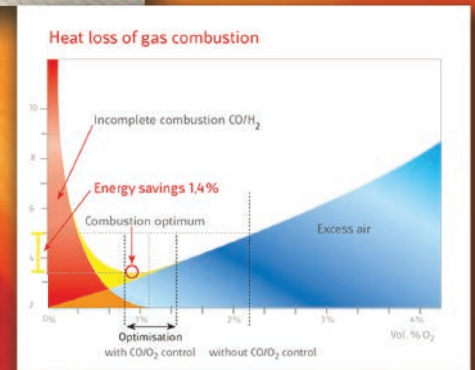


Savings by using O₂ respectively CO control

Function	Partial Load	Middle Load	High Load
O ₂ control	1.19 %	1.47 %	1.20 %
CO control	1.96 %	1.85 %	159 %
Operating hours	1600	5600	800
Fuel costs/h 0.35€/Nm ³			

Savings/year at 0.35 €/Nm³

O ₂ control		11 537 €
CO control	additionally	3 291 €
Total		14 828 €



Brenner & Feuerung

Sensorische Verbrennungsoptimierung von Gasfeuerungsanlagen

Sensoren und Systeme für die Feuerungstechnik



www.lamtec.de

Sensorische Verbrennungsoptimierung von Gasfeuerungsanlagen

Regelungstechnik, Verbrennungsregelung, Abgassensoren

Frank Hammer

Bereits heute ist die Gasqualität im Erdgasnetz nicht vernachlässigbaren Schwankungen unterworfen. Neue Quellen, eine veränderte Verteilerstruktur und insbesondere die Einspeisung regenerativ erzeugter Gase wie Biogas und Wind-Wasserstoff verändern künftig verstärkt die Konzentrationen der Kohlenwasserstoff-, Wasserstoff- und Inertgas-Anteile im Erdgas und damit dessen verbrennungstechnische Eigenschaften. Dies wirkt sich auf den Verbrennungsprozess und damit auf den Wirkungsgrad und die Emissionen von Gasfeuerungsanlagen aus. Eine Verbrennungsregelung zur Kompensation dieser Gasqualitätsschwankungen sowie anderer Störgrößen auf den Prozess ist daher unbedingt erforderlich. Speziell der Einsatz von robusten Abgassensoren zur Messung von Sauerstoff (O_2) und zur Detektion von unverbrannten Gasbestandteilen wie CO , H_2 , HC (CO_e) ermöglicht einfache Regelungsstrategien zur selbstadaptiven Optimierung der Verbrennung und steigert darüber hinaus die Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit der Gasfeuerungsanlage.

Ziel einer jeden Verbrennungsregelung sollte die Maximierung des Wirkungsgrades bei gleichzeitiger Minimierung der Schadstoffe sein. Der Einfluss der Luftzahl λ bzw. des Restsauerstoffgehalts auf den Wirkungsgrad und die Schadstoffemissionen einer Feuerungsanlage wird in **Bild 1** prinzipiell dargestellt. Zu hohe Luftüberschüsse führen zu Abgaswärmeverlust und Luftmangel zu Wirkungsgradverlusten durch unvollständige Verbrennung. Idealerweise wird die Anlage kurz „vor“ der sogenannten Emissionskante mit der optimalen Luftzahl betrieben, die bei heutigen Anlagen durchaus bei $\lambda_{opt} = 1,02$ liegen kann.

Tabelle 1. Typische Störgrößen und deren Auswirkung auf den O_2 -Gehalt im Feuerungsabgas.

Störgröße auf die Verbrennung	typische Schwankung der Störgröße	O_2 -Änderung in Vol.-%
Lufttemperatur	± 20 °C	$\pm 1,5$ Vol.-%
Luftdruck	± 25 mbar	$\pm 0,8$ Vol.-%
Heizwert	± 10 %	$\pm 2,0$ Vol.-%

Sensory combustion optimization of gas combustion systems

Already today, the quality of gas is subjected to non-negligible fluctuations in the natural gas grid. New repositories, an altered distribution structure and especially the supply of regenerative gases such as biogas and wind-hydrogen increasingly alter the concentrations of hydrocarbon, hydrogen and inert gas components in the gas and thus its combustion properties. This has an effect on the combustion process and therefore on the efficiency and emissions of gas furnaces. Therefore a combustion control system to compensate for these gas quality variations and other disturbances on the process is essential. In particular, the use of robust exhaust gas sensors for the measurement of oxygen (O_2) and for the detection of unburned gas components such as CO , H_2 , HC (CO_e) allows simple control strategies for self-adaptive optimization of combustion and in addition increases the reliability and operational safety of the gas combustion system.

