

# Sensorgesteuerte CO-Regelung zur Optimierung des Verbrennungsprozesses für Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung

Dr.-Ing. Frank Hammer, ESCUBE GmbH & Co KG, D-70569 Stuttgart

Dipl. Ing. (FH) Harald Weber, LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG, D-69190 Walldorf

## Kurzfassung

Der größte Teil vom Menschen verursachter Schadstoffe entsteht durch Verbrennungsprozesse in Industrie- und Hausfeuerungen oder beim Verkehr in Verbrennungsmotoren und Flugtriebwerken. Hauptschadstoffe sind die Produkte einer unvollständigen Verbrennung wie Ruß, CO, H<sub>2</sub> und unverbrannte Kohlenwasserstoffe C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>. Eine Minderung der Schadstoffemissionen ist vor allem durch die Gestaltung der Verbrennungsführung im Betrieb möglich. Im Automobil- und Kraftwerksbereich steht hierfür die keramische O<sub>2</sub>-Sonde ( $\lambda$ -Sonde) zur Verfügung. Aus Kosten- und Technologischen Gründen hat sich diese bei Feuerungsanlagen kleiner (<200kW) und mittlerer Leistung (<3MW) nicht durchgesetzt. Nachfolgend wird ein neuartiger keramischer CO<sub>e</sub>-Sensor sowie die zugehörige selbstadaptive Regelstrategie für diese Anwendung vorgestellt.

## I Das Problem

Der Trend bei stationären Feuerungsanlagen geht hin zu stufenlos regelbaren Wärmeerzeugern, die über einen großen Leistungsbereich modulierend betrieben werden können. Ein weiterer Trend geht hin zu raumluftunabhängigen Geräten, die im Wohnraum installiert werden können. Dabei hat das jeweilige Luft-Abgassystem (LAS) der Anlage einen entscheidenden Einfluss auf das Verbrennungssystem. Weitere Anforderungen an den Wärmeerzeuger resultieren aus der Flexibilisierung des Energieversorgungsmarktes. Diese bringt eine deutlich gestiegene Unsicherheit über die örtlich, zeitlich und verteilerabhängige Schwankung der Brennstoffqualität mit sich, die nur schwer vorherzusagen ist. Demgegenüber steht die Forderung, dass in jedem Betriebspunkt und zu jeder Zeit ein optimaler feuerungstechnischer Wirkungsgrad gewährleistet sein muss, bei gleichzeitiger Minimierung der Schadstoffe wie Ruß, CO, H<sub>2</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, also CO<sub>e</sub>. Diese Forderungen unter den sehr stark wechselnden Randbedingungen einzuhalten fällt, ohne entsprechende innovative Verbrennungsregelung, zunehmend schwerer. Eine feste Einstellung der Heizgeräte auf eine bestimmte Brennstoffgüte bzw. einen fixen LAS-abhängigen Betriebspunkt ist daher in Zukunft nicht mehr einfach zu realisieren. Daher sind neue Lö-

sungsansätze für einen emissionskontrollierten bzw. -optimierten Betrieb erforderlich, die auch in Hausfeuerungsanlagen wirtschaftlich einzusetzen sind. Eine fortschrittliche Lösung hierfür bieten Regelsysteme, die auf einem CO<sub>e</sub>-Sensor aufbauen (siehe **Bild 1**).

Optimierung von Feuerungsanlagen:	
Problem:	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Schlechte Verbrennung</li> <li>■ Schlechter Wirkungsgrad</li> <li>■ Hohe Emissionen von CO<sub>e</sub>, Ruß</li> </ul>
Bisherige Technologie:	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ O<sub>2</sub>-Regelung</li> </ul>
Zukünftige Technologie:	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Binäre Regelung über die Verbrennungsprodukte (CO<sub>e</sub>)</li> </ul>
Ziel:	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kontinuierliche Kontrolle und Verringerung der Emissionen bei allen Feuerungen durch den Einsatz keramischer CO<sub>e</sub>-Gassensoren in Verbindung mit einer selbstadaptiven Regelstrategie</li> </ul>

