

Intelligente Sondentechnologie ermöglicht schadstoffarme Verbrennung

Es liegt was in der Luft

Die thermische Verwertung von Biomasse durch Biomasseheizkessel stellt eine wertvolle Alternative für die Versorgung von Haushalten und Gewerbebetrieben mit Wärme, Warmwasser und Strom dar. Allerdings darf diese energetische Nutzung nicht zur Erhöhung klimarelevanter und gesundheitsschädlicher Emissionen führen. Im folgenden Fachaufsatz wird deshalb ein regelungstechnisches System vorgestellt, das einen schadstoffarmen Verbrennungsprozess ermöglicht und den Betrieb der Anlage zudem kontinuierlich bewertet und überwacht.

*Dr.-Ing. Mohammad Aleysa Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart und
Dr.-Ing. Frank Hammer, LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG, Walldorf*

Die Biomasse ist einer der wichtigsten erneuerbaren Energieträger für die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser. Zum Erreichen der klima- und umweltpolitischen Ziele in Europa wird die Biomasse auch in Zukunft eine maßgebliche Rolle spielen. Das Fachgebiet Verbrennungs- und Umweltschutztechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP beschäftigt sich intensiv mit der Erforschung und Entwicklung von innovativen Technologien zur Verbrennung und Abgasbehandlung. Dabei steht vor allem die thermische Verwertung von Biomasse und sonstigen biogenen Reststoffen im Vordergrund.

Der Ausbau der thermischen Verwertung der Biomasse durch Biomasseheizkessel stellt eine wichtige Methode beziehungsweise Technik dar, die für die Versorgung von Haushalten und Gewerbebetrieben mit Wärme und Warmwasser sowie Strom zunehmend verwendet wird. Diese Methode soll eine ausschlaggebende Rolle bei der Klimaschutzpolitik sowie bei der Nachhaltigkeitsstrategie in Deutschland spielen. Die verstärkte energetische

Nutzung der Biomasse darf andererseits nicht zur Erhöhung der klimarelevanten und gesundheitsschädlichen Emissionen wie zum Beispiel Kohlenstoffmonoxid (CO), flüchtige organische Komponenten (VOCs) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) führen und erfordert daher die Entwicklung von innovativen Technologien. Diese sollen nicht nur eine ökonomische und ökologische Energiebereitstellung gewährleisten, sondern auch derart aufgebaut sein, dass sie sich in bestehende intelligente Energiemanagementsysteme von Gebäuden zwecks der Erhöhung der Nutzungseffizienz integrieren lassen. Für eine sichere Funktion dieser Technologien im Praxisbetrieb sind auch passende Regelsysteme mit adäquater Methode für die permanente Bewertung des Betriebs und Überwachung der Emissionen erforderlich, welche dem heutigen Stand der Technik entsprechen.

In diesem Beitrag geht es um ein neuartiges regelungstechnisches System (das sogenannte Verbrennungsregelungs- und Emissionsmonitoringsystem: VREM), mit dem der Verbrennungsprozess durch den Einsatz einer O₂/CO_e-Sonde anstatt einer

herkömmlichen Lambda-Sonde nicht nur schadstoffarm und effizient geregelt, sondern auch der Betrieb permanent bewertet beziehungsweise die Emissionen überwacht werden können. Dieses System wurde im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts (FKZ: 03KB109, <https://www.energetische-bio-massenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/kombinationssystem-298/>) entwickelt.

Das VREM-Konzept der Anlagenüberwachung führt nicht nur zur Steigerung der Effizienz und Zuverlässigkeit, sondern ermöglicht auch die Verbesserung der Servicedienstleistung beim Kunden durch das dienstleistende Unternehmen. In diesem Beitrag wird die Optimierung der Verbrennungsregelung vorgestellt, wobei im weiteren Verlauf auch detailliert auf die Überwachung eingegangen wird.