Herausforderung für jede Verbrennung sind allmählich sich veränderte Bedingungen und schnelle von außen wirkende Störgrößen wie z. B.:

- Verbrennungsluft (Temperatur, Druck, Feuchte)
- Brennstoff (Heizwert, Temperatur, Viskosität)
- Verschmutzung (Brenner, Feuerraum, Kessel, Abgaskanal)
- Schornstein (Wind, Temperatur, Zug)
- Mechanik (Spiel, Hysterese, Bauteilversagen)

So führen typische Schwankungen der Lufttemperatur von ± 20 °C zu O_2 -Änderungen von $\pm 1,5$ Vol.-% O_2 . **Tabelle 1** zeigt den Einfluss weiterer Störgrößen auf den O_2 -Gehalt im Feuerungsabgas.

Wird ein Verbrennungsprozess fest eingestellt, so ist er ohne sensorische Überwachung „blind“ diesen O_2 -Schwankungen ausgesetzt. Bei Erhöhung von O_2 gemäß **Bild 1** resultiert daraus ein Wirkungsgradverlust durch Zunahme der Abgasmenge durch Luftüberschuss. Bei Verringerung von O_2 insbesondere bei Sauerstoffmangel besteht die Gefahr einer unvollständigen Verbrennung mit hohen Schadstoffemissionen

CO_e bei „Überschreiten“ der Emissionskante. Der Wirkungsgrad fällt drastisch ab, da brennbare Gase unverbrannt und ungenutzt über den Kamin ins Freie gelangen.

Eine Überwachung und sichere Einstellung der Verbrennung zur Kompensation derartiger Störgrößen ist damit sowohl aus Umwelt- als auch aus Sicherheitsgründen unverzichtbar. Nachfolgend werden die hierfür erforderlichen Abgassensoren sowie die damit realisierbare klassische O₂-Regelung und die effizientere CO_e/O₂-Optimierung vorgestellt.

1. Die Sensoren

Zur Überwachung der dynamischen Verbrennung sowie zur Kompensation von Störungen müssen schnell ansprechende Sensoren, idealerweise direkt im Abgaskanal der Feuerungsanlage platziert werden. Diese in-situ Abgassensoren sind hohen Belastungen im Rauchgas ausgesetzt. Neben den bekannten Verbrennungsprodukten sind dies Temperatur, Druck, Feuchte, Wasserdampf, Additive, HF, SO₂, SO₃, H₂SO₄, Asche, Staub, Schwermetalle sowie Kesselabrieb, Vibrationen, usw. Für diese Aufgabe werden daher robuste, hochdynamische Gassensoren auf Festkörperelektrolytbasis verwendet. Bekanntestes Beispiel eines Festelektrolytsensors ist dabei die vorwiegend im Automobilbau eingesetzte λ-Sonde.

Lamtec entwickelt und produziert eigene Festelektrolytsensoren zur Messung von O₂ und zur Detektion von CO_e. **Bild 2** zeigte beispielhaft die Kombisonde KS1D zur simultanen Messung von O₂ und CO_e mit einigen relevanten Daten und Fakten (v.l.n.r.: Oben: fingerhutartiges Sensorelement / Sensor / Einbausituation der Sonde; Mitte: KS1D-Sonde mit Messgasentnahme und Einbauarmatur / Einbausituation der Sonde; Unten: technische Daten der KS1D)

In **Bild 3** ist die fingerhutartig aufgebaute KS1D-Sonde prinzipiell abgebildet. Sie steckt im Abgaskanal der Feuerungsanlage. Die Zirkonoxidkeramik trennt dabei den Referenzgasraum außerhalb des Abgaskanals gasdicht vom Messgasraum. Auf der „Innenseite“ der Funktionskeramik befindet sich die Referenzelektrode aus Platin, während sich die beiden Messelektroden für O₂ und CO_e auf der „Außenseite“ der Keramik im Messgas befinden. Die O₂-Elektrode 1 aus Platin und die CO_e-Elektrode 2 aus einer Platin/Edelmetall-Mischung unterscheiden sich nur im Material. Dessen unterschiedliche katalytische und elektrochemische Eigenschaften ermöglichen erst die Detektion von CO_e. Die Sonde wird mittels integriertem Heizer auf Temperaturen von T_i ≈ 650 °C geheizt und geregelt. Bei dieser Temperatur ist die Festkörperelektrolytkeramik sauerstoffionenleitend und die beiden Sensorsignalspannungen U_{S1} zwischen Elektrode 1 und Referenzelektrode sowie U_{S2} zwischen Elektrode 2 und Referenzelektrode bilden sich aus und können gemessen werden.

