

Regelung des Verbrennungsluftmassenstroms bei Kleinfeuerungsanlagen

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der
Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Marko Völkel

aus Ilmenau

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Mitberichter:

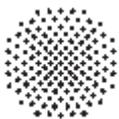
Prof. Dr. rer.nat. Ernst W. Messerschmid

Tag der Einreichung:

30.01.2007

Tag der mündlichen Prüfung:

17.09.2007



Universität Stuttgart **IGE** Institut für Gebäudeenergetik

2008

Kurzfassung

Die Entwicklung von kleinen und mittleren Brenner-Kessel-Systemen hat in den letzten Jahren einen Stand erreicht, der einen Betrieb mit hohem Nutzungsgrad ermöglicht. Der Abgasverlust solcher Anlagen ohne Nutzung der latenten Wärme des Abgases liegt unter fünf Prozent. Betrachtet man ein einzelnes System, scheint dieser Verlust gering. Summiert man aber die Gesamtheit aller Brenner-Kessel-Systeme in Deutschland oder sogar weltweit, ist die verlorene Wärmemenge sehr groß. Die Senkung des Abgasverlustes um einen oder zwei Prozentpunkte würde eine erhebliche Einsparung an fossilen Brennstoffen ermöglichen.

Diese Einsparung kann mit vertretbarem Systemaufwand nur noch über die Reduzierung des Verbrennungsluftmassenstroms auf das erforderliche Minimum erreicht werden. Derzeit werden Brenner-Kessel-Systeme mit einem Luftüberschuss von bis zu 30% betrieben. Dieser Überschuss kann auf 5% bis 10% reduziert werden. Für diese Reduktion muss der Luftmassenstrom geregelt werden. Als Regelgröße wird die Konzentration an unverbrannten Bestandteilen im Abgas (CO_a) herangezogen, da diese eine Funktion des Luftmassenstroms ist und die Verbrennung nahe dem Umschlagpunkt zwischen vollständiger und unvollständiger Verbrennung erfolgt.

Diese Regelung ist einfach und ohne großen Aufwand mit Hilfe von neuen Sensoren möglich. Ein solcher Sensor wurde weiterentwickelt und dessen Messverhalten analysiert. Die Auswahl geeigneter Materialien zur Sensorfertigung sowie die Optimierung des Fertigungsprozesses insbesondere im Hinblick auf Reproduzierbarkeit und Massenfertigung waren die ersten Schwerpunkte dieser Arbeit. Zur Integration der Sensoren in ein Gehäuse wurden verschiedene Kontaktierungsverfahren erprobt. Das Spaltschweißen hat sich hierbei als einfache, serientaugliche und kostengünstige Lösung erwiesen.

Bei der Gehäuseentwicklung wurde berücksichtigt, dass die Umgebungstemperatur je nach Messposition und Brenner-Kessel-System variieren kann. Hieraus ergeben sich zwei unterschiedliche Gehäusetypen. Während für Anwendungen bis ca. 150°C Bronzekontakte mit anschließender Kunstharzversiegelung ausreichen, müssen für den Temperaturbereich bis maximal 500°C Kontakte aus Nickel bzw. Nickellegierungen und keramische Vergussmaterialien gewählt werden.

Aus dem CO_a -Sensor mit zwei parallel arbeitenden Messelektroden wurde ein Prototyp eines Kombinationssensors für CO_a und Sauerstoff entwickelt.

Die entwickelten Sensoren wurden im Labor mit synthetischem Messgas und im realen Abgas untersucht und das Messverhalten analysiert. Die Sensoren erwiesen sich für den Einsatz im Abgas als geeignet. Die Lebensdauer des CO_a -Sensors beträgt mehr als 3 Jahre.

Eine bekannte Regelstrategie für Industriefeuerungen wurde weiterentwickelt, so dass sie auf kleine und mittlere Brenner-Kessel-Systeme anwendbar ist. Durch die Überwachung des Abgases auf CO_a und die sehr geringe Ansprechzeit des Sensors ist ein Betrieb des Brenner-Kessel-Systems bei minimalem Luftmassenstrom möglich und somit eine Verbrennung mit verbessertem Nutzungsgrad bei minimaler Schadstoffemission. Bei den Untersuchungen am Brenner-Kessel-System wurde des Weiteren festgestellt, dass der CO_a -Sensors als Flammwächter eingesetzt werden kann.

Da der CO_a -Sensor eine sicherheitsrelevante Komponente im Gesamtsystem ist, wurde eine Fehleranalyse des Sensor-Stecker-Subsystems durchgeführt. Darauf aufbauend wurde ein Selbstdiagnosealgorithmus entwickelt, der die Fehlerursache feststellt und entscheidet, ob die Sensorspannung zuverlässig ist oder ob das Gesamtsystem in einen sicheren Zustand gebracht werden muss.

Abstract

The development of domestic boiler-burner-systems in the last years allows an operation with high efficiency. The flue gas loss of modern systems is lower than five percent without using the latent heat of the flue gas. The flue gas loss of the individual system seems to be comparatively low. But the summary of all systems results in a big heat loss. The reduction of the flue gas loss by one to two percent would save a huge amount of fossil fuels.

This saving can only be accomplished on modern domestic boiler-burner-systems in a feasible way by a reduction of the combustion air mass flow to its minimum. Currently domestic boiler-burner-systems are operated with an excess combustion air up to 30 percent related to the necessary air mass flow for the stoichiometric combustion. This excess air can be reduced down to 5 percent to 10 percent. For that the combustion air mass flow has to be controlled. This can be achieved by a control of the concentration of all unburned components in the flue gas (CO_e), because the CO_e -concentration is a function of the combustion air mass flow and because the combustion works near the point where the complete combustion changes to incomplete combustion.