Das Funktionsprinzip

Das Konzept des VREM beruht darauf, dass der Verbrennungsprozess mit einem möglichst geringen, aber für eine vollständige Verbrennung ausreichenden Sauer-

stoffanteil, unabhängig von der Verbrennungstechnik beziehungsweise dem Verbrennungskonzept, sowie von dem eingesetzten Brennstoff, geregelt beziehungsweise optimiert wird. Um diese Art der Verbrennungsregelung technisch zu realisieren, wird eine neuartige O_2/CO_e -Sonde eingesetzt. Diese Sonde kann gleichzeitig sowohl den Gehalt an Sauerstoff, als auch den Gehalt an CO_e , das heißt die Summe aus allen nicht verbrannten Bestandteilen (CO , H_2 , C_nH_m), als wichtige Indikatoren für die Verbrennungsqualität beziehungsweise -vollständigkeit im Abgas detektieren und entsprechende Signale für die Regelung bereitstellen. Der optimale beziehungsweise minimale Sauerstoffgehalt ergibt sich aus dem maximal erlaubten Gehalt an CO_e (CO -Äquivalenten) beziehungsweise aus einer definierten Emissionskante, welche während der Verbrennung erreicht aber nicht überschritten werden darf. Bei der Regelung an der besagten Emissionskante soll die geringste Abgasmenge zur Reduzierung der thermischen Abgasverluste sprich die höchste Verbrennungseffizienz ohne Überschreitung der Emissionsgrenzwerte gewährleistet werden.

Diese Art der Regelung ist äußerst notwendig für die thermische Verwertung von heterogenen biogenen Brennstoffen mit variablen verbrennungstechnischen Eigenschaften, bei denen der optimale Sauerstoffbereich für eine sachgemäße Verbrennung stark variiert und nicht als fester Soll-Wert für die Regelung hinterlegt werden kann. Nur mit solchen Regelungskonzepten können biogene Brennstoffe in Kleinf Feuerungsanlagen im häuslichen und gewerblichen Gebäudebereich effizient und schadstoffarm thermisch verwertet werden und folglich einen großen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele sowie zur Energiewende in Deutschland leisten.

Sondentechnik verbessert Verbrennungsregelung

Gemäß dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik werden Biomasseheizkessel ausschließlich mit einer Lambda-Sonde, Temperaturfühlern (Abgas-, Feuerraum- und Kesseltemperatur) und Drucksensoren geregelt. Die Überwachung hinsichtlich der Sicherheit und der technischen Funktionalität und Emissionen erfolgt im Rahmen einer Typprüfung einmalig, bevor die Heizkessel auf dem

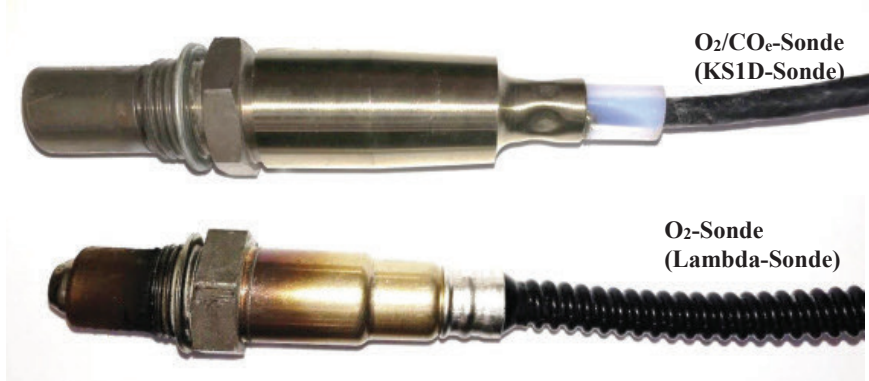


Bild 1: O_2/CO_e -Sonde im Vergleich mit einer herkömmlichen O_2 -Sonde.

Markt angeboten werden dürfen. In der Praxis werden die von Heizkesseln erzeugten Emissionen (Staub und Kohlenstoffmonoxid) in einigen europäischen Ländern in definierten Zeitabständen (in Deutschland beispielsweise alle zwei Jahre für 15 Minuten) wiederkehrend überwacht. Durch die aktuellen Überwachungsmechanismen ist die Schadstoffbelastung durch Biomasseheizkessel in der Praxis jedoch weder reproduzierbar noch abschätzbar. Eine verschlechterte Luftqualität lässt sich in vielen Gebieten während der Heizperioden beobachten, in denen intensiv mit Biomasse geheizt wird. Dort werden unter anderem die Feuerungsanlagen als Quelle für viele Schadstoffemissionen, vor allem für Feinstaub, verantwortlich gemacht. Durch den stetig zunehmenden Einsatz von Biomasse zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser kann sich diese Problematik ohne entsprechende Gegenmaßnahmen und verbesserte Technologien weiter verschärfen.