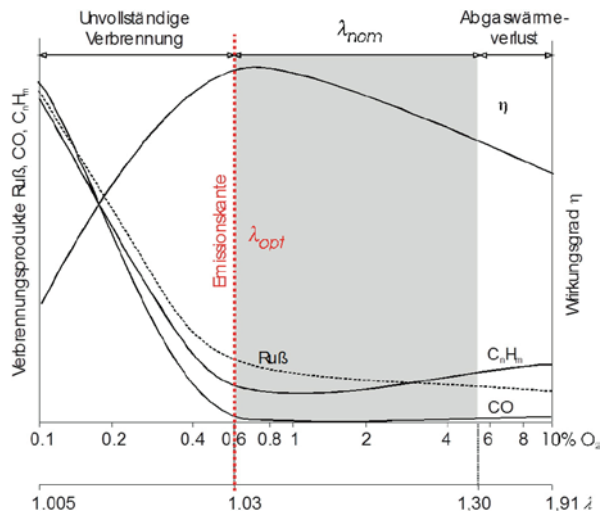


Bild 1. Typische Verläufe der Schadstoffemissionen und des Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom Luftüberschuss.

	O ₂	CO _e
Messbereich	0-21 Vol%	0-1.000 ppm
Auflösung	0,1 Vol% bei 0-18 Vol% 1 Vol% bei 18-21 Vol%	1ppm
Genauigkeit	±5 % vom Messwert nicht besser als ±0,3 Vol%	±25 % vom Messwert nicht besser als ±10 ppm
Ansprechzeit t₆₀	<10 s	<2 s

Bild 2. Kombisonde KS1D zur simultanen Messung von O₂ und CO_e.

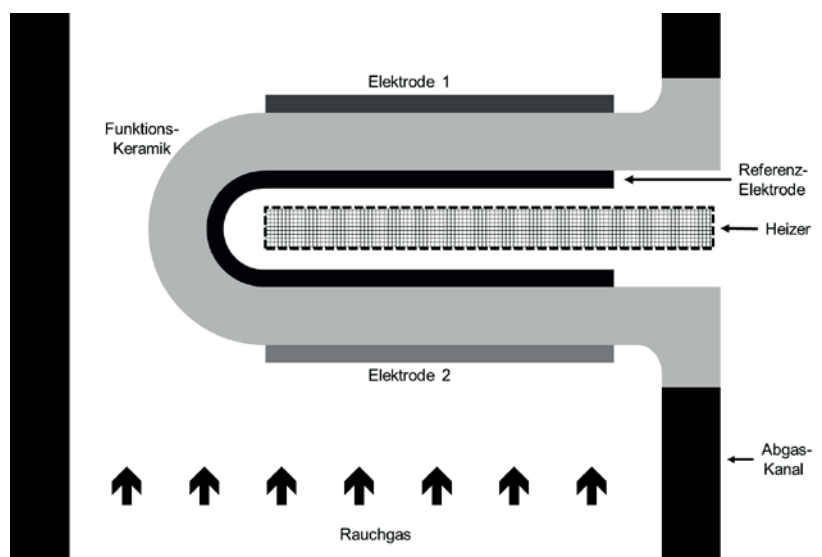


Bild 3. Funktionsprinzip der KS1D.

