

Institut für Sensorik und Informationssysteme am IAF der
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Holzverbrennung 2015

Konzeption, Darstellung und Untersuchung eines extrem
emissionsarmen Stückholz-Heizkessels

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen 27383/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

Verbundpartner

Institut für Feuerungs- und Kraftwerktechnik (IFK), Universität Stuttgart

Institut für Raumfahrtssysteme (IRS), Universität Stuttgart

Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS), Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Bosch Thermotechnik GmbH (BTT), Lollar

Dittrich Elektronik GmbH, Baden-Baden

Lamtec GmbH, Walldorf

Autoren:

M.Sc Dipl.-Ing. (FH) Johannes Brodbeck (IFK)

Dr.-Ing. Frank Hammer (IRS)

Prof. Dr. Ralf Herwig (ISIS)

Prof. Dr. Heinz Kohler (ISIS)

Prof. Dr. Thorsten Leize (ISIS)

Dr.-Ing. Michael Struschka (IFK)

Januar 2013

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	27383/02	Referat	24/0	Fördersumme	320.000
----	-----------------	---------	-------------	-------------	----------------

Antragstitel **Konzeption, Darstellung und Untersuchung eines extrem emissionsarmen Stückholz-Heizkessel**

Stichworte Stückholz-Heizkessel, Optimierung der Verbrennung durch Neukonstruktion, Optimierung der Verbrennungsluftregelung, Abgas-Sensorik, Oxidationskatalyse

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
18 Monate	18.06.2010	30. Sept. 2012	1

Zwischenberichte	15.12.2010
------------------	------------

Bewilligungsempfänger	Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft	Tel	0721/925-1282
		Fax	0721/925-2361
	Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS) Moltkestrasse 30 76133 Karlsruhe	Projektleitung	Prof. Dr. Heinz Kohler
		Bearbeiter	Kohler

Kooperationspartner Universität Stuttgart, Institut für Raumfahrtsysteme (IRS), Abteilung In-Situ Gassensorik, Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart
Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerktechnik (IFK), Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart
Bosch Thermotechnik GmbH, Lollar
Dittrich Elektronik GmbH, Baden-Baden
Lamtec GmbH, Walldorf

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Der Optimierung der Stückholzverbrennung durch Verbrennungsluftregelung auf der Basis der sensorisch erfassten Abgasparameter Verbrennungstemperatur, Restsauerstoffkonzentration und CO/HC-Gehalt sind durch konstruktive Gegebenheiten der Verbrennungsanlage Grenzen gesetzt. Eine ganzheitliche Betrachtung unter Einbeziehung des zu prognostizierenden Energiebedarfs ist notwendig, um verbrennungstechnisch optimierte Verbrennungsbedingungen im Alltagsbetrieb realisieren zu können.
Zielsetzung: Entwicklung eines Stückholz-Heizkessels, der unter praxisnahen Betriebsbedingungen hinsichtlich der Emissionen von Schadgasen (CO, VOC, PAK etc.) und Feinstäuben neue Maßstäbe setzt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- Konstruktive Optimierung der Brennräume hinsichtlich Durchlüftung des Brenngutes (Primärkammer) und Durchmischung der Pyrolysegase mit der Sekundärluft (Sekundärbrennkammer).
- Verbrennungsluftregelung basierend auf den Parametern Verbrennungstemperatur, Restsauerstoffkonzentration (ROC) und CO/HC-Gehalt.
- Evaluation und Weiterentwicklung der Gassensorik.
- Verbrennungsprozess-Monitor zur Prozessregelung und Wärmebedarfsbilanzierung

Ergebnisse und Diskussion

Durch Modifizierung eines Heizkessels aus der Serie des Verbundpartners Bosch Thermotechnik in Kooperation mit dem IFK (verteilte Verbrennungsluftzufuhr über Öffnungen in den Roststegen; seitlich angebrachte, neu konstruierte Nachbrennkammer; Verbrennungsluftzuführung über zwei separat regelbare Gebläse) konnten Hohlbrandsituationen gänzlich vermieden werden. Die Nachverbrennung der Pyrolysegase mit der Verbrennungsluft ist mit einer am IFK entwickelten Verwirbelungstechnik exzellent. In der stationären Hochtemperatur (HT)-Verbrennungsphase wurden CO-Konzentrationen von unter

Ergebnisse und Diskussion (Fortsetzung)

20mg/m³ und PM-Emissionen von 10-14 mg/m³ (beide Werte bezogen auf 13%ROC) gemessen.

Mit der ISIS-Verbrennungsluftregelung wurden ähnlich niedrige Emissionswerte in der HT-Verbrennungsphase erzielt. Mit speziellen Algorithmen für die Zünd- und die Nachlegephase auf vorhandene Glut können beide instationäre, bekannterweise von erhöhten Emissionen begleitete Phasen, sehr kurz gehalten werden (3-4min.bzw. <2min). Stationärer Teillastbetrieb ist mit der momentanen Version des Musterkessels nicht möglich. Hierzu sind weitere konstruktive Modifikationen der Primär-Brennkammer notwendig. Experimente am ISIS zum automatisierten Teillastbetrieb zeigten allerdings, dass bei Absenkung der Verbrennungstemperatur auf Werte unter 920°C die Emissionen deutlich zunehmen. – Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer Wärmebedarfsprognose für die Stückholzfeuerung.

Drei verschiedene Sensorprinzipien zur kontinuierlichen Messung der Restsauerstoffkonzentration (ROC) wurden am ISIS untersucht. Sowohl die Sonde MFO10-O (Dittrich Elektronik, Baden-Baden), als auch die Sonde LSU 4.9 (Bosch) sind für Anwendungen in Holzfeuerungsprozessen gut geeignet.

Zur Bestimmung des CO/HC-Gehaltes und zur Verbrennungsluftregelung wurde der CarboSen-Mischpotentialsensor (Lamtec GmbH) eingesetzt. Nach einem speziellen Kalibrierverfahren wurde im Prozess eine sogenannte CO/H₂-äquivalente Konzentration der unverbrannten Kohlenwasserstoffe gemessen, die recht gut die gasförmigen Emissionen beschreibt. Die Signalstabilität weist allerdings noch zu hohe Exemplarstreuung auf. Vom IRS wurde ein Kombisensor auf der Basis des CarboSen entwickelt, der sowohl CO/HC als auch ROC mit einem Chip zu messen vermag. Ein ähnliches Kombiprinzip hat auch die Dittrich GmbH, basierend auf der Kombination einer Nernst- mit einer Coulombschen Pumpzelle, entwickelt. Die Signalabhängigkeit sowohl von ROC als auch von CO- bzw. H₂-Gaskonzentrationen ist gut reproduzierbar, jedoch ist die Signalauswertung noch weiterzuentwickeln.

Zur Erstellung von Wärmebedarfsprognosen ist die aktuelle Kenntnis des Holz-Vorrates im Kessel von Bedeutung. Es wurde ein spezielles Wägeprinzip entwickelt, mit dem die Bestimmung der Brennstoffmasse mit einer Genauigkeit von ca. ±1kg möglich ist.

Experimente zur Reduzierung der gasförmigen Emissionen durch katalytisch gestützte Nachverbrennung waren geplant, konnten aber wegen Zeitknappheit und technischer Abstimmungsprobleme nicht durchgeführt werden.

Es wurde ein Feuerungsprozess-Monitor konzipiert, der aus einem Modul zur Verbrennungsregelung im Kessel mit Human-Interface und einem Wohnraum-Bedienelement (Kommunikationsprozessor) besteht. Letztere Einheit dient zur Visualisierung der wichtigsten aktuellen Feuerungsprozess-Parameter, zur Kommunikation der Verbrennungsqualität und zur numerischen Simulation der Wärmebedarfsprognose um den Betreiber über den aktuellen Brennstoff-Nachlegebedarf zu informieren.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

H. Kohler, S. Brunner, P. Butschbach, D. Glesing; Sensorik und Abgas-Katalyse zur Reduktion der Emissionen von Klein-Holzfeuerungsanlagen, Konferenz „Energetische Biomassenutzung – Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft“, Berlin, 5. Nov. 2012, Konferenzband Energetische Biomassenutzung, S. 80 (2013) ISSN 2192-1806

J. Brodbeck, M. Struschka; Entwicklung eines feuerungstechnisch optimierten Holzvergaserkessels, Vortrag Workshop „Feuerungstechnik trifft Sensorik“, Hochschule Karlsruhe, 15. Feb. 2013.

H. Kohler, S. Brunner, P. Butschbach, D. Glesing; Sensorik und Abgaskatalyse zur Minderung der Emissionen von Holzverbrennungsanlagen kleiner Leistung, Vortrag Workshop „Feuerungstechnik trifft Sensorik“, Hochschule Karlsruhe, 15. Feb. 2013.

J. Brodbeck, M. Struschka; Entwicklung eines feuerungstechnisch optimierten Holzvergaserkessels, VDI - KrdL Expertenforum, Betrieb von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen – Umwelt- und Sicherheitsaspekte, 16. April 2013

Fazit

Das sehr ambitionierte Ziel, einen sowohl konstruktiv als auch regelungstechnisch optimierten, extrem emissionsarmen Stückholzheizkessel zu entwickeln, konnte im Projektzeitraum nicht ganz erreicht werden. Es wurden aber einige sehr innovative Teilergebnisse erzielt, die bei Fortsetzung des Projektes in einer zweiten Stufe sehr gute Aussichten auf Zielerreichung versprechen.

Einleitung und Zielsetzung

Das Projekt „Holzverbrennung 2015“ hat zum Ziel, die Stückholzverbrennung in Heizkesseln kleiner Leistung (Nennwärmeleistung (NWL) ca. 18 kW) weit über den Stand der Technik hinaus in allen Phasen der Verbrennung zu optimieren, um auf diese Weise die Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen, CO und Feinstäuben auf ein Minimum zu reduzieren. Diese Ziele sollen nicht nur unter der nach den gesetzgeberischen Vorgaben als Qualitätsmaßstab herangezogenen quasi stationären Hochtemperaturphase (stationärer Dauerbetrieb) der Verbrennung erreicht werden, die ab 2017 gemäß der zweiten Stufe der 1. BImSchV auch wiederkehrend vor Ort zu überprüfen sein wird; das Projekt zielt vielmehr darüber hinaus auf die Absenkung der Umweltbelastung in allen Phasen der Verbrennung im praxisnahen Betrieb ab. Um die Entwicklungsziele zu quantifizieren, wurden Benchmark-Werte definiert. Diese sind in Tabelle 1 dem Stand der Technik gegenübergestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Emissionsmittelwerte moderner Heizkessel mit den in diesem Projekt angestrebten Emissionszielen

Emissionskomponente**	Mittelwerte modernster Heizkessel auf Basis (Stand der Technik)			Benchmark-Werte für Stückholzkessel „Holzverbrennung 2015“	
	Normprüfung* (stationärer Dauerbetrieb)	Überwachungsmessung 1. BImSchV	praxisnaher Betrieb****	stationärer Dauerbetrieb	praxisnaher Betrieb
CO in mg/m ³	178	1.675	5.055	< 25	< 125
VOC in mgC/m ³	8	***	424	< 2	< 10
Staub in mg/m ³	20	108	197	< 8	< 20

* vgl. auch Abb. 3-4 und 3-6 des vorläufigen Endberichts der Vorstudie zur Untersuchung der Möglichkeiten, die Schadgas- und Feinstaubemissionen eines Stückholzkessels zu minimieren. In obiger Tabelle sind nur Prüfberichte der BLT Wieselburg aufgeführt

** bei 13 Vol% O₂

*** für VOC existiert kein Grenzwert

**** mit Teillastregelung und ohne Pufferspeicher, Messungen ausgeführt am IFK. Vgl. hierzu Werte beim stationären Dauerbetrieb: CO 170 mg/m³ und Staub 38 mg/m³ (jeweils bei 13 Vol% O₂) in Tab. 3-3 im vorläufigem Endbericht der Vorstudie zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Minimierung der Schadgas- und Feinstaubemissionen eines Stückholzkessels.

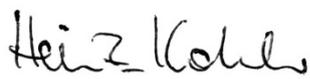
Aus den Ergebnissen vorangegangener Arbeiten des ISIS zur Optimierung der Verbrennung eines Stückholzheizkessels mittels neuartiger Methoden der Verbrennungsluftregelung mit dem Ziel der Absenkung der Schadgas- und Feinstaubemissionen /Koh07, Koh09/ hatte sich die Erkenntnis verfestigt, dass die Schadgas- und Feinstaubemissionen nur durch einen ganzheitlichen Lösungsansatz zur Optimierung des Verbrennungsprozesses auf ein Minimum gesenkt werden können. Dieser ganzheitliche Lösungsansatz wurde in einer Vorstudie /Vor10/ im Hinblick auf

- den Stand der Feuerungstechnik und den daraus resultierenden Entwicklungspotenzialen,
- die Untersuchung zur Auswahl, Eignung und Weiterentwicklung von Abgassensoren zur Optimierung der Verbrennungsprozessregelung und die
- die Studie eines Feuerungsmonitors

vertieft, um konkrete Entwicklungsschritte für die Projektstufe I vorzubereiten, die in diesem Schlussbericht vorgestellt wird. Wegen des großen Umfangs der Gesamtaufgabe wurde von Beginn an eine weitere Projektstufe II vorgesehen, in der die aus den beiden ersten Projektstufen resultierenden Ergebnisse in weiteren Entwicklungsschritten in einen intelligenten Stückholzheizkessel (Prototyp) münden sollen, mit dem schließlich das Projektziel „minimale Emissionen im Praxisbetrieb“ erreicht werden soll. Die im Projektzeitraum zu bearbeitende Projektstufe I wurde grob in folgende Teilaufgaben unterteilt:

- (1) Neukonzeption der Brennräume im Hinblick auf rasche Erreichung genügend hoher Verbrennungstemperaturen nach der Zündung, optimale Heranführung der Verbrennungsluft an das Brenngut (Primärbrennkammer) zur Vermeidung von Verbrennungsprozessstörungen und optimale Durchmischung der Pyrolysegase mit der Verbrennungsluft (Sekundärbrennkammer) zur Realisierung möglichst vollständiger Verbrennung der Pyrolysegase.
- (2) Weiterentwicklung der Erkenntnisse aus Vorläuferprojekten zur Regelung der Verbrennungsluftströme in allen Phasen der Verbrennung auf der Basis der sensorisch registrierten Prozessgrößen Verbrennungstemperatur in der Nachbrennkammer (TNBK), Restsauerstoffkonzentration im Abgas (ROC) und CO/HC-Gehalt im Abgas /But09, Koh10, Koh12/.
- (3) Entwicklung von Gassensorelement-Prototypen (Kombisensoren), die sowohl die Detektion von ROC als auch von CO/HC mit einem Sensorchip ermöglichen.
- (4) Untersuchungen verschiedener Hochtemperatur-Gassensoren hinsichtlich ihrer Eignung zum Dauereinsatz im Abgas von Holzfeuerungsprozessen.
- (5) Integration eines Oxidationskatalysators zur Nachverbrennung der gasförmigen Bestandteile in Phasen geringerer Verbrennungstemperatur (z.B. TNBK <850°C).
- (6) Realisierung eines Musterkessels (NWL ca. 18 kW), der auch für Teillastbetrieb geeignet ist, Optimierung der Verbrennungsluftregelung in allen Phasen der Verbrennung und Gegenüberstellung der Emissionen im Betrieb optimaler Verbrennung (Volllast) und im Teillastbetrieb.
- (7) Erstmalige Entwicklung eines Verbrennungsprozessmonitors, der sowohl die Verbrennungsqualität über die Zeit darstellt als auch aus einem zu entwickelnden Wärmebedarfsmodell den Brennstoffbedarf prognostiziert und dem Betreiber den Nachlegebedarf an Brennstoff vorschlägt, um auf diese Weise den Betriebszustand optimaler Verbrennung auch im praxisnahen Betrieb über möglichst lange Betriebszeiten aufrecht zu erhalten. Der Aspekt der Brennstoffbedarfsermittlung wurde nach Projektstart zusätzlich in das Programm aufgenommen und im Zwischenbericht erstmals formuliert.
- (8) Optimierung des Musterkessels und der Verbrennungsluftregelung in einer weiteren Entwicklungsstufe, Fertigstellung des Feuerungsprozess-Monitors (Prototyp).

Zur Verfolgung dieses ganzheitlichen Lösungsansatzes mit dem Ziel der Minimierung der Emissionen im Praxisbetrieb wurde ein Forschungsverbund aus ausgewiesenen Partnern auf den Gebieten Feuerungsanlagenkonstruktion, Stückholzkesselbau, Sensorik- und Informationssysteme und Sensorherstellung und -vertrieb gegründet. Die Teilaufgaben (1) – (6) waren in Projektstufe I vorgesehen, die Teilaufgabe (7) sollte in Projektstufe I begonnen und zusammen mit Teilaufgabe (8) in Projektstufe II fortgeführt werden (Option).


(Projektkoordinator)

Karlsruhe, den 25. Januar 2013

Ökologische Bilanzierung des Verfahrens (IFK)

Durch Holzfeuerungen werden verschiedene Schadstoffe (CO, VOC, Staub) emittiert, die sich auf Klima und Gesundheit auswirken. So verursacht z.B. Kohlenstoff in Form von Ruß und CH₄ eine Erhöhung des Strahlungshaushaltes der Erde und ruft somit eine direkte klimaverändernde Wirkung hervor. Organische Verbindungen sowie Ruß weisen eine gesundheitsschädigende Wirkung auf.

Um die Umweltbelastung durch Holzfeuerungen bilanzieren zu können, müssen für den Anlagenbestand altersstufenspezifische Emissionsfaktoren berechnet werden. Diese Emissionsfaktoren berücksichtigen sowohl gemessene Praxiswerte als auch Emissionswerte von Prüfstandsmessungen bei Voll- und Teillast. Durch statistische Erhebungen kann die Anzahl der in Betrieb stehenden Anlagen nach Baujahr aufgeschlüsselt werden, so dass letztendlich für die einzelnen Schadstoffe ein durchschnittlicher Emissionsfaktor berechnet werden kann. Über den Endenergieverbrauch können dann die Gesamtemissionen eines bestimmten Jahres berechnet werden. In einem Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit wurden diese Emissionsfaktoren unter anderem auch für den Anlagenbestand von Stückholzkesseln bis zum Jahr 2005 bestimmt [Struschka et al., 2007]. Die folgende Tabelle 2 zeigt die ermittelte Anlagenzahl und die Aufteilung in Altersstufen der installierten Stückholzkessel (mittlere Leistung 35 kW).

Tabelle 2 Anlagenbestand von Stückholzkesseln und Aufteilung nach Altersstufen in Deutschland im Jahr 2005 [Struschka et al., 2007]

Feuerstätten für feste Brennstoffe in Haushalten in Deutschland (2005) Gesamtbestand in 1.000 Stück: 13.688,4	Leistungsbereich in kW (mittlere Leistung ¹)	Altersstufe	Anzahl insgesamt [1.000 Stück]	davon in Alterstufe	
				Anteil [%]	Anzahl [1.000 Stück]
			Heizkessel - handbeschickt	25 - 50 (35 kW)	bis 1988/89
		1990 - 2004	65	123,5	
		ab 2005	16	29,6	

Mit einem ermittelten Endenergieverbrauch dieser Anlagen von 20.413 TJ im Jahr 2005 ergab sich für Stückholzkessel in Deutschland im Bereich Haushalte folgendes Emissionsaufkommen für CO, VOC und Staub:

Tabelle 3 Berechnetes Emissionsaufkommen für Stückholzkessel im Bereich Haushalte für Deutschland im Jahr 2005 [Struschka et al., 2007]

	Emissionsaufkommen		
	CO t	VOC t	Staub t
Anlagenbestand bis 2005	29249	991	1054

Da für den optimierten Stückholzkessel nur Emissionswerte bei Volllast vorliegen, wurden für eine ökologische Bilanzierung gegenüber dem Anlagenbestand drei Szenarien berechnet. Zunächst wurde das Emissionsaufkommen für den Anlagenbestand in 2005 wie in Tabelle 2

ohne Berücksichtigung der Teillastzustände berechnet. Als zweites Szenario wurde das Emissionsaufkommen mit den Emissionen gemäß dem ermittelten Stand der Technik (Normprüfungen - siehe Tabelle 1) für den Fall berechnet, dass alle Stückholzkessel (190.000 Stück) durch Anlagen gemäß dem Stand der Technik ersetzt werden. Im dritten Szenario erfolgte die Berechnung mit den gemessenen Emissionen des optimierten Stückholzmusterkessels, ebenfalls für den Fall, dass alle bestehenden Anlagen durch den optimierten Stückholzmusterkessel substituiert worden wären. Tabelle 4 fasst das derart berechnete Emissionsaufkommen zusammen.

Tabelle 4 Berechnetes Emissionsaufkommen für unterschiedliche Szenarien

	Emissionsaufkommen *		
	CO t	VOC t	Staub t
Anlagenbestand bis 2005**	15596	898	1327
Stand der Technik***	3838	163	531
Stückholzmusterkessel****	327	61	347
Minderungspotential gegenüber Anlagenbestand	98%	93%	74%
Minderungspotential gegenüber Stand der Technik	91%	63%	35%

* Endenergieverbrauch 20413 TJ

* Anlagenzahl und Verteilung 2005; ohne Teillast;

**Anlagenzahl 2005; alle Anlagen mit Emissionen gemäß dem Stand der Technik; ohne Teillast;

***Anlagenzahl 2005; alle Anlagen mit Emissionen optimierter Stückholzmusterkessel; ohne Teillast

Natürlich würden die berechneten Emissionsaufkommen in Tabelle 4 nicht die Realität widerspiegeln, da bestimmte Betriebszustände der Anlagen nicht mit berücksichtigt wurden. Sie sollen vielmehr dazu dienen ein relatives Minderungspotential gegenüber dem Stand der Technik abschätzen zu können.

Das Emissionsaufkommen von Stückholzkesseln kann nicht nur durch verbrennungstechnische Maßnahmen reduziert werden, dies kann auch durch den effizienten Einsatz des Energieträgers Holz erfolgen. Dank des reduzierten Luftüberschusses konnte der Wirkungsgrad des optimierten Stückholzmusterkessels gegenüber dem Stand der Technik deutlich erhöht werden (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5 Wirkungsgrad von Stückholzkesseln gemäß dem Stand der Technik und des Stückholzmusterkessels

	Wirkungsgrad
Stand der Technik	90%
Stückholzmusterkessel*	94%

* Ö-Norm M7510-4; Abgastemperatur= 150°C;

Umgebungstemperatur= 20°C; O₂= 4 Vol. %

Dies zeigt, dass mit dem Einsatz eines verbrennungstechnisch und Wirkungsgrad optimierten Stückholzkessels ein großer Schritt in Richtung einer umwelt- und klimafreundlichen, sowie ressourcenschonenden Biomassenutzung getan werden kann.

Ökonomische Bilanzierung des Verfahrens (BTT)

Eine detaillierte Bewertung der ökonomischen Aspekte der im Projekt umgesetzten Feuerungsanlage kann nur unter dem Gesichtspunkt einer groben Schätzung stattfinden. Die Konstruktionstiefe des Prototyps befindet sich im Stadium eines Funktionsmodells und berücksichtigt daher nicht alle typischen Aspekte einer Serienlösung. Dennoch wird auf Basis der vorliegenden Daten versucht, eine Einschätzung bzgl. der zu erwartenden Kosten einschließlich aller Unsicherheiten zu prognostizieren.

Wird die Lösung im Ganzen betrachtet, so sind die wesentlichen konstruktiven Änderungen in der Primär- und in der Sekundärkammer unternommen worden, um den Verbrennungsprozess gegenüber dem Stand der Technik deutlich zu verbessern. Die technische Umsetzung in der Sekundärbrennkammer zur Verbesserung der Emissionswerte können im Wesentlichen auf folgende Punkte reduziert werden:

- eine zylindrische feuerfeste Brennkammer - heute werden dazu hochbelastbare Keramiken verwendet,
- eine seitliche Zuführung der Verbrennungsgase, aus der Primärzone kommend,
- und einer optimierten Zuführung der Sekundärluft zur Verbesserung der Durchmischung.

Eine keramische zylindrische Brennkammer mit einer seitlichen Eindüsung der Verbrennungsgase kann als Stand der Technik bezeichnet werden und ist somit als kostenneutral einzuschätzen. Die Eindüsung der Sekundärluft über einen metallischen Körper stellt dagegen bzgl. Haltbarkeit und Robustheit in einer thermisch hoch belasteten Umgebung die größte Herausforderung dar. In diesem Temperaturbereich werden typischerweise hochfeste temperaturbeständige Stähle wie z.B. 1.4828 und Inconel verwendet. Letzteres stellt bzgl. Temperaturbeständigkeit die beste, aber auch die teuerste (Material- und Bearbeitungskosten) Lösung dar. Es wäre an dieser Stelle eine Umsetzung in dem keramischen Grundkörper anzustreben, jedoch stellen Gießbarkeit, Fertigungstoleranzen und Mindestmaterialdicke bei feinen Konstruktionen das größte Problem dar. Sollte es nicht möglich sein, die Sekundärluftzuführung als keramisches Bauteil umzusetzen und eine metallische Lösung notwendig sein, so würde die Baugruppe Sekundärkammer gegenüber heutigen Konzepten deutlich kostenintensiver ausfallen. Falls dieser nicht dauerhaft stabil ausführbar ist, muss die Sekundärluftzuführung nach einer bestimmten Betriebszeit ausgetauscht werden und als Verschleißteil definiert werden. Dem Kunden würde hierbei zusätzliche Kosten in Form einer Wartung und Austausch des Verschleißteiles zufallen. Eben genannte Abschätzung beruht auf der Annahme, dass sich der Bauraumvolumen gar nicht bis kaum ändert und sich dadurch die Materialkosten für Materialmenge und Verkleidung annähernd gegenüber Heute konstant bleibt

Im Falle der Primärbrennkammer betritt das Projekt mit einem luftdurchführten Rost zur homogenen Vergasung des Holzes Neuland. Wie die Ergebnisse zeigen, kann die hohe Verbrennungsgüte der Anlage nicht nur auf die gute Performance der Sekundärbrennkammer zurückgeführt werden, sondern auch auf die hoch effiziente Entgasung in der Primärbrennkammer. Offen geblieben ist in dem Projekt das Problem mit der Leistungsmodulation. Offensichtlich neigt diese Art der Vergasung über einen luftdurchströmten Rost zu einer Potenzialerhöhung - einer Neigung zu hoher Entgasungsleistung - und somit zu einem System,

das schwer zu modulieren ist. Hier besteht noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf, um die physikalischen und chemischen Zusammenhänge vollends zu verstehen.

Für den durchströmten Brennrast sind zusätzliche Materialkosten (temperaturbeständiger Stahlwerkstoff) zu berücksichtigen und durch die komplexe Schweißkonstruktion ist ggf. der Einsatz eines Schweißroboters (höhere Investitionskosten) zu prüfen oder eine entsprechend längere Fertigungszeit anzusetzen.

Weiterhin ist bei der Kostenkalkulation zu berücksichtigen, dass zusätzliche Druckgebläse, Veränderungen bzw. Erweiterungen an der Elektronik und der Einsatz zusätzlicher Sensorik (CO-, Luftmassensensor, ...) notwendig sind und sich dadurch die Material- und Montagekosten weiter erhöhen.

In Anbetracht aller noch offenen Punkte und notwendigen Entwicklungsarbeiten würde eine Serienumsetzung der vorgestellten Konzepte die Herstellkosten bis zu 20% höher ausfallen lassen, die sich entsprechend in einen höheren Verkaufspreis ($\geq 20\%$) niederschlagen werden. Ob diese Preiserhöhung am Markt umzusetzen ist, darf auf Grund der bestehenden Emissionsgrenzen der 1. BImSchV angezweifelt werden, da diese mit der heutigen Technologie unterschritten werden kann.

Inhaltsverzeichnis des Schlussberichtes

1	Grundlagen der Emissionsbildung bei der Verbrennung von Holz.....	10
2	Möglichkeiten der feuerungsseitigen Emissionsminderung.....	14
3	Gerätetechnischer Stand heutiger Stückholzkessel.....	16
4	Emissionen bei der Verbrennung von Holz in Stückholzkesseln	23
5	Konzeptentwicklung eines optimierten Stückholzkessels.....	31
6	Experimentelle Validierung des optimierten Stückholzkessels.....	42
7	Konzeptumsetzung als Stückholzmusterkessel	52
8	Zusammenfassung und Ausblick	70
9	Literatur IFK.....	74
10	Verbrennungsluftregelung des Musterkessels	78
11	Abgassensorik	91
12	Feuerungsprozess-Monitor	102
13	Zusammenfassung und Ausblick	111
14	Literatur ISIS.....	114
15	Einleitung IRS.....	118
16	Abgassensorik - Entwicklung von Kombi-Abgassensoren.....	118
17	Weiterentwicklung und Qualifizierung der In-Situ Gassensorik in Richtung simultane Messung von CO/HC mit O₂.....	122
18	Konzeptionierung einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)....	130
19	Erarbeitung der Vorgaben für die Entwicklung und den Aufbau einer Sensorelektronik.....	130
20	Entwicklung von Routinen zur kontinuierlichen Funktionsüberwachung der Gassensorik.....	131
21	Kurzfassung DITTRICH	134
22	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	134
23	Einleitung DITTRICH	134
24	Das O₂/CO-Sensorsystem.....	135
25	Ansteuerungs-/Auswertungselektronik.....	138
26	Erprobungsergebnisse	140
27	Zusammenfassung DITTRICH	142

Berichtsteil zu den Arbeitspaketen des IFK



Universität Stuttgart



Universität Stuttgart
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart (Vaihingen)
Tel.: +49-(0)-711-685-63487, Fax: +49-(0)-711-685-63491
Email: ifk@ifk.uni-stuttgart.de

M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Johannes Brodbeck
Dr.-Ing. Michael Struschka

25. Januar 2013

Inhaltsverzeichnis IFK-Berichtsteil

1	Grundlagen der Emissionsbildung bei der Verbrennung von Holz	10
1.1	Kohlenwasserstoffe.....	11
1.2	Partikel.....	13
2	Möglichkeiten der feuerungsseitigen Emissionsminderung	14
3	Gerätetechnischer Stand heutiger Stückholzkessel	16
3.1	Stückholzkessel nach dem Sturzbrandprinzip	17
3.2	Stückholzkessel mit seitlichem Abbrand.....	20
3.3	Geometrische Abmessungen von Stückholzkesseln	22
4	Emissionen bei der Verbrennung von Holz in Stückholzkesseln	23
5	Konzeptentwicklung eines optimierten Stückholzkessels	31
5.1	Konzept Modul 1	32
5.2	Konzept Modul 2	34
6	Experimentelle Validierung des optimierten Stückholzkessels	42
6.1	Beschreibung der Versuchsfeuerung	42
6.2	Versuchsaufbau und Messtechnik.....	43
6.3	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung	45
6.4	Ergebnisse der Verbrennungsversuche	46
7	Konzeptumsetzung als Stückholzmusterkessel	52
7.1	Beschreibung des Stückholzmusterkessels.....	52
7.2	Versuchsaufbau und Messtechnik.....	53
7.3	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung	55
7.4	Verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels	55
7.4.1	Einfluss der Primärluftmenge	56
7.4.2	Ergebnisse der Gasmessungen	57
7.4.3	Einfluss der Sekundärluftmenge.....	61
7.4.4	Ergebnisse der Partikelmessungen.....	63
7.4.5	Einfluss der Verbrennungsregelung	65
7.4.6	Schlussfolgerungen.....	68
8	Zusammenfassung und Ausblick	70
9	Literatur IFK	74

1 Grundlagen der Emissionsbildung bei der Verbrennung von Holz

Der Verbrennungsprozess von holzartiger Biomasse kann grundsätzlich in drei Teilprozesse unterteilt werden (Abbildung 1.1). Die Verbrennung von Holz beginnt mit der Erwärmungsphase. In der anschließenden Trocknungsphase, die hauptsächlich über 100 °C stattfindet, wird das am Holz anhaftende oder eingeschlossene Wasser verdampft. Dabei, wie auch bei den anderen Verbrennungsstufen, schreitet der Prozess von außen nach innen fort. Während der Brennstoff innen noch trocknet, beginnt außen bereits die pyrolytische Zersetzung der Holzbestandteile.

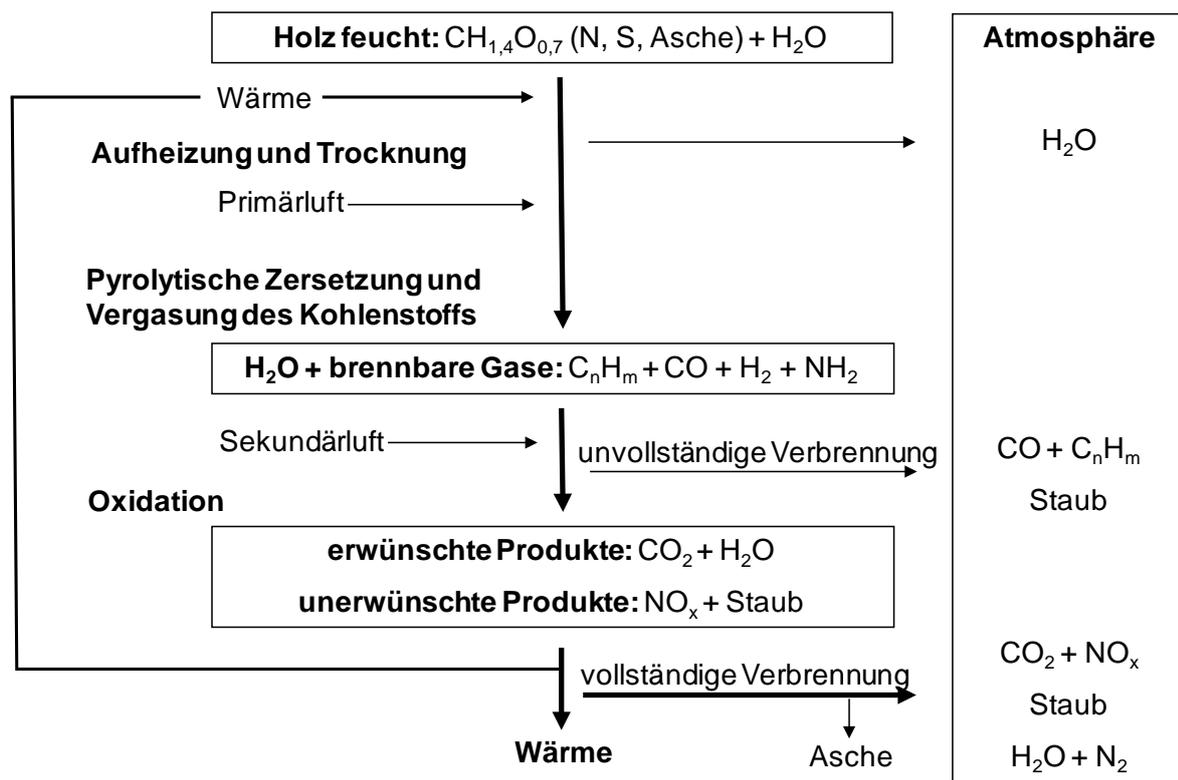


Abbildung 1.1 Teilprozesse bei der Holzverbrennung [Kaltschmitt et al., 2001]

Unter Pyrolyse versteht man den chemischen Prozess, bei dem ausschließlich Wärme bei Sauerstoffausschluss zugeführt wird. Dabei kommt es zu einer Aufspaltung der langkettigen organischen Verbindungen in kürzerkettige Verbindungen. Es werden brennbare Gase in Form von Kohlenstoffmonoxid (CO) und gasförmigen Kohlenwasserstoffen sowie Pyrolyseöle (Teere) gebildet. Dieser Vorgang benötigt keinen Sauerstoff. Da Sauerstoff aber in chemisch gespeicherter Form (bei Holz ca. 44 % der Trockenmasse) oder durch Luftzuführung stets vorhanden ist, kommt es unter Wärmefreisetzung unmittelbar nach der Aufspaltung zu mehr oder weniger vollständigen Oxidationsreaktionen.

Um den Prozess der Entgasung durch die Wärmefreisetzung in Gang zu halten und in der Leistung zu steuern, wird in Feuerungsanlagen gezielt an den Ort der pyrolytischen Zersetzung (z. B. Glutbett) Luftsauerstoff als Primärluft zugeführt. Dieser Teilprozess wird auch als Vergasung bezeichnet. Dabei wird die benötigte Wärme aus unvollständigen Reaktionen der gasförmigen Pyrolyseprodukte mit Sauerstoff bereitgestellt. Zur Reaktion der festen und flüs-

sigen Pyrolyseprodukte (Kohle, Teere) sind im Vergleich zur pyrolytischen Zersetzung mit zum Teil über 500 °C, merklich höhere Temperaturen notwendig.

Im Teilprozess der Oxidation haben sich die Brenngase schon teilweise im Feuerraum ausgebreitet. Durch die gezielte Zuführung von Luftsauerstoff in diesem Teilprozess (Sekundärluft) kann hier eine mehr oder weniger vollständige Oxidation der freigesetzten gasförmigen Produkte stattfinden. Dabei entsteht Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasser (H₂O). Der Abbau der Kohlenwasserstoffe erfolgt hierbei über die Bildung von CO als Zwischenprodukt, das in einer weitergehenden Oxidation zu CO₂ reagiert.

Außer der von Flammenbildung gekennzeichneten Oxidation ist bei biogenen Festbrennstoffen ebenso die flammenlose Verbrennung bedeutsam, die im Endstadium des Verbrennungsvorganges auftritt. Der als Endprodukt der pyrolytischen Zersetzung gebildete feste Kohlenstoff (Holzkohle) wird dabei im Glutbett zuerst vergast (Feststoffvergasung) und anschließend in der Gasphase oxidiert. Als Verbrennungsrückstand verbleibt die Asche [Kaltschmitt et al., 2001].

Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz werden mit dem Abgas Verbrennungsprodukte emittiert, die je nach Verbrennungszustand, in Produkte aus vollständiger bzw. unvollständiger Verbrennung unterteilt werden können. Stoffe aus der vollständigen Verbrennung der biogenen Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O) sind Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf, Stickstoffoxide (NO_x) und anorganische Staub- und Aschepartikel. Stoffe aus der unvollständigen Verbrennung der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O) sind im Wesentlichen Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (C_nH_m oder VOC), sowie Partikel (Ruß, Teere und bei Umgebungstemperatur kondensierbare organische Verbindungen).

Als Ursache für eine unvollständige Verbrennung ist eine ungenügende Sauerstoffzuführung nur selten allein ausschlaggebend. Oft ist auch die Verbrennungstemperatur in der Ausbrandzone (Oxidationszone) zu gering. Dadurch laufen die Reaktionen zu langsam ab, besonders dann, wenn zu feuchte Brennstoffe verwendet werden. Weiterhin kommt es zu einer unvollständigen Verbrennung, wenn die Verweilzeit der Reaktionspartner in der heißen Zone zu gering ist (z. B. auf Grund zu klein dimensionierter Feuerräume). Zu hohe Wassergehalte im Brennstoff reduzieren die Verbrennungstemperatur und führen zu einer Erhöhung des Abgasvolumens. Dadurch ist die Aufenthaltszeit der Brenngase im Brennraum herabgesetzt. Eine zu geringe Durchmischung der Brenngase mit der Verbrennungsluft kann außerdem zu einer lokalen Unterversorgung von Sauerstoff führen. Die Folge ist auch hier eine unvollständige Verbrennung [Kaltschmitt et al., 2001].

Nachfolgend wird auf die Emissionsbildung der Kohlenwasserstoffe und Partikel näher eingegangen.

1.1 Kohlenwasserstoffe

Bei der unvollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen kann im Abgas eine Vielzahl von Substanzen auftreten, welche einen ketten- oder ringförmigen Grundkörper aus Kohlenstoff und Wasserstoff aufweisen. Zusätzlich können neben diesen Elementen auch Heteroatome wie z.B. Sauerstoff vorhanden sein. Zu solchen organischen Verbindungen gehören Alkohole, Aldehyde und organische Säuren, wie z. B. Methan, Propan, Methanol, Formaldehyd, und Ameisensäure [Baumbach, 1994]. Viele dieser organischen Substanzen sind flüchtige Verbindungen und befinden sich im Abgas in gas- oder dampfförmigem Zustand. Andere

dagegen kondensieren aus und können an Asche- bzw. Rußpartikeln adsorbiert werden, wie z.B. die nachfolgend beschriebenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), oder liegen als teerartige Aerosole vor.

Läuft die Verbrennung mit unzureichender O₂-Zufuhr oder schlechter Vermischung der Verbrennungsluft mit den Pyrolysegasen ab, können auch höhermolekulare Stoffe wie polyzyklisch aromatische Kohlenwasserstoffe im Abgas von Holzfeuerungsanlagen auftreten. Dabei sind zwei oder mehr Benzolringe miteinander verknüpft (Abbildung 1.2).

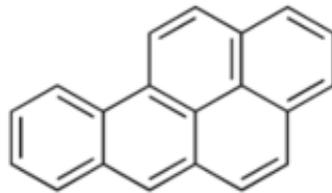


Abbildung 1.2 Strukturformel von Benzo[a]pyren

Die Polyzyklenbildung läuft in folgenden Teilschritten ab [Baumbach, 1994]:

- Addition von kleineren aliphatischen Verbindungen und Zyklisierung zu hydroaromatischen Kohlenwasserstoffen mittlerer Molekülgröße
- Überführung der hydroaromatischen Kohlenwasserstoffe in vollaromatische
- Bildung größerer aus kleineren polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen.

Die wichtigsten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe wurden von der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) in einer Liste zusammengefasst (Tabelle 1.1). Darin werden insgesamt 16 Einzelverbindungen benannt, die nach Vorkommen, Bedeutung, Umweltrelevanz und toxikologischen Gesichtspunkten als Leitsubstanzen unter den PAK anzusehen sind. Wobei sowohl die Toxizität als auch der Siedepunkt der PAK mit der Anzahl der Benzolringe zunimmt.

Tabelle 1.1 PAK-Liste der amerikanischen Bundesumweltbehörde (EPA)

Einzelverbindung	Anzahl Benzolringe	Einzelverbindung	Anzahl Benzolringe
Naphthalin	2	Benzo[a]anthracen	4
Acenaphthylen	3	Chrysen	4
Acenaphthen	3	Benzo[b]fluoranthen	5
Fluoren	3	Benzo[k]fluoranthen	5
Phenanthren	3	Benzo[a]pyren	5
Anthracen	3	Dibenz[ah]anthracen	5
Fluoranthen	4	Benzo[ghi]perylen	6
Pyren	4	Indeno[1,2,3-cd]pyren	6

1.2 Partikel

Das entstehende Abgas aus der Holzverbrennung besteht nicht nur aus gasförmigen Komponenten, sondern enthält auch feste und flüssige Bestandteile, sogenannte Aerosole. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften dieser Aerosole werden hauptsächlich durch die vorherrschende Verbrennungsqualität beeinflusst. Außerdem können Partikel durch das Mitreißen von Brennstoff- oder Ascheteilchen ins Abgas gelangen (Tabelle 1.2).

Tabelle 1.2 Partikelarten aus der Holzverbrennung, eingeteilt nach Verbrennungsqualität [Nussbaumer, 2003]

Partikel aus vollständiger Verbrennung	Partikel aus unvollständiger Verbrennung
mineralische Bestandteile des Holzes (z.B. CaO)	elementarer Kohlenstoff (Holzkohle)
Fremdteile, die am Holz anhaften (Sand, Erde)	organischer Kohlenstoff in Form von unverbrannten Holzbestandteilen
Salze (Sulfate, Chloride, Karbonate, Hydroxide, Oxide, Nitrate, ionische Verbindungen)	organischer Kohlenstoff in Form von Teer
Metalloxide (z.B. Al ₂ O ₃)	organischer Kohlenstoff in Form von Ruß

Bei der Verbrennung von Holz kommt es zu verschiedenen Partikelbildungsmechanismen, welche in Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen unterschiedlich stark zu den Gesamtstaubemissionen beitragen (Abbildung 1.3). Unter nahezu **vollständigen Verbrennungsbedingungen** gehören folgende Partikelbildungspfade zu den wichtigsten:

- Fest-Dampf-Partikel-Pfad anorganischer Bestandteile: Hierbei verdampfen die Komponenten im Glutbett (> 600 °C) und bilden, bei der Temperaturabnahme im Abgas, über Nukleation, Koagulation und heterogene Kondensation Partikel. Bei den so entstandenen Partikeln handelt es sich um anorganische Salze, im Größenbereich von 0,1 µm (=100 nm), hauptsächlich um Kaliumverbindungen wie K₂SO₄ und KCl.
- Fest-Partikel-Pfad anorganischer Bestandteile: Diese schwerflüchtigen anorganischen Komponenten des Holzes gelangen als feste Komponenten ins Abgas und können dort durch Kondensation und Koagulation wachsen. Diese Salze, meist Kalziumverbindungen wie CaO, haben einen Aerodynamischen Durchmesser im Bereich von 1 µm. Dieser Partikelbildungsmechanismus spielt jedoch lediglich bei der Rindenverbrennung eine Rolle.

Läuft die **Verbrennung unvollständig** ab, werden Kohlenstoff-Partikel mit dem Abgas emittiert, die bei der pyrolytischen Zersetzung freigesetzt wurden und anschließend nicht vollständig oxidiert sind. Dabei kann zwischen den Kohlenstoff(C)-haltigen festen oder flüssigen Zersetzungsprodukten sowie den C-haltigen Syntheseprodukten unterschieden werden:

- C-haltige (kondensierte) Zersetzungsprodukte sind organische Verbindungen (z.B. Teere), welche aus Fragmenten der Holzbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin bestehen.
- Zu den kohlenstoffhaltigen Syntheseprodukten gehört z.B. Ruß. Die Rußbildung wird durch Sauerstoffmangel in der Flammenwurzel, z.B. durch ungenügende Vermischung von Brennstoff und Luft, und durch hohe Temperaturen in dieser Phase begünstigt [Baumbach, 1994].

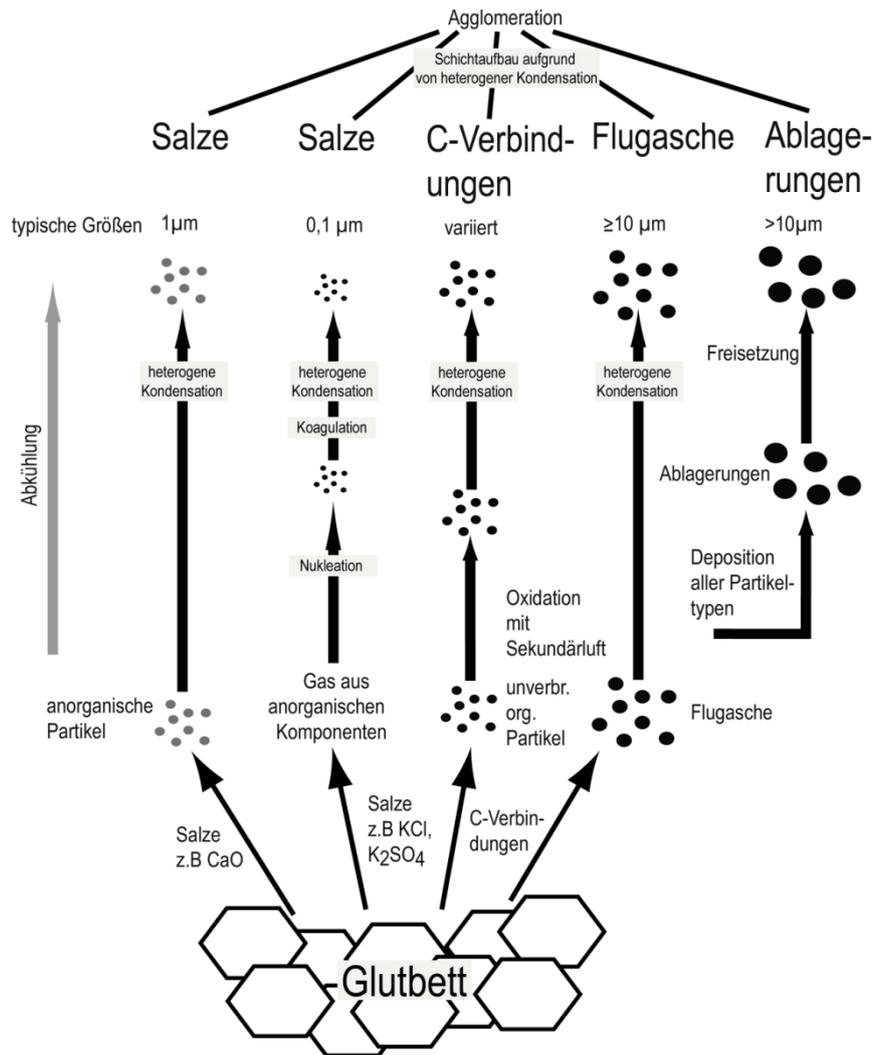


Abbildung 1.3 Schematische Darstellung der Partikelbildung in Holzfeuerungen [Nussbaumer, 2003]

Durch schwankende Gasgeschwindigkeiten können sowohl Aschepartikel mitgerissen (Flugasche) als auch Ablagerungen abgelöst und freigesetzt werden. Diese Partikel liegen im Größenbereich $\geq 10\ \mu\text{m}$ und sind für die Gesamtstaubemissionen von untergeordneter Bedeutung, da sie meist schon, durch entsprechende Abgasführung, in der Feuerungsanlage abgeschieden werden können.

2 Möglichkeiten der feuerungsseitigen Emissionsminderung

Für einen vollständigen Ausbrand und niedrige Emissionen müssen im Feuerraum bestimmte Verbrennungsbedingungen vorhanden sein. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Sekundärbrennkammer oder Nachbrennkammer. In ihr werden die Brenngase bei möglichst hohen Temperaturen, ausreichender Verweilzeit und guter Durchmischung mit der Sekundärluft mehr oder weniger vollständig verbrannt. In der Regel gelten für eine vollständige Brennstoffumsetzung im Feuerraum folgende Einflussgrößen:

- Oxidationsmittel, d.h. Sauerstoff im Überschuss (λ i.d.R. zwischen 1,4 und 2,2)

- Räumliche Trennung von Feststoffvergasung und heißer Gasphasenoxidation (Primär- und Sekundärluft)
- homogene Vermischung der Gase mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft
- ausreichende Verweilzeit in der heißen Zone (i.d.R. ca. 2s)
- ausreichend hohe Temperaturen ($> 850^{\circ}\text{C}$).

Bei der Auslegung und Konstruktion einer Nachbrennkammer kann der Ausbrand z.B. durch die Erhöhung der Verweilzeit in der heißen Zone oder durch die Erhöhung der Turbulenz verbessert werden. Eine Verbesserung der Durchmischung kann durch aktive Elemente wie Prallplatten und Düsen oder durch rein strömungstechnische Maßnahmen (z.B. Erzeugung einer Rückströmung) erfolgen. Der Einfluss wird in Abbildung 2.1 deutlich, demnach ist eine ideale Mischung der Ausbrandluft mit den heißen Brenngasen anzustreben.

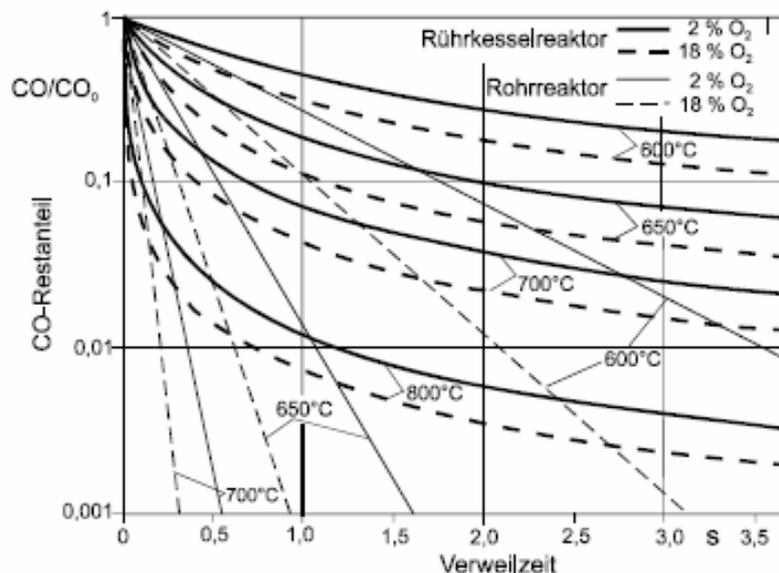


Abbildung 2.1 CO-Restanteil in Abhängigkeit der Verweilzeit für verschiedene Temperaturen, Reaktortypen und O_2 -Konzentrationen [Kaltschmitt et al., 2001]

Für niedrige Partikelemissionen reicht, aufgrund der unterschiedlichen Partikelbildungsmechanismen (vgl. Kapitel 1.2), eine vollständige Verbrennung allein nicht aus. Untersuchungen an einer automatischen Holzfeuerung zeigen, dass die über den Fest-Dampf-Partikel-Pfad entstandenen Partikel (bei konstantem Betrieb) den größten Anteil (ca. 60%) der Partikelmasse ausmachen und der Anteil des Kohlenstoffs unter 7 Massen-% liegt. Bei Phasen mit unvollständigen Verbrennungszuständen nimmt der Anteil der Kohlenstoff-Partikel zu. Um den anorganischen Partikelanteil, der hauptsächlich aus Kaliumverbindungen besteht, zu reduzieren, muss im Glutbett eine gewisse Sauerstoffarmut erzeugt werden, so dass bevorzugt schwerflüchtige Kaliumverbindungen entstehen. Bei einem Glutbett-Luftüberschuss von $\lambda = 0,2$ bis $0,4$ und einem Gesamt-Luftüberschuss zwischen $\lambda = 1,3$ und $1,4$ kann sowohl die Gesamtstaubemission (Faktor 5-6) als auch die Partikelanzahl reduziert werden [Nussbaumer, 2003]. Die Verbrennungstemperatur ist für die Partikelbildung über den Fest-Dampf-Partikel-Pfad von untergeordneter Bedeutung.

3 Gerätetechnischer Stand heutiger Stückholzkessel

Bei handbeschickten Stückholzkesseln zur zentralen Gebäudebeheizung (über Heizwasserkreise) wird heute ausschließlich der untere Abbrand als Feuerungsprinzip eingesetzt. Hierbei wird der Feuerraum in eine Primär- (Brennstoffreservoir) und Sekundärkammer unterteilt. In der Primärkammer erfolgt mittels Primärluftzugabe die Feststoffvergasung, wobei jeweils nur die unterste Schicht des Brennstoffs umgesetzt wird. Das über dem Glutbett liegende Holz dient als Brennstoffreserve, welches selbstständig nachrutscht und somit einen quasi-kontinuierlichen Brennstoffnachschub ermöglicht. Über die Menge der zugeführten Verbrennungsluft (Primärluft) kann die Feuerungswärmeleistung entsprechend dem aktuellen Wärmebedarf angepasst werden. Die in der Primärkammer freigesetzten Brenngase werden meist über ein Saugzuggebläse entweder nach unten (Sturzbrand) oder zur Seite (seitlicher Unterbrand) in die Sekundärkammer (Brennkammer) befördert und dort unter Sekundärluftzugabe mehr oder weniger vollständig verbrannt (Abbildung 3.1). Feuerungen mit Sturzbrand besitzen keinen Verbrennungsrost, dort bleibt die Asche im Füllraum liegen. Beim seitlichen Unterbrand kann die Primärluftzugabe teils auch über einen Bodenrost erfolgen, dies ermöglicht eine komfortablere Entaschung und einen vollständigen Holzkohleabbrand.

Nach der Sekundärkammer werden die heißen Abgase durch den Wärmetauscher geleitet. Je mehr Schikanen (Turbulatoren) die heißen Abgase hierbei im Wärmetauscher überwinden müssen, desto besser erfolgt die Wärmeabgabe an das Heizwasser und desto höher ist folglich der Kesselwirkungsgrad. Dieser liegt im Volllastbetrieb unter Prüfstandsbedingungen durchschnittlich bei ca. 90% (laut FNR-Marktübersicht, 2007).

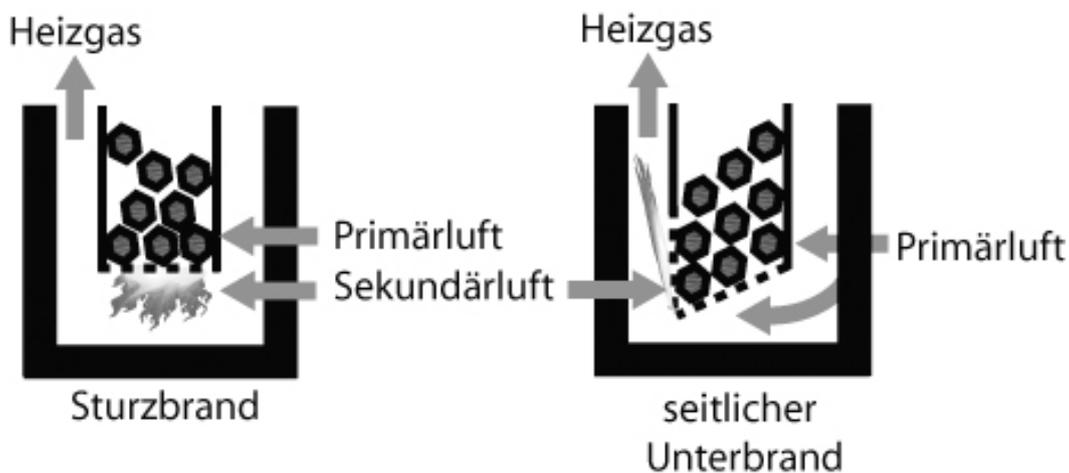


Abbildung 3.1 Feuerungsprinzipien bei Stückholzkesseln

Ein weiteres gerätetechnisches Unterscheidungsmerkmal ist die Ausführung der Regelung. Bei handbeschickten Stückholzkesseln hat eine Regelung folgende Ziele:

- Anpassung der Feuerungswärmeleistung an den aktuellen Wärmebedarf, wodurch lange Abbrandzeiten erreicht werden
- Anpassung von Primär- und Sekundärluft um möglichst optimale Verbrennungsbedingungen während der unterschiedlichen Verbrennungsphasen zu erreichen
- bei Systemen mit Wärmespeicher: Integrierte Speicherbewirtschaftung mit Restwärmenutzung.

Abhängig von der Regelung lassen sich Stückholzkessel in reine Volllastkessel, leistungsregelte Stückholzkessel und leistungs- und verbrennungsgeregelte Stückholzkessel unterscheiden. Volllastkessel besitzen keine Regelung, die Primär- und Sekundärluftmengen sind fest eingestellt. Bei einem leistungsregelmäßigem Stückholzkessel kann der Verbrennungsprozess entsprechend der Wärmeabnahme angepasst werden. Die modernste Entwicklungsstufe für die Verbrennung von Stückholz stellen die leistungs- und verbrennungsgeregelten Stückholzkessel dar. Zur Verbrennungsüberwachung kommt hier meist eine Lambdasonde zur Messung der O₂-Konzentration am Kesselausgang bzw. im Abgasrohr zum Einsatz. Ziel der Verbrennungsregelung ist es, durch die Anpassung der Primär- und/oder Sekundärluftmenge möglichst optimale Verbrennungsbedingungen und niedrige Emissionswerte zu erreichen.

Nachfolgend wird auf die verschiedenen Verbrennungskonzepte, Detaillösungen zur Feuer- raumgestaltung, zur Führung und Verteilung der Verbrennungsluft sowie auf die bisherigen Entwicklungsansätze zur Verbrennungsoptimierung der verschiedenen Hersteller eingegangen.

3.1 Stückholzkessel nach dem Sturzbrandprinzip

Eine gebräuchliche Bauform von Stückholzkesseln beruht auf dem Sturzbrand- Feuerungsprinzip (Abbildung 3.2). Sie besteht aus einem großen Füllschacht für 33, 50 oder auch 100 cm langem Scheitholz, in den eine bestimmte Menge Holz aufgegeben werden kann. Damit möglichst nur die Brennstoffschicht direkt über dem Glutbett an der Verbrennung teilnimmt, werden verschiedene konstruktive Maßnahmen ergriffen. So wird z.B. der Füllschacht durch einen Wassermantel gekühlt. Eine zusätzliche Innenauskleidung des Füllraums soll den Teer- und Rußniederschlag an kalten Flächen im Füllraum begrenzen. Die Primärluftzugabe in den unteren Teil des Füllschachts erfolgt über zahlreiche seitliche Öffnungen, siehe auch Abbildung 3.3. Der Füllschachtboden muss grundsätzlich folgenden materialspezifischen Anforderungen gerecht werden:

- robust gegen mechanische Beanspruchung aufgrund herabfallender Holzscheite beim Befüllen des Stückholzkessels
- hohe Wärmespeicherkapazität für ein hochreaktives und heißes Glutbett unmittelbar vor der Brennkammer.

Meist kommen bei der Konstruktion von Füllschachtböden für Stückholzkessel mit Sturzbrand z.B. Feuerbetone, Schamottesteine oder hitzebeständige Gussplatten zum Einsatz. Über eine Öffnung im Füllschachtboden werden die freigesetzten Brenngase unter Zugabe von Sekundärluft in die Brennkammer gesaugt. Füllraumseitig sind diese (schlitzförmigen) Öffnungen meist mit Stahl- oder Gussbauteilen ausgekleidet. Dies dient zum einen als Kantenschutz der sehr stoßempfindlichen Feuerfestmaterialien, zum anderen wird durch eine entsprechende geometrische Gestaltung verhindert, dass Holzkohle in die Brennkammer gelangt bzw. die Sekundärluftöffnungen verstopfen (siehe Abbildung 3.4).

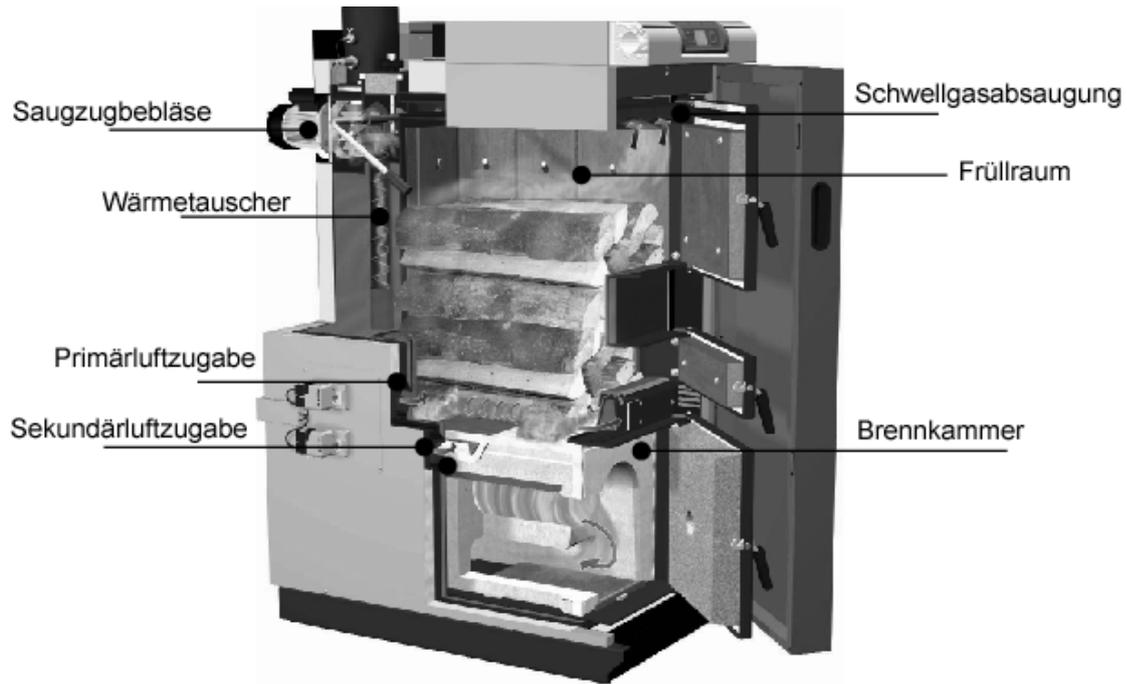


Abbildung 3.2 Aufbau eines Stückholzkessels nach dem Sturzbrandprinzip [Fröling, 2009]

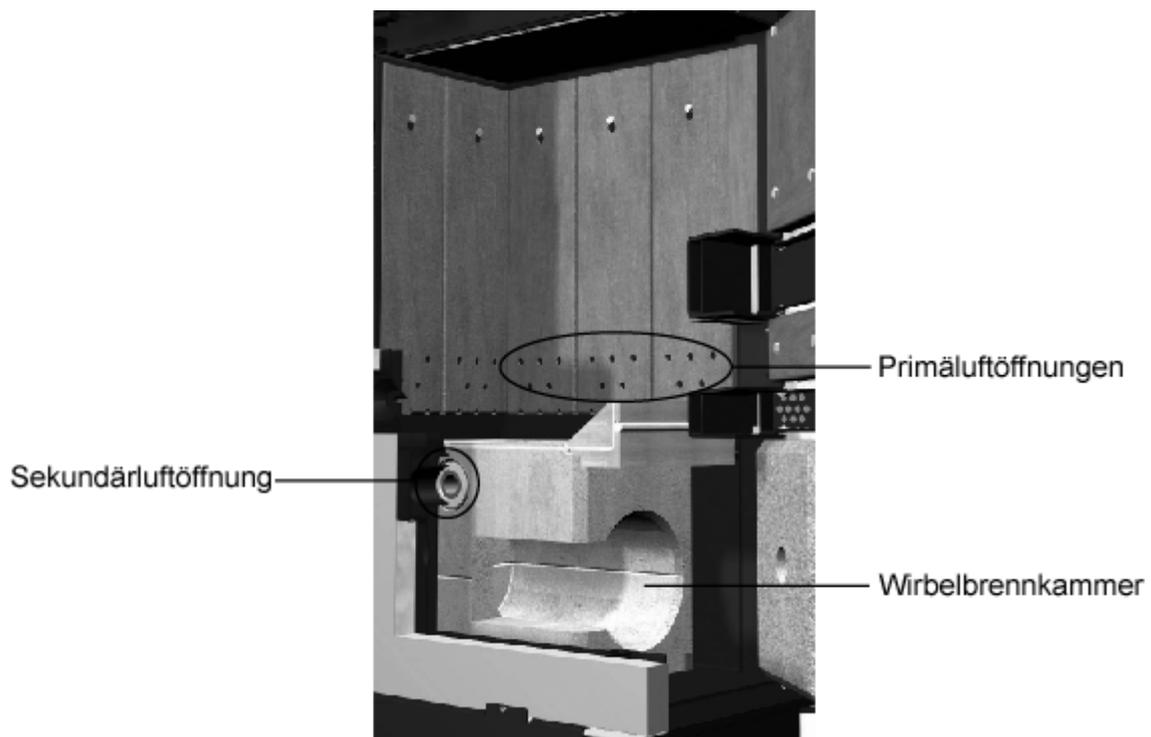


Abbildung 3.3 Primärluft- und Sekundärluftöffnungen eines Sturzbrand-Stückholzkessels [Fröling, 2009]

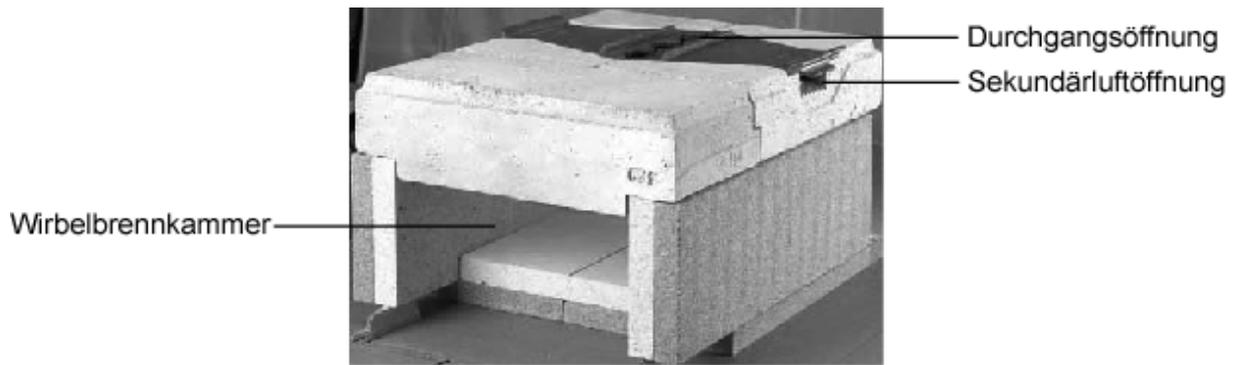


Abbildung 3.4 Beispiel für Füllschachtboden mit Durchgangsöffnung für die Brenngas in die darunterliegende Brennkammer [ETA, 2008]

Die geometrische Gestaltung im weiteren Verlauf der Durchgangsöffnung (nach der Sekundärluftzugabe) ist für eine intensive Durchmischung der Brenngase mit der Sekundärluft in der Brennkammer sehr wichtig. Dies kann z.B. durch eine Verjüngung der Durchgangsöffnung (Düseneffekt) erreicht werden, wie in Abbildung 3.5 beispielhaft dargestellt ist.

