

Optische Temperaturmessung in Feuerungsanlagen

von **Albert Book**

Im Rahmen gesetzlicher Bestimmungen und genehmigungsrechtlicher Auflagen werden die für die NO_x-Abscheidung im Abgas von Feuerungsanlagen mit einem NO_x-Reingaswert von <100 mg/Nm³ bei einem NH₃-Schlupf von <10 mg/Nm³ hohe Anforderungen gestellt. Um diese Anforderungen zu erfüllen, bedarf es der Ermittlung der Temperatur innerhalb des Kessels als Regelgröße für primäre und sekundäre Maßnahmen zur Schadstoffreduktion. Der Bericht erläutert die verschiedenen Messsysteme zur optischen Temperaturmessung in Feuerungsanlagen.

Die Ursachen der Entstehung von Stickoxiden sind der Gehalt an Stickstoff im Abfall sowie die zur Zerstörung der organischen Schadstoffe notwendigen hohen Verbrennungstemperaturen. Das Ziel von feuerungstechnischen Maßnahmen ist, schon während des Verbrennungsprozesses die Bildung von NO_x weitgehend zu unterdrücken. Um damit niedrige NO_x-Emissionen bei gleichzeitig vollständiger Verbrennung zu erzielen, ist eine möglichst lange Verweildauer der Partikel in der reduzierenden Primärzone und eine gute Vermischung mit der Verbrennungsluft in der Sekundärzone erforderlich. Zudem steigt der Druck auf die Betreiber von Kohlekraftwerken und thermischen Verbrennungsanlagen für Abfall, Ersatzstoffe und Biomasse, die Betriebskosten zu senken. Gleichzeitig ist es das Bestreben, den Wirkungsgrad des Kessels zu erhöhen und den Verschleiß der Ofenwandung und Wärmetauscher zu minimieren, um damit die Lebensdauer zu erhöhen.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen und Optimierung des Verbrennungsprozesses spielt die korrekte Erfassung und homogene Verteilung der Temperatur im Feuerraum eine entscheidende Rolle. Nach der Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) und der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) sind Abfallverbrennungsanlagen so einzurichten und zu betreiben, dass für die Verbrennungsgase, die bei der Verbrennung von Abfällen oder Stoffen entstehen, nach der letzten Verbrennungsluftzuführung eine Mindesttemperatur von 850 °C einzuhalten ist, um die Schadstoffemission unterhalb der zulässigen Grenzwerte zu halten. Bei der Verbrennung von gefährlichen Abfällen mit einem Halogengehalt von >1 % hat der Betreiber dafür zu sorgen, dass eine Mindesttemperatur von 1100 °C eingehalten wird. Der optimale Temperaturbereich, in dem eine spürbare NO_x-Reduktion erzielt wird, liegt abhängig von der Abgaszusammensetzung zwischen 850 und 1100 °C.

Letztendlich ist es das Ziel der Betreiber von Feuerungsanlagen, durch einen temperaturgeführten Regelprozess den Brennstoff vollständiger zu verbrennen, wenig Asche zu

produzieren, dabei gleichzeitig die Anforderung der Schadstoffemission zu erfüllen und möglich wenig Reduktionsmittel verwenden zu müssen. Zudem hat die Temperaturverteilung innerhalb eines Kessels einen erheblichen Einfluss auf den Verschleiß und die Lebensdauer. Bei einer zu hohen Temperatur besteht die große Gefahr, dass sich innerhalb kürzester Zeit Verschlackungen an den Wänden und Wärmetauschern absetzen. Neben den Effizienzverlusten aufgrund der Isolierwirkung können sich die Klumpen der Schlacke lösen und beim Herabfallen einen erheblichen mechanischen Schaden anrichten. Bei einer zu niedrigen Temperatur verringert sich die Geschwindigkeit zur Reduktion der Stickoxide. Dadurch wird das Ammoniak nicht vollständig aufgelöst: Es entsteht ein Ammoniakschlupf, der zur Bildung von Ammoniaksalzen führt. Dies erhöht den Verschleiß der Anlage durch Korrosion.

Temperaturmessung in Feuerungsanlagen

Die Temperaturmessung in Verbrennungsprozessen ist recht komplex. Die Auswahl der geeigneten Messmittel, die Positionierung der Messstellen und die Interpretation der Messergebnisse bei dem Zusammenspiel der Betriebszustände, dem Brennstoff, der Zufuhr von Verbrennungsluft und Reduktionsmittel stellt schon eine große Herausforderung an die Fachexperten zur Optimierung des Verbrennungsprozesses.

Vieles beruht auf empirischem Wissen und weniger auf physikalisch ableitbaren Beweisen. Schon allein die Herkunft des Brennstoffes und damit die Art und Zusammensetzung hat einen erheblichen Einfluss auf die Verbrennung.