**Bild 1** Die Problematik der Feuerungsoptimierung

## II Die Verbrennungsoptimierung

### 2.1 Die Verbrennungscharakteristik

**Bild 2** zeigt den typischen Verlauf der Gaskonzentrationen einer Feuerungsanlage über dem Restsauerstoffgehalt im Abgas (O<sub>2</sub>) bzw. über der Luftzahl  $\lambda = 21/(21-O_2)$ . Bei einer idealen stöchiometrischen Verbrennung ( $\lambda = 1$ ) wird der Anlage genau so viel (Luft) Sauerstoff zugeführt, wie für eine vollständige Verbrennung des Brennstoffes benötigt wird. D.h. im Abgas befindet sich kein Restsauerstoff mehr und die Anlage arbeitet mit maximalem Wirkungsgrad. Weniger (Luft) Sauerstoff führt zu Wirkungsgradverlusten durch eine unvollständige Verbrennung bei gleichzei-

tig hohen Emissionen. Ein Luftüberschuss führt zu Abgaswärmeverlusten, da nicht an der Verbrennung beteiligte Luft als Ballast mitgeführt wird.

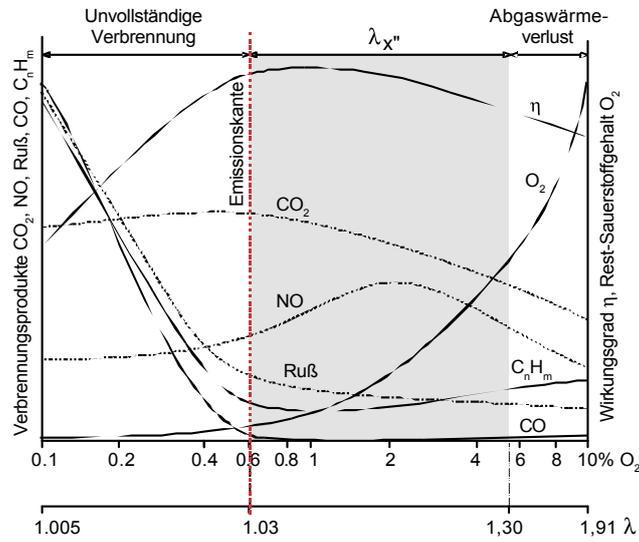


Bild 2: Die Verbrennungscharakteristik

## 2.2 Stand der Technik

Veränderungen der Verbrennungsluft (Temperatur, Druck, Feuchte) der Brennstoffqualität (Viskosität, Heizwert) aber auch Verschleiß, Verschmutzung oder Verstopfung der Düse bzw. des Zu-/Abluftkanals führen dazu, dass sich der optimale Betriebspunkt der Anlage ständig verändert. Daher wird das Brennstoff-Luftverhältnis von Feuerungsanlagen heute im Rahmen einer Einmaleinstellung bei der Inbetriebnahme im Luftüberschussbereich je nach Monteur bei anfänglichen  $\lambda = 1,3 - 1,4$  eingestellt. Im nominellen Betriebsbereich arbeitet die Anlage dort zuverlässig jedoch mit großem Sicherheitsabstand zur Emissionskante und niedrigem Wirkungsgrad. Dieser Sicherheitsabstand wird eingestellt, damit in keinem Betriebszustand eine unvollständige Verbrennung mit hohen Emissionen eintreten kann.