Durch die zylindrische (siehe Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3) oder rechteckige Bauform (siehe Abbildung 3.4) der Brennkammer werden heiße Gaswirbel erzeugt, so dass eine heiße Zone mit sehr guter Durchmischung entsteht. Aufgrund der sehr hohen Temperaturen, die bis ca. 1.000 °C erreichen können, kommen auch hier Feuerfestmaterialien wie Schamotte, Feuerbetone, Lava Tone oder Keramikfasermaterialien und Feuerfestmaterialien aus Siliziumcarbid zum Einsatz.

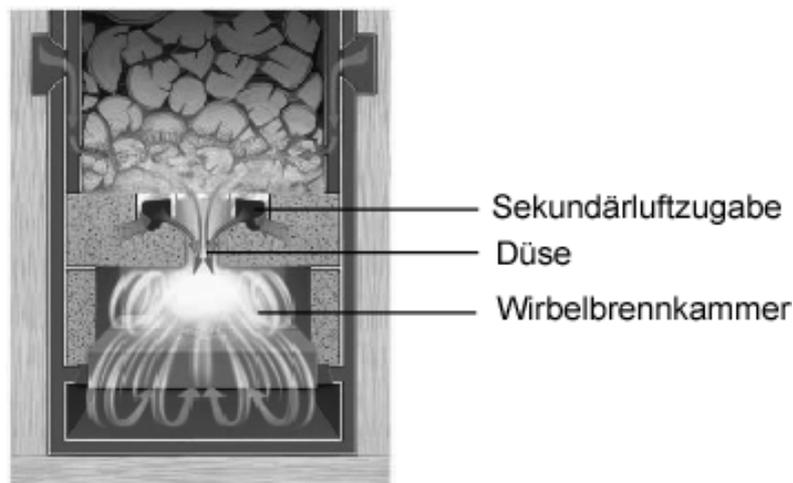


Abbildung 3.5 Geometrische Gestaltung der Durchgangsöffnung zur Brennkammer eines Stückholzkessels nach dem Sturzbrandprinzip [Hoval, 2007]

Manche Hersteller versuchen durch eine horizontale Zweiteilung der Brennkammer die Verweilzeit der Brenngase deutlich zu erhöhen (vgl. Abbildung 3.3 gegenüber Abbildung 3.2). Eine weitere Möglichkeit, eine Vermischung der Brenngase mit der Sekundärluft zu erreichen, beruht auf einer Art Brennerprinzip. Hierbei erfolgt die Vermischung direkt beim Zusammentreffen der beiden Gasströme (Brenngas und Sekundärluft) und nicht in der Nachbrennkammer. Dieses Prinzip wird derzeit, soweit bekannt, von einem Hersteller angewandt,

was eine keramikfreie Konstruktion der Nachbrennkammer ermöglicht, so dass diese auch als herausnehmbare Aschelade verwendet werden kann (siehe Abbildung 3.6).



Abbildung 3.6 Keramikfreie Sekundärbrennkammer und Wirbelkammerbrenner [Künzel, 2009]

Die Wärmeabgabe der heißen Verbrennungsgase an das Heizwasser erfolgt dann im anschließenden Wärmetauscher. In Rohrwärmetauschern sorgen Einbauten (bezeichnet z.B. als Wirbulatoren oder Turbulatoren), die gleichzeitig zur Reinigung der abgasseitigen Wärmetauscherflächen dienen, für hohe Wirkungsgrade (Abbildung 3.7).

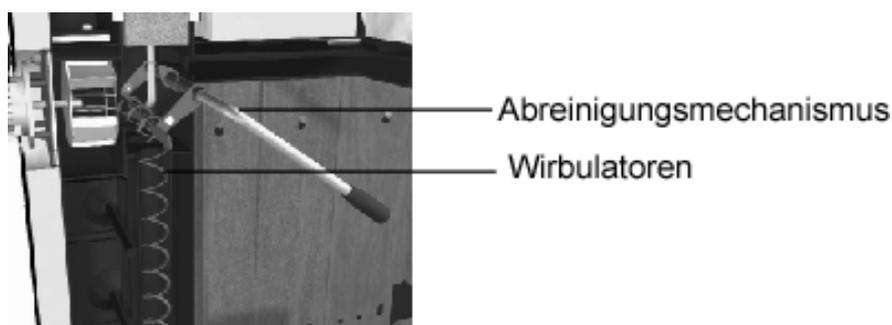


Abbildung 3.7 Wärmetauscher mit Wirbulatoren eines Stückholzkessels [Fröling, 2009]

3.2 Stückholzkessel mit seitlichem Abbrand

Als weiteres häufig eingesetztes Feuerungsprinzip kommt der seitliche Abbrand zum Einsatz, wobei die Brenngase seitlich in die Sekundärkammer geleitet werden (Abbildung 3.8).

Die Primärluftzuführung erfolgt über seitliche Öffnungen im Füllraum und von unten über einen Rost. Sekundärluft wird im Übergang zur Sekundärkammer beigemischt. Abhängig von der Füllraumgeometrie (Länge x Breite) ist die Sekundärkammer seitlich (Abbildung 3.8 und

Abbildung 3.9) oder rückseitig (Abbildung 3.10) angeordnet. Wobei es stehende und liegende Ausführungen gibt.

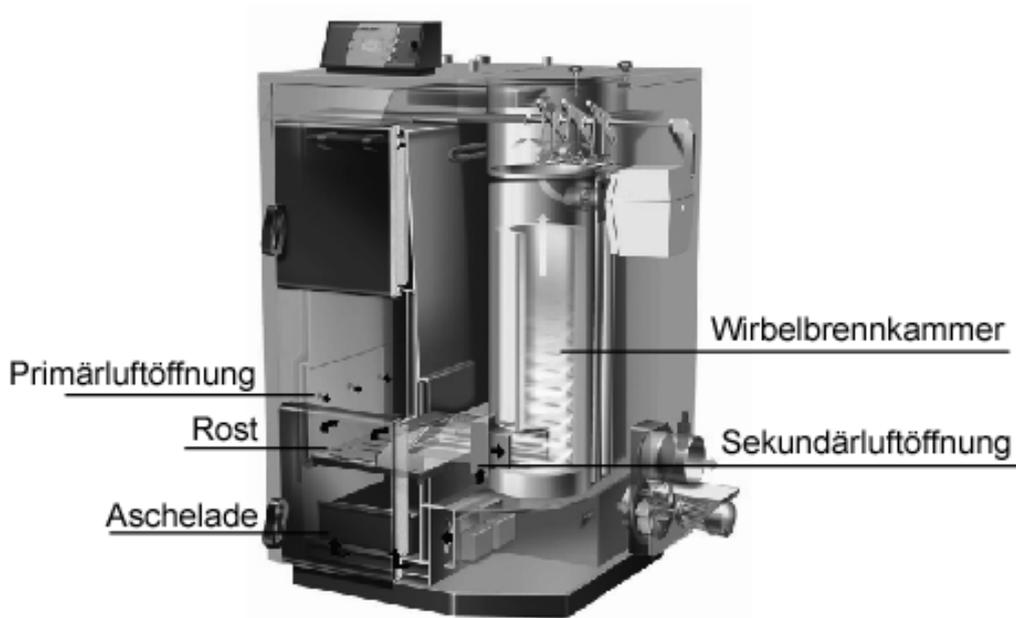


Abbildung 3.8 Aufbau eines Stückholzkessels mit seitlichem Abbrand (stehende Sekundärbrennkammer) [Arca, 2009]

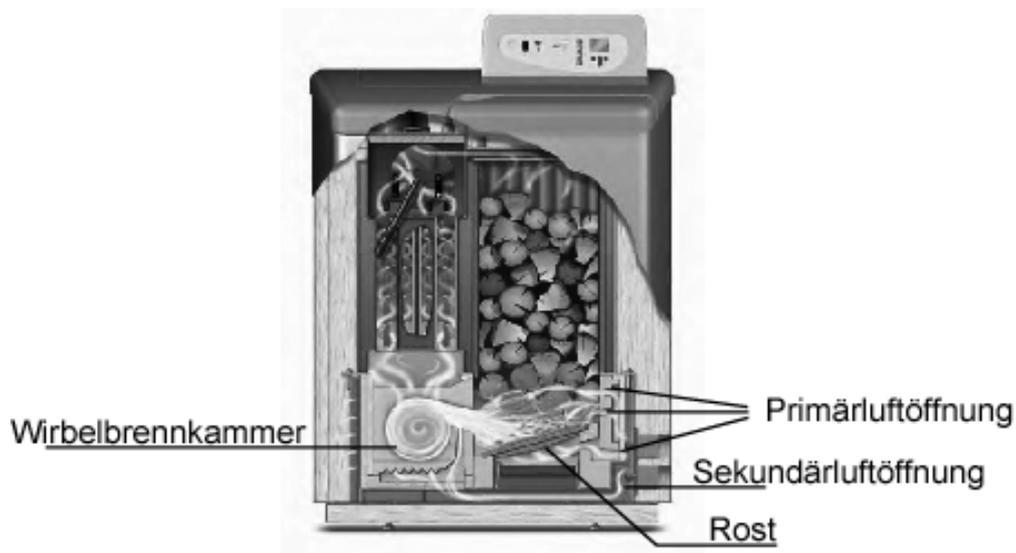


Abbildung 3.9 Aufbau eines Stückholzkessels mit seitlichem Abbrand (liegende Sekundärbrennkammer) [Guntamatik, 2009]

Im Gegensatz zum Feuerungsprinzip mit unterem Abbrand (Sturzbrand) unterstützt der Rost beim seitlichen Abbrand (Primärluft von unten) aktiv den Holzkohleausbrand. Für ein besonders heißes und reaktives Glutbett haben manche Hersteller den Stahlrost weiterentwickelt und mit keramischen Bauteilen versehen (Abbildung 3.10).

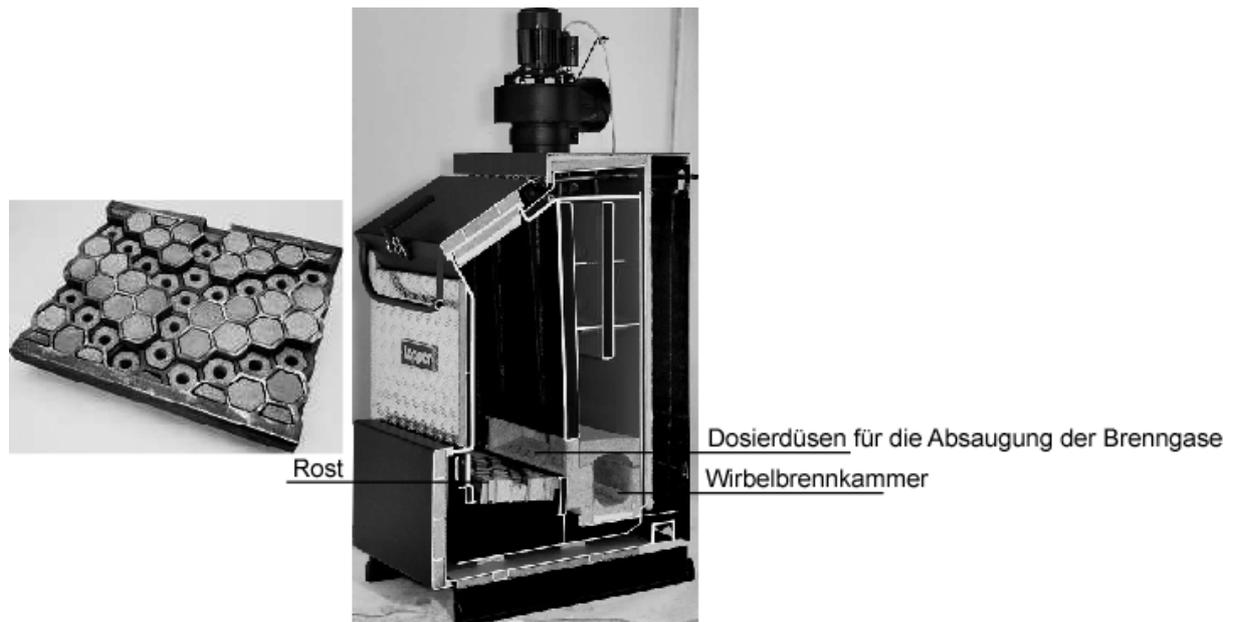


Abbildung 3.10 Aufbau eines Stückholzkessels mit seitlichem Abbrand (liegende Sekundärbrennkammer) und keramischem Wabenrost [Lopper, 2004]

3.3 Geometrische Abmessungen von Stückholzkesseln

Typische geometrische Abmessungen von Stückholzkesseln im Leistungsbereich zwischen 20 kW und 30 kW und von einzelnen Bauteilen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1 Typische geometrische Abmessungen von Stückholzkesseln im Nennwärmeleistungsbereich von 20-30 kW

	Kesselabmessungen [cm]			Gewicht [kg]	spezifisches Füllschachtvolumen [l/kW]	spezifisches Kesselwasservolumen [l/kW]
	Höhe	Breite	Tiefe			
Mittelwert	143	71	111	573	5,6	4,8
Min-Wert	106	55	83	300	3,1	2,6
Max-Wert	163	104	142	770	8,8	9,8

Abhängig vom Feuerungsprinzip unterscheiden sich die Stückholzkessel in ihrer Geometrie, wobei Stückholzkessel nach dem Sturzbrandprinzip eher höher und Stückholzkessel mit seitlichem Abbrand eher breiter sind. Letztendlich müssen die geometrischen Abmessungen eines Stückholzkessels so gestaltet werden, dass Engstellen im Haus und schmale Türen problemlos passiert werden können. Das Füllschachtvolumen ist hauptverantwortlich für die Brenndauer des Stückholzkessels und damit mitentscheidend für einen großen Heizungskomfort. Die Grundfläche des Füllschachtes wird nach der maximal einfüllbaren Holzlänge ausgelegt. Unterschieden wird im betrachteten Nennwärmeleistungsbereich zwischen 33 cm und 50 cm langen Holzscheiten. 86% der Stückholzkessel im Leistungsbereich 20-30 kW sind für die Verbrennung von 50 cm Holzscheiten dimensioniert [FNR-Marktübersicht, 2007]. Typische spezifische Volumina für Wirbelnachbrennkammern liegen zwischen 370 cm³/kW und 470 cm³/kW.

4 Emissionen bei der Verbrennung von Holz in Stückholzkesseln

Bei der Verbrennung von Holz in Stückholzfeuerungen ändern sich die Emissionskonzentrationen im Abgas im Zuge eines Abbrandes einer Holzcharge sehr stark. In Abbildung 4.1 ist ein charakteristischer Verlauf eines Chargenabbrandes dargestellt, wobei sich die verschiedenen Abbrandphasen in einer Stückholzfeuerung anhand der CO- und CO₂-Konzentrationsverläufe erkennen lassen. Die zeitliche Länge und die Emissionshöhe der einzelnen Phasen sind exemplarisch zu verstehen und können je nach Stückholzkessel, auf-gegebene Brennstoffqualität und Betriebsbedingungen unterschiedlich lang und ausgeprägt sein.

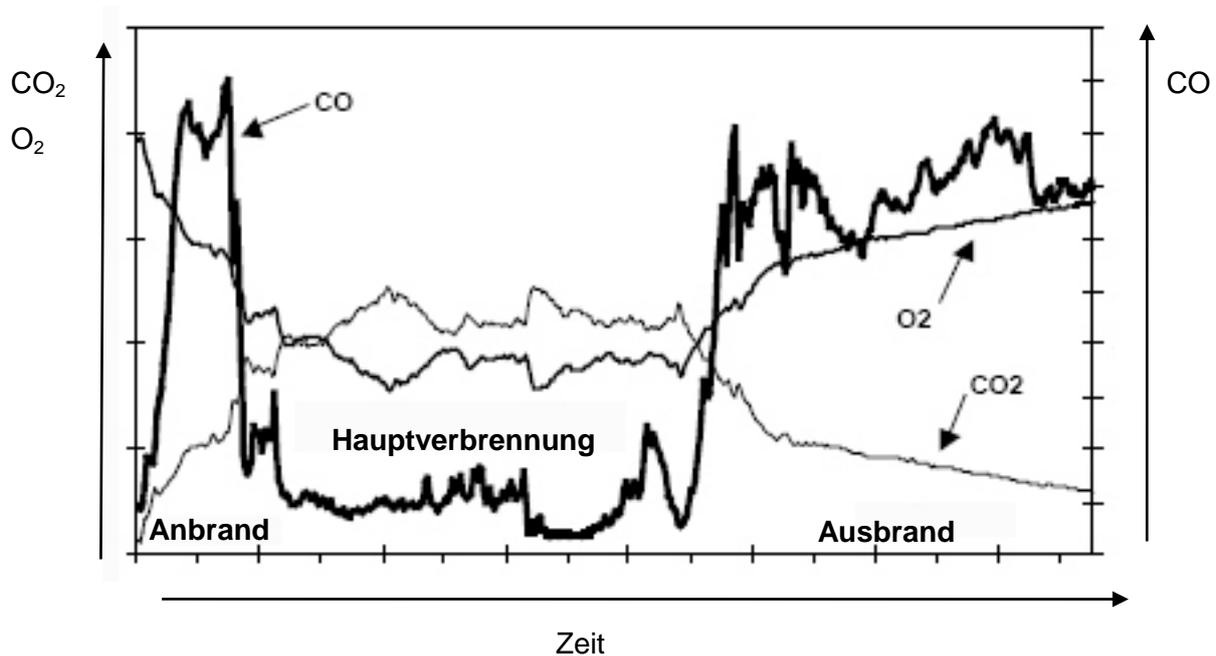


Abbildung 4.1 Exemplarischer Chargenabbrand einer Stückholzfeuerung mit verschiedenen Verbrennungsphasen [Zuberbühler, 2002]

Grundsätzlich unterscheidet man bei Stückholzfeuerungen die Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand. Hauptursache für die hohen Emissionen beim Anbrand und Ausbrand ist die zu niedrige Flammentemperatur und bei der Ausbrandphase noch der Wechsel von der Gasphasen- zur Feststoffverbrennung (reiner Holzkohleabbrand). Während der ungestörten stationären Hauptverbrennungsphase im Volllastbetrieb (bei Nennwärmeleistung) weist eine Stückholzfeuerung unter günstigen Randbedingungen (z.B. Verwendung guter Brennstoffqualitäten, technisch einwandfreier Zustand der Anlage, guter Wartungszustand) ihr niedrigstes Emissionsniveau auf, da hier optimalste Verbrennungsbedingungen gegeben sind.

Abweichend davon kann es während der Hauptverbrennungsphase zu erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung kommen (Tabelle 4.1). Dies ist z.B. der Fall, wenn die Feuerung zur Leistungsanpassungen auf einen veränderten Wärmebedarf reagiert, so dass die Stückholzfeuerungen gewisse Teillastpunkte anfährt oder gar in einen Gluthaltbetrieb schaltet, auch hier ist die sinkende Flammentemperatur maßgebend für erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung. Zum anderen kann es aber auch

zu Störungen - bedingt durch das Hohlbrandphänomen, Holzaufgabe des Betreibers oder schwankende Brennstoffeigenschaften - während der Hauptverbrennungsphase kommen.

Tabelle 4.1 Verbrennungsphasen einer Stückholzfeuerung und charakteristisches Emissionsniveau

Verbrennungsphase	Emissionen
Anbrand	hohe Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen hohe Feinstaubkonzentrationen (besonders organische Stäube)
Hauptverbrennung	
- Volllast	niedrige Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen mittlere Feinstaubkonzentrationen (anorganische Stäube)
- Teillast	mittlere Kohlenmonoxid- und niedrige Kohlenwasserstoffkonzentrationen niedrige Feinstaubkonzentrationen (anorganische Stäube)
- Gluthalteinbetrieb bzw. Anfahren aus Gluthalteinbetrieb	hohe Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen hohe Feinstaubkonzentrationen (besonders organische Stäube)
- Störungen (Hohlbrand, Holzaufgabe, schlechte Brennstoffqualität)	hohe Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen hohe Feinstaubkonzentrationen (besonders organische Stäube)
Ausbrand	hohe Kohlenmonoxidkonzentrationen niedrige Feinstaubkonzentrationen (anorganische Stäube)

Das Emissionsniveau moderner Stückholzfeuerungen unterscheidet sich in Abhängigkeit der Art und Weise, wie die Abbrandversuche zur Ermittlung des Emissionsverhaltens der Kessel durchgeführt werden. Daher wurden verschiedene Datenquellen ausgewertet und gegenübergestellt. Als Datengrundlage dienen die Prüfstandwerte der Normprüfung nach DIN-EN 303-5 für die Stückholzfeuerungen, die Inbetriebnahmemessungen der Schornsteinfeger nach 1. BImSchV sowie eigene Messungen eines simulierten Praxisbetriebs. Entscheidend für die Vergleichbarkeit und Beurteilung der Emissionswerte aus den vorliegenden Datenquellen ist die Versuchsdurchführung und die Betriebsweise der Stückholzfeuerungen während der Messungen:

- **Messungen nach DIN-EN 303-5**

Im Rahmen der Normprüfung nach DIN-EN 303-5 werden Messungen bei Nennwärmeleistung und im Teillastbetrieb des Stückholzkessels durchgeführt. Vor Messbeginn schreibt die Prüfnorm ein Vorheizen des zu prüfenden Kessels von mindestens 3 Stunden bei Nennwärmeleistung vor. Die Mittelwertbildung der gasförmigen Emissionen erfolgt bei Nennwärmeleistung über zwei komplette Abbrände, im Teillastbetrieb wird über einen Abbrand gemittelt. Für einen Kessel mit 22 kW Nennwärmeleistung mit einem Füllschachtvolumen von 145 Litern ergibt sich demnach eine Messzeit bei Nennwärmeleistung von bis zu 16 h und nochmals 16 h im Teillastbetrieb. Der Staubgehalt wird über mehrere Halbstundenmittelwerte bestimmt. Die Emissionswerte werden getrennt nach Leistung für den ungestörten Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung bzw. Teillast angegeben. In Abbildung 4.2 ist der Emissionsverlauf einer solchen Prüfstandmessung im ungestörten Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung dargestellt. Leis-

tungsregelvorgänge, Anbrand- und Ausbrandphase, sowie erhöhte Emissionen durch Verbrennungsstörungen, wie z.B. Hohlbrände, werden nicht erfasst oder sind aufgrund der langen Mittelungszeiten nicht von Bedeutung.

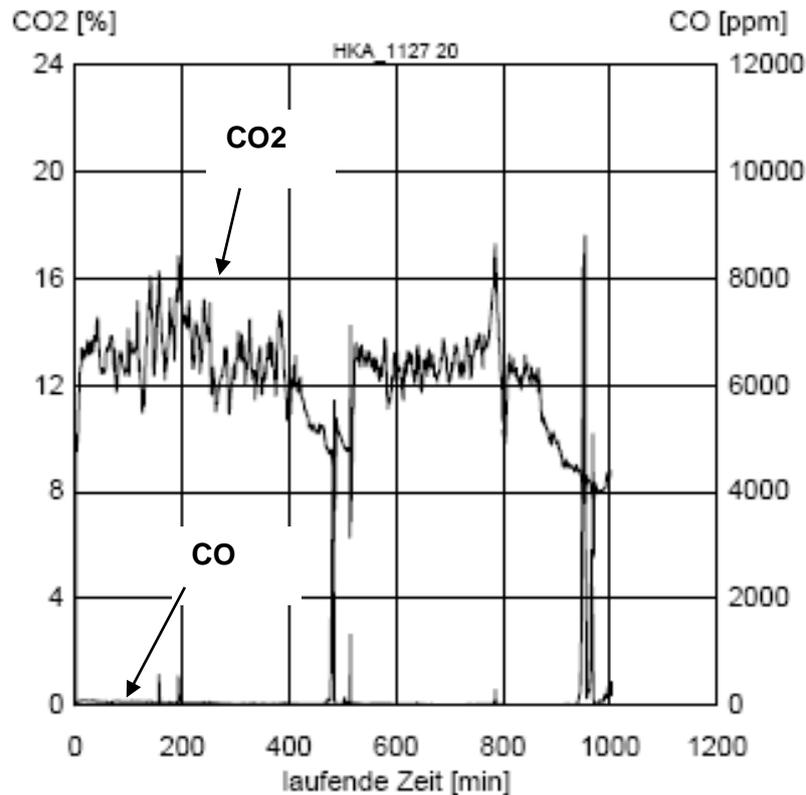


Abbildung 4.2 Zeitlicher Verlauf der CO₂- und CO-Konzentrationen im Abgas bei der Normprüfung einer Stückholzfeuerung nach DIN-EN 303-5 [BLT Wieselburg, 2004]

- **Inbetriebnahmemessungen der Schornsteinfeger**

Überwachungsmessungen nach 1. BImSchV sind bei Stückholzkesseln bei Nennwärmeleistung im ungestörten Dauerbetrieb durchzuführen. Der Beginn der Emissionsmessung soll 5 Minuten nach Aufgabe der maximal möglichen Brennstoffmenge auf ein für die Entzündung ausreichendes Glutbett erfolgen. Die Mess- und Mittelungszeit beträgt 15 Minuten. Aufgrund den Gegebenheiten vor Ort an den installierten Anlagen ist davon auszugehen, dass die Emissionswerte z.T. auch andere Verbrennungsphasen wie Anbrand, Teillast und Verbrennungsstörungen (Hohlbrände) mit beinhalten, welche aufgrund der kurzen Mess- und Mittelungszeit den Emissionsmittelwert der Feuerung deutlich beeinflussen können.

- **Praxisnahes Betriebsverhalten**

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit wurde das Emissionsverhalten einer Stückholzfeuerung unter praxisnahen Bedingungen untersucht. Hierzu wurde die Stückholzfeuerung in verschiedenen Versuchsreihen mit bzw. ohne Pufferspeicher be-

trieben und anhand verschiedener Heizlastkurven (kalter Wintertag, mittlerer Wintertag und milder Wintertag) ein Verbraucher simuliert. In Abbildung 4.3 ist hierzu ein Beispiel für die Verläufe der CO₂-, CO- und VOC-Konzentrationen für den Stückholzkessel mit 1.500 l Speicher für die Heizlastkurve Wintertag 'kalt' dargestellt. Der Heizenergiebedarf wurde hierbei durch die Aufgabe von zwei Holzchargen gedeckt [Struschka et al., 2004].

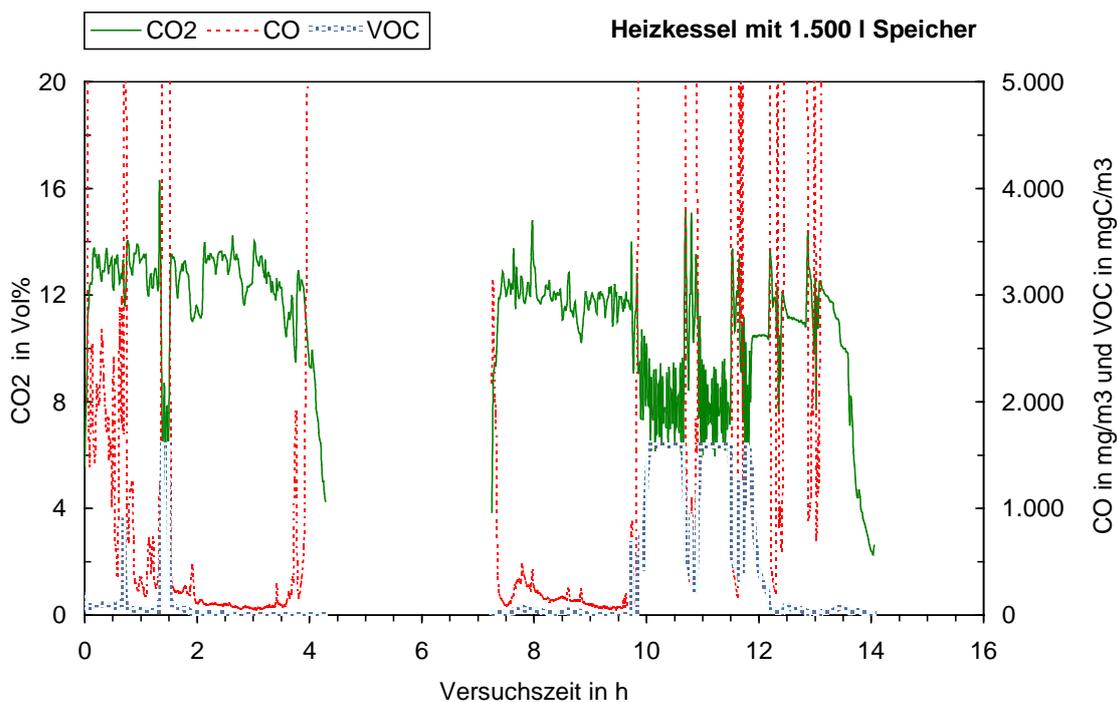


Abbildung 4.3 Gemessene Konzentrationsverläufe beim Heizbetrieb Wintertag 'kalt' für einen Stückholzkessel mit 1.500 l Speicher (Brennstoff Buchenscheitholz, Holzaufgabemenge insgesamt 73 kg) [Struschka et al., 2004]

Beim Betrieb des Kessels mit Pufferspeicher kann die Feuerungsleistung über längere Zeiten konstant auf hohem Niveau gehalten werden, solange Überschusswärme in den Pufferspeicher gefahren werden kann. Dies war vollständig im ersten Abbrand und einige Zeit im zweiten Abbrand möglich. Höhere CO- und VOC-Emissionen beim ersten Abbrand traten durch den Anbrenn- und Aufwärmvorgang des Kessels und im weiteren Verlauf durch Störungen im Verbrennungsablauf (wahrscheinlich durch Vorgänge der Verbrennungsregelung oder geringfügige Brückenbildung im Füllraum) auf. Nach rund 1,5 h Feuerungsbetrieb erfolgte eine kurze Kesselabschaltung, da die obere Grenze der Kesselwassertemperatur erreicht wurde. Beim zweiten Abbrand war nach einer Feuerungszeit von rund 2 Stunden der Pufferspeicher nahezu aufgeladen. Dies führte zu längeren Betriebszeiten des Kessels im Gluthaltemodus.

Die so gewonnen Emissionswerte spiegeln das reale Emissionsverhalten einer Stückholzfeuerung wieder, da sie eine nahezu alle Verbrennungsphasen aus Tabelle 4.1 beinhalten.

Die anhand der beschriebenen Datenquellen berechneten Emissionsmittelwerte im Abgas von Stückholzfeuerungen sind in Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 für die Kohlenmonoxid- und Staubkonzentration gegenübergestellt.

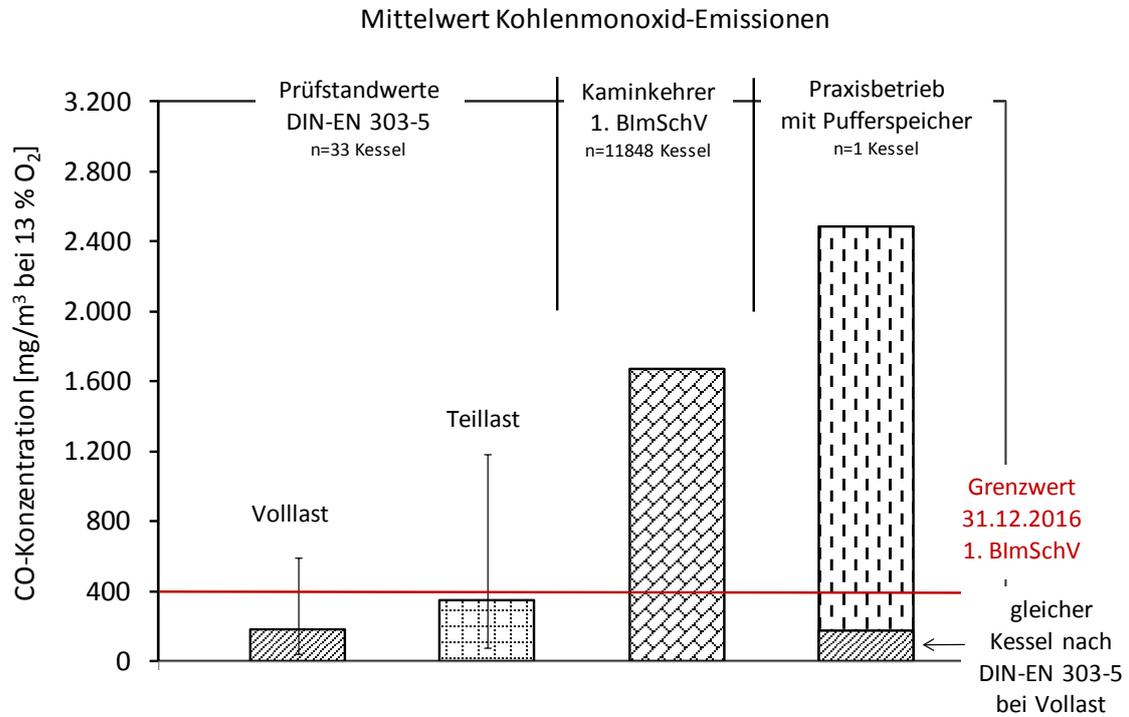


Abbildung 4.4 Mittelwert der Kohlenmonoxidkonzentrationen von Stückholzkesseln nach unterschiedlichen Datenquellen

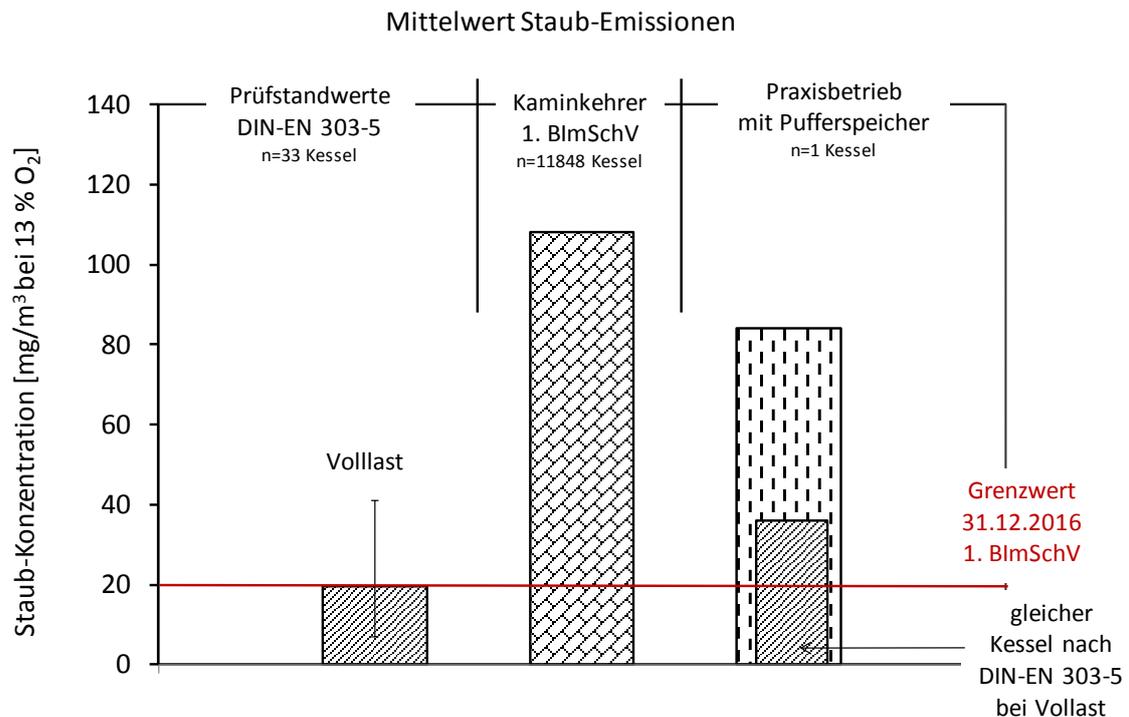


Abbildung 4.5 Mittelwert der Staubkonzentrationen von Stückholzkesseln nach unterschiedlichen Datenquellen

Die Prüfstandwerte nach DIN-EN 303-5 zeigen, dass der emissionstechnische Stand moderner Stückholzfeuerungen schon sehr weit fortgeschritten ist. Eine Vielzahl der zugelassenen Kessel weisen niedrige Emissionen im reinen Volllastbetrieb unter stationären Bedingungen auf. Was die gasförmigen Emissionen (CO-Emissionen) angeht, kann der geforderte Grenzwert der Stufe 2 der 1. BImSchV (gilt für Neuanlagen für Stückholz ab 1.1.2017) zumindest auf dem Prüfstand sicher eingehalten werden. Allerdings verursachen bereits geringe Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt einer Feuerung, wie dies z.B. im Teillastbetrieb der Fall ist (niedrigere Verbrennungstemperaturen, veränderte Strömungsverhältnisse), erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung (vgl. Abbildung 4.4). Dies zeigen auch die Messergebnisse der Schornsteinfeger oder des simulierten Praxisbetriebs.

Kritischer stellt sich die Situation bei den partikelförmigen Emissionen dar. Der Mittelwert der Staubkonzentration unter Prüfstandsbedingungen fällt genau mit dem geforderten Grenzwert der Stufe 2 zusammen. Es ist daher unsicher, ob die Stückholzkessel nach dem heutigen Stand der Technik die Überwachungsmessungen der Schornsteinfeger nach 1. BImSchV einhalten können.

Demzufolge ist vor allem im Praxisbetrieb mit instationären Betriebsanteilen ein erhebliches Minderungspotential bezüglich der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung (CO, VOC und Staub) bei Stückholzkesseln vorhanden. Bei der Entwicklung von neuen Konzepten für einen emissionsarmen Stückholzkessel genügt es deshalb nicht, den Verbrennungsprozess unter stationären Bedingungen isoliert zu betrachten und zu optimieren, es müssen auch die in der Praxis gegebenen Randbedingungen und damit alle Verbrennungsphasen (vgl. Tabelle 4.1) in eine Konzeptentwicklung mit einbezogen werden.

Als Ursache für eine unvollständige Verbrennung mit erhöhten Emissionen kommen vereinfacht folgende Möglichkeiten in Frage:

- Stofftransport durch Turbulenz:
 - unzureichende Vermischung von Pyrolysegasen mit Sauerstoff und/oder Strahlenbildung
- Reaktionskinetik:
 - zu niedrige Flammentemperatur
 - zu kurze Verweilzeit in der heißen Zone
 - breites Verweilzeitspektrum
 - Temperaturqueneffekte an kalten Wänden oder durch Einmischung kalter Luft bzw. Abgase in die Flamme.

Um eine optimierte Stückholzfeuerung robuster gegenüber Verbrennungsphasen mit unzureichender Reaktionskinetik zu gestalten; ist die minimale Reaktionstemperatur in der Reaktionszone, bei welcher die Reaktionskinetik ausreichend schnell abläuft, abzusenken. Dies kann nur durch eine Verbesserung der Mischungsqualität von brennbaren Gasen und Verbrennungsluft erreicht werden. In einer heißen Brennkammer mit Verbrennungstemperaturen über 850 °C laufen die Reaktionen sehr schnell ab, so dass in der Regel die Mischungsqualität für eine vollständige Verbrennung limitierend ist. Dies hat zur Folge, dass eine Verbesserung der Verbrennung im stationären Volllastbetrieb nur noch durch eine optimierte Vermischung erreicht werden kann. Außerdem ermöglicht die Verbesserung der Mischungsqualität

die Entwicklung einer kompakteren Brennkammer. Die Vorteile einer verbesserten Mischungsqualität der Pyrolysegase mit der Sekundärluft und die zu erwartenden Emissionsminderungspotentiale sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Für die Konzeptentwicklung einer Sekundärbrennkammer mit optimierter Vermischung können die Vorgänge mittels CFD (Computational Fluid Dynamics) simuliert werden. Nur so lassen sich Strömung, Turbulenz, ggf. auch Verbrennung, Temperaturverteilung, Verweilzeiten und Mischungseffizienz anschaulich visualisieren und eine optimale Konstruktion detektieren.

Im reinen Volllastbetrieb emittieren moderne Stückholzkessel nach dem Stand der Technik bereits sehr niedrige Staubemissionen. Da diese Feinstaubpartikel größtenteils anorganischen Ursprungs sind, ist mittels optimierter Verbrennung hier kaum noch eine Minderung zu erwarten. Dies kann nur noch über eine Feinstaubfilterung bzw. im gewissen Maße über eine optimierte Strömungsführung und eine Vergleichmäßigung der Brennstoffbetttemperatur erreicht werden.

Tabelle 4.2 Verbrennungsphasen einer Stückholzfeuerung und Einschätzung der Emissionsminderungspotentiale durch eine optimierte Verbrennung

Verbrennungsphase	Beschreibung der Vorteile	CO	VOC	org. Staub
Anbrand	deutliche Verkürzung der Anbrennzeiten durch Reduzierung der minimalen Reaktionstemperatur und kompaktere Bauweise (schnelleres Aufheizen)	++	++	++
Hauptverbrennung				
- Volllast	stabilerer Betrieb bei kurzzeitigen Schwankungen und verbesserte Verbrennung durch intensive Vermischung	+	+	o
- Teillast	Reduzierung der Flammtemperatur wird durch verbesserte Vermischungsqualität kompensiert	++	++	o
- Gluthaltebetrieb	kurze Start- und Stabilisierungsphasen nach einem Gluthaltebetrieb	+	+	+
- Störungen (Holzauf-lage, Brennstoffqua-lität)	kurze Start- und Stabilisierungsphasen nach der Brennstoffauf-lage und robuster bei schwankender Brennstoffqualität	+	+	+
Ausbrand	Verkürzung der Ausbrandzeiten durch Reduzierung der minimalen Reaktionstemperatur	o	o	o

- ++ großes Emissionsminderungspotential
- + mittleres Emissionsminderungspotential
- o geringes Emissionsminderungspotential

Eine Minderung der Hohlbrandanfälligkeit muss bei der Umsetzung eines optimierten Stückholzkessels ebenfalls Bestandteil der Entwicklungsarbeiten sein. Allerdings sind mögliche Maßnahmen zur Vermeidung dieses Phänomens bei Stückholzfeuerungen weit schwieriger zu finden, da die genauen Ursachen aus wissenschaftlicher Sicht nicht ausreichend erforscht und bekannt sind.

Auch lässt sich dieser Vorgang mittels CFD bisher nicht simulieren, auch experimentell ist es schwierig, diese Zustände reproduzierbar und zuverlässig einzustellen. Somit ist die Ursachenforschung grundsätzlich zeitaufwändig, weshalb dieses Phänomen bisher nicht systematisch untersucht wurde. Es wird aber vermutet, dass eine ungleichmäßige Temperaturverteilung über dem Rost oder Füllschachtboden als mögliche Ursache in Frage kommt, so dass der Brennstoff unterschiedlich schnell entgast und sich so Hohlräume bilden. In der Entgasungszone einer optimierten Stückholzfeuerung ist daher eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone anzustreben.

Allerdings wird in der Praxis unter Umständen bei einer Brennstofffüllung Holz unterschiedlicher Feuchte, unterschiedlicher Holzart (Fichte, Buche usw.) und mit morphologisch unterschiedlichen Eigenschaften (Rundholz, gespaltenes Holz, große und kleine Holzstücke) verwendet. Auch die Art und Weise wie der Brennstoff eingeschichtet wird, ist sehr betreiber-spezifisch. Unter solchen Bedingungen ist die Entstehung eines Hohlbrandes mit erhöhten Emissionen, aufgrund der unterschiedlichen Entgasungsgeschwindigkeit, vorprogrammiert. Somit reicht eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung nicht aus, es muss vielmehr auch eine mechanische Vorrichtung (z.B. beweglicher Rost) in Betracht gezogen werden, um entstandene Hohlräume automatisch zu verdichten. Hierzu ist eine automatische Erkennung einer Hohlbrandsituation durch die Kesselregelung notwendig. Derartige Maßnahmen müssen letztendlich aber experimentell erprobt und nachgewiesen werden, sie können weder berechnet noch simuliert werden.

Ein neu konzipierter Stückholzkessel muss die Grenzwerte der 1. BImSchV der Stufe 2 für das Jahr 2017 bei den Betriebsbedingungen für die Normprüfung (nur stationäre Bedingungen bei konstanter Wärmeleistung, optimale Randbedingungen und fachgerechte Bedingung) deutlich unterschreiten. Im praktischen Betrieb bei den Betriebsbedingungen für die Schornsteinfegermessungen (Randbedingungen der Praxis mit nicht genau definierten Brennstoffqualitäten, mehr oder weniger ungestörtem Dauerbetrieb, u.U. mit nicht optimaler Installation, hydraulischer Abstimmung des Systems und Einstellung der Kesselregelung) sind die Grenzwerte sicher zu unterschreiten. Diese liegen für CO bei $0,4 \text{ g/m}^3$ und für Staub bei $0,02 \text{ g/m}^3$ (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂). Außerdem muss der neu konzipierte Heizkessel so aufgebaut sein, dass auch im praktischen Heizbetrieb mit instationären Betriebszuständen eine Grenzwertüberschreitung, wenn überhaupt, nur kurzzeitig und nur in geringem Umfang stattfindet. In der Regel sollen auch bei diesen ungünstigen Betriebsbedingungen die Grenzwerte merklich unterschritten werden. Diese hohen Ziele können nur erreicht werden, wenn das Gesamtsystem, bestehend aus Kessel, Regelung, Sensorik optimiert wird. Die Zielwerte für CO, VOC und Staub für die Neuentwicklung des Stückholzkessels sind in Tabelle 1 (siehe Einleitung und Zielsetzung des Projektes) aufgelistet.

Zusammengefasst soll der neu entwickelte Stückholzkessel in folgenden Punkten, gegenüber den besten marktverfügbaren Kesseln, erheblich verbessert werden:

- abgestimmtes und insgesamt optimiertes marktfähiges Gesamtkonzept bestehend aus Kessel, Regelung, Sensorik
- Reduzierung der Hohlbrandgefahr durch eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone (weniger Emissionsspitzen)
- Erhöhung der Mischungsgüte in der Nachbrennkammer durch optimierte Strömungsbedingungen (geringere Emissionen im Dauerbetrieb, bei Teillast und im praxisnahen Betrieb)

- schnelle Aufheizzeiten der Nachbrennkammer durch Verwendung von Bauteilen mit geringer Masse (kürzere Emissionsspitzen beim Kesselstart)
- Minderung des Luftüberschusses durch die angestrebten Verbrennungsverbesserungen (höherer feuerungstechnischer Wirkungsgrad).

Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich nahezu ausschließlich mit der verbrennungstechnischen Optimierung eines Stückholzkessels.

5 Konzeptentwicklung eines optimierten Stückholzkessels

Das Kesselkonzept des feuerungstechnisch optimierten Stückholzkessels beruht grundsätzlich auf dem Prinzip einer zweistufigen Verbrennung mit seitlichem Abbrand. Die Nennwärmeleistung des Stückholzkessels wurde, im Hinblick auf die verbesserten Dämmstandards von Einfamilienhäusern, auf ca. 18 kW festgelegt, die Teillast soll 50 % der Nennwärmeleistung betragen. Diese Leistungsklasse bietet auch Vorteile hinsichtlich der geforderten Pufferspeichergröße, welche in der 1. BImSchV mit min. 55 l/kW vorgeschrieben ist. Pufferspeicher dieser Größe mit ca. 1.000 l passen noch durch jede gängige Haus- bzw. Heizraumbtüren und sind daher aufgrund der Einbringmöglichkeit aber auch aufgrund des geringen Platzverbrauchs im Heizungskeller eine optimale Lösung. Die wichtigsten Eckdaten sind in Tabelle 5.1 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 5.1 Eckdaten für einen optimierten Stückholzkessel

KenngroÙe	Wert
Heizleistung	9 – 18 kW (Teillast – Volllast)
Brennstofflänge	30 cm
min. Pufferspeichergröße	1.000 l

Die Aufstellung des optimierten Stückholzkessel soll dem Heizungsbauer deutlich erleichtert werden. Hierzu ist ein modularer Aufbau des Stückholzkessels angedacht. Vom Prinzip stellt sich der Aufbau gemäß Abbildung 5.1 aus zwei Modulen mit jeweils charakteristischen Teilfunktionen dar. Dies ermöglicht dem Heizungsbauer die Module separat voneinander in den Heizungsraum einzubringen und erst vor Ort zu montieren.

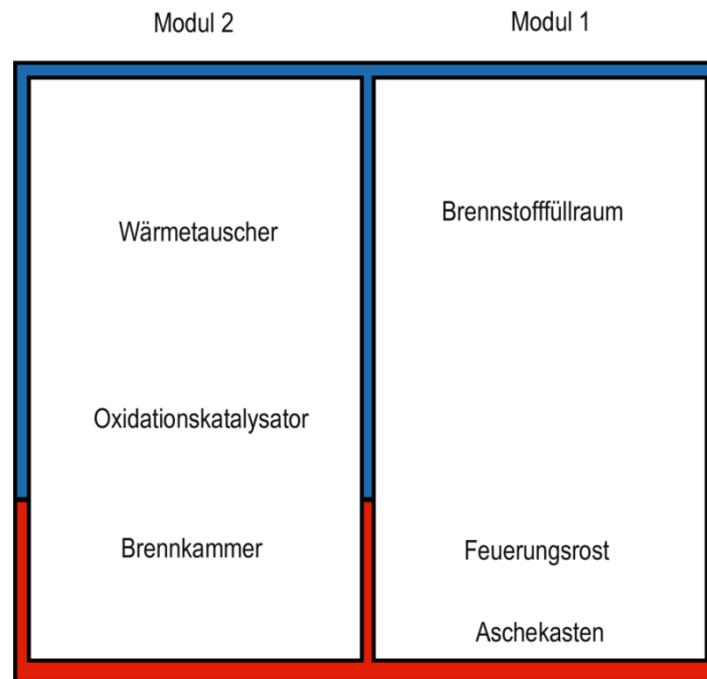


Abbildung 5.1 Schematische Darstellung des modularen Aufbaus eines optimierten Stückholzkessels, bestehend aus zwei Modulen mit den wichtigsten Teilfunktionen (rot: ungekühlt; blau: wassergekühlt)

5.1 Konzept Modul 1

In Modul 1 werden folgende Teilfunktionen erfüllt:

- **Brennstofffüllraum:** Dieser dient als Brennstoffreservoir und muss aus Komfortgründen ausreichen groß dimensioniert werden. Das Füllraumvolumen wurde auf 120 l festgelegt, so können ca. 33 kg Brennstoff pro Brennstofffüllung aufgegeben werden. Bei Nennwärmeleistung (NWL: 18 kW) ergibt dies eine Brenndauer von ca. 7 Stunden.
- **Aschekasten:** Der Aschekasten ist gemäß DIN-EN 303-5 so zu dimensionieren, dass eine Aschemenge von 12 Stunden Betriebszeit aufgenommen werden kann. Mit einem Volumen von ca. 6,8 l ist der Aschekasten 3-fach größer als gefordert und bietet somit für den Betreiber ausreichenden Komfort.
- **Feuerungsrost:** Bei klassischen Rostfeuerungsanlagen erfolgt die Primärluftzuführung ausschließlich durch den Rost. Für eine gleichmäßige Primärluftverteilung und der damit verbundenen gleichmäßigen Temperaturverteilung ist ein hohler Rost vorgesehen, durch welchen die Primärluft strömt und über Lochdüsen in den einzelnen Rostelementen verteilt wird. Neben der gleichmäßigen Primärluftverteilung über die gesamte Rostfläche hat dieses Konzept gleichzeitig den Vorteil einer Primärluftvorwärmung bzw. Kühlung des Rosts. Maßgebend für die Dimensionierung des Rosts ist die vorgesehene maximale Scheitholzlänge. Hieraus ergibt sich eine Grundfläche für den Rost von ca. 380 x 300 mm. In Abbildung 5.2 ist eine erste Version dieses Rosts abgebildet.

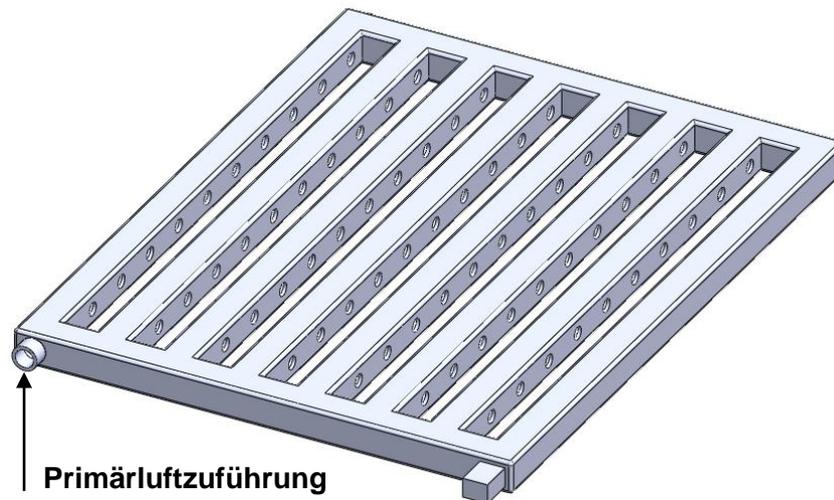


Abbildung 5.2 Feuerungsrost mit Lochdüsen zur Primärluftverteilung

Ein gewisser Nachteil einer solchen Rostausführung liegt in der Verschmutzungsgefahr des Rosts im inneren. Deshalb muss dieser in der Praxis aus dem Füllraum herausnehmbar sein, so dass eine Reinigung erfolgen kann. Als weiterer Nachteil sind an dieser Stelle höhere Produktionskosten zu nennen. Demgegenüber sollten jedoch die Vorteile einer gleichmäßigeren Primärluftverteilung überwiegen. Die Eckdaten dieser ersten Version des Rosts sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Hinsichtlich der Luftführung im Rost selbst besteht strömungstechnisch sicherlich noch Optimierungsbedarf. Es muss bei der Detailauslegung sichergestellt werden, dass die Austrittsgeschwindigkeit der Verbrennungsluft durch jede Lochdüse in etwa gleich groß ist.

Tabelle 5.2 Eckdaten des Feuerungsrostes

Kenngröße	Wert
Primärluftvolumenstrom (200°C; 44 % der Verbrennungsluft bei 18 kW NWL)	0,0071 m ³ /s
Lochaustrittsgeschwindigkeit	1 m/s
Lochdurchmesser	8 mm
Anzahl der Löcher	140
Abmessungen	300 x 380 mm

In Abbildung 5.3 ist der Stand des Konzepts für Modul 1 erkennbar. Im Füllraumboden ist der entnehmbare Aschekasten (1) positioniert. Darüber befindet sich der Feuerungsrost (2) mit den Lochdüsen für die Primärluftverteilung. Dieser ist auf der einen Seite beweglich gelagert, wobei über die zylindrische Lagerung der Primärluftstrom (6) von außen in den Rost gelangt (vgl. auch Abbildung 5.2). Besonderes Merkmal des Feuerungsrostes stellt die mechanische Vorrichtung zur Vermeidung von Hohlbränden dar. Hierzu soll die andere Seite des Feuerungsrostes auf Federn (4) gelagert werden. Über eine starre Verbindung des Rosts, mit einem sich außerhalb des Füllraums befindlichen Vibrationsmotor (5), soll dieser in vertikaler Richtung schwingfähig sein. Entstandene Hohlräume können somit beseitigt werden. Ob der

Vibrationsvorgang zyklisch erfolgen und/oder über einen Algorithmus ausgelöst werden soll, kann beim derzeitigen Projektstand nicht entschieden werden. Die Praxistauglichkeit und Wirksamkeit einer solchen Vibrationseinrichtung ist experimentell nachzuweisen und steht noch aus. Ein Alternativkonzept zur Vertikalen Bewegung des Rosts sieht an gleicher Stelle eine Art Nockenwelle vor, mittels derer der Rost angehoben und abgesenkt werden kann.

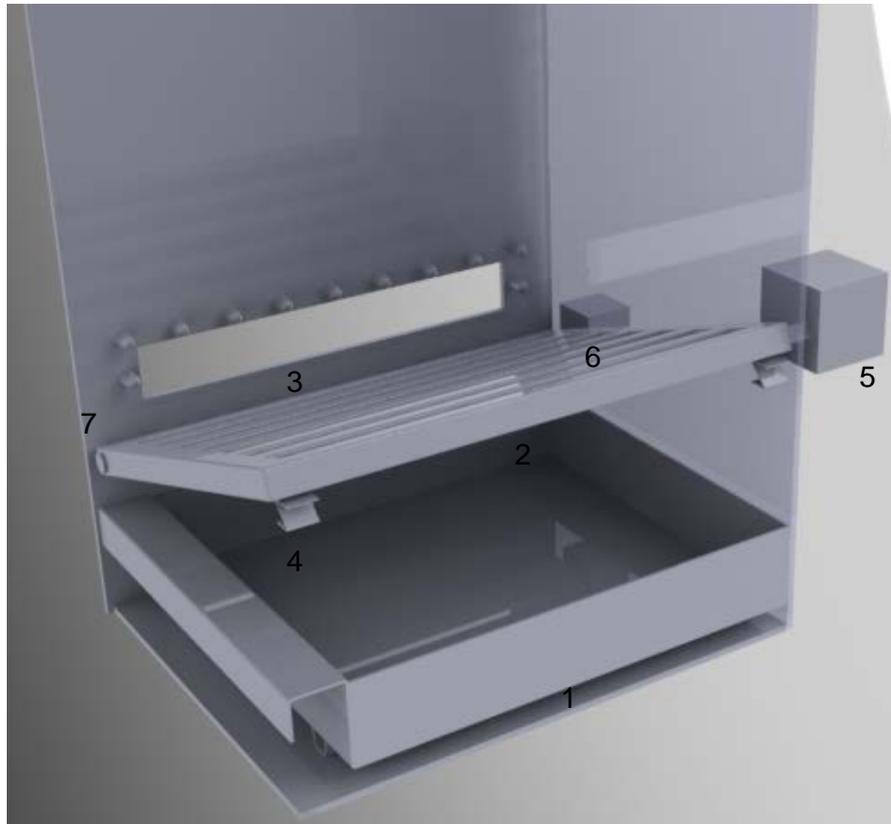


Abbildung 5.3 Konzept Modul 1 für die optimierte Stückholzfeuerung

Eine Schrägstellung des Rosts soll die Bewegungsrichtung des Holzes hin zur seitlichen Durchbrandöffnung (3) unterstützen. Um zu verhindern, dass die Durchbrandöffnung durch davorliegende Holzscheite blockiert wird, sind dort Abstandshalter (7) vorgesehen, welche den Übergang der Pyrolysegase in die Brennkammer sicherstellen. Im Bereich der Glutzone über dem Rost sollen die Kesselwände mit Schamotte ausgekleidet werden.

5.2 Konzept Modul 2

Wie bereits beschrieben ist es das Ziel, die Vermischungsqualität der Pyrolysegase mit der Sekundärluft in der Brennkammer gegenüber dem Stand der Technik maßgeblich zu verbessern, für

- eine optimierte Oxidation brennbarer Gase und Feststoffe
- eine Verbrennung bei tiefem Luftüberschuss mit hohem feuerungstechnischen Wirkungsgrad
- eine optimierte Oxidation der brennbaren Gase auch bei Teillast oder schwankender Brennstoffqualität.

Das Konzept für Modul 2 wird sich daher zunächst ausschließlich auf die Entwicklung einer optimierten Brennkammer konzentrieren. Als erster Schritt ist es von Bedeutung, die Strömung bzw. die Mischungsqualität einer Brennkammer nach dem Stand der Technik zu betrachten und damit eine Referenz zu schaffen. Hierzu wurde die Strömung in einer Brennkammer einer Stückholzfeuerung nach dem Stand der Technik mittels CFD (Computational Fluid Dynamics), ohne chemische Reaktionen (Verbrennung), simuliert. Nach dem Eintritt der Sekundärluft in die Pyrolysegase mischen sich diese Teilströme mehr oder weniger schnell. Bei einer vollständigen Vermischung hat sich unter wärmedichten Bedingungen (keine Wärmedurchgänge durch die begrenzenden Bauteile) die adiabate Mischtemperatur T_m eingestellt:

$$T_m = \frac{V_{sec} \times c_{sec} \times T_{sec} + V_{pyr} \times c_{pyr} \times T_{pyr}}{V_{sec} \times c_{sec} + V_{pyr} \times c_{pyr}} \quad \text{Formel (1)}$$

mit: T_m adiabate Mischtemperatur
 V_{sec} Volumenstrom Sekundärluft
 T_{sec} Temperatur Sekundärluft
 c_{sec} spezifische Wärmekapazität Sekundärluft
 V_{pyr} Volumenstrom Pyrolysegase
 T_{pyr} Temperatur Pyrolysegase
 c_{pyr} spezifische Wärmekapazität Pyrolysegase.

Somit kann eine erste Quantifizierung der Mischung der Pyrolysegase mit der Sekundärluft in einer Brennkammer über die adiabate Mischtemperatur erfolgen. In Tabelle 5.3 sind die Kenngrößen, welche für die Strömungssimulation berechnet bzw. angenommen wurden, angegeben.

Abbildung 5.4 zeigt die CFD-Simulation zur Visualisierung der Strömung mittels Strömungslinien in einer Brennkammer einer Stückholzfeuerung gemäß dem Stand der Technik.

