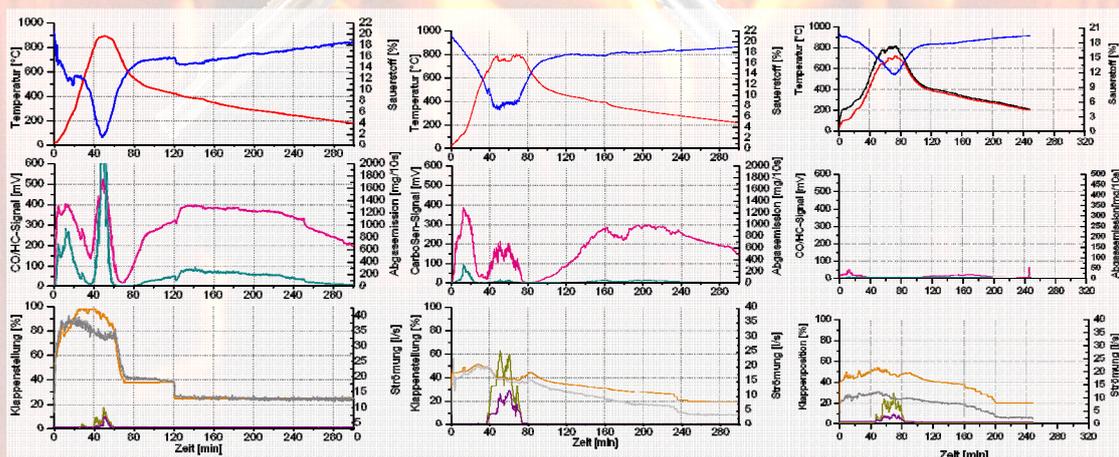


Optimierung der Verbrennungsvorgänge in Stückholzfeuerungsanlagen durch sensorische und katalytische Methoden

Kooperationspartner:

- Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS) am IAF, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
- ESCUBE GmbH + Co. KG, Dr. Frank Hammer, Stuttgart
- Brunner GmbH, Eggenfelden
- Viessmann GmbH, Allendorf
- Dittrich Elektronik GmbH, Baden-Baden
- ECOkat GmbH, Udenheim



Autoren

Prof. Dr. Heinz Kohler (ISIS) und Dr. Frank Hammer (ESCUBE GmbH+Co. KG)

November 2007

Optimierung der Verbrennungsvorgänge in Stückholzfeuerungsanlagen durch sensorische und katalytische Methoden

Förderprojekt Nr. 22663-24/0 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
Laufzeit: 1. Juli 2005 – 31. Aug. 2007

Kooperationspartner:

Institut für Sensorik und Informationssysteme am IAF (ISIS), Hochschule Karlsruhe –
Technik und Wirtschaft, Prof. Dr. Heinz Kohler (Projektkoordination)
ESCUBE GmbH + Co. KG, Dr. Frank Hammer, Stuttgart
Brunner GmbH, Eggenfelden
Viessmann GmbH, Allendorf
Dittrich Elektronik GmbH, Baden-Baden
ECOkat GmbH, Udenheim

Abschlussbericht

Autoren: Prof. Dr. Heinz Kohler, Dr. Frank Hammer

Inhalt

- 1) Einführung und Problemstellung
- 2) Installation und Nachrüstung der Feuerungsanlagen
- 3) Sensorische Aspekte der Feuerungstechnik
- 4) Regelungsalgorithmen zur Optimierung des Verbrennungsprozesses
- 5) Oxidationskatalyse
- 6) Ergebnisse und Diskussion
- 7) Qualifizierung des CARBOSEN 1000 (ESCUBE GmbH + Co. KG) für
Hochtemperatureinsätze im Abgas von Stückholzverbrennungsanlagen
- 8) Zusammenfassung
- 9) Ökologische und Ökonomische Bilanzierung
- 10) Öffentlichkeitsarbeit

1 Einführung und Problemstellung

Bereits im Jahre 2002, also lange bevor sich in Deutschland politisch die Erkenntnis durchsetzte, dass die Energiegewinnung aus Biomasse gefördert werden sollte, um (i) nachwachsende Energieträger soweit möglich am Energiemix zu beteiligen und somit einen Beitrag zur nachhaltigeren Energieversorgung zu leisten, (ii) CO₂-neutrale Energieträger zu fördern, (iii) die Abhängigkeit von (unsicheren) ausländischen Energiequellen zu mildern und (IV) neue lokale Wirtschaftskreisläufe zu stärken, hatte das ISIS (damals IAF-Sensorik-Gruppe) damit begonnen, die Qualität der Stückholzverbrennung angesichts der Emissionswerte in Frage zu stellen und sich Gedanken zu machen, welche in-situ Gassensoren denn geeignet sein könnten, um den Verbrennungsprozess zu jedem Zeitpunkt eines Abbrandes hinreichend zu beschreiben, um daraus ein Regelungskonzept für den Primär- und Sekundärluftstrom abzuleiten. Ausgangspunkt war die Tatsache, dass die Brunner GmbH Eggenfelden, eine neue Kachelofeneinsatz-Generation mit EOR-Steuerung (Messung der Verbrennungstemperatur und der Schadgasemission (TGS-Sensor)) vorgestellt hatte und die Emissionswerte dieses neuen Produktes von „nur 1000ppm CO“ als besondere Innovation herausstellte, was den Projektkoordinator zur Kontaktaufnahme veranlasste, um sich über weitere Entwicklungsmöglichkeiten auszutauschen. Die folgende intensive Zusammenarbeit wurde vom Land Baden-Württemberg im Schwerpunktprogramm „Innovative Projekte“ (Juni 2002 – Mai 2003) gefördert und bezog bereits die Sensorhersteller (ESCUBE GmbH, Dittrich Elektronik GmbH) und weitere an diesem Projekt interessierte Partner (Heraeus GmbH, Kleinostheim; ECOkat GmbH, Udenheim; Schiedel Kaminbau GmbH + Co, München) als Kooperationspartner mit ein. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Auswahl geeigneter Gassensoren und die Entwicklung eines eigenen, fortgeschrittenen Regelungskonzeptes, das sich etwas an die Regelstrategien des Herstellers anlehnte (Unterteilung in drei Abbrandphasen, trendgesteuert) mit dem bescheidenen Erfolg, dass die CO-äquivalenten Gasemissionen im Mittel auf etwa 50% reduziert werden konnten. Natürlich blieben nach dieser kurzen Projektlaufzeit von nur einem Jahr noch viele Fragen offen, jedoch zeichnete sich bereits ab, dass durch kontinuierliche Regelung der Primär- und Sekundärluftströme auf der Basis der sensorischen Eingangsgrößen Verbrennungstemperatur, Restsauerstoffgehalt und CO/HC-Gehalt im Abgas die Verbrennungsqualität noch weiter zu verbessern sein müsste. Hierzu waren vor allem Fortschritte bzgl. der Hochtemperaturstabilität des CO/HC-Sensors (Projektunterauftrag ESCUBE GmbH + Co KG) und in der Konzeption des Regelungsalgorithmus notwendig – beide Aspekte wurden als Arbeitspakete in dieses Forschungsprojekt aufgenommen. Zusätzlich wurde das Projekt durch den Aufbau eines Stückholz-Heizkessels (Vitolig 200, Viessmann GmbH, Allendorf / Windhager GmbH, Seekirchen (A)) und entsprechende Untersuchungen erweitert. Da der SF10SK-Kachelofeneinsatz (Brunner GmbH, Eggenfelden) bereits aus dem Vorprojekt vorhanden war und die

Erfahrungen mit dem Sauerstoffsensoren der Dittrich Elektronik GmbH sehr zufrieden stellend waren, konnten die Arbeiten in diesem Projekt auf die Arbeitspakete

- a) Ertüchtigung des ESCUBE CarboSen 1000 für Hochtemperaturanwendungen
- b) Aufbau des Vitolog 200 im Technikum des ISIS und Nachrüstung mit Sensorik und Messtechnik
- c) Entwicklung von Regelungsstrategien anhand von Sensordaten aus Abbrandexperimenten
- d) Untersuchung der Auswirkung von Oxidationskatalysatoren auf die Verbrennungsqualität
- e) Ermittlung der relativen Reduktion der Schadgasemissionen durch die Maßnahmen in c) und d).

konzentriert werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass auf das Arbeitspaket „Regelungsstrategien für modulierenden Betrieb des Stückholzheizkessels“ verzichtet wurde, da im Projektverlauf klar wurde, dass dies den Projektrahmen sprengen würde und sich andeutete, dass der modulierende Betrieb nachteilige Auswirkungen auf die Verbrennungsqualität haben muss. Gleichzeitig war die Priorität dieser Entwicklung deutlich gesunken, da der Gesetzgeber inzwischen die Installation eines Wärmepuffers vorsieht, der so dimensioniert sein muss, dass er die gesamte Wärmemenge einer Stückholzfüllung aufnehmen kann.

Während der zweijährigen Laufzeit hat das Projekt deutlich an Bedeutung gewonnen, da, wie eingangs kurz zusammengefasst, die Regierungen die Entwicklung der Energiegewinnung aus Biomasse fördern, jedoch gleichzeitig klar ist, dass dies zu einer erheblichen Mehrbelastung von Mensch und Umwelt führen wird (Emission toxischer Gase und Stäube), wenn die Verbrennungsqualität nicht spürbar verbessert wird. Folgende Sachverhalte machen dies deutlich: Die geplante Verschärfung der 1. BImSchV ab dem Jahr 2008 auf die CO-Obergrenzen von 2000ppm für Kachelöfen und Heizkamine und auf 1000ppm für Stückholzheizkessel muss in Relation zu CO-Emissionen von Gas- und Heizölbrennern von weit unter 100ppm gesehen werden. Wird somit die Wärmegewinnung durch Verbrennung von Holz, insbesondere von Stückholz, nach dem Stand der Technik ab 2008 (von Altanlagen ganz zu schweigen) weiter gesteigert, dann muss mit einer erheblichen Mehrbelastung gerechnet werden /Str07/. Es besteht also dringender Handlungsbedarf!

2 Installation und Nachrüstung der Feuerungsanlagen

Wie in Kap. 1 bereits angedeutet, konnte in diesem Projekt bereits auf Installationen des Kachelofeneinsatzes SF10SK der Brunner GmbH aus einem Vorprojekt zurückgegriffen werden. Diese Installationen hatten sich bewährt. Im Projektverlauf wurde analog ein Stückholz-Heizkessel Vitolig 200 der Viessmann GmbH installiert und mit weitgehend ähnlicher Mess- und Regelungstechnik ausgerüstet. Im Folgenden wird diese Nachrüstung für beide Anlagen gemeinsam beschrieben und die individuellen Unterschiede werden aufgezeigt.

Die Anlagen im Überblick zeigt Abb. 1. Beide Verbrennungsanlagen (VA) sind mit einer gemeinsamen Abgasführung verbunden, der Kaminzug wird durch einen geregelten



Abb.1
Verbrennungsanlagen im Technikum des ISIS. Der SF10SK-Kachelofeneinsatz wurde, wenn nicht gesondert vermerkt, mit Holzbriketts (Heizprofi GmbH) befeuert, zur Befuerung des Vitolig 200 Stückholzheizkessel wurde ausschließlich vorgetrocknetes Buchenholz (Restfeuchte < 20%) verwendet.

Saugzugventilator konstant gehalten. Die Mess- und Regelungseinrichtung (im Vordergrund) wurde so erweitert, dass sie im alternativen Betrieb für beide VA genutzt werden kann. Die Wärme der VA wird über einen externen Wärmetauscher in Form einer Wasserkühlung abgeführt, wobei die Wassertemperatur in der VA durch die Regelungssoftware vorgegeben werden kann und die tatsächlich während eines Abbrandes abgeführte Wärme durch einen Wärmemengenzähler gemessen wird. Die VA wurden jeweils mit Luftmassenstromsensoren nachgerüstet, welche getrennt die Primär- und Sekundärluftströme messen. Zur Regelung der Zuluftströme werden die herstellereitig zur Verfügung stehenden Stellmotoren für die Zuluftstellschieber verwendet. Beide VA wurden so umgebaut, dass der Betrieb sowohl mit der Regelungstechnik des Herstellers möglich ist (bei gleichzeitiger Erfassung der Signale der nachgerüsteten Sensoren (siehe unten)) als auch die gesamte Mess- und Regelungseinrichtung im Rahmen der Untersuchungen zur Optimierung des Verbrennungsprozesses selbst übernommen werden kann.

