die vollständige Reaktion mit einem Methan-Molekül (CH_4) werden zwei Sauerstoff-Moleküle benötigt; aus diesen entstehen zwei Wassermoleküle und ein Kohlendioxid-Molekül.

$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

In der Praxis reicht diese ideale und gleichzeitig minimale Sauerstoffmenge für eine vollständige Verbrennung allerdings nicht aus. Da die Brennstoffe immer zu einem gewissen Grad verunreinigt sind und Brennstoff und Sauerstoff nur unvollkommen vermischt werden können, muss dem Verbrennungsprozess in Industriekesselanlagen mehr Sauerstoff und damit mehr Brennluft zugeführt werden, als es von der Stöchiometrie her erforderlich wäre. Diese zusätzliche Luftmenge nennt man Luftüberschuss.

Besonders wichtig für die Beurteilung von Verbrennungsvorgängen ist das Luftverhältnis bzw. die Luftverhältniszahl λ (gesprochen Lambda). Sie beschreibt das Verhältnis der tatsächlich erforderlichen zur stöchiometrisch berechneten Luftmenge. Die Luftverhältniszahl für einen bestimmten Verbrennungsprozess lässt sich anhand der Abgaskomponenten Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2) und Sauerstoff (O_2) mit den folgenden Formeln bestimmen.

$$\lambda = 1 + \frac{O_2}{21 - O_2}$$

Berechnung der Luftverhältniszahl anhand des O_2-Anteils im Rauchgas.

Da bei modernen Feuerungsanlagen der Betrieb bei Luftüberschuss üblich ist, wird heute in der Regel die eindeutige Berechnung des Luftverhältnisses über den O_2-Gehalt bevorzugt.

Die Bestimmung von λ anhand einer CO_2-Messung hat den Vorteil, dass sich Kohlendioxidanteile im Rauchgas unter allen Verbrennungsbedingungen feststellen lassen. Der CO_2-Gehalt ist aber nicht eindeutig und reicht allein nicht aus, um festzustellen, ob der Verbrennungsprozess unter Luftmangel oder unter Luftüberschuss abläuft.

Dazu muss zusätzlich gemessen werden, ob CO oder O_2 im Rauchgas enthalten ist. Der in die Formel einzusetzende Wert CO_2max ist vom verwendeten Brennstoff abhängig.

$$\lambda = \frac{CO_2 max}{CO_2}$$

Brennstoff	CO_2max
Heizöl	15,4
Erdgas	11,9
Flüssiggas	13,9
Koks und Holz	20,0
Briketts	19,3
Braunkohle	19,2
Steinkohle	18,5
Stadtgas	11,6
Prüfgas	13,0
Torf	15 – 30

Berechnung der Luftverhältniszahl anhand des CO_2-Anteils im Rauchgas. Der Wert CO_2max ist als Materialkonstante vom Brennstoff abhängig.

Der Einfluss der Luftverhältniszahl auf den Verbrennungsprozess

Erfahrene Servicetechniker wissen: Für einen weiten Regelbereich, eine stabile Verbrennung, eine optimale Brennstoffausnutzung und möglichst niedrige Emissionswerte ist die optimale Versorgung mit Luft entscheidend. Warum das so ist, zeigt das folgende Diagramm:

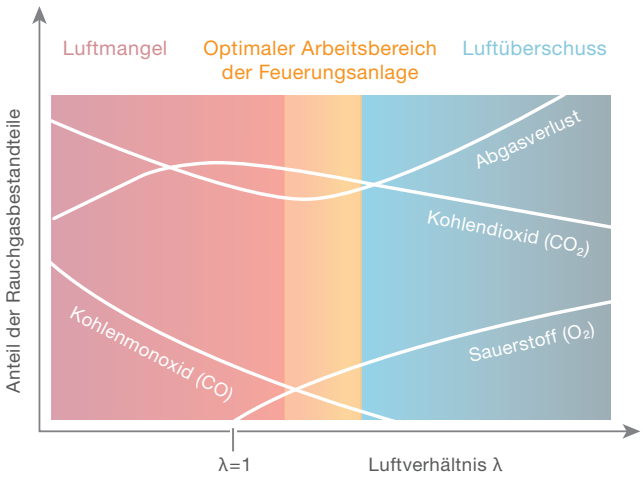


Abb. 4: Die Anteile der Rauchgasbestandteile beim Verbrennungsprozess in einer Kesselanlage in Abhängigkeit vom Luftverhältnis.