That kind of control can be realised easily with new sensor systems. Such a sensor system was further developed and its behaviour analysed during this thesis. The selection of the right materials and the optimisation of the production process of the sensor element in terms of repeatability and mass production were the first points to solve. For the integration of the sensor element into a casing, different processes of contacting were tested. Micro welding turned out to be an easy low cost solution that can be used in mass production.

The development of the casing was depending on the flue gas temperature. The results are two different casings, one for low temperature and one for high temperature applications. For low temperature applications up to 150°C bronze contact pins fixed with synthetic resin meet the requirements. For high temperature applications up to 500°C it is necessary to use contact pins of nickel or nickel alloy and ceramic filling to fix them.

A new development derived from the CO_e -sensor element is a prototype of a combined sensor element that can measure CO_e - and O_2 -concentrations simultaneously. The lack of an oxygen reference requires the measurement principle of the amperometric measurement.

The sensor elements were tested and analysed in their behaviour in the laboratory in synthetic gas as well as assembled in the flue gas of different boiler-burner-systems. Both the CO_e sensor as well as the combined sensor element for CO_e and O_2 proved to be suitable for applications in flue gas. The lifetime of the CO_e -sensor was demonstrated for more than 3 years.

A known control strategy for industrial boilers was further developed for the application on domestic boiler-burner-systems. By control of the CO_e -concentration of the flue gas and the fast response time of the sensor element it is possible to run the boiler-burner-system at a minimal combustion air mass flow and thereby with an improved efficiency and with minimal emissions. As another result of the investigation, the sensor can be used as flame detector if the sensor is placed accordingly.

Due to the fact that the sensor is an important component of the burner safety system the sensor was analysed in view of possible errors. Based on that analysis a self-check algorithm was developed. With that algorithm the reason for the error can be detected and the system can check the quality of the sensor signal. So it is possible to switch the burner control from the sensor controlled system to a safe status control, if the sensor is not working properly.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Grundlagen	3
2.1	Zerstäubungsbrenner	3
2.2	Brennwertgeräte	5
2.3	Grundlagen der Verbrennung	6
2.4	Bedingungen im Rauchgas	9
2.5	Gesetzliche Vorschriften	10
2.6	Wirkungsgrade und Abgasverluste	11
2.6.1	Allgemeine Beschreibung	11
2.6.2	Abgasverluste für Feuerungen nach BImSchV	12
2.6.3	Wirkungsgrad von Brennwertanlagen	13
2.6.4	Berechnung eines äquivalenten C_xH_y	17
2.7	Grundlagen keramischer Sensoren	18
2.7.1	Allgemeines	18
2.7.2	Der Nernstsche Sensor	19
2.7.3	Der Nicht-Nernstsche Sensor	21
2.7.4	Volumenstrom- und Temperaturmessung	23
3	Sensorentwicklung	25
3.1	Das Sensorelement	25
3.1.1	Sensoraufbau und Sensormaterial	25
3.1.2	Sensorfertigung	31
3.2	Gehäusetechnologie und Sensorperipherie	34
3.2.1	Aufbau- und Verbindungstechnologie	34
3.2.2	Sensorelektronik	36
3.3	Charakterisierung des Rauchgassensors	37
3.3.1	Messverhalten auf CO, H ₂ und im realen Abgas	37
3.3.2	Sensorempfindlichkeit auf CH ₄	39
3.4	CO _ä -O ₂ Kombisensor	40
4	Regelstrategie und Regelablauf	43
4.1	Allgemeines	43
4.2	Der Versuchsaufbau	43
4.3	Die Emissionskantenregelung	45
4.4	Der CO _ä -Sensor als Flammwächter	48
4.5	Abgasverluste des Brenner-Kessel-Systems	49

5	Fehlersicherheit des Sensorsystems	51
5.1	Allgemeines	51
5.2	Prinzipieller Aufbau eines eigensicheren Sensorsystems	51
5.3	Grundlagen der Fehlersicherheit.....	52
5.3.1	Fehlererkennung durch Redundanz.....	52
5.3.2	Fehlererkennung mittels bekannter Relation.....	53
5.3.3	Fehlererkennung mittels elektrischer Stimulation.....	54
5.3.4	Fehlererkennung durch funktionale Tests	54
5.3.5	Fehlererkennung mittels Zuverlässigkeitsindikatoren	54
5.3.6	Lokale Fehlererkennung eines Sensorsystems	55
5.3.7	Fehleranalyse.....	57
5.3.8	Fehlerbeseitigung	57
5.3.9	Fehlersignalisierung	58
5.4	Fehlermanagementkonzept für den entwickelten Sensor.....	60
5.4.1	Fehlererkennung auf der Heizseite.....	62
5.4.2	Fehlererkennung auf der Sensorseite – Keramik	65
5.4.3	Fehlererkennung auf der Sensorseite – Elektroden.....	68
5.4.4	Modell zur Fehleranalyse	69
5.4.5	Möglichkeiten zur Fehlerbeseitigung.....	71
5.4.6	Fehlersignalisierung an übergeordnete Systeme	72
6	Zusammenfassung und Ausblick	74
7	Literatur	78
8	Anhang.....	82
8.1	Approximationen nach Glück.....	82
8.2	Tabellen und Zahlen	83
8.3	Fehleranalyse des CO ₂ -Sensors.....	85