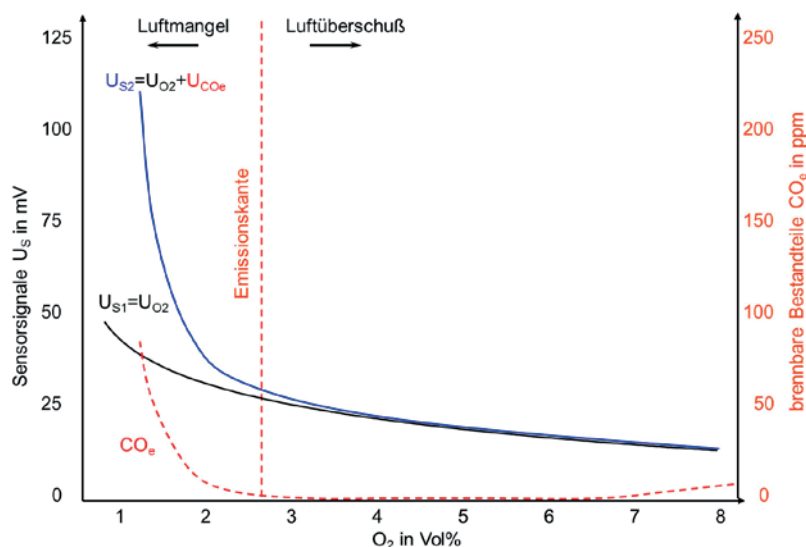


Bild 4. Prinzipieller Signalverlauf der beiden KS1D-Sensorspannungen in Abhängigkeit vom Luftüberschuss.

Die Sensorspannung an beiden Elektroden U_{Si} mit $i = 1, 2$ entspricht zunächst der bekannten Nernst-Spannung, die gemäß

$$U_{Si} = U_{0,i} + \frac{RT_i}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2,ref}}{p_{O_2,mess}} \right) \quad (1)$$

vom zu messenden Sauerstoffpartialdruck $p_{O_2,mess}$ im Abgas abhängt. Der O_2 -Partialdruck der Umgebung als Referenz ist bekannt und liegt konstant bei $p_{O_2,ref} = 21$ Vol.-%. Die universelle Gaskonstante R sowie die Faradaykonstante F sind ebenfalls bekannt. Ein einfacher 1-Punktvergleich an Umgebungsluft mit $p_{O_2,mess} = p_{O_2,ref} = 21$ Vol.-% liefert $U_{Si} = U_{0,i}$ und damit direkt die sensorspezifischen Offsetspannung $U_{0,i}$ bei der eingestellten Sensortemperatur T_i .

Bei Anwesenheit von brennbaren Gasen CO_e bildet sich an der zweiten Messelektrode zusätzliche eine Nicht-Nernstsche Sensorspannung U_{CO_e} aus, welche sich zum reinen Nernstsche Sauerstoffsignal addiert. Das resultierende Sensorsignal an der Elektrode 2 ergibt sich also zu

$$U_{S2} = U_{S1} + U_{CO_e} \quad (2)$$

Daraus ergibt sich für die brennbaren Bestandteile CO_e

$$U_{CO_e} = U_{S2} - U_{S1} \quad (3)$$

In **Bild 4** sind die beiden Signale U_{S1} und U_{S2} der KS1D über dem O_2 -Gehalt im Abgas einer typischen Feuerungsanlage dargestellt. Zusätzlich ist auf der zweiten y-Achse die Konzentration unverbrannter Bestandteile CO_e in ppm mit aufgetragen. Ein typischer Verlauf der CO_e -Konzentrationen bei allmählich reduzierter Luftzahl λ bzw. O_2 -Gehalt zeigt bei Annäherung an die

unvollständige/schlechte Verbrennung einen signifikanten Anstieg der CO_e -Konzentration aufgrund von Verbrennungsluftmangel (vergleiche hierzu auch **Bild 1**).

Im Luftüberschussbereich bei sauberer CO_e -freier Verbrennung liegen beide Sensorsignale U_{S1} und U_{S2} identisch aufeinander und zeigen gemäß Nernst den aktuellen Sauerstoffanteil im Abgaskanal an. In der Nähe der Emissionskante steigt dann jedoch das Sensorsignal der zweiten Elektrode U_{S2} durch das addierte Nicht-Nernstsche CO_e -Signal überproportional an. Für die Auffindung der Emissionskante können sowohl die absoluten Sensorsignale U_{S1} und U_{S2} , als auch die relative Sensor-signaländerung nach der Zeit dU_{S2}/dt , also die Signaldynamik insbesondere der CO_e -Elektrode herangezogen werden.

2. Die O_2 -Regelung

Um der Gefahr einer unvollständigen Verbrennung vorzubeugen werden, nach heutigem Stand der Technik, die meisten Industriefeuerungsanlagen mittels einer klassischen O_2 -Regelung auf einen Luftwert λ mit genügend Sicherheitsabstand zur Emissionskante eingestellt. In **Bild 1** ist der sich daraus ergebende nominelle Betriebsbereich zu sehen, der sich bis zu $\lambda_{nom} = 1,3$ und darüber hinaus erstrecken kann.