Wird die Anlage unter Luftmangel betrieben, steht nicht genug Sauerstoff zur Verfügung, um den Brennstoff vollständig zu verbrennen. Dadurch sind im Rauchgas Kohlenmonoxid (CO), Ruß und Brennstoffreste enthalten, die über den Kamin in die Umwelt gelangen. Außerdem ist die Energieausnutzung verringert, da nicht die gesamte, im Brennstoff gespeicherte Energie durch die Verbrennung freigesetzt wird.

Läuft der Kessel dagegen unter Luftüberschuss, wird der Brennstoff vollständig verbrannt. Überschüssige Luft führt aber auch zur vermehrten Bildung von Stickoxiden (NO_X), außerdem sinkt der Wirkungsgrad, da die Verbrennungstemperatur durch die Verdünnung mit kühler Außenluft abgesenkt wird. Als Faustregel führt eine Erhöhung der Luftmenge um 10 Prozent zu einer Steigerung des Brennstoffverbrauchs um 1 Prozent.

Für jeden Verbrennungsprozess gibt es also ein optimales Verhältnis von Brennstoff- und Luftzufuhr. In diesem Bereich arbeitet die Feuerungsanlage mit stabiler Flamme, bestem Wirkungsgrad und geringsten Emissionen. Die Herausforderung für den Servicetechniker besteht darin, das optimale Luftverhältnis zu bestimmen und die Anlage daraufhin einzustellen.

	Luftmangel	Optimaler Arbeitsbereich der Feuerungsanlage	Luftüberschuss
Vorteile	• Keine Emission von Stickoxiden		• Vollständige Verbrennung des Brennstoffs • Kein Ruß und keine Brennstoffreste im Rauchgas • Sicherer Betrieb
Nachteile	• Unvollständige Verbrennung des Brennstoffs und dadurch verringerte Energieausnutzung • Kohlenmonoxid, Ruß und Brennstoffreste im Rauchgas • Unsicherer Betrieb bis hin zum Erlöschen der Brennerflamme		• Geringerer Wirkungsgrad durch Wärmeverluste • Anstieg der Emission von Stickoxiden (NO_X)
Kohlenmonoxid (CO)	Kohlenmonoxid (CO) entsteht, weil nicht genug Sauerstoff für die vollständige Oxidation zu CO_2 zur Verfügung steht.		Da genügend Sauerstoff zur Verfügung steht, wird entstehendes CO vollständig zu CO_2 weiteroxidiert.
Kohlendioxid (CO_2)	Bei zunehmendem Sauerstoffanteil nimmt durch die Oxidation zu CO_2 der CO-Gehalt ab. In gleichem Maße nimmt die CO_2-Konzentration zu. Dieser Vorgang ist etwas über $\lambda = 1$ abgeschlossen, und der CO_2-Anteil erreicht sein Maximum.		Der CO_2-Gehalt nimmt bei Werten oberhalb von $\lambda = 1$ wieder ab, jedoch nicht nur durch chemische Reaktion, sondern als Verdünnungseffekt durch die zunehmende Menge an Verbrennungsluft, die selbst praktisch kein CO_2 einbringt.
Sauerstoff (O_2)	Der Sauerstoff (O_2) wird durch die Verbrennung vollständig aufgezehrt und ist im Rauchgas kaum oder gar nicht nachweisbar.		Bei zunehmender Luftzufuhr steigt der Sauerstoffanteil im Rauchgas an. Durch die überschüssige Luft wird der Verbrennungsprozess abgekühlt, und die Energieeffizienz der Anlage sinkt.

Vor- und Nachteile bei nicht stöchiometrischer Verbrennung.

Herausforderungen bei der Einstellung von Kesselanlagen

Das Anfahren der Kesselanlage

Kesselanlagen in industriellen Anwendungen arbeiten in der Regel im konstanten Dauerbetrieb, und die kritische Phase des Anfahrens tritt entsprechend selten auf. Der Anfahrvorgang ist schwierig zu regeln, denn die Entzündung des Luft-Brennstoff-Gemischs führt zu einer plötzlichen Vergrößerung des Gasvolumens und damit zu einem schlagartigen Druckanstieg im Feuerraum. Dieser Druckanstieg verursacht nicht nur Volumenverschiebungen in den Heizgas- und Abluftkanälen, sondern führt auch zu einer Verringerung des Gebläsedrucks und damit der geförderten Luftmenge. Während des Anfahrens sind dadurch vermehrt Kohlenmonoxid, Ruß und unverbrannte Brennstoffe im Rauchgas enthalten.