Tabelle 5.3 Kenngrößen zur Strömungssimulation einer Brennkammer nach dem Stand der Technik

Kenngröße	Wert
Heizleistung	30 kW
Wirkungsgrad	86 %
Luftüberschußzahl	1,75
Sekundärluftvolumenstrom bei 100 °C	42,8 m ³ /h
Pyrolysegasvolumenstrom bei 800 °C	120,3 m ³ /h
adiabatische Mischtemperatur bei vollständiger Vermischung	468 °C

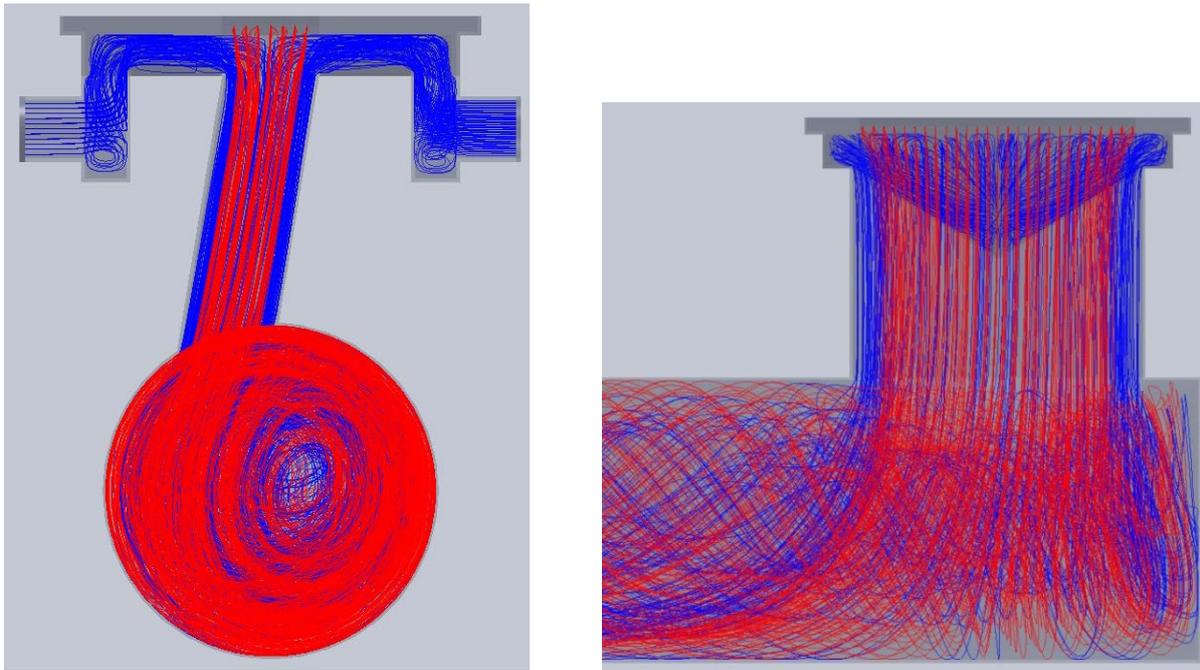


Abbildung 5.4 Strömungslinien in der Brennkammer eines Stückholzkessels nach dem Stand der Technik in einer Vorder- und einer Seitenansicht (blaue Linien: Sekundärluft; rote Linien: Pyrolysegase)

Die Strömungslinien zeigen, wie die Sekundärluft (blau) von rechts und links eingebracht wird und senkrecht auf den Pyrolysegasstrom (rot) trifft. Danach gelangen beide Teilströme gemeinsam über einen tangential angeordneten Kanal in die darunter liegende Wirbelbrennkammer und bilden dort einen Wirbel aus. Bei vollständiger Vermischung müsste sich eine adiabatische Mischtemperatur von ca. 468 °C einstellen. Der Längsschnitt durch die Brennkammer zeigt, dass sich die beiden Teilvolumenströme in dem tangential angeordneten Kanal kaum vermischen (Abbildung 5.5). Es ist eine starke Strähnenbildung sowohl im hinteren als auch im vorderen Bereich der Brennkammer erkennbar.

Am Ende der Brennkammer (Brennkammerlänge ca. 440 mm; Durchmesser 208 mm) liegt ca. 1/3 der Querschnittsfläche im Bereich der adiabaten Mischtemperatur (Abbildung 5.6). Auf Grundlage dieser Ergebnisse muss es das Ziel einer neukonzipierten Brennkammer sein, die Vermischung deutlich effizienter und gleichmäßiger zu gestalten. Die ersten Varianten einer neuentwickelten Brennkammer werden nachfolgend vorgestellt.

Die neuentwickelte Brennkammer basiert dabei auf dem Grundgedanken, durch ein Bauelement eine bessere Vermischung in der Brennkammer zu erzeugen. Abbildung 5.7 zeigt schematisch das Bauelement.

Aufbauend auf diesem Prinzip wurden, bis zum Projektende (Phase I), zwei grundsätzliche Ausführungsvarianten einer Brennkammer entwickelt (Abbildung 5.8). Diese sind beide aus einer zylindrischen Brennkammer aufgebaut, in deren Zentrum sich die Sekundärluftzuführung befindet. Variante 1 und Variante 2 unterscheiden sich von der Einströmung der Pyrolysegase in die Brennkammer. In Variante 1 erfolgt dies axial an der Stirnseite der Brennkammer, in Strömungsrichtung der Sekundärluft. Bei Variante 2 strömen die Pyrolysegase tangential in die Brennkammer.

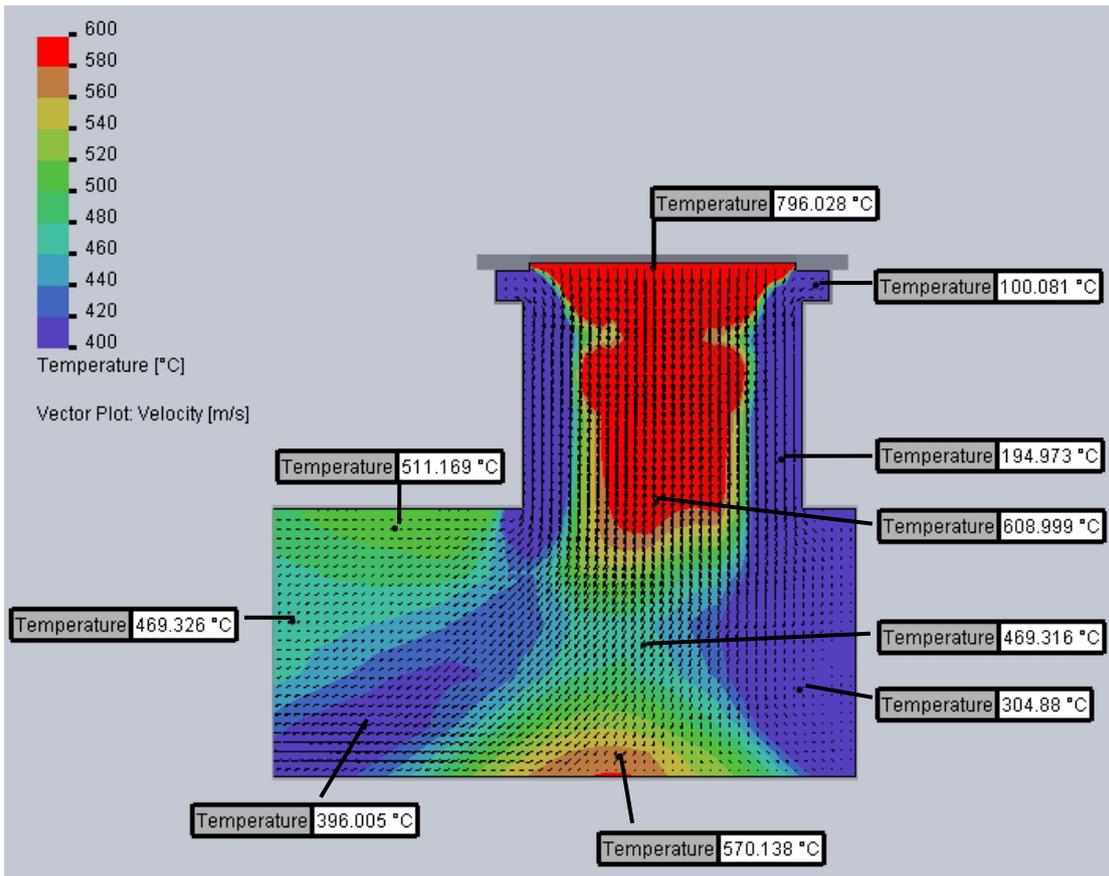


Abbildung 5.5 Temperaturverteilung in einer Brennkammer bei der Vermischung von Sekundärluft (100 °C) mit den Pyrolysegasen (800°C) (CFD-Simulation ohne chemische Reaktionen)

Häufigkeitsverteilung der Temperatur im Querschnitt (Brennkammerende)

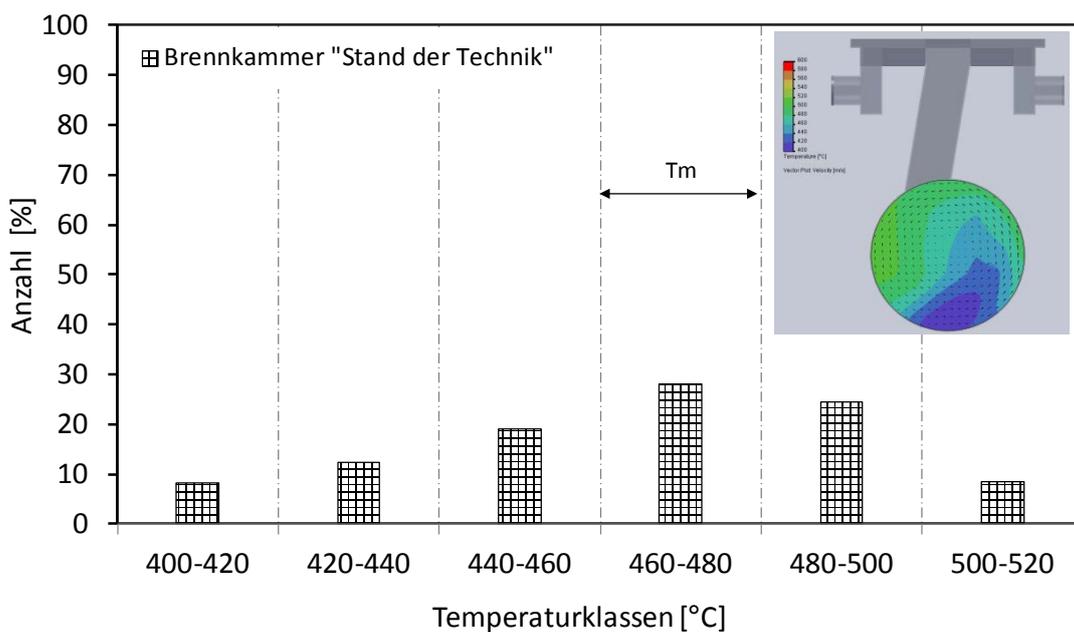


Abbildung 5.6 Häufigkeitsverteilung der Strömungstemperatur am Brennkammerende

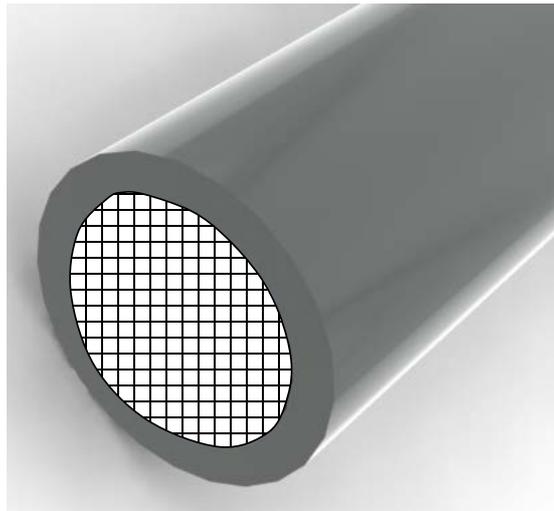
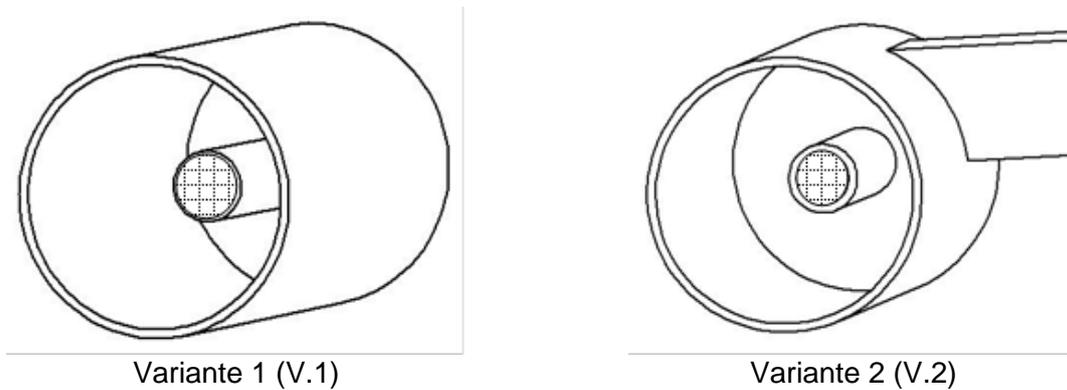


Abbildung 5.7 Bauelement zur besseren Vermischung (schematisch)



Variante 1 (V.1)

Variante 2 (V.2)

Abbildung 5.8 Ausführungsvarianten V.1 und V.2 der Brennkammer (Durchmesser 150 mm) mit Sekundärluftzuführung

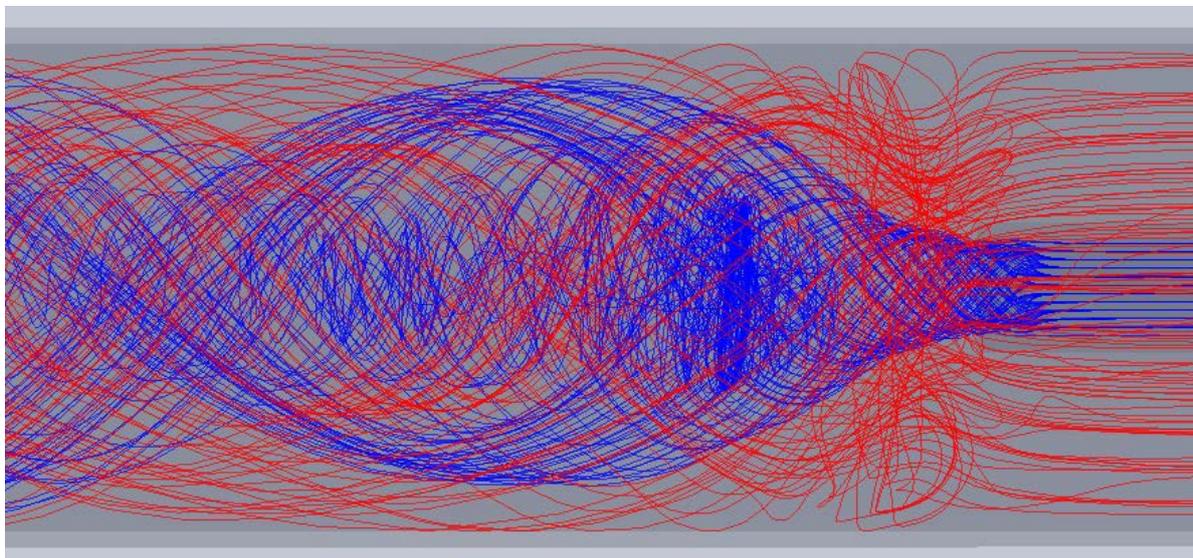
Zur Beurteilung der beiden Varianten wurden auch hier CFD-Simulationen durchgeführt. Die notwendigen Berechnungseingaben sind in Tabelle 5.4 angegeben.

Tabelle 5.4 Kenngrößen zur Strömungssimulation der neuentwickelten Brennkammer

Kenngröße	Wert
Heizleistung	18 kW
Wirkungsgrad	86 %
Luftüberschußzahl	1,75
Sekundärluftvolumenstrom bei 100 °C	25,7 m ³ /h
Pyrolysegasvolumenstrom bei 800 °C	72,2 m ³ /h
adiabatische Mischtemperatur bei vollständiger Vermischung	469°C

Die CFD-Simulationen zeigen, dass sich bei beiden Brennkammervarianten kurz nach der Sekundärlufteinmischung ein starker Wirbel ausbildet (Abbildung 5.9). Bei Variante 1 ist ein deutliches Rückströmgebiet im Zentrum der Brennkammer vorhanden.

Variante 1



Variante 2

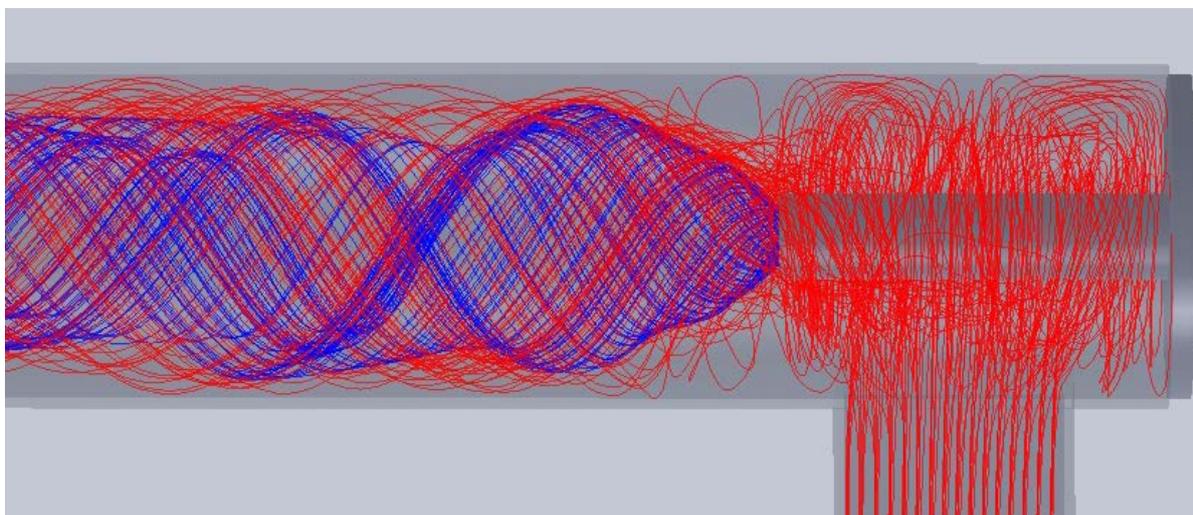
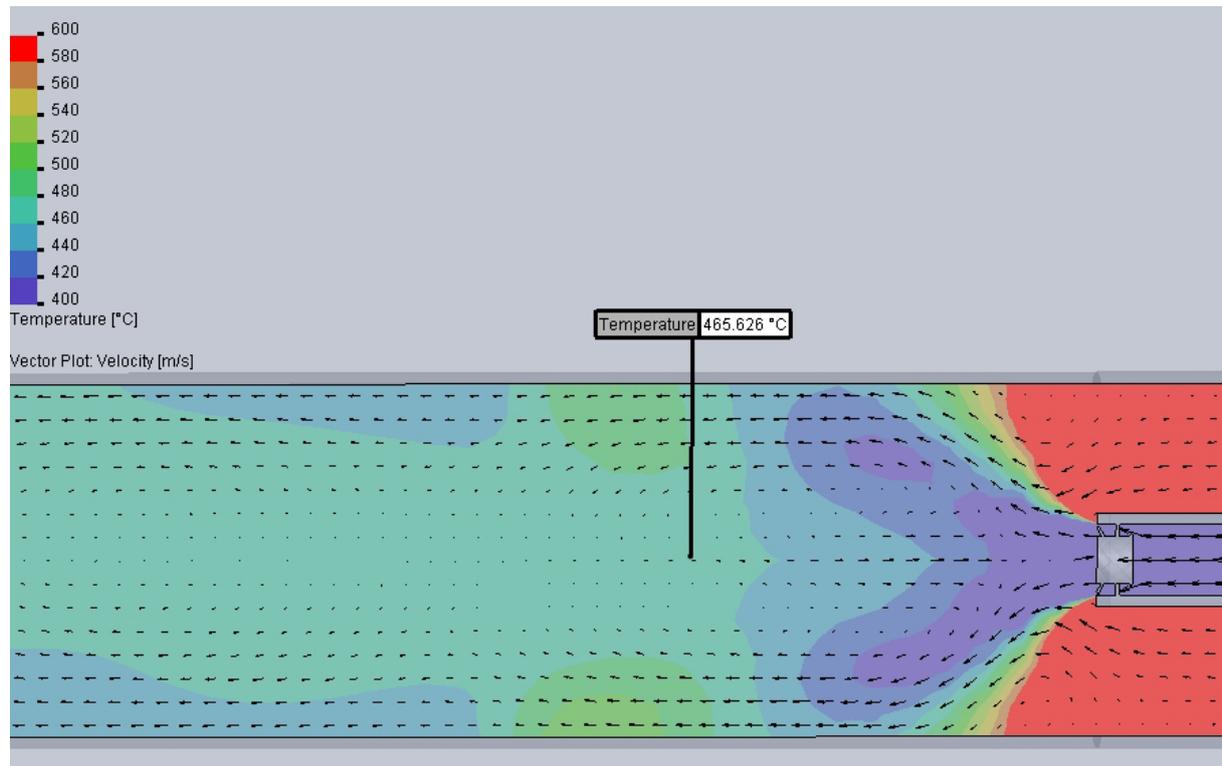


Abbildung 5.9 Strömungslinien der zwei berechneten Brennkammervarianten V.1 und V.2 (blaue Linien: Sekundärluft; rote Linien: Pyrolysegase) (CFD-Simulation ohne chemische Reaktionen)

Dass sich dieses Rückströmgebiet, wenn auch nicht so ausgeprägt, ebenfalls bei Variante 2 ausbildet, ist an den Geschwindigkeitsvektoren in Abbildung 5.10 erkennbar. Dieses Rückströmgebiet sorgt dafür, dass es bei beiden Varianten bereits kurz nach dem Sekundärluftaustritt zu einer intensiven Vermischung der Sekundärluft mit den Pyrolysegasen kommt. Lediglich im Wandbereich ist noch eine gewisse Strahlenbildung erkennbar. Ein derartiges Rückströmgebiet soll in Praxis auch zur Homogenisierung der Temperaturen in der Brennkammer beitragen und gleichzeitig die Flammenstabilität erhöhen.

Variante 1



Variante 2

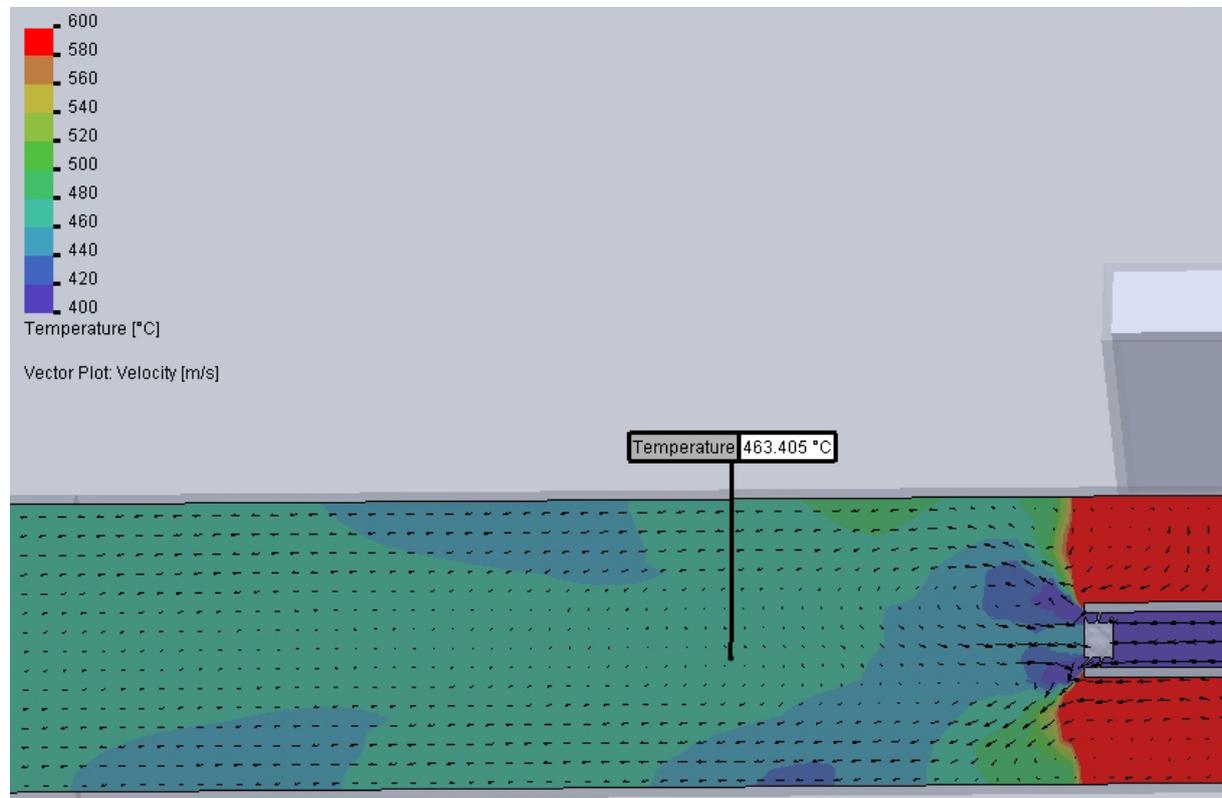


Abbildung 5.10 Temperaturverteilung der Brennkammervarianten V.1 und V.2 bei der Vermischung von Sekundärluft (100 °C) mit den Pyrolysegasen (800°C) (CFD-Simulation ohne chemische Reaktionen)

Da die Sekundärluft bis zu ihrem Auslass eine bestimmte Wegstrecke im heißen Bereich zurücklegen muss, ist diese gut vorgewärmt, was sich positiv auf die Verbrennung auswirkt. Mit diesen ersten Varianten einer neukonzipierten Brennkammer konnte die Vermischungsqualität und Vermischungsgeschwindigkeit der Sekundärluft mit den Pyrolysegasen deutlich gesteigert werden.

Die Brennkammer nach dem Stand der Technik zeigte ein breites Spektrum in der Temperaturhäufigkeitsverteilung auf (Abbildung 5.6). Demnach waren nur ca. 30 % der Strömungsfläche am Brennkammerende (Querschnitt bei 440 mm) vollständig vermischt. Dieses breite Spektrum konnte bei der neukonzipierten Variante 2 auf einen engen Temperaturbereich (2 Temperaturklassen) reduziert werden, wodurch auch die Strahlenbildung entsprechend abnimmt.

Durch die optimierte Zuführung der Sekundärluft sind bei Variante 2 bereits 250 mm nach der Sekundärluftzumischung 66 % der Strömung vollständig vermischt (vgl. Bereich der adiabaten Mischtemperatur in Abbildung 5.11). Ein Vergleich der simulierten Brennkammervarianten untereinander weist leichte Vorteile der Variante 2 gegenüber Variante 1 auf, da hier die Vermischung etwas schneller abläuft.

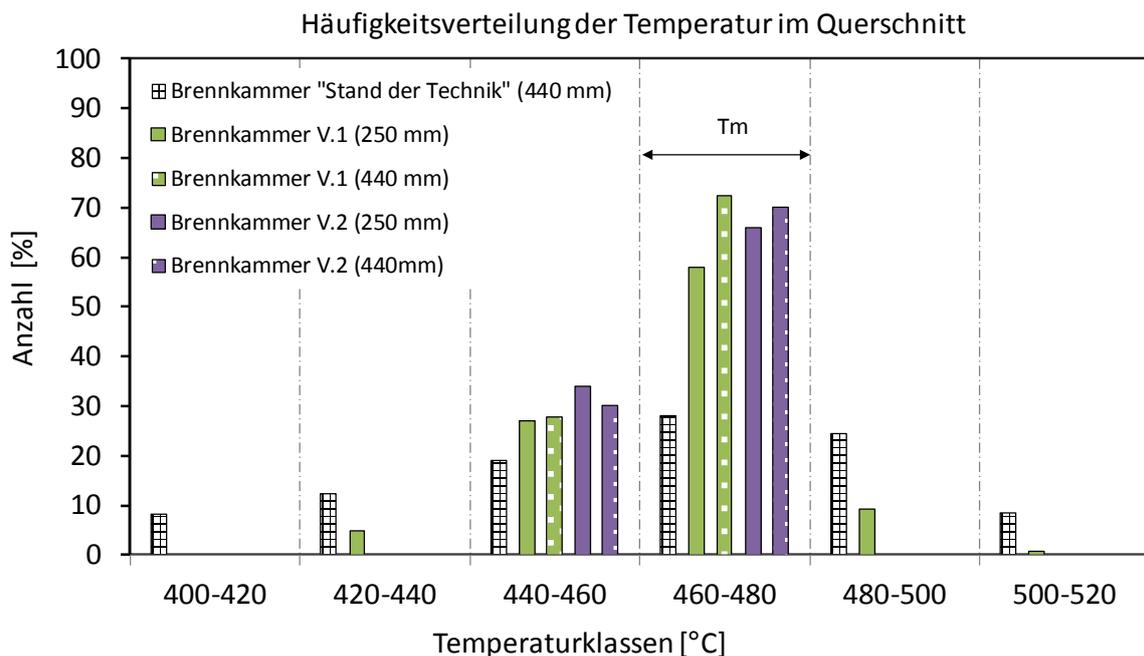


Abbildung 5.11 Häufigkeitsverteilung der Strömungstemperatur bei den zwei Brennkammervarianten V.1 und V.2 und einer Brennkammer nach dem Stand der Technik

Durch die Visualisierung in der CFD-Simulation hat sich das Konzept der optimierten Verbrennungsluftführung in der Nachbrennkammer (Variante 2) als vielversprechend gezeigt und soll in einer Versuchsfeuerung konstruktiv umgesetzt werden.

6 Experimentelle Validierung des optimierten Stückholzkessels

Aufbauend auf dem entwickelten Konzept eines verbrennungstechnisch und wirkungsgradoptimierten Stückholzkessels wurde eine vereinfachte Versuchsfeuerung mit dem Ziel aufgebaut, die Wirksamkeit des Brennkammerkonzeptes hinsichtlich geringer Abgasemissionen experimentell verifizieren zu können.

6.1 Beschreibung der Versuchsfeuerung

Abbildung 6.1 zeigt die realisierte Versuchsfeuerung, bestehend aus ihren Hauptkomponenten Primärkammer, Ascheraum, Sekundärbrennkammer und Abgasanschluss. Die Holzaufgabe erfolgte über eine Fülltüre in der Primärkammer. Eine weitere Türe im Bereich des Ascheraums ermöglichte das Entfernen der anfallenden Asche.

Die Primärkammer ist mit ca. 80 l Füllschachtvolumen ausreichend groß, so dass der maximal einfüllbare Holzvorrat für eine ununterbrochene Brenndauer (bei 18 kW Nennwärmeleistung) von ca. 4 h reicht. Um sicher zu stellen, dass der obere Teil des Brennstoffstapels, nur trocknet und nicht bereits frühzeitig entgast, wurde eine Wasserkühlung an den Außenwänden der Primärkammer angebracht.

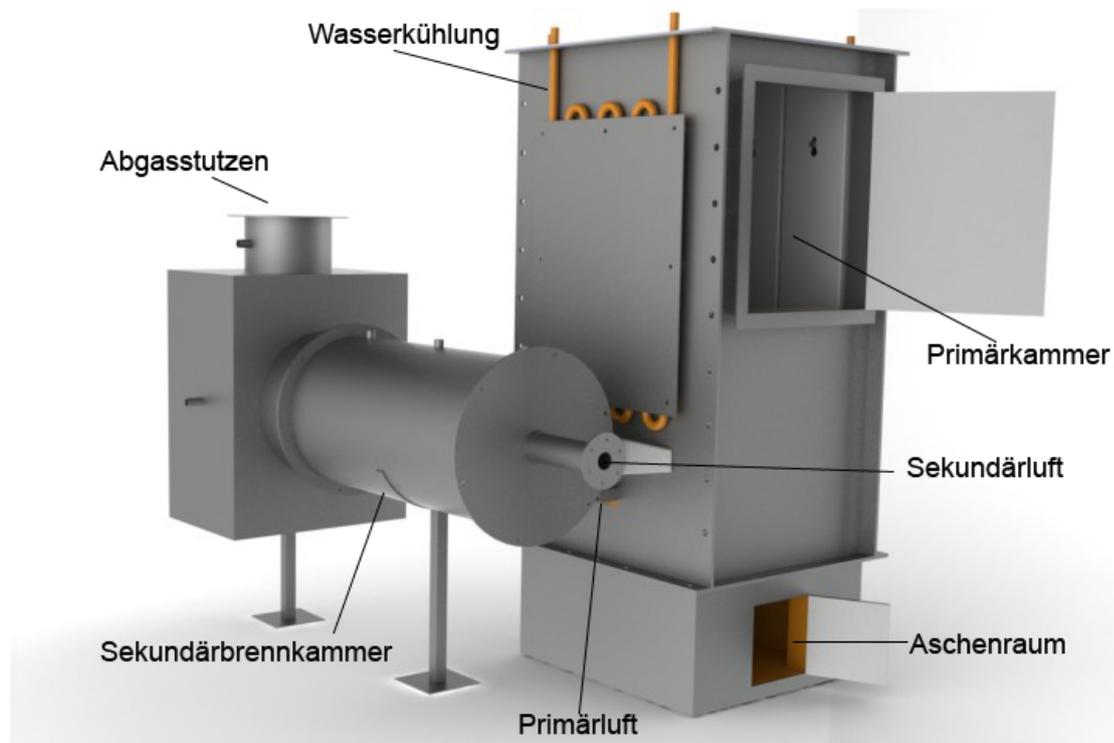


Abbildung 6.1 CAD-Ansicht der realisierten Versuchsfeuerung

Die Primärluftzufuhr erfolgte über gleichmäßig verteilte Bohrungen im Rost, wodurch ein homogenes Glutbett und somit eine gleichmäßige Umsetzung des Holzes erreicht werden soll (siehe Abbildung 6.2). Die Wärmeschutzisolierung im Bereich des Glutbettes soll den Entgasungsprozess durch möglichst hohe Temperaturen zusätzlich unterstützen.

Mit Abstandshaltern rund um die Austrittöffnung der Primärkammer soll sichergestellt werden, dass die Entgasungsprodukte immer ungehindert in die Sekundärbrennkammer gelangen können. Dabei ist der Übergangskanal zwischen Primärkammer und Sekundärbrennkammer derart angeordnet, dass die Entgasungsprodukte tangential in die zylindrische Sekundärbrennkammer strömen und so in Rotation versetzt werden. Für die Dimensionierung des Übergangskanals und der Sekundärbrennkammer wurde eine CFD-Software verwendet, mit dem Ziel einer möglichst vollständigen Durchmischung (siehe Kapitel 5). Dabei erfolgt die axiale Sekundärluftzufuhr in die Sekundärbrennkammer über eine optimierte Zuführung der Sekundärluftrohr (siehe Abbildung 6.2). Hierdurch wird eine sehr gute Durchmischung der Holzgase mit dem Luftsauerstoff erreicht. Die Sekundärbrennkammer weist einen Durchmesser von 150 mm auf und wurde zur Reduzierung der Wärmeverluste mit feuerfester Wärmeschutzisolierung ausgestattet, um die notwendige Temperatur für eine optimale Verbrennung möglichst schnell erreichen zu können.

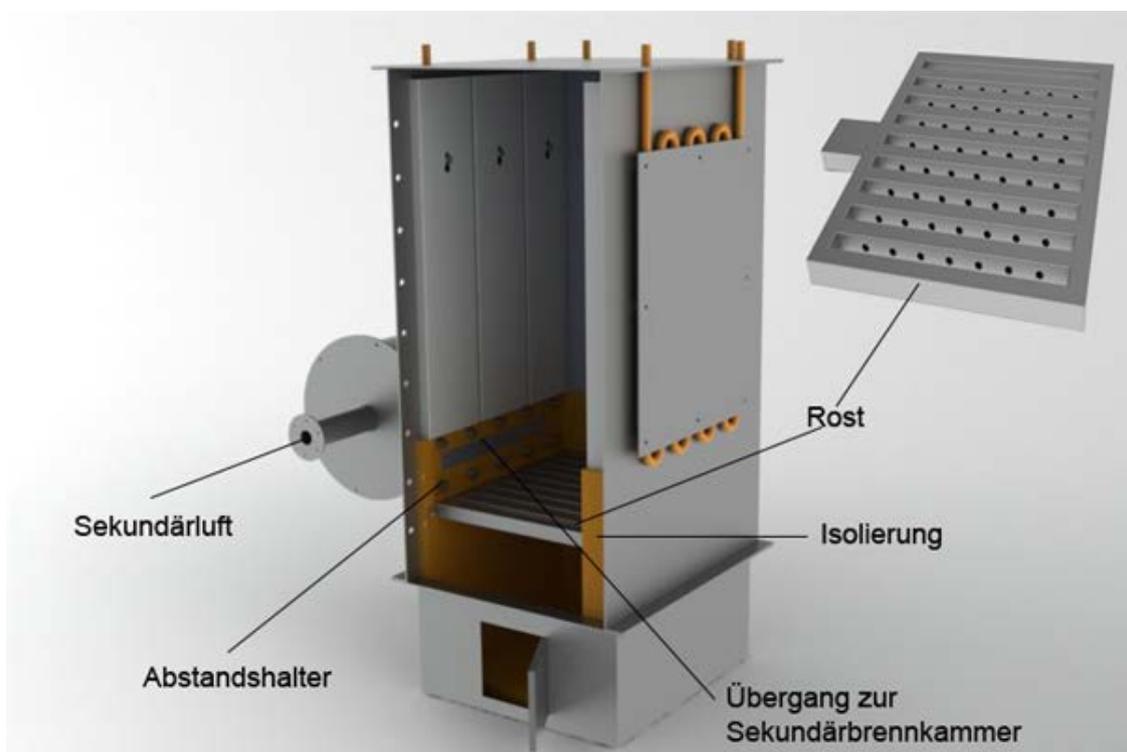


Abbildung 6.2 Blick in den Primärbereich der Versuchsfeuerung und vergrößerte Darstellung der Rostkonstruktion und der optimierten Sekundärluftzuführung

6.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Messungen wurden im Technikum des Instituts für Feuerungs- und Kraftwerktechnik (IFK) der Universität Stuttgart durchgeführt. Abbildung 6.3 gibt einen Überblick des Prüfstandsbaus und der wichtigsten Messstellen, welche kontinuierlich und diskontinuierlich aufgenommen wurden.

Für die kontinuierliche Abgasanalyse wurden Messgeräte der Fima Rosemount eingesetzt. Außerdem wurde weitere Sensorik verwendet, um Drücke und Temperaturen bestimmen zu

können. Die Abgasprobe wurde mittels einer Rauchgassonde aus dem Abgasrohr entnommen, filtriert, entfeuchtet und über eine beheizte Leitung zu den Messgeräten geführt. Die verwendeten Messgeräte und Messprinzipien der Abgasanalyse, sowie die bei der Gerätekalibrierung verwendete Prüfgaskonzentration sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Vor jeder Messung wurden die einzelnen Kanäle der Gasanalytoren mit Prüfgas kalibriert. Die Nullpunkte wurden zuvor mit Stickstoff 5.0 überprüft und gegebenenfalls nachjustiert. Nach jeder Messung wurden noch einmal Stickstoff und Prüfgase aufgegeben, um die Drift festzustellen und diese in der Auswertung korrigieren zu können.

Stellvertretend für Produkte unvollständiger Verbrennung und zur qualitativen Beurteilung der Verbrennung wurden die Kohlenmonoxidkonzentrationen im Abgas gemessen. Auf Feinstaubmessungen wurde aufgrund des fehlenden Wärmetauschers verzichtet. Dieser scheidet bei Praxisanlagen die größeren Aschepartikel ab, so dass Partikelmessungen an der Versuchsfeuerung nicht repräsentativ gewesen wären. Bei niedrigen Kohlenmonoxidemissionen in der Hauptverbrennungsphase kann davon ausgegangen werden, dass dies auch mit geringen Konzentrationen an Ruß und organischen Feinstaubpartikeln einhergeht.



- 1: Volumenstrom Sekundärluft
- 2: Volumenstrom Primärluft
- 3: Temperatur Brennkammer Eingang
- 4: Temperatur Brennkammer Mitte
- 5: Abgasanalyse (Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff (O₂), Kohlendioxid (CO₂))

Abbildung 6.3 Darstellung der aufgebauten Versuchsfeuerung und der Messstellen

Zur Charakterisierung der Verbrennung wurde auch die Flammentemperatur in der Sekundärbrennkammer mit Temperatursensoren (NiCr-Ni) vom Typ K gemessen. Dabei stimmt die gemessenen Verbrennungstemperaturen nicht mit der theoretisch realisierbaren adiabaten Verbrennungstemperatur überein. Grund hierfür sind zum einen die unvermeidbaren Wärmeverluste in der Brennkammer. Zum anderen ist die gemessene Verbrennungstemperatur mit Thermoelementen wegen der Strahlungsverluste und der Wärmeableitung des Thermoelements niedriger als die reale Temperatur der Verbrennungsgase in der Flamme.

Tabelle 6.1 Messgrößen, Messprinzipien und die verwendeten Prüfgaskonzentrationen

Messgröße	Messgerät	Messprinzip	Prüfgas	Messbereich
CO ₂	Binos / Rosemont	nicht dispersive Infrarotabsorption	12,1 Vol%	0-20 Vol%
O ₂	Binos / Rosemont	Paramagnetismus	9,7 Vol%	0-25 Vol%
CO	Binos / Rosemont	nicht dispersive Infrarotabsorption	0,70 Vol%	0-3 Vol%
CO	Binos / Rosemont	nicht dispersive Infrarotabsorption	826 ppm	0-1.000 ppm

Sowohl die Primär- als auch die Sekundärverbrennungsluft wurde der Versuchsfeuerung mittels Druckluft zugeführt, wobei die Menge über Ventile einstellbar war. Die Volumenströme der zugeführten Verbrennungsluft wurden mit Hilfe von Schwebekörperdurchflussmessern bestimmt, jedoch nicht kontinuierlich aufgezeichnet, aber bei einer vorgenommenen Volumenstromänderung dokumentiert.

6.3 Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

Die Verbrennungsversuche wurden bei kalter und bei warmer Feuerung, d.h. Holzaufgabe ohne bzw. mit bestehender Grundglut, durchgeführt. Als Brennstoff kam handelsübliches Buchenholz zum Einsatz, wobei immer eine Charge von 15 kg Holz eingefüllt wurde. Bei den Versuchen mit einer warmen Feuerung wurde die Holzcharge auf ein bereits bestehendes Glutbett gegeben, wobei über die Zeit (von 6 Vol% CO₂ bis 6 Vol% CO₂) und der aufgegebenen Brennstoffmenge die ungefähre Feuerungswärmeleistung der Anlage bestimmt werden konnte. Der Kaminzug lag konstant bei ca. 20 Pa. Für die durchgeführten Verbrennungsversuche wurde die Sekundärluft direkt am Anfang der Sekundärbrennkammer zugegeben und nicht 180 mm im Brennkammerinneren wie in den CFD-Simulationen (siehe Kapitel 5). Sämtliche Verbrennungsversuche wurden mit handgeleiteter Verbrennungsluftzufuhr durchgeführt. Dabei wurde versucht, die Verbrennung bei einem Restsauerstoffgehalt im Abgas zwischen 4 bis 5 Vol% zu halten.

Die kontinuierlich erfassten Größen (Abgaskonzentrationen und Temperaturen) wurden als 1-Sekunden-Werte registriert. Aufgrund der fehlenden automatischen Leistungs- und Verbrennungsregelung war es schwierig, reproduzierbare Versuche über den gesamten Abbrand zu realisieren. Daher wurden die nachfolgend dargestellten gemittelten Messwerte jeweils nur für die Hauptverbrennungsphase bestimmt, d.h. ohne Anfeuer-, Start- und Ausbrandphase. Die Umrechnung der gemessenen mittleren Konzentration von CO auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% erfolgte mittels der ebenfalls gemessener O₂-Konzentration nach folgender Formel [1. BImSchV, 2010]:

$$E_B = \frac{21 - O_{2,B}}{21 - O_{2,M}} * E_M \quad \text{Formel (2)}$$

mit: E_B Emissionskonzentration bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt
 E_M : gemessene mittlere Emissionskonzentration
 $O_{2,B}$: Bezugssauerstoffgehalt in Vol%
 $O_{2,M}$: gemessene mittlere Sauerstoffkonzentration in Vol%.

6.4 Ergebnisse der Verbrennungsversuche

Im Folgenden sollen zwei repräsentative Abbrände bei der Aufgabe von jeweils einer Charge 15 kg Holz auf ein bestehendes Glutbett bzw. bei kaltem Zustand der Versuchsfeuerung vorgestellt werden. In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse dieser Verbrennungsversuche zusammengefasst aufgeführt.

Tabelle 6.2 Ergebnisse der Verbrennungsversuche bei „kalter“ und „warmer“ Feuerung

		"kalt"	"warm"
Allgemein	Versuchsdauer [h]	4,0	4,0
	Brennstoff	Buchenholz	
	Brennstoffmenge [kg]	15	15
Emissionen Hauptverbrennungsphase	Brenndauer Hauptverbrennungsphase [h]	2,4	2,1
	O_2 [Vol.-%]	5,0	4,6
	CO_2 [Vol.-%]	16,1	17,1
	CO [mg/m^3 bez. 13 Vol.-% O_2]	33,7	27,6
	Min-Wert CO [mg/m^3 bez. 13 Vol.-% O_2]	5,5	17,8
	Max-Wert CO [mg/m^3 bez. 13 Vol.-% O_2]	649,9	101,6
	Temperatur Brennkammer Eintritt [$^{\circ}C$]	749	639
	Temperatur Brennkammer Mitte [$^{\circ}C$]	900	898
Feuerung	Feuerungsanlage	Versuchsfeuerung	
	Feuerungsleistung [kW]	16	16
	Schornsteinzug [Pa]	20	20

Nach dem Zünden des Brennstoffs, bei kalter Feuerung, benötigt die Versuchsfeuerung ca. 10 min, um die für eine vollständige Verbrennung notwendigen Temperaturen in der Sekundärbrennkammermitte von ca. 800 $^{\circ}C$ zu erreichen. Während der anschließenden Hauptverbrennungsphase wurden im Mittel ca. 34 mg/m^3 (bez. auf 13 Vol% O_2) Kohlenmonoxid gemessen. Dabei wurde versucht, den Luftüberschuss der Versuchsfeuerung bei ca. $\lambda=1,3$ (entsprechend 5 Vol% O_2) zu halten. Aus Abbildung 6.4 ist zu erkennen, dass beim Start der Feuerung noch viel Primärluft und wenig Sekundärluft zugegeben wurde. Während der Hauptverbrennungsphase muss hingegen nur noch verhältnismäßig wenig Primärluft, dafür aber mehr Sekundärluft zugeführt werden.

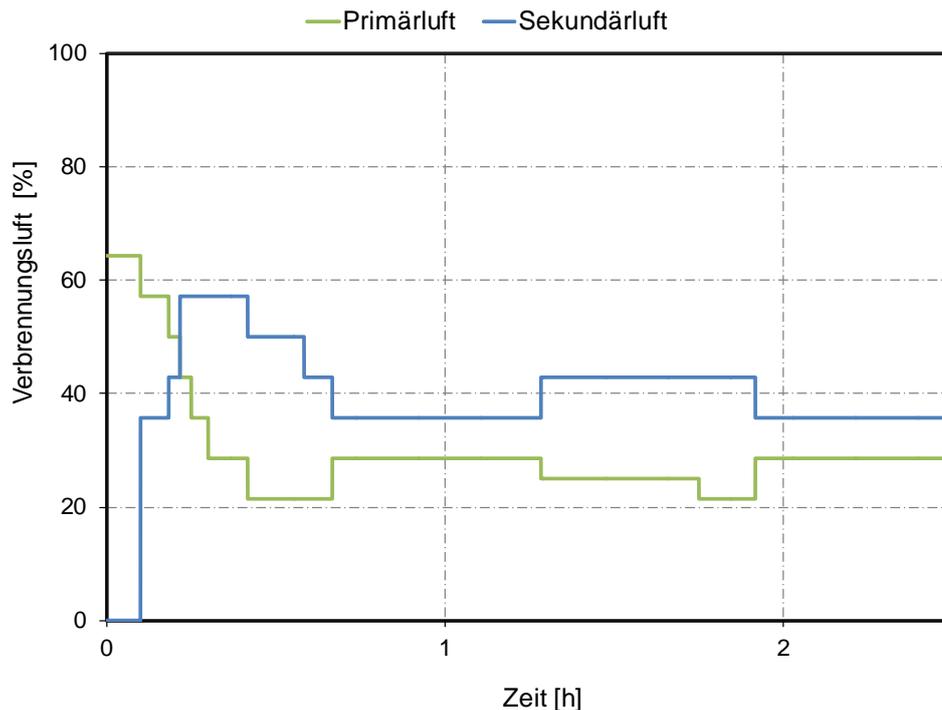


Abbildung 6.4 Verbrennungsluftvolumenströme beim Versuch mit „kalter“ Feuerung

Abbildung 6.5 zeigt, dass aufgrund der sehr guten Vermischung der Holzgase mit der Sekundärluft sehr niedrige CO-Emissionen bei einem geringen Luftüberschuss über die gesamte Hauptverbrennungsphase erreicht wurden. Die etwas höhere CO-Emissionsspitze (bei ca. 0,8 h) wurde durch zu schnelles Reduzieren der Primärluft verursacht. Dies hatte zur Folge, dass im Primärbereich der Holzgasungsprozess gedrosselt wurde, was wiederum eine deutliche Reduzierung der gemessenen Sekundärbrennkammertemperaturen mit sich brachte (siehe Abbildung 6.6) und somit die notwendigen Brennkammertemperaturen für eine vollständige Verbrennung nicht mehr gegeben waren. Mit einer funktionierenden Regelung könnten solche Zustände aber einfach vermieden werden.

Ab der Versuchszeit 0,8 h bis zum Ende der Hauptverbrennungsphase brennt die Versuchsf Feuerung sehr stabil und es werden sehr gute Verbrennungswerte erreicht. Die gemittelte CO-Konzentration über diese Zeitspanne beträgt rund 11 mg/m^3 (bez. auf 13 Vol% O_2). Insgesamt konnten mit der neuentwickelten Sekundärbrennkammer (aufgrund der optimierten Vermischung) über einen breiten Luftüberschussbereich sehr niedrige CO-Emissionswerte erreicht werden, wie die Darstellung der CO-Konzentrationen über dem Rest- O_2 im Abgas in Abbildung 6.7 verdeutlicht. Ab einem Rest- O_2 im Abgas von $< 5 \text{ Vol\%}$ steigen die Kohlenmonoxidemissionen zwar leicht an, befinden sich aber immer noch in einem für Holzfeuerungen sehr guten Bereich.

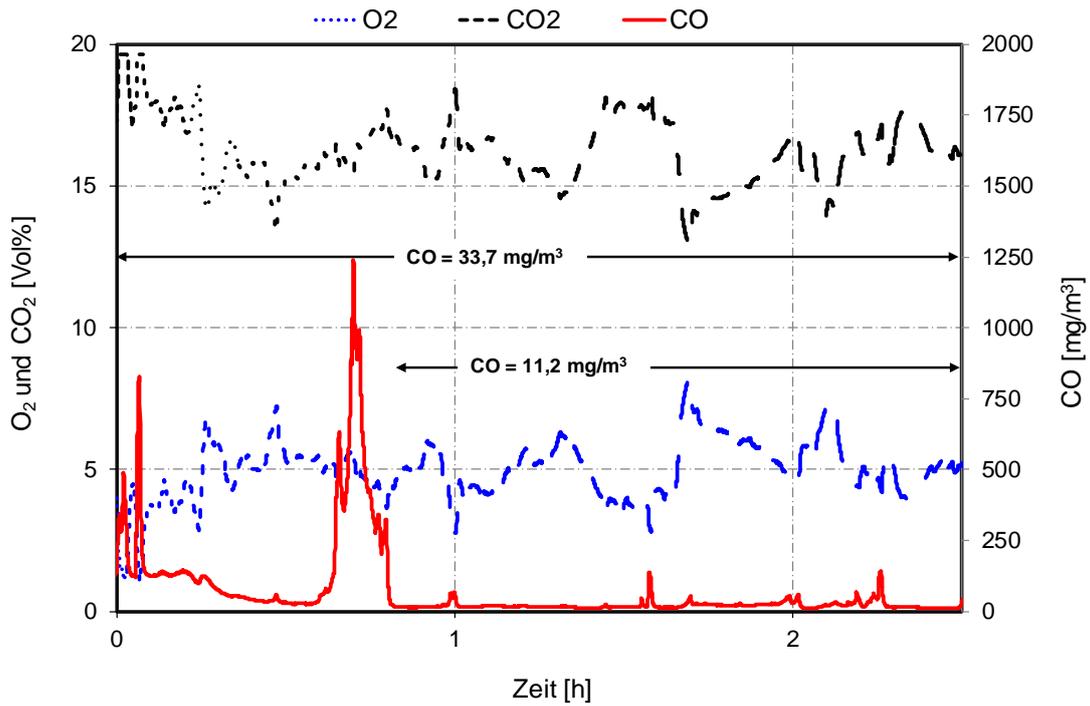


Abbildung 6.5 Zeitlicher Verlauf (Hauptverbrennungsphase) der gemessenen Abgaskonzentrationen bei „kalter“ Feuerung

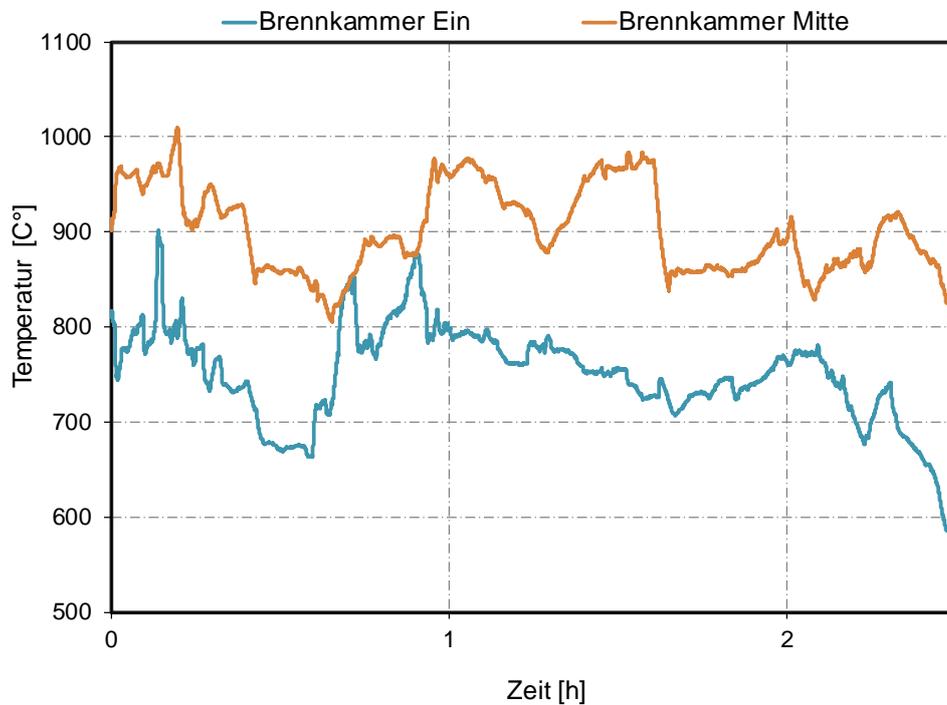


Abbildung 6.6 Verlauf der gemessenen Sekundärbrennkammertemperaturen und der Abgastemperatur bei „kalter“ Feuerung

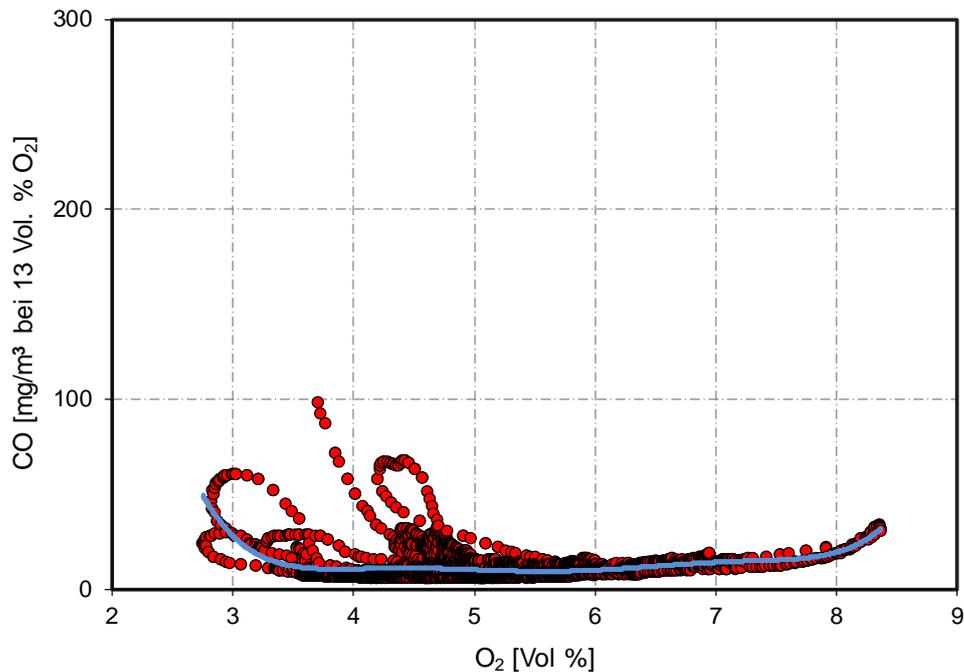


Abbildung 6.7 Abhängigkeit der Kohlenmonoxidkonzentration vom Rest-O₂ im Abgas (dargestellt sind hier Konzentrationen ab Stunde 1,0 aus Abbildung 6.5)

Bei marktüblichen Holzfeuerungen steigen die Emissionen, in dem hier beschriebenen Luftüberschussbereich (Rest-O₂ im Abgas < 5 Vol%), meist bereits um Größenordnungen an. Um minimalste Emissionswerte zu garantieren, darf der Rest-O₂ im Abgas der Versuchsfeuerung 3,5 Vol% nicht unterschreiten. Der Punkt, an welchem die Produkte unvollständiger Verbrennung schlagartig steil ansteigen, wird bei Rest-O₂-Konzentrationen im Abgas von < 2,5 Vol% erreicht.

Wird eine Charge von 15 kg Holz auf ein bestehendes Glutbett („warme“ Feuerung) gegeben, so ist für ein schnelles Zünden und das Erreichen ausreichend hoher Verbrennungstemperaturen die Zugabe einer ausreichenden Primärluftmenge entscheidend. Bei einem Volumenstrom von 18 m³/h Primärluft zündet die Versuchsfeuerung sehr gut und es werden nach ca. 4 min gute Emissionswerte erreicht (Abbildung 6.8). Während der Startphase wurde keine Sekundärluft zugeführt, was zur Folge hat, dass zu wenig Verbrennungsluft für eine vollständige Verbrennung zur Verfügung stand (zu erkennen durch den sehr geringen Rest-O₂ im Abgas). Durch die Zugabe von geringen Mengen Sekundärluft können die Kohlenmonoxidemissionen während der Startphase sicherlich weiter reduziert werden.

In der anschließenden Hauptverbrennungsphase (siehe Abbildung 6.9) liegen die Kohlenmonoxidkonzentrationen über einen Zeitraum von ca. 2 h auf einem konstant niedrigen Niveau, der CO-Konzentrationsmittelwert beträgt ca. 28 mg/m³ (bez. auf 13 Vol% O₂). Der CO-Verlauf ist dabei sehr ruhig und zeigt kaum Schwankungen auf. Die berechnete Standardabweichung der bezogenen Kohlenmonoxidkonzentration in Höhe von 7,4 mg/m³ zeigt, dass Änderungen im Luftüberschuss in der heißen und gut durchmischten Sekundärbrennkammer (siehe Abbildung 6.10) nahezu ohne Wirkung auf die Verbrennungsqualität bleiben (siehe Abbildung 6.11).

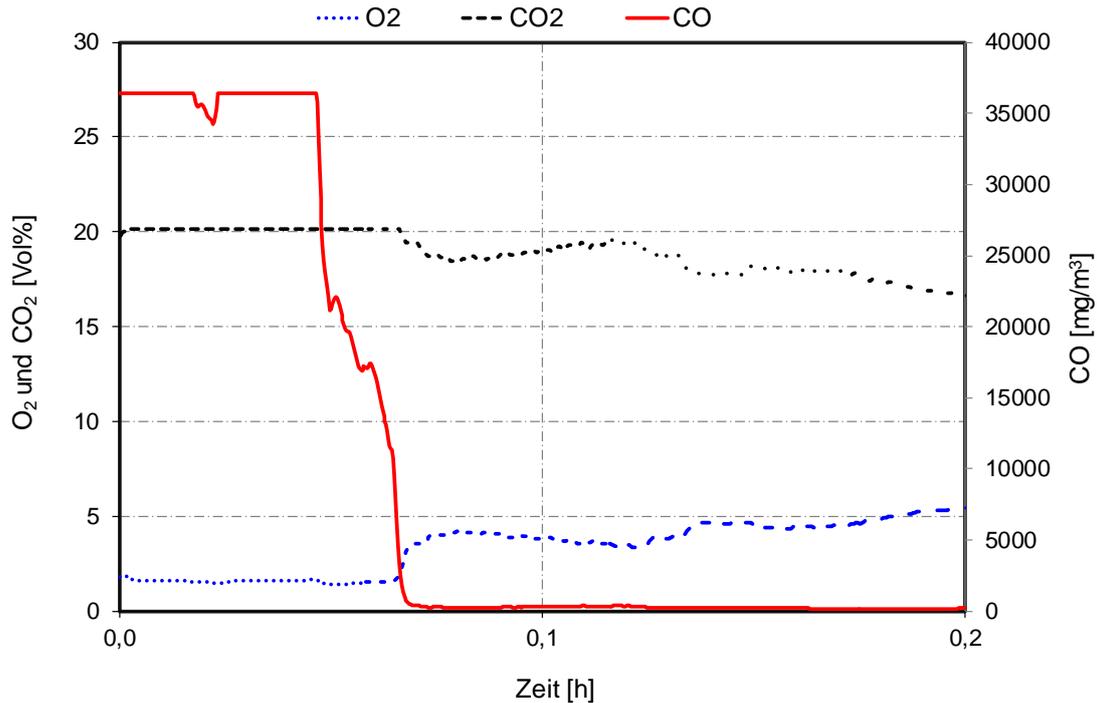


Abbildung 6.8 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Abgaskonzentrationen während der Startphase bei der Aufgabe einer Holzcharge auf ein bestehendes Glutbett („warme“ Feuerung)

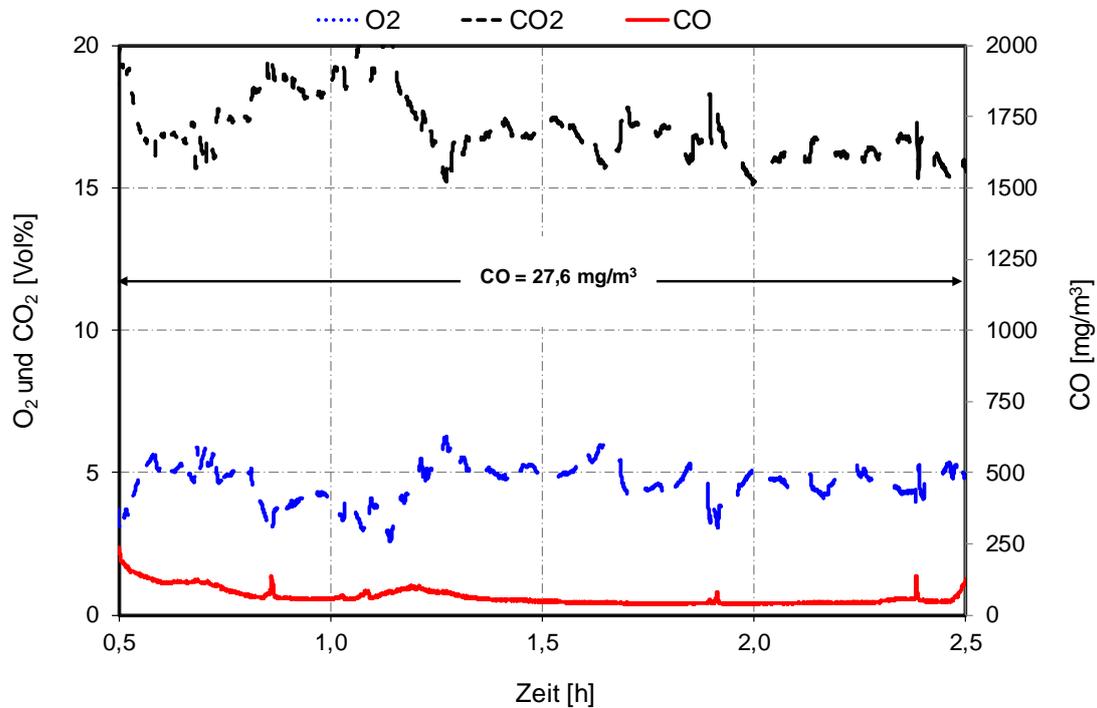


Abbildung 6.9 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Abgaskonzentrationen während der Hauptverbrennungsphase bei der Aufgabe einer Holzcharge auf ein bestehendes Glutbett („warme“ Feuerung)

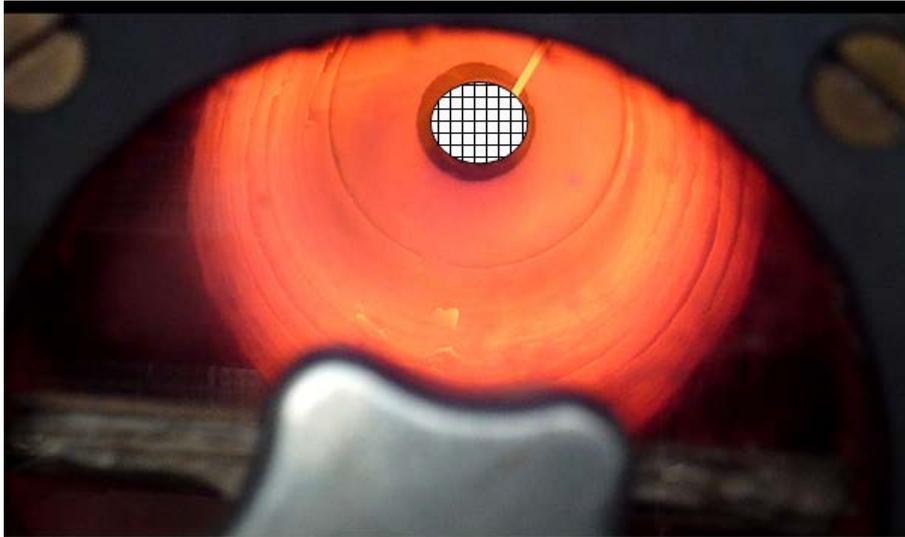


Abbildung 6.10 Blick in die heiße, gut durchmischte Sekundärbrennkammer der Versuchsfeuerung

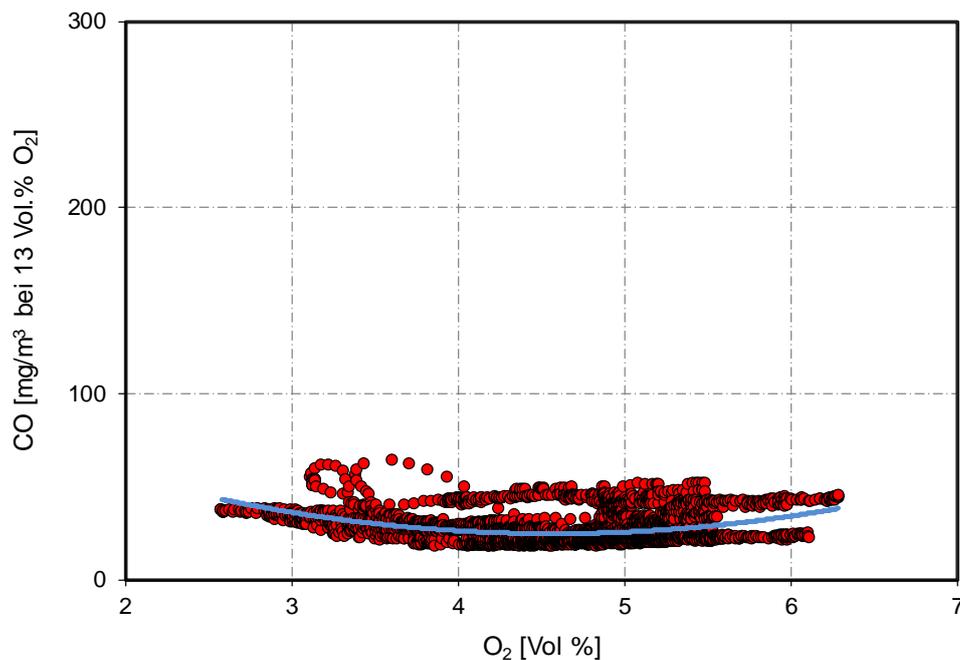


Abbildung 6.11 Abhängigkeit der Kohlenmonoxidkonzentration vom Rest-O₂ im Abgas (dargestellt sind hier Konzentrationen ab Stunde 0,5 aus Abbildung 6.9)

Sämtliche durchgeführten Feuerungsversuche verdeutlichen, dass dank der gleichmäßigen Primärluftverteilung über dem gelochten Feuerungsrost ein sehr homogenes Glutbett aufgebaut wird, was eine sehr gleichmäßige Entgasung des Brennstoffes in der Primärkammer ermöglicht. Das in der Praxis bei Stückholzkesseln häufig auftretende Problem der Holbrandbildung wurde – zumindest bei dem eingesetzten Buchenholz – nicht beobachtet. Ein beweglicher Rost, welcher in der Lage wäre derartige Blockaden in der Füllkammer mechanisch aufzulösen (siehe Kesselkonzept in Kapitel 5.2), ist somit zum jetzigen Stand der Entwicklung nicht notwendig.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen der Versuchsfeuerung wurde als nächster Schritt einer erster Prototyp eines Stückholzkessels angefertigt. Neben dem innovativen Sekundärbrennkammerkonzept wurde diese Feuerung nun auch mit einem Wärmetauscher ausgestattet. Ziel war es, diesen Musterkessel bei genau definierten Leistungsvorgaben (Volllast, Teillast) zu charakterisieren (inkl. Feinstaubmessung). Ein weiteres Ziel war die Erprobung eines Regelkonzepts, für eine möglichst stabile Verbrennung während der stationären Hauptverbrennungsphase.