Der Sicherheitsabstand zur Emissionskante muss dabei um so größer gewählt werden, je größer die Messunsicherheit und der Messfehler der O_2 -Messung, z.B. durch Falschluff sind und je größer und dynamischer die Schwankungen insbesondere der Gasqualität sind. Dieser Sicherheitsabstand ist verfahrensbedingt nötig und wirkt sich ungünstig auf den Wirkungsgrad aus, da das Optimierungspotenzial bis zum anlagen- und brennstoffspezifischen Verbrennungsoptimum nahe der Emissionskante verschenkt wird.

Die klassische O_2 -Regelung auf einen festen O_2 -Wert kompensiert diese Schwankungen weitestgehend. Mit einer lastabhängigen O_2 -Einstellung kann die Effizienz der Anlage noch gesteigert werden. Über die O_2 -Regelung hinaus ermöglicht die nachfolgend beschriebene Emissionskantenregelung zur Verbrennungsoptimierung eine weitere Annäherung an die Emissionskante bis hin zum Wirkungsgradmaximum.

3. Die CO_e/O_2 -Optimierung (Emissionskantenregelung)

Zur Auffindung der Emissionskante wird das Brennstoff-Luft-Verhältnis mittels geeigneter Stellglieder dynamisch und ohne Beeinflussung des Leistungsreglers in Richtung einer kleineren Luftzahl λ verringert, bis sich an der Emissionskante das CO_e -Sensorsignal U_{S2} vom O_2 -Signal U_{S1} spreizt (**Bild 4**) und sowohl der absolute Sensorsignalhub als auch die Signaldynamik dU_{S2}/dt aufgrund der beginnenden schlechten Verbrennung signifikant ansteigt. Eine kleine Erhöhung der Luftmenge resultiert schließlich im optimalen Arbeits-

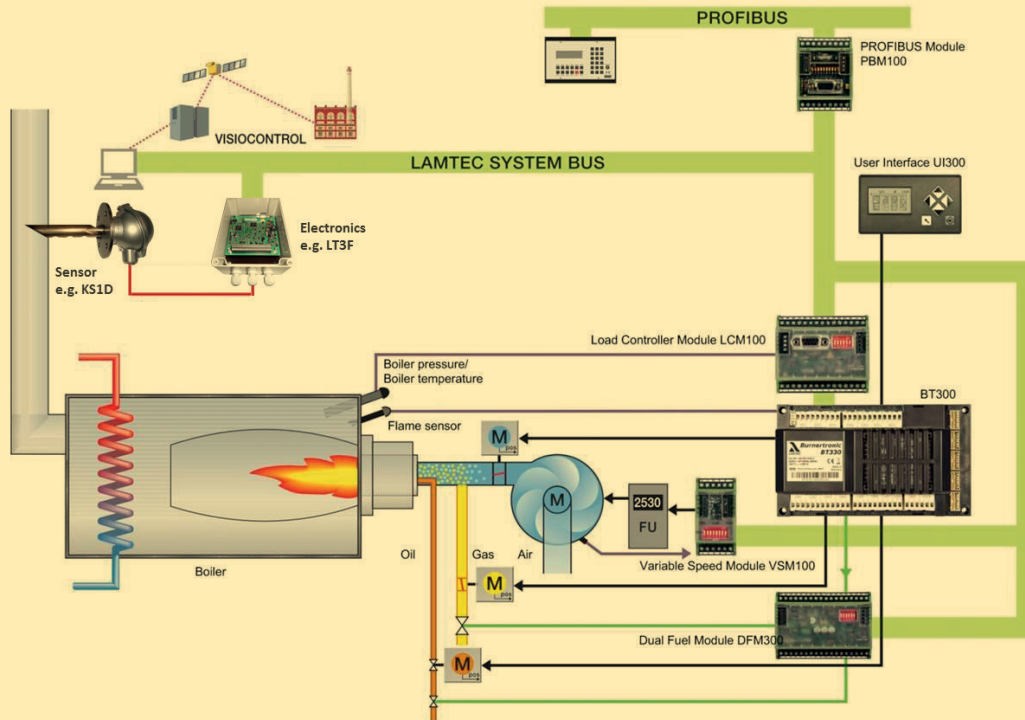


Bild 5. Kessel mit Zweistoffbrenner ausgerüstet mit BurnerTronic BT300, Drehzahlregelung, In-Situ Gassensor und Sensor-elektronik zur CO_e/O_2 -Optimierung.