Besonders kritisch wird der Anfahrprozess, wenn der Anfahrdruck den maximal erreichbaren Gebläsedruck übersteigt. Bei einem verstärkten Rückgang des Luftdurchsatzes reduziert sich der Brennstoffabbrand und damit auch der Druck im Feuerraum. Bei der daraufhin wieder einsetzenden vollen Luftförderung steigen erneut Brennstoffabbrand und Druck im Kessel an – der Brenner pulsiert. Um ein zufriedenstellendes Anfahrverhalten zu erreichen, sind meist Veränderungen am Brenner erforderlich. Diese reichen vom Austausch der Düse über die Reduzierung der Brennerleistung bis zur Veränderung des Gebläserads.

Bei einem gut eingestellten Anfahrverhalten klingen die überhöhten Schadstoffemissionen in der Regel aber schnell ab, wenn die Feuerungsanlage vom Anfahr- in den Normalbetrieb übergeht.

Optimierung des Verbrennungsprozesses anhand der Luftzahl

Aus den Überlegungen zum Verbrennungsprozess im Allgemeinen und zur Luftverhältniszahl im Speziellen leiten sich unmittelbar die Mess- und Regelungsaufgaben für den Servicetechniker ab:

- Eine optimale Luftzahl und damit ein optimales Verhältnis von Brennstoff- und Luftzufuhr sind entscheidend, um einen großen Betriebsbereich, eine stabile Flamme und den besten Wirkungsgrad bei geringsten Emissionen zu gewährleisten.
- Um eine optimale Luftzufuhr zu erreichen, müssen die Ventilatorleistung, die Gebläse und die Luftkanäle aufeinander abgestimmt sein und regelmäßig in ihrer Funktion kontrolliert werden.

Wie das Brennstoff-Luft-Gemisch im Detail optimal eingestellt werden kann, ist je nach Kesselhersteller, Brennstoffart und Regelschema unterschiedlich. Einige Brenner steuern die Luftmenge, die in den Kessel eingebracht wird, andere die Kraftstoffmenge und noch andere lassen die Einstellung beider Parameter zu. In jedem Fall ist es für einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb wichtig, die genaue Sauerstoffmenge im Prozess zu kennen.

Brenner- und Kesselanlagen effizient einstellen

Abgas-Analyse mit testo 340 und testo 350

Die Abgas-Analysegeräte testo 340 und testo 350 erfassen mit ihren Gassensoren alle Bestandteile des Rauchgases, die für eine umfassende Analyse des Verbrennungsprozesses und für die optimale Einstellung der Anlage notwendig sind. Dank der integrierten Drucksensoren können auch zusätzliche Messwerte wie der Luftdurchsatz, der Schornsteinzug oder der Differenzdruck zwischen Kessel und Raum erfasst werden. Die beiden Modelle unterscheiden sich in Aufbau, Ausstattung und Einsatzzweck:

testo 340 ist ein Handgerät für den effizienten Service bei der Inbetriebnahme und Wartung von Kesselanlagen. Mit 4 Gassensoren – einem O_2-Sensor und drei weiteren, frei wählbaren Sensoren für CO, CO_{low}, NO, NO_{low}, NO_2 und SO_2 – lassen sich alle relevanten Bestandteile des Rauchgases zuverlässig analysieren und der Verbrennungsprozess so einstellen, dass das bestmögliche Verhältnis von Brennstoff- und Luftzufuhr erreicht wird. Mit Schlauchverlängerungen bis zu 7,8 m können alle Parameter komfortabel eingeregelt werden, auch wenn die Messstelle weiter von Brenner und Luftzuführung entfernt ist.

testo 350 besteht aus einer Control Unit und einer Analysebox und ist mit einer umfangreichen Gasaufbereitung die erste Wahl für hochpräzise und lange andauernde Abgasmessungen. Dank Gaskühler, Kondensatfalle und Verdünnung erfüllt das Abgas-Analysesystem testo 350 in vielen Ländern die Voraussetzungen für offizielle Emissionsuntersuchungen. Insgesamt 6 Gassensoren können eingesetzt werden und bieten zusätzliche Messmöglichkeiten für Schwefelwasserstoff (H_2S), Kohlenwasserstoffe (C_XH_Y) und Kohlendioxid (CO_2) mittels nichtdispersiver Infrarotsensorik (NDIR). Control Unit und Analysebox werden per Bluetooth gekoppelt. Dank der großen Reichweite kann der Servicetechniker alle Analysewerte unabhängig vom Messort verfolgen. So sieht er unmittelbar, welche Auswirkungen seine Einstellungen an der Luftzufuhr oder am Brenner auf die Emissionen der Feuerungsanlage haben.