7 Konzeptumsetzung als Stückholzmusterkessel

7.1 Beschreibung des Stückholzmusterkessels

Die verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels wurde mit der in Abbildung 7.1 gezeigten Anlage durchgeführt, die vom Projektpartner BTT erstellt wurde. Diese wurde zum großen Teil aus Fertigungskomponenten aufgebaut. Als Grundgerüst kam dabei ein handelsüblicher Stückholzkessel vom Typ Logano S161 der Fa. Bosch Thermotechnik GmbH zum Einsatz. An diesem Stückholzkessel nach dem unteren Abbrandprinzip waren umfangreiche Modifikationen notwendig, um das Konzept eines optimierten Stückholzkessels umsetzen zu können. Feuerraumboden und Brennkammer wurden entfernt und durch den luftdurchströmten Rost ersetzt, so dass der obere Bereich fortan als Füllraum für das Holzreservoir und der untere Bereich als Ascheraum zur Verfügung stand. Die ursprüngliche Abgas- und Verbrennungsluftführung wurde still gelegt. Die neue Primärluftzufuhr erfolgte mittels Druckgebläse über viele gleichmäßig im Rost verteilte Bohrungen. Um einen seitlichen Abbrand zu ermöglichen, wurde in der linken Kesselwand eine Durchgangsöffnung geschaffen. Hieran konnte die verbrennungsoptimierte Sekundärbrennkammer angeflanscht werden. Die Sekundärluftzufuhr in die Sekundärbrennkammer erfolgte über ein weiteres Druckgebläse. Sowohl die Sekundärbrennkammer als auch Teile der Primärkammer wurden im Inneren mit Vermiculite wärmegeklämt.

Im Anschluss an die Sekundärbrennkammer geben die heißen Abgase den größten Teil ihrer Energie im Wärmetauscher an das zirkulierende Wasser ab. Ein kleinerer Teil der Energie wird bereits vorher, über die ebenfalls wassergekühlte Sekundärbrennkammer bzw. den wassergekühlten Füllraum, abgegeben. Im Wasserkreislauf sind Füllraum, Sekundärbrennkammer und Wärmetauscher hydraulisch in Reihe geschaltet. Für den notwendigen Unterdruck in dem Stückholzmusterkessel sorgt ein Abgasgebläse in Anschluss an den Wärmetauscher.

Die wichtigsten Eckdaten des Stückholzmusterkessels im Überblick sind:

- optimierter Feuerungsrost mit integrierter Primärluftverteilung für Holzscheite mit einer Kantenlänge von 330 mm und Abmessungen Füllraum (FR) 400x380x650 mm
- Nachverbrennung in optimierter Sekundärbrennkammer (SBK) mittels optimierter Sekundärluftzuführung
- Sekundärbrennkammerlänge 510 mm; Innendurchmesser 150 mm
- je ein separat ansteuerbares Druckgebläse für Primär- und Sekundärluftzufuhr, Abgasförderung über ein Abgasgebläse
- Wärmetauscher (WT).

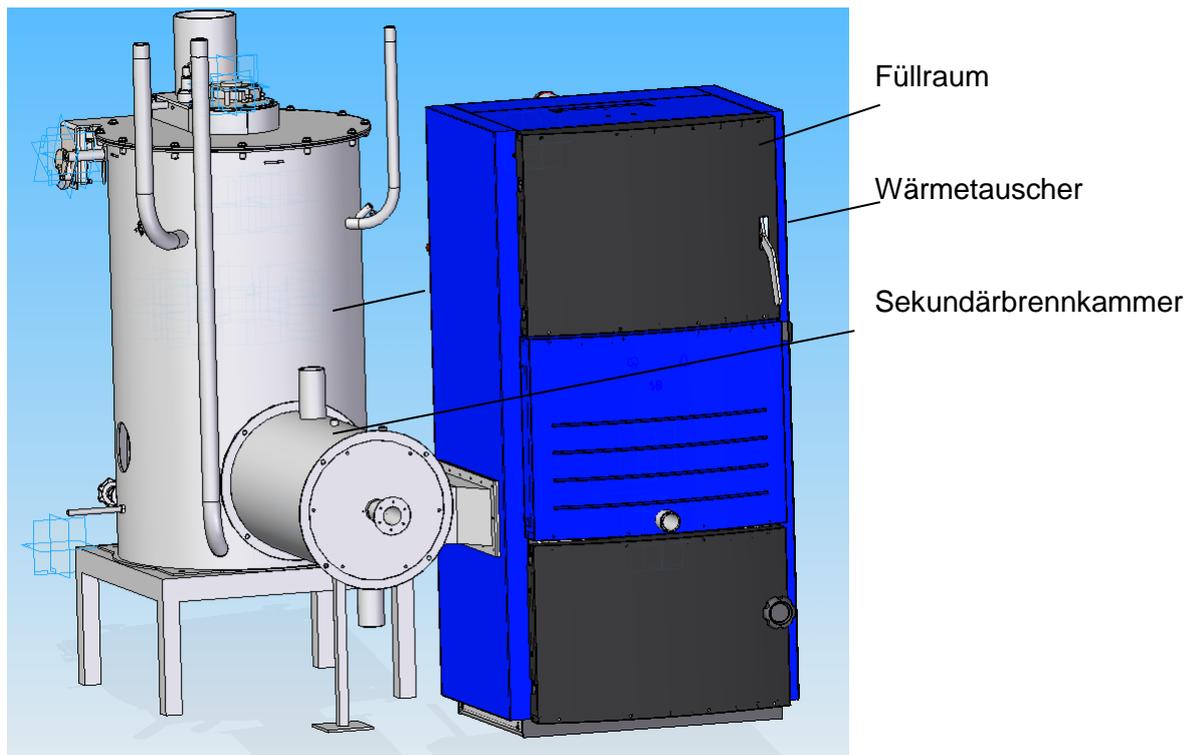


Abbildung 7.1 CAD-Modell des Stückholzmusterkessel

7.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels erfolgte auf einem Prüfstand des Instituts für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Abbildung 7.2 gibt einen Überblick des Prüfstandaufbaus und der Messstellen. Abgasseitig wurde der Stückholzmusterkessel an einen Kamin angeschlossen. Die Wärmeenergie des Wärmetauschers wurde über den Heizkreisvor- und Rücklauf einer Wärmesenke zugeführt, wobei der Rücklauf über eine Rücklaufanhebung bei konstanten 60°C gehalten wurde und die Temperaturspreizung 20 K betrug. Neben den energetischen Daten des Heizungssystems wurden anlagen- und abgasspezifische Messgrößen kontinuierlich und diskontinuierlich aufgenommen.

Die verwendete Messtechnik und die Prüfgaskonzentrationen sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Bei dem Stückholzmusterkessel wurde eine Verbrennungsregelung mit einem elektronisch angesteuerten Druckgebläse für die Sekundärluft realisiert. Als Sensorik kam ein CarboSen-Sensor der Fa. ESCUBE zur Detektion der oxidierbaren Gase (CO, H₂, VOC) zum Einsatz.

Für die verbrennungstechnische Charakterisierung der Anlage wurde die Einstellung der jeweiligen Verbrennungsluftmenge „manuell“ von Hand durchgeführt, um das Betriebs- und Emissionsverhalten in den einzelnen Verbrennungsphasen darzustellen. In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde dann eine „automatische“ Verbrennungsluftregelung in Form einer CO-Kantenregelstrategie umgesetzt.

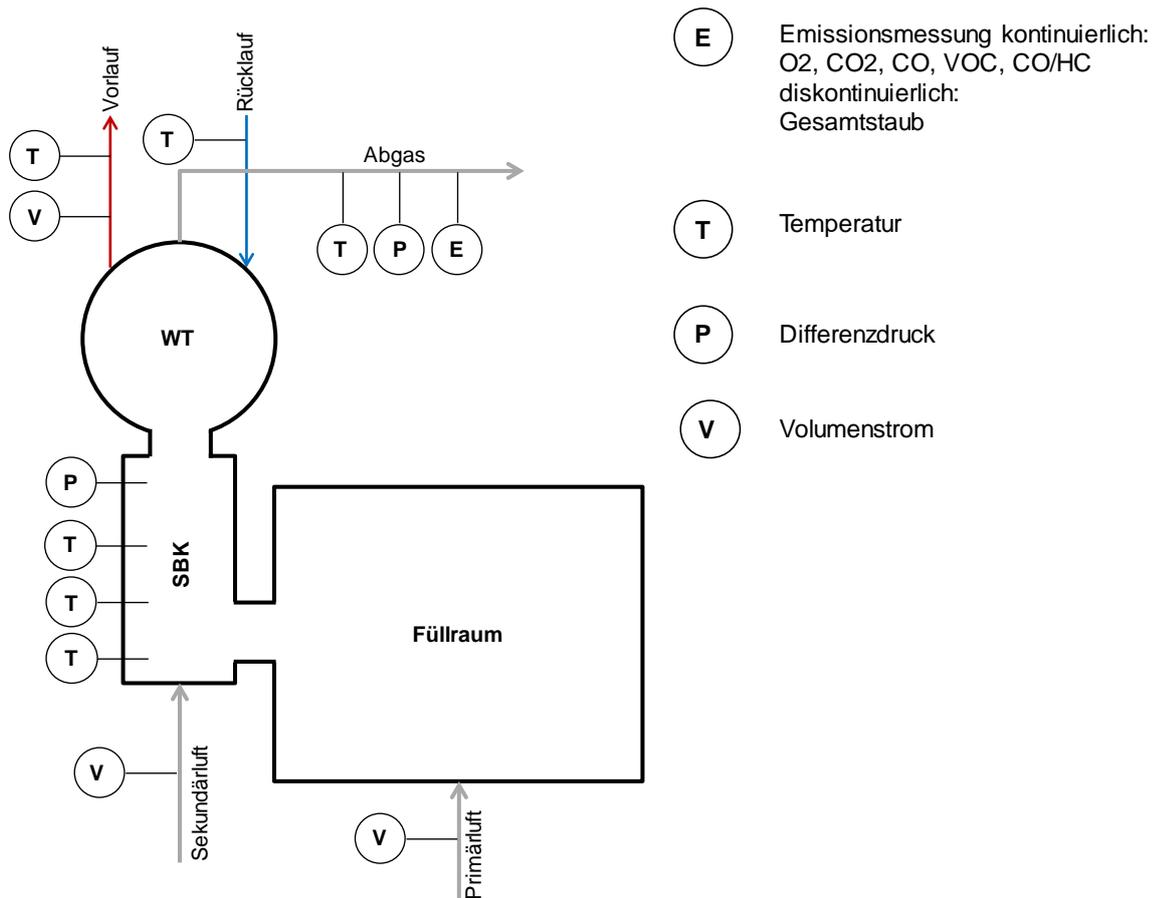


Abbildung 7.2 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellen an dem Stückholzmusterkessel

Tabelle 7.1 Messgrößen, Messprinzipien und die verwendeten Prüfgaskonzentrationen

Messgröße	Messgerät	Messprinzip	Prüfgas	Messbereich
CO ₂	Binos / Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	16,1 Vol%	0-20 Vol%
O ₂	Binos / Rosemount	Paramagnetismus	5,0 Vol%	0-25 Vol%
CO	Binos / Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	0,70 Vol%	0-3 Vol%
CO	Binos / Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	80,6 ppm	0-1.000 ppm
VOC	FID 123 / Testa	Flammen Ionisation Detektor	80,0 ppm	0-1.000 ppm
Gesamtstaub	Filterkopfgerät / Paul Gothe	Gesamtstaub nach VDI 2066		
Strömungsgeschw.	SS 20.260 / Schmidt	Hitzdraht		0,2-10 m/s
Temperatur	NiCr-Ni / Thermodirekt	Thermospannung		-270 bis 1.372 °C
Druck	Airflow Airflow	pneumatisch elektrisch		0-100 Pa 0-250 Pa

7.3 Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

Vor Beginn der Messungen wurde der Stückholzmusterkessel mit ca. 5 kg Holz angeheizt. Als Brennstoff kam handelsübliches Buchenholz mit einer Kantenlänge von 33 cm zum Einsatz. Erreichte die CO₂-Konzentration im Abgas einen Wert von 5 Vol% wurde durch Nachlegen einer abgewogenen Holzmenge von ca. 13-15 kg der Versuch gestartet. Der Buchenholzstapel wurde dabei quer zum Übergang in die Sekundärbrennkammer auf dem Rost platziert. Das jeweilige Versuchsende wurde bei einer CO₂-Konzentration im Abgas von ebenfalls 5 Vol% festgesetzt. Der Kaminzug lag konstant bei ca. 20 Pa. Für die verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels wurden Parameter ausgewählt, welche zum einen die pyrolytische Zersetzung und Vergasung des Kohlenstoffs und zum anderen die in der Gasphase ablaufenden Verbrennungsprozesse prinzipiell beeinflussen. Folgende Einflussfaktoren wurden ausgesucht, um die Betriebsweise des Stückholzmusterkessels zu variieren:

- zugeführte **Primärluftmenge**: Einflussfaktor für pyrolytische Zersetzung des Brennstoffes (freigesetzte Brenngasmenge)
- zugeführte **Sekundärluftmenge, Position und Art der Sekundärluftzuführung**: Einflussfaktor auf die Güte der Verbrennungsqualität.

Sämtliche Verbrennungsversuche - außer mit automatischer Verbrennungsregelung - wurden mit manuell geregelter Verbrennungsluftzufuhr durchgeführt. Dabei wurde versucht, den Restsauerstoffgehalt im Abgas so gering wie möglich zu halten, bei gleichzeitig minimaler CO-Konzentration.

Die kontinuierlich erfassten Größen (Abgaskonzentrationen und Temperaturen) wurden als 10-Sekunden Mittelwerte registriert. Die Staubprobenahmen wurden im Anbrand (ca. 2-3 min nach der Brennstoffaufgabe), während der Hauptverbrennungsphase und im Ausbrand gestartet und jeweils 30 min lang durchgeführt.

Folgende Definitionen wurden für die Unterscheidung der Verbrennungsphasen gemacht:

Anbrand: nach Brennstoffaufgabe bis die Anlage stabil eingeregelt wurde (ca. 5-10 min nach Brennstoffaufgabe)

Hauptverbrennung: Zeitraum zwischen Anbrand und Ausbrand

Ausbrand: ab einer CO-Konzentration von > 200 mg/m³ bis zum Erreichen der Grundglut.

Um die Emissionskonzentrationen zwischen verschiedenen Betriebszuständen vergleichbar zu machen, wurden sie auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% bezogen. Die Umrechnung erfolgt nach Formel (2) (siehe Kapitel 6.3).

7.4 Verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels

Während den Emissionsmessungen an dem Stückholzmusterkessel wurden verschiedene Parameter verändert, um deren Einfluss auf den Verbrennungsprozess zu untersuchen und so das charakteristische Verbrennungsverhalten des Stückholzmusterkessels zu beschreiben.

Grundsätzlich kann die Betriebsweise einer Stückholzfeuerung anhand der Feuerungswärmeleistung und dem Luftüberschuss beschrieben werden. Übergeordnete Qualitätskriterien sind der Wirkungsgrad und die Emissionen der Anlage, welche wiederum von der Betriebsweise abhängig sind.

Bei einer Holzfeuerung werden der Luftüberschuss und damit auch die Verbrennungsqualität über das Verhältnis von Luft- zu Brennstoffzufuhr bestimmt. Obwohl sich die Holzzufuhr einer Stückholzfeuerung nicht kontinuierlich steuern lässt, kann über die getrennte Zuführung von Primär- und Sekundärluft der Holzabbrand in gewissen Bereichen beeinflusst werden. Die Sekundärluft hat Einfluss auf die Verbrennungsqualität (Emissionen), wobei die Primärluftmenge bestimmt, wie viel Holz abgebrannt wird (Wärmeleistung).

7.4.1 Einfluss der Primärluftmenge

Stückholzkessel nach dem heutigen Stand der Technik sind ggf. in der Lage, über die Primärluftmenge ihre Leistung in einem Bereich von etwa 50 % bis 100 % zu modulieren. Bei einer anvisierten Wärmeleistung des Stückholzmusterkessels von 18 kW entspräche das einer minimalen Leistung von 9 kW. Um den Einfluss der Primärluft auf die Entgasungsreaktion und damit auf die Teillastfähigkeit des Stückholzmusterkessels zu untersuchen, wurde die Schrittantwort einer Primärluftreduzierung auf die Wärmeleistung gemessen. Hierzu wurde die Primärluftzufuhr im 10 Minuten Interwall schrittweise reduziert, die Wärmesenke wurde auf 20 kW eingestellt. Abbildung 7.3 zeigt die Reaktion der Verbrennung auf die Reduzierung der Primärluft.

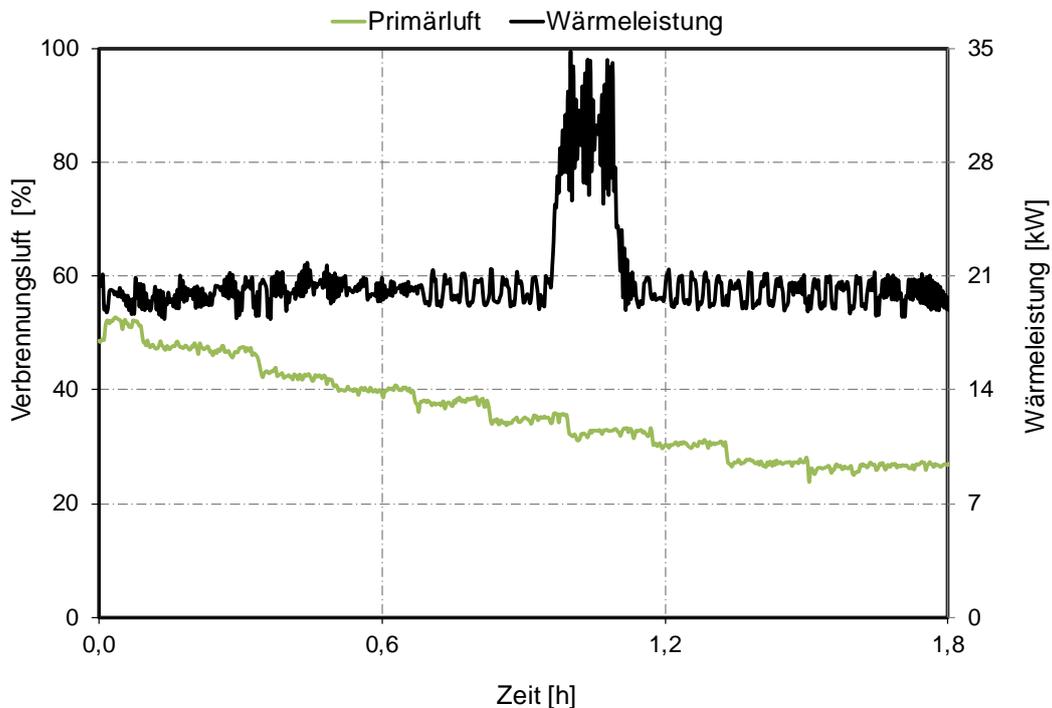


Abbildung 7.3 Reaktion der Wärmeleistung auf ein schrittweises reduzieren der Primärluftmenge

Dabei konnte kein eindeutiger Zusammenhang der Primärluft auf die Entgasungsreaktion und damit auf die Wärmeleistung festgestellt werden. Obwohl die Primärluft in den ersten 1,5 h um ca. 50 % reduziert wurde, konnte die Wärmeleistung nicht unter 20 kW abgesenkt werden. Ein weiteres Absenken der Primärluft hatte ein Erlöschen der Flamme zur Folge. Nach einer Stunde Versuchszeit musste die Wärmeleistung der Wärmesenke kurzzeitig auf 35 kW hochgesetzt werden, um ein Auslösen der thermischen Ablaufsicherung (Vorlauftemperatur > 95 °C) zu verhindern.

Ursache für dieses Verhalten des Stückholzmusterkessels könnte die Tatsache sein, dass durch den luftdurchströmten Rost und den zum größten Teil wärmegeprägten Füllraum eine extrem heiße Glut erzeugt wird, so dass über dem Glutbett aufgrund der Reaktionswärme eine intensive Vergasung stattfindet, welche durch eine primärseitige Reduzierung des Sauerstoffangebotes nicht steuerbar ist. Durch die Absenkung des Sauerstoffangebots unter ein bestimmtes Niveau wird der Sauerstoff bereits im Glutbett aufgebraucht, so dass die Oxidationsreaktionen ein abruptes Ende finden. Die weitere verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels wurde bei der kleinsten noch einstellbaren Leistung von ca. 23 kW bis 25 kW durchgeführt.

7.4.2 Ergebnisse der Gasmessungen

Abbildung 7.4 zeigt einen typischen Verlauf eines Abbrandes mit Buchenscheitholz und manueller Primär- und Sekundärluftregelung. Nach der Aufgabe von Brennstoff auf die Grundglut laufen verschiedene physikalische und chemische Prozesse gleichzeitig, allerdings mit unterschiedlicher Intensität ab. Zuerst ist eine Anbrennphase mit geringer CO₂-Konzentration und damit einhergehendem hohem Luftüberschuss erkennbar. Niedrigere Brennkammertemperaturen, eine nur lokal begrenzte Flammenausbildung und örtliche Zersetzungsreaktionen ohne Flammenausbildung führen in dieser Anbrandphase zu erhöhten Kohlenwasserstoff-, Partikel- und Kohlenmonoxidemissionen. In der Anbrennphase hat eine optimierte Durchmischung in der Sekundärbrennkammer nur einen geringen Einfluss, da hier die Temperatur für ein schnelles Durchzünden der schon freigesetzten Entgasungsprodukte fehlt. Die Zugabe großer Mengen von Sekundärluft ist in dieser Verbrennungsphase kontraproduktiv, da diese ein Kühlen der noch nicht gezündeten Entgasungsprodukte bewirkt. Für die Dauer und Höhe der Emissionen in der Anbrennphase sind ebenfalls die Grundglutmenge (diese bestimmt auch die momentane Temperatur im Füllraum) und die aufgelegte Brennstoffmasse (sowie die Stückgrößen des aufgelegten Brennstoffs) von großer Bedeutung. Bei einem guten Kontakt des Brennstoffes mit dem Glutbett und ausreichend großer Glutmenge kann ein schnelles Durchzünden erfolgen. Diese Varianz ist auch in den Mittelwerten der Kohlenmonoxidemissionen für den Anbrand in Tabelle 7.2 zu erkennen.

Im Anschluss an den Anbrand geht die Verbrennung in die stabile Hauptverbrennungsphase über (Abbildung 7.4), dabei steigen die Verbrennungstemperaturen in der Sekundärbrennkammer rasch an. Während der Hauptverbrennungsphase wurde die Primärluft relativ konstant gehalten, die Sekundärluft wurde je nach Entgasungsmenge angepasst (siehe Abbildung 7.5).

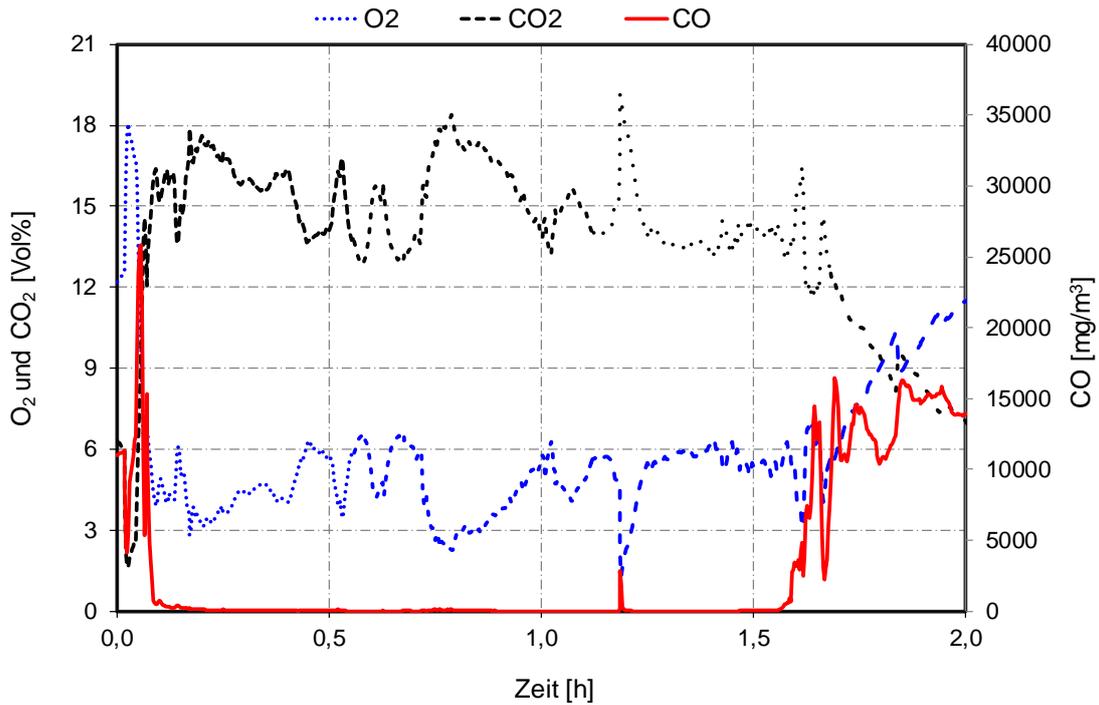


Abbildung 7.4 Zeitlicher Verlauf der Abgaskonzentrationen eines Abbrandes mit Anbrand-, Hauptverbrennungs- und Ausbrandphase beim Stückholzmusterkessel

Tabelle 7.2 Mittelwerte von Abbrandversuchen mit dem Stückholzmusterkessel

Abbrandversuche mit Holz						Gesamtabbrand	
	O ₂ Vol%	CO ₂ Vol%	CO * mg/m ³	VOC * mgC/m ³	Dauer h	WL kW	Holz kg
Anbrand	3,2	17,2	2.525	-	0,3		
Hauptverbrennung	4,5	15,8	23	-	1,7	>20	15
Ausbrand	7,7	12,4	1.139	-	0,9		
Anbrand	11,8	7,4	10.397	-	0,2		
Hauptverbrennung	5,3	15,0	23	-	1,7	25	14
Ausbrand	12,0	8,0	2.556	-	0,4		
Anbrand	7,2	11,9	23.038	-	0,2		
Hauptverbrennung	4,5	15,8	39	-	1,4	22	13,5
Ausbrand	8,4	11,6	1796		0,7		
Anbrand	4,1	16,0	1.535	493	0,2		
Hauptverbrennung	5,5	14,8	15	3	1,5	23	15
Ausbrand	7,5	12,4	4.219	152	0,8		

* Angaben bezogen auf 13 Vol% O₂
 grün optimale Einstellung für den Kessel
 WL Wärmeleistung

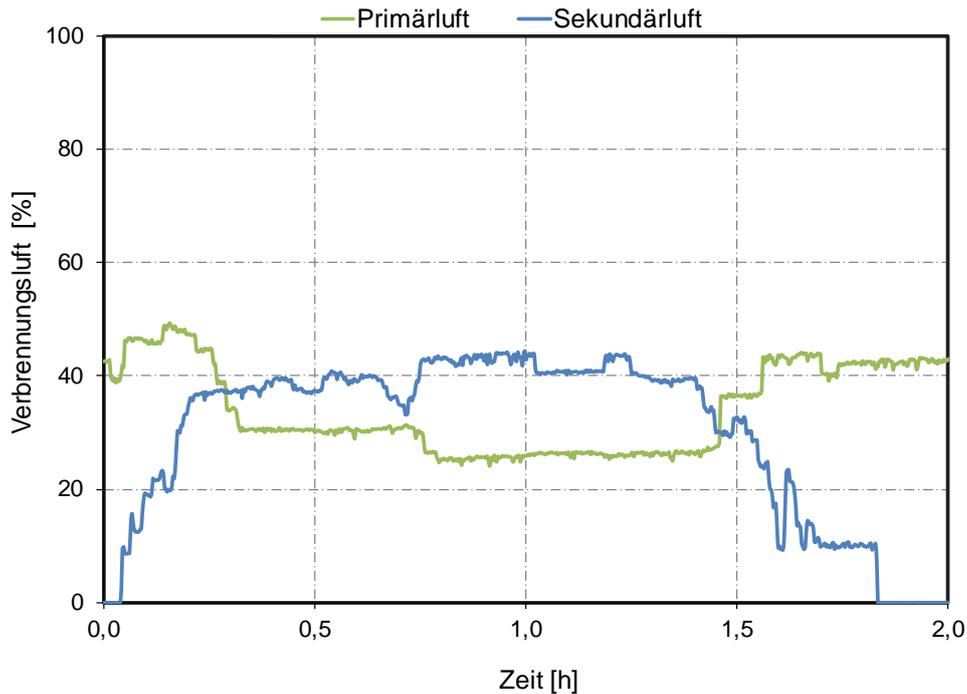


Abbildung 7.5 Zeitlicher Verlauf der zugeführten Verbrennungsluft während eines Abbrandes mit Anbrand-, Hauptverbrennungs- und Ausbrandphase

Ab ca. 800 °C in der Sekundärbrennkammermitte (siehe Abbildung 7.6) ist die Temperatur ausreichend hoch, um durch die Zugabe von Sekundärluft und der optimalen Vermischung der Reaktionspartner in der Sekundärbrennkammer eine sehr emissionsarme Verbrennung zu realisieren. In dieser Hauptverbrennungsphase betragen die Mittelwerte der Kohlenmonoxidemissionen niedrige 23 mg/m³ bis 39 mg/m³ (vgl. Tabelle 7.2 Mittelwerte von Abbrandversuchen mit dem Stückholzmuster). Aufgrund der optimierten Durchmischung in der Sekundärbrennkammer kann die Verbrennung bei einem sehr geringen Luftüberschuss und bei stabilen Bedingungen stattfinden. Noch niedrigere Emissionswerte werden bei optimaler Einstellung des Kessels erreicht (ausführlicher beschrieben in Kapitel 7.4.3), der Mittelwert der CO-Konzentration beträgt dann nur noch 15 mg/m³, die Kohlenwasserstoffkonzentration (VOC) liegt bei 3 mg/m³ (vgl. Tabelle 7.2 Mittelwerte von Abbrandversuchen mit dem Stückholzmuster). Im optimalen Einstellpunkt des Stückholzmusterkessels wurden auch die Partikelmessungen durchgeführt (vgl. Kapitel 7.4.4).

Gegen Abbrandende steigt die CO-Konzentration wieder an. Bei der Verbrennung von Holz erfolgt dies innerhalb kürzester Zeit (siehe auch Abbildung 7.4). Hierbei geht die Verbrennung von einer Gasphasenverbrennung in die Feststoffverbrennung der Holzkohle über und es stellt sich nach Boudouard ein temperaturabhängiges Gleichgewicht zwischen CO₂ und CO ein (vgl. Abbildung 7.7). Durch erhöhen der Temperaturen im Glutbett verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung CO, welches allerdings auf Grund zu geringer Temperaturen im Feuerraum nicht mehr zündet bzw. nicht mehr zu CO₂ oxidieren kann. Daher lassen sich die CO-Emissionen bei Abbrandende nur durch Sekundärmaßnahmen, wie z.B. durch den Einsatz eines Oxidationskatalysators, reduzieren. Eine Verbrennungsregelung oder eine optimierte Luftführung kann gegen Abbrandende keinen Einfluss auf die CO-Emissionen mehr nehmen.

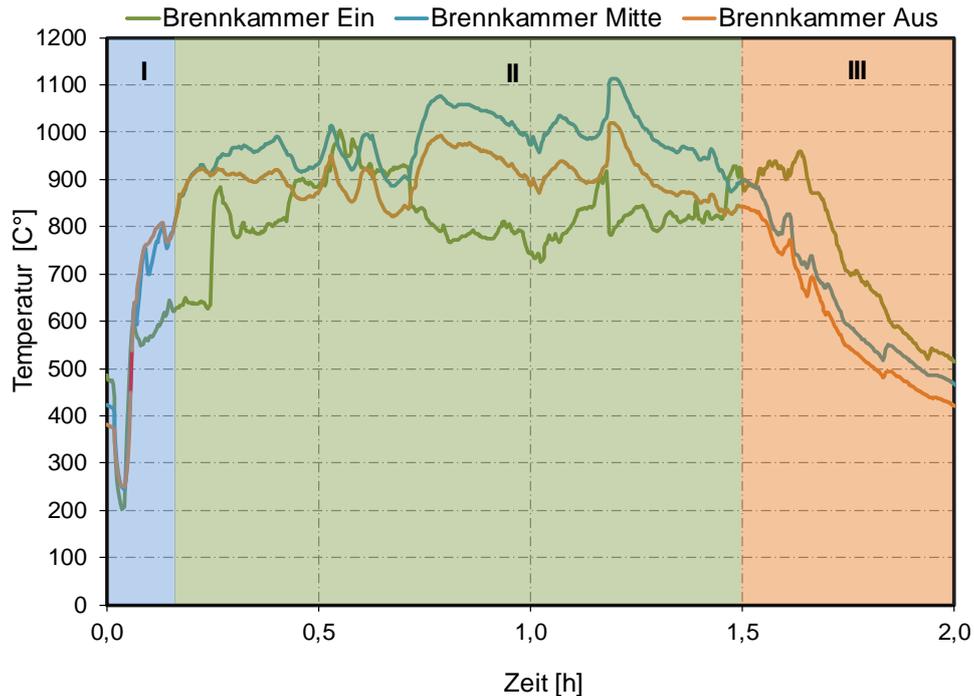


Abbildung 7.6 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen in der Sekundärbrennkammer während der Anbrand- (I), Hauptverbrennungs- (II) und Ausbrandphase (III)

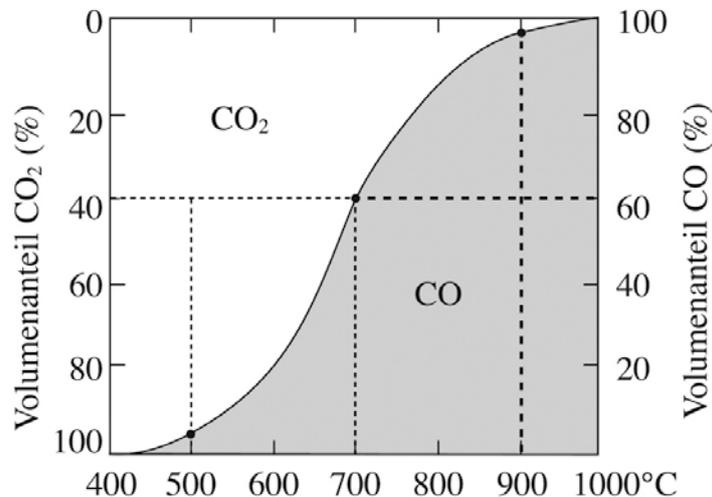


Abbildung 7.7 Boudouard-Gleichgewicht [Gerthsen, 2006]

Obwohl dem Stückholzmusterkessel in der Ausbrandphase immer die gleiche Menge Primärluft zugeführt wurde, sind die Mittelwerte der CO-Konzentrationen doch unterschiedlich hoch. Dabei wurde die Beobachtung gemacht, dass am Abbrandende noch Brennstoffstücke übrig bleiben, die thermisch noch nicht vollständig zersetzt wurden. Diese Brennstoffreste zersetzen sich thermisch während der Ausbrandphase noch weiter, werden aber aufgrund des geringen Brennstoffumsatzes und der geringeren Sekundärbrennkammertemperatur nicht vollständig oxidiert. Liegen diese Brennstoffreste mittig oder nahe der rechten Füllraumwand sind die Emissionen höher, liegen sie dagegen direkt vor dem Übergang in die Sekundärbrennkammer, kann die relativ kurze Flamme noch in die Sekundärbrennkammer gelangen, was wiederum geringere CO-Emissionen zu Folge hat.

7.4.3 Einfluss der Sekundärluftmenge

Das Konzept eines extrem emissionsarmen Stückholzkessels wurde basierend auf dem Grundgedanken entwickelt, die Vermischung der Entgasungsprodukte mit der zugeführten Sekundärluft in der Sekundärbrennkammer zu optimieren. Dabei soll die Sekundärluft die Vermischung aktiv unterstützen. Um die Wirkung der Sekundärluft zu überprüfen wurde diese soweit reduziert, bis aufgrund eines Sauerstoffmangels ein deutlicher Anstieg der CO-Konzentrationen erfolgte (Detektion der CO-Kante).

Des Weiteren wurde der Einfluss der Sekundärluftposition auf die Verbrennung innerhalb der Brennkammer untersucht. Abschließend wurde die Wirkung der optimierten Sekundärluftzuführung auf die Verbrennungsqualität selbst untersucht, hierzu wurden Versuche mit und ohne optimierte Sekundärluftzuführung durchgeführt.

Die CO/O₂-Charakteristik in Abbildung 7.8 zeigt den Einfluss des Luftüberschusses auf die Vollständigkeit der Verbrennung beim Stückholzmusterkessel während der Hauptverbrennungsphase. Die Verbrennung in der Sekundärbrennkammer erreicht über einen breiten Luftüberschussbereich (O₂ < 7 Vol% bis O₂ > 2,5 Vol%) konstant niedrige Emissionswerte und damit eine annähernd vollständige Verbrennung. Die Tatsache, dass die vollständige Verbrennung auch bei sehr niedrigem Luftüberschuss realisiert werden konnte (O₂ im Abgas ~ 2,5 Vol%), kann als Beleg für die sehr gute Vermischungsqualität der Sekundärluft mit den brennbaren Gasen herangezogen werden. Um einen guten Wirkungsgrad zu erreichen, aber auch einen gewissen Puffer in Richtung der CO-Kante zu haben, wird der optimale Betriebspunkt des Stückholzmusterkessels bei 3,5 - 4,5 Vol% O₂ im Abgas gesehen. Unterhalb von 2,5 Vol% O₂ treten in der Sekundärbrennkammer mehr oder weniger ausgeprägte Zonen mit Sauerstoffmangel auf, wodurch die Konzentrationen von Produkten unvollständiger Verbrennung im Abgas zunehmen.

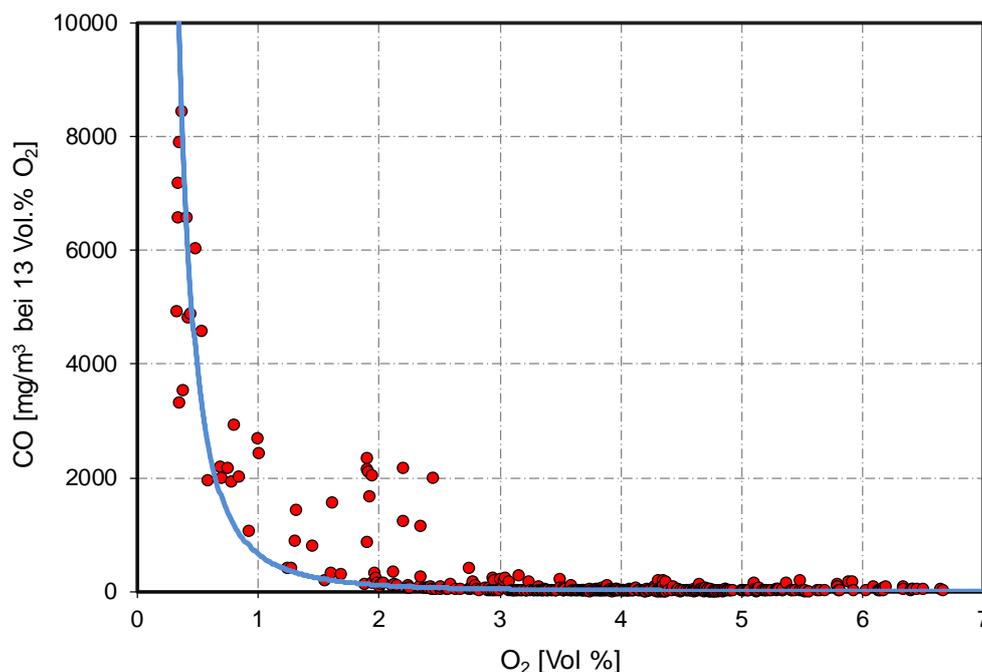


Abbildung 7.8 Abhängigkeit der Kohlenmonoxidkonzentration vom Rest-O₂ im Abgas während der Hauptverbrennungsphase beim Stückholzmusterkessel

Die Position und damit auch der Zeitpunkt des Zusammentreffens der Sekundärluft mit den brennbaren Gasen aus der Primärkammer haben einen Einfluss auf die Vollständigkeit der Verbrennung. Erfolgt die Einmischung der Sekundärluft zu spät, hat sich die Verbrennung bereits etwas abgekühlt oder die Verweilzeit der Reaktionspartner reicht für eine gute Durchmischung in der Brennkammer nicht mehr aus.

Daher erfolgt die Zumischung der Sekundärluft bei Stückholzkesseln nach dem Stand der Technik direkt in der Flammenwurzel. Eine Sekundärluftzuführung direkt in die Sekundärbrennkammer hat daher Innovationscharakter. Um den Einfluss der Sekundärluftposition untersuchen zu können, wurden Versuche mit unterschiedlichen Sekundärluftpositionen durchgeführt. Die drei untersuchten Sekundärluftpositionen sind in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3 **Untersuchte Sekundärluftpositionen innerhalb der Sekundärbrennkammer**



Tabelle 7.4 zeigt die Ergebnisse zum Einfluss der Sekundärluftposition auf die mittleren Gaskonzentrationen während der Hauptverbrennungsphase beim Stückholzmusterkessel. Mit Sekundärluftposition 2 wurden die besten Verbrennungswerte erreicht, die mittlere CO-Konzentration beträgt hier nur noch 15 mg/m³.

Tabelle 7.4 **Einfluss der Sekundärluftposition auf die Gaskonzentrationen während der Hauptverbrennungsphase beim Stückholzmusterkessel**

Abbrandversuche mit Holz	Gesamtabbrand					
	O ₂ Vol%	CO ₂ Vol%	CO * mg/m ³	Dauer h	WL kW	Holz kg
Hauptverbrennung SL-Position 1	4,9	15,4	43	1,6	23	14,9
Hauptverbrennung SL-Position 2	4,8	15,5	15	1,4	23	13,2
Hauptverbrennung SL-Position 3	4,5	15,8	39	1,4	22	13,5

* Angaben bezogen auf 13 Vol% O₂

WL Wärmeleistung

Durch die optimierte Sekundärluftzuführung wird die Durchmischung der Verbrennungsluft mit brennbaren Gasen in der Sekundärbrennkammer unterstützt. Um die Wirksamkeit dieser Maßnahme zu überprüfen, wurden Versuche mit und ohne optimierte Sekundärluftzuführung durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Durchmischung der Brenngase mit der

Sekundärluft positiv unterstützt wird. Der Mittelwert der CO-Konzentration während der Hauptverbrennungsphase ist ohne optimierte Zuführung ca. 4-fach höher (siehe Abbildung 7.9).

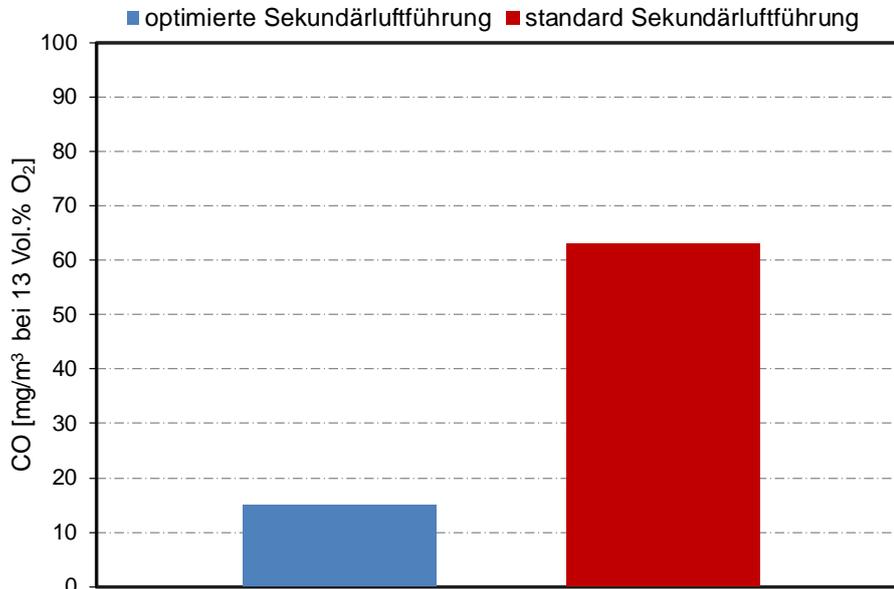


Abbildung 7.9 CO-Konzentration mit und ohne optimierter Sekundärluftzuführung während der Hauptverbrennungsphase beim Stückholzmusterkessel

7.4.4 Ergebnisse der Partikelmessungen

Für die gravimetrische Staubmessung wurde ein Teil des Abgasstroms isokinetisch über eine Sonde abgesaugt und über einen Quarzfaserfilter geleitet. Nach der Messung wird die Sonde bis zum Quarzfilter mit einem Isopropanol / Aceton-Gemisch gespült, um Ablagerungen in der Sonde mit zu erfassen. Diese Spülung wird anschließend eingedampft und ausgewogen. Aus der Gewichtszunahme des Filters, dem Gewicht der Spülung und dem abgesaugten Volumenstrom bei der Messung wird der Staubgehalt im Abgas bestimmt. Dieses Messverfahren entspricht der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [VDI-Richtlinie 2066, 2006].

Bei der Verbrennung von Holz kommt es zu verschiedenen Partikelbildungsmechanismen, welche in Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen unterschiedlich stark zu den Gesamtstaubemissionen beitragen. Der Fest-Dampf-Partikel-Pfad ist hierbei der wichtigste Bildungsmechanismus. Hierbei verdampfen die Komponenten im Glutbett ($> 600\text{ °C}$) und bilden bei der Temperaturabnahme im Abgas, über Nukleation, Koagulation und heterogene Kondensation Partikel. Bei den so entstandenen Partikeln handelt es sich um anorganische Salze, im Größenbereich von $0,1\text{ }\mu\text{m}$ ($=100\text{ nm}$), hauptsächlich um Kaliumverbindungen wie K_2SO_4 und KCl .

Läuft die Verbrennung unvollständig ab, werden zusätzlich Kohlenstoff-Partikel mit dem Abgas emittiert, die bei der pyrolytischen Zersetzung freigesetzt und anschließend nicht vollständig oxidiert wurden (z.B. Teere und Ruß). Die anorganischen Salze, welche auf dem Fest-Dampf-Partikel-Pfad entstehen bilden daher eine Grundfracht an Partikeln die auch bei einer annähernd vollständigen Verbrennung immer emittiert wird. Allerdings kann auch die

Verdampfung der anorganischen Holzkomponenten aus dem Fest-Dampf-Partikel-Pfad beeinflusst werden. Einen Einfluss auf die Verdampfung hat die Menge zugeführter Primärluft bzw. des zugeführten Sauerstoffs in das Glutbett [Nussbaumer, 2003]. Hohe Sauerstoffkonzentrationen im Glutbett können zudem zu örtlich höheren Temperaturen führen und damit den Verdampfungsprozess begünstigen.

In Tabelle 7.5 sind die Ergebnisse der Partikelmessungen für die einzelnen Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand aufgelistet. Die Probenahmedauer betrug jeweils 30 min, wobei die Probenahme im Anbrand ca. 2 min nach Brennstoffauflage gestartet wurde. Auffällig ist, dass die Partikelemissionen in der ersten halben Stunde nach Brennstoffauflage (Anbrandphase) mit $9,6 \text{ mg/m}^3$ bzw. $10,5 \text{ mg/m}^3$ (bei 13 Vol% O_2) am geringsten sind. Mit $12,8$ und $12,0 \text{ mg/m}^3$ (bei 13 Vol% O_2) während der stabilen Hauptverbrennungsphase steigen die Partikelemissionen etwas an. Die höchsten Partikelemissionen wurden während der Ausbrandphase gemessen. Außerdem unterscheiden sich die zwei ermittelten Partikelkonzentrationen im Ausbrand mit $22,4 \text{ mg/m}^3$ und $37,3 \text{ mg/m}^3$ (bei 13 Vol% O_2) relativ stark.

Nach aktuellem Erkenntnisstand wäre zu erwarten gewesen, dass die höchsten Partikelemissionen in der Anbrandphase, aufgrund der teilweise noch unvollständigen Verbrennung und der damit verbundenen Entstehung von Kohlenstoffpartikeln, auftreten. In der darauffolgenden Hauptverbrennungsphase wären dann geringere und beim reinen Holzkohleabbrand in der Ausbrandphase sehr geringe Partikelkonzentrationen zu erwarten gewesen. Die Tatsache, dass bei dem vorliegenden Stückholzmusterkessel die Primärluft vollflächig und gleichmäßig durch das Glutbett geführt wird, sorgt für ein hohes Sauerstoffangebot und entsprechend hohen Temperaturen im Glutbett. Daher dürfte der beschriebene Fest-Dampf-Partikel-Pfad der anorganischen Salze die dominierende Partikelquelle des Stückholzmusterkessels sein. Dies würde auch die niedrigen Partikelemissionen in der Anbrandphase erklären. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich nur wenig Glut auf dem Feuerungsrost und die Glutbetttemperaturen sind durch das frisch aufgelegt Holz abgesunken, so dass weniger anorganische Salze wie Kalium- und Calciumverbindungen in leicht flüchtige Verbindungen umgewandelt werden. In der Anbrandphase trägt auch die Bildung von organischen Kohlenstoff-Partikeln einen gewissen Anteil zur Gesamtstaubmasse mit bei, wie die schwarze Färbung des Filtermaterials in Tabelle 7.5 erkennen lässt.

In der stationären Hauptverbrennungsphase hat sich ein hochreaktives und mehrere Zentimeter hohes Glutbett aufgebaut. Die Partikelemissionen in dieser Phase der vollständigen Verbrennung bestehen hauptsächlich aus kondensierten anorganischen Verbindungen. Auch der ockerfarbene Quarzfilter der Ausbrandphase deutet darauf hin, dass die Partikelemissionen definitiv nicht aus unverbrannten Bestandteilen herrühren.

Während des Ausbrands ist das Glutbett am höchsten, zudem wurde die Primärluftmenge erhöht (siehe Abbildung 7.5), um diese Phase möglichst kurz zu halten. Dies sorgt für eine erhöhte Verdampfungsrate anorganischer Partikel und erklärt, warum die Partikelkonzentrationen in dieser Phase der Verbrennung des Stückholzmusterkessels am höchsten sind.

Tabelle 7.5 Partikelkonzentrationen während der jeweiligen Verbrennungsphasen zweier Abbrände beim Stückholzmusterkessel

Verbrennungsphase	O ₂ Vol%	CO ₂ Vol%	CO * mg/m ³	Partikel * mg/m ³	Dauer min	Quarzfilter der 2. Staubprobenahme
1. Anbrand	3,8	16,5	82	10,5	30	
2. Anbrand	4,2	16,0	312	9,6	30	
1. Hauptverbrennung	4,8	15,5	22	12,8	30	
2. Hauptverbrennung	4,4	15,9	8	12,0	30	
1. Ausbrand	7,9	12,1	3531	22,4	30	
2. Ausbrand	7,4	11,8	7583	37,3	30	

* Angaben bezogen auf 13 Vol% O₂

7.4.5 Einfluss der Verbrennungsregelung

Bei modernen Stückholzkesseln nach dem Stand der Technik kommt als Verbrennungsregelung in der Regel eine Lambda-Regelung zum Einsatz, wobei die Messung des Luftüberschusses mittels einer Lambda-Sonde erfolgt. Der Luftüberschuss wird dabei über die Verbrennungsluftmenge (Primär- und Sekundärluftmenge) auf einen fest eingestellten Sollwert (Leistungsabhängig) geregelt. Um Luftmangelsituationen zu vermeiden, muss der Sollwert in der Praxis eher zu hoch bemessen werden. Dadurch wird eine Einbuße beim Wirkungsgrad in Kauf genommen. Da der Luftüberschuss im Abgas keinen direkten Aufschluss auf die Güte der Verbrennung gibt, bleiben Phasen unvollständiger Verbrennung, z.B. hervorgerufen durch schwankende Brennstoffqualitäten oder sich verändernde Bedingungen im Feuerraum, unberücksichtigt.

Bei der umgesetzten CO-Kantenregelung wird die Summe der unverbrannten Bestandteile des Abgases von einem Sensor vom Typ CarboSen der Firma Escube erfasst. Das Signal erlaubt einen direkten Rückschluss auf die Güte der Verbrennung. Besteht ein Luftüberschuss und wird die Verbrennungsluftmenge kontinuierlich über das geregelte Sekundärluftgebläse reduziert, bis der Übergang von vollständiger zu unvollständiger Verbrennung durch einen exponentiellen Anstieg der unverbrannten Abgasbestandteile sichtbar wird (siehe Abbildung 7.10). Anschließend muss die Regelung wieder einen Schritt aus diesem Bereich herausfahren, so dass sich die Verbrennung wieder im optimalen Arbeitspunkt (geringe CO-Konzentration bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad) befindet (gekennzeichnet durch die senkrechte gestrichelte Linie). Das in diesem Fall für Holzfeuerungen umgesetzte Regelkonzept ist basierend auf einer parameterfreien Statistik und wurde für den Einsatz an einem Pelletofen getestet [Diez, 2011].

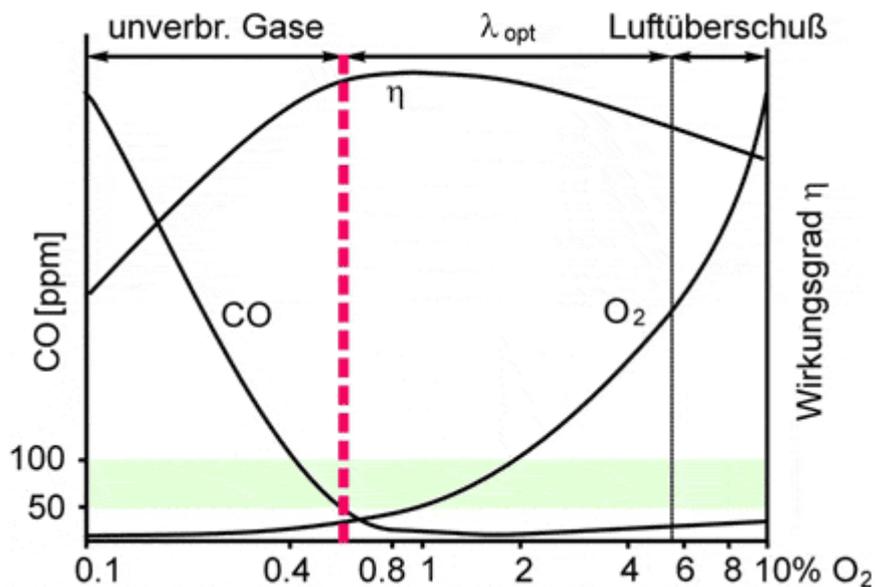


Abbildung 7.10 Zusammenhang zwischen Emissionskante, Luftüberschuss und Wirkungsgrad [Hammer et al., 2008]

Die CO-Kantenregelstrategie wurde während der Hauptverbrennungsphase am Stückholzmusterkessel getestet. In Abbildung 7.11 ist der zeitliche Verlauf der gemessenen Gaskonzentrationen im Abgas mit Regelung dargestellt. Dabei wurde die Sekundärluft aus einem gewissen Luftüberschuss heraus bis zum Erreichen der Emissionskante reduziert. Die Emissionskante liegt bei ca. 2,5 Vol% O₂ (siehe Kapitel 7.4.3).

Da das Regelkonzept noch relativ träge eingestellt war, konnte ein weiteres Absinken des Luftüberschusses nicht verhindert werden, so dass sich die Verbrennung im absoluten Luftmangel befand und kein Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung stand, was mit einem starken CO-Anstieg verbunden war.

Das Messprinzip des CarboSen-Sensors beruht auf der Festkörperelektrolyse und arbeitet nach dem Nicht-Nernstschen Prinzip, wobei Sauerstoff im Abgas nötig ist um ein Messsignal erzeugen zu können. Befindet sich die Verbrennung im Luftmangel (O₂ im Abgas < 1 Vol%), geht das Sensorsignal auf den Wert Null zurück. Der Regelalgorithmus geht nun fälschli-

cherweise von sehr guten Verbrennungswerten aus, so dass eine weitere Reduzierung der Sekundärluft erfolgt. Hier wurde die Regelung abgebrochen und der Luftüberschuss manuell erhöht. In dem dargestellten Messzeitraum wurde die Emissionskante insgesamt sechsmal angefahren, viermal davon musste der Regelvorgang aufgrund absoluten Luftmangels unterbrochen werden. Dies verdeutlicht, dass für eine funktionierende CO-Kantenregelstrategie am Stückholzmusterkessel mit dem CarboSen-Sensor eine zweite Messgröße, wie z.B. der Sauerstoffgehalt im Abgas, oder andere Maßnahmen (z.B. Anpassung des Regelalgorithmus) notwendig sind.

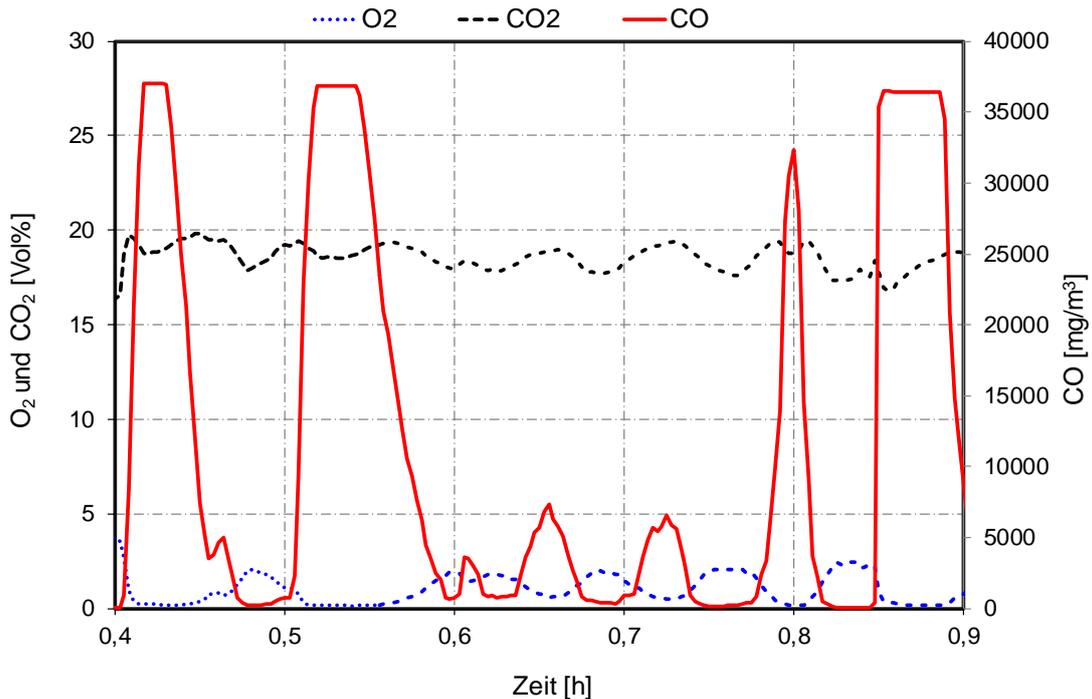


Abbildung 7.11 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Emissionen beim Einsatz der CO-Kantenregelstrategie mit CarboSen-Sensor als Messglied

Um die Regelstrategie trotzdem anwenden zu können, wurde als Regelgröße das Signal des CO-Analysators verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.12 zu sehen. Die Regelung ist nun in der Lage, die CO-Kante sicher zu erkennen und auch wieder aus ihr herauszufahren. Allerdings ist die Regelung noch nicht in der Lage die Verbrennung konstant im optimalen Arbeitspunkt zu halten, so dass die gemessenen Emissionen noch stärker schwingen. Für einen vollkommen automatisierten Regelungsbetrieb mit konstant niedrigen Emissionen muss der Regelalgorithmus noch weiter optimiert werden und auch in der Lage sein, die Anbrand- und Ausbrandphasen, sowie Teillastzustände sicher und Emissionsarm regeln zu können.