## 2.3 Die industrielle O<sub>2</sub>-Regelung

Bei industriellen Feuerungsanlagen ist die O<sub>2</sub>-Überwachung heute Stand der Technik. Sie basiert meist auf der Messung des Sauerstoffgehaltes im Abgas mittels  $\lambda$ -Sonde, wie Sie aus dem automobilen Bereich bekannt ist. Sie erlaubt die kontrollierte Einstellung der Anlage auf einen fest vorgegebenen  $\lambda$ -Wert. Eine Drift der Sensoren wird durch regelmäßige Eich- und Kalibrierroutinen kompensiert. Die O<sub>2</sub>-Überwachung gibt bei stationären Feuerungsanlagen allerdings keinen Hinweis auf eine vollständige Verbrennung bzw. auf die aktuelle Lage der Emissionskante. Dazu ist die Erfassung der im Abgas enthaltenen unverbrannten Bestandteile CO<sub>e</sub> notwendig.

## 2.4 Die industrielle CO<sub>e</sub>-Regelung

Ziel einer modernen Regelung muss die Verringerung des Abgaswärmeverlustes durch die Absenkung der Luftzahl bis zur Emissionskante sein. Dies ist mit Hilfe eines empfindlichen CO<sub>e</sub>-Sensors möglich. So lassen sich CO<sub>e</sub>-Bestandteile z.B. mit der vielfach erprobten KS1 Sonde der Fa. LAMTEC genau detektieren. Sie ähnelt ihrem Aufbau der Nernst'schen  $\lambda$ -Sonde, liefert jedoch ein Mischpotential, welches bereits bei geringen Mengen oxidierbarer Gase höher ist als das Signal einer reinen Sauerstoffsonde. Die KS-1D Sonde verbindet beide Messprinzipien und liefert neben CO<sub>e</sub>- zusätzlich den O<sub>2</sub>-Anteil.

Für Industriefeuerungsanlagen bietet LAMTEC als Hersteller elektronischer Steuerungen neben der klassischen O<sub>2</sub>-Regelung seit Anfang 2004 auch die innovative CO<sub>e</sub>-Regelung an. Gegenüber einer reinen O<sub>2</sub>-Regelung kann hier der Restsauerstoffgehalt nochmals deutlich auf Werte unter 1 Vol-% gesenkt werden. Daraus resultiert ein deutlich verbesserter feuerungstechnischer Wirkungsgrad, eine Schadstoffminimierung sowie geringere Abgasverluste. Die Gesamteinsparung beträgt beispielsweise in einer Anlage der Brauerei Jever pro Brenner 12.721,43 €/Jahr [7]. Die CO<sub>e</sub>-Regelung wurde 2004 mit einer Anerkennung im Rahmen der Verleihung des Innovationspreises der Deutschen Gaswirtschaft ausgezeichnet.

Während sich im Bereich der Industriefeuerungen O<sub>2</sub>- oder CO<sub>e</sub>-geregelter Anlagen immer mehr durchsetzen, ist dies bei Hausfeuerungsanlagen aufgrund fehlender kostengünstiger Sensoren und einfacher Regelstrategien nicht zu beobachten, auch wenn neuere Referenzen darauf hinweisen [4]. Um diese Lücke zu schließen, und die Vorteile einer sensorgeführten Brenneroptimierung auch bei Feuerungsanlagen kleiner bis mittlerer Leistung zukünftig nutzen zu können, wurde der keramische Gassensor CarboSen entwickelt [1-3].