Zur Regelung von Biomasseheizkesseln wird gemäß dem Stand der Technik die Lambda-Sonde eingesetzt (Bild 1, unten). Durch das im Abgas gemessene O_2 -Signal mit den Kessel- und Feuerraumtemperaturen, werden die Kessel bezüglich der Verbrennungsluft- und/oder der Brennstoffzufuhr geregelt. Ein großes Problem bei der Regelung mit der Lambda-Sonde besteht darin, dass der durch die Sonde erfasste Sauerstoff aufgrund von möglichen Leckagen meistens nicht dem Sauerstoffüberschuss in der aktiven Reaktionszone entspricht. Darüber hinaus liefert die Lambda-Sonde ungenaue Signale bei unvollständiger Verbrennung sowie unzureichender Beheizung bei niedrigen Abgastemperaturen. Die Lambda-Sonde kann diesen unerwünschten Zustand einer unvollständigen, nicht sachgemäßen Verbren-

nung nicht erkennen. Der optimale Sauerstoffgehalt im Abgas (Lambda-Wert) für eine vollständige Verbrennung ist von der Konstruktion der Brenn- und Nachoxidationskammer, der Dichtheit der gesamten Anlage mit den Abgaswegen sowie von den verbrennungstechnischen Eigenschaften des eingesetzten Brennstoffs, vor allem bezüglich des Vergasungsverhaltens, abhängig. Einen Verbrennungsprozess tatsächlich mit einem festen Lambda-Wert zu regeln ist nur unter bestimmten Bedingungen und mit geringer Flexibilität hinsichtlich der Variationen der Betriebsparameter möglich.

Sauerstoff stellt eine wichtige Regelgröße dar, die alleine aber nicht ausreichend ist einen stabilen und zuverlässigen Betrieb – vor allem in der Anfahrbetriebsphase sowie in anderen problematischen Betriebsphasen – zu erreichen. Er stellt lediglich eine indirekte Größe für die Regelung der Verbrennung sowie als Indikator zur Beurteilung der Verbrennungsqualität dar. Aus den oben genannten Punkten ergeben sich die Vorteile der O_2/CO_e -Sonde (Bild 1, oben), welche die nicht verbrannten Abgasbestandteile einer schlechten Verbrennung schnell detektiert und infolgedessen der Verbrennungsvorgang besser geregelt werden kann. Auch Ungenauigkeiten in der O_2 -Messung beziehungsweise Falschlufteinbrüche beeinflussen das gute Regelergebnis nicht.

Während sich die Anwendung der O_2 -Sonde (Lambda-Sonde) für die Regelung biomassebetriebener Heizkessel massiv verbreitet hat, wird die O_2/CO_e -Sonde (KS1D) bisher hauptsächlich und sehr erfolgreich bei industriellen Öl- und Gasfeuerungsanlagen eingesetzt.

Die Besonderheit der ebenfalls auf Festkörperelektrolytbasis arbeitenden und daher sehr robusten O_2/CO_e -Sonde liegt

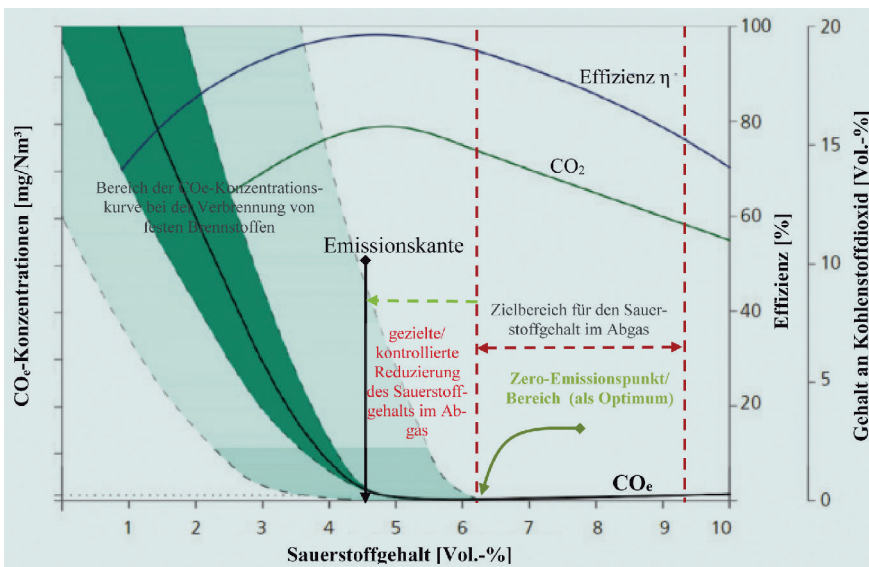


Bild 2: Konzept der Emissionskantenregelung vom VREM.