Im Falle des Vitolig 200 Stückholzkessels waren zusätzlich einige Besonderheiten zu installieren: Der Kessel besitzt herstellereitig einen eigenen Saugzugventilator. Nach Nachrüstung des Kessels mit einem Differenzdrucksensor, der im Abgasstrang des Kessels installiert wurde, kann die Saugleistung des Ventilators geregelt und damit der Saugzug des Kessels in den Regelungsalgorithmus der Prozesssteuerung einbezogen werden. Weiterhin wurde zusätzlich ein Thermoelement installiert, das die Verbrennungstemperatur in der

Sekundärbrennkammer misst. Dies war notwendig geworden, da die Temperaturmessung des Herstellers im Abgaszug nach der Sekundärbrennkammer geschieht und deswegen diese Daten keine direkten Aussagen über die Temperatur des Nachverbrennungsprozesses zulassen.

Beide VA wurden jeweils mit Abgassensoren zur Bestimmung des Restsauerstoffgehaltes (RSG) und des CO/HC-Gehaltes ausgerüstet (Kap.3).

3 Sensorische Aspekte der Feuerungstechnik

Im Gegensatz zu den bisher fortgeschrittensten Zuluftregelungskonzepten nach dem Stand der Technik, die entweder nur die Verbrennungstemperatur (T) oder die T und den RSG oder die T und den CO/HC-Gehalt messen, war bereits im Vorprojekt vermutet worden, dass nur durch simultane in-situ Erfassung aller drei Größen T, RSG und CO/HC-Gehalt eine hinreichende Beschreibung des aktuellen Verbrennungsprozesses möglich ist, um daraus einen robusten, für möglichst alle Abbrandsituationen (Variation des Brennmaterials, unterschiedliche Feuerungsgewohnheiten des Betreibers, unterschiedliche Brennstoffmengen, usw.) geeigneten und gleichzeitig in seiner Funktion überschaubaren Regelungsalgorithmus für die Zuluftströme abzuleiten.

Zur Bestimmung des RSG hatte sich die Verwendung des Sauerstoffsensors der Dittrich Elektronik GmbH, Baden-Baden bereits im Vorprojekt hervorragend bewährt. Es handelt sich hierbei um einen festkörperelektrochemischen Sensor, der eine Nernstsche Konzentrationszelle mit einer elektrochemischen Pumpzelle kombiniert /Koh06, Dit86/ und auf diese Weise eine lineare Signalabhängigkeit von der Restsauerstoffkonzentration im thermodynamischen Gleichgewicht mit allen anderen Gaskomponenten liefert. Im Gegensatz zu den gängigen Messmethoden des RSG wurde auf den Einsatz der preiswerteren Nernst-Konzentrationszelle, auch Sprungsonde genannt, verzichtet, da diese im für die Stückholzverbrennung relevanten Regelbereich $1,4 \leq \lambda \leq 2,5$ /Nus89/ nur sehr geringe Sensitivität aufweist und deshalb die Aussagekraft des Sensorsignals problematisch erscheint oder die Aufbereitung zumindest sehr aufwändig ist.

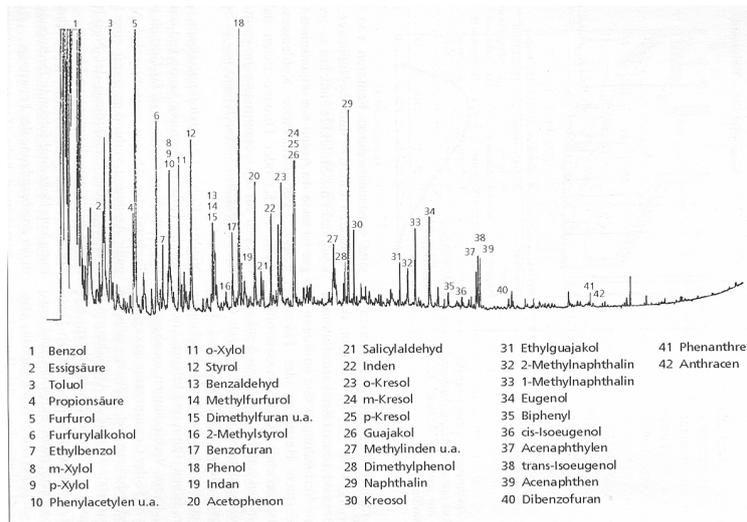


Abb.2
Gaschromatogramm einer Abgasprobe bei unzulänglichem Ausbrand von Holz mit höhermolekularen Kohlenwasserstoffen nach Marutzky und Seeger /Mar/.

Zur in-situ Messung der nicht oder nur unvollständig oxidierten Komponenten, wie CO, verschiedene Komponenten von Alkanen, Aromaten und PAK usw. im Abgas (Abb.2) stehen nur sehr wenige sensorische Möglichkeiten zur Verfügung, die bei Temperaturen oberhalb 100°C dauerhaft einsetzbar sind. Gedanklich wurde von der Feststellung ausgegangen, dass es angesichts der Vielfalt der bei der Holzverbrennung emittierten Gaskomponenten (Abb.2) nicht anzuraten ist, eine Leitkomponente selektiv sensorisch zu erfassen. Insofern stehen Abschlussbericht zum DBU-Förderprojekt „Optimierung der Verbrennungsvorgänge in Stückholzfeuerungsanlagen durch sensorische und katalytische Methoden“

nach dem Kenntnisstand der Verfasser drei Alternativen zur Verfügung: das Pellistorprinzip, Metalloxid-Gassensoren (z.B. TGS-Typ) und seit kurzem das Mischpotentialprinzip. Die beiden ersten Sensortypen wurden wegen zu geringer Sensitivität (Pellistor) bzw. komplexer Querempfindlichkeit für Feuchte und RSG (TGS) ausgeschlossen, ein Mischpotentialsensor für den low-cost-Bereich wird von der ESCUBE GmbH+Co. KG hergestellt, der für Temperaturen bis maximal 200°C seit 2002 serienreif, für höhere Temperaturen jedoch noch in der Entwicklungsphase ist. Das Sensorprinzip beruht auf der Potentialdifferenzmessung zweier Elektroden, die auf einem gemeinsamen Festelektrolyten (Yttrium stabilisiertes Zirkoniumoxid) aufgebracht sind (Kap. 7). Während das Halbzellenpotential der Platinelektrode zum Festelektrolyten auf dem thermodynamischen Gleichgewicht des Restsauerstoffes mit allen anderen Gaskomponenten (CO, HC-Komponenten) beruht, stellt sich am anderen Elektrodenmaterial (z.B. Platinlegierung) dieses Gleichgewicht nicht ein. Vielmehr misst man ein Halbzellenpotential, das zwar auch vom adsorbierten Sauerstoff bestimmt wird, jedoch steht dieser im Ungleichgewicht mit den anderen Gaskomponenten /Ham02/. Infolgedessen ergibt sich als Sensorsignal eine Potentialdifferenz, deren Konzentrationsabhängigkeit (Sensitivität) spezifisch von der Art der Gaskomponenten (CO, HC-Komponenten) und vom Restsauerstoffpartialdruck abhängt (Abb. 3).

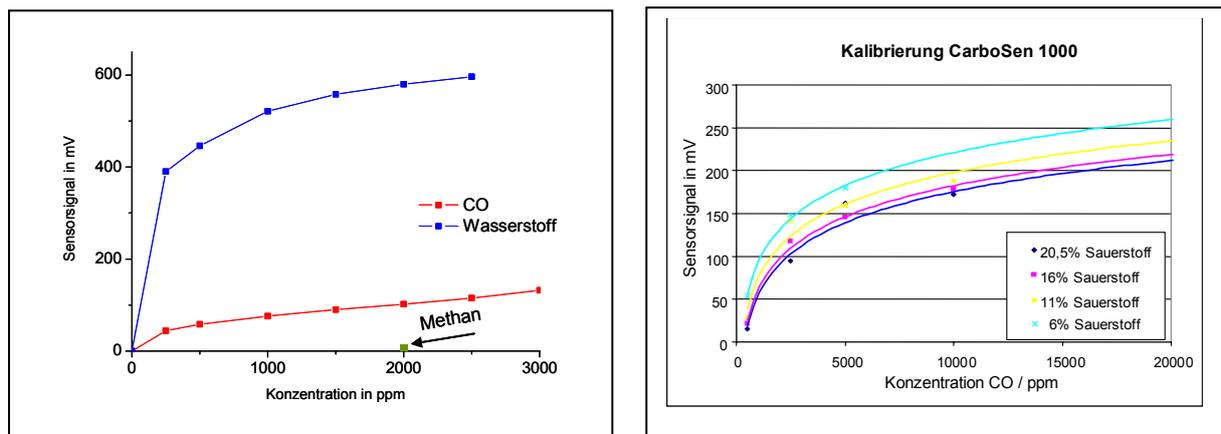


Abb.3: Abhängigkeit des Sensorsignals des CarboSen 1000 von der Konzentration verschiedener Modellgase bei $c(\text{O}_2)=20,5\%$ a) und von der CO-Konzentration bei verschiedenen Restsauerstoffkonzentrationen b).

Angesichts der komplexen Abgaszusammensetzung von unvollständigen Holzverbrennungsprozessen (Abb.2) und unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Sensoreigenschaften, liefert dieses Sensorprinzip kein komponentenspezifisches Signal, sondern einen Messwert, der in komplexer Weise mit unterschiedlichen Sensitivitäten von den Konzentrationen der un- oder teiloxidierten Gaskomponenten und vom Restsauerstoffgehalt bestimmt wird. Insbesondere muss bedacht werden, dass sich die Abgaszusammensetzung sowohl im Verlauf eines Abbrandes verändert als auch von der Holzart (-qualität) abhängen kann. Allerdings reicht dieses komponentenunspezifische Sensorsignal zur Registrierung einer

äquivalenten Schadgaskonzentration bezogen auf einen Kalibrierwert eines bestimmtes Modellgases (z.B. CO) völlig aus, um als Eingangsgröße für einen Regelungsalgorithmus der Zuluftströme zu dienen und daraus die Änderung der Verbrennungsqualität als Folge von unterschiedlichen Regelungsstrategien abzuleiten (siehe unten) und damit zu einer Bewertung der Regelungskonzepte und der zugehörigen Verbrennungsqualität zu kommen.

Die Kalibrierung der Gassensoren wurde in regelmäßigen Zeitabständen überprüft. Wegen der zuverlässigen linearen Signalabhängigkeit des Sauerstoffsensors (MF010-0, Ditt- rich GmbH+Co., Baden-Baden) war dies durch Überprüfung des Signales bei Umgebungs- luft möglich und nicht weiter problematisch.

Wie bereits in Kap. 1 angedeutet, hat die Signalstabilität des CarboSen 1000 (Escube GmbH+Co. KG, Stuttgart) noch nicht eine vergleichbare Qualität erreicht. Es kam vereinzelt zu Sensorausfällen, was auf Probleme mit der Aufbau- und Verbindungstechnik hindeutet. Der CO/HC-Sensor zeigt auch immernoch eine charakteristische Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (Abb. 4), die möglicherweise auf eine unzureichende Regelung der Sensorheizung zurückzuführen ist. Diese Probleme werden über die Projektlaufzeit hinaus weiterhin vom Projektpartner bearbeitet (siehe Kap. 7). Die noch nicht zufriedenstellende

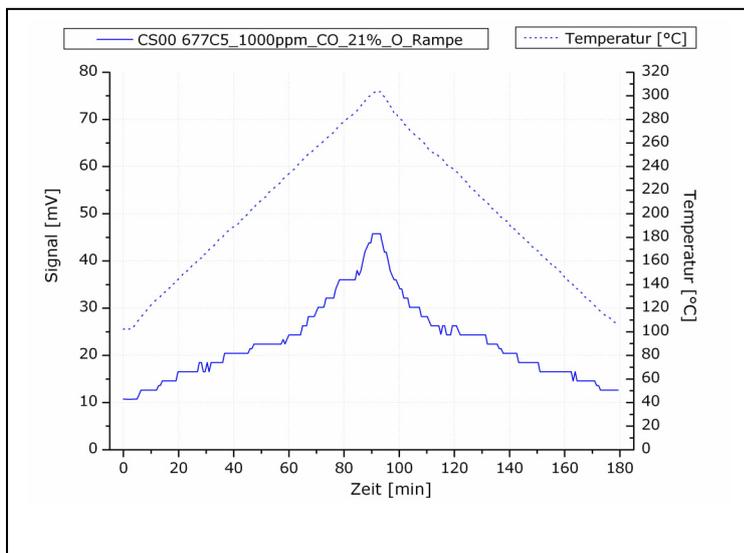


Abb. 4:
Abhängigkeit des CarboSen 1000 – Signals von der Um- gebungstemperatur bei Beaufschlagung mit 1000ppm CO.



Abb. 5
Foto der temperierbaren Sensor- Testzelle ($RT \leq T \leq 300^\circ\text{C}$) bei geöffnetem Deckel. Die Zelle ist mit einem CarboSen 1000 und einem Thermo- element (weiß) bestückt.