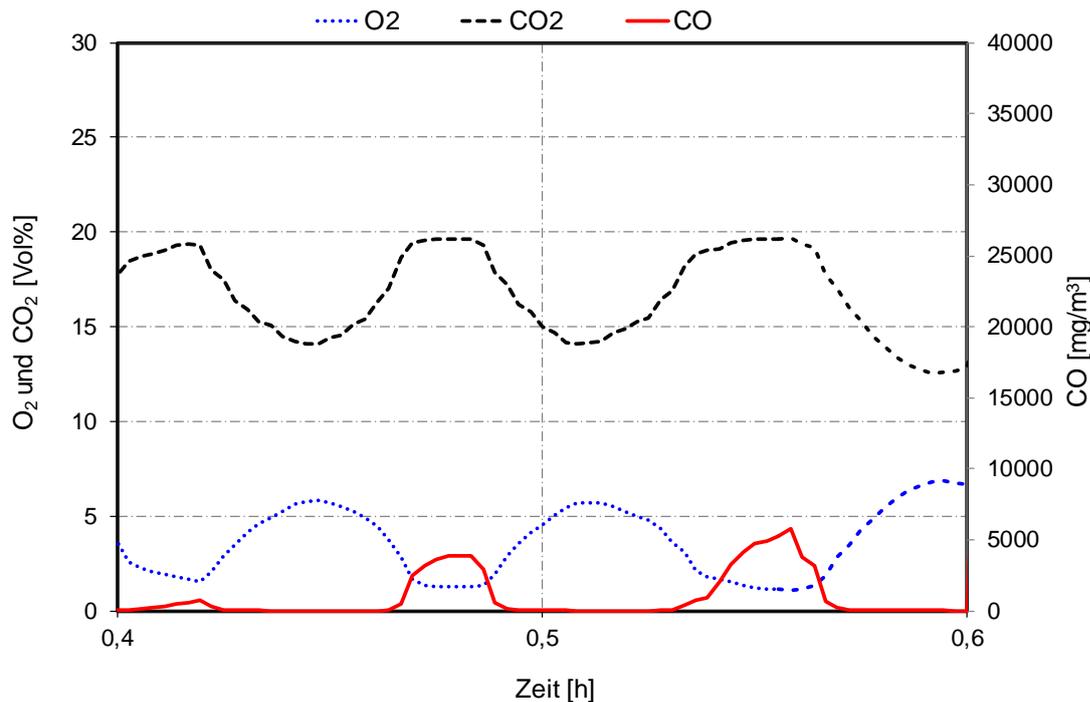


Abbildung 7.12 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Emissionen beim Einsatz der CO-Kantenregelstrategie mit CO-Gasanalysator als Messglied

Die vom IFK hier erstmals an einem Stückholzkessel untersuchte CO-Kantenregelstrategie unter Einsatz eines CarboSen-Sensors verfolgt einen völlig anderen Ansatz, als das vom Projektpartner ISIS propagierte Regelkonzept. Die wesentlichen Unterschiede sind, dass es sich bei der CO-Kantenregelung um einen geschlossenen Regelkreis handelt sowie keine Absolutwerte des CarboSen-Sensors und keine umfangreichen Parameterstudien zur Anpassung von Kenngrößen notwendig sind. Allerdings zeigen diese ersten Versuche, dass der Regelalgorithmus für die CO-Kantenregelung noch verbessert und ggf. eine zweite Messgröße für ein sicheres Betriebsverhalten des Reglers notwendig sein könnte.

7.4.6 Schlussfolgerungen

An dem entwickelten Stückholzmusterkessel wurden im Bereich der Entgasungszone (Füllraum) und der Nachverbrennungszone (Sekundärbrennkammer) Primärmaßnahmen umgesetzt, um den Schadstoffausstoß solcher Anlagen im stationärem Dauerbetrieb, aber auch im praxisnahen Betrieb deutlich zu senken. Durch die homogene Primärluftverteilung konnte eine sehr gleichmäßige Entgasung des Holzes erreicht werden. Hohlbrände, wie sie bei marktüblichen Anlagen oft auftreten, konnten nicht beobachtet werden. Ein modulierender Betrieb und das Einstellen von Teillastzuständen waren mit dieser Primärluftführung allerdings nicht möglich. Es konnte keine Korrelation zwischen der Entgasungsmenge (Leistung) und der Primärluft festgestellt werden.

In der Anbrand- und insbesondere in der Ausbrandphase kommt es aufgrund der physikalischen Grenzen bei der thermochemischen Umwandlung von Holz zu erhöhten Emissionen, die sich durch Primärmaßnahmen kaum beeinflussen lassen. Zumindest beim Anbrand konnte ein schnelles Durchzünden erreicht werden, so dass die Anlage schnell in die stationäre Hauptverbrennungsphase übergeht. In der Anbrandphase gibt es bedingt beeinflussba-

re Faktoren, wie die aufgegebenen Holzmenge, oder die Morphologie der Holzstücke und deren Kontakt zur Grundglut, welche die Anbranddauer beeinflussen. Durch ein heißes Glutbett und die optimale Menge Primärluft kann diese Phase aber auf ein Minimum reduziert werden.

Der Anstieg der CO-Konzentrationen im Ausbrand, nach dem Übergang von den Gasphasenreaktionen zu den Gas-Feststoff-Reaktionen des Holzkohleabbrandes, kann durch primärseitige Maßnahmen nur wenig beeinflusst werden. Mit einem kompakten, am Übergang zur Nachbrennkammer konzentrierten Glutbett kann die Emissionshöhe allerdings begrenzt werden. Die Schadstoffemissionen im Ausbrand lassen sich allerdings nur durch Sekundärmaßnahmen weitgehend reduzieren.

Die Ergebnisse des handgeregelten Stückholzmusterkessels mit dem umgesetzten Konzept eines neuen Feuerungsrostes und einer Sekundärbrennkammer mit optimierter Vermischung haben gezeigt, dass in der stationären Hauptverbrennungsphase sehr niedrige Emissionswerte bei den gasförmigen Abgaskomponenten erreicht werden. Obwohl der Bildungsmechanismus anorganischer Staubpartikel bei der vorliegenden Rostkonstruktion (sauerstoffreiches und heißes Glutbett) eher begünstigt wird, liegen die partikelförmigen Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau. Die vorgeschriebenen Grenzwerte der 1. BImSchV für die 2. Stufe für Kohlenstoffmonoxid und Staub konnten deutlich unterschritten bzw. klar eingehalten werden.

Die ambitionierten Emissionszielwerte (siehe Tabelle 1) wurden im stationären Dauerbetrieb (Wärmeleistung ca. 22-25 kW) für CO und VOC erreicht. Die Emissionsziele bezüglich der partikelförmigen Emissionen wurden nicht ganz erreicht. Gegenüber den Prüfstandsmittelwerten von Stückholzkesseln nach dem Stand der Technik konnten die Emissionen aber deutlich abgesenkt werden (Abbildung 7.13).

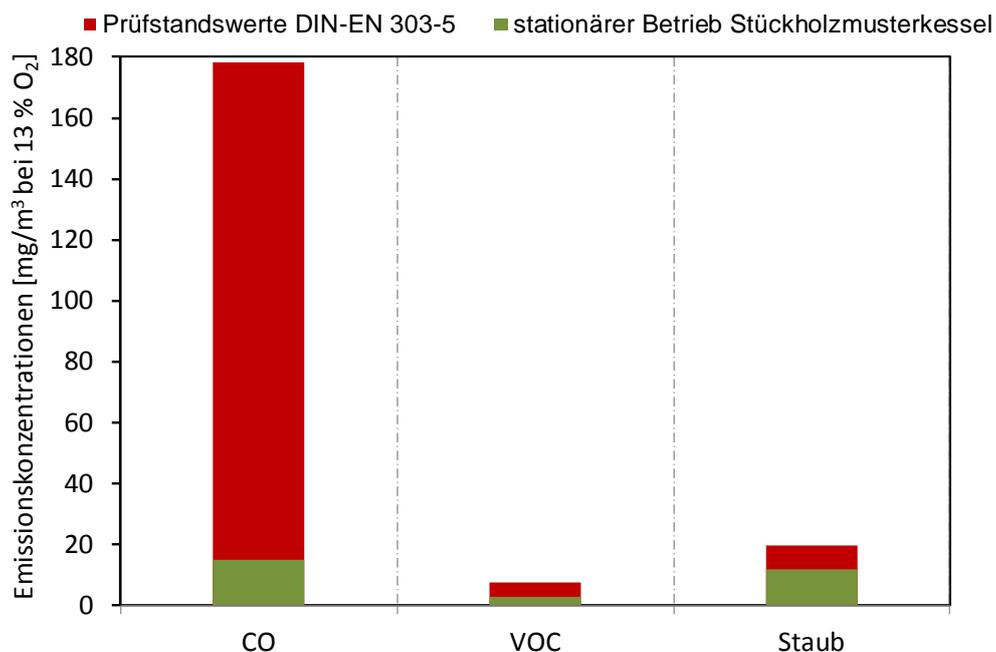


Abbildung 7.13 Vergleich der Emissionskonzentrationen von gemittelten Prüfstandswerten nach dem Stand der Technik (siehe Tabelle 4.3) mit dem Stückholzmusterkessel

Die gesetzten Emissionsziele eines simulierten Praxisbetriebs des Stückholzmusterkessels konnten aufgrund der nicht möglichen Leistungsmodellierung nicht verifiziert werden.

Durch den Einsatz einer Verbrennungsregelung in Form der CO-Kantenregelstrategie konnte gezeigt werden, dass dieses Regelkonzept prinzipiell für Stückholzfeuerungen geeignet ist und dementsprechend die CO-Emissionskante auch von der Regelung detektiert wird. Allerdings war noch kein kontinuierlicher Betrieb im optimalen Arbeitspunkt der Anlage möglich, hierzu sind weiter Entwicklungsarbeiten notwendig. Mit einer funktionierenden Leistungs- und Verbrennungsregelung können die Emissionen beim Stückholzmusterkessel sicherlich noch weiter reduziert bzw. auf dem äußerst geringen Niveau stabilisiert werden.

Zusammenfassend wurden folgende Ziele erreicht:

- Reduzierung der Hohlbrandgefahr durch eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone (weniger Emissionsspitzen)
- schnelle Aufheizzeiten der Nachbrennkammer durch Verwendung von Bauteilen mit geringer Masse (kürzere Emissionsspitzen beim Kesselstart)
- robuste Nachbrennkammer mit optimiertem Vermischungsprozess der Reaktionspartner
- gleichbleibend sehr niedriges Emissionsniveau in der stationären Hauptverbrennungsphase über einen breiten Luftüberschussbereich
- deutliche Minimierung des Luftüberschusses durch die angestrebten Verbrennungsverbesserungen (höherer feuerungstechnischer Wirkungsgrad).

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der wissenschaftliche Stand zur Emissionsbildung bei der thermochemischen Umwandlung von Holz aufgezeigt. Besonderes Augenmerk wurde auf die Bildungsmechanismen der Partikelemissionen gelegt. Zu den Gesamtstaubemissionen tragen sowohl organische als auch anorganische Partikelemissionen bei. Bei vollständigen Verbrennungsbedingungen können die organischen Partikelemissionen (Ruß und Teere) auf ein Minimum reduziert werden. Hingegen ist der Bildungsmechanismus der anorganischen Partikel (Salze und Oxide) unabhängig von der Verbrennungsqualität und somit durch Primärmaßnahmen kaum beeinflussbar. Eine Reduzierung der Gesamtstaubemissionen unter ein bestimmtes Niveau ist daher – selbst bei bester Verbrennungsqualität – nur durch Sekundärmaßnahmen (z.B. Elektrofilter) erreichbar.

In der Anbrand- und insbesondere in der Ausbrandphase (Holzkohleabbrand) kommt es aufgrund der physikalischen Grenzen bei der thermochemischen Umwandlung von Holz zu erhöhten Emissionen (CO, VOC, Staub), welche sich durch Primärmaßnahmen kaum beeinflussen lassen. In der Anbrandphase sind die niedrigen Feuerraumtemperaturen ausschlaggebend für die Emissionsentstehung. Auch in der Ausbrandphase nimmt die Verbrennungstemperatur deutlich ab und der Restkohlenstoff des entgasten Holzes wird in einer Gas-Feststoff-Reaktion oxidiert, wodurch vor allem die CO-Emissionen nahezu unvermeidlich ansteigen. Während der Hauptverbrennungsphase treten bei Holzfeuerungen meist die geringsten Emissionen auf, allerdings kann es in dieser Phase zu erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung kommen, wenn die Feuerung zur Leistungsanpassungen auf einen veränderten Wärmebedarf reagiert, so dass die Stückholzfeuerungen ge-

wisse Teillastpunkte anfährt, in den Luftmangelbereich gerät oder gar in einen Gluthalbetrieb schaltet. Im Gluthalbetrieb ist eine sinkende Flammentemperatur maßgebend verantwortlich für den Anstieg von Produkten unvollständiger Verbrennung. Zum anderen kann es aber auch zu Verbrennungsstörungen - bedingt durch das Hohlbrandphänomen, Holzaufgabe des Betreibers oder schwankende Brennstoffeigenschaften - während der Hauptverbrennungsphase kommen. Dieses Bild zeigt sich auch in der Emissionsbewertung von Stückholzkesseln, welche im Zuge dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurde. Die Emissionsbewertung von Stückholzkesseln kann z.B. anhand der Ergebnisse von Normprüfungen, von Überwachungsmessungen nach der 1. BImSchV oder durch einen praxisnahen Betrieb der Heizkessel auf dem Prüfstand oder durch mehrmonatige Messungen an installierten Feuerungsanlagen erfolgen. Letzteres Verfahren liefert zwar die realistischsten Ergebnisse, ist aber nur mit großem Aufwand möglich. Aufgrund dieser völlig unterschiedlicher Testbedingungen können die Ergebnisse nicht oder nur in Teilaspekten verglichen werden.

Bei Normprüfungen werden die Heizkessel unter optimierten und definierten Randbedingungen bei konstanter Wärmeleistung betrieben. Diese Ergebnisse zeigen vor allem, welche minimalen Emissionen und welcher maximale feuerungstechnischer Wirkungsgrad mit der Feuerung bei Nennwärmeleistung bzw. bei minimaler Wärmeleistung erreicht werden kann.

Bei Überwachungsmessungen im Rahmen der 1. BImSchV erfolgen die Messungen bei Nennwärmeleistung bzw. maximal möglicher Wärmeleistung im ungestörten Dauerbetriebszustand. Mit diesen Ergebnissen kann das Emissionsverhalten bezüglich CO und Staub unter stationären Bedingungen bei hoher Leistung unter praxisüblichen Randbedingungen bewertet werden.

In beiden Fällen ist es das Ziel, instationäre Betriebsbedingungen, wie Anheizen aus dem kalten Zustand, Regelvorgänge oder Teillastverhalten bei wechselndem Wärmeabfluss sowie die Ausbrandphase (Holzkohleverbrennung) bei der Messung zu vermeiden und damit nicht zur Bewertung heranzuziehen. Bei den Überwachungsmessungen gelingt dies aufgrund der Randbedingungen und den besonderen Verhältnissen vor Ort nicht immer.

Da jedoch das Emissionsaufkommen der Heizkessel vor allem durch die instationären Betriebszustände und deren Anteile an der Gesamtbetriebszeit bestimmt wird, liegen in Abhängigkeit vom Anteil der instationären Betriebsphasen die Emissionen von CO, VOC und Staub für den praktischen Betrieb deutlich höher als für den stationären Dauerbetrieb. Jedoch muss gesehen werden, dass bei Stückholzkesseln, die zur Gebäudeheizung in üblicher Form eingesetzt werden, lang andauernde stationäre Betriebszustände unter guten Betriebsbedingungen nur dann auftreten, wenn die Randbedingungen (z.B. richtige Bedienung, gute Holzqualität, fachgerechte Installation und Einstellung der Anlage) entsprechend günstig sind. Aufgrund des stark schwankenden Heizwärmebedarfs der Gebäude (tägliche und saisonale Schwankungen) und des chargenweisen Betriebs der Heizkessel ist davon auszugehen, dass die instationären Betriebszustände einen bedeutenden bis hohen, in einigen Fällen gar überwiegenden Anteil an der Gesamtbetriebszeit haben. Letzteres gilt vor allem für Stückholzkessel (Bestandskessel), die ohne Pufferspeicher betrieben werden. Folglich gilt hinsichtlich der Bilanzierung des Schadstoffausstoßes: geringe CO-, VOC- und Staub-Emissionen im stationären Dauerbetrieb der Heizkessel sind zwar eine notwendige aber keine hinreichende Anforderung an die Feuerungsanlagen. Daher wurde als Ziel definiert, dass sich die niedrigen Emissionswerte des stationären Dauerbetriebs bei instationären Betriebszuständen nur unwesentlich verschlechtern dürfen. Dies kann nur durch eine kontinuierliche,

sensorbasierte Regelung am Optimum in allen Phasen des Verbrennungsprozesses und durch eine Optimierung der Verbrennungstechnik geschehen.

Bei der Entwicklung eines neuen Stückholzkessels mit optimierter Verbrennungstechnik wurde die Gesamtfunktion „Stückholzkessel“ abstrahiert und in Teilfunktionen geringer Komplexität zerlegt und entsprechende Lösungsprinzipien entwickelt.

Die dadurch gefundene Konzeptvariante eines neu entwickelten Stückholzkessels sollte verbrennungstechnisch in folgenden Punkten, gegenüber den besten marktverfügbaren Kesseln erheblich verbessert werden:

- Reduzierung der Hohlbrandgefahr durch eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone (weniger Emissionsspitzen) mittels eines luftdurchströmten Feuerungsrostes
- Erhöhung der Mischungsgüte in der Nachbrennkammer durch optimierte Strömungsbedingungen, unterstützt durch eine optimierte Zuführung der Sekundärluft (geringere Emissionen im Dauerbetrieb, bei Teillast und im praxisnahen Betrieb)
- schnelle Aufheizzeiten der Nachbrennkammer durch Verwendung von Bauteilen mit geringer Masse (kürzere Emissionsspitzen beim Kesselstart)
- Minderung des Luftüberschusses durch die angestrebten Verbrennungsverbesserungen (höherer feuerungstechnischer Wirkungsgrad).

Das Kesselkonzept wurde zunächst in Form einer Versuchsfeuerung validiert und in einem zweiten Schritt in einem Stückholzmusterkessel umgesetzt. Der Stückholzmusterkessel weist eine Feuerungswärmeleistung von 25 kW bei einem Wirkungsgrad von 94% auf. Mit der Konzeptumsetzung eines luftdurchströmten Rosts in der Primärzone konnte eine gleichmäßige, hohlbrandfreie Entgasung erreicht werden. Diese Art der Primärluftzuführung ließ allerdings in der bisherigen technischen Umsetzung keinen Teillastbetrieb zu.

Mit der neuentwickelten Nachbrennkammer konnte der Vermischungsprozess zwischen brennbaren Gasen und dem Luftsauerstoff (Sekundärluft) optimiert werden. Die Zielwerte für die CO- und VOC-Konzentrationen konnten im stationären Dauerbetrieb des Stückholzmusterkessels mit einer mittleren CO-Konzentration von 15 mg/m³ (bez. auf 13 Vol% O₂) und einer mittleren VOC-Konzentration von 3 mg/m³ (bez. auf 13 Vol.%) erreicht werden. Aufgrund des optimierten Vermischungsprozesses in der Nachbrennkammer war es möglich den Luftüberschuss, bei gleichbleibend niedrigen Emissionen, bis auf 3,5 Vol% O₂ zu reduzieren und so den Wirkungsgrad deutlich zu steigern.

Im Hinblick auf die Partikelemissionen wurden die Zielwerte im stationären Dauerbetrieb mit rund 13 mg/m³ knapp verfehlt. Hierbei war die Färbung des Filtermaterials hellgrau, was im Wesentlichen auf anorganische Partikel schließen lässt. Der Bildungsmechanismus für Partikel anorganischer Herkunft wird aufgrund des extrem heißen und mit viel Sauerstoff versorgten Glutbetts durch die gewählte Rostkonstruktion verstärkt angeregt.

Zusammenfassend wurden folgende Ziele erreicht:

- Reduzierung der Hohlbrandgefahr durch eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone (weniger Emissionsspitzen)
- schnelle Aufheizzeiten der Nachbrennkammer durch Verwendung von Bauteilen mit geringer Masse (kürzere Emissionsspitzen beim Kesselstart)

- robuste Nachbrennkammer mit optimiertem Vermischungsprozess der Reaktionspartner
- gleichbleibend niedriges Emissionsniveau in der stationären Hauptverbrennungsphase über einen breiten Luftüberschussbereich
- deutliche Minimierung des Luftüberschusses durch die angestrebten Verbrennungsverbesserungen (höherer feuerungstechnischer Wirkungsgrad).

Die Ergebnisse des neu entwickelten Stückholzmusterkessels haben gezeigt, dass die Verbrennungsqualität durch einen optimierten Vermischungsprozess in der Nachbrennkammer drastisch erhöht werden konnte. Im Teillastbereich muss der Stückholzmusterkessel seine sehr guten Verbrennungseigenschaften noch unter Beweis stellen. Hierzu muss die Primärluftführung entsprechend modifiziert werden. Mit einer modifizierten Primärluftführung kann sicherlich auch ein weiteres Minderungspotential hinsichtlich der Partikelemissionen anorganischer Herkunft erreicht werden. Diese Aspekte sind Themen zukünftiger Untersuchungen. Deutlich wird aber jetzt schon, dass eine vollflächige Markteinführung des neu entwickelten Stückholzmusterkessels zu einer erheblichen Umweltentlastung und zu einer effizienten und ressourcenschonenden Biomassenutzung beitragen kann.

9 Literatur IFK

1. BImSchV (2010):

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 26. Januar 2010 (BGBl. I, Nr. 4, S. 38-56).

Arca (2009):

Produktdatenblatt Holzessel O2, Arca Heizsysteme e.K., Lauf a.d.P., Deutschland.

BAFA (2009):

Liste der förderfähigen Stückholzkessel. Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Eschborn.

G. Baumbach (1994):

Luftreinhaltung. 3. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg.

K. Diez (2011):

Untersuchungen zum Einsatz der CO-Kantenregelung bei einem Pelletofen. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Stuttgart.

ETA (2008):

Prospekt ETA-SH, ETA Heiztechnik GmbH, Hofkirchen an der Trattnach, Österreich, Juli 2008.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2007):

Marktübersicht Scheitholzvergaserkessel und Scheitholz-Pellet-Kombinationskessel. Im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow.

Fröling (2009):

Prospekt S4 Turbo, Fröling Heizkessel- und Behälterbau GmbH, Grieskirchen, Österreich, Januar 2009.

Gerthsen, T (2006):

Anorganische Chemie für Werkstoffe und Verfahren. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe.

Guntamatik (2009):

Stückholzprogramm Guntamatik, Guntamatik Heiztechnik GmbH, Peuerbach, Österreich, Februar 2009.

F. Hammer, H. Weber (2008):

Sensorgesteuerte CO-Regelung zur Optimierung des Verbrennungsprozesses für Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung, ESCUBE GmbH & Co KG, Stuttgart und LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG, Walldorf.

H. Hartmann, V. Schmid, H. Link (2003):

Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung. Partikelgrößenverteilung, Gesamtstaub und weitere Kenngrößen. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamt im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart. Technologie- und Förderzentrum, Straubing.

H. Hartmann, P. Roßmann, P. Turowski (2006):

Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamt im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart. Technologie- und Förderzentrum, Straubing.

Hoval (2007):

Prospekt AgroLyt, Hoval GmbH, Vaduz, Lichtenstein, September 2007.

F. Joos (2006):

Technische Verbrennung. Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen. Springer Verlag, Heidelberg.

M. Kaltschmitt, H. Hartmann (2001):

Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Heidelberg.

Künzel (2009):

Produktübersicht Holzvergaserkessel, Paul Künzel GmbH & Co., Prisdorf, Mai 2009.

Lopper (2004):

Prospekt Holzkessel, Lopper Kesselbau GmbH, Rohr-Alzhausen, Deutschland, Februar 2004.

T. Nussbaumer (2003):

Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Projekt im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie und des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Verenum, Zürich.

M. Struschka, O. Emich, G. Baumbach (2004):

Untersuchung an einem Stückholzkessel mit und ohne Wärmespeicher zur Ermittlung optimaler Speichergrößen. Forschungsvorhaben der LUBW. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart.

M. Struschka, D. Kilgus, M. Springmann, G. Baumbach (2007):

Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung. Forschungsvorhaben der BMU. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart.

VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006):

Messen von Partikeln. Staubmessung in strömenden Gasen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

U. Zuberbühler (2002):

Maßnahmen zur feuerungsseitigen Emissionsminderung bei der Holzverbrennung in gewerblichen Feuerungsanlagen. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart.

Berichtsteil zu den Arbeitspaketen des ISIS



Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Institut für Sensorik und Informationssysteme
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Moltkestr. 30, D-76133 Karlsruhe

Prof. Dr. Heinz Kohler
Prof. Dr. Ralf Herwig
Prof. Dr. Thorsten Leize

Januar 2013

Inhaltsverzeichnis ISIS-Berichtsteil

10	Verbrennungsluftregelung des Musterkessels	78
10.1	Experimentelle Vorkehrungen	78
10.2	Regelungskonzept	80
10.3	Experimentelle Entwicklung der automatischen Verbrennungsluftregelung	81
10.4	Untersuchungen zur Teillastfähigkeit.....	85
10.5	Finaler Entwicklungsstand der Verbrennungsluftregelung in Projektstufe I.....	86
10.6	Messungen mit Abgaskatalysator.....	90
11	Abgassensorik	91
11.1	Vergleich der drei ROC-Messprinzipien im Abgas	91
11.2	Charakterisierung der CO/HC-Sensoren KS1-D(CO/HC), Dittrich CO/O ₂ – Sonde und CarboSen 1000/10.000 in Modellgasen und im Abgas	93
11.3	Kalibriersequenz für CO/HC-Mischpotenzial-Sensoren	99
11.4	Referenzierung der (CO/HC) _{äquiv.} -Konzentration	100
12	Feuerungsprozess-Monitor	102
12.1	Motivation.....	102
12.2	Kommunikationsprozessor	103
12.3	Grundmodul zur Kesselregelung mit Human-Interface	105
12.4	Ermittlung des aktuellen Holzvorrats zur Brennstoffbedarfsprognose.....	109
13	Zusammenfassung und Ausblick	111
14	Literatur ISIS.....	114

10 Verbrennungsluftregelung des Musterkessels

10.1 Experimentelle Vorkehrungen

Nach Anlieferung des Musterkessels am ISIS (9. März 2012) mussten der Kesselkörper und der separate groß dimensionierte Wärmetauscher (WT) auf unterschiedlichen Ebenen positioniert werden, um beide Körper mit der am Kessel angeflanschten Nachbrennkammer verbinden zu können (Abbildung 10.1). Die Konstruktion des Musterkessels, der durch Umbau eines Serienkessels gefertigt wurde, und der am IFK neu konstruierten Nachbrennkammer, sind in Kapitel 7.1 im Detail beschrieben. Anschließend wurde die Anlage mit dem vorhandenen Kühlsystem bzw. der Abgas-Wärmetauscher mit der Abgassystem des ISIS-Feuerungstechnikums verbunden. Je ein Thermoelement (NiCr/Ni) zur Messung der (repräsentativen) Kesselwassertemperatur wurde direkt nach dem Kesselausgang (Vorlauf) und zur Messung der Temperatur in der Nachbrennkammer (TNBK) mittig eingeführt.

Die Bestimmung der Nenn- bzw. Teillastwärmeleistung des Kessels wäre technisch möglich gewesen, da ein Wärmemengenzähler (Kundo GmbH) im Kühlkreislauf betrieben und softwareseitig ausgelesen wurde und ein Nadelventil zur Einstellung der Kühlleistung (über einen Kühlwasserwärmetauscher) durch das hauseigene Wassernetz eingesetzt wurde. Jedoch ist offensichtlich die tatsächliche Wärmeleistung der Anlage deutlich höher als ursprünglich als Projektziel festgelegt worden war (ca. 18kW). Mit den Messeinrichtungen am IFK wurden 25kW bestimmt (siehe Kapitel 7.4.1). Eine Regelung der Kühlwassertemperatur auf z.B. konstant 75°C war folglich wegen der zu geringen Leistung des Kühlwasser-Wärmetauschers (20kW) am ISIS nicht möglich, um (i) eine aussagekräftige Leistungsmessung durchführen und (ii) im Zustand konstanter Kesseltemperatur experimentieren zu können. Vielmehr erhöhte sich die Kühlwassertemperatur während eines Abbrandexperiments auch nach voller Öffnung des Nadelventils weiter, d.h. es konnte nur eine eingeschränkte Holzmenge pro Experiment verbrannt werden, um unzulässig hohe Kesselwassertemperaturen ($T > 85^{\circ}\text{C}$) zu vermeiden. Alle Experimente wurden bei kaltem Kessel gestartet.

Das bereits im Rahmen von Vorläuferprojekten für einen Scheitholz-Kachelofeneinsatz und für einen Scheitholzheizkessel (Vitolig 200, Viessmann) am ISIS entwickelte und experimentell getestete Konzept zur Regelung der Verbrennungsluftströme /Koh07/ wurde modifiziert und individuell an den von den Partnern zur Verfügung gestellten Musterkessel angepasst. Insbesondere war die ISIS- Hard- und Software von der Regelung motorbetriebener Klappenpositionen auf die Regelung der Drehzahl von Gebläsen für Primär- und Sekundärverbrennungsluft umzustellen. Hierzu wurde für die Verbrennungsluftgebläse, die von BTT zur Verfügung gestellt worden waren, am ISIS eigens die Elektronik zur Drehzahlregelung entwickelt. Es wurde zwar von BTT auch ein Saugzuggebläse zur Verfügung gestellt, für das in Vorarbeit am ISIS eine weitere elektronische Drehzahlregelung entwickelt wurde, jedoch kam dieses letztlich nicht zum Einsatz, da schließlich ein anderes Saugzuggebläse am separat stehenden, nicht speziell für diesen Musterkessel entwickelten Wärmetauscher bereits vorinstalliert war, das nur unregelt, d.h. unter Volllast betrieben werden konnte. Heizkessel, Sekundärbrennkammer und Wärmetauscher wurden zwar durch einen gemeinsamen Kühlkreislauf gekühlt, jedoch waren diese nicht in einem gemeinsamen Kesselgehäuse integriert, sondern bildeten separate, fest miteinander verbundene Einheiten (siehe Kapitel 7.1). Einen Überblick über den experimentellen Aufbau im ISIS-Feuerungstechnikum gibt Abbildung 10.1.

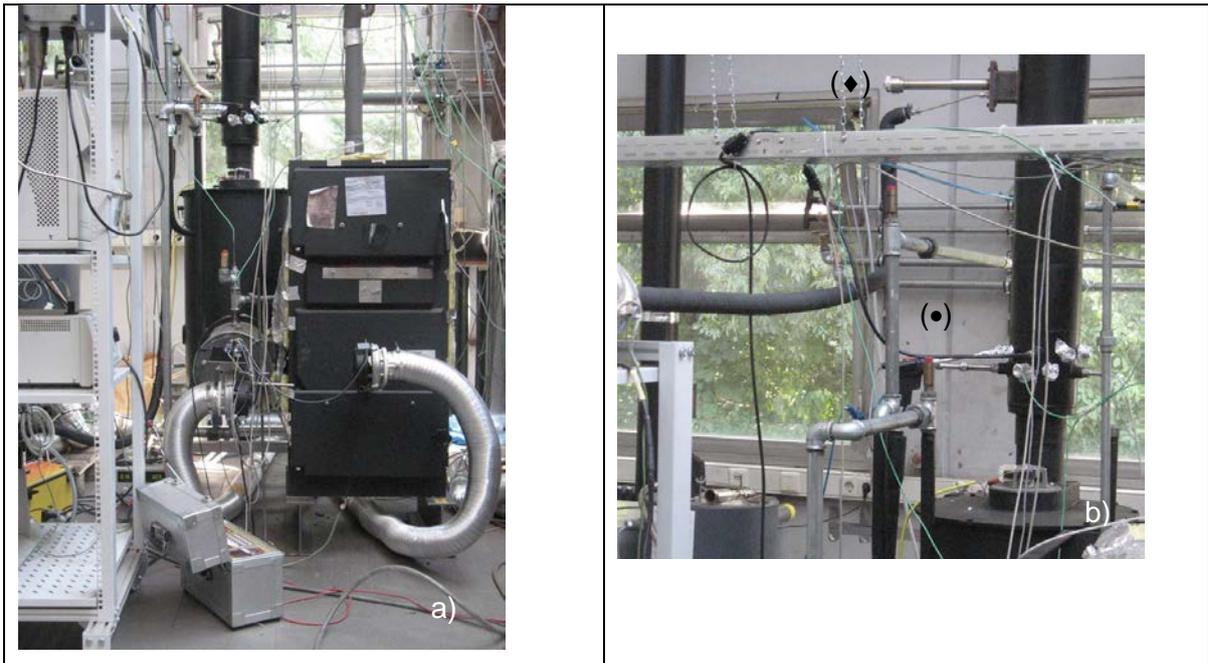


Abbildung 10.1 Musterkessel, aufgebaut im ISIS-Feuerungstechnikum. a) Heizkessel (rechts) mit linksseitig angeflanschter Sekundärbrennkammer (Bildmitte), dahinter der Wärmetauscher mit senkrecht nach oben geführtem Rauchgasrohr. b) Abgasrohr mit den Flanschen zur Installation der Gassensoren (●) und mit der Entnahmestelle für die Feinstaubmessung (◆). Die beiden Gebläse für Primär- und Sekundärluft sind über Flexrohre mit den Luftmassenströmungssensoren (unterhalb der Feuerstätte auf dem Boden liegend) verbunden. Die Verbrennungsluft wird über einen separaten Luftkanal von außen der Anlage zugeführt

Die Sensoren für die Restsauerstoffkonzentration (ROC) und den Rest-CO/HC-Gehalt im Abgas wurden unmittelbar nach dem Abgas-Wärmetauscher stromabwärts positioniert (Abbildung 10.1b). Hinsichtlich der Funktionsweise dieser Sensoren wird auf die Ausführungen des Partners Dittrich Elektronik (Kap. 24.1) und auf den Abschlussbericht der Vorstudie /Vor10/ verwiesen.

In jedem der beiden Verbrennungsluftkanäle auf der Ansaugseite der Verbrennungsluftgebläse ein Luftmassenstromsensor installiert. Es handelt sich hierbei um einen vom Hitzdraht-Anemometer abgewandelten, temperaturkompensierten, großformatigen Sensorchip (Heraeus, Kleinostheim), der am ISIS in ein geeignetes Gehäuse positioniert (Abbildung 10.2) wurde und mit einer am ISIS gefertigten Elektronik nach den Angaben des Herstellers betrieben wird. Die Kalibrierung der Strömungssensoren kann am ISIS mit einer zu diesem Zweck in Vorarbeiten speziell aufgebauten Kalibriereinrichtung durchgeführt werden.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Strömungswiderstände, die sich aus der unterschiedlichen Art der Verbrennungsluftzuführung (Primärluft ausschließlich über Löcher in den Stegen des Feuerrostes, Sekundärluft über optimierte Zuführung) ergeben, musste vor Inbetriebnahme zuerst experimentell untersucht werden, ob aus dem regelbaren Drehzahlbereich der Gebläse geeignete Verbrennungsluftströme für eine gut zu kontrollierende Primär- bzw. Sekundärverbrennung resultieren. Mittels der jeweils im Verbrennungsluftkanal vorgeschalteten Massenstromsensoren wurde im kalten Zustand der Anlage ein regelbarer Luftmassenstrombereich primärseitig von 1,5 l/s bis 5 l/s und sekundärseitig von 0l/s bis 7,5l/s ermittelt. Letzterer Bereich konnte allerdings erst nach Drosselung der Strömung mittels einer

Blende (Blendenöffnung $\varnothing 10\text{mm}$) im Verbrennungsluftkanal ($\varnothing 100\text{mm}$) erreicht werden, die zwischen Luftmassenstromsensor und Gebläse eingefügt wurde. Die Tatsache, dass auch bei vollständiger Rücknahme der Gebläseleistung primärseitig noch ein Restluftmassenstrom gemessen wird, ist vermutlich auf die (zu hohe) Unterdruckwirkung durch den Saugzugventilator zurückzuführen. Eine Erklärung durch ggfls. vorliegende Leckagen kommt jedenfalls nicht in Betracht, da die Luftmassenstromsensoren auf der Saugseite der Gebläse angebracht sind.

Auf eine Differenzdruckmessung (z.B. Druck in der Sekundärbrennkammer gegen Außen- druck) wurde verzichtet, da die Zugbedingungen wegen der stationären Betriebsweise des Saugzugventilators experimentell nicht beeinflusst werden konnten.

10.2 Regelungskonzept

Entsprechend dem Ziel dieses Projektes, die Emissionen von Stückholzheizkesseln nicht nur unter Prüfstandsbedingungen sondern insbesondere im praxisnahen Betrieb zu minimieren, kommt der Verbrennungsluftregelung eine besondere Bedeutung zu. Hierbei ist eine möglichst optimale feuerungstechnisch erreichbare Verbrennungsqualität eine notwendige Voraussetzung, die aber nur hinreichend zum Tragen kommt, wenn in allen Phasen der Verbrennung spezifische Algorithmen zur Verbrennungsluftregelung gefunden werden können, die auf Prozessparametern basieren, die für eine hinreichenden Beschreibung des Verbrennungsprozesses sowohl in den instationären als auch in den (einfacher beherrschbaren) stationären Phasen der Verbrennung geeignet sind. Hierzu wurde am ISIS im Rahmen von Vorprojekten ein Verbrennungsluftregelungskonzept erarbeitet, das nicht, wie nach dem Stand der Technik üblich, auf den Parametern Verbrennungstemperatur und Restsauerstoffkonzentration (ROC) im Abgas beruht, sondern sich zusätzlich auf dem CO/HC-Gehalt im Abgas stützt.

Die grundlegende Methodik, nach der - basierend auf den Ergebnissen aus Vorprojekten - die Verbrennungsluftregelung entwickelt wurde, lässt sich folgendermaßen zusammenfassen /Koh12/: Die Drehzahl des Primär-Verbrennungsluftgebläses ist eine Funktion der Prozessparameter *Temperatur der Nachbrennkammer (TNBK)* und *Restsauerstoffkonzentration (ROC)*, die des Sekundärluft-Gebläses eine Funktion der Parameter *TNBK* und des $\text{CO}/\text{H}_{2,\text{äquiv.}}$ -Wertes der unverbrannten Gaskomponenten (CO/HC-Wert) im Abgas. Die Regelung nach dem $\text{CO}/\text{H}_{2,\text{äquiv.}}$ -Wert wurde in diesem Projekt erstmals eingeführt. Der $\text{CO}/\text{H}_{2,\text{äquiv.}}$ -Wert wird auf Kalibrierdaten des CarboSen-Signals referenziert, die in einer festgelegten Kalibrierroutine gewonnen werden (Kapitel 11.3). Der Parameter-Ist-Zustand (Sensor-Messwerte) wird alle 10s mit den Parameter-Sollwerten verglichen. Aus den Abweichungen werden nach obigen Funktionen die neuen Gebläsedrehzahlen berechnet. Die Schrittweite, mit der die Drehzahländerungen vorgenommen werden, ist an die dynamischen Eigenschaften der Verbrennungsanlage und an die Phase des Verbrennungsprozesses spezifisch anzupassen.

Die Erfahrungen aus den oben erwähnten Vorläuferarbeiten haben gezeigt, dass bei individueller Anpassung an den Feuerungsanlagentyp und Definition der beiden Funktionen für die Verbrennungsluftregelung in jeder Phase der Verbrennung einer Charge bestehend aus Zündphase (1), (stationärer) Hochtemperaturphase (HT-Phase) (2), Ausbrandphase (3) und Nachlegephase (4), der Verbrennungsprozess optimiert werden kann, was sich letztlich in

einer meist verlängerten HT-Phase, in insgesamt geringeren Verbrennungsluftströmen und in teilweise erheblich verringerten Emissionen von gasförmigen und partikulären Schadstoffen niederschlug /But09, Koh10/. Die Aufgabe in diesem Projekt bestand somit darin, in allen genannten Phasen der Verbrennung, möglichst optimale Regelungsparameter für den Musterkessel zu finden. Es wurde immer ein kompletter Chargen-Abbrand durchgeführt, der nach Zündung im kalten Anlagenzustand alle oben genannten Phasen durchlief. Die Parameteranpassung fand somit quasi simultan in allen genannten Verbrennungsphasen statt.

Darüber hinaus wurden Experimente zur Teillastfähigkeit des Musterkessels durchgeführt. Hierzu wurde die Solltemperatur in der Nachbrennkammer vom zuvor definierten Nennlastwert $TNBK_N = 950^\circ\text{C}$ auf einen (in Phase 5 wählbaren) Teillastwert von $TNBK_T = 925^\circ\text{C}$ bzw. $TNBK_T = 900^\circ\text{C}$ abgesenkt. Auf diese Weise wurde nach oben skizzierten Funktionen in einer zu definierenden Übergangsphase der Primär-Verbrennungsluftstrom verringert, was die Verminderung des Wärmestromes und damit die Absenkung der Wärmeleistung zur Folge haben sollte.

10.3 Experimentelle Entwicklung der automatischen Verbrennungsluftregelung

Zuerst war eine Holzstapelmethode in der Primärkammer festzulegen, nach der eine möglichst reproduzierbare Verbrennung in der Zünd- und ersten HT-Phase erwartet werden konnte. Da die Geometrie des Stapelraumes eine nahezu quadratische Grundfläche aufweist, können Holzscheite mit 33cm Kantenlänge alternativ entweder alle in eine gemeinsame Richtung oder abwechselnd über Kreuz geschichtet werden. Um eine möglichst gleichmäßige Durchlüftung des Stapels in der Brennzzone zu erzielen, wurde die kreuzweise Stapelmethode gewählt (Abbildung 10.3). Zur möglichst schnellen Erreichung der Solltemperatur (ca. 950°C) nach der Zündung wurde der Boden des Füllraumes zuerst mit einer Lage zerknülltem Zeitungspapier bedeckt, anschließend eine kleine Menge dünnes Reisigholz verteilt, dann mit einer Lage dünnem Scheitholz fortgefahren und schließlich drei bzw. vier Lagen mit Scheitholz (Buchenholz, \varnothing ca. 8-10cm, je drei Scheite pro Lage, insgesamt 12-13kg (bei vier Lagen)) gestapelt. Diese Stapelordnung konnte beim Nachlegevorgang (ca. 4kg) auf die Glut wegen der hohen Temperaturen nicht beibehalten werden, d.h. die Befüllung war in dieser Phase immer ungeordnet.

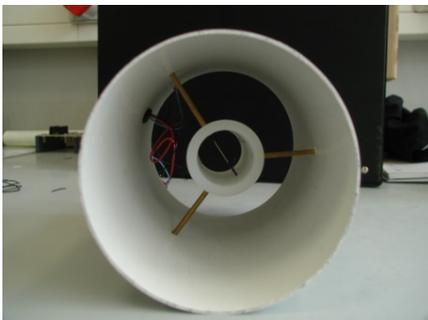


Abbildung 10.2
Luftmassenströmungssensor, eingebaut in einer Halterung, welche zentrisch in einem Kunststoffrohr (\varnothing 100mm) positioniert wurde



Abbildung 10.3
Stapelung der Buchenholz-Scheite in der Brennkammer des Musterkessels vor dem Kaltstart. Am linken Bildrand ist der Pyrolysegas-Auslassschacht in die Sekundärbrennkammer sichtbar

Die zu definierenden Verbrennungsluftströme waren im Falle des Primärluftstromes durch die Anlage (Leistung des Primärluftgebläses, Leistung des Saugzugventilators und Strömungswiderstand, insbesondere über die Bohrungen im Feuerrost) vorgegeben. Der Regelbereich des Sekundärluftstromes wurde, wie oben beschrieben, durch eine Blende nach Erfahrungswerten aus Vorprojekten /Koh07, Koh09/ festgelegt.

Zur Bewertung der Musterkesselregelung wurden in den ersten Experimenten ausschließlich die Signale der Gassensoren und die Temperatur (TNBK) herangezogen. Im Falle der ROC-Messung waren, wie aus Vorexperimenten bekannt war /Vor10/, sehr zuverlässige Messergebnisse zu erwarten. Hinsichtlich des CO/HC-Wertes für die gasförmigen Emissionen wurde dieser zu Trendanalysen herangezogen und dann später referenziert (Kapitel 11.4). Das CarboSen-Signal wurde in regelmäßigen Abständen durch eine Zwischenkalibrierung mit CO/H₂-Luft-Gemischen überprüft und bewertet (siehe Kapitel 11.3). Diese Vorgehensweise reichte aus, um die Qualität der Regelung in der frühen Phase der Entwicklung zu bewerten. Nach Erreichen eines fortgeschrittenen Qualitätsstandes wurde sie durch kontinuierliche Registrierung der ROC, der CO₂-, CO-, NO- und HC – Konzentration (Äquivalenzwert) ergänzt. Hierzu diente ein Standard-Rauchgasanalysegerät mit vorgeschalteten Partikel-Filtern und Messgasentfeuchter (IM 2800A, IM Environmental Equipment GmbH, Heilbronn). Die partikulären Emissionen wurden mit einem Partikelanalysegerät (SMPS/APS, TSI Inc.) und mit einem gravimetrischen Gesamtstaubmesssystem (Paul Gothe GmbH) in Anlehnung an die VDI 2066-Norm referenziert.

Eine repräsentative Übersicht über einen Chargenabbrand gibt Abbildung 10.4.

Der Abbildung 10.4 zugrunde liegende und anschließend diskutierte Stand der Verbrennungsluftregelung ist ein sehr weit fortgeschrittener Zwischenstand, der anschließend nochmals verändert wurde (siehe unten), um das Verbrennungsverhalten in den instationären Phasen zu verbessern. Er basiert auf den oben angesprochenen experimentellen Vorgehensweisen und repräsentiert Verbrennungsexperimente, bei denen die Sekundärlufteinführung in etwa der Position 2 (siehe Kapitel 7.4.3, Tabelle 7.3) entspricht. In dieser Position wurden in Übereinstimmung mit den Arbeiten am IFK die besten Verbrennungsergebnisse in der stationären Hochtemperaturphase erzielt. Diese Ergebnisse werden nachfolgend in allen Phasen der Verbrennung im Detail diskutiert:

- Generell wurde beobachtet, dass der Musterkessel „ausgesprochen gutmütig“ auf die Verbrennungsluftströme reagiert. Dies bedeutet, in bisher 22 Feuerungsexperimenten ist es niemals zu Blockaden der Verbrennungsluftzufuhr oder der Pyrolysegasabströmung oder zu Hohlbränden gekommen, die zu unvorhergesehenen Temperatureinbrüchen führen können, die wiederum regelungstechnisch kaum zu beherrschen sind und naturgemäß mit erheblichen Emissionen von unverbrannten Pyrolysegasen führen würden. Diese Erfahrung ist in guter Übereinstimmung mit den Experimenten, die von den Partnern am IFK durchgeführt wurden (siehe Kap. 7.4.6) und ist ein klarer Hinweis auf die verbesserte Qualität der Primär-Verbrennungsluft- und Pyrolysegasströmungsbedingungen in der Verbrennungszone über dem Feuerrost im Vergleich zum in Vorarbeiten untersuchten Stückholzheizkessel /Koh07, Koh09/.
- Nachdem nach dem Zünden TNBK ca. 200°C erreicht hatte, wurde die Brennkammer verschlossen und innerhalb von weiteren 3 min (Min. 6) war eine Verbrennungstemperatur von >900°C erreicht. Die Verbrennungsanlage erreicht somit in äußerst kurzer Zeit genügend hohe Temperaturen in der Nachbrennkammer, bei denen eine gute Nachverbrennung erwartet werden kann. Entsprechend kurz ist die Zeit erhöhter Emissionen in der Zündphase, was am Verlauf des CarboSen- und des korrespondie-

renden CO/H_2 -Wertes gut zu sehen ist. Die dazugehörige Verbrennungsluft-Regelungsstrategie wird in Kap.10.2 angesprochen.

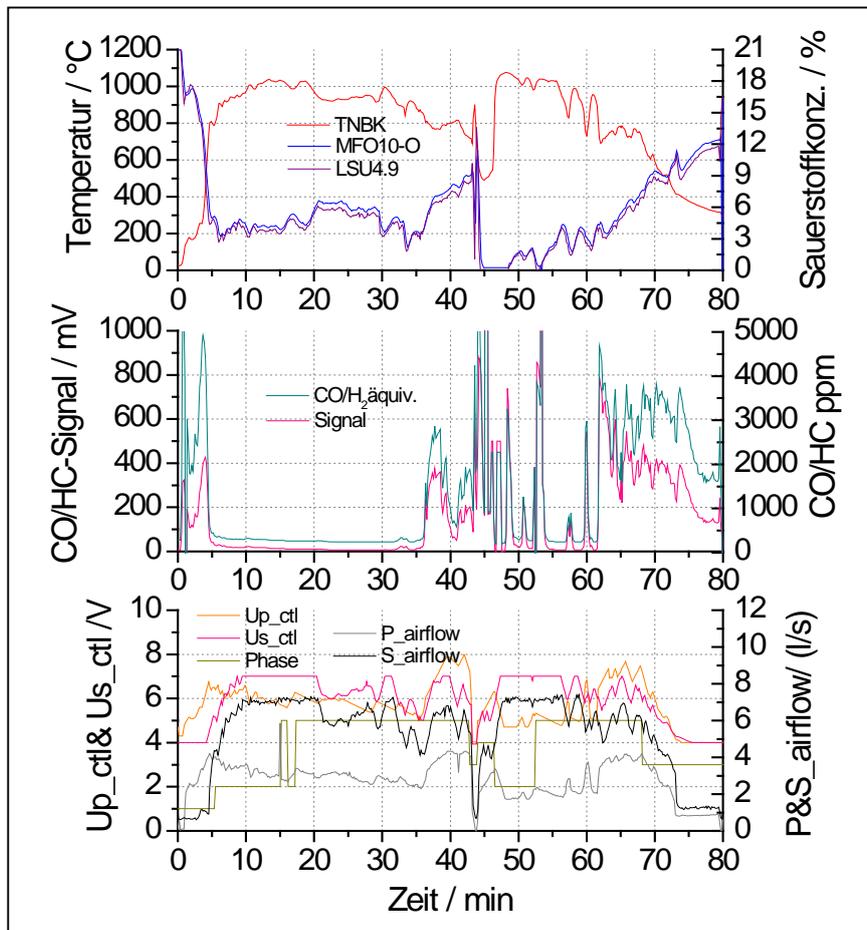


Abbildung 10.4 Darstellung eines automatisierten Abbrandexperiments im Entwicklungsstadium. Die Feuerung startet im kalten Zustand und durchläuft die oben beschriebenen Phasen der Verbrennung. Die Regelungsphasen (1- Zündphase, 2-HT-Phase, 3-Ausbrandphase, 4-Nachlegephase, 5-Teillastphase) sind im unteren Diagramm als horizontale Linien bezeichnet (linke Skala). Im oberen Diagramm ist der Verlauf der Verbrennungstemperatur TNBK, und die ROC (MFO10-O und LSU 4.9 simultan registriert) dargestellt. Das mittlere Diagramm zeigt den Verlauf der CO/H_2 -äquiv.-Konzentration und des Signals des CarboSen (Anmerkung: Das CarboSen-Signal ist bei $\text{ROC} < \text{ca.} 0,5\%$ aufgrund des Messprinzips nicht aussagekräftig und wurde deshalb in dieser Phase der Verbrennung generell null gesetzt). Das Diagramm unten zeigt die Verläufe der softwareseitig vorgegebenen Spannungen für die Gebläsedrehzahlen und die daraus resultierenden Luftmassenströmungen für Primär- und Sekundär-Verbrennungsluft. Brennstoff: Hier drei Lagen (ca. 9kg) Buchenholzscheite

- Alle Abbrandexperimente zeigten recht niedrige Emissionen (CO/HC -Signal $< 100\text{mV}$) in der Hochtemperaturphase bei TNBK oberhalb ca. 900°C und $\text{ROC} > 3\%$ (Abbildung 10.4). Bemerkenswert ist die gute Verbrennungsqualität selbst bei verhältnismäßig niedriger ROC. Dies zeugt von einer sehr guten Durchmischung der Pyrolysegase mit der Sekundär-Verbrennungsluft. Bereits in dieser Entwicklungsphase des ISIS-Regelungsalgorithmus (siehe Kapitel 10.2) kann offensichtlich die Hochtemperatur-Verbrennungsphase sehr stabil betrieben werden; die Vorteile dieser Regelungsstrategie gegenüber einer Emissionskantenregelung, wie sie in Kapitel 7.4.5 versuchsweise eingeführt wurde, sind beträchtlich. Das zeigen die CarboSen-Signale zwischen Min. 6

und min. 36 deutlich. Die Referenzierung der Signale des CarboSen-CO/HC-Sensors bzw. der daraus errechneten $\text{CO}/\text{H}_{2,\text{äquiv.}}$ -Werte durch begleitende Analyse des Abgases mittels eines Hochtemperatur-FTIR-Analysesystems, wird in Kapitel 11.4 diskutiert.

- Fällt die Verbrennungstemperatur auf Werte unterhalb ca. 920°C , dann steigen die Emissionen steil an (Abbildung 10.4, Min. 36). Detailliertere Untersuchungen hierzu werden anschließend nochmals separat diskutiert.
- ROC wurde simultan mit der O_2 – Sonde (MFO10-O) der Dittrich GmbH und mit der LSU 4.9 der Bosch GmbH registriert. Beide Messungen verlaufen, von einem kleinen Offset abgesehen, sehr gleichförmig. Der rapide Abfall der ROC nach Erreichen von $\text{TNBK} > 800^{\circ}\text{C}$ nach der Zündung ist charakteristisch. Dieser Übergang in die HT-Phase ist regelungstechnisch nicht einfach zu beherrschen, da je nach Entwicklung der Verbrennungskinetik kurzzeitige Sauerstoffdefizitzustände entstehen können. In diesem Beispiel (Abbildung 10.4) wird die Regelung der Verbrennungsluftströme in der Zündphase sehr gut beherrscht. Ab ca. Min. 17 wurde interaktiv Phase 5 (Teillastbetrieb bei $\text{TNBK} = 925^{\circ}\text{C}$) gewählt, was zu einer Absenkung der Verbrennungstemperatur von ca. 1010°C auf ca. 920°C führte, bevor dann nach Min. 35 bereits der Ausbrand sich ankündigt, da in diesem Experiment ausnahmsweise nur drei Scheitholzlagen (ca. 9kg) gezündet wurden. - Der Regelungsalgorithmus sieht vor, durch Erhöhung des Primärluftstromes die TNBK hoch zu halten. Dies äußert sich in einem kontinuierlichen Anstieg von ROC und ist begleitet von deutlich erhöhten Emissionen infolge zu geringer Verbrennungstemperaturen als Folge des Brennstoffmangels gegen Ende der ersten HT-Phase.
- Nachdem TNBK sich von oben 720°C genähert hatte (Übergang zur Ausbrandphase), wurde nachgelegt, um diese Verbrennungsphase ebenfalls regelungstechnisch abzubilden. Diese Verbrennungsbedingungen sind hinsichtlich der Vermeidung hoher Emissionen am schwierigsten zu beherrschen, da wegen des kaum reproduzierbaren Zündverhaltens des Feuerholzes auf dem Glutbett infolge (i) kaum reproduzierbarer Glutbettmenge bzw. von deren Verteilung und (ii) kaum reproduzierbarer Scheitholzaufgabe (Geometrie) sich in den ersten 3min nach Auflage der Holzscheite eine extrem instationäre Verbrennungssituation mit teilweise extrem hohem Sauerstoffbedarf einstellen kann. Entsprechend hohe Emissionen unter ROC-Defizit wurden im Zeitraum von Min. 44 – Min. 48 und nochmals bei Min. 53 registriert. Diese Situationen sind wegen des Sauerstoffdefizits auch bei hohen Verbrennungstemperaturen von hohen Emissionen begleitet. Wie nahezu alle Experimente gezeigt haben, sind die Emissionen in den ersten ca. 4 min nach dem Nachlegen sogar beträchtlich höher als beim Kaltstart in der Zündphase. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, da, wie oben bereits ausgeführt, bei relativ großer Glutmenge und entsprechend hohen Temperaturen sehr lebhaft, extrem sauerstoffkonsumierende Zündvorgänge entstehen können, die nur bei einer entsprechend hohen Regelungsdynamik der Verbrennungsluftströme beherrscht werden können. Dies stellt entsprechend hohe Anforderungen an die Konstruktion der Anlage und erfordert situationsspezifische Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen.
- Die zweite HT-Phase des Experiments (Abbildung 10.4) wird ausgesprochen schnell erreicht, die Nachlegephase (4) dauert ca. 2,5min bis zum Übergang in die HT-Phase (2) und der Übergang der TNBK von 550°C auf 900°C benötigt 30s. Diese Ergebnisse sind als überaus günstig einzustufen, da sie belegen, dass der Übergang in die HT-Phase nach dem Nachlegen sehr kurz gehalten werden kann und damit die Phase hoher Emissionen infolge niedriger TNBK entsprechend kurz ist. Allerdings bedarf dies, wie bereits oben angesprochen, spezieller Regelungsalgorithmen in Phase (4), die offensichtlich beim momentanen Entwicklungsstand die schnellen Änderungen des Verbrennungsprozesses noch nicht genügend gut abbilden, um die oben erwähnten, kurzen Phasen mit ROC-defizit zu vermeiden. In den beiden letzten Experimenten wurde speziell die Regelung in den Phasen (1) und (4) modifiziert, um dieses instationäre,

von hoher Dynamik beherrschte Verhalten des Verbrennungsprozesses besser zu beschreiben. Das Ergebnis veranschaulichen Abbildung 10.5 und Abbildung 10.6.

- Ist die Bedingung $TNBK < 720^{\circ}\text{C}$ und $ROC > 6\%$ erfüllt, dann geht die Verbrennungsluftregelung in die Ausbrandphase (3) über. In dieser Phase wird sowohl die Drehzahl des Primär- als auch das Sekundärluftgebläses linear mit TNBK verringert, der Drehzahlnullpunkt (U_{s_ctl} bzw. $U_{p_ctl} = 4,5\text{V}$) wird bei $TNBK = 450^{\circ}\text{C}$ jeweils erreicht. Wie aus Abbildung 10.4 zu entnehmen ist, fließt auch ohne aktiven Betrieb der Gebläse jeweils ein Restluftstrom von ca. 1l/s. Dies ist offensichtlich eine Folge der relativ hohen Leistung des Saugzuggebläses. – Die CO-Emissionen die vor Eintritt in die Ausbrandphase bzw. während dieser Phase registriert werden (Abbildung 10.4) sind zwar erheblich höher als in der HT-Phase, jedoch deutlich niedriger als die in Abbildung 7.4, Kapitel 7.4.2 beobachteten. Dies unterstreicht, dass dieser erste, einfache Lösungsansatz der temperaturgesteuerten Verbrennungsluftrücknahme bereits wirksame Emissionsminderungen verspricht. Gleichwohl sind weitere Optimierungen auch in dieser wegen zu geringer Verbrennungstemperaturen wenig mit Primärmaßnahmen beeinflussbaren Phase denkbar. Eine wirklich substantielle Verringerung der gasförmigen Emissionen wird in dieser Phase allerdings nur durch katalytisch gestützte Nachverbrennung möglich sein (Kapitel 10.6).

10.4 Untersuchungen zur Teillastfähigkeit

Wie bereits oben erwähnt, wurde zur Untersuchung der Teillastfähigkeit des Kessels der Regelungsalgorithmus erweitert. Hierbei wurde zugrunde gelegt, dass der Wärmestrom gesenkt werden kann, wenn TNBK und damit der Primärverbrennungsluftstrom gesenkt wird. Eine Erweiterung des Regelungsalgorithmus durch eine Phase 5 erlaubte die Absenkung des Sollwertes von TNBK durch interaktiven Eingriff in die ISIS-Regelungssoftware, um diesen Betriebszustand experimentell nachzubilden. Wie Abbildung 10.4 zeigt, wurde bei Min. 22,5 der Teillast-Betriebsmodus gestartet, indem die Solltemperatur von 950°C auf 925°C reduziert wurde. Aus dem unteren Diagramm ist sehr gut zu sehen, dass die Gebläsedrehzahl (U_{p_ctl} , hier angegeben in V) linear über die Zeit langsam reduziert wird und daraus resultiert in den ersten ca. 3-4 Min. auch eine stabile Verbrennungstemperatur bei ca. 900°C . Hier nicht weiter diskutierte Experimente haben gezeigt, dass eine schnellere Rücknahme der Gebläsedrehzahl nicht sinnvoll ist, da dann das Risiko sauerstoffdefizitärer Verbrennungssituationen besteht, was verbunden ist mit einem Temperatureinbruch (TNBK sinkt unter 800°C) und entsprechend hohen Emissionen.

Jedoch etwa in Min. 26 steigt TNBK innerhalb von wenigen 10s auf ca. 1060°C und wird anschließend relativ stabil um eine Temperatur von ca. 990°C geregelt, obwohl die Primärverbrennungsluftströme von zuvor ca. 4l/s bei TNBK ca. 930°C auf jetzt ca. 1,8l/s bei TNBK ca. 990°C auf das technisch einstellbare Minimum gesenkt wurden. Es hat sich somit eine neue Verbrennungsprozesssituation eingestellt, die mit den zuvor gültigen Regelungsparameterwerten nicht beschrieben werden kann und diese neue Verbrennungssituation führte keineswegs zur gewünschten Absenkung von TNBK. Allerdings reagiert die Regelung mit dem Maximum der sekundärluftseitig einstellbaren Verbrennungsluftströme, so dass erhöhte Schadgasemissionen vermieden werden. Dieses Verhalten trat in mehreren Experimenten wiederholt auf und muss als systematische Kesseleigenschaft gewertet werden, die – wie in weiteren Experimenten gezeigt wurde – auch dann auftritt, wenn der Wechsel in den Teillastbetrieb vermieden wird.

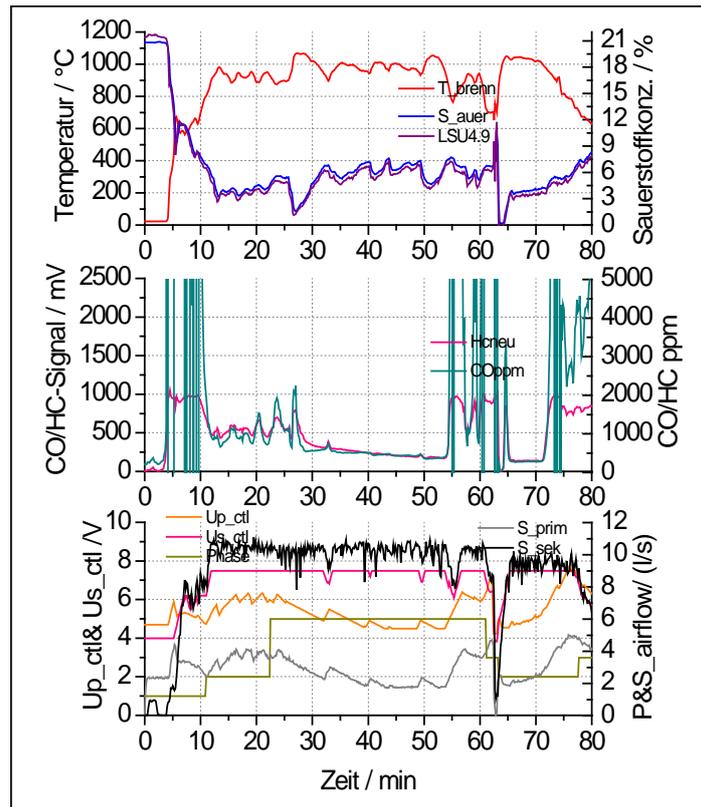


Abbildung 10.5 Abbrandexperiment mit Zündphase aus dem kalten Kesselzustand, Übergang in den Teillastmodus durch Reduktion der TNBK von 950°C auf 925°C bei Minute 22,5 und Nachbefüllung mit vier Scheiten Buchenholz bei Minute 63. Sekundärlufteinführung in Position 1

Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen der Partner am IFK (Kapitel 7.4.1). Hypothetisch kann dieses Verhalten möglicherweise dadurch erklärt werden, dass es nach einer gewissen Zeit nach der Zündung (ca. 20-30 min) zur Pyrolyse des Holzstapels auch oberhalb der Verbrennungszone kommt, was zu einem entsprechend höheren Wärmestrom in die Sekundärbrennkammer führt. Die Folge sind sehr hohe Verbrennungstemperaturen, die zwar von recht niedrigen Emissionen begleitet sind, jedoch den (gewünschten) Teillastbetrieb nicht zulassen.

10.5 Finaler Entwicklungsstand der Verbrennungsluftregelung in Projektstufe I

Der in Projektstufe I erreichte vorläufige finale Entwicklungsstand der Verbrennungsluftregelung wird in (Abbildung 10.56) dargestellt. Dieser wurde insbesondere in der Zünd- und Nachlegephase nochmals modifiziert, um die Arbeitstemperatur (TNBK > 900°C) nach der Zündung zügig zu erreichen und gleichzeitig Verbrennung unter Sauerstoffdefizit am Übergang der beiden instationären Phasen in die nachfolgende HT-Phase zu vermeiden. Die in Abbildung 10.5 und Abbildung 10.6 vorgestellten Ergebnisse wurden allerdings mit Position 1 der Sekundärlufteinströmung erzielt. Wie bereits oben ausgeführt, und in Kapitel 7.4.3, Tabelle 7.3 dargestellt, ist dies nicht die Position, mit der optimale Nachverbrennung erzielt wird. Dies erklärt die etwas schlechteren Emissionswerte in der HT-Phase im Vergleich mit den Messdaten in Abbildung 10.4 und Abbildung 11.11 insbesondere bei TNBK < ca. 1060°C, sollte aber die Untersuchungsergebnisse für die instationären Phasen nicht bedeutend beeinflussen.

Gleichwohl sind weitere Optimierungen der Verbrennungsluftregelung in der HT-Phase notwendig, um (sporadische) sauerstoffdefizitäre Situationen in der HT-Phase bei den höchsten Verbrennungstemperaturen zu vermeiden (Min. 55 – Min. 65, Abbildung 10.6). Hierzu gehört eine stabile Regelung im engen Bereich $3\% < \text{ROC} < 5,5\%$. Diese Feinjustierungen der Regelalgorithmen waren allerdings in Anbetracht der knappen verfügbaren Experimentierzeit nicht möglich und sind angesichts der – wie oben erwähnt - kaum regelbaren Verbrennungsvorgänge in der Primärbrennkammer (ab ca. Min. 30) auch nicht sinnvoll bevor diesbezüglich ein Lösungsweg (Modifizierung der Brennkammer?) gefunden ist.

Bei detaillierter Betrachtung kann festgestellt werden, dass die Vermeidung sauerstoffdefizitärer Verbrennungszustände in der Zünd- und Nachlegephase jetzt weitgehend gelungen ist. TNBK steigt in der Zündphase sehr schnell (innerhalb 3min nach Verschluss der Kesseltür auf ca. 900°C), anschließend sinkt ROC um ca. Min. 10 nicht unter ca. 1,5% und bei Min. 83, nach dem Nachlegen, nur äußerst kurzzeitig unter 1%. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die CO/H_2 -Äquivalenzwert in Situationen niedriger ROC nicht aussagekräftig sind, da das CarboSen-Signal bei $\text{ROC} < 2\%$ generell nicht repräsentative Werte liefert. Dies ist eine Folge des Sensorsignals durch Mischpotenzialbildung.