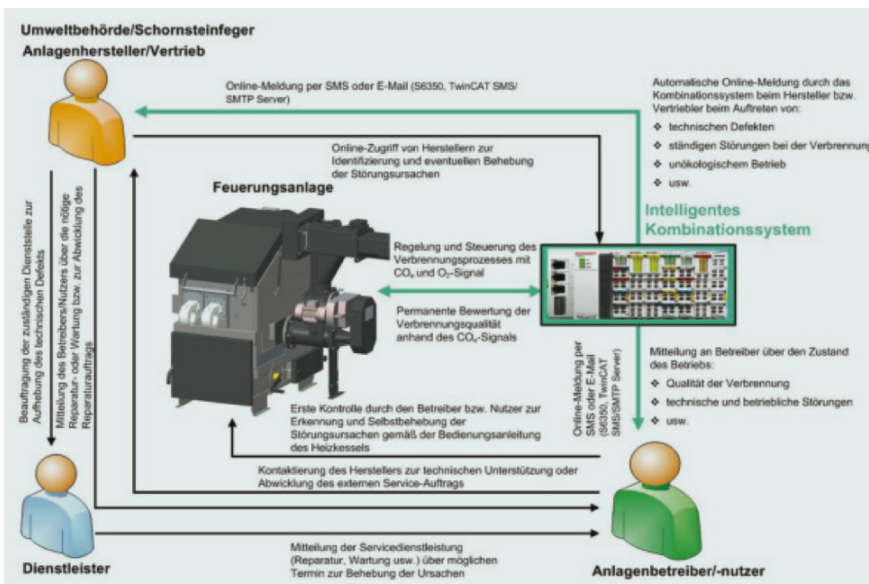


Bild 3: Schematische Darstellung der Meldung und Behandlung von Störfällen gemäß VREM.

darin, dass zusätzlich zu O_2 auch die nicht verbrannten Abgasbestandteile CO_e schnell detektiert, und infolgedessen die Verbrennungsqualität direkt beurteilt und in dieser Hinsicht optimal geregelt werden kann. Das hat zur Folge, dass das Optimum der Verbrennung zu jedem Zeitpunkt des Betriebs eingestellt und eine entsprechend signifikante Minderung der Schadstoffemissionen erreicht werden kann. Außerdem lässt sich auf dieser Basis eine permanente Bewertung der Verbrennungsqualität entwickeln, wodurch technische Fehler sowie Fehlbedienungen schnell und früh erkannt und entsprechend durch den zuständigen Kundendienst beseitigt werden können.

Aufbau und Funktion des VREM

Das Verbrennungsregelungs- und Emissionsmonitoringsystem beruht auf dem Einsatz der oben beschriebenen O_2/CO_e -Sensorik, mit der sich durch eine sukzessive Minderung des Sauerstoffgehalts im Abgas bei gleichzeitig niedrigen Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen die Verbrennung regelungstechnisch so einstellen lässt, dass höchste Wirkungsgrade erreicht werden können. Das Prinzip dieser sogenannten Emissionskantenregelung ist in Bild 2 erklärt.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Regelkonzepten, gibt das VREM keinen fes-

ten Sollwert für den Sauerstoffgehalt beziehungsweise Luftüberschuss oder Lambda-Wert im Abgas vor. Vielmehr stellt sich der jeweils optimale Wert in Abhängigkeit von der Verbrennungsqualität sowie dem Gehalt an nicht verbrannten gasförmigen Bestandteilen CO_e selbst adaptiv ein. Die Regelung zielt darauf ab, durch die kontinuierliche Einstellung der Sekundärluft und unter Berücksichtigung der CO_e -Konzentrationen den jeweils optimalen Betriebspunkt der Anlage zu finden und einzustellen. Außerdem werden die Primärluft sowie die Brennstoffförderung so geregelt, dass hohe Brennkammertemperaturen für eine vollständige Oxidation möglichst schnell erreicht und gleichzeitig möglichst geringe Abgasverluste eingehalten werden können.