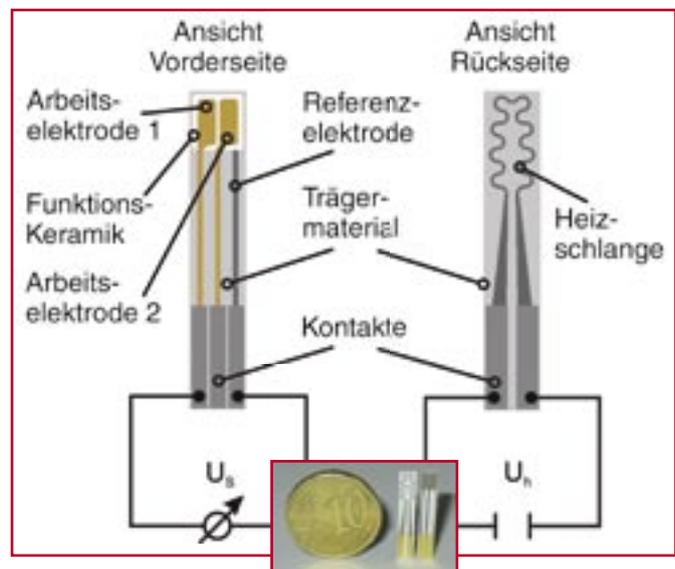


Bild 3: Der CO<sub>e</sub>-Sensor CarboSen

## III Der CO<sub>e</sub>-Sensor

### 3.1 Aufbau und Funktion des Sensors

Das physikalische Prinzip des CO<sub>e</sub>-Sensors (siehe **Bild 3**) ist die Festkörperelektrolyse. Als keramischer Elektrolyt wird, wie bei der λ-Sonde auch, Yttriumdotiertes Zirkondioxid verwendet. Diese Keramik zeichnet sich durch eine hohe Sauerstoffleitfähigkeit ab 400°C, sowie durch eine hohe chemische Stabilität aus. Im Gegensatz zur klassischen Nernst'schen O<sub>2</sub>-Sonde handelt es sich allerdings um einen Nicht-Nernst'schen Sensor. Die gewählte Materialpaarung resultiert in unterschiedlichen Adsorptionscharakteristiken an der Pt-Referenz- und den Arbeitselektroden und erlauben so die Detektion der Produkte einer unvollständigen Verbrennung nach

$$U_S = \frac{\Re \cdot T_S}{n \cdot F} \cdot \ln \frac{C_{CO_e(ad,K)}}{C_{CO_e(ad,A)}},$$

mit der universellen Gaskonstante  $\Re$ , der Sensortemperatur  $T_S$ , der Valenzzahl der am Ionentransport beteiligten Sauerstoffionen  $n = 2$ , und der Faraday Konstanten  $F$ . Die Konzentrationen  $C_{CO_e(ad,A)}$  und  $C_{CO_e(ad,K)}$  repräsentieren das auf der Anode bzw. Kathode adsorbierte CO<sub>e</sub>.

Hervorzuheben ist die Generierung einer direkt meßbaren Sensorsignalspannung  $U_S$  mit logarithmischer Charakteristik. Der Ursprung liegt physikalisch bestimmt und drifffrei bei 0mV. Mit Ansprechzeiten unter 1s und großer Auflösung im unteren Bereich können brennbare Gase bereits ab 1ppm zuverlässig detektiert werden. Die Robustheit und Schnelligkeit der Sensoren sowie die hohe Dynamik ermöglichen die Umsetzung einer zuverlässigen Überwachung, Regelung bzw. Optimierung der dynamischen Verbrennungsvorgänge nach der Emissionskantenregelung.

### 3.2 Die Sensortypen

Die planaren Sensorelemente werden unter Reinraumbedingungen bei ESCUBE in Siebdrucktechnik gefertigt. Dies erlaubt eine kostengünstige und gleichzeitig qualitativ hochwertige Produktion auch großer Stückzahlen. Danach werden die Sensorelemente in anwendungsspezifische Gehäuse integriert.

**Bild 4** zeigt den CarboSen1000 im Standardgehäuse für Anwendungen bis 200°C Abgastemperatur, 100% relativer Feuchte und kondensierenden Bedingungen. Durch den integrierten Montageclip kann der Sensor einfach in eine 11,5 - 12 mm durchmessende Bohrung im Abgaskanal einer Feuerung eingebracht, positioniert und fixiert werden. In der Mitte ist der CarboSen1000 im Hochtemperaturgehäuse zu sehen. Diese Ausführung erlaubt einen Einsatz bis zu 450°C. Das 8 mm durchmessende Tauchrohr kann kundenspezifisch mit bis zu 1 m Länge ausgeführt werden. Der An-

schluß in den Prozeß geschieht z.B. über eine gerade Einschraubverschraubung. Mit integrierter Elektronik eignet sich das Sensorsystem auch für andere industrielle Prozesse bis hin zur in-situ Überwachung der Kesselwandatmosphäre in Kraftwerken.