Das nach dem letzten Entwicklungsstand recht günstige Verbrennungsluft-Regelungsverhalten in der Zündphase (Abbildung 10.6) wurde durch lineare Erhöhung der Primärluft-Gebläsedrehzahl bis zu $\text{TNBK} = 500^{\circ}\text{C}$ und durch darauf folgende lineare Absenkung derselben für Temperaturen $\text{TNBK} > 500^{\circ}\text{C}$ bei gleichzeitiger Berücksichtigung der ROC erreicht. Weiterhin wurde das Sekundärluft-Gebläse erst nach Erreichen von $\text{TNBK} > 500^{\circ}\text{C}$ zugeschaltet, um die schnelle Erhöhung von TNBK durch zu frühzeitige Eindüsung von kalter Verbrennungsluft nicht zu verzögern, d.h. die Sekundärluft-Gebläsedrehzahl wurde oberhalb dieser Temperatur linear mit TNBK und dem CO/H_2 -Äquivalenzwert erhöht. - Gleichwohl sind weitere Verbesserungen der Regelung recht aussichtsreich, wenn auch das dynamische Verhalten der Regelung optimiert wird.

Allerdings werden die im Vergleich in Abbildung 11.11, Kap. 11.4 beobachteten CO-Konzentrationen von zeitweise deutlich unter 100ppm nur kurzzeitig erreicht. Auffallend ist auch, dass nach Erreichen von $\text{TNBK} > 900^{\circ}\text{C}$ das CO/HC-Signal nicht wie gewohnt steil absinkt, sondern bei Verbrennungstemperaturen um ca. $\text{TNBK} = 900^{\circ}\text{C}$ relativ hohe Emissionsspitzen beobachtet werden. Dies wird, wie oben bereits angesprochen, auf die Neupositionierung der Sekundärluftzufuhr (Position 1) zurückgeführt.

Insgesamt ist zwischen Min. 30 und Min. 68 TNBK zu hoch (Abbildung 10.56), was wahrscheinlich die Folge des unkontrollierbaren Abbrandverhaltens des Holzstapels ist (siehe oben), jedoch konnte in dieser langen Phase der Primärverbrennungsluftstrom nicht weiter zurückgenommen werden, da dies die Drehzahlregelung des Gebläses nicht zuließ. Auch wird zwischen Min. 57 und Min. 63 eine kurze Sauerstoffmangelsituation beobachtet, die bei gleichzeitig sehr hohen Verbrennungstemperaturen TNBK durch weitere Erhöhung des Sekundärluftstromes wahrscheinlich hätte vermieden werden können, jedoch beim momentanen Stand regelungstechnisch nicht zufriedenstellend beherrscht werden konnte, da der Sekundärluftstrom bereits das einstellbare Maximum erreicht hatte. Vermutlich hätte die mechanische Limitierung der Verbrennungsluftströme durch Einfügen einer Blende in den Primär-Verbrennungsluftkanal und die weitere Optimierung des Blendendurchmessers im Sekundär-Verbrennungsluftkanal die Regelungscharakteristik weiter verbessert. Es bestehen somit noch Optimierungsmöglichkeiten. Gleichwohl konnte in der kurzen Experimentierzeit

von nur zwei Monaten bereits ein recht fortgeschrittener Stand erreicht werden, der in weiten Bereichen des Abbrandes sehr niedrige Emissionen ermöglicht.

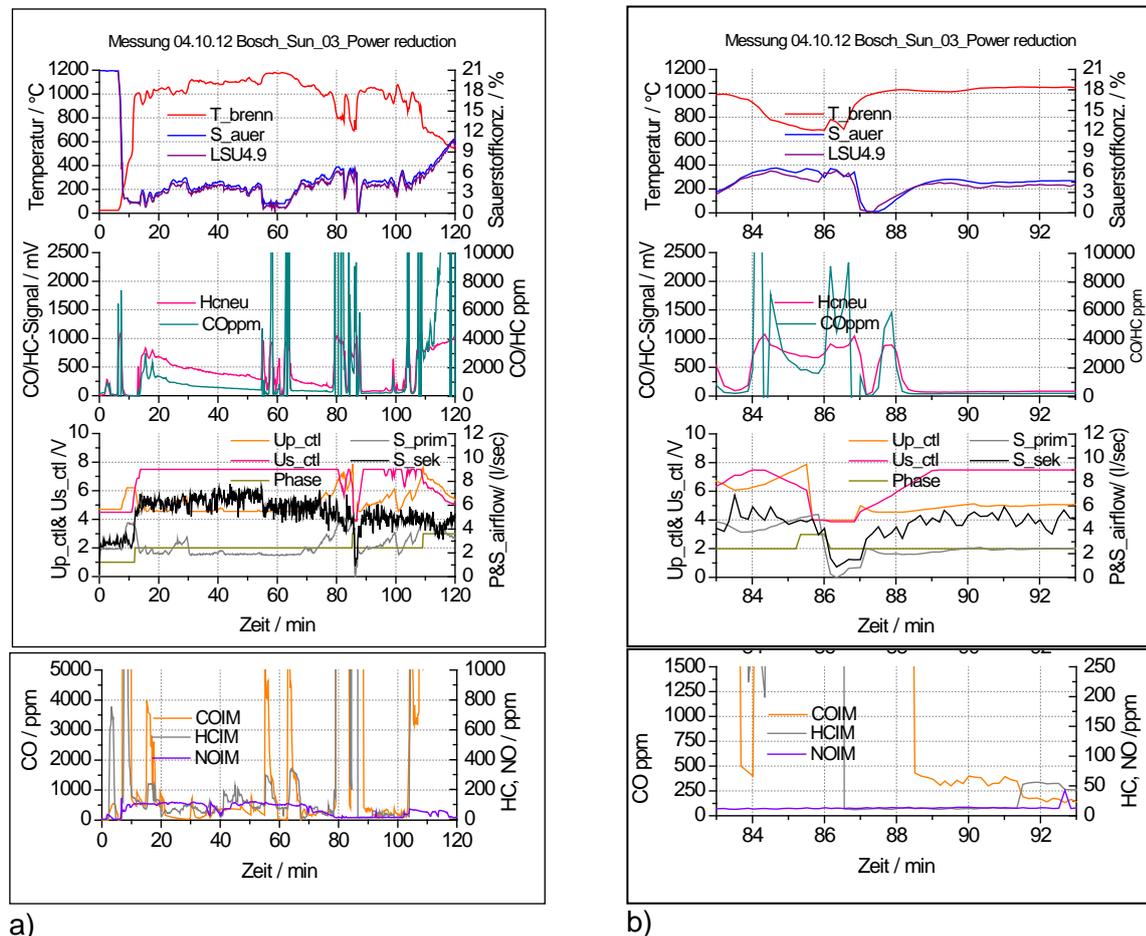


Abbildung 10.6 Beispiel eines Abbrandverlaufes, der nach dem letzten Stand der Entwicklung des Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmus in Projektstufe I durchgeführt wurde. (a) Gesamtüberblick, der gesamte Abbrand wurde mit der „ISIS-Vollast-Regelung“ durchgeführt. (b) Detaildarstellung des Abbrandverhaltens nach dem Nachlegen von vier Holzscheiten bei Min. 87 . Die Bezeichnungen der Kurven entsprechen denen in Abbildung 10.5. Im untersten Diagramm ist jeweils zusätzlich der Verlauf der CO-, HC- und NO-Konzentration dargestellt, die mit dem Rauchgasanalysegerät (IM 2800) simultan registriert wurden

Aus der detaillierten Darstellung des Abbrandverlaufes nach dem Nachlegen von vier Holzscheiten bei ca. Min. 86 (Abbildung 10.6 b) lassen sich einige zusätzliche Erkenntnisse über das instationäre Verhalten der Anlage gewinnen. Nachdem die Regelung etwa bei Min. 86,5 wieder auf „Automatik“ gesetzt war (die Gebläse wurden während des Befüllungsvorganges beide ausgeschaltet, um ausströmendes Gas aus der Füllöffnung zu minimieren), stieg TNBK sehr schnell von ca. 700°C auf ca. 1000°C an, gleichzeitig wurde der Primär-Verbrennungsluftstrom nach einer kurzen Zündphase auf den (einstellbaren) Minimalwert zurückgefahren und der Sekundärluftstrom kontinuierlich gesteigert. Es tritt, wie oben bereits erwähnt, mit dem Anstieg von TNBK nur eine sehr kurze Sauerstoffdefizit-Phase auf, die etwa 1min andauert und von hohen Emissionen begleitet ist. Bereits ca. 1,5min nach dem Verschließen der Fülltür ist die CO-Konzentration wieder auf Werte <500ppm abgesunken.

Diese schwierig zu beherrschenden instationären Verbrennungssituationen werden somit bereits recht gut regelungstechnisch beherrscht, gleichwohl scheint eine weitere Verbesserung möglich, wenn die Sekundärverbrennungsluft (softwareseitig) noch schneller erhöht wird und insgesamt größere Sekundärluftströme durch Blendenoptimierung (siehe oben) zugelassen werden.

Weiterhin wurden zu diesem Abbrand auch die partikulären Emissionen mittels eines SMPS/APS-Systems (TSI Inc.) analysiert. Und schließlich gibt Tabelle 10.1 einen Überblick über die gravimetrisch bestimmten Gesamtstaubemissionen von fünf gegen Ende der Experimentierkampagne durchgeführten Abbränden. Hierzu wurde ein Feinstaubentnahmesystem (Paul Gothe GmbH) verwendet und die Staubkonzentrationen mit Tiefenfiltern des Herstellers unter Beachtung der VDI-Norm 2066 während der HT-Phase jeweils über ca. 30 Minuten ermittelt (Tabelle 10.1).

Tabelle 10.1

Abbrand-Nr.	Mittlere ROC / %	Gasmenge /m ³	Entnahmezeit / min	Staubmenge /mg	Staubkonz. mg/m ³	Staubkonz. bezogen auf 13%ROC mg/m ³
17	4	0,30	23	9,0	30,0	14,1
18	5,5	0,37	34	10,6	28,6	14,8
20	5	0,39	30	12,0	30,8	15,4
21	4,5	0,33	30	9,9	30,0	14,6
22	4	0,36	30	10,5	29,2	13,7

Die gravimetrisch bestimmte Gesamtstaubkonzentration zeigt eine verhältnismäßig geringe Streuung und ist deutlich niedriger als die nach der 1. BImSchV in der zweiten Stufe geforderten 20mg/m³, allerdings deutlich höher als der angestrebte Wert von 8mg/m³ (siehe Tabelle 1). Die oben angesprochene weitere Reduktion des Primärverbrennungsluftstromes in der Hochtemperatur-Verbrennungsphase kann vermutlich von regelungstechnischer Seite in diesem Zusammenhang weitere Fortschritte bewirken.

Die Feinstaub-Partikelanalyse wurde in mehreren Phasen der Verbrennung separat durchgeführt (Abbildung 10.7). Überraschenderweise ist die Konzentration der feinen Partikel PM<200nm in der frühen HT-Phase besonders gering. Die relativ geringe PM-Emission in der darauf folgenden Phase (Min.31-60) war erwartet worden, da hier der Primärluftstrom konstant auf dem niedrigsten einstellbaren Wert gehalten wurde. Teilweise mehr als eine Größenordnung höhere PM-Emissionen werden in Phasen beobachtet, in denen das Regelungssystem den Primärluftstrom erhöht, um bei zu Ende gehendem Brennstoffvorrat die Verbrennungstemperatur hochzuhalten (Min. 78-90 und Min. 100-108). Dies zeigt deutlich den starken Einfluss des Primär-Verbrennungsluftstromes, der durch die Glut geführt wird, auf die PM-Emissionen und bekräftigt obige Vermutung, dass durch regelungstechnische Minimierung des Primär-Verbrennungsluftstromes als Primärmaßnahme diese Größe ebenfalls minimiert werden kann. Die Verteilung der Konzentration der „großen Partikel“ PM 700-2000nm scheint hingegen in allen Phasen nahezu gleich zu sein.

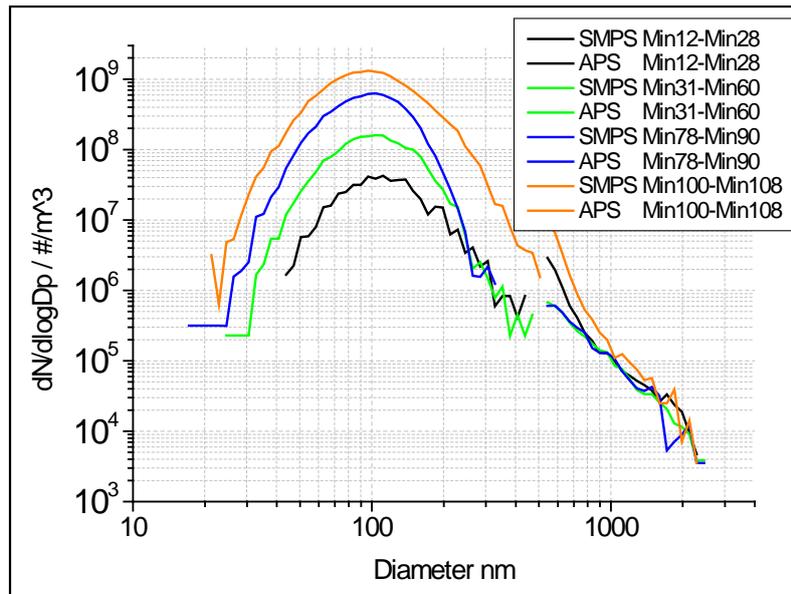


Abbildung 10.7 Verteilung der Partikelzahl über die Größe, gemessen in verschiedenen Abbrandphasen des Experiments in Abbildung 10.5. Es wurde in Abständen von drei Minuten je ein Spektrum aufgenommen und in den angegebenen Zeitintervallen gemittelt

10.6 Messungen mit Abgaskatalysator

Die hohen gasförmigen Emissionen in den instationären Verbrennungsphasen Zündphase, Nachlegephase und Ausbrandphase sind grundsätzlich nicht durch optimierte Verbrennungsluftregelung zu beherrschen, weil infolge von zu niedrigen Reaktionstemperaturen in der Nachbrennkammer (TNBK < 900°C) die notwendige Oxidationskinetik nicht erreicht wird. Gleichwohl kann eine optimierte Verbrennungsluftregelung, wie oben gezeigt, diese Phasen unvollständiger Verbrennung zeitlich minimieren. Aus diesem Grund war im Projektzeitraum die Integration eines Oxidationskatalysators an geeigneter Stelle im Abgaskanal vorgesehen.

Es waren zwei Varianten eines Oxidationskatalysators vorbereitet worden:

- Integration eines auf Metallfolien geträgerten Katalysators (EcoCat GmbH) in das Abgasrohr zwischen Nachbrennkammer und Rauchgaswärmetauscher. Die Ausführung der Wellfolien (Anzahl CPSI) wurde mit dem Hersteller besprochen. Zuerst sollte durch Integration unbeschichteter Wellfolien die Abgastemperatur und der Druckverlust am Katalysator in den verschiedenen Verbrennungszuständen untersucht werden. Anschließend waren dann Experimente mit beschichteten Blechen geplant.
- Integration eines kommerziellen Abgaskatalysators (Dr. Pley Environmental GmbH).

Letztlich musste auf die Experimente mit Katalysator angesichts

- des erheblichen technischen Aufwandes (Umbau der Anlage und experimentelle Untersuchung der geeignetsten Position im Abgasstrang)
- der mit der Installation verbundenen Neuanpassung der Regelungsalgorithmen

infolge der zu knappen Experimentierzeit nach Eintreffen und Installation des Musterkessels am ISIS verzichtet werden.

11 Abgassensorik

11.1 Vergleich der drei ROC-Messprinzipien im Abgas

Um letztlich bewerten zu können, welche der drei von den Sensorik-Partnern zur Verfügung gestellten, auf verschiedenen Messprinzipien beruhenden Sensorelemente zur kontinuierlichen Detektion von ROC im Abgas des Feuerungsprozesses geeignet sind, waren in Projektstufe I einige experimentelle Untersuchungen vorgesehen. Zur Verfügung standen

- die O₂ – Sonde (MFO10-O) der Dittrich GmbH
- die Breitband-Lambdasonde LSU 4.9 der Bosch GmbH und
- der Kombisensor KS1-D der Lamtec GmbH.

Alle drei Sensorprinzipien wurden in Kap. 9.1 des Schlussberichtes der Vorstudie /Vor10/ im Detail beschrieben. Sie basieren auf elektrochemischen Hochtemperatur-Zellen, die im Abgas bei Temperaturen bis ca. 400°C betrieben werden können. Die Sensorprinzipien a) und b) beruhen auf der Kombination einer coulombmetrischen Zelle mit einer Nernst-Konzentrationszelle, die Sonde unter c) vereint eine klassische Nernst-Konzentrationszelle zur Bestimmung der ROC mit einer Mischpotential-Zelle zur Bestimmung des CO/HC-Gehaltes. Im Folgenden werden die zugehörigen Signale dieses Sensortyps als KS1-D(O₂) und KS1-D(CO/HC) separat diskutiert.

Als viertes Messprinzip war eine ein-Chip-Kombisonde, die im Rahmen des Projektes zur Musterreife entwickelt werden sollte, für die Tests vorgesehen. Diese Neuentwicklung konnte bis zum Projektende seitens des Verbundpartners IRS nicht zur Verfügung gestellt werden (siehe Kap. 19).

Das Verhalten der Sonden wurde zuerst in O₂/N₂-Gemischen in der ISIS-Gassensor-Testanlage /Jer02/ und anschließend im Abgas untersucht.

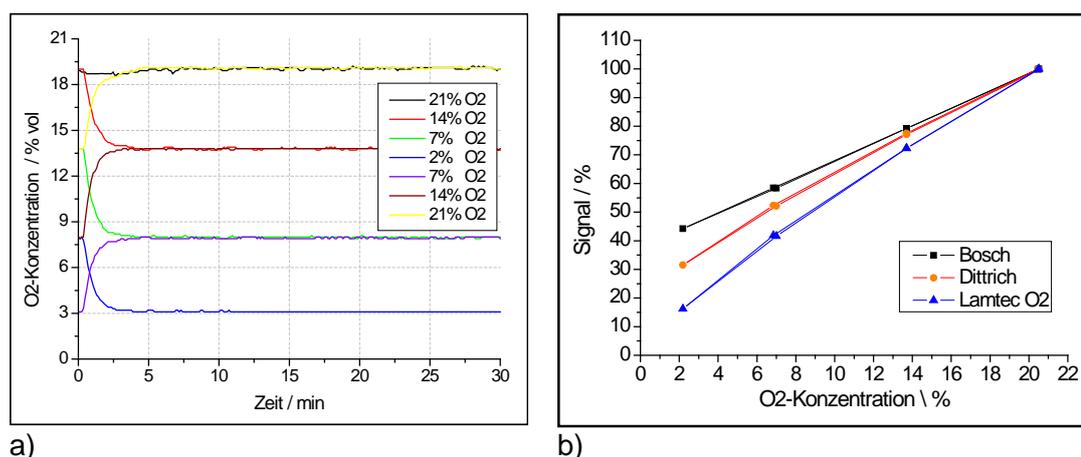


Abbildung 11.1 Zeitverlauf des Sauerstoff-Sensorsignals, beispielhaft aufgeführt für den Lamtec KS1-D (O₂) Sensor (a), aufgenommen über vier verschiedene Sauerstoffkonzentrationsstufen absteigend und wieder aufsteigend /Leh11/. Die Sonden LSU 4.9 (Bosch) und MFO10-O wurden analogen Konzentrationsstufen unterworfen. In (b) wird die Signalabhängigkeit aller drei Sonden von der Sauerstoff-Konzentration verglichen

Alle drei Sensortypen zeigen sehr gute Reversibilität (Abbildung 11.1). Allerdings verläuft nur das Signal der LSU 4.9 in guter Näherung linear mit der Sauerstoffkonzentration.

Das Verhalten der drei genannten Sauerstoffsensoren im Abgas zusammen mit den CO/HC-Sensoren CarboSen1000 und KS1-D(CO/HC), wurde anhand von Feuerungsexperimenten mit dem Vitolog 200 – Scheitholzheizkessels (Viessmann, Allendorf) untersucht, da in dieser frühen Phase des Verbundprojektes der Musterkessel noch nicht zur Verfügung stand. Beispielhaft ist ein Abbrandverlauf in Abbildung 11.2 dargestellt. Die Verläufe der Signale der beiden Sauerstoffsensoren des Typs MFO10-O und der LSU 4.9 – Sonde sind in allen Verbrennungsphasen bis auf einen Offset äquivalent. Eine signifikante Abweichung im Signal der KS1-D(O₂) stellt sich allerdings immer in Situationen hoher CO/HC-Emissionen ein. Diese Abweichungen wurden anhand der Signale der KS1-D (CO/HC) und CarboSen 1000 im mittleren Diagramm bei Min. 13, Min. 27 und insbesondere ab ca. Min. 80 übereinstimmend beobachtet.

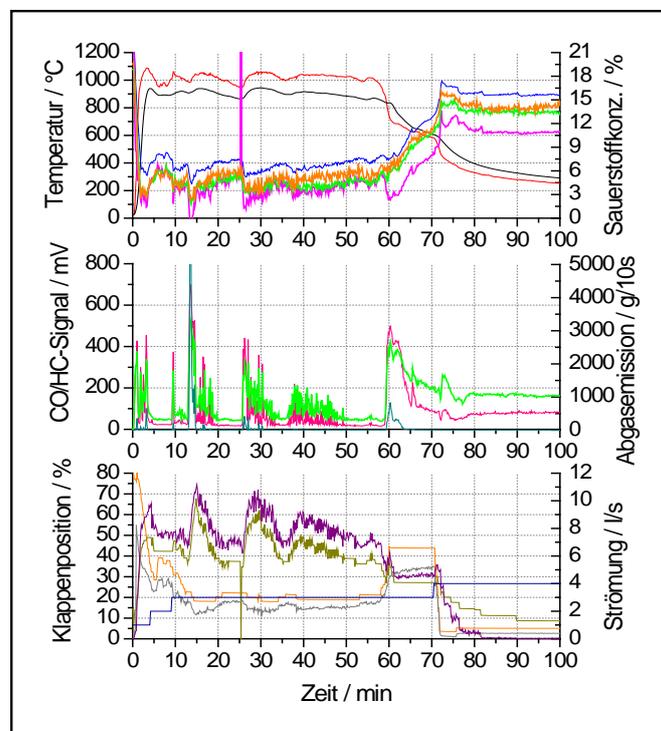


Abbildung 11.2 Beispiel eines Verlaufs eines Abbrandes im Vitolog 200 Scheitholzessel /Leh11/ bei Betrieb mit einem Oxidationskatalysator. Oberes Diagramm: Temperatur in der Nachbrennkammer (rot), Temperatur des Katalysators (schwarz), Sauerstoffkonzentration, gemessen mit den Sensoren MFO10-O (blau), LSU 4.9 (orange), einer Chipversion des MFO10-O (grün) und KS1-D(O₂). Mittleres Diagramm: Signal der KS1-D(CO/HC) (grün) und des CarboSen1000 (magenta), aus den Kalibrierdaten errechnete äquivalente relative Abgasemission (dunkelgrün). Unteres Diagramm: Verlauf der Klappenstellungen für Primärluftstrom (orange) und Sekundärluftstrom (oliv) bzw. die zugehörigen Verbrennungsluftströme (grau und lila). Die Verbrennungsphasen sind im unteren Diagramm durch eine horizontale Linie (blau) gekennzeichnet

Offensichtlich ist das Signal der KS1-D(O₂) auch vom CO/HC-Gehalt des Abgases abhängig. Dies wird als Hinweis auf eine (geringfügige) Mischpotenzialbildung auch an der Pt/YSZ-Halbzelle interpretiert, was bei hohem CO/HC-Gehalt zu einer Fehlmessung der ROC von

ca. -3% im Vergleich zu den beiden anderen Sensoren führt. Dies ist ungewöhnlich und deutet auf eine möglicherweise zu niedrige Betriebstemperatur des Sensorelementes hin. Falls diese Hypothese zutrifft, könnte eine etwas höhere Betriebstemperatur Abhilfe schaffen. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass dann die Sensitivität der CO/HC-Mischpotentialzelle abnimmt.

Während einer größeren Zahl von Abbränden (>22) wurden keine signifikanten Instabilitäten weder des MFO10-O-Typs noch der LSU 4.9 – Sonde beobachtet. Beide Messzellen scheinen für den Dauereinsatz in Abgasen von Stückholzheizkesseln gut geeignet.

11.2 Charakterisierung der CO/HC-Sensoren KS1-D(CO/HC), Dittrich CO/O₂ – Sonde und CarboSen 1000/10.000 in Modellgasen und im Abgas

Wie aus Abbildung 11.2 (mittleres Diagramm) zu entnehmen ist, sind die Signalverläufe des CarboSen1000 und des KS1-D(CO/HC) in Abhängigkeit vom CO/HC-Gehalt im Abgas durchaus ähnlich. Aus den deutlich höheren Signalen des KS1-D(CO/HC) in der Ausbrandphase (ab ca. Min. 65) kann vermutet werden, dass der Sauerstoffeinfluss auf die Bildung des Mischpotenzials in beiden Sensortypen unterschiedlich ist. Da dieser Einfluss jedoch im Kalibrierverfahren berücksichtigt (siehe Kapitel 11.3) und anschließend im Messeinsatz kompensiert werden kann, ist dies im Hinblick auf einen Einsatz im Feuerungsprozess kein Qualitätskriterium. Allerdings, wegen der oben angesprochenen Querempfindlichkeit des Sauerstoffsignals des KS1-D(O) bei hohen CO/HC-Emissionen ist diese Kompensation problematisch. Da vermutlich das Sauerstoffsignal nicht unabhängig vom CO/HC-Gehalt des Abgases ist (siehe oben), wurde der KS1-D-Kombisensor in seiner vorliegenden Ausführung zur Bestimmung der ROC und des sauerstoffkompensierten CO/HC-Gehalts als weniger geeignet eingestuft und wurde deswegen in den folgenden Experimenten nicht mehr weiter untersucht, obwohl die Kombination beider Funktionen in einer Sonde im Hinblick auf spätere Anwendungen als grundsätzlich attraktiv eingestuft wird.

Die Dittrich O₂ – Sonde (MFO10-O) wurde bereits oben hinsichtlich ihrer Eigenschaften zur Messung der ROC vorgestellt. Der Verbundpartner Dittrich Electronic hat sich der Aufgabe gewidmet, die MFO10-O zu modifizieren, in dem eine zusätzliche Mischpotentialelektrode (Pt/Au-Legierung) auf der Außenseite der Nernstzelle aufgebracht wurde. Details hinsichtlich des Aufbaus und des Funktionsprinzips dieser modifizierten Sonde wurden vom Verbundpartner in diesem Abschlussbericht beschrieben (Kap. 24). Da das Messsignal (Periodendauer der zyklischen Pumpsequenz) sowohl auf die O₂-Nernstzelle als auch auf die Mischpotentialzelle bezogen werden kann, stehen quasi simultan beide Informationen, ROC und das CO/HC-Mischpotential zur Verfügung. Dieser Kombisensor ist aus feuerungstechnischer Sicht besonders attraktiv, da er auf einem Chip, d.h. in einem einzigen Sensorgehäuse beide Prozessparameter, ROC und CO/HC-Gehalt zu messen erlaubt, was nicht zuletzt zu einer preiswerten Sensortechnologie führen sollte. Er ist als alternative Sensortechnologie zum Kombisensor des IRS (siehe Beitrag in diesem Abschlussbericht) bzw. zum oben beschriebenen KS1-D-Kombisensor zu sehen.

Die Dittrich O₂/CO – Sonde wurde dem ISIS inklusive Hard- und Software zur digitalen Registrierung der Messsignale über eine USB-Schnittstelle zu Testzwecken zur Verfügung gestellt (Abbildung 11.3).

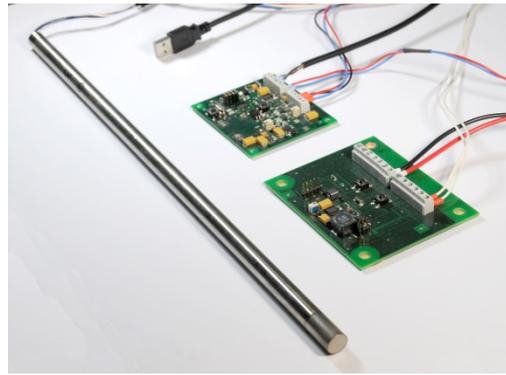


Abbildung 11.3 O₂/CO – Sonde der Dittrich Electronic GmbH incl. Messelektronik zur Registrierung der Signale über eine USB-Schnittstelle (siehe hierzu der Beitrag der Dittrich Electronic GmbH zum Abschlussbericht)

Um abgasrelevante Testsituationen zu simulieren, wurden am ISIS Gassensitivitätstests mit Mischungen von H₂ bzw. CO in N₂/synth. Luft-Gemischen durchgeführt. Diese Messungen wurden mittels der institutseigenen Gassensor-Testanlage vorgenommen, die nach Vorgabe von Gaskonzentrationssequenzen über die Zeit festlegbare Gasflüsse über eine Test-Software einstellt und simultan die Sensorsignale registriert /Jer02/. Die Messungen wurden in einer Messkammer zur simultanen Begasung mehrerer Sensorelemente durchgeführt (Abbildung 11.5). Ein charakteristisches Beispiel von aus solchen Messungen resultierenden Sensorsignalen ist in Abbildung 11.4 dargestellt.

Die Sensitivitätstests wurden bei stufenförmig vorgegebenen H₂- bzw. CO-Konzentrationen bei verschiedenen, ebenfalls stufenförmig vorgegebenen Sauerstoffpartialdrücken durchgeführt (Abbildung 11.4). Das Signal der Sauerstoff-Sonde, folgt den stufenförmig vorgegebenen Sauerstoffpartialdrücken, wobei sich hohe CO- oder H₂-Konzentrationen in geringfügigen Minderungen des O₂-Signals niederschlagen. Dies ist eine Folge von Oxidationseffekten an der Pt-Elektrode, da diese gleichzeitig als Katalysator wirkt (der Sauerstoffpartialdruck wird im thermodynamischen Gleichgewicht mit allen anderen Gaskomponenten registriert).

Wird bei konstantem O₂-Partialdruck die H₂- bzw. CO-Konzentration stufenweise erhöht, dann fällt das Signal der Mischpotenzialelektrode stufenförmig. Weiterhin wird beobachtet, dass das H₂- bzw. CO-Signal mit fallendem O₂-Partialdruck fällt und gleichzeitig die hohen Konzentrationsstufen nicht registriert werden (Sensitivitätsbegrenzung). Insbesondere letzteres Ergebnis ist ungewöhnlich und mit allgemein anerkannten Modellen zur Erklärung der EMK-Abhängigkeit von Mischpotenzialelektroden vom CO/HC-Gehalt bei variablem O₂-Partialdruck nicht vereinbar /Miu98/. Im Gegenteil, man erwartet, dass die Sensitivität für CO/HC mit fallendem O₂-Partialdruck steigt (Kap. 11.3). Möglicherweise liegt hier ein Problem bezüglich der Messtechnik/Signalauswertung vor, auf die während der Experimente am ISIS allerdings kein Einfluss genommen werden konnte.

Die Ergebnisse in Abbildung 11.4 zeigen insbesondere, dass beim niedrigsten O₂-Partialdruck (50mbar entspricht etwa 5%ROC) nur die erste (25ppm) und zweite (50ppm) H₂-Konzentrationsstufe durch eine Signaländerung registriert werden. Die hohen Konzentrationsstufen, 150ppm und 250ppm, schlagen sich nicht als Signaländerungen nieder. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei Beaufschlagung mit CO erzielt.

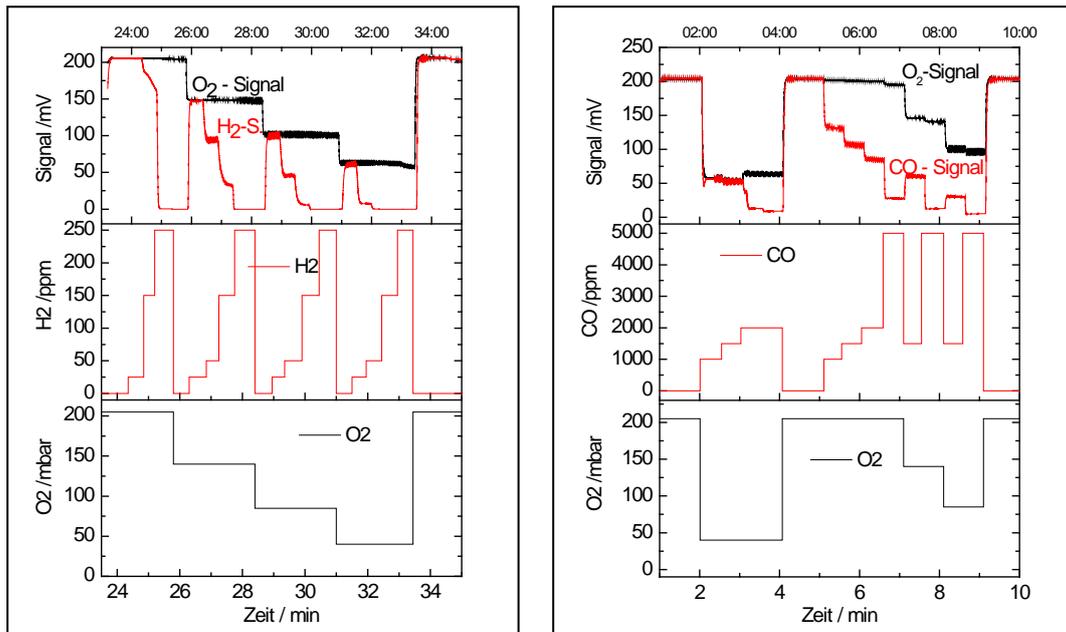


Abbildung 11.4 Signale der Dittrich - O₂/CO – Sonde bei Beaufschlagung mit H₂- bzw. CO-N₂/O₂-Gemischen bei unterschiedlichen Sauerstoffpartialdrücken. Im unteren und mittleren Diagramm sind jeweils die vorgegebenen Gaskonzentrationen, im oberen Diagramm die CO/H₂- bzw. O₂-Signale des Kombisensors dargestellt

Somit musste aus den obigen Ergebnissen geschlossen werden, dass die vorliegende O₂/CO – Sonde der Dittrich Electronic GmbH zwar (im Rahmen der Testsequenzen überprüfte) stabile Messungen von ROC und CO/HC verspricht, jedoch die Sensitivität im für die Feuerungstechnik relevanten ROC-Bereich ($2\% < \text{ROC} < 14\%$) unzureichend ist. In Anbetracht des etablierten Sensorprinzips bleibt allerdings momentan unklar, ob dieses nicht zufriedenstellende Verhalten ein Elektrodenproblem (Materialwahl bzw. Präparationstechnologie) oder ein Messtechnik-/Signalauswerteproblem darstellt. Antworten hierzu können nur vom Verbundpartner gegeben werden.

Weiterhin waren Sensitivitäts- und Stabilitätstests Kombisensors des IRS vorgesehen. Sensorelemente konnten allerdings vom Verbundpartner im Laufe des Berichtszeitraumes nicht zur Verfügung gestellt werden, so dass diese Untersuchungen abgesetzt werden mussten (siehe Bericht des IRS).

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich auf Sensitivitäts- und Stabilitätstests, die mit CarboSen – Sensorelementen sowohl in Modellgasen als auch in Abgasen des Feuerungsprozesses durchgeführt wurden. Die Problematik der Stabilität des Sensortyps CarboSen1000 wurde bereits im Schlussbericht der Vorstudie /Vor10/ beschrieben und mit ersten Testergebnissen belegt. Auch wurde ein Regenerationszyklus untersucht, der zumindest Hinweise auf eine Regenerationsfähigkeit der Sensoren durch kurzzeitigen Betrieb bei Sauerstoffüberschuss (an Umgebungsluft) bei gleichzeitig hohen Sensor-Temperaturen (ca. 800°C) gibt.

Aus früheren Experimenten sind überdies Hinweise zu folgendem Sachverhalt bekannt: Teilweise erhebliche Sensitivitätsminderungen werden im Abgas von Holzverbrennungsprozessen immer dann beobachtet, wenn der Verbrennungsprozess durch längere Verbrennungsphasen bei Sauerstoffmangel ($\text{ROC} < 1\%$ über mehrere Minuten) gekennzeichnet ist.

Dies stützt die Erkenntnisse, die in der Vorstudie gesammelt werden konnten, und motivierte Untersuchungen mit Modellgasen am gleichen Sensortyp in ungehäustem Zustand bei gleichzeitiger Variation der ROC (Abbildung 11.5).

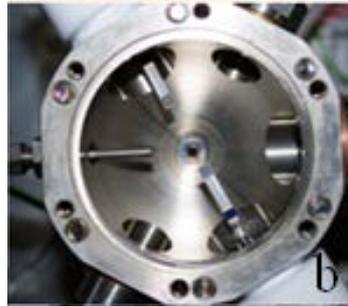


Abbildung 11.5 Gassensor-Messkammer mit zwei ungehäusten CarboSen-Sensorelementen und einem Thermosensor bei abgenommenem Kammerdeckel

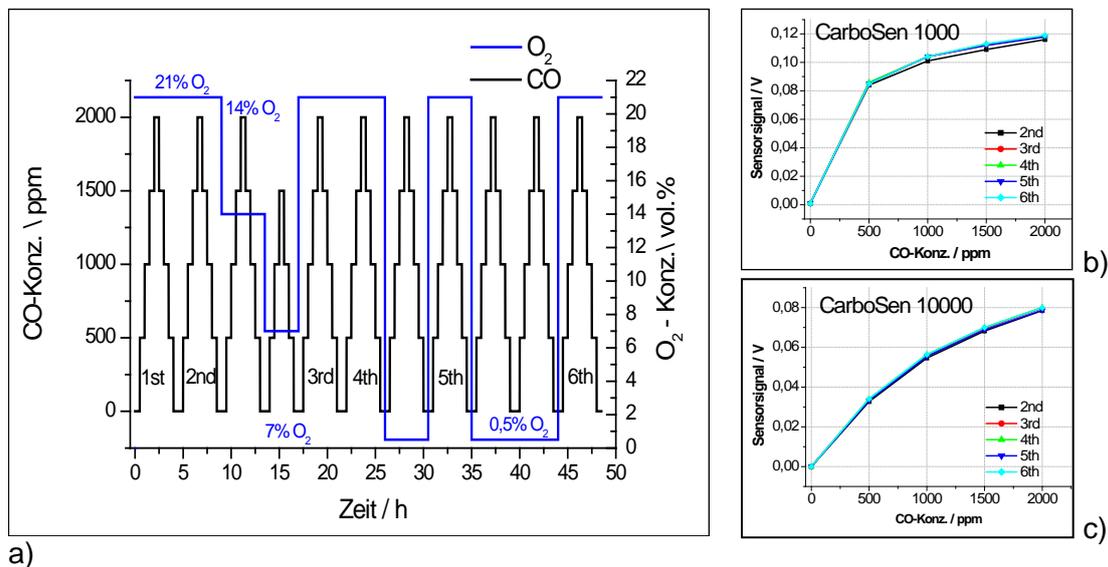


Abbildung 11.6 Gassequenz unterschiedlicher CO und O₂-Konzentrationen zur Untersuchung der Stabilität bzw. Reproduzierbarkeit des Mischpotenzials (a). Ähnliche Sequenzen wurden auch für die Gase H₂ und Propen beaufschlagt. Die Signale eines CarboSen1000 bzw. eines CarboSen10000 sind beispielhaft in (b) bzw. (c) über der Konzentration aufgetragen

Ein Auszug aus den Messsequenzen unter Beaufschlagung verschiedener Gaskonzentrationen auch bei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen, ist Abbildung 11.6 zu entnehmen. Wie die Untersuchungen zeigten, sind bei Beaufschlagung mit CO bzw. mit H₂ im Rahmen der Experimente keine signifikanten Sensitivitätsverluste erkennbar. Dies gilt auch nach Beaufschlagung mit Gasen bei geringer ROC (Abbildung 11.6 b, c).

Ganz anders stellt sich die Situation bei Exposition mit Propen dar. Beide Sensortypen, CarboSen1000 bzw. CarboSen10000 verlieren innerhalb von vier Gasexpositionsequenzen erheblich an Sensitivität (Abbildung 11.7). Diese deutliche Instabilität der Sensorelemente geht einher mit gut sichtbarer Verkokung der Elektrodenoberfläche, wie ein Vergleich der Sensorelemente vor und nach der Beaufschlagung mit Propen zeigt (Abbildung 11.8).

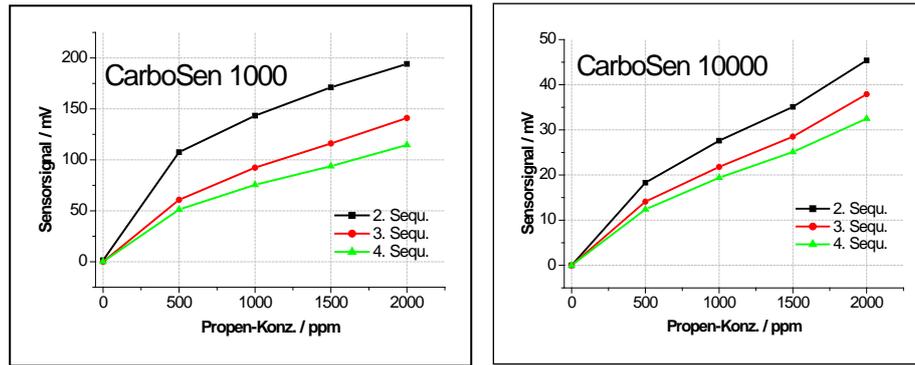


Abbildung 11.7 Signalverlauf der beiden CarboSen-Sensoren über der Konzentration von Propen nach verschiedenen Expositionssequenzen

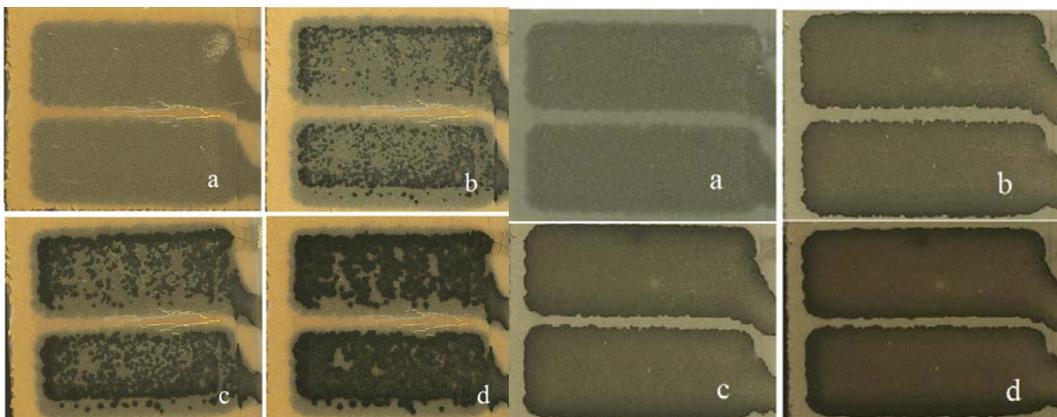


Abbildung 11.8 Foto der Pt/Au-Elektroden des CarboSen1000 (links) und des CarboSen10000 (rechts) (a) vor der ersten Messung, (b) nach der zweiten Messsequenz von Propen in Luft, (c) nach Betrieb über eine Messsequenz bei 14% O₂ und (d) nach Betrieb nach einer weiteren Messsequenz bei 7% O₂

Bereits bei Betrieb bei verschiedenen Propen-Konzentrationen in synth. Luft beginnt die Verkockung. Diese nimmt mit der Betriebszeit und mit sinkender ROC deutlich zu und ist auf den Elektroden des CarboSen10000 deutlich homogener verglichen mit derjenigen des CarboSen1000. Vermutlich ist dies eine Folge der Inhomogenität der Au/Pt-Konzentration (Legierung) infolge der erheblich kürzeren Temperzeit der Elektroden des CarboSen1000 bei niedrigerer Temperatur (10min bei 850°C vs. 4h bei 1050°C) /Aka11/.

Langzeituntersuchungen der CarboSen – Sensoren im Abgas durch begleitende wiederkehrende Kalibrierungen (siehe Kapitel 11.3) ergaben noch kein einheitliches Bild. Es kamen testweise CarboSen zum Einsatz, die bereits nach 2-3 Abbränden erhebliche Sensitivitätsverluste zeigten. Die Experimente mit dem Musterkessel wurden hauptsächlich mit einem CarboSen1000 (CS1820) durchgeführt (insgesamt 17 Abbrände), der zuvor schon in mehreren Holz- und Miscanthus-Pelletfeuerungen verwendet worden war und anhand mehrerer Zwischenkalibrierungen als vergleichsweise stabil identifiziert worden war. Zwischen den Einsätzen im Verbrennungsabgas im Musterkessel wurde immer wieder in CO, H₂ – Modellgasen verschiedener Konzentration kalibriert, so dass die Änderung der Sensitivität dargestellt werden kann (Abbildung 11.9).

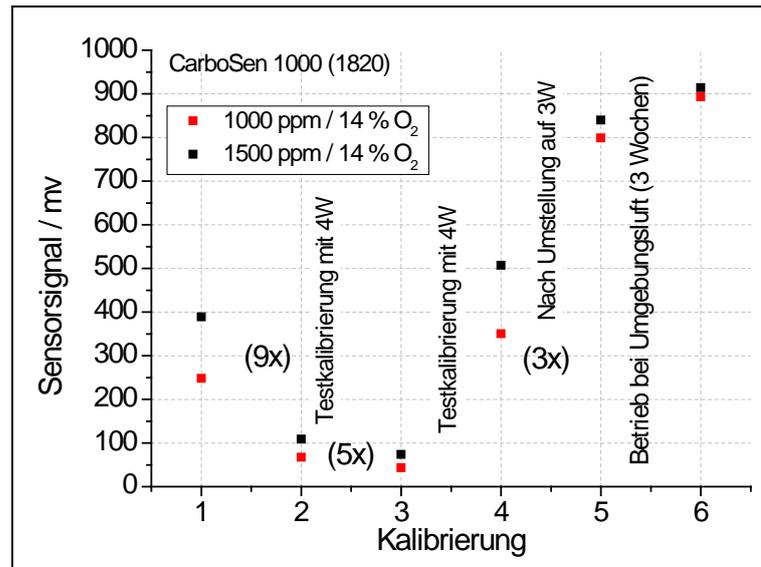


Abbildung 11.9 Sensorsignal des CarboSen1000 (1820) aus insgesamt fünf Kalibrierungen mit CO/H₂-Gasmischungen in Luft. Die Kalibriersequenz ist in Kapitel 11.3 näher beschrieben

Aufgetragen sind die Signale des CS1820-Sensorelementes bei jeweils 1000ppm bzw. 1500ppm CO/H₂ in synthetischer Luft. Die Signale der ersten Kalibrierung entsprechen in guter Übereinstimmung denen, die zuvor aus mehreren Kalibrierungen bekannt waren, die die Feuerungsexperimente mit Holz- bzw. Miscanthus-Pellets begleitet hatten. Die zweite Kalibriersequenz nach weiteren neun Feuerungsexperimenten mit dem Musterkessel ergab allerdings erheblich niedrigere Signale des CS1820. Dies wurde zuerst hingenommen, da über die Neuberechnung der Funktion $c(\text{CO}/\text{H}_2)_{\text{äquiv.}} = f(U)$, siehe Kapitel 11.3, der Sensitivitätsverlust im Feuerungsprozess-Regelalgorithmus berücksichtigt werden konnte. Nach weiteren fünf Abbrandexperimenten wurde die dritte Kalibrierung vorgenommen und ein weiterer, diesmal geringerer Sensitivitätsverlust festgestellt. Rücksprache mit dem Hersteller (Dr. Hammer, Escube GmbH) führte zur Vermutung, dass die Heizleistung und damit die Sensortemperatur zu hoch gewählt sein könnten. In der Tat lieferte die Rücknahme der Heizleistung von 4Watt auf 3Watt zur erheblichen Steigerung der Empfindlichkeit (Kalibrierung 4 und 5) sogar über den Wert hinaus, der im ersten Kalibrierexperiment gemessen worden war (Abbildung 11.9). Dieses Ergebnis entsprach zwar dem Verständnis der Generierung von Mischpotentialen (die Halbzellenpotentiale der Pt,Au/8YSZ- und der Pt/8YSZ-Halbzelle nähern sich grundsätzlich mit der Temperatur oberhalb $T=640^\circ\text{C}$ einander an), jedoch blieb zuerst unbeantwortet, wieso bei vormals konstanter Heizleistung (4Watt) während der ersten neun Experimente die Sensitivität so dramatisch zurückgegangen war. Erst die Erkenntnis des Herstellers, dass sich „bei Beaufschlagung mit bestimmten HC´s der keramische Innenwiderstand des Sensors bleibend erhöht“ (siehe Abschlussbericht IRS), erklärt die Beobachtung. Trifft diese Erhöhung des Innenwiderstandes - vermutlich während der ersten neun Abbrände - zu, dann regelt die elektronische Temperaturregelung die Sensortemperatur zu höheren Werten, was zur Erhöhung der Sensortemperatur und damit der beobachteten Sensitivitätsminderung führt. Weiterhin ist bemerkenswert, dass in Übereinstimmung mit ähnlichen Beobachtungen in /Aka11/, die Sensitivität nach weiteren drei Wochen Betrieb an Luft signifikant zunahm.

Aus den Beobachtungen sind folgende Schlüsse zu ziehen:

- Die Sensitivitätsexperimente an mit Modellgasen beaufschlagten ungehäusten Sensorelementen wurden bei konstanter Heizerspannung, also ohne elektronische Temperaturregelung durchgeführt. Signifikante Sensitivitätsänderungen über die Experimentierzeit wurden nur bei Beaufschlagung mit Propen beobachtet, jedoch nicht in CO- bzw. H₂-Luftgemischen. Dies bedeutet, dass dieser Sensitivitätsverlust über die irreversible Veränderung der Mischpotentialelektroden erklärt werden muss.
- Die Experimente im Feuerungsprozess wurden mit gehäusten Sensoren durchgeführt deren Arbeitstemperatur durch die elektronische Regelung des keramischen Innenwiderstandes des Sensorelementes seitens des Herstellers konstant gehalten wurde. Die Erhöhung des keramischen Innenwiderstandes wahrscheinlich durch Reaktionen mit bestimmten Gaskomponenten im Abgas, wie z.B. Propen, ist sicherlich eine weitere Ursache für die beobachteten Sensitivitätsverluste und erklärt das Verhalten in Abbildung 11.9 in Übereinstimmung mit den Ausführungen in Kap. 16.
- Dies bedeutet, dass die Langzeitstabilität dieses Sensortyps gesteigert werden kann, wenn die Regelung der Arbeitstemperatur zukünftig andersartig vorgenommen wird als bisher, z. B. durch Regelung des Heizerwiderstandes. Hierzu ist aber ein Vierpolbetrieb des Heizers notwendig (Beaufschlagung des Stromes und Messung der Spannung über getrennte Anschlüsse). Die hierzu notwendigen Änderungen des Heizerlayouts hat der Hersteller bereits vorgenommen. Tests am ISIS stehen allerdings noch aus.

11.3 Kalibriersequenz für CO/HC-Mischpotenzial-Sensoren

Um die Parametrierung des ISIS-Regelungsalgorithmus von den (unterschiedlichen bzw. sich verändernden) Sensitivitätseigenschaften des CarboSen-CO/HC-Sensors zu entkoppeln, ist im Förderzeitraum erstmals eine neue Kalibriersequenz definiert und aus den Kalibrierdaten sind Kalibrier-Funktionen abgeleitet worden, die eine Verbrennungsluftregelung in Abhängigkeit des CO/H₂-äquivalenten CO/HC-Gehaltes zulassen.

Bereits in der Vorstudie /Vor10/ war experimentell gezeigt worden, dass das Mischpotential der CarboSen-Sensoren für unterschiedliche Gaskomponenten eine unterschiedliche Sensitivität des Signals nach der Beziehung $U=a+b \cdot \ln(c(i))$ aufweist, wobei $c(i)$ die Konzentration der Gaskomponente i darstellt. Diese Sensitivität ist für H₂ sehr hoch, für CO mittel hoch und für Alkane wie z. B. Methan sehr niedrig /But09/. Weiterhin war festgestellt worden, dass angesichts der Vielzahl von Gaskomponenten, die bei Stückholzverbrennung emittiert werden, eine Regelung auf der Basis einer Abgasanalyse der Komponenten wegen des hohen Aufwandes aussichtslos erscheint. Andererseits ist die Berücksichtigung des Gehaltes an unverbrannten Gaskomponenten insbesondere zur Regelung der Verbrennungsluftströme von Feuerungsanlagen kleiner Leistung besonders erfolgversprechend, um die Emissionen alleine durch optimierte Verbrennungsluftregelung wirksam abzusenken /Koh12, Koh13/.

Folglich musste eine Kalibriersequenz definiert werden, die im relevanten Bereich von ca. 0-1200ppm CO/H₂,_{äquiv.} Gaskonzentrationen eine konzentrationsabhängige Regelung der Sekundärverbrennungsluftgebläse zulässt. Konzentrationen oberhalb 1200ppm wurden als zu hoch festgelegt und entsprechend im Algorithmus berücksichtigt. Da im genannten Konzentrationsbereich die Signale des CarboSen im Feuerungsprozess erheblich über denen liegen können, die bei CO/Luft-Beaufschlagung gemessen werden, wurden CO/H₂-Mischungen im Verhältnis 1/1 als Kalibriergase eingesetzt (Abbildung 11.10), um diesen Signalbereich später als Konzentrationsbereich darstellen zu können.

Darüber hinaus ist die ROC-Abhängigkeit des CarboSen-Signals in einer Kalibriersequenz abzubilden. Folglich war ein 2-dim. Kalibrierfeld zu definieren, in dem CO/H₂-

Konzentrationen von 500ppm, 1000ppm und 1500ppm bei ROC von 7%, 10,5%, 14% und 21% gewählt wurden. Ein Beispiel für eine solche Kalibrierung ist in Abbildung 11.10 dargestellt.

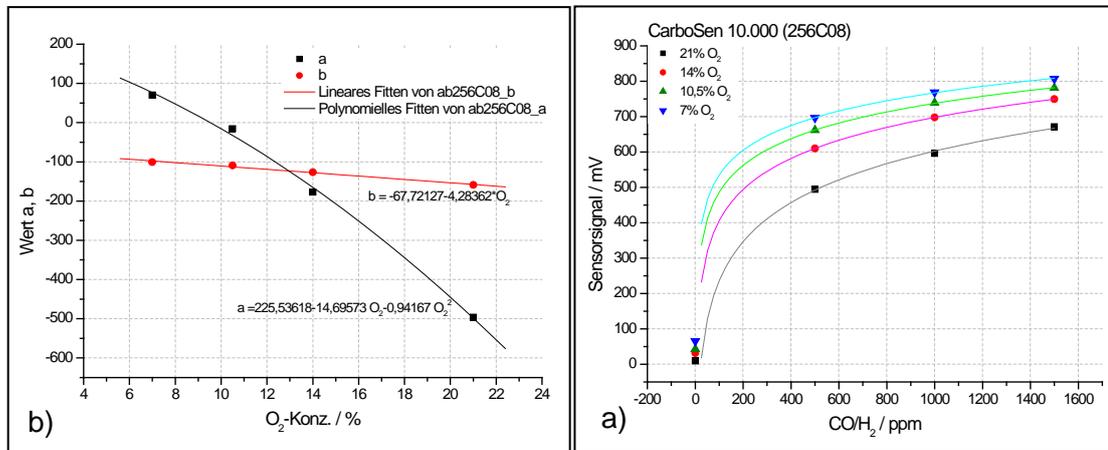


Abbildung 11.10 Sensorsignale eines CarboSen10000 in Abhängigkeit der CO/HC-Kalibriergaskonzentration und der ROC (a). Aus den Fitfunktionen $U=a + b \cdot \ln(c)$, die für jede ROC bestimmt wurden, lassen sich die Fitfunktionen $a(c(O_2))$ und $b(c(O_2))$ darstellen (b)

Über die Umkehrfunktion $c(CO/H_2)_{\text{äquiv.}} = \exp((U-a)/b)$ lässt sich dann bei sensorisch bestimmter ROC eine ROC-kompensierte $(CO/H_2)_{\text{äquiv.}}$ -Gaskonzentration bestimmen, die dem Algorithmus zur Regelung der Sekundärverbrennungsluftströme zugeführt wird.

11.4 Referenzierung der $(CO/HC)_{\text{äquiv.}}$ -Konzentration

Die Referenzierung der CO/HC-Signale bzw. der daraus errechneten $(CO/HC)_{\text{äquiv.}}$ -Konzentrationen wurde in mehreren Experimenten während der Entwicklung des Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmus mit einem Rauchgasanalysegerät mit Rauchgastrockner (IM2800) vorgenommen. Die Konzentrationen von CO, NO (beide gemessen mit kalibrierten amperometrischen Gassensoren) und HC (photometrisch bestimmter Summenparameter der organischen Komponenten) wurden kontinuierlich während der Abbrände registriert und zum CO/HC-Signalverlauf des CarboSen1000 in Bezug gesetzt. Eine Umrechnung der Emissionen auf den Bezugssauerstoffgehalt von 13% wurde nicht vorgenommen. Dies erklärt die etwas höheren Werte im Vergleich zu den Ergebnissen der Messungen in Kapitel 7.4.2, die das IFK für die Hochtemperaturphase angegeben hat.

Zu einem einzigen Abbrand liegen zusätzlich Gasanalysen vor, die simultan mittels eines Hochtemperatur-FTIR-Gasanalytators (Ansyco Analytische Systeme und Komponenten GmbH, Karlsruhe) durchgeführt wurden. Dieser Abbrand entspricht dem Abbrandexperiment, das in Abbildung 10.4 bereits diskutiert wurde. Er erlaubt den Vergleich der Zeitverläufe des CarboSen-Signals mit den Analysen des IM-Rauchgasanalysegerätes und den mit dem HT-FTIR erzielten Analyseergebnissen (Abbildung 11.11).

Die Signale lassen sich alle im Zeitverlauf gut korrelieren. Ist TNBK > 900°C, dann ist das CarboSen-Signal sehr niedrig (<30mV) und infolgedessen sind die aus der Kalibrierung errechneten $CO/H_2, \text{äquiv.}$ -Konzentrationen sehr gering. Sowohl das IM-Rauchgasanalysegerät

als auch die HT-FTIR-Analyse registrieren in diesen HT-Phasen CO-Konzentrationen, die teilweise deutlich unterhalb 100ppm liegen. Detaillierte Untersuchungen anhand verschiedener Abbrände haben gezeigt, dass nur oberhalb $TNBK > 920^{\circ}\text{C}$ bei $ROC \geq 4\%$ CO-Konzentrationen $< 100 \text{ ppm}$ erreicht werden (siehe hierzu auch Abbildung 12.2). Minimale Emissionen von ca. 30ppm CO wurden bei $ROC > 3,5\%$ und $TNBK > 950^{\circ}\text{C}$ gemessen. Dies entspricht ca. 15ppm CO bezogen auf 13% ROC. In guter Übereinstimmung der beiden Analyseverfahren werden NO-Emissionen von bis zu 200ppm bei $TNBK > 900^{\circ}\text{C}$ gemessen. Wie zu erwarten war, korrelieren die mit dem IM-Analysegerät gemessenen HC-Emissionen ebenfalls mit dem CarboSen-Signal. Bemerkenswert sind auch die teilweise sehr hohen CH_4 -Emissionen bei $TNBK < 800^{\circ}\text{C}$. Weiterhin wurden hohe Emissionen von Formaldehyd und Ethen in diesen Phasen unvollständiger Verbrennung gefunden (hier nicht dargestellt).

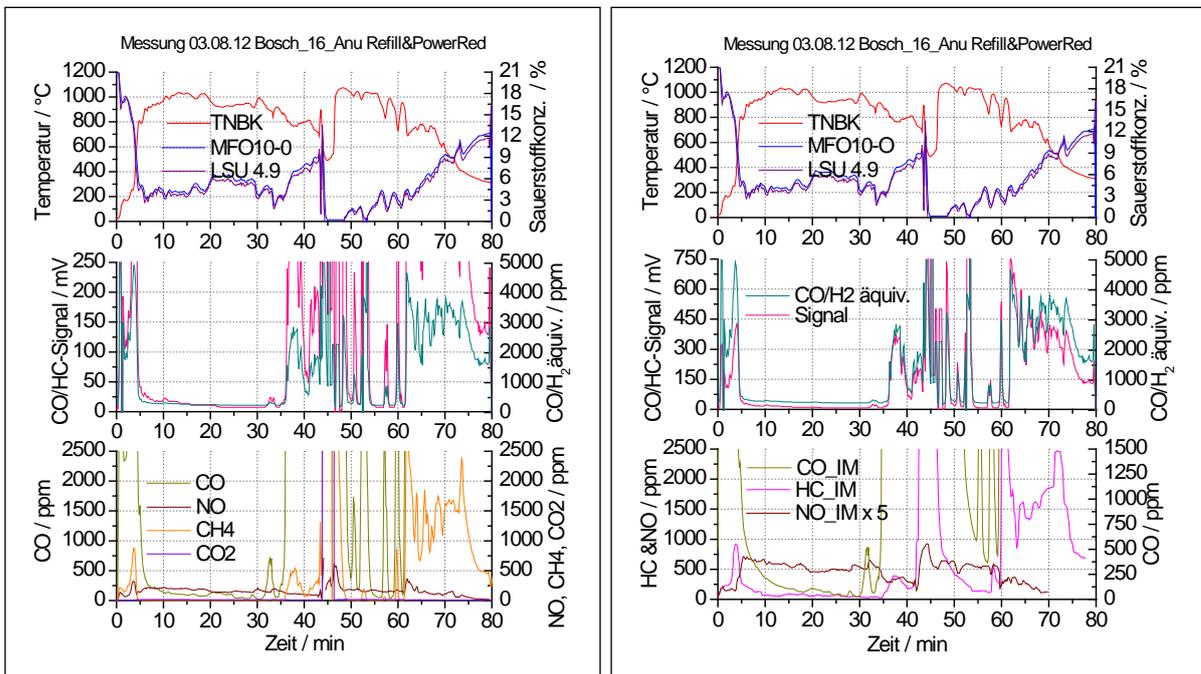


Abbildung 11.11 Darstellung der Abbrandparameter TNBK, ROC (oberes Diagramm) und CarboSen-Signal, CO/H_2 -äquiv. (mittleres Diagramm) über dem Verlauf der mit dem HT-FTIR gemessenen Gaskomponenten CO, NO, CH_4 und CO_2 (a) und der mit dem IM-Rauchgasanalysegerät registrierten Gaskomponenten CO, HC und NO (b)

Die Referenzierung der CarboSen-Signale zeigt, dass eine hohe Korrelation zwischen dem CO/H_2 -äquiv. -Wert und den CO/HC -Emissionen besteht (Abbildung 11.11), gleichwohl kann eine quantitative Übereinstimmung aufgrund des sensorischen Messprinzips nicht erwartet werden. Dies bestätigt aber eindrucksvoll, dass der CO/H_2 -äquiv. -Wert zur Optimierung der Verbrennungsregelung von sehr hoher Relevanz ist, weil er den Gehalt an un- oder teilverbrannten Abgaskomponenten sehr gut repräsentiert. Weiterhin legen die Daten nahe, dass vermutlich nur ein relativ schmaler TNBK/ROC-Bereich vorliegt, in dem die Emissionen minimiert werden können.

12 Feuerungsprozess-Monitor

12.1 Motivation

Im Zwischenbericht des Projektes wurde detailliert die Notwendigkeit eines Feuerungsprozess-Monitors beschrieben, der auf der Basis von numerisch erstellten Wärmebedarfsprognosen und der sensorischen Bestimmung der noch im Vorratsschacht vorliegenden Brennstoffmenge dem Nutzer darzustellen vermag, welche Holzmenge zu beliebigem Zeitpunkt vorteilhafterweise nachzulegen ist, um einerseits immer genügend Wärme im Pufferspeicher vorrätig zur Verfügung zu haben, andererseits ein Überangebot von Wärme zu vermeiden, das der Pufferspeicher wegen aktuell nicht ausreichender Wärmespeicherkapazität nicht aufnehmen kann. Letzteres würde zwangsläufig eine Drosselung der Heizleistung nach sich ziehen. Die Konsequenz wäre der Übergang der Verbrennungsluftregelung in den Teillast- oder gar Gluthaltebetrieb – Betriebsarten, die keinesfalls den Zustand optimaler Verbrennung repräsentieren und deswegen mit erhöhten Emissionen einhergehen. Motiviert war die Notwendigkeit, sich mit einer Wärmebedarfsprognose auseinanderzusetzen durch die Aufgabe, eine wesentliche Absenkung der Emissionen im Praxisbetrieb zu erreichen. Dies bedeutet, dass die Feuerungsanlage witterungs- und damit wärmebedarfsunabhängig möglichst immer im Zustand optimaler Verbrennung, d.h. unter Nennlast betrieben werden muss, will man dem Anspruch der Minimierung der Emissionen im Praxisbetrieb gerecht werden (siehe hierzu auch die Ausführungen des Partners IFK in Kapitel 4).