Im Gegensatz zur klassischen Lambda-Regelung können durch das VREM Betriebsstörungen erkannt werden, welche im Praxisbetrieb aufgrund technischer Mängel oder einer Fehlbedienung wie zum Beispiel dem Einsatz ungünstiger oder für den Heizkessel nicht zugelassener Brennstoffe entstehen können (Bild 3). Hierbei werden die möglichen technischen Ursachen analysiert und entsprechend gespeichert. Bei der Festlegung der Ursachen ist zwischen Ursachen aufgrund der Verbrennungstechnik, des Brennstoffs und einer unsachgemäßen Bedienung des Heizkessels zu unterscheiden. Die Meldung der Störfälle mit den Analyseergebnissen erfolgt beispielsweise automatisch über E-Mail oder eine mobile App, wobei die Daten in einem Datenportal gespeichert und bei den entsprechenden autorisierten Stellen (Nutzer, Betreiber, Anlagenhersteller, zuständiger Kundendienst, Umweltbehörde) zur Einleitung geeigneter Maßnahmen gemeldet werden.

Die permanente Bewertung des Betriebs beziehungsweise das Prozess-Monitoring kann von den Anlagenherstellern als zusätzliche Dienstleistung für die Kunden zwecks Fernanalyse der technischen Funktionalität des Heizkessels und der Verbrennungsqualität angeboten werden. In diesem Fall gelangen die Meldungen über ein spezielles Portal zum Anlagenhersteller oder jeweiligen Dienstleister und können dort zur zügigen Problembeseitigung und Einleitung einer Serviceleistung bearbeitet werden. Diese Option ist für die Anlagenhersteller vor allem in der Gewährleistungszeit des Produkts wichtig, da besonders kostengünstig

ge Dienstleistungen beim Auftreten von technischen Fehlern oder Betriebsstörungen realisiert werden können. Die permanente Überwachung der Emissionen in Analogie zu großen Verbrennungsanlagen ist Dank der O₂/CO_e-Sonde (KS1D) sowohl technisch als auch wirtschaftlich realisierbar. Da die Einsparung durch reduzierten Brennstoffverbrauch für Kleinf Feuerungsanlagen wirtschaftlich nicht spürbar ist, hängt eine schnelle und erfolgreiche Umsetzung in der Praxis – auch im Sinne der Umwelt – von der Gesetzgebung ab. Solange es keine gesetzlichen Regelungen zur permanenten Überwachung von Kleinf Feuerungsanlagen gibt, können solche Systeme nur hinsichtlich der Verbesserung der Dienstleistung auf Hersteller- und Kundenwunsch ausgeführt werden.

Regel- und Verbrennungsverhalten des VREM

Bild 4 zeigt das Verbrennungsverhalten in einem handbeschildeten Heizkessel beim Einsatz vom VREM, welcher mit Buchenscheitholz betrieben wurde. Dabei wurden die Verläufe des Sauerstoffüberschusses im Abgas, Kohlenstoffmonoxid sowie die Abgas- und Kesseltemperaturen aufgezeichnet. Der Abbildung kann entnommen werden, dass der Sauerstoffüberschuss im Abgas auf einem niedrigen Niveau (durchschnittlich < 4,0 Vol.-%) gehalten wird und während des Betriebs an den entsprechenden Bedarf an Sauerstoff für einen sachgemäßen Betrieb angepasst wird. Durch die Regelung mit der O₂/CO_e-Sonde erreicht der Sauerstoffüberschuss einen minimalen Wert von 3,8 Vol.-%, bei dem die Konzentrationen des Kohlenstoffmonoxids über den gesamten Abbrand niedrig und im Durchschnitt unter einer Emissionsgrenze von 50 mg/Nm³ bleiben.

Durch diese kontrollierte Reduzierung des Sauerstoffüberschusses im Abgas werden die Abgasmenge und somit die thermischen Abgasverluste minimiert, ohne dabei die chemischen Abgasverluste über nicht verbrannte Bestandteile im Abgas zu erhöhen. Bei der eingesetzten Versuchsanlage wurde der Wirkungsgrad durch die Regelung mit dem VREM um über sechs Prozent dauerhaft mit hoher Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit verbessert. Bei älterer Verbrennungstechnik zum Beispiel im Bestand ist eine Verbesserung im Praxisbetrieb von 16 Prozent zu gewährleisten.