Temperaturkompensation erzeugt im relevanten Temperaturfenster der Testeinsätze ($100^\circ\text{C} \leq T \leq 250^\circ\text{C}$) einen Messfehler von ca. $\pm 25\text{mV}$, was angesichts der gemessenen Sig- nale des CarboSen 1000 ($0 \leq U \leq 600\text{mV}$) einen für eine wirksame Regelung nicht allzu sehr störenden Fehler darstellt, wie sich in Kap. 4 zeigen wird. Jedoch gaben die beobachteten Sensitivitätsinstabilitäten Anlass, in regelmäßigen Abständen die Sensitivität durch

Beaufschlagung mit Modellgasen bekannter Konzentration (1000ppm CO, 1000 ppm Ethanol) zu überprüfen. Hierfür wurde im Laufe des Projektes eine temperierbare Sensortestzelle (Abb.5) ($RT \leq T \leq 300^\circ\text{C}$) entwickelt, die mittels einer vollautomatisierten Gas- mischanlage /Jer2002/ begast werden kann.

Schließlich wurde die Frage untersucht, ob der CarboSen 1000 tatsächlich geeignet ist, ein repräsentatives Signal des CO/HC-Gehaltes von Holzfeuerungsabgasen zu liefern. Zu diesem Zweck wurde ein Abgasanalysegerät (IM 2800) beschafft, das mittels Gaspumpe und Staubfiltern vorgereinigtes Abgas über ein Array von elektrochemischen Gasmesszellen zur Analyse der Sauerstoff-, der CO- und der NO_2 -Konzentration und über eine photometrische Messzelle zur Analyse des HC-Gehaltes pumpt. Abb. 6 zeigt das Signal des CarboSen 1000 und die Analysewerte für CO und HC im Vergleich.

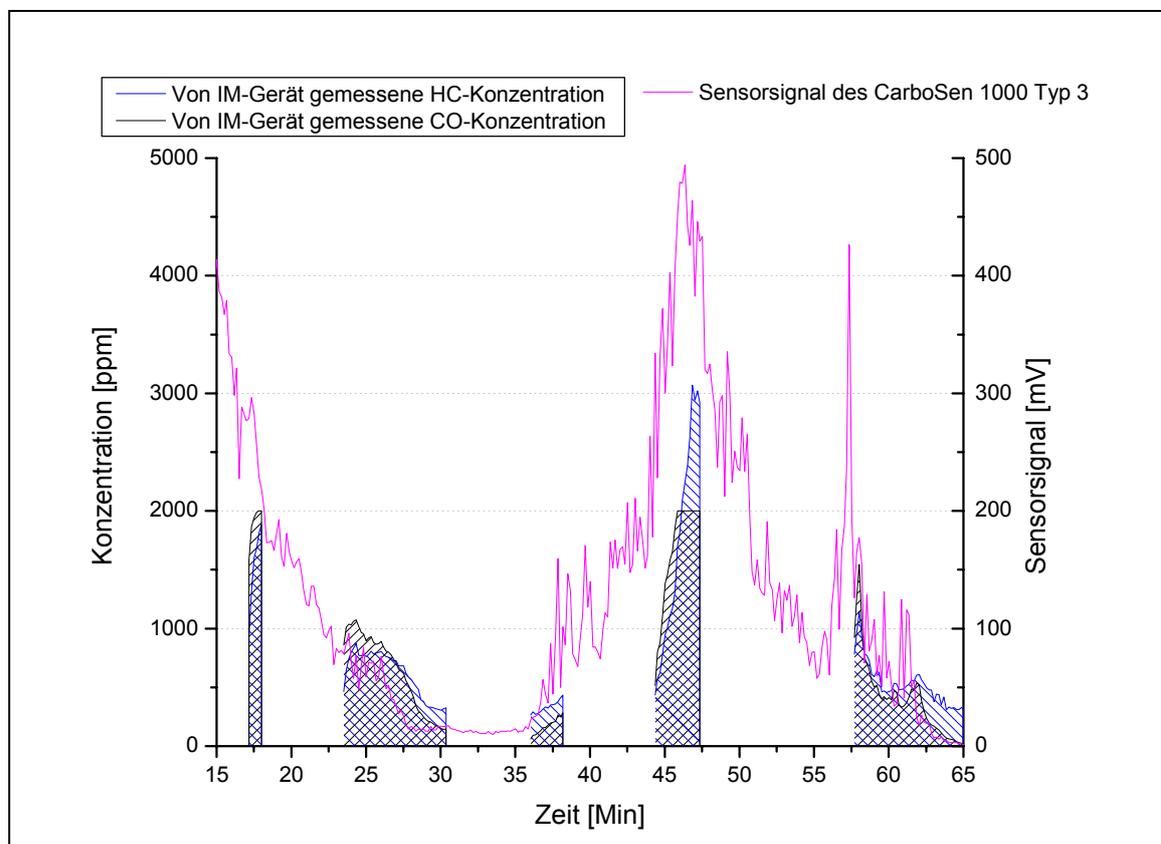


Abb. 6
Verlauf des CarboSen 1000 – Signals und der mit dem IM ??? – Analysegerät gemessenen CO- und HC-Konzentrationen im Vergleich. Der Messbereich des CO-Sensors (0-2000ppm) führte teilweise zur Signalbegrenzung (2000ppm). Aufgrund der schnellen Belegung der Filter konnten Messungen mit dem IM-Analysegerät nur in Intervallen von wenigen Minuten durchgeführt werden.

Die mit dem Analysegerät gemessenen Konzentrationen von CO und HC bestätigen die Vermutung, dass CO- und HC-Konzentration unabhängig im Verlauf des Abbrandes variieren. Insgesamt wurde jedoch durch die Messungen gezeigt, dass das CarboSen 1000 - Signal recht gut die CO/HC-Konzentration repräsentiert.

4 Regelungsalgorithmen zur Optimierung des Verbrennungsprozesses

Neben der Festlegung geeigneter Sensoren zur Beschreibung des Verbrennungsprozesses bestand die Hauptaufgabe des Projektes darin, einen möglichst einfachen Regelungsalgorithmus für die beiden Zuluftströme zu finden, der in allen Phasen des Abbrandes (Anheizphase, Hochtemperaturphase, Ausbrandphase) hohe Schadgasemissionen vermeidet. Wie erwartet, spielt die T eine Schlüsselrolle zur Beurteilung der Verbrennungskinetik in der Nachbrennkammer; jedoch wurde aus den Verbrennungsexperimenten die Erkenntnis gewonnen, dass der RSG und der CO/HC-Gehalt nicht so stark korrelieren, dass mit einer der beiden Größen und der T die dritte bestimmt werden könnte. Somit war entschieden, dass alle drei Parameter (T, RSG, CO/HC-Gehalt) für einen wirksamen Regelungsprozess als Eingangsgrößen herangezogen werden mussten. Diese waren in geeigneter Weise in einem Regelungsalgorithmus miteinander zu verknüpfen, dass die beiden Ausgangsgrößen, nämlich Primär- und Sekundärluftstrom – eingestellt über die entsprechenden Zuluftschieber - in jeder Phase des Abbrandes den Verbrennungsprozess optimieren. Im Gegensatz zu unseren Experimenten im Vorprojekt und zu den gängigen Regelungskonzepten, die bei eher mäßigem Erfolg meist mit einer Verknüpfung von Absolutsignal und Signaltrend versuchen diese Aufgabe zu erfüllen (z.B. Fuzzy-Logik), besteht der neu entwickelte Regelungsansatz, wenn erst einmal eine genügend hohe Verbrennungstemperatur erreicht ist (bei Betrieb ohne Oxidationskatalysator: $T \geq 600^\circ\text{C}$), aus einem einfacheren algebraischen Regelungsalgorithmus, der auf den Modellen zur Verbrennungsoptimierung von Th. Nussbaumer /Nus89/ beruht und ausschließlich auf den Absolut-Sensorsignalen basiert. Dies hat angesichts der noch nicht ganz zufrieden stellenden Signalstabilität des CarboSen 1000 gewisse Nachteile, hat aber den sehr gewichtigen Vorteil, dass alleinig die für den Verbrennungsprozess (Oxidationskinetik) relevanten Größen als Absolutwerte eingehen. Zweitens musste die Frage beantwortet werden, wie in einfacher Arithmetik aus drei Eingangsgrößen (T, RSG, CO/HC-Gehalt) zwei Ausgangsgrößen (Primär- und Sekundärluftstrom) bestimmt werden können. Wie die Experimente zeigten, führt die Bestimmung des Primärluftstromes durch das Signalpaar T und RSG und des Sekundärluftstromes durch das Signalpaar T und CO/HC zu einem sehr wirkungsvollen, vereinfachten Regelungsalgorithmus. Dieses grundlegende Regelungskonzept für Feststoff-Verbrennungsanlagen mit getrennt gesteuerter Primär- und Sekundärluftzufuhr hat (wahrscheinlich) allgemeine Gültigkeit und konnte an beide Anlagentypen mit Erfolg adaptiert werden.

5 Oxidationskatalyse

Wie die Abbrandexperimente zeigen werden (Kap. 6), kann durch Anwendung der in Kap. 4 beschriebenen Regelungsstrategie zwar eine deutliche Verringerung der Schadgasemissionen erreicht werden, jedoch verbleiben immer noch signifikant erhöhte Emissionen insbesondere in den Verbrennungsphasen mit relativ niedriger Verbrennungstemperatur ($T \leq 700^\circ\text{C}$, Anheiz- und Ausbrandphase). In diesen Phasen ist die Umsatzkinetik in der Sekundärbrennkammer offensichtlich nicht hoch genug, um bei der zur Verfügung stehenden Verweildauer der Gase eine vollständige Oxidation der Schadgase zu erreichen. Dies bedeutet, dass bei Temperaturen unterhalb 700°C die Umsatzkinetik durch katalytische Verfahren unterstützt werden muss, um die Schadgasemissionen weiter zu reduzieren. Aufgrund dieser Erkenntnis wurden mit Katalysatormaterial beschichtete, hochtemperaturbeständige Bleche (Hersteller: ECOkat GmbH, Udenheim) zugeschnitten und zu einem Oxidationskatalysator zusammengefügt, der in die Abgasführung des jeweiligen Ofentyps passgenau eingefügt wurde (Abb.7). Allerdings nimmt die Stabilität dieser Katalysatormaterialien bei Temperaturen oberhalb 1000°C zunehmend ab, sodass die Temperatur im Katalysator gemessen wird, um diese Temperaturgrenze seitens der Regelungstechnik zu berücksichtigen.

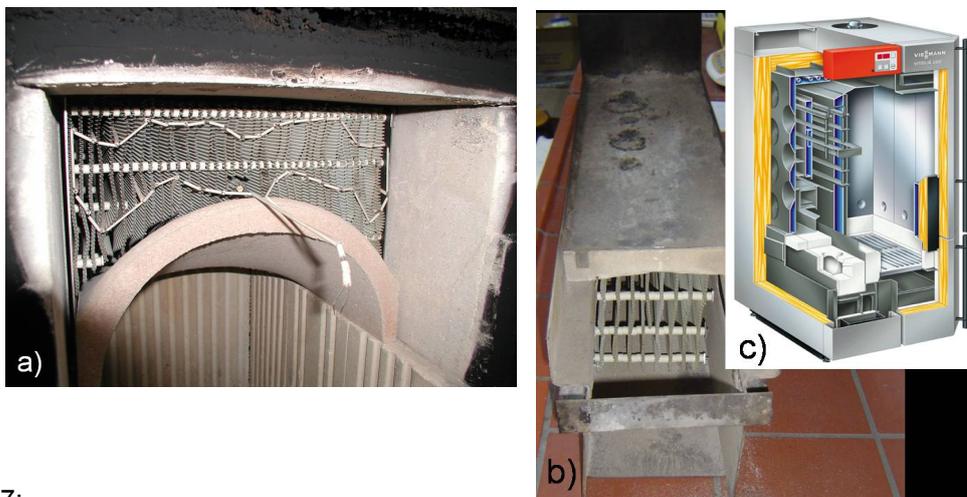


Abb. 7:

Oxidationskatalysatoren, eingepasst

- in die Sekundärbrennkammer des SF10SK-Kachelofeneinsatzes. Bei abgenommener Frontplatte sind die Katalysatorbleche mit der elektrischen Heizvorrichtung sichtbar, (geom. Katalysatorfläche: $4,8\text{m}^2$). Die Aussparung direkt oberhalb des Gewölbes nimmt die Katalysatorprobe auf.
- in den Abgaszug des Vitolig 200 –Stückholzheizkessels. Der Katalysator wurde in der Sekundärbrennkammer (weißer Quader links vom Feuerrost) nachgeschalteten Abgaszug installiert c) und der Abstand der Bleche wurde etwas größer gewählt, um den Strömungswiderstand genügend gering zu halten (geom. Katalysatorfläche: $0,6\text{m}^2$)

Zur Untersuchung der Frage, ob unter den harschen Bedingungen im Abgas von Holzverbrennungsanlagen der Oxidationskatalysator seine Stabilität und damit seine Wirksamkeit über eine große Anzahl von Abbränden behält, wurde eine kleine, herausnehmbare Kataly-

satorprobe in einer Aussparung des Oxidationskatalysators (Abb. 7a) im SF10SK dem Abgas ausgesetzt und an dieser in Abständen von jeweils 3-4 Abbränden in einer eigens aufgebauten Messanlage Umsatzmessungen vorgenommen. Den schematischen Aufbau dieser Apparatur /Bup07/ zeigt Abb. 8a und die Ergebnisse werden in Abb. 8b vorgestellt.