Wenn dann auch noch eine unzulängliche und nicht verlässige Messtechnik zur Erfassung der Temperatur an den relevanten Messstellen eingesetzt wird, können auch mathematische Modelle und adaptive Regelungen nicht wirklich funktionieren.

Für eine regelungstechnisch solide Basis ist eine stabile und aussagekräftige Temperaturerfassung die Voraussetzung.

Messung mit Thermoelementen

Vielfach werden zur Temperaturmessung Thermoelemente eingesetzt, die die Temperatur im wandnahen Bereich von einigen Zentimetern erfassen. Diese entspricht jedoch nicht unbedingt der zentralen Temperatur großer Kessel mit Abmessungen von bis zu 20 x 20 m und insbesondere wenn die Wände mit

Wärmetauschern bestückt sind. Damit ist eine Aussage über die Temperaturverteilung innerhalb des Kessels unmöglich.

Ein weiteres Problem von Thermoelementen ist ein physikalisch bedingtes Altern und damit Driften der Elemente. Je nach Gastemperatur und Schadstoffanteil kann sich der angezeigte Messwert innerhalb von Wochen langsam verändern. Durch die Ausstattung von redundanten Messstellen und einem regelmäßigen Austausch der Sensoren wird versucht, dieses Problem zu minimieren. Damit fallen permanent Verbrauchskosten an.

Zudem verhindert die Trägheit der Thermoelemente mit einer Reaktionszeit von mehreren Minuten eine schnelle Reaktion auf kurzzeitige Temperaturänderungen. Entsprechend ist die Schwankungsbreite der Prozessregelung hoch.

Messung mit Pyrometern

Eine weitere Möglichkeit zur Temperaturmessung in einem Kessel ist der Einsatz von Pyrometern. Diese ermitteln aus der von einem Messobjekt emittierten Infrarotstrahlung die Temperatur anhand des Planck'schen Strahlungsgesetzes. Da die Einstellzeit von Pyrometern wenige Millisekunden beträgt, kann damit auch auf schnelle Temperaturänderungen reagiert werden. Moderne, auf Gleichlichttechnologie aufgebaute Geräte arbeiten ohne bewegte Teile. Sie sind daher verschleißfrei und quasi zeitlich unbegrenzt einsetzbar.

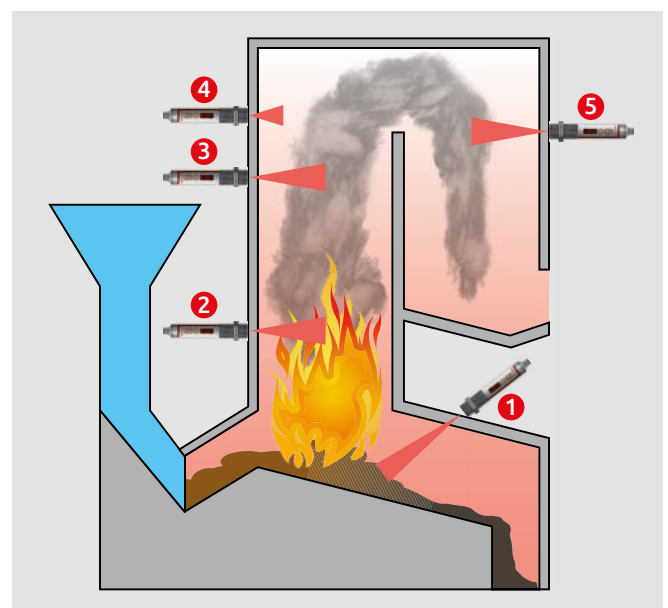


Bild 1 Prinzipielle Darstellung der unterschiedlichen Messstellen in einem Feuerraum
 1: Glutbett, 2: Flamme, 3: Abgas im Innern des Kessels,
 4: Abgas im wandnahen Bereich, 5: Abgas nach der letzten Verbrennungsluftzufuhr

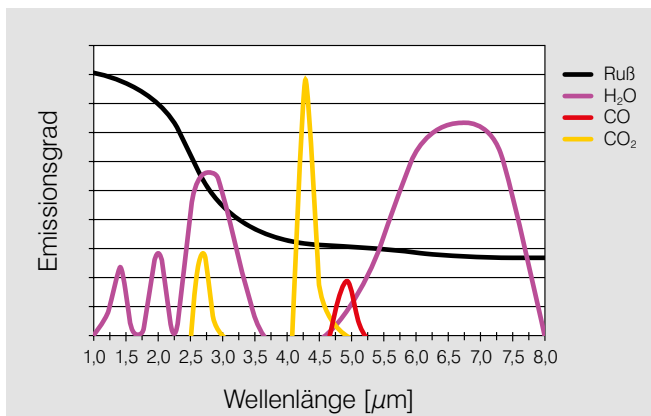


Bild 2 Strahlungscharakteristik von Verbrennungsgas

Je nach Anforderung und Bedarf werden Pyrometer für die verschiedenen Messstellen einer Feuerungsanlage von der Messung des Glutbettes, der Flammen, der heißen Rauchgase oder der Wandung eingesetzt (**Bild 1**). Zu beachten ist, dass je nach Messaufgabe unterschiedliche Pyrometertypen erforderlich sind.