**Bild 4:** Der CarboSen1000 im Standardgehäuse (o. links) und im Hochtemperaturgehäuse einmal mit und einmal ohne on-board Elektronik

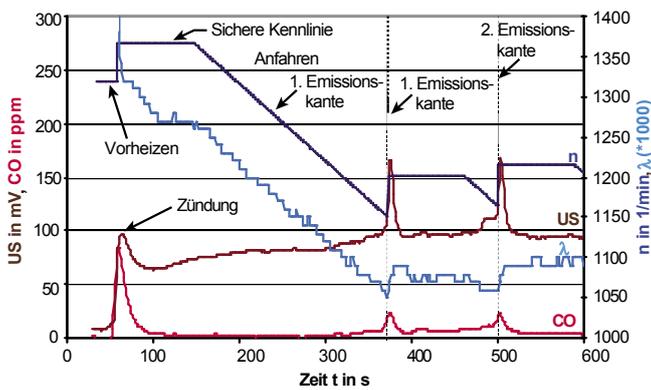
## IV Die CO<sub>e</sub>-Regelstrategie

In den letzten beiden Jahren wurde, mit dankenswerter Unterstützung der Friedrich-und-Elisabeth BOY-SENStiftung, an der Forschungsgesellschaft HLK mbH die Strategie der industriellen CO<sub>e</sub>-Regelung für Kleinf Feuerungen weiterentwickelt und modifiziert. Zum Einsatz kommt hier ein modulierender Öl-Blaubrenner der Fa. HERMANN in einem 20kW-Kessel der Fa. ROTEX umgesetzt [6].

Der Sensor sitzt dabei direkt im Abgaskanal des Sturzbrenners. Die Sensorsignale werden in der Steuerelektronik verarbeitet und in entsprechende Stellgliedersignale umgewandelt. Das Stellglied ist in diesem Fall das Verbrennungsluftgebläse. Geregelt wird die Gebläsedrehzahl. **Bild 5** zeigt den typischen Ablauf des Optimierungsvorgangs nach der Emissionskantenregelung.

- 1) Nach dem Start des Brenners fährt die Anlage auf die nominelle, sichere Kennlinie mit genügend Abstand zur Emissionskante ( $\lambda = 1,3 - 1,4$ ). Je nach Lastanforderung stellt sich die Pumpenfrequenz/ Öl-Fördermenge und damit die entsprechende Kesselleistung mit der zugehörigen, nominellen Gebläsedrehzahl  $n$  ein.
- 2) Nach einer vorgegeben Zeit von z.B.  $t = 50s$  reduziert sich die Gebläsedrehzahl  $n$  mit einer vorgegebenen Rate  $dn/dt$ . Bei fester Pumpenfrequenz bedeutet dies eine Reduzierung der Luftzahl  $\lambda$  und damit eine Wirkungsgradsteigerung durch Verringerung des Abgaswärmeverlustes.
- 3) Den optimalen Betriebspunkt der Anlage ( $\lambda = 1,05 - 1,1$ ) findet der CO<sub>e</sub>-Sensor durch Signalanstieg von  $U_S$  bzw.  $dU_S/dt$  an der Emissionskante mit einer abschließenden fest vorgegebenen, leichten Drehzahlerhöhung.

Diese Routine kann beliebig oft z.B. nach längerer Betriebspause wiederholt werden. Zwischen diesen Punkten überwacht die Regelung sowohl ein schnelles als auch ein langsames Ansteigen des Emissionswertes.



**Bild 5:** Typischer Zyklus der CO<sub>e</sub>-Regelung

Durch die kombinierte Betrachtung der stationären Sensorsignale  $U_s$  und der Signaländerungen  $dU_s/dt$  und  $dU_s/dS_i$ , wird eine alterungs- und drifttolerante Regelung möglich.  $S_i$  sind die Position der  $i$  Stellglieder bzw. Zustände der Anlage. Auf eine regelmäßige Kalibrierung der Sensoren kann somit verzichtet werden. Ein einfacher Selbsttest des Sensors in Verbindung mit einigen Plausibilitätsbetrachtungen der Anlage im Betrieb gewährleistet ein höchstmögliches Potential an Sicherheit des Brenners.