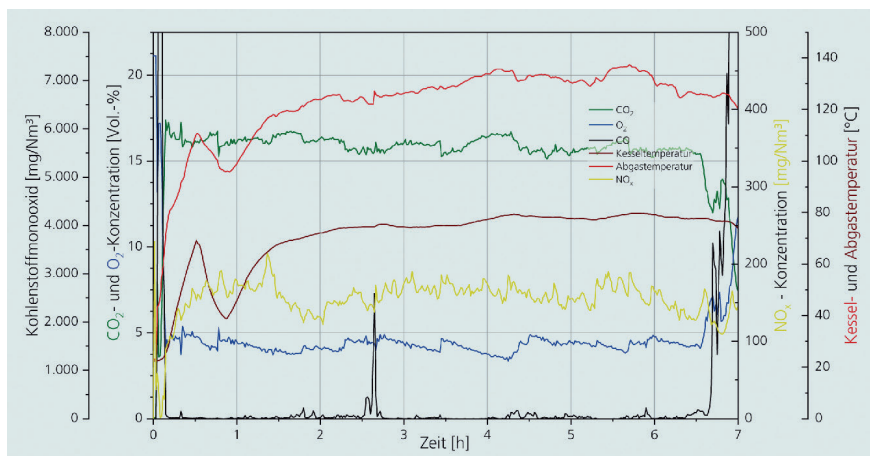


Bild 4: Verbrennungs- und Regelungsverhalten des VREM beim Einsatz in einem handbeschildeten Vergaserkessel.

Moderne Technologien wie das VREM, mit dem die Wärmebereitstellung in Gebäuden deutlich effizienter stattfinden kann, führen nicht nur zu einer Minderung der jährlichen CO₂-Emissionen von bis zu acht Millionen Tonnen (hochgerechnet für alle Biomasseheizkessel in Deutschland mit einer durchschnittlichen thermischen Leistung von 50 kW), sondern tragen auch zu einer finanziellen Entlastung beziehungsweise Kosteneinsparung für die Endverbraucher bei und steigern dabei Sicherheit und Zuverlässigkeit der Anlage. In der Praxis lassen sich durch die Verbesserung der Effizienz bei der Wärmebereitstellung jährlich Kosten von bis zu 500 Euro pro Anlage mit einer thermischen Leistung von 50 kW einsparen. Dank dieser Kosteneinsparungen wird sich die Technologie für den Endverbraucher innerhalb von rund drei Jahren amortisieren. Die Kosten für die O₂/CO_e-Sonde inklusive Elektronik sind mit etwa 170 Euro bei 5 000 Stück vergleichbar mit den Kosten für die herkömmliche Lambda-Sonde.

Die regelungstechnische Verbesserung der Verbrennung mit dem Einsatz der in VREM implementierten Emissionskantenregelung wurde ausschließlich für handbeschildete Heizkessel entwickelt und erfolgreich auf dem Prüfstand erprobt. Die Entwicklung der Emissionskantenregelung für automatisch beschildete Heizkessel soll nun in weiteren Projekten durchgeführt werden. Das Gleiche gilt für die Dauererprobung der Emissionskantenregelung sowohl für automatisch als auch für handbeschildete Heizkessel in der Praxis, was ein wichtiges Überzeugungsargument für die Kesselhersteller und ihre Kunden ist.

Das VREM bietet ein großes Potenzial für eine umwelt- und ressourcenschonende sowie hocheffiziente Verbrennung und folglich Brennstoff- und Kosteneinsparungen unter praktischen Einsatzbedingungen. Weitere Ziele der Dauererprobung in der Praxis bestehen in der Weiterentwicklung der Regelalgorithmen, dem Testen einer neuen Elektronik der O₂/CO_e-Sonde, der Untersuchung der Stabilität der O₂/CO_e-Sonde über eine lange Betriebszeit und in der Durchführung einer ausführlichen Risikoanalyse. Zusätzlich ist die Weitererprobung der Emissionsüberwachung sowie der Betriebsbewertung mit einer zentralen und dezentralen Datenspeicherung, -bewertung und -übertragung ein wesentliches Ziel der Dauererprobung des VREM in der Praxis. ■



**Dr.-Ing.
Mohammad
Aleya**

ist Leiter des Fachgebiets Verbrennungs- und Umweltschutztechnik am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart.



**Dr.-Ing.
Frank Hammer**

ist Produktmanager für Sensoren und Sensorsysteme bei der Lamtec Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG, Walldorf.