Messung des Glutbettes

Bei der Messung des Glutbettes sind Pyrometer einzusetzen, die sich nicht durch das heiße Rauchgas im Sichtfeld zum Glutbett beeinflussen lassen. Die Geräte messen in einem sehr selektiven Wellenlängenbereich von $3,9 \mu\text{m}$. In diesem Bereich sind Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) transparent und beeinflussen den Messwert nicht (**Bild 2**).

Messung der Flammentemperatur

Zur optischen Messung der Temperatur von rußenden Flammen werden sogenannte Flammenpyrometer eingesetzt. Die Messung beruht auf dem Quotientenmessverfahren sprich die Infrarotstrahlung wird im nahen Infrarotbereich auf zwei Wellenlängen zeitgleich erfasst und daraus die Temperatur bestimmt. Ein komplexer Algorithmus in den Geräten sorgt dafür, dass Schwankungen der Partikeldichte und der Partikelgröße über die Länge der Messstrecke kompensiert werden und den Messwert nicht stören.

Messung der Abgastemperatur

Voraussetzung für eine pyrometrische Temperaturmessung ist ein Objekt, das Infrarotstrahlung emittiert. Da die im Abgas vorhandene Partikelkonzentration eher gering und nicht konstant ist, würde ein herkömmliches Pyrometer mehr oder weniger durch das Gas hindurch eine Mischung aus der Temperatur der Partikel und der gegenüberliegenden Wand messen. Der Messwert wäre somit bei unterschiedlichen Lastzuständen von der Dichte der Partikel abhängig.

Die Hersteller von Pyrometern nutzen daher die besondere Strahlungscharakteristik des Abgases aus und haben Geräte mit einer spektralen Empfindlichkeit im Bereich von $4,4 - 4,8 \mu\text{m}$ entwickelt. In diesem Bereich besitzt heißes, kohlenstoffhaltiges Gas eine hohe optische Dichte und damit gute Strahlungseigenschaften (**Bild 2**).

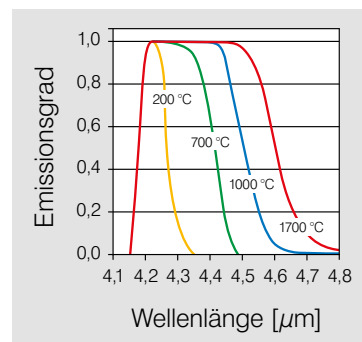


Bild 3 Emissionsgrad von CO_2 -haltigem Gas in Abhängigkeit der Wellenlänge und Temperatur

Das Emissionsvermögen des Abgases ist von der Wellenlänge und Temperatur abhängig. Mit steigender Temperatur verbreitert sich die Absorptionsbande zum langwelligeren Bereich hin (**Bild 3**). Bei der Messung heißer Abgase sind daher schmalbandige Pyrometer mit einem Spektralbereich $> 4,35 \mu\text{m}$ zu wäh-

len, so dass die Infrarot-Strahlung des heißen CO_2 -Gases im Kesselraum erfasst wird, ohne dabei vom kalten CO_2 -Gas in der Nähe der Wandung gestört zu werden.

Im wandnahen Bereich sind die Temperaturen deutlich niedriger als in der Mitte des Feuerraums (**Bild 4**). Je nachdem, ob bevorzugt die Temperatur in der Nähe der Wand als Alternative zu Thermoelementen oder die eher prozessentscheidende Temperatur im Innern des Feuerraums gemessen werden soll, sind Pyrometer mit einer geringen oder großen Sichttiefe einzusetzen. Da es sich bei Gas nicht um einen Flächenstrahler, sondern um einen Volumenstrahler handelt, ermittelt ein Pyrometer einen gemittelten Wert über die Sichttiefe. Die Sichttiefe ist von der CO_2 -Konzentration und Temperatur des heißen Gases abhängig.