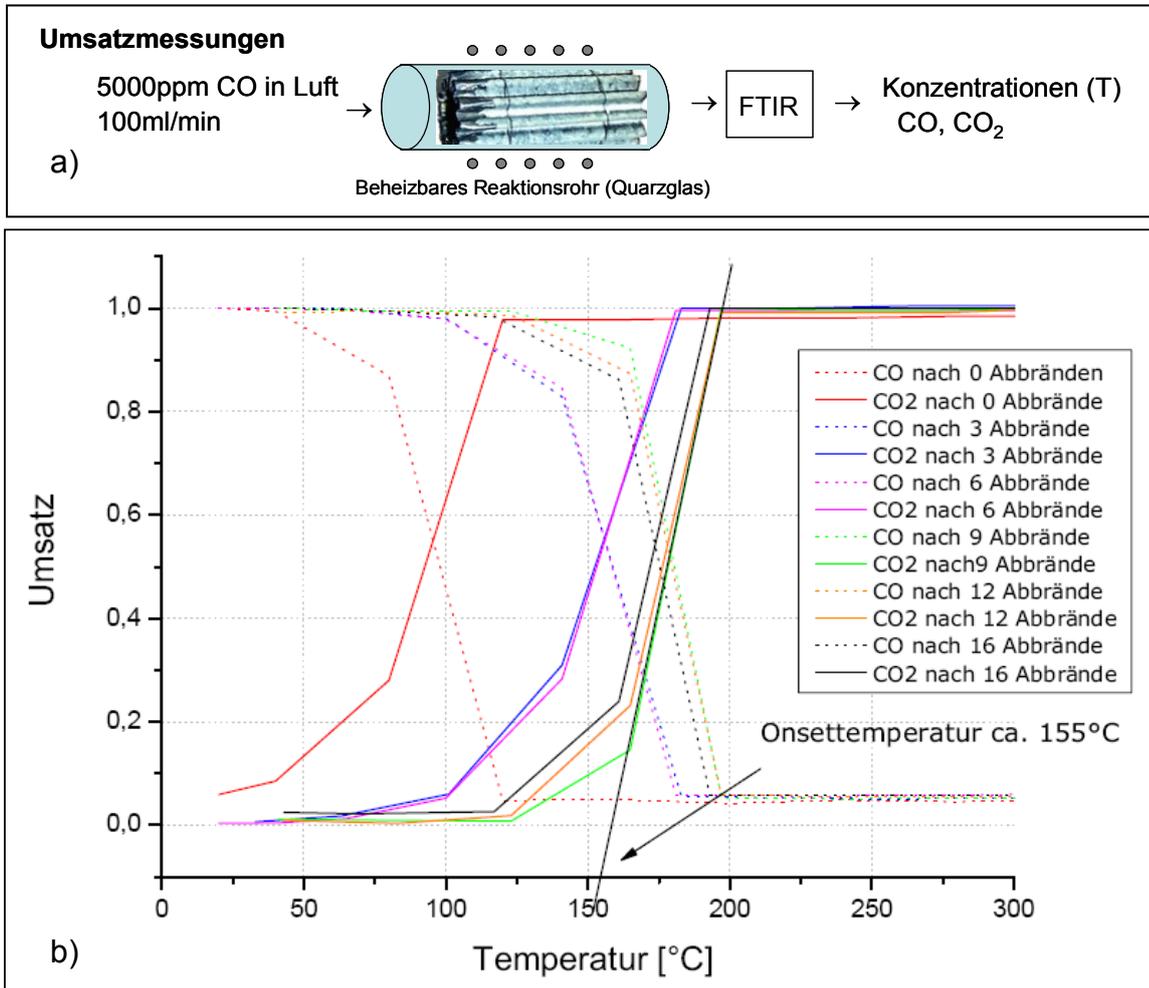


Fig. 8: Charakterisierung des Oxidationskatalysators durch Umsatzmessungen

- a) Schematischer Aufbau der Apparatur zur Bestimmung des Umsatzes der Reaktion $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ in Abhängigkeit von der Katalysatortemperatur
- b) Relativer Umsatz ausgedrückt in Konzentrationen bezogen auf die Ausgangskonzentration (5000ppm CO) bzw. die CO₂-Konzentration bei sehr hohen Temperaturen (vollständige Umsetzung).

Die Ergebnisse der Umsatzmessungen (Fig. 8b) zeigen sehr deutlich, dass die Onset-Temperatur, d.h. die Temperatur, oberhalb der sich die Umsatzrate an der katalytischen Oberfläche wirksam erhöht, während der ersten 9 Abbrände auf ca. 150°C ansteigt, sich dann aber nach den Abbränden 12 und 16 bei dieser Temperatur stabilisiert. Dieses Ergebnis lässt noch keine Schlüsse zur Beurteilung der Langzeitstabilität zu, gibt aber erste Hinweise, dass das in der Automobil-Abgasreinigungstechnik bewährte Katalysatormaterial auch in dieser Anwendung erfolgreich eingesetzt werden könnte.

6. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden anhand der Sensorsignale für T, RSG, CO/HC-Signal, Primärklappenstellung, Sekundärklappenstellung, Primärluftstrom und Sekundärluftstrom die Abbrandverläufe über die Zeit dargestellt. Aus der Summe der beiden Zuluftströme und den CO-äquivalenten Schadgaskonzentrationen (aus den CO/HC-Signalen bei Zugrundelegung der Kalibrierkurve für CO berechnet) wurde in 10s-Intervallen die aktuelle CO-äquivalente Schadgasemission in mg/10s errechnet und in den Diagrammen aufgeführt. Dies sind sehr aussagekräftige Daten, da sie die Schadgasemissionen über den Zeitverlauf des Abbrandes darstellen und damit Hinweise geben, in welchen Phasen der Verbrennung weitere Verbesserungen wünschenswert sind. Verglichen werden jeweils die Daten bei Regelung mit dem Regelungskonzept des Herstellers mit denen, die auf dem in dieser Arbeit entwickelten Regelungsalgorithmus basieren.

6.1 Abbrandexperimente im SF10SK – Kachelofeneinsatz

Abb. 9 zeigt die Abbrand-Daten, jeweils gemittelt über mehrere Abbrände bei Zuluftregelung nach der Methode des Herstellers (Abb. 9a) bzw. nach dem neu entwickelten Algorithmus (Abb. 9b).

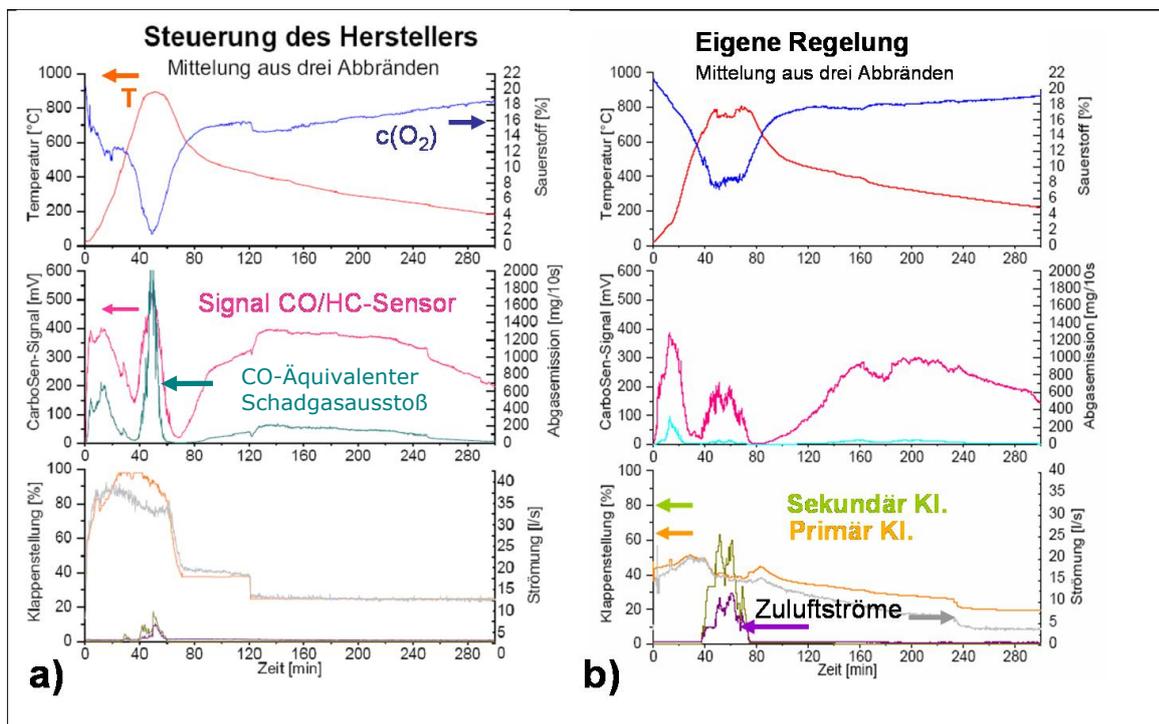


Abb.9
Abbranddaten bei Betrieb mit der Zuluftregelung des Herstellers (a) bzw. mit der eigenen entwickelten Regelungsmethode (b). Zuluftströme: primär (grau), sekundär (violett), Brennstoff jeweils 10,7kg Holzbriketts

Der Vergleich der beiden Abbrandverläufe zeigt die konzeptuellen Regelungsunterschiede. In Abb. 9b ist der Primärluftstrom in der Anheiz- und Hochtemperaturphase

(0-60min) gedrosselt (vgl. mit Abb.7a), was zur Folge hat, dass die Verbrennung langsamer angefacht wird und insgesamt etwas „gezähmter“ abläuft. Dies ist auch aus der im Mittel verlängerten Hochtemperaturphase ($T > 700^\circ\text{C}$) ersichtlich. Die zu schnelle Anfachtung des Verbrennungsprozesses führt im Hochtemperaturbereich zu Sauerstoffmangelsituationen (Abb. 9a), was sehr hohe Schadgasemissionen zu Folge hat. Bei eigener Regelung werden Sauerstoffmangelzustände vermieden, nicht zuletzt auch deswegen, weil die Sekundärklappe großzügiger bei hohen T geöffnet wird. Die genannten Unterschiede der Regelungskonzepte resultieren schließlich in einem Rückgang der Schadgasemissionen auf im Mittel ca. 15% der Werte des Herstellers. Dieses Ergebnis unterstreicht die Wirksamkeit des neu entwickelten Regelungskonzeptes, zeigt aber auch, dass hauptsächlich in den Phasen niedriger T weiterhin beachtenswerte Schadgasemissionen vorliegen, weil infolge reduzierter Umsatzkinetik diese durch Regelungsoptimierung nicht vermieden werden können. Hier verspricht nur die Anwendung der Oxidationskatalyse weitere Fortschritte.

Nach Einbau des in Abb. 7 vorgestellten Oxidationskatalysators und erneuter Anpassung der Regelungsparameter an die jetzt veränderten Abbrandbedingungen wurden mehrere

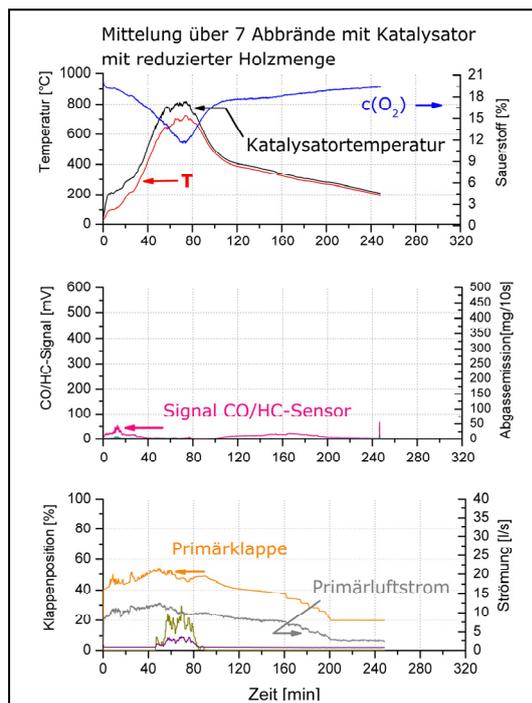


Abb.10:
Abbranddaten, gemittelt über mehrere Abbrände bei Betrieb des SF10SK-Kachelofeneinsatzes mit neu entwickelter Regelung und mit Oxidationskatalysator. Brennstoff: 7,9kg Holzbriketts pro Abbrand.