## Ergebnis

Der Einsatz einer selbstadaptiven, sensorgeführten Verbrennungsregelung von Feuerungsanlagen nach der Emissionskantenstrategie erlaubt durch Verringerung des Abgasverlustes einen optimalen Betrieb der Anlage mit maximalem Wirkungsgrad, bei minimalen Emissionen und geringstem Brennstoffverbrauch. Nimmt man beispielsweise an, daß dadurch der Abgasverlust aller Kleinf Feuerungsanlagen nur um 1% verringert werden könnte, würden allein deutschlandweit etwa 397 Mio. Liter Heizöl und 478 Mio. m<sup>3</sup> Erdgas weniger verbraucht werden. Dies entspräche einer Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von etwa 1,9 Mio. Tonnen pro Jahr! Mit jedem zusätzlichen Prozentpunkt erhöhen sich die Werte entsprechend [4].

Neben dem effizienten und kostensparenden Betrieb ermöglicht die in-situ Messung direkt in der Verbrennungsabluft eine kontinuierliche Diagnose der Anlage. So kann eine Veränderung der Anlage bereits vor einem Ausfall festgestellt und ein präventives Wartungssignal mit erster Fehleranalyse ausgegeben werden.

Der Service kann rechtzeitig gerufen werden, und zwar dann wenn er benötigt wird. So führt der Einsatz der Sensorik zu einer Steigerung der Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit der Anlage bei gleichzeitiger Absenkung von Service- und Reparaturkosten. Das schont die Umwelt, die Finanzen und die Nerven des Betreibers.

## Literatur

- [1] Hammer F., Fasoulas S., Messerschmid E., Weber H., Houpert B.; "Miniaturized CO/H<sub>2</sub>-Sensor for Monitoring and Controlling Small Burners and Heaters", 2nd European Conference on Small Burner and Heating Technology, ECSBT 2, Stuttgart, March 16.-17., 2000
- [2] Hammer F.; „Entwicklung eines miniaturisierten Festkörperelektrolytsensors aus der Raumfahrt zur Optimierung von Verbrennungsprozessen“, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr 935, Düsseld. VDI Verlag 2002 (ISBN 3-18-393508-2)
- [3] Wöllenstein J., Baumann R., Rademacher S., Stich R., Hammer, F.; "A novel solid electrolyte hydrogen sensor", Chemical Sensors, Vol. 20, Supplement B (2004), page 236, Technical Digest of the 10th International Meeting on Chemical Sensors, Tsukuba, Japan, July 11-14, 2004
- [4] Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks, Zentralinnungsverband (ZIV): „Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks in der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2004
- [5] Marx, E., Linke W.; „Handbuch Feuerungstechnik 2005“, Verlag Gustav Kopf GmbH, Waiblingen, 2005, s. 276ff (ISSN 1438-4264)
- [6] Klein B., Völkel M., Hammer F.; „Entwicklung eines sensorgesteuerten modulierenden Ölbrenners“, Forschungsbericht, HLK-Brief 123 des Lehrstuhls für Heiz- und Raumluftechnik der Universität Stuttgart, der Forschungsgesellschaft HLK Stuttgart mbH, der HLK Stuttgart GmbH und des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich HLK Stuttgart e.V (Herausgeber), Stuttgart, Februar 2005
- [7] Völkel M., Hammer F.; „CO<sub>e</sub>-Regelung mit Miniatur-Sensor eröffnet neue Perspektiven in der Verbrennungstechnik“, Fachbeitrag, Gaswärme International (54) Nr. 3/2005, S. 174-177, Vulkan-Verlag, Essen, März 2005