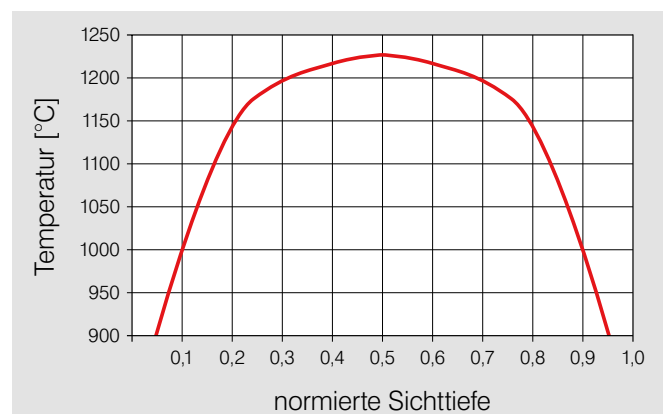


Bild 4 Temperaturprofil innerhalb des Feuerraums

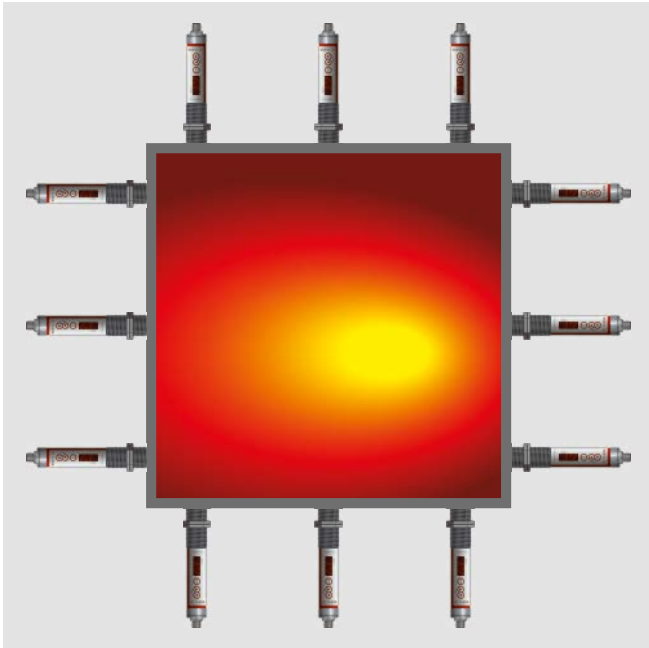


Bild 5 2-dimensionales Wärmebild zur Anzeige der Schiefelage der Temperaturverteilung

Montage und Auswahl der Pyrometer

Entscheidend für eine optimale Verbrennung und einen minimalen Verschleiß ist eine homogene Temperaturverteilung im Kesselraum. Aus einer Matrix von Geräten wird ein zweidimensionales Temperaturprofil ermittelt. So lassen sich thermische Schiefagen erkennen und entsprechende primäre feuerungstechnische Maßnahmen einleiten (**Bild 5**).

Im Bild 1 sind die je nach Messaufgabe typischen Messstellen dargestellt. Bei der Auswahl der Pyrometer ist darauf zu achten, dass die Geräte einen ausreichend schmalen optischen Sicht-



Bild 6 Kompaktes Pyrometer mit schmalen Sichtkegel und moderner digitaler IO-Link Schnittstelle

kegel besitzen, um durch die teils nur 1 Zoll großen Ofenöffnungen hindurchmessen zu können. Neuerdings werden auch Pyrometer mit integrierter Videokamera eingesetzt, die neben dem Messwert gleichzeitig das Videobild zur visuellen Kontrolle auf einem Monitor in der Schaltwarte übertragen. Für eine schnelle Kontrollmessung bietet der Markt inzwischen für die jeweilige Messaufgabe und Messstelle entsprechende portable Geräte an (**Bild 6**).

Zur Erfassung eines 2-dimensionalen Temperaturprofils werden auf einer Ebene je Wand bis zu 3 Pyrometer installiert. Zur Vernetzung und störungsfreien Datenübertragung bieten sich Pyrometer mit modernen digitalen Schnittstellen wie z.B. IO-Link an.

Fazit

Pyrometer sind bei richtiger Auswahl und Installation ideal geeignet, um die verschiedenen Messaufgaben zur Temperaturmessung in Feuerungsanlagen zu lösen. Da sie keinem Verschleiß oder einem Alterungseffekt unterliegen, arbeiten sie über lange Zeit zuverlässig. Selbst schnelle Temperaturschwankungen können aufgrund der kurzen Einstellzeit erfasst werden und unverzüglich in den Regelprozess einfließen.

Aufgrund der Komplexität der Temperaturmessung ist es jedoch ratsam, die Unterstützung durch die Experten bei der Auswahl der Messsysteme, der Messwertanalyse und die Einbindung in den Regelprozess in Anspruch zu nehmen.



Autor

Dipl.-Ing. Albert Book
 KELLER HCW GmbH
 Infrared Temperature Solutions (ITS)
 Tel. +49 5451 85320
 albert.book@keller.de
 www.keller.de/its