Abbrände durchgeführt. Die gemittelten Daten werden in Abb. 10 vorgestellt. Der Katalysator wurde in der Anbrandphase (erste ca. 5 Minuten) auf 200°C elektrisch beheizt bis sich in der Folge die Temperatur aufgrund zunehmender Verbrennungswärme eigenständig weiter erhöhte. Der Verlauf der Katalysatortemperatur, zum Teil deutlich oberhalb T , ist ein Hinweis auf exotherme Oxidationsreaktionen. Der erheblich niedrigere Verlauf der CO-äquivalenten Schadgasemissionen zeigt, dass jetzt auch in den Phasen niedrigerer T die Emissionen deutlich abgenommen haben. Folglich ergibt sich eine gemittelte Gesamtemission auf unter 1% verglichen mit den Emissionswerten, die bei Herstellerbetrieb ohne Oxidationskatalysator (Abb. 9a) erzielt werden.

6.2 Abbrandexperimente im Vitolig 200 – Stückholzheizkessel

Wie der Vergleich der gemittelten Abbrandverläufe in Abb. 11 zeigt, ist die Reduktion der Schadgasemissionen nach Anwendung des in Kap. 4 beschriebenen Regelungskonzeptes (Abb. 11b) im Mittel nicht sehr viel geringer als dies beim Betrieb des Stückholzheizkessels mit Herstellersteuerung beobachtet wurde (Abb. 11a).

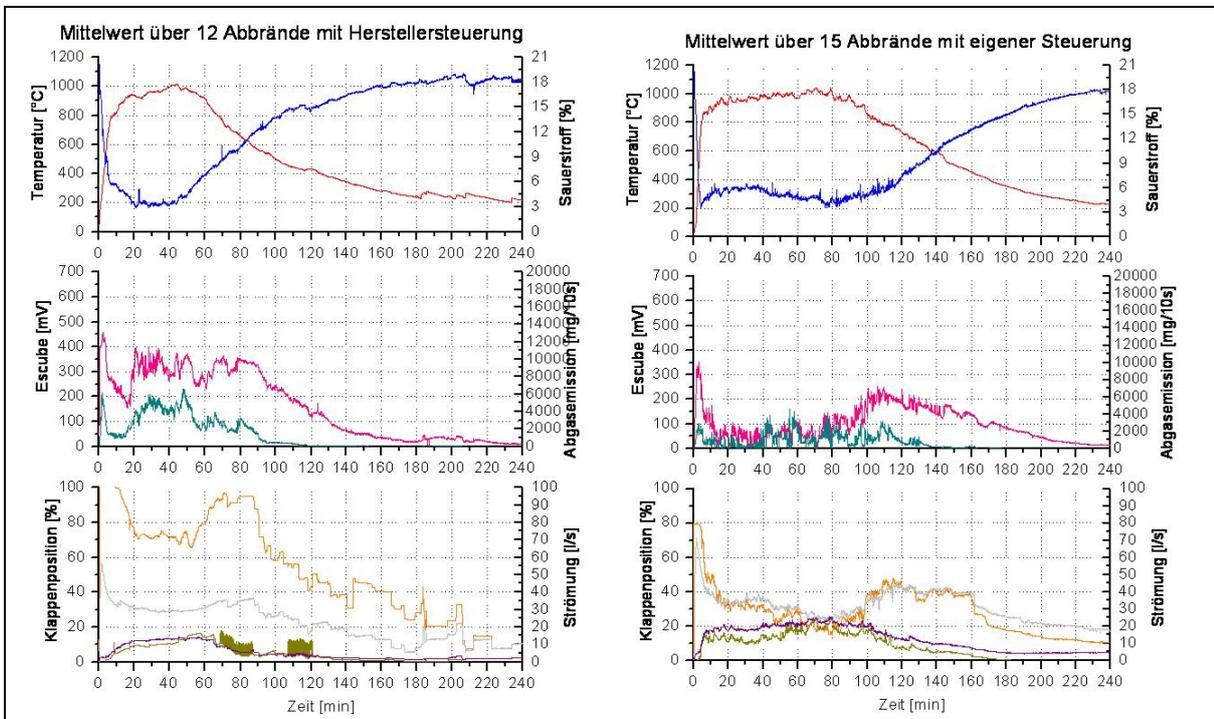


Abb.11: Abbrandverläufe im Vitolig 200 – Stückholzheizkessel (Brennstoff: Buchenholz gespalten, ca. 21kg)

- bei Betrieb mit herstellereigener Regelung
- bei Betrieb mit neu entwickelter Regelung, basierend auf den Eingangsgrößen T, RSG und CO/HC-Gehalt

Auch bei dieser Verbrennungsanlage zeigt sich, dass die Phase hoher Verbrennungstemperatur ($T \geq 800^\circ\text{C}$) durch die grundsätzlich andere Regelungsstrategie von Primär- und Sekundärluft (Kap. 4) vorteilhafterweise im Mittel verlängert ist (ca. 100min gegenüber ca. 70min bei Herstellerregelung), jedoch drückt sich dies (noch) nicht allzu sehr in der Minderung der Schadgasemissionen aus. Integriert über jeweils einen Abbrand ergibt sich im Mittel eine Minderung auf ca. 50% im Vergleich zur Regelung nach der Methode des Herstellers. Wie jüngste Messungen zeigen, liegen die Gründe in der noch nicht zufrieden stellenden Anpassung der Regelungsparameter an diesen Ofentyp. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Verbrennungsraumgeometrie und insbesondere wegen der erheblich höheren Nennwärmeleistung (24KW) vgl. mit dem SF10SK (10KW) gehen die Parameterwerte wesentlich empfindlicher in das Abbrandverhalten ein, was die Verbrennungsoptimierung naturgemäß etwas erschwert. Dieser Optimierungsprozess ist bei Projektende noch nicht abgeschlossen.

Entsprechend noch nicht zufriedenstellend ist das Emissionsergebnis nach Integration eines Oxidationskatalysators in den Abgaskanal, der sich an den Ausgang der Sekundär-brennkammer (Abb. 7b, c) anschließt. Aufgrund höherer Abgasströme im Vitoliq 200 (Summe der Zuluftströme teilweise über 60l/s (Abb. 12) vgl. mit ca. 30l/s im SF10SK (Abb.9)) bei gleichzeitig deutlich engerem Abgaskanal sind die Strömungsgeschwindigkeiten des Abgases im Vitoliq 200 wesentlich höher, d.h. die Aufenthaltsdauer im Katalysatorbereich ist entsprechend geringer. Das bedeutet, dass die Oxidationswirkung des Katalysators im Vitoliq 200 deutlich geringer sein muss als im SF10SK, da sich darüber hinaus die Katalysatorflächen im Verhältnis $0,6\text{m}^2/4,8\text{m}^2$ unterscheiden.

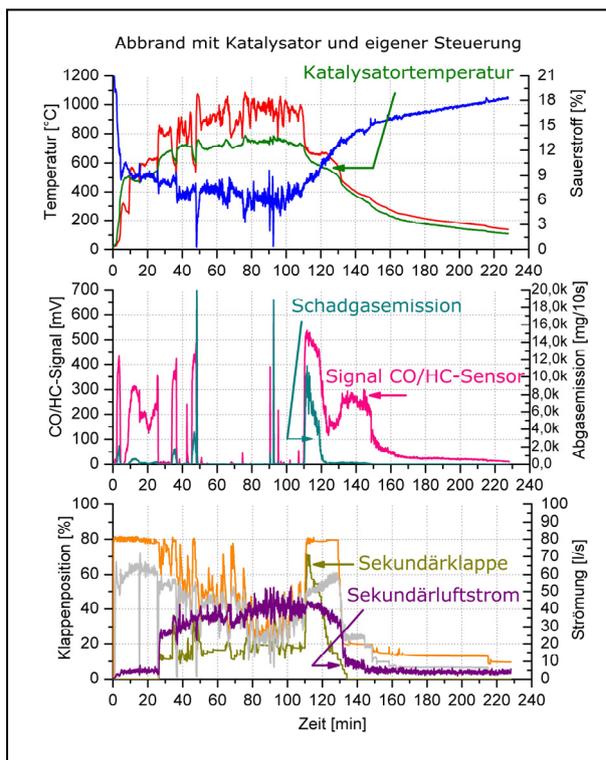


Abb. 12
Abbrand im Vitoliq 200 mit Katalysator. Der Abbrandverlauf zeigt, dass insbesondere bei relativ niedrigen Abbrandtemperaturen (unter 800°C) hohe Schadgas-Emissionsspitzen entstehen, die durch Öffnen der Sekundärklappe nicht vermieden werden können, da die Wirksamkeit der katalytischen Nachoxidation nicht ausreicht.

Die entsprechenden Abbrände zeigen, dass die Verbrennung in Phasen hoher Verbrennungstemperaturen ($T \geq 900^\circ\text{C}$) sehr gut ist, d.h. kaum Schadgasemissionen beobachtet werden, jedoch sind die Emissionen bei deutlich geringeren T teilweise erheblich, was klar darauf hindeutet, dass infolge der zu geringen Reaktionsrate der Gase mit den Katalysatorflächen die Nachoxidation nicht ausreicht. Weitere Fortschritte können in dieser Problematik nur durch die weitere Verringerung der Zuluftströme und die deutliche Vergrößerung der Katalysatorfläche erzielt werden.

7 Qualifizierung des CarboSen 1000 für Hochtemperatureinsätze im Abgas von Stückholzverbrennungsanlagen

Der CarboSen Sensor ist ein Nicht-Nernstscher Sensor zur Detektion brennbarer Gase wie CO, H₂ und C_nH_m. Seine Kennlinie wurde in Abb. 3, Kap. 3 bereits vorgestellt. Abb. 13 zeigt seinen Aufbau. Einige Merkmale des Sensors sind:

- Innovative Siebdrucktechnik
- Kleine Abmessungen (20x3,5x0,6mm³)
- Robust, chem. beständig
- Potentiometrische Messung
- Kein Drift, definierter Nullpunkt
- Kurze Ansprechzeit < 1s
- Redundante Elektroden
- Funktionsüberwachung über Elektronik durch redundante Elektroden ermöglicht

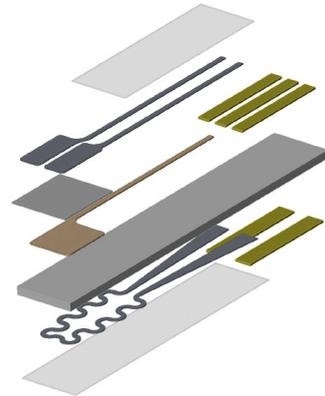


Abb. 13: Aufbau des CarboSen Sensorelements zu Beginn des Projekts.

Der CarboSen Sensor wurde speziell für die Verbrennungsoptimierung von Hausfeuerungsanlagen (Öl- und Gas) ausgelegt. Dort misst er direkt in-situ im Abgaskanal die Produkte unvollständiger Verbrennung [Ham02]. Bei diesen Anwendungen haben die Sensoren Lebensdauern von 2,5 (Gas) bzw. 3,5 (Öl) Jahren nachgewiesen.

Die Umgebungsbedingungen dort unterscheiden sich jedoch wesentlich von denen im Abgas einer Holzfeuerung. Bei Holz werden Temperaturen von bis zu 250°C erreicht, bei gleichzeitig nicht auszuschließender Kondensation und Belastung durch Staub und Ruß. Daher musste der Sensor für diesen Einsatz ertüchtigt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden daher nachfolgend aufgelistete Entwicklungen durchgeführt.

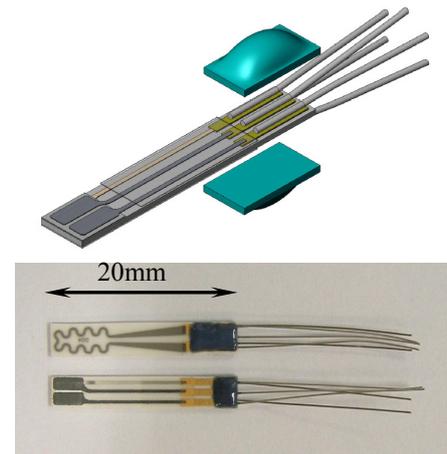


Abb. 14: CarboSen Sensorelement mit Kontaktdrähten und Glasversiegelung.

7.1 Adaption des CarboSen1.000 Sensors zur in-situ Integration in den Abgaskanal von Stückholzfeuerungen

Eine Änderung des bestehenden Sensorelements (Design eingefroren im Februar 2002) war im Rahmen des Projektes nicht vorgesehen. Das planar aufgebaute Sensorelement wurde für die Integration in einem temperaturbeständigen Gehäuse mit Signaldrähten kontaktiert

(Abb. 14). Hierfür wurden zunächst 0,22mm durchmessende Ni-Drähte verwendet. Diese wurden materialschlüssig mit den Kontaktpads auf dem Sensorelement verbunden und zur Zugentlastung mit Spezialglas fixiert. Umfangreiche Variationen (Material und Drahtdicke) sowie Parameteroptimierungen waren notwendig um den Prozess sicher zu gestalten.