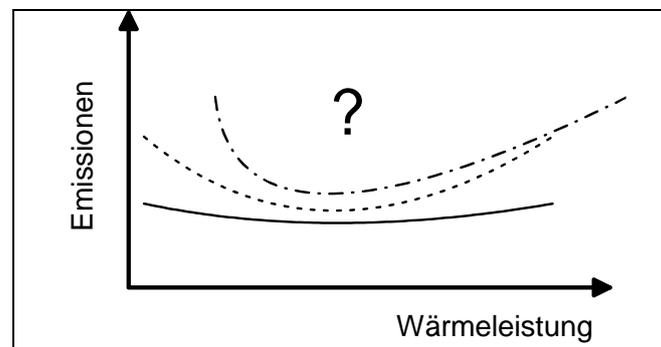


Abbildung 12.1 Unklares Emissionsverhalten von Stückholzheizkesseln bei Teillast-Betrieb

Allerdings konnte auf Grund der oben beschriebenen verbrennungstechnischen Probleme (Kapitel 10.4) im Berichtszeitraum nicht mit der nötigen Genauigkeit quantitativ ermittelt werden, wie hoch die Emissionszunahmen beim Verlassen des Zustandes der optimalen Verbrennungsluftregelung zu veranschlagen sind (Abbildung 12.1), jedoch liegen Hinweise vor, dass die gasförmigen Emissionen auf ein Mehrfaches der minimal in der Hochtemperaturphase erreichbaren ansteigen würden (Kapitel 11.4.).

Wie detaillierte Analysen der Daten in Abbildung 12.2 zeigen, werden die minimalen CO-Konzentrationen (<50ppm) bei TNBK $\geq 950^{\circ}\text{C}$ und ROC $\geq 4\%$ erreicht. Eine bereits geringfügig Reduktion von TNBK unter 950°C bei ROC $\approx 6\%$ schlägt sich in einer deutlich erhöhten CO-Konzentration von ca. 100ppm nieder. Bei TNBK $\approx 900^{\circ}\text{C}$ und ROC = 4,5% wurde bereits eine CO-Konzentration von über 500ppm gemessen. Diese Analyseergebnisse zeigen, dass zur Realisierung eines Teillastbetriebes mit diesem Musterkessel die Verbrennungstempera-

tur nicht unter ca. 930°C gesenkt werden kann, will man dramatisch überhöhte Emissionen vermeiden. Möglicherweise können zukünftig konstruktive Verbesserungen des Brennraumes gefunden werden, die diese Teillastfähigkeit der Anlage verbessern, jedoch belegen diese ersten Ergebnisse mit hoher Aussagekraft, dass der vorausschauende Betrieb von Stückholz-Heizkesseln von besonderer Bedeutung ist, wenn man im Praxisbetrieb hinsichtlich der Emissionen Fortschritte erzielen will.

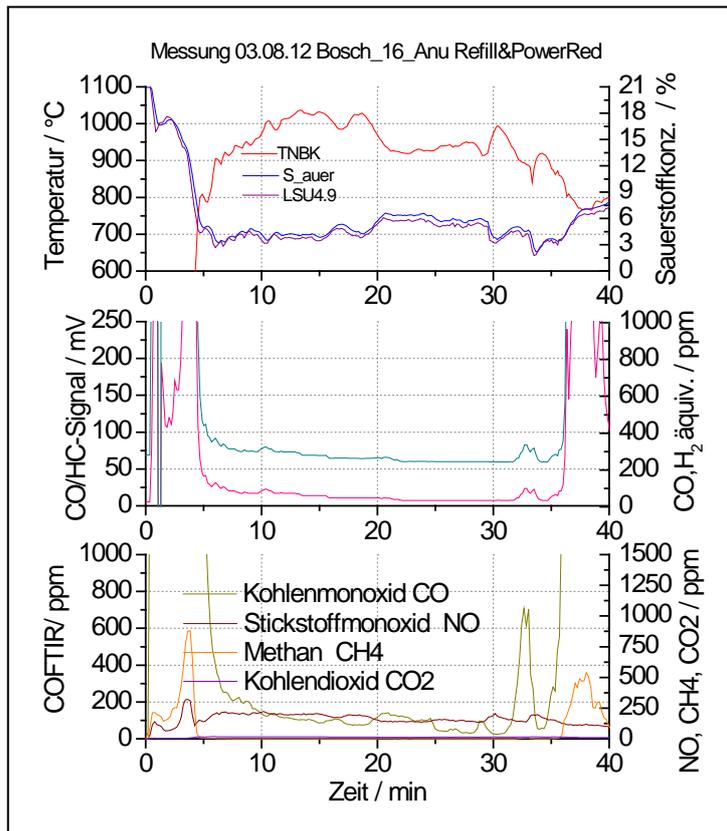


Abbildung 12.2 Daten aus Abbildung 11.11 in Detailskalierung

Im Folgenden werden die ersten Arbeitsschritte zur Realisierung eines Feuerungsmonitors beschrieben.

12.2 Kommunikationsprozessor

Der Feuerungsmonitor besteht aus der Konsole und dem Kommunikationsprozessor (Wohnraum-Bedienelement) und dem Grundmodul am Heizkessel.

Die Steuerung des Ofens wird vom Grundmodul am Heizkessel übernommen. Dieser kommuniziert über einen CAN-Bus mit dem „Kommunikations-Prozessor“. Die Aufgaben des Kommunikations-Prozessors sind:

- Aufnahme der Messwerte des Steuerungsrechners und Speicherung für statistische Auswertungen, die Rückwirkungen auf die Steuerung haben. So ist zum Beispiel angedacht, die Abbrände und den Wärmebedarf aus den statistischen Daten hochzurechnen und damit eine Abschätzung zu bekommen, wann der nächste Abbrand durchgeführt bzw. wann und wie viel Brennstoff nachgelegt werden soll.

- Logging auf einer SD-Karte
- Kommunikation mit der Heizungsanlage
- Kommunikation mit dem Wohnzimmer-Gerät, sofern vorhanden
- Evtl. könnte es auch möglich sein, Updates über diesen Weg einzuspielen.

Abbildung 12.3 zeigt die Hardware, die dazu im Projekt eingesetzt wurde: Es handelt sich um ein Keil MCBSTM32C Evaluationsboard, das die benötigte Peripherie gleich mitbringt: Eine (zwei) CAN-Schnittstelle(n) und einen SD-Kartenslot, der über SPI angeschlossen ist. Auch eine Ethernet-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Wohnzimmergerät ist vorhanden.

Zur Programmierung und zum Debuggen diente der abgebildete Olimex JTAG Adapter, mit dem es möglich wurde, auch unter Eclipse mit dem GNU ARM compiler ohne Einschränkungen in der Codegröße zu programmieren.

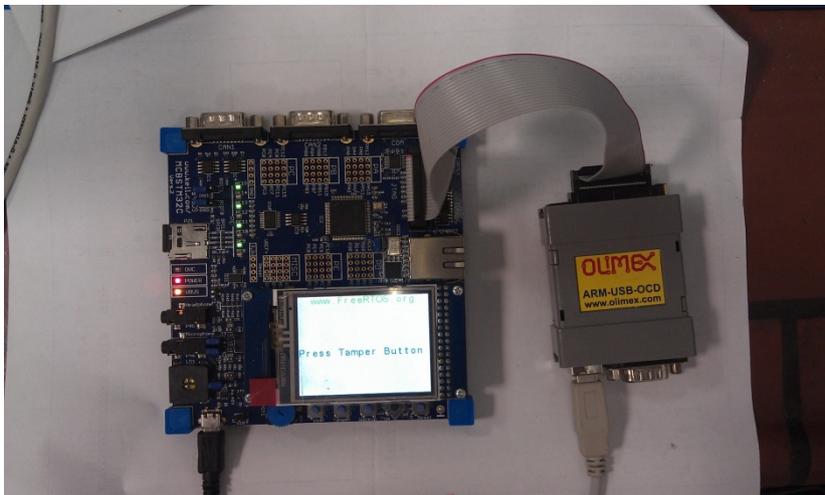


Abbildung 12.3 Hardware des Kommunikationsrechners

In einer Projektarbeit der Master-Studentin Liwa Wu und mit Hilfe der Projektteilnehmer des ISIS ist es gelungen, im Projektzeitraum folgende Ergebnisse zu erzielen:

- CAN Kommunikation ist vorbereitet.
- Die SD-Karte kann benutzt werden, die Logdatei kann darauf geschrieben werden. Voraussetzung dazu ist, dass die SD-Karte das FAT32 Dateiformat benutzt.
- Für die Versuche wurde bisher das FreeRTOS Betriebssystem eingesetzt.

Leider konnte aufgrund der Verzögerungen des Projektes der Kommunikationsprozessor keine weitere fertige Funktionalität erhalten. Der nächste Schritt ist die CAN-Kommunikation mit dem Steuerungsrechner. Dazu muss eine CAN-Matrix definiert werden.

Einen Überblick über die Einbindung des Kommunikationsrechners in das Gesamtsystem des Feuerungsmonitors gibt Abbildung 12.4.

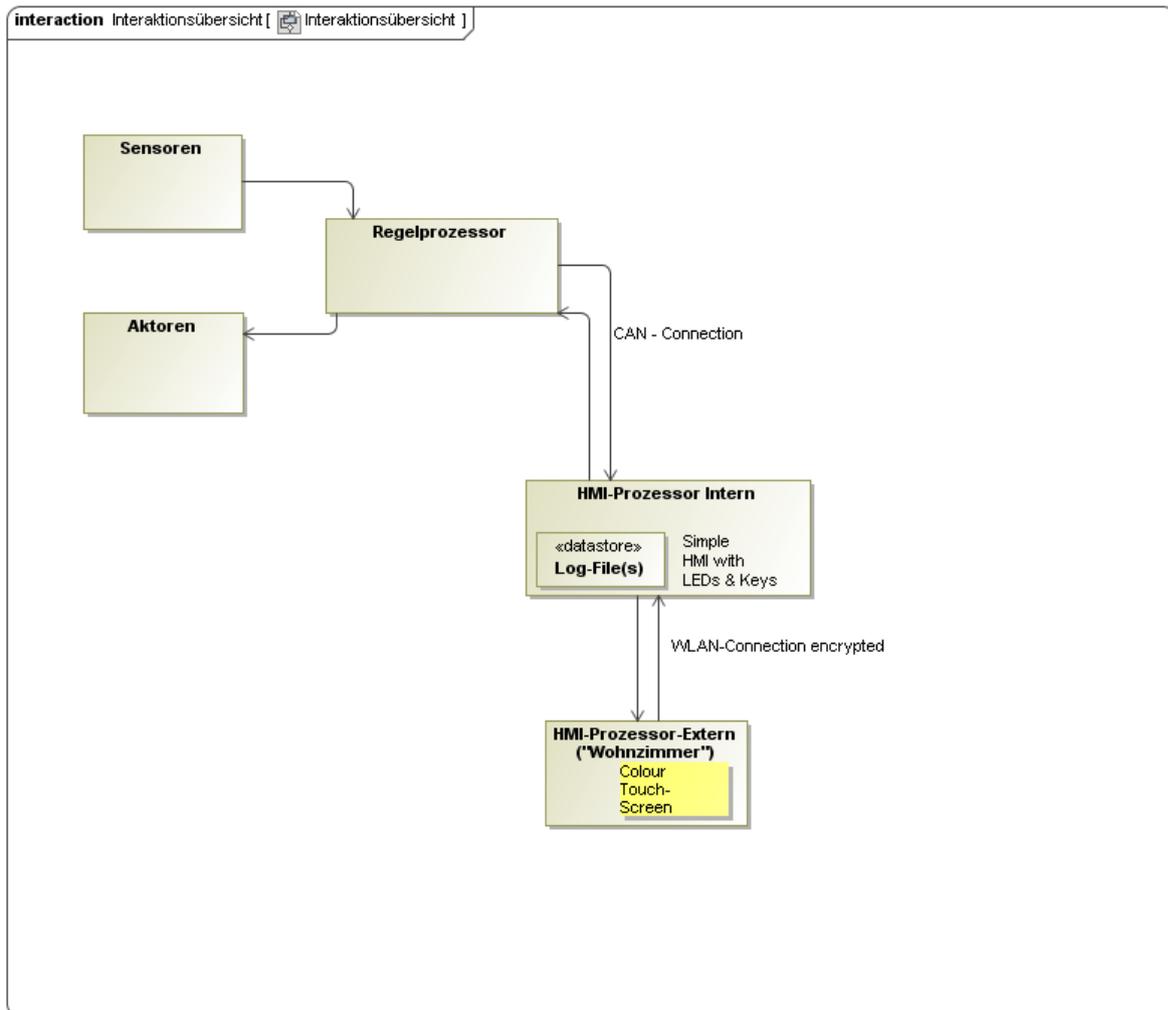


Abbildung 12.4 Rolle des Kommunikationsrechners

12.3 Grundmodul zur Kesselregelung mit Human-Interface

Das Grundmodul stellt die Interfaces zu den Sensoren und Aktoren zur Verfügung sowie ein einfaches Human Interface für die Bedienung des Heizkessels am Aufstellort. Das Rahmenwerk für die Regelung entspricht der Regelung des Laborsystems, d.h. ein Zustandsautomat ist implementiert, bei dem jedem Zustand ein eigener Regelalgorithmus mit stetigem Anschluss zugeordnet werden kann. Dieses Rahmenwerk erlaubt eine Übernahme des LabVIEW basierten Laborsystems mit einer entsprechenden Struktur.

Als Hardwarebasis wurde ein dspic33f Evaluation Board (FLEX von Evidence) gewählt, das im Stapelverfahren mit Standard Interface Platinen für Schnittstellen erweitert werden kann. Der dspic33f wurde ausgewählt, weil er mit einer 17 Bit MAC Unit (Hardware-Multiplizierer) ausgerüstet ist, die eine schnelle Verarbeitung der Regelalgorithmen ermöglicht. Zugleich erlaubt die umfassende Ausstattung des dspic33f mit Hardware Schnittstellen sequentielle Abläufe zu kontrollieren (Abbildung 12.5).

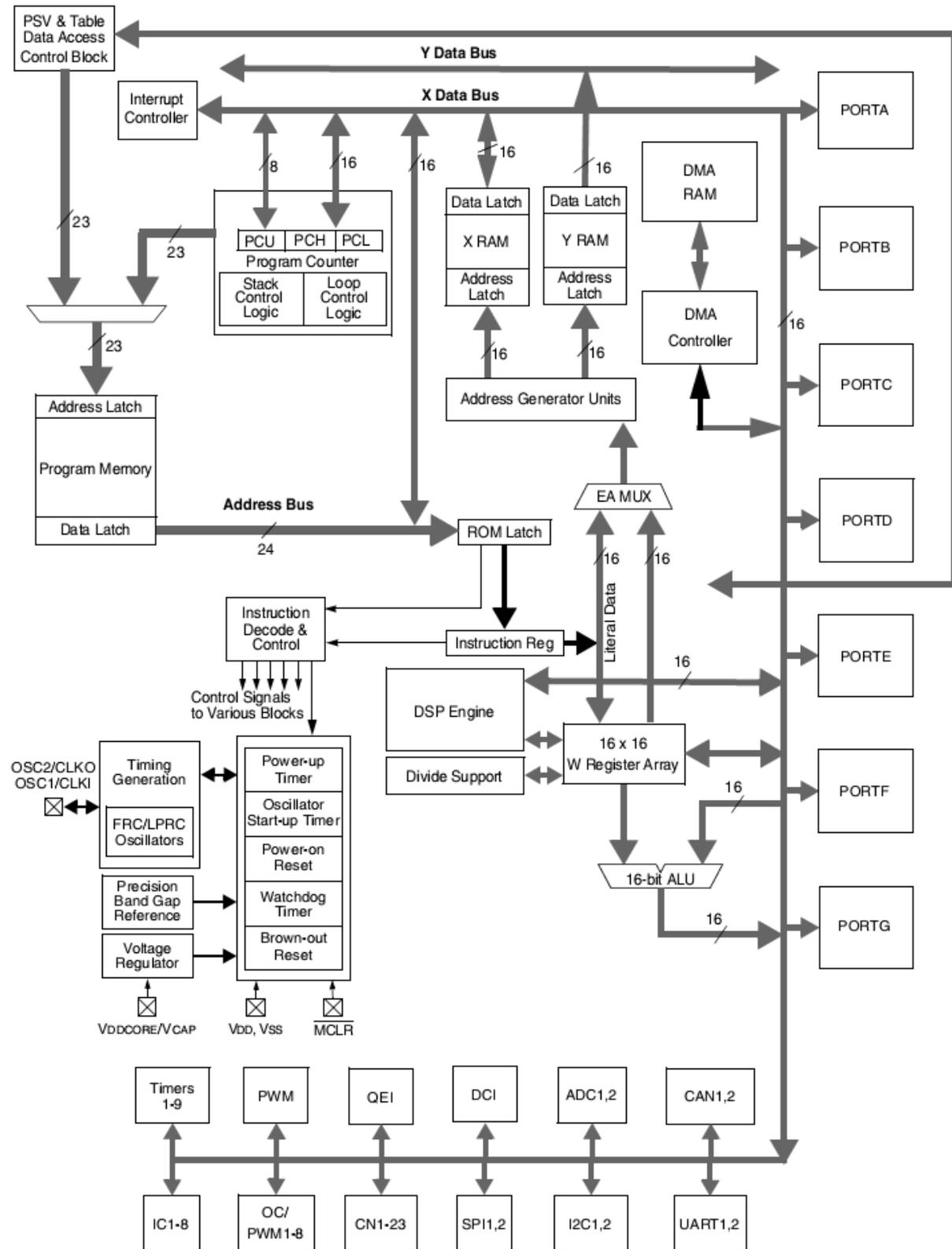


Abbildung 12.5 Architektur des dspic33f (Quelle: Microchip)

Im Klassendiagramm (Abbildung 12.6) ist die fast vollständige Hardware Unterstützung (rote Rahmen) eingetragen. Besonders einfach gestaltet sich die Motoransteuerung durch bis zu 8 Kanäle mit PWM Signalen. Lediglich die Thermoelement Signale müssen extern verstärkt werden (MAX 66785 für K Type), die Anbindung erfolgt über SPI Bus. Auch bei Integration

der Elektronik für die Abgassensoren sind zusätzliche Spezialchips bzw. ASICs der Sensor Hersteller erforderlich, die meist über I2C Bus mit dem dspic kommunizieren. Da die entsprechenden Bausteine noch nicht definiert werden konnten, war ein Test mit der Monitorplatine noch nicht möglich, sollte aber auf Grund der Standard Schnittstellen keine Probleme bereiten.

Der RISC Befehlssatz macht Multitasking auf Maschinensprachen Ebene möglich und garantiert damit bei Einhaltung entsprechender Designregeln höchste Zuverlässigkeit. Die Software ist gegen Ausfall auf Watchdog Ebene gesichert, kleinere Störungen durch Energieeintrag von außen werden durch Variablen Überwachung und Speichertest abgefangen. Eine Kopplung mit Parallelprozessoren ist, falls Redundanz erforderlich ist, möglich.

Das Rahmenwerk für den Zustandsautomat und dazugehörige Unterautomaten unter Verwendung von kooperativem Multitasking ist mit MPLab® Simulation auf Assembler Ebene getestet. Für die SPI Schnittstellen, die a priori Kommunikationsfehler nicht erkennen können, wurde eine periodisch aufgerufene Testroutine vorgesehen.

Ein Software Update ist mit Hilfe eines PIC18F2550SP Prozessors und USB Schnittstelle möglich (Standard Applikation ohne besondere Sicherheitsanforderung). Ein Download über den Kommunikationsprozessor sollte ebenfalls möglich sein. Die entsprechenden Arbeiten waren jedoch erst für Phase 2 vorgesehen.

Die Bedienung am Aufstellort sollte mit weitgehend ausfallsicheren und robusten Bedien- und Anzeigeelementen erfolgen. Darum sind an dieser Stelle Taster (Handschuhbedienung) und LED Anzeigen vorgesehen. Einige Projektpartner waren der Meinung, dass dies nicht zeitgemäß sei und schlugen Touchscreen etc. vor. Da diese nicht über die geforderte Robustheit verfügen (außer im hochpreisigen Bereich), wurde als Kompromiss ein zweizeiliges hinterleuchtetes LCD Display (blau) vorgesehen, das zusätzliche Infos in Textform anzeigen kann. Der angefragte Touchscreen Komfort ist an der Remote Konsole gegeben.

Die Fertigstellung des Monitors und der Test am Musterkessel waren für Projektstufe 2 vorgesehen. Die vorbereitenden Arbeiten in Projektstufe 1 mussten sich daher auf die Bereitstellung des Rahmenwerkes und der wesentlichen Programmobjekte beschränken. Auch die abschließende Entwicklung der Interfacetreiber ist erst am Musterkessel mit voller Sensor und Aktor Ausrüstung möglich.

Da nach Eintreffen des Musterkessels am ISIS und dessen Aufbau im ISIS-Technikum nur noch wenig Zeit für Experimente bestand und nur noch Personal zur Verfügung stand, das im Rahmen der kostenneutralen Projektverlängerung beschäftigt werden konnte, wurde zugunsten der Weiterentwicklung der Verbrennungsluft-Regelung mit dem Laborsystem auf weitergehende Entwicklungsarbeiten, die ein Funktionsmuster des Monitors zum Ziel hatten, verzichtet.

Ebenfalls in Phase II des Projektes ist die Entwicklung der Algorithmen zur Erstellung eines ersten Entwurfs einer Brennstoffbedarfsprognose zu sehen.

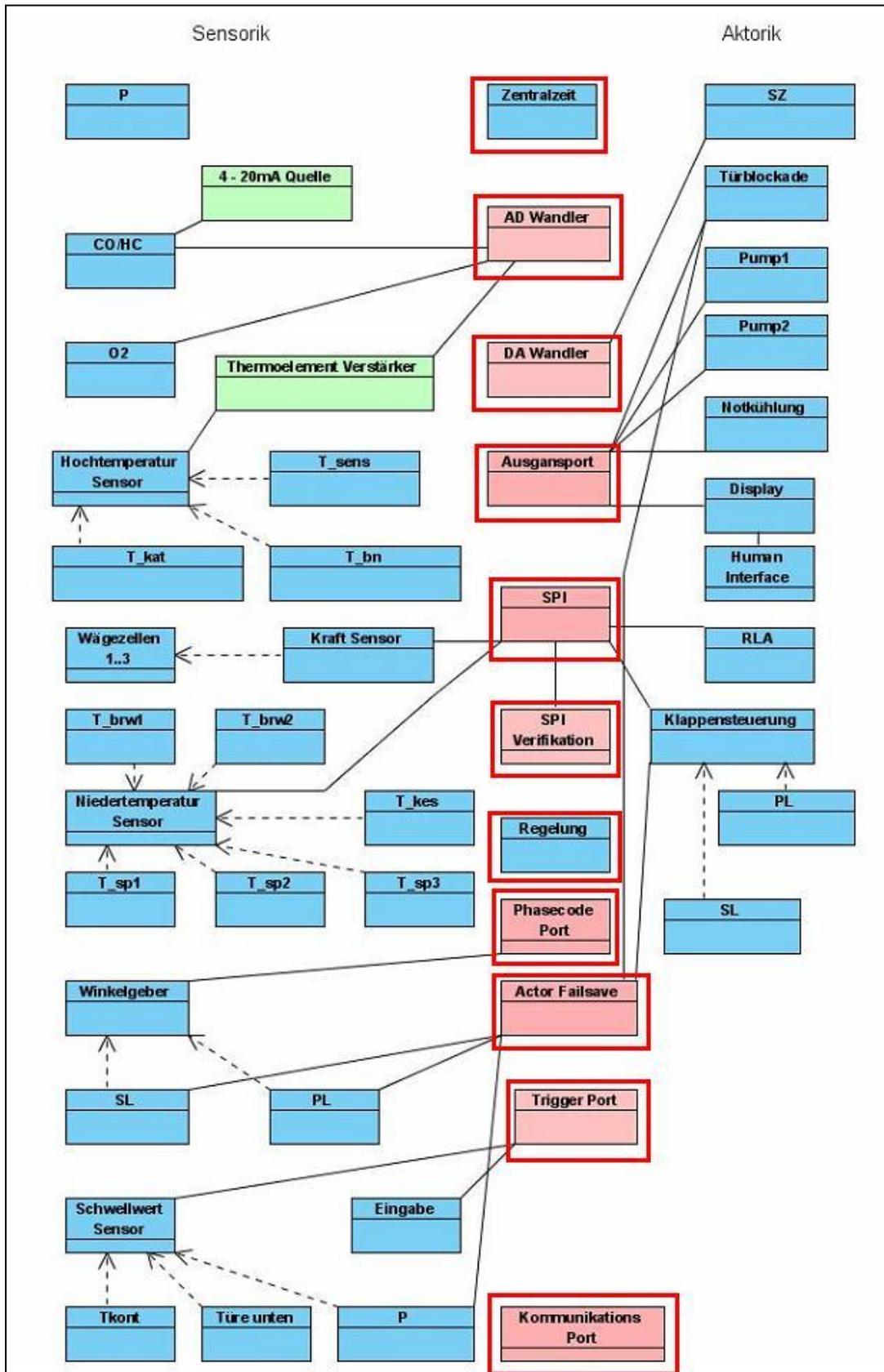


Abbildung 12.6 Klassendiagramm zum Grundmodul der Kesselregelung

12.4 Ermittlung des aktuellen Holzvorrats zur Brennstoffbedarfsprognose

Aus der Sicht der Sensorik kann hinsichtlich der notwendigen Ausrüstung eines Monitors, der auch eine Brennstoffbedarfsprognose unterstützt, nahezu ausschließlich auf verfügbare Standardelemente wie z.B. Temperatursensoren zur Ermittlung des Wärmeinhalts im Pufferspeicher oder auf einen Wärmemengenzähler zur Ermittlung des aktuell abfließenden Wärmestromes zurückgegriffen werden. Einziges bisher nicht gelöstes Problem ist die sensorische Bestimmung des (unverbrannten) Restholzbestandes im Vorratsschacht des Heizkessels. Dieses Arbeitspaket war in der ursprünglichen Projektkonzeption nicht vorgesehen und wurde – nach ausgiebiger Auseinandersetzung mit der technischen Realisierung eines Brennstoffbedarfsprognosemodells – erstmals im Zwischenbericht formuliert und als zusätzliche Aufgabe aufgenommen. Es wurden folgende Methoden in Erwägung gezogen:

- (1) Bestimmung der Füllhöhe mittels Ultraschall-Sensorik
- (2) Bestimmung der Füllhöhe mittels HF-Reflektionsmessung
- (3) Bestimmung der Massenzunahme mit der Befüllung und des Verlaufs der Masse $m(t)$ über die Zeit des Abbrandes durch Wiegen der gesamten Verbrennungsanlage.

Methode (1) wird als grundsätzlich interessant eingestuft, konnte jedoch im Berichtszeitraum über einige erste Experimente hinaus nicht weiter verfolgt werden. Methode (2) wurde experimentell anhand von brennenden Holzstapeln untersucht und festgestellt, dass Fehlmesungen in dem Moment auftreten, in dem die Glut nicht mehr durch (kaltes) Holz abgedeckt ist. Vermutlich ist die Ionisierung der Luft direkt über der Glut die Ursache für die fehlerhafte Abstandsmessung. Methode (3) wurde experimentell mit dem im Technikum vorhandenen Vitolig 200 Heizkessel (Viessmann) untersucht. Im folgenden Absatz werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Zuerst wurde die Anlage mit einem Standard-Abgasrohrstück versehen, das Längenänderungen durch thermische Ausdehnung aufnehmen kann. Der Heizkessel wurde auf vier piezoelektrische Wägezellen gestellt, die mit einer elektronischen Messeinheit versehen waren (Quadro-Set 1-QS1C3/1.5T, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Berlin), welche wiederum vom Mess- und Steuerungsprogramm ausgelesen wurde.

Die ersten Feuerungsexperimente mit dieser Anordnung führten auf $m(t)$ -Diagramme, aus denen nicht auf den Masseverlauf über die Zeit $m(t)$ und damit auf Masseänderungen im Holzvorratsschacht geschlossen werden konnte.

Erst nach Modifikation der Kühlwasserverrohrung durch Einfügen von druckwasserfähigen Flexrohren konnten reproduzierbare Wägeergebnisse gewonnen werden, die beispielhaft in Abbildung 12.7 vorgestellt werden.

Der zeitliche Verlauf der Masse des Heizkessels folgt immer in charakteristischer Weise der in Abbildung 12.7 dargestellten Form. Die Masse der Anlage beträgt ca. 737kg, nach Befüllen mit Holz misst das System ca. 753kg und unmittelbar nach der Zündung, d.h. mit steigender Temperatur T_{NBK} , steigt das Wägeergebnis weiter bis zu einem Maximum von ca. 758kg. Offensichtlich resultiert aus der thermischen Ausdehnung des Systems (im Wesentlichen das Abgasrohr) eine zusätzliche Kraftwirkung auf die Wägezellen. Jenseits des Wägemaximums wird dann über die Zeit eine nahezu lineare Abnahme der Masse $m(t)$ registriert, die nur von der Massezunahme infolge Nachlegens von Brennstoff bei Min. 50 unterbrochen

wird. Ca. bei Min. 140 nimmt dann das Wägesignal abrupt ab, gleichzeitig fällt TNBK mit ähnlich steiler Flanke. Dies ist eine Folge der schnellen Temperaturabnahme im Abgasrohr (thermische Schrumpfung des Rohres), da der ISIS-Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmus - entwickelt in einem Vorprojekt - ab diesem Moment den Primärverbrennungsluftstrom nach Unterschreiten einer charakteristischen Temperatur $TNBK_c$ in einer Stufe auf einen geringen Wert zur Restbelüftung absenkt und dadurch der Wärmestrom stark reduziert wird.

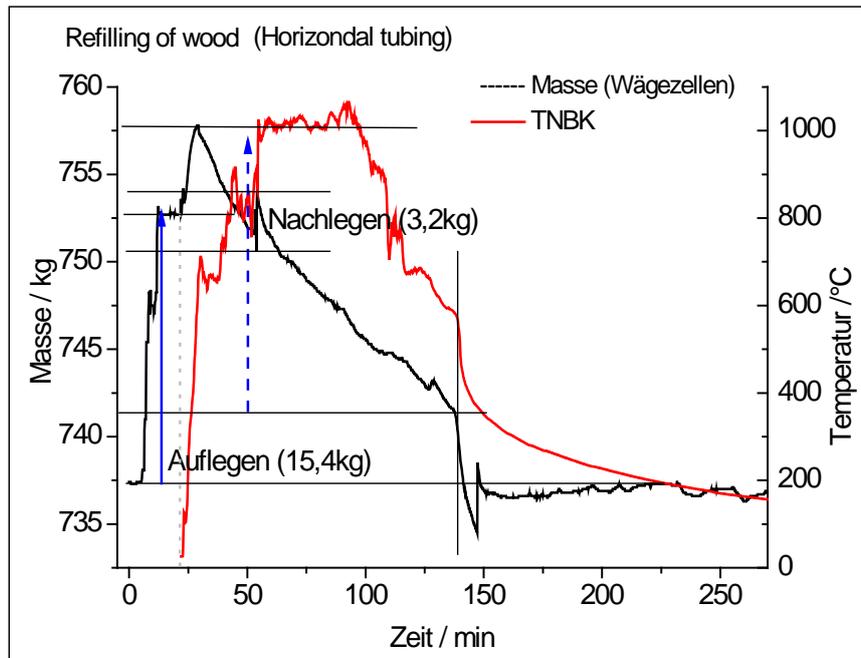


Abbildung 12.7 Typischer Masse- und Temperatur (TNBK) - Zeitverlauf des Vitolig 200 – Heizkessels nach Aufgabe von 15,4 kg Scheitholz und einmaliger Nachbefüllung von 3,2 kg Brennholz (jeweils Buche). Die Pfeile (blau durchgezogen und gestrichelt) sind gleich lang und repräsentieren die zu Anfang aufgelegte Holzmenge. Der Scheitholzkessel wurde nach einem in einem Vorprojekt entwickelten ISIS-Regelungsalgorithmus betrieben

Bildet man die Differenz der Masse zwischen dem Massen-Maximum $m(\text{Peak})$ und dem Wert bei $TNBK_c$, dann erhält man gut reproduzierbar eine nur geringfügig größere Massendifferenz als die, die der ursprünglich aufgelegten Holzmasse entspricht. Aus diesen Ergebnissen wird geschlossen, dass nach der Beziehung

$$\text{Verfügbare Restmasse Holz (t)} \approx \text{Anfangsmasse Holz} - (m(\text{Peak}) - m(t))$$

mit einer Genauigkeit von $\Delta m = \pm 1 \text{ kg}$ die aktuelle, noch unverbrannte Holzmasse ermittelt werden kann. Der Messfehler Δm hängt vermutlich mit den Reibungseigenschaften des Abgasrohrstückes zur Aufnahme der Wärmeausdehnung (siehe oben) zusammen.

Anhand der hohen Reproduzierbarkeit der Daten aus drei Abbränden kann geschlossen werden, dass die Massebestimmung des Holzstapels mit der Wägemethode mit für ein Wärmemanagementsystem genügend hoher Genauigkeit möglich ist. Jedenfalls scheint der für eine Wärmemengenberechnung aus Δm resultierende Fehler geringer als die Fehler, die durch die Variation der Holzart (Brennwert) und des Feuchtegehaltes des Brennstoffes resultieren können.

13 Zusammenfassung und Ausblick

Das ambitionierte Ziel, sowohl die gasförmigen als auch die partikulären Emissionen eines Stückholz-Musterheizkessels nicht nur unter optimierten Prüfstandsbedingungen sondern auch in allen Phasen der Verbrennung, ausgehend von der Kaltstartphase bis schließlich inklusive der Ausbrandphase zu minimieren, kann alleine durch Optimierung der Verbrennungsluftregelung aus physikalisch-chemischen Gründen nicht erreicht werden, da in Phasen zu niedriger Verbrennungstemperatur in der Sekundärbrennkammer ($T_{NBK} < 900^{\circ}\text{C}$) die Reaktionskinetik eine vollständige Oxidation der Pyrolysegase nicht zulässt. Die Experimente haben klar bestätigt, dass zur Erreichung dieses Ziels die Integration eines Oxidationskatalysators in Kombination mit einer Verbrennungsluftregelung, die auch instationäre Verbrennungsprozesse zufriedenstellend beschreibt, der einzig gangbare Weg darstellt.

Dass Untersuchungen der Verbrennungsprozessregelung mit Oxidationskatalysator nicht wie vorgesehen durchgeführt werden konnten, ist eine Folge von massiven Verzögerungen im Projektablauf, die auch von einer zweimaligen kostenneutralen Projektverlängerung nicht aufgefangen werden konnten.

Trotz dieser Einschränkungen hinsichtlich des erreichten Projektumfanges, resultieren aus der Projektstufe I einige sehr wichtige Erkenntnisse, die als wichtige Basis für weitere Entwicklungsschritte dienen werden. Diese seien wie folgt kurz zusammengefasst:

Sensorik:

- Die Prozessführung auf der Basis der Sensorsignale Temperatur in der Nachbrennkammer, Restsauerstoffkonzentration und CO/HC-Gehalt im Abgas hat sich eindrucksvoll bewährt. Auf diese Weise konnten sehr stabile Emissionsverläufe in der Hochtemperaturphase erzielt werden.
- Die Sensoren O_2 – Sonde (MFO10-O) und Breitband-Lambdasonde LSU 4.9 sind beide zur kontinuierlichen Bestimmung der ROC sowohl hinsichtlich der Sensitivitätseigenschaften als auch der Langzeitstabilität der Signale für den längeren Betrieb im Abgas von Holzfeuerungsprozessen gut geeignet. Im Experimentierzeitraum wurden keine Instabilitäten festgestellt.
- Die in diesem Förderzeitraum erstmals eingeführte, simultane Registrierung des CO/HC-Gehaltes auf der Basis der kalibrierten $(\text{CO}/\text{H}_2)_{\text{äquiv.}}$ -Gaskonzentration stellt einen weiteren wichtigen innovativen Schritt zur weiteren Optimierung der Verbrennungsluftregelung dar. Die $(\text{CO}/\text{H}_2)_{\text{äquiv.}}$ -Gaskonzentration ist hervorragend korreliert mit den tatsächlichen Emissionen von un- oder teilweise oxidierten Gaskomponenten, gleichwohl muss bedacht werden, dass die Sensitivität zu den verschiedenen Gaskomponenten sehr unterschiedlich sein kann.
- Die Untersuchungen der CarboSen-Sensoren zur Registrierung des CO/HC-Gehaltes mit Modellgasen und die wiederkehrende Kalibrierung mehrerer Sensorelemente haben gezeigt, dass zwei Ursachen für die beobachteten Sensitivitätsverluste zu nennen sind:
 - Irreversible Veränderungen der Elektroden des Mischpotenzial-Sensors bei Reaktion mit spezifischen Gaskomponenten.
 - Sensitivitätsverlust durch Drift der (geregelten) Sensortemperatur infolge Zunahme des (geregelten) Widerstandes zwischen Mess- und Referenzelektrode.

Letztere Driftursache sollte problemlos durch eine Umstellung der Temperaturregelung über eine Vierpol-Widerstandsmessung des Heizers (bereits vom Partner begonnen)

beseitigt werden können. Erstere Ursache für Sensitivitätsverluste bedarf hinsichtlich der Auswirkungen für eine optimierte Verbrennungsluftregelung weiterer Untersuchungen, wenn die Drift durch Temperaturinstabilität beseitigt ist. - Anhand eines CarboSen-Sensorelementes konnte gezeigt werden, dass die Sensitivität auch über längere Betriebszeit (ausgedehnte Experimente in einem Pelletheizkessel und 17 Abbrände im Musterkessel) erhalten bleibt.

Verbrennungsluftregelung

- Generell ist festzustellen, dass sich die Verbrennungsluftregelung basierend auf der Primärluftgebläsedrehzahl als Funktion von TNBK und ROC und auf der Sekundärluftgebläsedrehzahl als Funktion von TNBK und $(\text{CO}/\text{H}_2)_{\text{äquiv.}}$ -Gaskonzentration bewährt hat. Auf diese Weise konnten sehr stabile Emissionsverläufe in der Hochtemperaturphase erzielt werden. Es wurden aber auch bereits fortgeschrittene Verbrennungsluftregelungsalgorithmen für alle Phasen der Verbrennung entwickelt.
- Aufgrund der fortgeschrittenen Entwicklung der Verbrennungsluftregelungsalgorithmen auch für die instationären Verbrennungssituationen wird die Zündphase innerhalb von ca. 3min nach Verriegelung der Ofentür (Erreichen einer stabilen Zündung) überwunden und die stationäre HT-Phase wird nach dem Nachlegen auf das Glutbett sogar innerhalb von knapp 2min erreicht. Gleichzeitig werden in diesen instationären Verbrennungszuständen Sauerstoffdefizite (insbesondere in der Nachlegethase) zwar nicht gänzlich, aber weitgehend vermieden. Weitere Verbesserungen sind in diesem Zusammenhang notwendig und durch weitere Anpassung der Algorithmen ohne weiteres möglich. Dies verspricht geringstmögliche Emissionen im Praxisbetrieb, die nur noch durch Integration eines Katalysators weiter reduziert werden können.
- Der hinsichtlich minimaler gasförmiger Emissionen optimale Prozesszustand ist bei $3\% < \text{ROC} < 5,5\%$ und $930^\circ\text{C} < \text{TNBK} < 980^\circ\text{C}$ gegeben, wobei die Obergrenzen als eher „weich“ eingestuft werden, sieht man von Gesichtspunkten zur Maximierung des Verbrennungswirkungsgrades bei dieser Betrachtung ab. Bei optimaler Positionierung der Sekundärlufteinströmung werden CO-Konzentrationen von ca. 15ppm (bezogen auf 13% ROC) erreicht (Anmerkung: CO-Konzentrationsangaben in ppm entsprechen in guter Näherung den in der Feuerungstechnik üblicheren Angaben in mg/m^3).
- Aufgrund feuerungstechnischer Instabilitäten im Entgasungsraum (Primärbrennkammer), die sich erst nach ca. 30min nach der Zündung einstellen, waren Experimente zur Teillastfähigkeit des Musterkessels bzw. die Untersuchung regelungstechnischer Fragen hierzu nicht möglich. Allerdings konnten Hinweise gewonnen werden, die belegen, dass bereits bei Absenkung von TNBK unter ca. 920°C mit einem merklichen Anstieg der Emissionen zu rechnen ist.

Feuerungsprozess-Monitor

- Die Notwendigkeit eines den aktuellen Verbrennungszustand visualisierenden und den Wärmebedarf prognostizierenden Feuerungsprozess-Monitors wurde durch die Ergebnisse des Projektes deutlich unterstrichen, wenn die Minimierung der Emissionen im Praxisbetrieb als Projektziel in aller Konsequenz umgesetzt werden soll.
- Es wurden alle notwendigen Festlegungen zur Struktur des Feuerungsprozess-Monitors getroffen. Der Monitor besteht aus zwei Prozessoren, dem Grundmodul, das die Feuerungsprozessregelung übernimmt, und dem Kommunikationsprozessor, der den Ist-Zustand der Feuerung zum Betreiber kommuniziert (Konsole im Wohnzimmer), die verbrennungstechnischen Daten speichert und z.B. auch den Wärmebedarf anhand von statistischen Modellen prognostiziert. Neben der Konzeptentwicklung wurde in ei-

nem weiteren vorbereitenden Schritt ein Teil der Interface-Treiber bereits programmiert.

Es bleibt zusammenfassend festzustellen, dass aus der Sicht der Feuerungsprozessführung durch automatisierte Verbrennungsluftregelung eines von den Partnern entwickelten Musterkessels und aus Sicht der Sensorik einige sehr wichtige, teilweise innovative Erkenntnisse aus diesem Projekt gewonnen werden konnten, welche bei Weiterverfolgung in einer zweiten Entwicklungsstufe sehr wohl eine nochmals erhebliche Absenkung der Emissionen gegenüber dem geforderten Obergrenzen nach der 1. BImSchV in der zweiten Stufe (wirksam ab 2017) in Aussicht stellen. Ob dabei die in der Einleitung formulierten, sehr ambitionierten Benchmark-Werte ohne weitere Sekundärmaßnahmen (z.B. PM-Filter) erreicht werden, bleibt abzuwarten. Aus den Ergebnissen ist jedenfalls zu folgern, dass weiteres Optimierungspotenzial besteht, das im Zusammenspiel mit einem Oxidationskatalysator zumindest eine deutliche Annäherung an die genannten Benchmark-Werte in allen Phasen der Verbrennung erwarten lässt.

14 Literatur ISIS

/Aka11/:

Saner Akan; Optimization of the signal stability of the HydroSen Sensor element in hydrogen leak detection applications, Master-Thesis, Sensor Systems Technology, Karlsruhe University of Applied Sciences (2011).

/BUT09/:

P. Butschbach, F. Hammer, H. Kohler, A. Potreck, Th. Trautmann; Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of the exhaust gas, Sensors and Actuators B137(1) (2009) 32-41.

/Jer02/:

A. Jerger, H. Kohler, F. Becker, H.-B. Keller, R. Seifert; New Applications of Tin Oxide Gas Sensors – II. Intelligent sensor system for reliable monitoring of ammonia leakages, Sensors & Actuators B, 81 (2002) 301-307.

/Koh07/:

H. Kohler, F. Hammer; Optimierung der Verbrennungsvorgänge in Stückholz-Feuerungsanlagen durch sensorische und katalytische Methoden, Förderprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Schlussbericht 2007.

/Koh09/:

H. Kohler, P. Butschbach, M. Aleksandrova; Untersuchung der Auswirkungen der Verbrennungsoptimierung in Stückholz- und Pelletfeuerungsanlagen kleiner Leistung auf die Minderung der Feinstaubemissionen – Optimierung durch Zuluftregelung mittels in-situ Abgassensoren, Förderprojekt aus dem Förderprogramm „Betriebliche Umwelttechnik“ des Umweltministeriums Baden-Württemberg, Schlussbericht 2009.

/Koh10/:

H. Kohler, P. Butschbach, Th. Trautmann, H. Belmir; Wood energy for domestic heating: Extensive reduction of toxic gas and particulate matter emissions by optimized control of the firing process and use of gas sensors; in COMPUTERS and SIMULATION in MODERN SCIENCE, vol. 3, Eds.: Nikos E. Mastorakis, Metin Demiralp, Valeri M. Mladenov, WSEAS Press, ISBN: 978-960-474-256-1, p. 492 (2010).

/Koh12/:

Heinz Kohler, Andres Potreck, Thomas Trautmann; Verfahren und Vorrichtung zur Verbrennung von Brennstoffen; Offenlegungsschrift DE 10 2006 046 599 A1 2008.04.03 (2006), erteilt im Feb. 2012.

/Koh13/:

H. Kohler, S. Brunner, P. Butschbach, D. Glesing; Sensorik und Abgas-Katalyse zur Reduktion der Emissionen von Klein-Holzfeuerungsanlagen; Konferenzband Energetische Biomassenutzung: Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft, Berlin 5. Nov. 2012, Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms "Energetische Biomassenutzung", Band 09, Eds.: Thrän, D.; Pfeiffer, D., Leipzig 2013. - ISSN 2192-1806 (in Druck)

/Leh11/:

Michael Lehmann, Charakterisierung von Sauerstoffsensoren im Abgas von Feststoff-Verbrennungsöfen, Bachelor-Thesis, Studiengang Sensorik, HS Karlsruhe (2011)

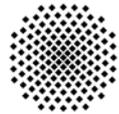
/Miu98/:

N. Miura, T. Raisen, G. Lu, N. Yamazoe; Highly selective CO sensor using stabilized zirconia and a couple of oxide electrodes, Sensors&Actuators B 47 (1998) 84-91.

/Vor10/:

F. Hammer, H. Kohler, M. Struschka; Holzverbrennung 2015 - Vorstudie zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Minimierung der Schadgas- und Feinstaubemissionen eines Stückholzkessels, Förderprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Abschlussbericht 2010.

Berichtsteil zu den Arbeitspaketen des IRS



Universität Stuttgart



Universität Stuttgart
Institut für Raumfahrtsysteme
Abt. Raumtransporttechnologie
Pfaffenwaldring 29, 70550 Stuttgart
Tel.: 0711 / 685-62030, Fax.: 0711 / 685-63596
Email: irs@ifk.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. N. Rendler

Dr.-Ing. F. Hammer

Januar 2013

Inhaltsverzeichnis IRS-Berichtsteil

15	Einleitung IRS.....	118
16	Abgassensorik - Entwicklung von Kombi-Abgassensoren.....	118
17	Weiterentwicklung und Qualifizierung der In-Situ Gassensorik in Richtung simultane Messung von CO/HC mit O₂.....	122
18	Konzeptionierung einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)....	130
19	Erarbeitung der Vorgaben für die Entwicklung und den Aufbau einer Sensorelektronik.....	130
20	Entwicklung von Routinen zur kontinuierlichen Funktionsüberwachung der Gassensorik.....	131

15 Einleitung IRS

Im Rahmen des Projektes war das IRS für die Entwicklung einer Abgassensorik verantwortlich, speziell für die Entwicklung des KombiSen-Sensorelementes zur simultanen Messung von O₂ und CO_e im Feuerungsabgas. Die nachfolgend dargestellten Entwicklungen im Projekt „Holzverbrennung 2015-Projektstufe 1“ basieren auf den Arbeiten des Vorläuferprojektes (DBU AZ: 273883/01) und setzen diese fort. Die Vorarbeiten aus dem Vorläuferprojekt können dem entsprechenden Abschlussbericht „Vorstudie zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Minimierung der Schadgas- und Feinstaubemissionen eines Stückholzkessels“, der dem Projektträger bereits vorliegt, entnommen werden.

Nachfolgend werden nun die in der Projektstufe 1 am IRS durchgeführten Entwicklungen und Ergebnisse vorgestellt.

16 Abgassensorik - Entwicklung von Kombi-Abgassensoren

Im Laufe des Projektes wurden CarboSen (s. Abbildung 16.1) und KombiSen (s. Abbildung 17.1) Sensorelemente, Sensoren und Sensorsystemen vom Stand der Technik produziert, weiterentwickelt, vermessen und falls möglich an das ISIS ausgeliefert. Tabelle 16.1 zeigt die Gegenüberstellung des CarboSen nach dem „Stand der Technik“ mit den Weiterentwicklungen für das Projekt „Neu“.

Tabelle 16.1 Optimierungsmaßnahmen an der CO/HC-Struktur zur Ertüchtigung für Holzfeuerungsanwendungen

CarboSen	Stand der Technik	Neu	Effekt	Probleme	To Do
Sensorelement Messbereich bis 0,1% CO _e	CS1.000	CS1.000DS	höhere Reproduzierbarkeit, höhere Temperaturbeständigkeit, höhere Signalstabilität	keine	Lebensdauer-nachweis
Sensorelement Messbereich bis 1% CO _e	CS10.000	X	größerer Messbereich, höhere Temperaturbeständigkeit, höhere Signalstabilität	geringe Reproduzierbarkeit	Weiterentwicklung Sensorelement
Kontaktdrahtmaterial	Pt/Ni	Au/Ni	Pt/Ni nicht mehr verfügbar	zu spröde	Alternatives Material finden
Heizerregelung	Rh	Rki	bessere Temperaturkompensation für T>250°C	verändert sich durch spezielle HC's	Weiterentwicklung Sensorelement
Anzahl Kontaktdrähte	5	7	ermöglicht bessere, langzeitstabilere 4L-Temperaturkompensation	teurer	Neue Integration
Integration ins 100m Tauchrohrgehäuse	Al ₂ O ₃ -Isolationsstab	Glasseiden Isolator	Robuster, höhere Vibrations- und Schockbeständigkeit	mit Au/Ni Draht derzeit nicht realisierbar	Alternatives Darahmaterial finden
Elektronik	XC164	BT300	kleiner, leichter, günstiger, SiL-Zulassung	noch in Entwicklung	Weiterentwicklung

Insgesamt wurden 12 Stück CarboSen CS1.000 und 13 Stück CarboSen CS10.000 Sensorelemente mit 5 Kontaktdrähten an das ISIS ausgeliefert:

- Im Gaslabor zeigt der CS10.000 höhere Signalstabilität und geringere Drift bei ausreichender Sensitivität. Die Reproduzierbarkeit der Signale ist jedoch noch nicht hoch genug.

Für die Anwendung im realen Abgas wurden die Sensorelemente in ein bis 450°C temperaturbeständige Tauchrohrgehäuse l=100mm integriert. Insgesamt wurden 2 Stück CarboSen Sensoren CS1.000G, 100mm und 2 Stück CarboSen Sensoren CS10.000G, 100mm ans ISIS ausgeliefert:

- Sowohl im Gaslabor als auch im realen Abgas zeigt der CS10.000 im Tauchrohr höhere Signalstabilität und geringere Drift bei ausreichender Sensitivität. Insbesondere ist der CS10.000 geeigneter, da er eine höhere Temperaturstabilität aufweist, wenn z.B. die Abgastemperaturen kurzfristig auf über 600°C gehen, was für eine Holzfeuerung der Fall sein kann. Die Reproduzierbarkeit der Signale ist jedoch noch nicht hoch genug.

Einfluss auf die Reproduzierbarkeit haben der Aufbau des Sensorelements selbst, sowie die Betriebsweise des Sensors, insbesondere die Art der Temperaturkompensation um die hohen Abgastemperaturschwankungen von -20°C bis +450°C (kurz 600°C) auszuregeln. Denn wenn sich die Sensortemperatur ändert, so ändert sich die Sensorcharakteristik und es sind keine reproduzierbaren Messungen möglich. Um also eine höhere Reproduzierbarkeit zu erreichen, wurde

1. eine neue Temperaturregelstrategie (R_{ki} anstatt R_n) entwickelt
2. eine weiter Temperaturregelstrategie (4L-Kompensation anstatt 2L) entwickelt
3. der CO_e -Teil des Sensors weiterentwickelt (Variante CarboSen „DS“).

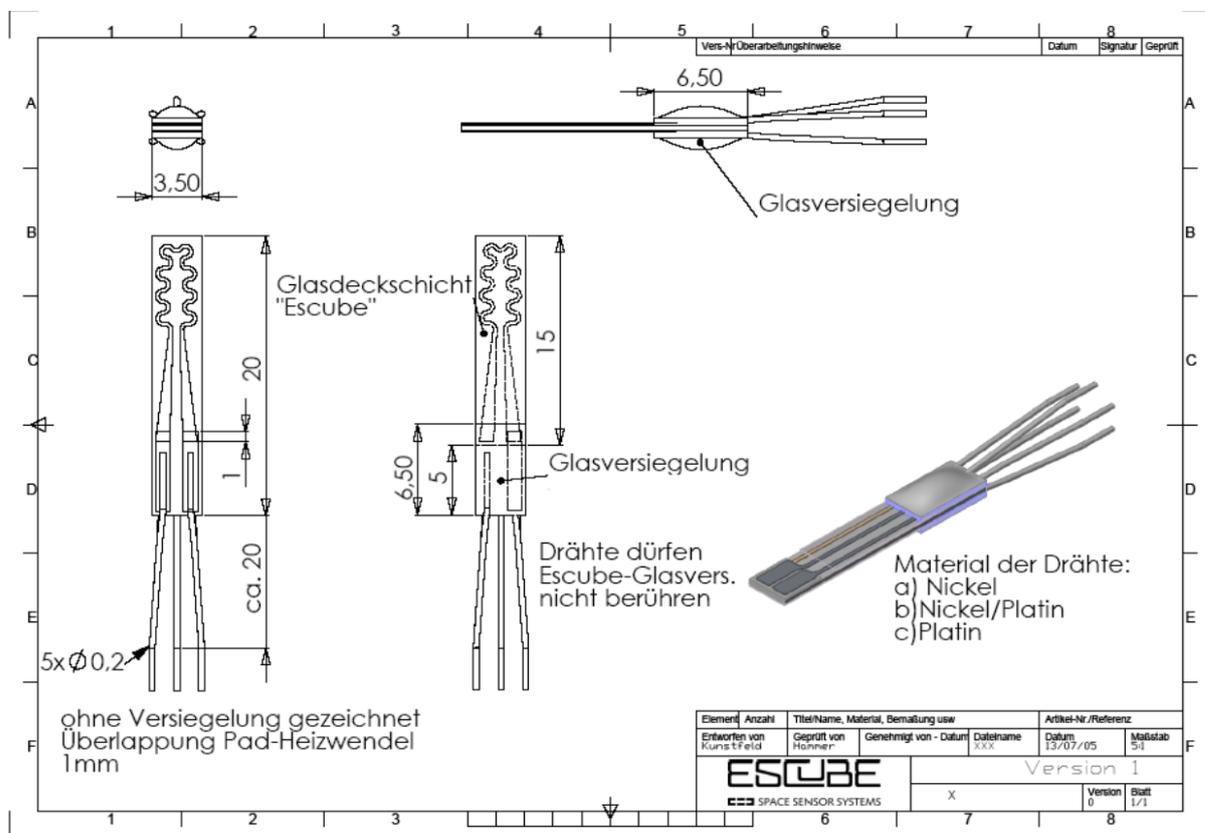


Abbildung 16.1 CarboSen Sensorelement vom „Stand der Technik“ mit 5 Kontaktdrähten

Zu 1):

Die 2 Stück ausgelieferte XC164 Sensorelektroniken wurden einem Firmware Update unterzogen und von der bekannten R_n -Regelung (Konstanthaltung des Pt-Heizerwendelwiderstandes) auf R_{ki} -Regelung umgestellt (Konstanthaltung des keramischen Innenwiderstandes).

- Tests im Hochtemperaturofen am IRS/ESCUBE mit synthetischen Gasen sowie Messungen in der beheizbaren Messkammer sowie im realen Feuerungsabgas am ISIS haben bestätigt, dass reproduzierbarere Messung bis über 450°C (ISIS) bzw. 600°C (IRS/ESCUBE) mit der R_{ki} -Regelung möglich ist.
- Langzeittests mit den R_{ki} -geregelt Sensoren im realen Feuerungsabgas am IRS/ESCUBE haben gezeigt, dass sich bei Beaufschlagung mit einer bestimmten Sorte HC's der keramische Innenwiderstand bleibend erhöht. Dadurch zeigt der Sensor eine Langzeitdrift mit abnehmenden Signalen.

Insbesondere bedeutet dies, dass bei konstant geregelten R_{ki} , die Sensortemperatur allmählich ansteigt und der Sensor damit unempfindlicher gegenüber HC's wird. Diese HC's können bei Holzfeuerungsabgasen nicht ausgeschlossen werden. Um diesem temperaturbedingten Langzeitdrift-Effekt vorzubeugen, wurde...

Zu 2):

...die Temperaturregelstrategie weiter verfeinert und auf die 4L-Temperaturkompensation gesetzt. Hierzu mussten die Sensorelemente mit 7 anstatt mit 5 Drähten aufgebaut werden. Insgesamt wurden im Laufe des Projekts 6 Stück CarboSen Sensorelemente CS1.000, 2 Stück CarboSen Sensorelemente CS10.000 und 4 Stück CarboSen Sensorelemente CS1.000DS jeweils mit 7 Kontaktldrähten an das ISIS ausgeliefert.

4L bedeutet, dass pro Heizerwendelkontakt (2 Stück) nicht eine sondern zwei Drähte – insgesamt also 4 Leiter (4L) angebracht werden. Der Zuleitungswiderstand kann damit zu jedem Zeitpunkt unabhängig von der Heizerwendel exakt vermessen und dessen Einfluss kompensiert werden. Eine Variation des Zuleitungswiderstandes mit variabler Abgastemperatur führt somit nicht mehr zu einer Temperaturveränderung am Sensorelement.

- Eine höhere Reproduzierbarkeit aufgrund konstant gehaltener Sensortemperatur konnte erreicht werden.
- Eine temperaturbedingte Langzeitdrift, vergleichbar der bei der R_{ki} Regelstrategie ist nicht mehr sichtbar.

Der Übergang von 5 auf 7 Kontaktldrähte macht eine neue Integration unumgänglich. Das 100mm Tauchrohr mit 6mm Innen- und 8mm Außendurchmesser nach dem „Stand der Technik“ ist in seinem Inneren mit einem ca.5mm durchmessenden Al_2O_3 -Keramikisoliationsstab ausgeführt, der jedoch nur Bohrungen für 6 Leiter erlaubt. Al_2O_3 -Isoliationsstäbe mit einer höheren Anzahl von Bohrungen sind nur mit größerem Außendurchmesser erhältlich. Diese Stäbe passen dann nicht mehr in die bestehende Tauchrohrperipherie. Als Alternative zum Al_2O_3 -Isoliationsstab wurde die Verwendung von Glasseiden Isolatoren untersucht.

- Untersuchungen haben gezeigt, dass der gefundene Glasseiden-Isolator bis 700°C optisch einwandfrei, flexibel und funktionell bleibt.
- Die Anzahl der signalführenden Leitungen ist damit flexibel wählbar und die bestehende Integrationshardware und die Integrationswerkzeuge sind weiter einsetzbar.

Die Integration unterschiedlicher CarboSen und KombiSen Sensorelemente wurde daraufhin bei einem externen Spezialisten veranlasst.

Zu diesem Zeitpunkt wurden die zur Integration vorgesehenen Sensorelemente zur Bedrahtung an einen weiteren externen Zulieferer geschickt. Unvorhersehbar war jedoch, dass zu diesem Zeitpunkt der „Stand der Technik“ Pt/Ni-Draht nicht mehr verfügbar war. Eine Recherche zur Findung eines neuen Lieferanten des Pt/Ni-Drahtes wurde gestartet (läuft noch). Alternative, günstigere Drahtmaterialien werden ebenfalls gesucht und sollen getestet werden.

Die vom Bedrahtungsspezialisten vorgeschlagene Au/Ni-Lösung wurde aufgrund des Zeitdruckes im Projekt an den vorbereiteten weiterentwickelten und gefertigten CarboSen und KombiSen Sensorelementen appliziert. Als Ergebnis ist festzuhalten:

- Au/Ni-Drähte können erfolgreich an die Sensorelemente angebracht werden. Bei der Verglasung mit Fixierglas wandert jedoch das Au in den Ni-Kern des Drahtes, und die Oberfläche oxidiert. Dies verhindert eine nachträgliche elektrische Kontaktierung bei der Integration der Sensorelemente.
- Bei der Integration der Sensorelemente in das hochtemperaturbeständige Tauchrohrgehäuse wird das bedrahtete Sensorelement nochmals einem Ofenprozess unterzogen. Der oben erwähnte Effekt (Au-Wanderung, Ni-Oxidation) wurde dadurch verstärkt. Zudem wurde eine Versprödung des Ni-Drahtes beobachtet, welche eine weitere Integration in die vorbereitete Hardware mit Glasseiden-Isolatoren usw. unmöglich machte. Sämtliche Kontaktdrähte brechen bei der Integration ab.

Damit war es nicht möglich die aktuellsten Sensorentwicklungen CarboSen „4L“ und KombiSen Sensorelemente in Tauchrohre zu integrieren und im realen Abgas einer Feuerungsanlage einzusetzen. Dennoch wurden die Sensoren vorab in den Labors am IRS/ESCUBE getestet und die Ergebnisse nachfolgend vorgestellt. Weitere Ergebnisse der während des Projektes gewonnenen Erfahrungen mit den Sensoren im Abgas – insbesondere mit darauf aufbauender Verbrennungsregelung - wurden am ISIS durchgeführt und werden dort gesondert dargestellt.

Zu 3):

Die CO_e-Elektrode des CarboSen Sensors wurde parallel dazu weiterentwickelt und die Variante CarboSen „DS“ gefertigt. Sie zeichnet sich insbesondere aus durch

- eine höhere Temperaturstabilität bis über 600°C hinaus
- eine höhere Sensitivität des Sensors bezüglich CO_e, was für die geringeren Emissionen einer emissionsoptimierten Feuerungsanlage vorteilhaft ist
- eine höhere Reproduzierbarkeit der Sensorsignale
- eine höhere Signalstabilität / geringere Drift.

17 Weiterentwicklung und Qualifizierung der In-Situ Gassensorik in Richtung simultane Messung von CO/HC mit O₂

Basierend auf den Vorarbeiten wurden ab Mitte 2011 18 Platten „fortgeschrittene“ KombiSen Sensoren (s. Abbildung 17.1) in drei unterschiedlichen Dicken $t=0,5$, $t=0,38$ und $t=0,25$ mm in unterschiedlichen Variationen gefertigt. Auf jeder Platte sind dabei 34 Sensorstrukturen aufgebracht, die in Blöcke unterteilt und in sämtlichen Variationen ausgeführt wurden.

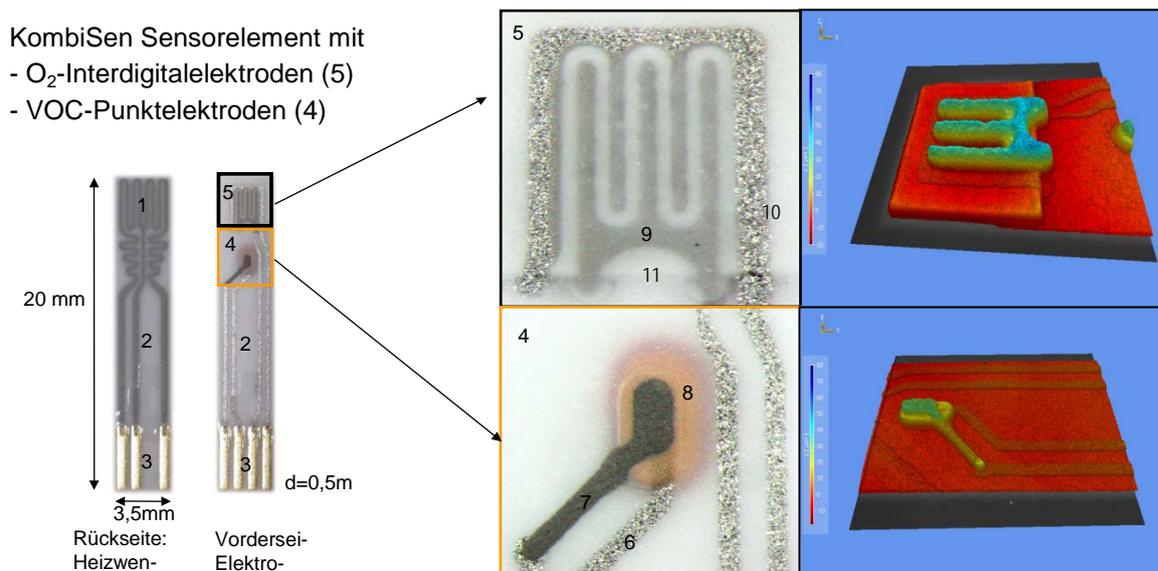


Abbildung 17.1 Stereomikroskopische (links und Mitte) und weisslichtinterferometrische (rechts) Aufnahme des siebdrucktechnisch gefertigten CO/HC-O₂-Kombinationsensors mit Interdigital- und Punktelektroden, Trägersubstrat (2), Heizer (1), Kontaktpads (3), Zuleitungen (6), CO/HC-Elektrode (7), Struktur (8), Kathode (9), Anode (10) und YSZ (11)

Bei der Produktion traten mit den dünnen Substraten Probleme auf. Die $t=0,25$ mm dicken Platten 13-18 sind dabei gerissen und konnten nicht erfolgreich fertiggestellt werden.

Insgesamt konnten ca. 80 Sensorelemente erfolgreich vereinzelt werden. Alle Sensorelemente wurden elektrodenseitig auf Kurzschluss und heizerseitig auf den spezifischen Widerstand bei Raumtemperatur getestet. Es konnte kein Kurzschluss festgestellt werden und die Widerstände waren im nominellen Bereich.