punkt λ_{opt} der Anlage „vor“ der Emissionskante. Diese Vorgehensweise wird kontinuierlich wiederholt, um auch bei veränderten Bedingungen oder Brennerlasten, die zu einer Verschiebung der Emissionskante führen, stets den Betrieb nahe am Verbrennungsoptimum gewährleisten zu können.

Schnelle Änderungen oder Störungen bei bereits optimal eingestellter Anlage werden durch die permanente Überwachung der CO_e -Emissionen sowie der Information zum aktuellen O_2 -Gehalt im Abgas sowie gegebenenfalls weiterer Plausibilitätsbetrachtungen sofort erkannt. Die Anlage wird dann in einen „sicheren“ Betriebsbereich mit ausreichend Luftüberschuss gebracht und ausgehend von einer sicheren Kennlinie mittels oben geschilderter Routine erneut an ihren neuen optimalen Betriebszustand bei den geänderten Konditionen herangeführt.

Die CO_e/O_2 -Optimierung ist seit über 10 Jahren weltweit erfolgreich im Einsatz. Die wichtigsten Vorteile der CO_e/O_2 -Optimierung gegenüber einer O_2 -Regelung sind zusammengefasst:

- Höhere Energieeinsparung durch permanente Selbstoptimierung in jedem Lastpunkt,
- besseres Regelverhalten durch deutlich kürzere Einstellzeit,
- falschlufunabhängig,
- fehlersicher,
- robust,
- wartungsfrei.

4. Die Einsparrechnung

Zur Verbrennungsregelung ist heute das komplette Spektrum an elektronischen Brennersteuergeräten, Brennstoff-Luft-Verbundreglern, IR/UV-Sensoren, Flammenüberwachungen CO_e/O_2 -Messgeräten mit zugehöriger Sensorik am Markt verfügbar.

Für Anlagen mittlerer Leistung von 0,3-5 MW ist die BurnerTronic BT300 in ihrer Preis/Leistungsklasse weltweit das erste Gerät welches für die O_2 -Regelung sowie auch für die CO_e/O_2 -Optimierung eingesetzt werden kann (**Bild 5**). Sie vereint sämtliche Vorteile einer elektronischen Verbundregelung mit einem elektronischen



Bild 6. Auf CO_e/O_2 -Optimierung umgebauter 5 MW Zweistoffbrenner mit LT3F-Sensorelektronik sowie Schaltschrank mit integrierter BT300, Drehzahlregelung etc.

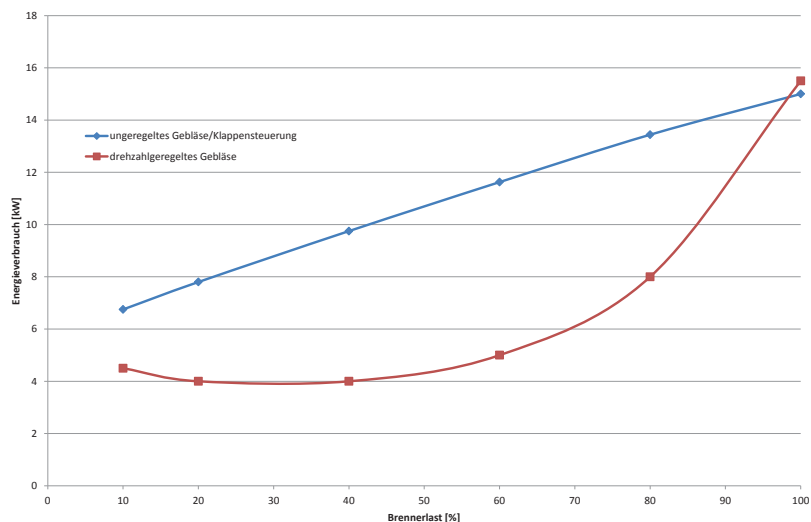


Bild 7. Vergleich des Energieverbrauchs des unregulierten und des drehzahlgeregelten Verbrennungsluftgebläses über der Brennerlast.