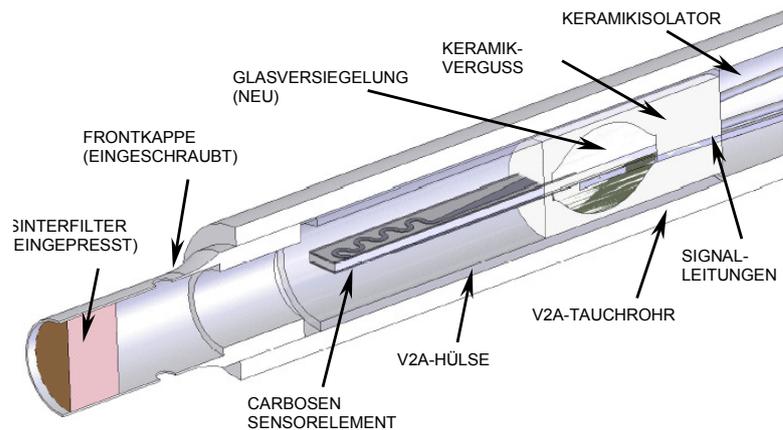


Abb. 15: CarboSen integriert in ein temperaturbeständiges Tauchrohr.

7.2 Ertüchtigung des Sensors auf Temperaturen bis zu 500°C

In mehreren Iterationen wurde die Integration in ein temperaturbeständiges Tauchrohrgehäuse durchgeführt. Ziel war die Minimierung des Integrationsaufwandes bei gleichzeitiger Verwendung möglichst standardisierter Komponenten und Verfahren, wie sie aus dem Bereich der Temperaturmessung (z.B. Pt100) erhältlich und bekannt sind. Abb. 15 zeigt den CarboSen in der Spitze eines Edelstahltauchrohrs.

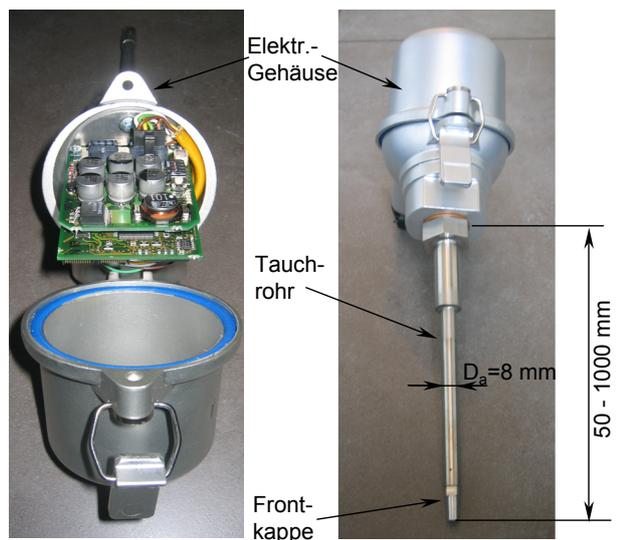


Abb. 16: CarboSen integriert in ein temperaturbeständiges Tauchrohr, Version 1.

Abb. 16 zeigt das Sensorsystem bestehend aus dem temperaturbeständigen Sensor im Tauchrohr mit on-board Elektronik. Die Elektronik wurde speziell für den Betrieb des Sensors in harschen Umgebungsbedingungen bei der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG entwickelt. Einige Merkmale des Sensorsystems sind nachfolgend aufgelistet:

- industriegerechtes Design (CE, EMV)
- staub- und spritzwassergesch. Gehäuse (IP65)
- temperaturbeständig bis 75°C (kurz: 95°C)
- Mikroprozessorelektronik (programmierbar)
- Datenübertragung Analog und CAN-Bus

- Sensor / Tauchrohr austauschbar
- Frontkappe abschraubbar

Der Sensor wurde in der Hochtemperaturmesskammer getestet. Abb. 17 zeigt das Sensorsignal in mV über die Umgebungstemperatur in °C aufgetragen. Das Sensorsignal ist stark von der Umgebungstemperatur abhängig und steigt, von anfänglich 110 mV bei ca. 60°C

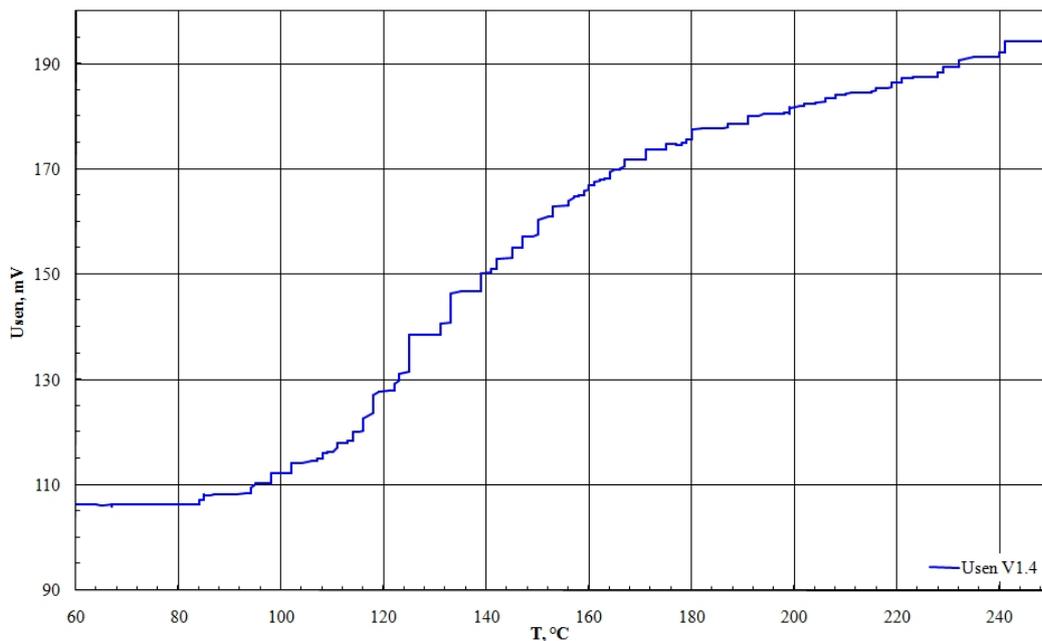


Abb.17: Temperaturabhängiges Sensorsignal des CarboSen Sensors. Tauchsonde-Version 1, Software-Version V1.4 mit R_h -Regelung bei 1000ppm CO in synthetischer Luft.

Umgebungstemperatur auf 195 mV bei 250°C Umgebungstemperatur. Zwischen 100°C und 250°C lässt sich hier ein gemittelter Sensorsignalanstieg von ca. 0,6 Ω /K errechnen.

Grund hierfür ist die Temperaturabhängigkeit des Zuleitungswiderstandes. Bei der in Softwareversion V1.4 realisierten Konstantwiderstandstemperaturkompensation führt der temperaturbedingte Anstieg des Zuleitungswiderstandes zur Verringerung des Heizerwiderstandes R_h und damit zum Absinken der Sensortemperatur T_s . Eine niedrigere Sensortemperatur führt zu höherer Sensitivität und damit zum Anstieg des Sensorsignals.

Um diese Abhängigkeit zu minimieren kann die bekannte 4-Leiter-Technologie oder die

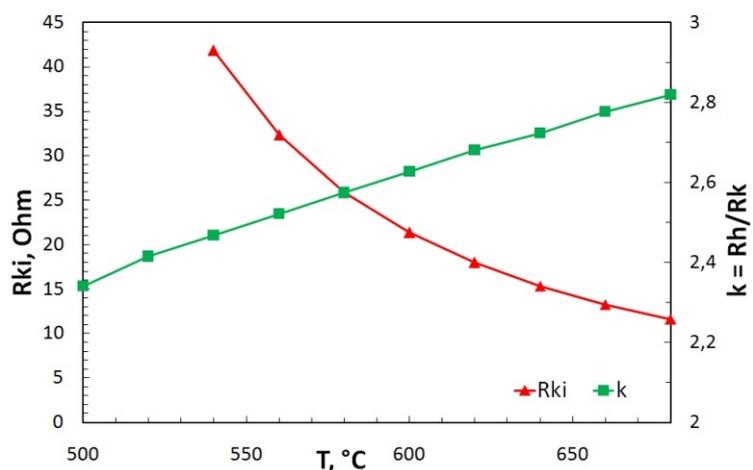


Abb. 18: Heizwendelwiderstandsverhältnis $k=R_h/R_k$ (Heisswiderstand/Kaltwiderstand bei 0°C) und keramischer Innenwiderstand R_{ki} als eindeutige Funktion der Sensortemperatur T_s .

sogenannte R_{ki} -Regelung eingesetzt werden, bei der der keramische Innenwiderstand konstant gehalten wird.

Abb. 18 zeigt die Temperaturabhängigkeit des Heizerwendelwiderstandes R_h und des keramischen Innenwiderstandes R_{ki} . Beide Größen sind eine eindeutige Funktion der Sensortemperatur und ermöglichen dadurch eine eindeutige Temperatureinstellung und -konstantregelung durch Konstanthaltung des jeweiligen Widerstandes.

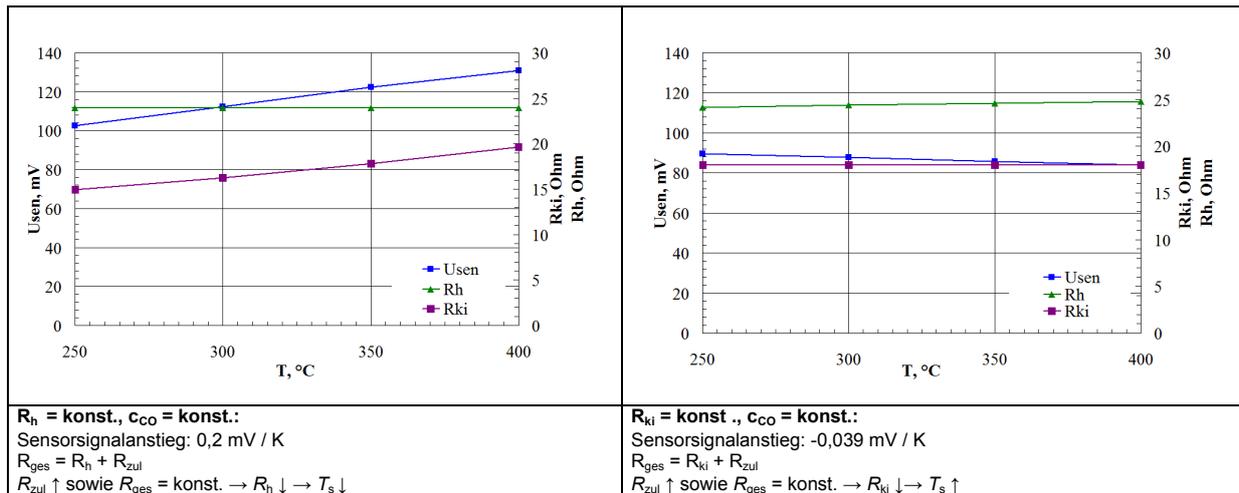


Abb. 19: Rechts: Tauchsonde-Version 2, Software-Version V1.4 mit R_h -Regelung;
Links: Tauchsonde-Version 2, Software-Version V1.6 mit R_{ki} -Regelung.

Im Rahmen der Ertüchtigung in diesem Projekt wurde erstmalig die R_{ki} -Regelung realisiert. Hierfür wurde die bestehende Software V1.4 mit R_h -Regelung durch eine neuen Software Version V1.6 mit R_{ki} -Regelung ersetzt.

Abb. 19 stellt die Ergebnisse beider Regelkonzepte gegenüber. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für die Tests die gleiche bereits optimierte Tauchsonde-Version 2 (Abb. 21) eingesetzt. Allein die Hardware Verbesserung von Tauchsonde-Version 1 auf Tauchsonde-Version 2 führte zu einer Reduktion des umgebungstemperaturabhängigen Sensorsignalanstiegs von 0,6 mV/K auf 0,2 mV/K. Die Software Verbesserung von V1.4 auf V1.6 führte nochmals zu einer bemerkenswerten Verbesserung von nur noch -0,04 mV/K. Die Ergebnisse sind in TABELLE 7.1 nochmals zusammengefasst.