Insbesondere wurden folgende Modifikationen (nur Auszug) durchgeführt:

1. Der Abstand der CO_e Elektrode (4) und der O₂-Elektrode (5) vergrößert um die CO_e empfindliche Elektrode in einen kühleren Bereich zu platzieren und damit die Sensitivität zu erhöhen.
2. Die zusätzliche „DS“-Struktur vom CarboSen „DS“ appliziert (8) um eine höhere Reproduzierbarkeit, Sensitivität, Signalstabilität und Temperaturbeständigkeit zu erhalten.
3. Zudem wurde die Heizerwendel (s. Abbildung 17.2) optimiert, sowie eine zusätzliche Schirmschicht zwischen Heizerseite und Elektrodenseite eingebracht, um mögliche Signaleinkopplungen auf das Sensorsignal zu minimieren.

4. Die O₂-Elektrodenseite (9-11) optimiert, um eine stabile, lineare Ursprungscharakteristik zu erhalten.

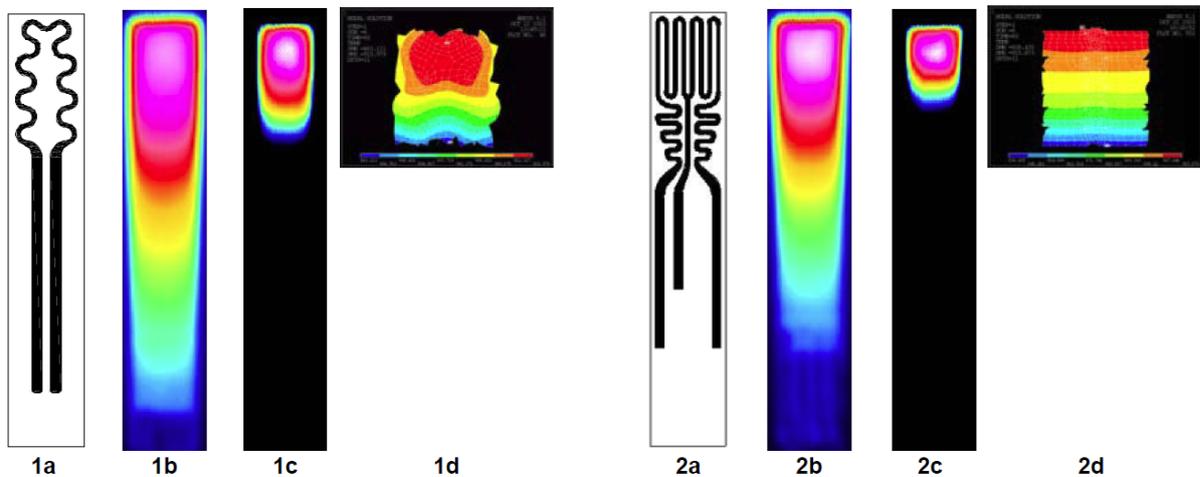


Abbildung 17.2 Stationäre Temperaturverteilungen von zwei Sensorheizervarianten. Dargestellt ist jeweils die Mäanderstruktur. (a), die gemessene Temperaturverteilung über den gesamten Messbereich von 250 – 900 K (b) bzw. über ein Temperaturintervall von $\Delta T=100$ K (c) sowie Simulationsergebnisse für die eigentliche sensitive Sensorfläche an der Sensorspitze mit ANSYS (d, vergrößert dargestellt)

Zu 1 und 2):

Die Erhöhung des Abstandes und die Applikation der DS-Struktur führten zu einer Erhöhung der CO_e-Sensorsignale im Vergleich zu den vorangegangenen KombiSen-Chargen. Trotzdem konnte der KombiSen Sensor mit US,max@1000ppmH₂ in Luft=400mV nur etwa 60% des Sensorsignals des Referenz-CarboSen1000DS Sensors am Testpunkt erreichen.

Zu 3):

Mit dem Ziel einer homogenen Temperaturverteilung wurde mittels ANSYS ® die Heizwendel optimiert und die O₂-sensitiven Elektroden in diesen homogenisierten Bereich platziert, um einheitlichere Gleichgewichtsreaktionen an den Elektroden zu erhalten.

- Eine verbesserte O₂-Charakteristik konnte dadurch erreicht werden (Ergebnisse folgen)
- Die zusätzliche Schirmschicht zeigte keinen positiven Effekt auf das Sensorsignal. Vielmehr wurde eine (unerwünschte) Verfärbung durch Materialmigration der mit der Schirmschicht ausgeführten Heizwendeln beobachtet (s. Abbildung 17.3).

Zu 4):

Eine größere Zahl von Sensoren wurde aufgebaut, mit der KombiSen-Sensorelektronik (AP19) verbunden, vermessen und kalibriert. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der Labortests, vor allem für die kritische O₂-Seite des KombiSen-Sensorelements, vorgestellt.

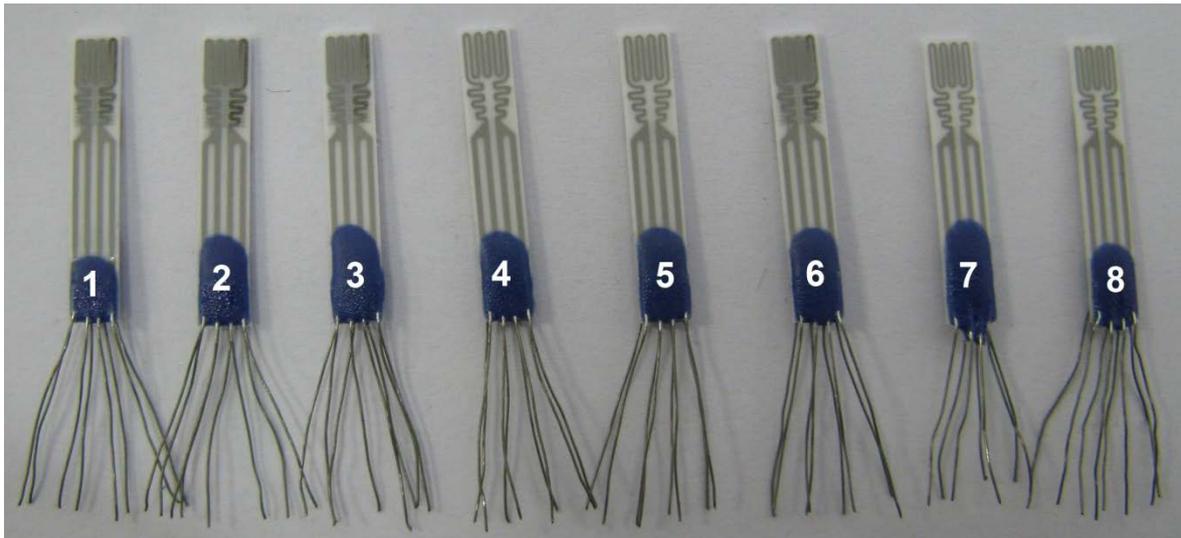


Abbildung 17.3 Verfärbung der Heizerwendeln bei mit zusätzlicher Schirmschicht ausgeführten KombiSen Sensorelementen (1-3, 6). Die Sensorelemente ohne Schirmschicht haben sich nicht verfärbt (4, 5, 7, 8)

- Alle getesteten Sensorelemente zeigen die gewünschte Sauerstoffempfindlichkeit und liefern bei 700°C Sensortemperatur an Raumluft einen Pumpstrom von 40-60uA. An N₂ feucht oder Argon feucht ergibt sich knapp über 0µA. Es gibt bisher keine Schlechttteile.
- Der Heizerwiderstand wurde statistisch zu 9,1Ω+0,2Ω ermittelt. Lediglich bei den Sensorelementen mit Schirmschicht hat sich der Heizerwiderstand nach den Tests um 0,3-0,6Ω erhöht.
- Die Heizung wird in 3-Leiter-Technik (vergleichbar, jedoch einfacher als 4-Leiter und spart einen Kontakt) auf konst. Widerstand geregelt und ist im Rahmen der Messgenauigkeit (IR-Thermometer TESTO 845) stabil. Es wurde keine Abnahme der Temperatur über die Zeit festgestellt.
- Bei der Variation Standard-O₂-Elektrode zu Cermet-O₂-Elektrode werden bei der Langzeitalterung Vorteile erwartet. Im Kurzzeitbetrieb / Stromniveau / Einlaufverhalten wurde kein Unterschied festgestellt.
- Das Einlaufverhalten der Sensoren ist bei Standardbetrieb (Sensortemperatur 700°C mit Raumluft bei 1bar 30°C 70%RF) ausgeprägt. D.h. der Pumpstrom nimmt kontinuierlich ab. Nach 17h liegt der Pumpstrom bei 42-71% des Ausgangswerts (s. Abbildung 17.4). Der Strombetrag am Anfang hat keinen Einfluss auf diese „Drift“. D.h. ein Sensor mit hohem Startstrom driftet viel, ein Sensor mit niedrigerem Startstrom driftet weniger. Die relativen Werte sind dabei vergleichbar. Die Sensoren stabilisieren sich nach einigen Tagen Einlaufzeit. Dieses Einlaufverhalten muss verbessert werden.
- Der keramische Innenwiderstand R_{ki} verändert sich geringfügig nach Erstinbetriebnahme und ist nach ca. 6h konstant.
- Nach jedem Aus- und wieder Einschalten ist der Pumpstrom höher als vor dem Ausschalten. Erst nach ca. 30min hat sich das Sensorsignal stabilisiert. Dieses Einschaltverhalten muss verbessert/beschleunigt werden.
- Ein Betrieb bei geringerer Sensortemperatur von 650°C verringert die Einlaufeffekte. Da dann aber die Kennlinie der Gaskalibrierung nicht-linear wird, ist keine einfache 1-Punktkalibrierung mehr möglich, so dass die minimale Sensortemperatur auf 700°C bestimmt werden kann.

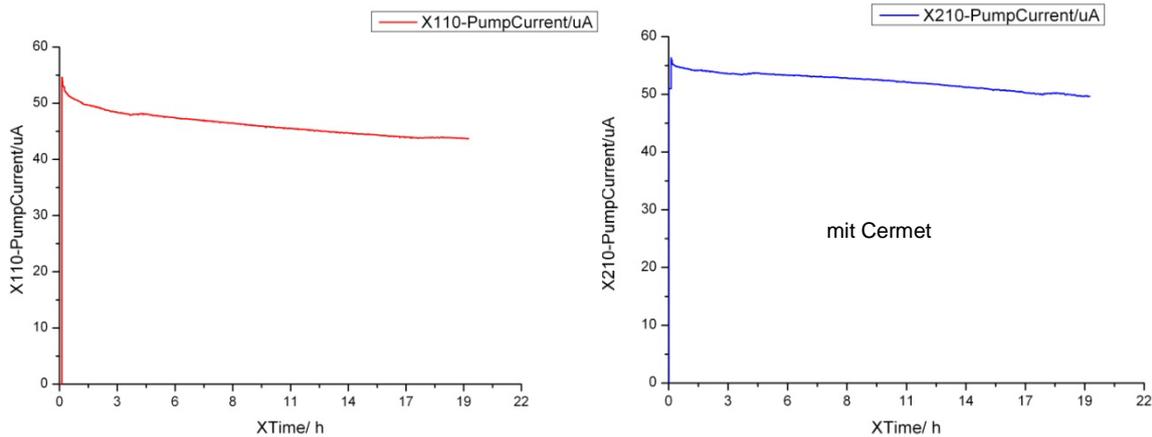


Abbildung 17.4 Typisches Einlaufverhalten der O₂-Signale beim KombiSen-Sensorelement (links: mit Standard-Elektrode, rechts: mit Cermet-O₂-Elektroden)

- Nach dem Einlaufen und nach 30 Minuten Einschaltwartezeit werden die Sensoren stationär betrieben. Danach lassen sich die Sensoren gut kalibrieren. Die Kalibrierkurve $I_S=f(O_2)$ ist bei 700°C nahezu linear. Bei 650°C ist die Kurve stark gekrümmt (nicht-linear). Die Sensoren reagieren sehr schnell.
- Die Totaldruckkalibrierung ist problemlos, die Sensoren reagieren sofort und reproduzierbar auf Druck.
- Querempfindlichkeitsuntersuchungen mit N₂, Ar, CO₂ zeigen keinerlei Querempfindlichkeiten bezüglich dieser Gase.
- Querempfindlichkeitsuntersuchungen mit H₂O stationär zeigen ebenfalls keinerlei Querempfindlichkeit zu relativer Feuchte. Bei einem H₂O-Sprung ist jedoch ein Signalanstieg mit steigender Feuchte zu sehen. Das Sensorsignal fällt dann wieder auf den erwarteten Wert. Diese $d(H_2O)/dt$ -Empfindlichkeit ist noch nicht erklärbar.
- Nach einem Fettgasstoß (Reduzierende Bedingungen mit hohen CO_e – Konzentrationen bei O₂-Mangel) ist der Sensor zunächst etwas empfindlicher und erreicht nach kurzer Zeit das ursprüngliche Niveau.
- Eine erste Genauigkeitsbetrachtung zeigt eine Wiederholgenauigkeit von 1% O₂ absolut. Dies bedeutet bei einem Messbereich von 0-21% eine relative Messgenauigkeit um 5% (ohne Alterung und Querempfindlichkeiten). Ziel ist eine Messgenauigkeit um 1%.

Insgesamt zeigen die Sensoren mit Cermet-O₂-Elektrode ein besseres / stabileres Sensor-signalverhalten und wurden daher mit alternativen Betriebsweisen (O₂-Dev-Kit Elektronik) weiter untersucht. So liefert eine erhöhte Sensortemperatur auf 750°C, der Betrieb mit überlagerter Wechselspannung und erhöhter Pumpspannung von 1V die in Abbildung 17.5 und Abbildung 17.6 exemplarisch an Sensor „K 6 1-2 c“ dargestellten Ergebnisse.

In Abbildung 17.5 ist der zeitliche Verlauf der Sensorsignale bei 3 unterschiedlichen Konzentrationen von 0, 12,5 und 25% O₂ in N₂ gezeigt. Die Sprungantwort ist sehr schnell und das Sensorsignal in wenigen Sekunden stabil. Beim Sprung von niedrigen zu höheren Konzentrationen ist ein leichtes Überschwingen erkennbar. Je größer der Sprung, desto größer der Überschwinger. Bei Sprüngen von 25% auf 12,5% ist entsprechend ein Unterschwingen erkennbar. Innerhalb von 50-100s ist das Signal wieder stabil. Eine überlagerte Drift ist nicht erkennbar, bei 25%. Die Signale sind im Rahmen des Versuchsaufbaus reproduzierbar.

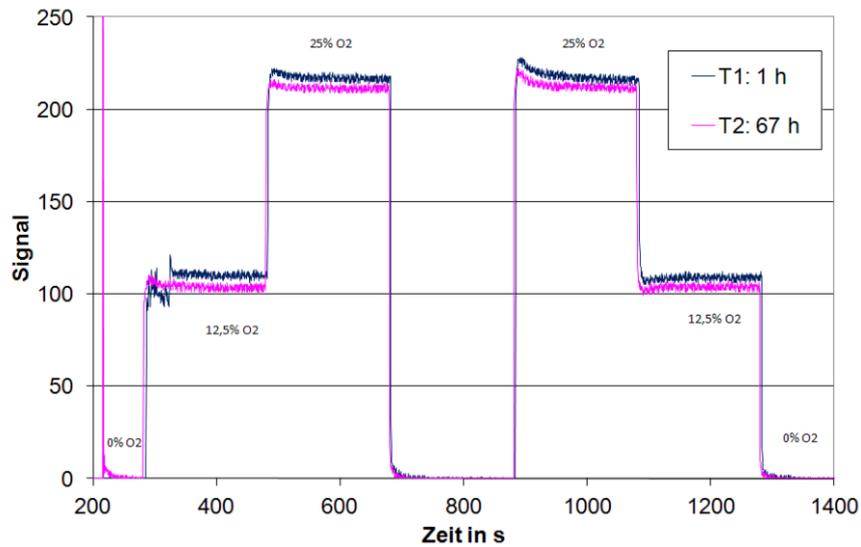


Abbildung 17.5 Verlauf der Sensorsignale des KombiSen 6-1-2-c bei 3 unterschiedlichen O₂-Konzentrationen in N₂ nach 1h on (T₁) und nach 67h on (T₂)

In Abbildung 17.6 sind die jeweiligen Endwerte jeder Stufe der Tests T₁ und T₂ dargestellt. Auch hier ist die nur geringfügige Verschiebung der Kennlinien erkennbar, was einen deutlichen Fortschritt zur vorangegangenen Generation Sensoren sichtbar macht.

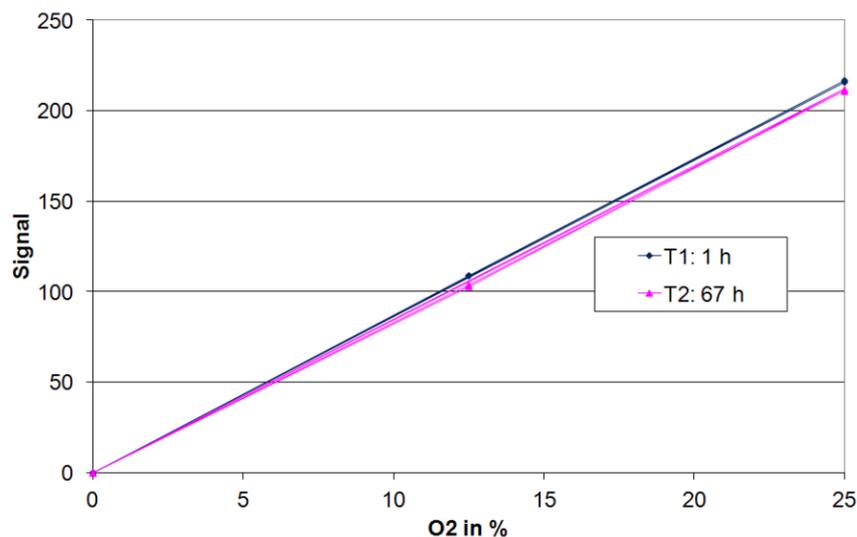


Abbildung 17.6 Stufenendwerte der Testmessungen mit KombiSen 6-1-2-c bei 0, 12,5 und 25% O₂ in N₂ nach 1h (Test 1) und nach 67h (Test 2)

Um eine zuverlässigere Aussage über die Drift zu erhalten, ist in Abbildung 17.8 das Histogramm über den Dauertest von 67h abgebildet. Abgesehen von dem angesprochenen initialen Einlaufverhalten über 2h ist keine bleibende gerichtete Drift mehr festzustellen, was ebenfalls einen deutlichen Fortschritt zur vorangegangenen Generation Sensoren sichtbar macht. Die zuvor identifizierte Einlauf- und Driftproblematik gemäß Abbildung 17.4 konnte damit entschärft werden.

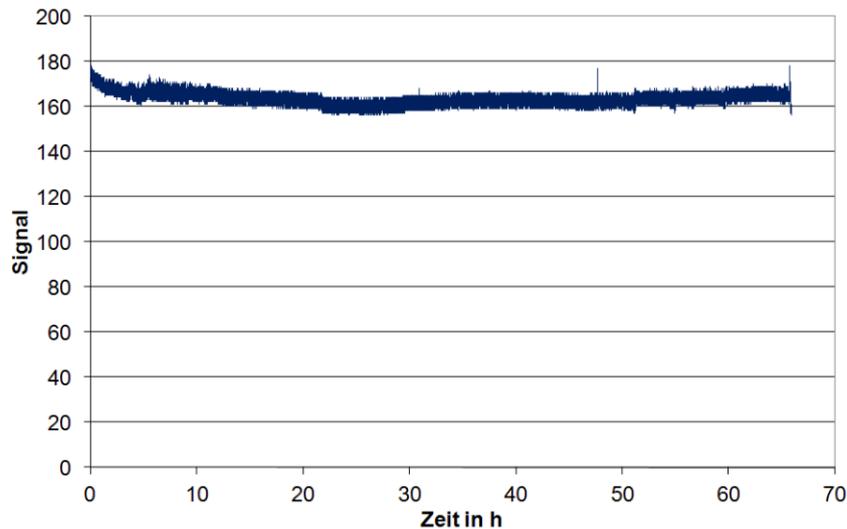


Abbildung 17.7 Signalverlauf des KombiSen 6-1-2-c über 67h an Umgebungsluft (21%O₂, Rest N₂)

Abschließend wurden die verbliebenen KombiSen-Sensorelemente mit der hierfür entwickelten KombiSen-Elektronik (AP19) im Synthesegaslabor getestet. D.h. die CO/HC (CO_e) Signale U_S in mV und die O₂ Signale I_S in μ A können beide erfasst werden. In Abbildung 17.8 ist exemplarisch die Charakteristik eines über 16h eingelaufenen KombiSen (K 5-2-1-d) bei Belastung mit unterschiedlichen H₂- und CO-Konzentrationen und wechselnden O₂-Anteilen abgebildet.

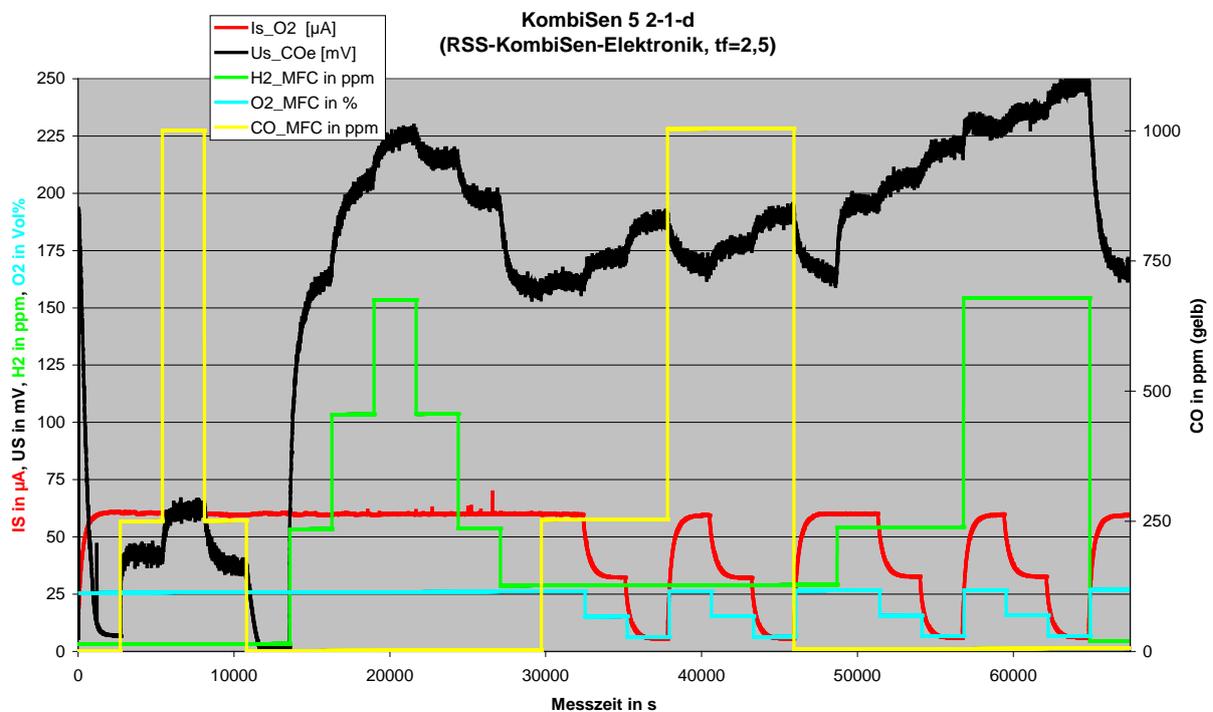


Abbildung 17.8 Histogramm der Charakterisierung des KombiSen Sensors K 5-2-1-d bei einem Temperaturfaktor $t_f=2,5$ mit der RSS-KombiSen-Elektronik

Bei $t=0-33000s$: Zunächst wird bei konstantem O_2 -Gehalt von 21% (blau) eine CO Treppe (gelb) und danach eine H_2 -Treppe (grün) gefahren. Die Konzentrationen werden über Massenflussregler eingestellt. Die Mischkammer hat ein großes Totraumvolumen, so dass die Sensorsignale selbst bei einer Haltezeit von 45 Minuten teilweise noch nicht den stationären Endwert erreicht haben.

Ungeachtet der CO/ H_2 -Variationen bleibt in dieser ersten Testsequenz zwischen $t=0$ und $33000s$ das O_2 Sensorsignal I_S in μA (rot) konstant bei $60\mu A$, gemäß dem konstanten O_2 -Gehalt von 21%.

$t=33000s-66000s$: Zunächst wird bei zwei konstant gehaltenen CO-Konzentrationen (250ppm, 1000ppm) und danach bei zwei konstant gehaltenen H_2 -Konzentrationen (50ppm, 150ppm) der O_2 Gehalt jeweils von 21% über 10% auf 1% reduziert, um die Sauerstoffquerempfindlichkeit der CO/HC Elektrode sowie die Reaktion der O_2 -Elektrode des KombiSen zu sehen.

Tabelle 17.1 zeigt, wie sich das CO_e -Sensorsignal U_S in mV mit ansteigenden CO-Konzentrationen von 5mV an Umgebung (Offset) auf 62mV bei 1000ppm CO erhöht und wieder auf 0mV (ideales Offset) an Umgebung absinkt.

Tabelle 17.1 CO_e -Sensorsignal U_S in mV des KombiSen 5-2-1-d als Funktion der CO-Konzentration bei 21% O_2

	CO in ppm				
	0	250	1000	250	0
U_S in mV	5	41	62	35	0

Tabelle 17.2 zeigt, wie sich das CO_e -Sensorsignal U_S in mV mit ansteigenden H_2 -Konzentrationen von 0mV an Umgebung (idealer Offset) auf 232mV bei 150ppm H_2 erhöht und mit abnehmenden Konzentrationen wieder absinkt. Das Niveau von 0mV an Umgebungsluft im letzten Schritt kann allerdings nicht mehr eingestellt werden, denn der H_2 -Massenflussregler schließt nach dem ersten öffnen nicht mehr komplett. Die Leckage führt zu H_2 -Konzentrationen von ca. 25 ppm *, welche von nun an ($t>26.000s$) bis zum Ende des Tests stets als Hintergrundkonzentration bestehen bleiben.

Tabelle 17.2 CO_e -Sensorsignal U_S in mV des K 5-2-1-d als Funktion der H_2 -Konzentration bei 21% O_2

	H_2 in ppm						
	0	50	100	150	100	50	ca. 25*
U_S in mV	0	165	203	232	211	194	155*

Tabelle 17.3 zeigt, dass ungeachtet der Hintergrundkonzentration die Sensorsignale der O_2 -Seite reproduzierbar dem kommandierten O_2 -Gehalt folgen und keinerlei Querempfindlichkeit auf H_2 und CO zu erkennen ist.

Tabelle 17.3 O₂-Sensorsignal I_S in μ A der K 5-2-1-d als Funktion des O₂-Gehalts bei unterschiedlichen Hintergrundkonzentrationen von H₂ und CO

Hintergrundkonzentration CO / H ₂ in ppm	O ₂ Gehalt in %		
	21	10	1
250 / ca. 25 *	58 μ A	31 μ A	5 μ A
1000 / ca. 25 *	58 μ A	30 μ A	5 μ A
0 / 50	58 μ A	30 μ A	6 μ A
0 / 150	58 μ A	30 μ A	6 μ A
0 / ca. 25	58 μ A	-	-

Tabelle 17.4 zeigt, dass bei beiden kommandierten CO-Konzentrationen die Sensorsignale mit abnehmendem O₂-Gehalt leicht ansteigen, also eine geringe Querempfindlichkeit der CO_e-Elektrode auf O₂-Variationen vorhanden ist.

Tabelle 17.4 CO_e-Sensorsignal U_S in mV des K 5-2-1-d bei zwei konstant gehaltenen CO-Konzentration als Funktion des O₂-Gehalts (Querempfindlichkeit auf O₂)

O ₂ -Gehalt in Vol%	CO in ppm	
	250 (+ca.25ppm H ₂)	1000 (+ca.25ppm H ₂)
21	160 mV	162 mV
10	170 mV	175 mV
1	185 mV	190 mV

Tabelle 17.5 zeigt, dass bei beiden kommandierten H₂-Konzentrationen die Sensorsignale mit abnehmendem O₂-Gehalt leicht ansteigen, also auch hier eine geringe Querempfindlichkeit der CO_e-Elektrode auf O₂-Variationen vorhanden ist.

Tabelle 17.5 CO_e-Sensorsignal U_S in mV des K 5-2-1-d bei zwei konstant gehaltenen H₂-Konzentrationen als Funktion des O₂-Gehalts (Querempfindlichkeit auf O₂)

O ₂ -Gehalt in Vol%	H ₂ in ppm	
	250 (+ca.25ppm H ₂)	1000 (+ca.25ppm H ₂)
21	160 mV	162 mV
10	170 mV	175 mV
1	185 mV	190 mV

18 Konzeptionierung einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)

Zur Vermessung der Sensorelemente bei externen Projektpartnern (ISIS), insbesondere zur Integration der KombiSen-Sensoren in den Abgaskanal der Holzfeuerungsanlage, müssen die Sensorelemente (s. Abbildung 17.3) in eine hochtemperaturbeständige Peripherie mit geeigneter Aufbau und Verbindungstechnologie (AVT) integriert werden. Aufbauend auf dem bestehenden Tauchrohrkonzept wurde die AVT, wie in Abbildung 18.1 zu sehen, konzipiert.

Insgesamt wurden 30 Sensorelemente mit Drähten versehen, mit Spezialglas fixiert und zur Integration beim externen Dienstleister verschickt. Bei der Integration traten die in Kapitel 16 bereits aufgelisteten Umstände/Probleme auf:

- Pt/Ni-Drähte vom „Stand der Technik“ waren nicht mehr verfügbar.
- Alternativ eingesetzte Au/Ni-Drähte oxidieren nach diversen Ofenprozessen, da das Au ins Ni emigriert. Die Drähte können dann nicht mehr kontaktiert werden.
- Alternativ eingesetzte Au/Ni-Drähte werden nach diversen Ofenprozessen spröde und brechen bei der Integration.

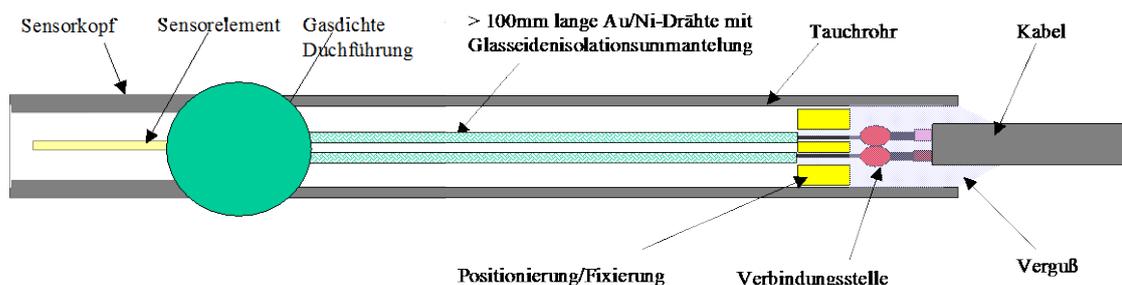


Abbildung 18.1 AVT-Konzept für die Integration der KombiSen Sensorelemente

Insgesamt konnten im Laufe der Projektphase daher keine integrierten KombiSen Sensorelemente an den Projektpartner ISIS ausgeliefert werden.

Derzeit werden alternative Lieferanten für Pt/Ni gesucht; um den „Stand der Technik“ wieder herzustellen. Alternative, kostengünstigere Drahtmaterialien werden gesucht und ggfls. appliziert und qualifiziert. Ein alternatives AVT-Konzept ohne Drähte wird erarbeitet und ggfls. realisiert.

19 Erarbeitung der Vorgaben für die Entwicklung und den Aufbau einer Sensorelektronik

Basierend auf den Ergebnissen der KombiSen Sensorelemente, wurde für deren Betrieb insgesamt drei identische Elektroniken, basierend auf der RSS-Elektronik des ILR (Universität Dresden) weiterentwickelt, modifiziert und aufgebaut (Abbildung 19.1). Mit dieser RSS-KombiSen-Elektronik und dem KombiSen-Adapter ist es nun möglich; den KombiSen Sensor temperaturkompensiert zu betreiben und sowohl das CO/HC als auch das O₂-Signal des KombiSen-Sensors simultan zu erfassen.

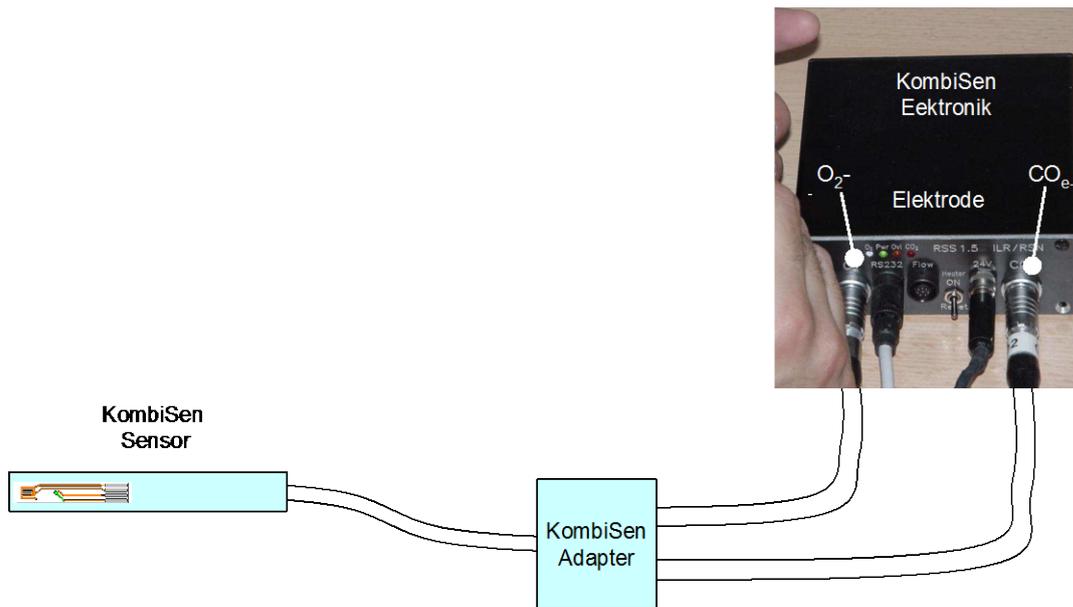


Abbildung 19.1 Elektronik mit Adapter und Sensor zum temperaturkompensierten Betrieb des KombiSen-Sensorelements sowie zur simultanen Erfassung der O₂- und der CO/HC-(CO_e)-Sensorsignale

Sobald die KombiSen Sensorelemente erfolgreich ins neue AVT-Konzept integriert werden können, ist das gesamte System in der in Abbildung 19.1 dargestellten Konfiguration verfügbar und beim Projektpartner ISIS für dortige Tests einsetzbar. Ein Labview-Executable zur Messwerterfassung, Visualisierung, Kalibrierung und Datenspeicherung ist ebenfalls verfügbar.

Im nächsten Schritt muss eine Vereinheitlichung des Adapters und der Elektronik sowie die Integration der vorteilhaften Betriebsweise „überlagerte Wechselspannung“ in die Elektronik durchgeführt werden. Die Realisierung der nächsten „vereinheitlichten“ Elektronik kann erst nach Design Freeze des KombiSen-Sensorelements erfolgen.

20 Entwicklung von Routinen zur kontinuierlichen Funktionsüberwachung der Gassensorik

Dieses Arbeitspaket kann sinnvollerweise erst bearbeitet werden, wenn das KombiSen-Sensorsystem zu Ende entwickelt, voll funktionsfähig und für den vorgesehenen Einsatz nachweislich qualifiziert ist.

Berichtsteil zu den Arbeitspaketen von DITTRICH



J. DITTRICH ELEKTRONIC GmbH & Co. KG
Bahnhofstr. 67, D-76532 Baden-Baden
Fon +49 7221 64103, Fax +49 7221 17103
E-Mail info@dittrich-systeme.de

Januar 2013

Inhaltsverzeichnis DITTRICH-Berichtsteil

21	Kurzfassung DITTRICH	134
22	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	134
23	Einleitung DITTRICH	134
24	Das O₂/CO-Sensorsystem	135
24.1	Aufbau des Sensors	135
24.2	Funktionsprinzip	136
24.2.1	Prinzip der Sauerstoffsonde	137
24.2.2	Prinzip der CO-Sonde	138
25	Ansteuerungs-/Auswertungselektronik	138
25.1	Heizungsansteuerung	139
25.2	Signalauswertung	140
25.3	Hilfsbeschaltung	140
25.4	Unterschied zwischen O ₂ - und CO-Ausführung	140
26	Erprobungsergebnisse	140
27	Zusammenfassung DITTRICH	142

21 Kurzfassung DITTRICH

Der vorliegende Beitrag beschreibt das im Rahmen des Verbundprojekts „Holzverbrennung 2015“ entwickelte Sauerstoff-/Kohlenmonoxid-Sensorsystem. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Entwicklung eines robusten und stabilen Sauerstoff-/Kohlenmonoxid-Sensorsystems für Hochtemperaturapplikationen zum Einsatz in einem Regelungssystem für Kleinf Feuerungsanlagen. Das Sensorsystem besteht aus zwei Zirkondioxidsonden: Eine für Sauerstoff und die zweite für die Detektion des Kohlenmonoxids. Es wurde am ISIS mit Modellgasen beaufschlagt und die simultane Registrierung der Konzentrationen von O₂, CO und H₂ untersucht (Kap. 11.2). Weiterhin wurden Methoden zur Signalextraktion und zur Auswertung des Messsignals erarbeitet und bewertet.

22 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt Holzverbrennung 2015 wurde in einer Kooperation mit dem Institut für Raumfahrtssysteme (IRS, Universität Stuttgart), Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS, Hochschule Karlsruhe), Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK, Universität Stuttgart), Fa. Bosch Thermotechnik GmbH (Bosch-TT Lollar) und Fa. Lamtec GmbH & Co. KG durchgeführt. Prototypen von Sauerstoff- und Kohlenmonoxid-Sensorsysteme für Hochtemperaturanwendungen wurden im Rahmen dieses Projektes entwickelt und an den Projektpartner ISIS weitergegeben.

23 Einleitung DITTRICH

Kohlenmonoxid (CO) ist ein Zwischenprodukt des Verbrennungsprozesses, der im Vergleich zu den anderen Reaktionsschritten langsam zu CO₂ oxidiert. Wenn die Bedingungen hinsichtlich wichtiger Einflussgrößen im Feuerraum einer Feuerungsanlage wie die Temperatur, die Verweilzeit oder die Durchmischung nicht optimal sind, führt das zur unvollständigen Verbrennung und dadurch zu Schadstoffen wie z.B. CO, Methan, VOC oder Ruß im Abgas. Der Kohlenmonoxidgehalt sowie der Sauerstoffgehalt kann daher als Indikator für unvollständige Verbrennung und für die Effizienz des Verbrennungsprozesses betrachtet werden. Durch die Überwachung des Kohlenmonoxidgehalts werden die Bewertung der Verbrennungsqualität sowie die Optimierung des Feuerungsprozesses in jeder Verbrennungsphase möglich. Gleichzeitig kann, mit der Verbesserung der Abgaswerte und der Minderung der Schadstoffemissionen, auch der Wirkungsgrad entscheidend verbessert werden. Eine maximal mögliche Wärmemenge kann mit minimalem Brennstoffeinsatz erzeugt werden. Hierfür ist eine sensorgesteuerte O₂/CO- oder CO-Reglung eine Voraussetzung. Der Sensor muss jedoch die wesentlichen Konzentrationen von O₂ und CO bei hohen Temperaturen und harschen Bedienungen genau und stabil messen. Für diese Messaufgaben sollen Sensorsysteme im zu entwickelnden Stückholz-Heizkessel eingesetzt werden. Sie sollen zur kontinuierlichen Messung und Auswertung der Sauerstoff- und der CO-Konzentration in allen Phasen des Verbrennungsprozesses in die Feuerungsanlage eingebaut werden.

Der Beitrag der Fa. J. Ditrlich Elektronik GmbH & Co. KG bei diesem Projekt ist die Entwicklung eines CO-Sensorsystems zum Einsatz in einem kleinen Stückholz-Heizkessel zur Opti-

mierung der Effizienz und zur Minimierung schädlicher Emissionen beim Verbrennungsprozess. Auf Basis einer Zirkondioxidsonde für Sauerstoff wurde ein Sensor zur Detektion von Kohlenmonoxid CO bzw. nicht verbrannten Abgasbestandteilen wie CO und H₂ (CO-equivalent) entwickelt. Gegenüber der O₂-Messung hat die Überwachung nicht verbrannter Abgasbestandteile den Vorteil eines direkten Bezuges auf die Qualität der Verbrennung.

Die Ansteuerung- und Auswerteelektronik sowie der entwickelte Sensor wurden an den Projektpartner ISIS weitergegeben um die Konzentration von Sauerstoff und Kohlenmonoxid bzw. CO-equivalent in Modellgasen zu bestimmen. Solche Sensorsysteme sollen später für die Untersuchung des Abgases in allen Verbrennungsphasen verwendet werden. Die so gewonnenen Daten aus Experimenten bei Modellgas-Beaufschlagung fließen in die Weiterentwicklung und Optimierung des Sensors ein.

24 Das O₂/CO-Sensorsystem

Das O₂/CO-Messsystem besteht aus zwei Zirkondioxid-Sensoren, ein Sensor für Sauerstoff und ein Sensor für Kohlenmonoxid. Jeder Sensor misst den Partialdruck des Zielgases direkt im Gasgemisch (absoluter Zielgasgehalt). Das Messverfahren beruht auf einem dynamischen Vorgang an zwei Zirkondioxidscheiben, die eine hermetisch abgedichtete Kammer bilden. Der gesamte Messbereich ist linear. Die Kalibrierung des Sauerstoffsensors erfolgt ohne die des Kohlenmonoxidsensors mit Referenzgas. Die Ausgabe des Sauerstoffsensors wird als Referenzsignal für die Kalibrierung und Auswertung betrachtet. Der gemessene Sauerstoff- und Kohlenmonoxidgehalt wird über einen analogen Kanal („4-20 mA“ oder „0-10V“) und einen digitalen Kanal ausgegeben, letzterer überträgt auch die Fehlermeldungen.

Die O₂- und CO-Sensoren sind für eine maximale Rauchgastemperatur von ca. 450°C geeignet. Diese Rauchgastemperatur wird bei Feuerungsanlagen normalerweise nicht überschritten, bei stark verschmutztem Kessel oder bei starker Überlast sind Rauchgastemperaturen in dieser Höhe jedoch nicht auszuschließen. Die Sensoren wurden daher in einem gewissen Sicherheitsabstand vom Ausgang des Kessels eingebaut.

24.1 Aufbau des Sensors

Der Sensor besteht aus einem Sensorelement das im Kopf eines langen Tauchrohrs aus Edelstahl sitzt und einer Ansteuerungs- und Auswerteelektronik. Das Sensorelement selbst besteht aus zwei identischen Zirkondioxidscheiben, die einen Platinring auf beiden Seiten abdecken um eine hermetische abgeschlossene Kammer zu bilden. Innerhalb der so entstehenden Kammer befindet sich ein Gas mit unbekanntem Sauerstoffgehalt (siehe Abbildung 24.1).

Eine Scheibe dient als elektrochemische Sauerstoffpumpe. Hierfür sind die Vorder- und Rückseiten durch den Platinring mit einer umkehrbaren Stromquelle verbunden. An der zweiten Scheibe wird die erzeugte Messspannung zwischen beiden Seiten abgegriffen. Um das Sensorelement vor Verschmutzungen zu schützen, die zu unstabilen und ungenauen Messsignalen führen können, sind zwei Außenscheiben aus gasdurchlässigen Aluminiumoxid (Al₂O₃) angebracht.

Eine äußere Kappe aus gesintertem Edelstahl wird zusätzlich verwendet um Partikeln, Kondensat und Ruß des Gasstromes zu filtern. Die Sonde ist mit einer Heizwendel umgeben. Sie wird üblicherweise mit einer Heizspannung von 4,5 V betrieben um die zum Betrieb nötige Temperatur des ZrO_2 zu schaffen. Die Arbeitstemperatur von etwa 700°C muss gewährleistet und durch einen Temperaturregler stabilisiert werden.

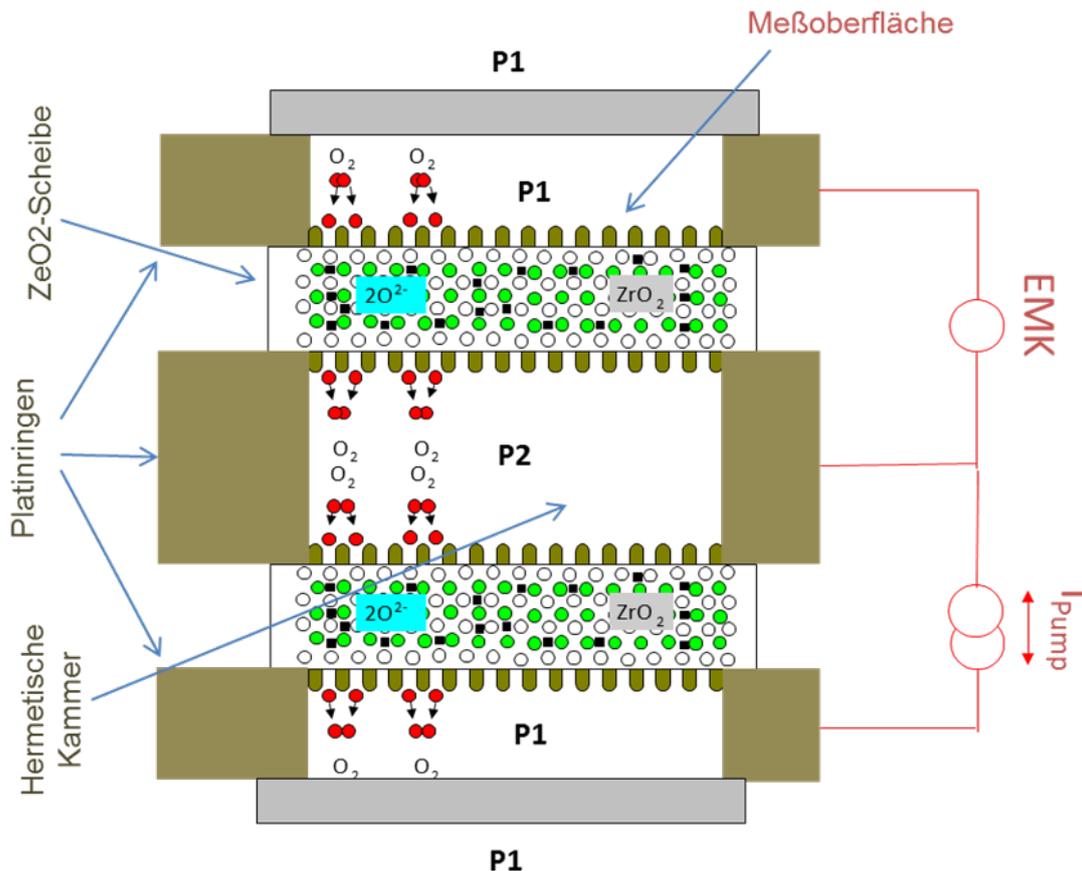


Abbildung 24.1 Schnitt durch den Sauerstoffsensorelement

24.2 Funktionsprinzip

Die theoretischen Grundlagen für die Sauerstoff- sowie für Kohlenmonoxidsensoren basieren auf der Sauerstoffmessung mit Yttrium stabilisiertem Zirkondioxid (YSZ). Dieser keramische Festkörperelektrolyt zeichnet sich durch eine hohe Leitfähigkeit für Oxidionen (O^{2-}) sowie durch eine hohe chemische Stabilität aus. Diese Ionenleitfähigkeit ist jedoch temperaturabhängig und tritt erst bei höheren Temperaturen auf (ab ca. 400°C). Die Temperatur der Sonde muss daher konstant gehalten werden, da dies sonst zu unstablen Messergebnissen führt. Die Leitfähigkeit ist proportional zu einem messbaren elektronischen Strom, welcher durch eine elektronische Verstärkung amperometrisch ausgewertet werden kann.

An der Kathode einer Zirkondioxidscheibe wird Sauerstoff erst reduziert, die Oxidionen diffundieren dann durch das Zirkondioxid. An der Anode schließlich oxidieren die Oxidionen wieder zu Sauerstoff. Die Detektion des Sauerstoffs kann entweder durch den Transport von O_2 durch eine Zirkondioxidscheibe gemäß Faraday'schem Gesetz oder durch das Messen

der Spannung über beiden Seiten der Zirkondioxidscheibe gemäß der Nernst-Gleichung realisiert werden. Dittrich-Sensoren kombinieren jedoch beide Prinzipien (siehe Kapitel 24.2.1).

24.2.1 Prinzip der Sauerstoffsonde

Um Sauerstoff zu detektieren, kommen meist Platinelektroden als Katalysator zum Einsatz. Die Vorder- und Rückseite beider Zirkondioxidscheiben sind mit durchlässigen Platinfilmern beschichtet.

Mittels der umkehrbaren Stromquelle kann der Sauerstoffpartialdruck in der mittleren Kammer moduliert werden (siehe Abbildung 24.1). Je nach Polarität der angelegten Pumpspannung diffundieren O₂-Ionen durch das entsprechende Zirkondioxid von einer Elektrode zu anderen. Die mittlere Kammer wird so periodisch evakuiert und befüllt. Dieser Ladungstransport kann mathematisch durch das Faraday'sche Gesetz beschrieben werden:

$$N = \frac{I \cdot t}{z \cdot F}$$

N: abgeschiedene Stoffmenge

I: eingepprägter Strom

t: Zeit

Z: Anzahl der pro Ion übertragenen Elektronen

F: Faraday-Konstante.

Die Sauerstoffpumpe erzeugt an der anderen Scheibe wegen der Änderung des Sauerstoffpartialdrucks p_2 eine Nernst-Spannung (elektromotorische Kraft: EMK). Diese Messspannung EMK ist abhängig von der Sauerstoffpartialdrücke p_1 (Messgas) und p_2 (Referenz) und lässt sich in der Nernst-Gleichung bestimmen:

$$EMK = - \frac{R T}{z F} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

R: Gaskonstant

T: Temperatur der Scheibe

Z: Anzahl der pro Ion übertragenen Elektronen

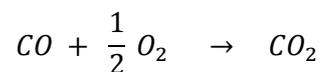
F: Faraday-Konstante.

Der Sauerstoffsensoren mit zwei Zirkondioxidscheiben nutzt beide beschriebenen Prinzipien. Eine Scheibe wirkt als O₂-Pumpe und über die zweite Scheibe misst man die Messspannung EMK. Diese Spannung wird mit zwei Umschaltspannungen verglichen. Wenn sie eine dieser Spannungen erreicht kehrt die Stromquelle die Richtung des Pumpstroms um. Die Dauer eines solchen Pumpzyklus verhält sich linear zum Partialdruck des zu messende Sauerstoffs. Die Linearität zum Sauerstoffpartialdruck p_1 ermöglicht es, den Sensor ständig zu

überwachen. Der Sensor ist somit fehlersicher! Die Kalibrierung der Sonde erfolgt an atmosphärischer Luft. Hierzu ist keine Referenzgase erforderlich.

24.2.2 Prinzip der CO-Sonde

Die Oxidation von Kohlenmonoxid ist nur schwach ausgeprägt, aber bei einer geeigneter Umgebungstemperatur und geeignetem Katalysator findet eine Reaktion des Kohlenmonoxids mit Sauerstoff wie folgt statt:



Für den entwickelten CO-Sensor wurde Gold als Katalysator für Kohlenmonoxid verwendet. Die Außenseite einer Zirkondioxidscheibe (Messoberfläche – Abbildung 24.1) wurde mit reinem Gold in Dünnschicht beschichtet.

Durch die beschriebene Reaktion fällt der Sauerstoffgehalt in der unmittelbaren Umgebung der Messoberfläche. Die CO-Sonde kann tatsächlich die Änderung des Signals erkennen. Der Sensor braucht allerdings den Sauerstoffpartialdruck als Referenzsignal für die Auswertung, welches vom Messsignal abgezogen wird. Dieses Signal lässt sich mit Hilfe einer O₂-Sonde erzeugen.

25 Ansteuerungs-/Auswertungselektronik

Die Ansteuerungs- und Auswerteelektronik besteht aus der

- Heizungsansteuerung
- Signalauswertung
- Hilfsmittel Beschaltung.

Die Nachfolgende Abbildung (Abbildung 25.1) zeigt das Blockschaltbild der Elektronik.

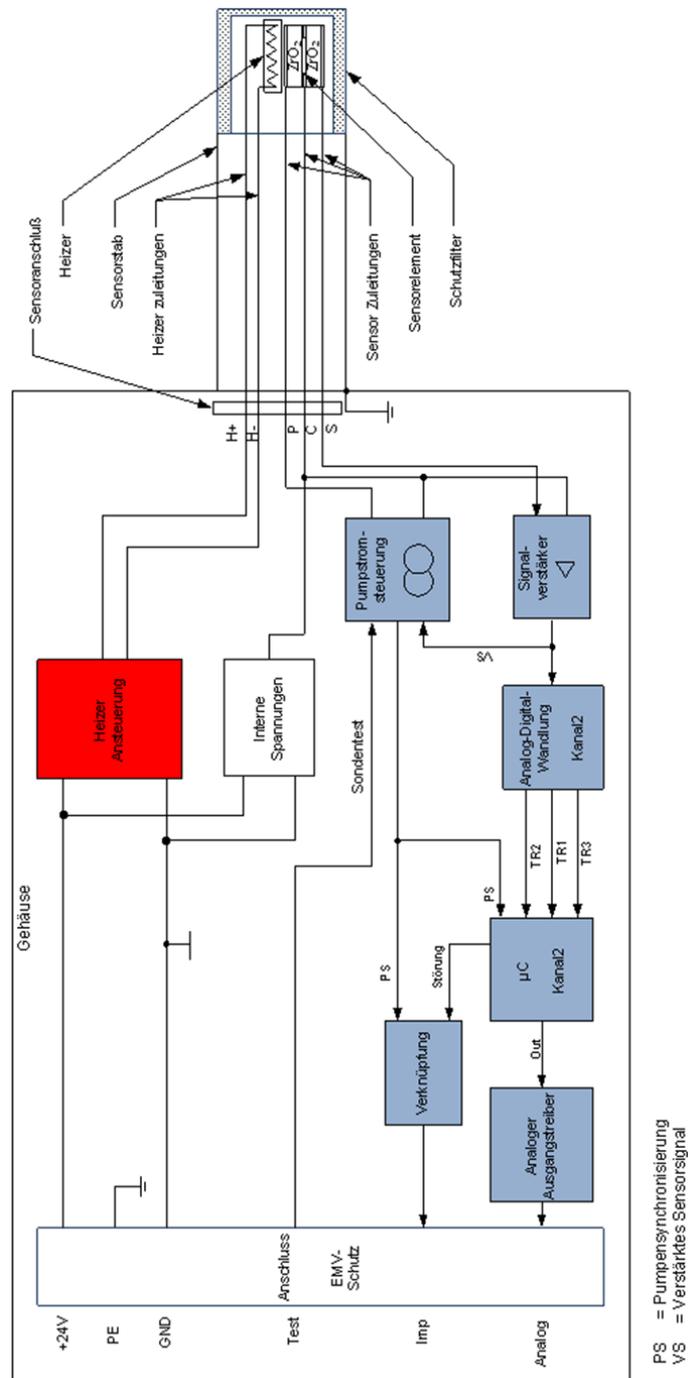


Abbildung 25.1 Blockschaubild der ZR-Sonden Auswertung

25.1 Heizungsansteuerung

Die Heizung wird mit einer konstanten Spannung betrieben. Um die geforderte Heizleistung von ca. 7,2 W effektiv zur Verfügung zu stellen wird ein DC/DC-Wandler verwendet, der die Versorgungsspannung auf gewünschte Heizspannung umsetzt. Um die Sonden bei ver-

schieden Temperaturen betreiben zu können ist die Heizspannung mittels eines Potentiometers einstellbar.

25.2 Signalauswertung

Das Messsignal wird über den Signalverstärker gefiltert und verstärkt. Dieses aufbereitete Signal wird als Feedback-Signal zur Pumpenansteuerung zurückgeführt und der AD-Wandlung zu geführt. Die Pumpenansteuerung bestimmt die Richtung des Konstantstromes, der der Pumpelektrode zu geführt wird. Die Richtung wird über 2 Komparatoren bestimmt und mittels eines Flip-Flop's gespeichert. Die Richtung wird auch als Synchronisationssignal dem Prozessor zu zugeführt. Die Höhe des Pumpsignals kann mittels eines Potentiometers eingestellt werden. Die Analog-Digital-Wandlung besteht aus 3 Komparatoren. Die Zeiten zwischen den Signalwechsel werden mittels eines Mikrocontrollers gemessen. Die Reihenfolge der Signale ist davon abhängig ob sich das System in einer Evakuierungs- oder Komprimierungsphase befindet. Dieses stellt der Prozessor über die Pumpensynchronisierung fest. Die Umrechnung der gemessenen Zeiten in die Konzentration führt ebenfalls der Controller durch. Dieser gibt das berechnete Signal an den D/A-Wandler weiter, der je nach Konfiguration ein Strom- oder Spannungssignal ausgibt.

25.3 Hilfsbeschaltung

Die Hilfsbeschaltung dient dazu das System EMV-Gerecht zu gestalten und die benötigten Referenzsignale in der geforderten Qualität zu erzeugen.

25.4 Unterschied zwischen O₂- und CO-Ausführung

Die Elektronik ist für beide Sonden identisch. Durch die eingebauten Potentiometer kann je nach Sonderelement und Anforderung die Arbeitstemperatur und der Pumpstrom variiert werden.

26 Erprobungsergebnisse

Der verwendete Sauerstoffsensor ist ein Produkt der Firma J. Dittrich Elektronik. Er wurde hergestellt und kalibriert zur Nutzung in diesem Projekt. Sein Signal ist in Abbildung 26.1 dargestellt.

Für die Messung des CO-Gehaltes im Abgas werden die Messgrößen Pumpzyklusdauer (O₂) und Pumpzyklusdauer (CO) in Sauerstoffkonzentrationen umgerechnet. Für den O₂-Sensor ist das der Sauerstoffgehalt und für den CO-Sensor allerdings der verbliebene Sauerstoff. Mit dem CO-Sensor kann bei bekanntem Sauerstoffgehalt der CO-Gehalt ermittelt werden. Allerdings existiert eine Querempfindlichkeit gegenüber H₂, das im Abgas der Feuerungsanlagen ebenfalls vorkommt. Im realen Brenner vorkommendes CO/H₂-Gemisch wird als effektiver CO oder CO-equivalent-Gehalt vom Sensor gemessen. Der Sensor wurde im Labor bei Umgebungsbedingungen bei verschiedenen Konzentrationen von O₂ und CO vermessen (siehe Abbildung 26.1 und Abbildung 26.2). Er hat stabile und reproduzierbare Messergeb-

nisse aufgewiesen. Das lineare Verhalten des Sensorausgangssignals mit CO-Konzentration wurde ebenfalls untersucht (siehe Abbildung 26.2). Die Sensoren wurden dem ISIS zur Untersuchung in Modellgasen übergeben (siehe hierzu Kap. 11.2).

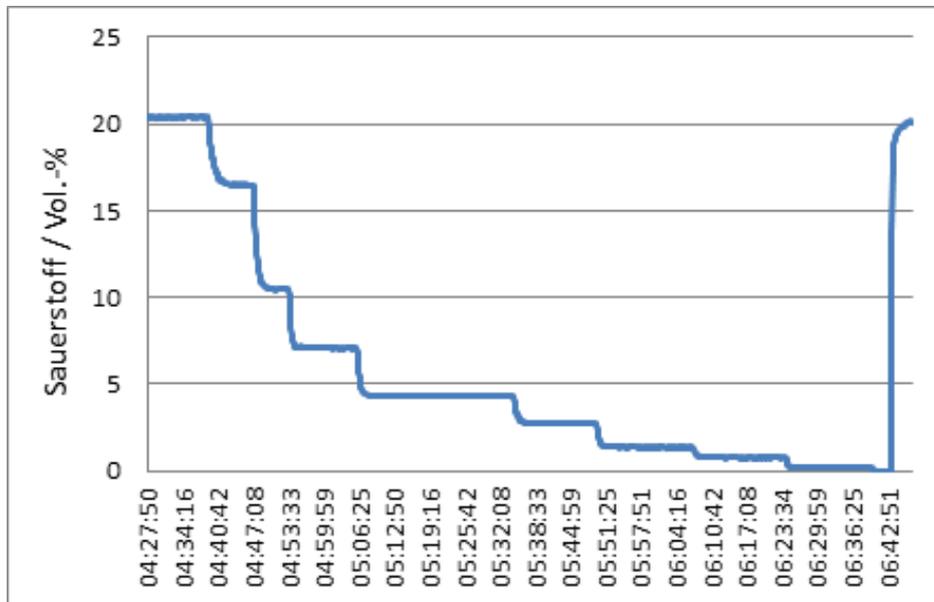


Abbildung 26.1 Ausgangssignal des kalibrierten Sauerstoffsensors

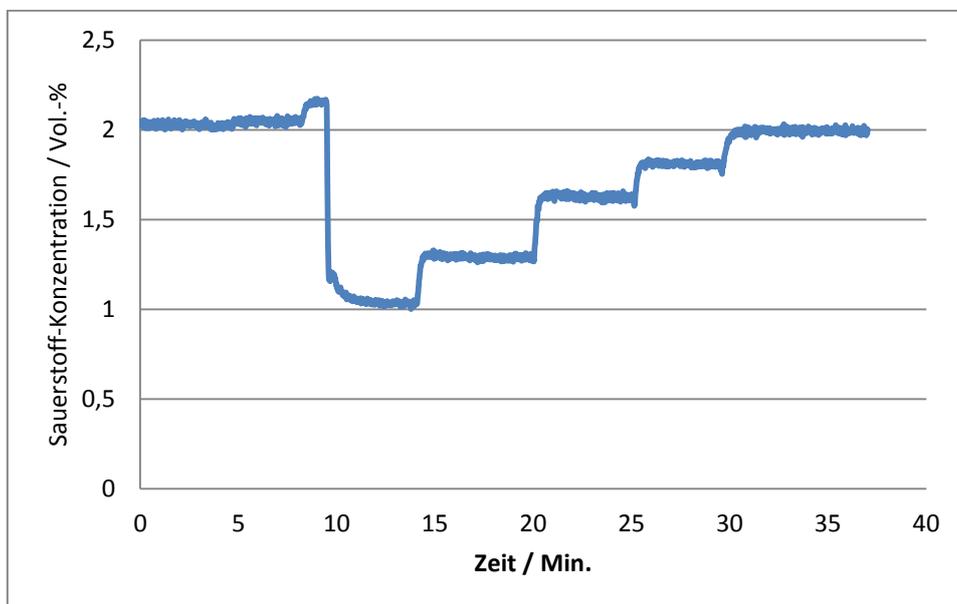


Abbildung 26.2 Ausgangssignal des CO-Sensors bei 2 Vol.-% Sauerstoff und verschiedenen CO-Konzentration (zwischen 0 und 300ppm)

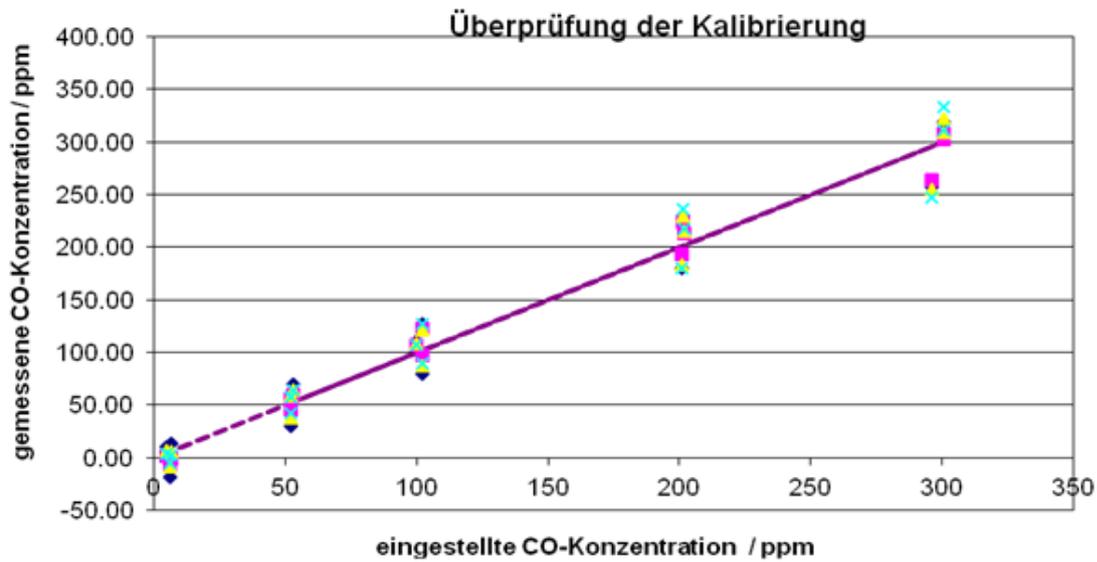


Abbildung 26.3 Überprüfung der Kalibrierung und der Reproduzierbarkeit des CO-Sensors. Mehrere Sensoren wurden vermessen.

27 Zusammenfassung DITTRICH

Ergebnis des Entwicklungsprojektes Holzverbrennung war ein optimiertes Sauerstoff- und Kohlenmonoxid-Sensorsystem. Der O₂-Sensor sowie der entwickelte CO-Sensor wurden im Labor vermessen. Sie haben stabiles und reproduzierbares Verhalten aufgewiesen.