Brennersteuergerät. Seit der Markteinführung vor etwa 3 Jahren werden mit steigender Tendenz jährlich über 3000 Anlagen mit ihr ausgerüstet und optimal betrieben – im Sinne der Umwelt!

Bild 6 zeigt einen der Kessel einer Thermoprozessanlage für die Nahrungsmittelindustrie mit einem 5 MW Zweistoffbrenner (Öl/Gas). Sämtliche Kessel der Anlage wurden jüngst mit einer CO_e/O₂-Optimierung und einer lastabhängigen Drehzahlregelung des Verbrennungs-

Tabelle 2. Konservative Einsparrechnung für den umgebauten 5 MW Zweistoffbrenner in **Bild 6**.

Einsparung Brenner 1:		Schwachlast	Mittellast	Volllast	
Betriebsstunden	h / Jahr	800	800	6.400	
Brennstoffkosten (Annahme)	€ / h	46	105	159	
O ₂ -Reduktion durch O ₂ -Regelung	Vol.-%	1,28	1,46	1,33	
Einsparung durch O ₂ -Regelung	€ / Jahr	464	1.223	13.598	15.286
zus. O ₂ -Reduktion durch CO _e /O ₂ -Optimierung	Vol.-%	0,33	0,22	0,33	
zus. Einsparung durch CO _e /O ₂ -Optimierung	€ / Jahr	120	186	3.353	3.660
Einsparung mit Drehzahlregelung	€ / Jahr				2.974
Gesamteinsparung	€ / Jahr				21.920

luftgebläses ausgestattet. Zur Abschätzung des Gewinns der Umbaumaßnahmen werden für die Einsparrechnung anlagen- und betriebsspezifische Randbedingungen sowie einige Messdaten vor und nach dem Umbau herangezogen.

Als Randbedingung gehen typische Schwankungen gemäß **Tabelle 1** in die Einsparrechnung ein. Die Abgastemperaturen wurden bei Volllast mit 150 °C und Schwachlast mit 120 °C gemessen. Die Verbrennungslufttemperaturen liegen im Sommer typischerweise bei 35 °C und im Winter bei 10 °C. Zur Kalkulation der Einsparungen werden Brennstoffkosten von 0,35 €/kWh_{Gas} angesetzt.

Durch den Einsatz eines drehzahlgeregelten Verbrennungsluftgebläses anstatt eines mit konstanter Drehzahl betriebenen Gebläses mit Klappensteuerung wird gemäß **Bild 7** eine weitere Einsparung an elektrischer Energie erreicht. Zur Kalkulation der elektrischen Einsparung werden Energiekosten von 0,12 €/kWh_{el} angesetzt.

In **Tabelle 2** sind die Ergebnisse der eher konservativen Einsparrechnung, welche auf der bekannten Siegert'schen Formel beruht, kurz vorgestellt. Die jährlichen Einsparungen durch die O₂-Regelung errechnen sich demnach an jedem Kessel dieser Anlage zu 15 286 Euro. Der Zusatzgewinn durch die CO_e/O₂-Optimierung beläuft sich nochmals auf 3660 Euro. Die CO_e/O₂-Optimierung mit einer Sonde (KS1D) ist ein Zusatznutzen und vom Aufwand vergleichbar dem einer reinen O₂-Regelung. Daher ist sie für alle Anlagen einfach nutzbar, speziell für Kessel mittlerer Leistung zunehmend interessant und neuerdings auch verfügbar. Die Einsparung durch die Drehzahlregelung beläuft sich nochmals auf 2974 €/a. Dies ergibt eine Gesamteinsparung von jährlich 21 920 Euro pro Kessel! Zu dieser Brennstoff- bzw. Kosteneinsparung für den Anlagenbetreiber kommt eine jährliche CO₂-Reduktion von ca. 130 t je Kessel dieser Anlage der Umwelt zugute.

Autoren



Dr.-Ing. **Frank Hammer**
 Lamtec Meß- und Regeltechnik für
 Feuerungen GmbH & Co KG |
 Walldorf |
 Tel.: +49 6227 6052 0 |
 E-Mail: hammer@lamtec.de

**LAMTEC Meß- und Regeltechnik
für Feuerungen GmbH & Co. KG**

Josef-Reiert-Straße 26

D-69190 Walldorf

Telefon: +49 (0) 6227 6052-0

Telefax: +49 (0) 6227 6052-57