TABELLE 7.1 Gegenüberstellung der umgebungstemperaturabhängigen Sensorsignaländerungen bei: 1) Ausgangssituation; 2) Hardwareertüchtigung und 3) Hardware- und Softwareertüchtigung

Entwicklungsschritt	(1)	(2)	(3)
Tauchsonde Version	1	2	2
Software-Version	1.4	1.4	1.6
Sensorsignaländerung $\Delta U_{sen} / \Delta T_{\infty}$ in mV / K	+0,6	+0,2	-0,04

7.3 Schutz des Sensorelements vor Staub/Ruß/Partikel ohne Verlust der Sensitivität und Ansprechzeit

Um den Sensor vor Staub und Partikeln im Abgaskanal zu schützen, ist die Spitze des Tauchrohrs mit einer abschraubbaren Frontkappe versehen. Dies ermöglicht eine einfache Variation der Porosität und der Sinterscheibendicke.

Abb. 20 zeigt die CarboSen Sensorcharakteristik auf H_2 mit und ohne Frontkappe gemessen am Gasesstand mit synthetischen Gasen. Es ist eine leichte Signalerhöhung erkennbar, die jedoch innerhalb der $\pm 20\%$ igen Toleranzzone der Referenzkennlinie bleibt. Im realen Betrieb im Ofen bzw. bei Begasung mit C_nH_m war jedoch eine leichte Sensorsignalverschmierung zu erkennen, die vermutlich durch die Dicke der Sinterscheibe verursacht sein könnte. Da gleichzeitig im realen Einsatz im Abgaskanal des Ofens keinerlei Probleme durch Verschmutzung bzw. Verstopfung des Filters zu erkennen waren, wurde bei der zweiten Tauchsondenversion die Sinterscheibe durch ein dünnes Lochblech ersetzt (Abb. 21). Zur Kostenersparnis wurde das Blech am Tauchrohr angeschweißt. Gleichzeitig wurde der Sensor von der Elektronik getrennt. Dies flexibilisiert die Auswahl des Einbauortes. Zudem wird die Elektronik später vorteilhaft in der Ofensteuerung untergebracht sein.

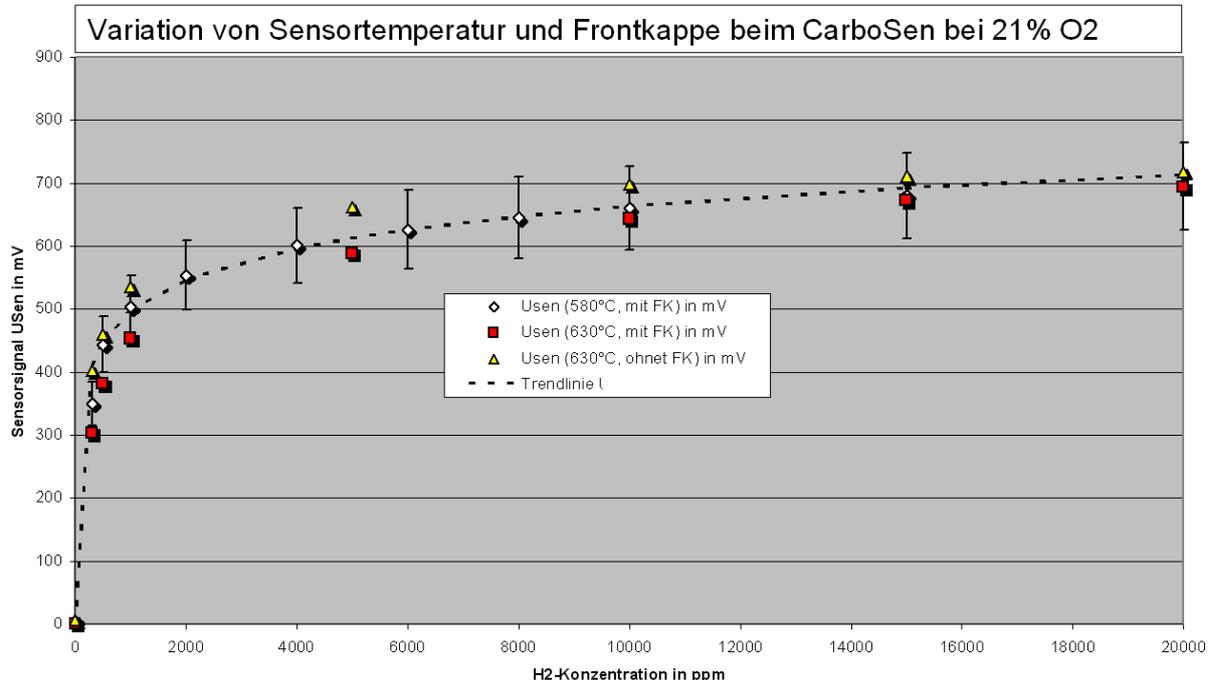


Abb. 20: Sensorsignale des CarboSen bei Beaufschlagung mit Wasserstoff/Luft-Gemischen und Variation von Sensortemperatur und Frontkappe (gemessen am Gasesstandes der ESCUBE GmbH + Co KG).

7.4 Umsetzung einer korrosionsbeständigen Verbindungs- und Leitungstechnologie gegen aggressivste Abgase (reduzierend, oxidierend, feucht)

Mehrere Abbrände sowie mehrmaliger Ein- und Ausbau der Sonde zur Charakterisierung und Kalibrierung wurden am ISIS durchgeführt. Unterschiedlichste Schadgase im Betrieb und wiederholte Beaufschlagung mit hohen Temperaturen durch die Messkammer (Abb. 5) führten zu Sensorsystem-ausfällen. Einige der Sensorelemente konnten zerstörungsfrei ausgebaut und untersucht werden. Optische

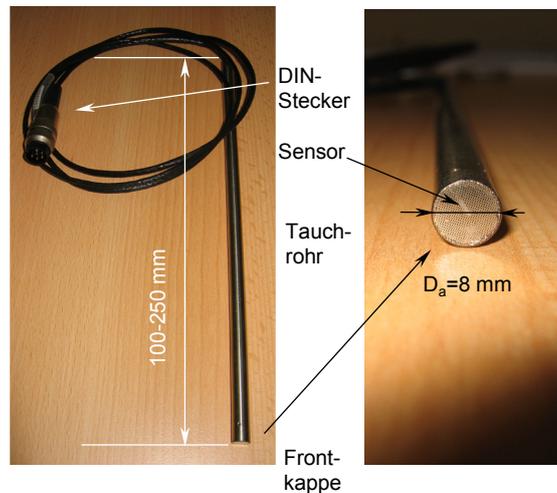


Abb. 21: CarboSen integriert in ein temperaturbeständiges Tauchrohr Version 2.

Beeinträchtigungen waren nicht zu erkennen. Die Funktion der Sensoren war teilweise noch vorhanden, bei anderen konnte sie durch Aufheiz- bzw. Regenerationszyklen wieder hergestellt werden. Damit verschiebt sich die Schadensanalyse auf die Sensorperipherie. Vermutlich sind hier zwei Schadensvorgänge verantwortlich:

- a) Hochtemperaturkorrosion an Kontaktstellen und Signalkabeln
- b) Kurzschlüsse und Kriechströme im porösen Vergussmassen bei kondensierender Feuchte

Folgende Abhilfen konnten konstruktiv geschaffen bzw. müssen im späteren Betrieb eingehalten werden:

- Zu a) Ni-Kabel wurden durch korrosionsbeständige Materialien ersetzt. Die Anzahl der Kontaktstellen wurde minimiert.
- Zu b) Der Sensor soll unter kondensierenden Bedingungen ständig weiterbeheizt werden. Eine Kondensation auf dem Sensor oder in der porösen Vergussmasse kann somit verhindert werden. Eine dichte Vergussmasse konnte leider im Rahmen des Projekts nicht realisiert werden. Dieses optimale Ziel wird jedoch weiter verfolgt.

Das Ergebnis der ertüchtigten Sonde / Tauchrohr-Version 2 ist in Abb. 21 zu sehen.

7.5 Integration eines neu entwickelten Sensorelements mit voraussichtlich geringster O₂-Querempfindlichkeit

Im Laufe des Projekts stellte sich heraus, dass eine Weiterentwicklung des CarboSen 1000 zur Senkung der O₂-Querempfindlichkeit (Abb.3) nicht erforderlich ist, da der RSG für die hier entwickelte Verbrennungsregelung als Eingangsgröße sowieso zur Verfügung stehen muss und somit auch zur Kompensation des Signales des CarboSen 1000 genutzt werden kann. Jedoch war die Sauerstoff-Kompensation zur Erreichung des momentanen Qualitätsstandes der Verbrennungsoptimierung bisher nicht erforderlich, da andere Regelgrößen weit gewichtiger auf die Verbrennung Einfluss nehmen. Bisher wird die Verbrennung (noch) mit unkompensierten CO/HC-Signalen geregelt, da im relevanten Regelbereich ($0 \leq U \leq 150 \text{ mV}$) das Sensorsignal sehr empfindlich von den Schadgaskonzentrationen abhängt, so dass die Querempfindlichkeit gegenüber dem RSG von eher untergeordneter Bedeutung ist. Für eine Feinabstimmung der Regelparameter an die individuelle Verbrennungsanlage wird man natürlich diese Kompensation des RSG-Einflusses auf das CO/HC-Signal durchführen.

Vielmehr wurde der Entschluss gefasst, einen Kombi-Sensor zur simultanen Messung von CO/HC und O₂ zu entwickeln, was die Kosten für die Gassensorik im Hinblick auf eine beabsichtigte Markteinführung des Sensor- und Regelungskonzeptes erheblich senken könnte. Diese Entwicklung sprengt jedoch den Rahmen dieses Projekts, jedoch wurde. Im Rahmen eines neuen Projekts ist diese Arbeit im Rahmen eines Folgeprojektes bereits begonnen worden.

7.6 Sammlung von Betriebserfahrung

Die Sensoren im Tauchrohr Version 1 wurden in dutzenden Abbränden erfolgreich zur Regelung der beiden Holzfeuerungsanlagen (Viessmann und Brunner) eingesetzt. 10 Sensoren der ertüchtigten Version 2 sind für Dauertests im Abgaskanal von Stückholz- und

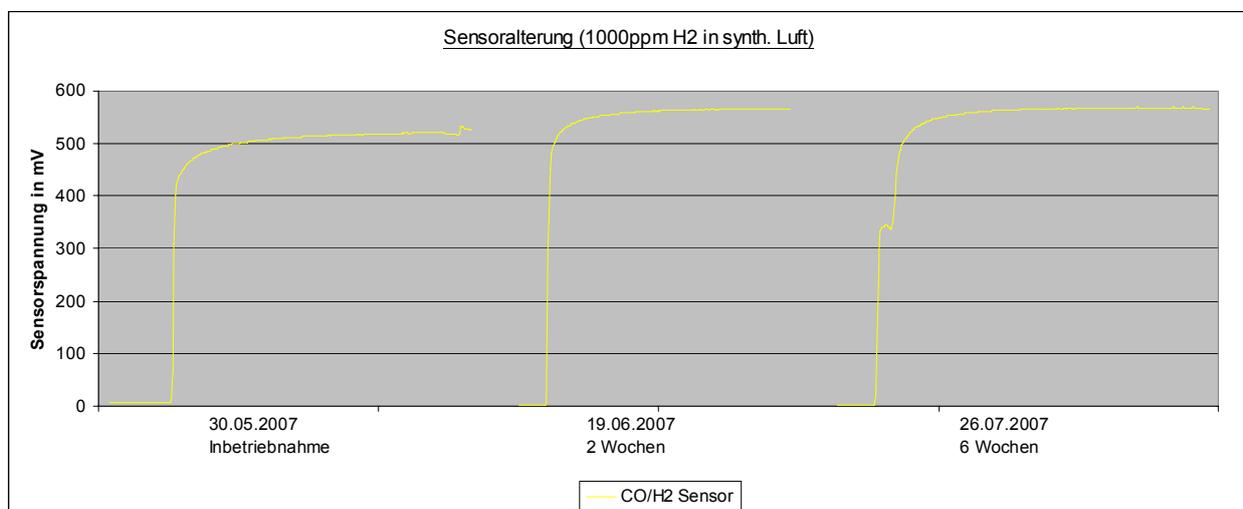


Abb. 22: CarboSen Version 2; Charakteristiken während des Dauertests. Getestet wird mit H₂ in synthetischer Luft. Nach 6 Wochen ist keine Drift erkennbar.

Pelletsfeuerungsanlagen eingebaut. Seit dem 30.05.2007 laufen die Sensoren ohne Ausfall und ohne erkennbare Drift bei Spitztemperaturbelastungen von bis zu 600°C (Abb. 22). Die Dauertests werden im Rahmen des oben bereits genannten neuen Projekts weitergeführt.