Das Abgas-Analysegerät testo 340 für effiziente Servicemessungen

Das Abgas-Analysesystem testo 350 für hochpräzise Emissionsmessungen

Echte NO_X-Messungen – essenziell für eine korrekte Brennereinstellung

Stickoxid-Emissionen sind essenziell für eine korrekte Brennereinstellung, außerdem werden sie vom Gesetzgeber streng reguliert. Das Abgas-Analysesystem testo 350 kann mit Sensoren für NO, NO_{low} und NO_2 ausgestattet werden, und zusätzlich sorgen das integrierte Peltier-Element zur Trocknung, die automatische Kondensatpumpe und die teflondotierten Gasentnahmeschläuche für eine optimale Gasaufbereitung und eine hohe Messgenauigkeit. Damit erfüllt testo 350 die Voraussetzungen, die bei vielen gesetzlich vorgeschriebenen Messungen gefordert sind.

NDIR-CO_2-Messungen – perfekt für Beton, Glasproduktion, Treibhausgase und vieles mehr

Bei der Herstellung von Beton, Kalk, Stahl oder Glas gibt der CO_2-Gehalt nicht nur Auskunft über den Verbrennungsprozess der Kesselanlage, sondern auch über den Produktionsprozess und die damit verbundene Produktqualität. Der CO_2-Sensor des testo 350 bestimmt den Kohlendioxid-Gehalt mittels nichtdispersiver Infrarotsensorik (NDIR) und erfüllt damit die strengen Anforderungen, die Messgeräte bei der Herstellung dieser Materialien erfüllen müssen. Dank der hohen Messgenauigkeit kann testo 350 mit einer O_2- und einer CO_2-Messzelle konfiguriert als NDIR-Referenzmessgerät eingesetzt werden.

Beheizte oder unbeheizte Messgasleitungen und Sonden?

Für beide Abgas-Analysegeräte stehen Messgasleitungen und Sonden in einer unbeheizten und in einer beheizten Variante zur Verfügung:

Die unbeheizten Messgasleitungen und Sonden sind durch den kompakten Aufbau, das geringe Gewicht und den Betrieb ohne externe Stromversorgung besonders geeignet, wenn Kurzzeitmessungen an vielen unterschiedlichen Messstellen durchgeführt werden sollen. Dank des geringen Totvolumens sprechen die Abgas-Analysegeräte zudem sehr schnell auf Veränderungen der Messgrößen an.

Die beheizten Varianten sind immer dann das Mittel der Wahl, wenn besonders hohe Genauigkeiten gefordert werden oder wenn Langzeitmessungen mit einer Messdauer zwischen einem Tag und mehreren Monaten durchgeführt werden sollen. Da Messgasleitung und Sonde auf eine Temperatur oberhalb des Abgastaupunktes gebracht werden, lagern sich Staubpartikel und Kondensat in den Gaswegen deutlich weniger an. Dadurch werden auch bei Langzeitmessungen hohe Messgenauigkeiten bei NO_2 und SO_2 erreicht.

Zusammenfassung

Bei Verbrennungsprozessen in Kesselanlagen ist das richtige Verhältnis von Brennstoff und Luft entscheidend für einen wirtschaftlichen und normkonformen Betrieb.

Um die größtmögliche Effizienz der Anlage zu erreichen und die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte für Stickoxide (NO_X), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2) einzuhalten, muss der Servicetechniker anhand der Einstellmöglichkeiten an Luftzuführung, Brenner und Rauchabzug das optimale Luftverhältnis einregeln.

Die Abgas-Analysegeräte testo 340 und testo 350 erfassen alle relevanten Rauchgaskomponenten und geben dem Techniker damit unmittelbar Rückmeldung auf alle seine Einstellungen. Dadurch lassen sich auch anspruchsvolle Mess- und Regelungsaufgaben schnell und zuverlässig durchführen.



Änderungen, auch technischer Art, vorbehalten.