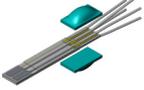
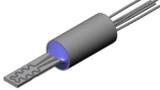
			
	Sensorelement	Sensor Kundenspez.	Sensor im Tauchrohr
Stück	Preis in €	Preis in €	Preis in €
1	250,00	300,00	500,00
10	150,00	200,00	450,00
100	100,00	150,00	350,00
1.000	69,99	90,00	200,00
10.000	23,53	40,00	100,00
100.000	13,36	25,00	80,00

Abb. 23: Abschätzung der Preise für Sensorelement (links), kundenspezifische Integrationsstufe (Mitte) und Sensor/Tauchrohr Version 1 (rechts).

7.7 Ziel: Serienfähiger Sensor für Holzfeuerungsanlagen

Eine Kostenkalkulation auf Basis des aktuellen Entwicklungsstandes wurde durchgeführt. Für den Sensor/das Tauchrohr ist ein Zielpreis unter 100 Euro ab 10.000 Stück erreichbar. Mit einer kundenspezifischen Integration können Kosten nochmals reduziert werden. Die erzielbaren stückzahlabhängigen Preise sind in Abb. 23 aufgezeigt. Eine Sensorelektronik ist darin nicht enthalten. Diese muss auf der Platine zur Ofensteuerung realisiert werden. Damit kontrolliert der Ofenbauer diese Kosten.

8 Zusammenfassung

Anhand von experimentellen Daten wurde gezeigt, dass bei Nutzung der Eingangsgrößen Verbrennungstemperatur, Restsauerstoffgehalt und CO/HC-Gehalt der Stückholz-Verbrennungsprozess über den Zeitverlauf des Abbrandes hinreichend gut beschrieben werden kann, um die Qualität der Verbrennung lückenlos darzustellen. Die genannten sensorischen Eingangsgrößen bzw. deren Zuverlässigkeit bilden eine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung eines neuen Regelungsalgorithmus für die Primär- und Sekundärluftströme, um den Verbrennungsprozess in allen Phasen eines Abbrandes in der Nähe des Optimums zu betreiben. Hierbei wurde deutlich, dass das Signal des CarboSen 1000 sehr gut als Regeleingangsgröße geeignet ist, trotz der sehr unterschiedlichen Sensitivität für verschiedene Gaskomponenten und der noch beobachteten Temperaturabhängigkeit des Signals.

Nach dem Stand der Arbeiten zum Ende des Förderzeitraumes ist es gelungen, die Schadgasemissionen des SF10SK-Kachelofeneinsatzes auf ca. 15% und des Vitolig 200 auf ca. 50% im Vergleich zu den Werten bei Herstellerbetrieb alleine durch die fortgeschrittene Regelungstechnik zu verringern! Es hat sich gezeigt, dass trotz der Unterschiede der Brennräume beider Feuerungsanlagen die Regelung der Zuluftströme nach der in Kap. 4 vorgestellten Strategie zum Erfolg führen kann, wenn die Parameterwerte sorgfältig angepasst werden. Im Falle des Vitolig 200 konnte diese Optimierung allerdings noch nicht zu Ende geführt werden.

Passt man zusätzlich einen Oxidationskatalysator in die Sekundärbrennkammer (SF10SK) bzw. in den die Sekundärbrennkammer anschließenden Abgaszug des Vitolig 200 ein, dann misst man eine weitere Reduktion der Schadgasemissionen auf Werte kleiner 1% (!) (SF10SK) bzw. auf ca. 30% (Vitolig 200), jeweils verglichen mit den Emissionswerten bei Betrieb mit der jeweiligen Herstellerregelung ohne Katalysator. Ersterer Wert ist sensationell und zeigt das technologische Potential auf, das in der Kombination von Sensorik, Regelungstechnik und Oxidationskatalyse zur Absenkung der Schadgasemissionen steckt. Letzterer Wert ist noch keineswegs zufrieden stellend, jedoch werden die Emissionen hauptsächlich in der Anheiz- bzw. Ausbrandphase, also bei Verbrennungstemperaturen unter 800°C verursacht, was eindeutig auf die zu geringe Umsatzrate des Oxidationskatalysators hinweist. Dies ist nicht weiter überraschend, da die Katalysatorfläche nur etwa 1/8 der Fläche des Katalysators im SF10Sk beträgt bei gleichzeitig höherer Strömungsgeschwindigkeit der Abgase. Jüngste, nach dem Projektzeitraum durchgeführte Verbrennungsexperimente im Vitolig 200 unter Einsatz eines Oxidationskatalysators mit etwa dreifacher Reaktionsfläche bestätigen diese Vermutungen. Sie resultierten in einer weiteren, deutlichen Absenkung der Schadgasemissionen und geben berechtigten Anlass zu

Hoffnungen, dass bei diesem Anlagentyp ähnliche Schadgasreduktionen möglich sind als beim SF10SK bereits gezeigt.

Schließlich haben die Arbeiten die bedeutende Erkenntnis erbracht, dass (i) mit den drei die Abgaseigenschaften charakterisierenden Sensorsignalen der Verbrennungsprozess hinreichend gut beschrieben wird und sich der Regelungsalgorithmus gegenüber bestehenden Regelungsmethoden deutlich vereinfachen lässt, (ii) der im Projektzeitraum entwickelte Regelungsalgorithmus in Kombination mit einem Oxidationskatalysator sehr wirksame Schadgasreduktionen ermöglicht, (iii) dieser Algorithmus grundsätzlich auf sehr verschiedene Stückholz-Feuerungsanlagen adaptierbar ist, wenn gewisse konstruktive Voraussetzungen (z.B. getrennte Regelung von Primär- und Sekundärluft, Erreichbarkeit hoher Verbrennungstemperaturen in der Sekundärbrennkammer, geregelter Abgaszug etc.) erfüllt werden.

9 Ökologische und ökonomische Bilanzierung

Die Autoren sind aufgrund der hier erarbeiteten Projekt-Ergebnisse zur Erkenntnis gelangt, dass durch das Zusammenwirken der entwickelten Sensorik und Regelungsmethodik mit katalytisch gestützter Nachverbrennung der Schadgase die aktuelle Problematik der hohen Schadgasemissionen beim Betrieb von Stückholzfeuerungsanlagen weitgehend gelöst oder zumindest wirksam in ihrer Auswirkung verringert wird. Im Falle der SF10SK-Verbrennungsanlage ist dies infolge der günstigen Gestaltung der Brennräume besonders gut gelungen (Reduktion der Schadgasemissionen auf weniger als 1% !). Die Situation stellt sich bezogen auf den Vitolig 200 Stückholzheizkessel wegen der deutlich höheren Abgasgeschwindigkeiten etwas ungünstiger dar. Jedoch konnten auch in diesem Fall die Schadgasemissionen auf ca. 20-25% der Werte des Herstellers reduziert werden. Somit kann die ökologische Bilanz gezogen werden, dass jetzt ein Verfahren zur Regelung der Stückholzverbrennungsprozesse vorliegt, das auf sehr unterschiedliche Verbrennungsanlagentypen adaptierbar ist, wenn gewisse konstruktive Voraussetzungen (siehe Kap. 8) erfüllt sind. Allerdings sind zur Umsetzung dieser Erkenntnisse in wirksame Technologieschritte der Hersteller von Stückholz-Verbrennungsanlagen folgende Voraussetzungen notwendig :

- zuverlässige, d.h. langzeitstabile und driftarme Gassensoren
- Gassensoren für Restsauerstoffgehalt und CO/HC-Gehalt, die im Preis im Vergleich zu den Gesamtkosten einer Feuerungsanlage akzeptabel sind. Die gesamte Verbrennungsregelung sollte zu einem Preis unter 1000€ realisiert werden können.
- Langzeitstabiler, preiswerter Oxidationskatalysator. Aufgrund noch fehlender Langzeitstudien (basieren bisher auf erst 16 Abbränden) kann hierzu noch keine abschließende Antwort gegeben werden.

- Vorgabe geeigneter Rahmenbedingungen durch den Gesetzgeber , um die konkurrenzfähigkeit hochwertiger Verbrennungsanlagen auf dem Markt sicherzustellen.

Insbesondere sind diese Ergebnisse geeignet, um dem Gesetzgeber weitere Anstöße zu entsprechenden Überlegungen zugunsten der Gesundheit von Mensch und Umwelt geben, die deutlich über die geplante Novellierung der 1. BimschV in 2008 hinausreichen könnten.

Massnahmen zur Verbreitung und Umsetzung der Ergebnisse: Wie oben bereits angedeutet, hängt die Umsetzung der Ergebnisse bedeutend davon ab, ob seitens des Gesetzgebers Technologieschritte durch geeignete Rahmenbedingungen initiiert werden. Die Partner und Anlagenhersteller Viessmann GmbH und Brunner GmbH haben natürlich die besten Voraussetzungen für eine zügige Umsetzung der Ergebnisse. Jedoch finden auch Gespräche mit einem Hersteller für Regelungssysteme statt, der ein auf unterschiedliche Anlagentypen adaptierbares System entwickeln könnte. Darüber hinaus wird der Kreis der Feuerungsanlagenhersteller durch die Unternehmen Paradigma, Karlsbad (Pelletheizkessel) und Wodtke, Tübingen-Hirschau (Kaminofen) zur Zeit erweitert, wobei in der neuen Forschungsinitiative mit Mitteln des Umweltministeriums Baden-Württemberg („Betriebliche Umwelttechnik, Dez. 07 – Nov. 08) auch das Thema „Feinstaub“ in die Untersuchungen mit eingeschlossen wird. Neben der dadurch erreichten noch stärker ganzheitlichen Betrachtung der Thematik werden durch diese Initiative insbesondere die Hersteller von Sensorik und Regelungstechnik ermutigt in diesen Markt einzusteigen, da mit der Erweiterung des Verfahrens auf weitere Anlagentypen die in Aussicht stehenden Stückzahlen weiter an Attraktivität gewinnen.

10 Öffentlichkeitsarbeit

Bereits während der Projektlaufzeit wurden Teile der Arbeit anlässlich der Fachtagung „Emissionsminderung an Kleinf Feuerungsanlagen“ in Dülmen im Nov. 2006 vorgetragen /KOH06/ und haben dort erstmals große Beachtung gefunden. Auf Einladung der Arbeitsgemeinschaft der Kachelofenwirtschaft (AdK) wurde das Projekt auf dem Messestand der AdK auf der ISH 2007 in Frankfurt anhand von zwei Vorträgen vorgestellt. Schließlich wurde der abschließende Projektstand /But2007/ auf Einladung beim 6. Stuttgarter Holzfeuerungskolloquium zusammen mit einem weiteren Vortrag zum ESCUBE CarboSen 1000 /Ham2007/ präsentiert.

Das aus den Projektarbeiten hervorgegangene neue Regelungskonzept für Primär- und Sekundärluft wurde in Zusammenarbeit mit dem Technologie-Lizenzbüro der Hochschulen in Baden-Württemberg (TLB) im Sept. 2006 zum Schutzrecht angemeldet.

10 Referenzen

- /But07/ Butschbach P., Kohler H., Potreck A.; Minderung der Schadgasemissionen von Stückholz-Feuerungsanlagen: Fortschritte durch Abgas-Sensorik und katalytische Nachverbrennung, Beiträge zum 6. Stuttgarter Holzfeuerungskolloquium, Inst. für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Bericht 52 (2007) 63
- /Bup07/ Butschbach P.; Diplomarbeit am Inst. für Sensorik und Informationssysteme, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft (2007)
- /Dit86/ Dittrich J.; Optimierung von Feuerungsanlagen durch O₂-Regelung mit dynamischem Sauerstoffsensoren, Verlag für Technische Literatur (1986) 16-21
- /Ham02/ Hammer F.; Entwicklung eines miniaturisierten Festkörperelektrolytsensors aus der Raumfahrt zur Optimierung von Verbrennungsprozessen, Dissertation Universität Stuttgart (2002)
- /Jer02/ Jerger A., Kohler H., Becker F., Keller H.B., Seifert R.; New applications of tin oxide gas sensors – II. Intelligent sensor system for reliable monitoring of ammonia leakages, Sensors and Actuators B81 (2002) 301-307.
- /Koh06/ Kohler H., Potreck A., Trautmann Th; Reduktion der Schadgasemissionen von Stückholz-Kleinfeuerungsanlagen durch Regelung der Zuluftströme mittels in-situ Abgassensorik, Beitragsband Fachtagung „Emissionsminderung an Kleinfeuerungsanlagen“, Dülmen 23. Nov. 2006
- /Mar99/ Marutzky R., Seeger K.; Energie aus Holz und Anderer Biomasse, DRW-Verlag (1999) 48.
- /Nus89/ Nussbaumer Th.; Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Forschungsbericht Nr.6, Laboratorium für Energiesysteme ETH Zürich (1989) 107.
- /Str07/ Struschka M., Juschka W., Bächlin W., Störgel Ch.; Detaillierte Berechnung von Emissionen und Immissionen aus Kleinfeuerungsanlagen; Beitragsband 6. Stuttgarter Holzfeuerungs-Kolloquium, Bericht Nr. 52, Inst. für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart (2007) 5