

Endbericht des mit Mitteln
aus dem Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)
über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe geförderten

Vorhabens FKZ 220 189 03

Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh - Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen

von

Dr.-Ing. Michael Struschka , Dipl.-Ing. Joachim Kiess
Dipl.-Ing. Mariusz Zieba, Dipl.-Ing. Alexander Rieder
Dipl.-Ing. (BA) M. Sc. Winfried Juschka, Dipl.-Ing. Anja Schuster

Universität Stuttgart

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)
(Institutsleiter: Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht)

und

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

sowie

Dipl.-Ing. agr. Peter Turowski, Dipl.-Phys. Paul Roßmann
Dr. Hans Hartmann, Dipl.-Ing. (FH) Alexander Marks

Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

Mai 2008

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung des Vorhabens und Vorgehensweise	3
2.1 Projektpartner und Arbeitsteilung	4
3 Zusammenfassungen der verschiedenen Berichtsteile	6
Teil I: Feld- und Prüfstandsmessungen zur Anlagenoptimierung und Adaption eines externen Staubabscheiders	11
Teil II: Entwicklung und Bereitstellung von für Biomassefeuerungen einsetzbaren Abgassensoren.....	87
Teil III: Betriebserfahrungen mit einer verbesserten 40 kW Getreidefeuerung.....	133

1 Einleitung

Die energetische Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Rückstände und Nebenprodukte als CO₂-neutrale Brennstoffe können einen Beitrag zur Schonung fossiler Ressourcen, zum Klimaschutz und zur Verbesserung der wirtschaftlichen Ergebnisse der landwirtschaftlichen Betriebe leisten. Vor diesem Hintergrund wird seitens der Deutschen Landwirtschaft verstärkt gefordert, die rechtlichen Voraussetzungen zu schaffen, damit Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung für Getreide und Getreideverarbeitungsreststoffe, die in den Geltungsbereich der 1. BImSchV (z.B. bis zu einer Nennwärmeleistung von 100 kW) oder der TA-Luft fallen (z.B. im Leistungsbereich über 100 bis 1.000 kW), legal und problemlos betrieben werden können. Hierbei erscheinen die Leistungsbereiche von 50 bis ca. 90 kW und von etwa 200 bis 350 kW besonders interessant, da der kleinere Leistungsbereich in etwa den Wärmebedarf der Wohn- und Betriebsgebäude und der obere Leistungsbereich den Wärmebedarf (Grundlast) kleinerer Nahwärmenetze oder z.B. von Unterglasflächen abdeckt. In diesen Leistungsbereichen könnte eine thermische Nutzung dieser Biomassen durch die landwirtschaftlichen Betriebe selbst oder z.B. durch diesen angegliederte Betreiberfirmen erfolgen.

Neben einem möglichen gezielten Anbau von Getreide zur energetischen Nutzung, hier liegen bereits vielfach Schätzungen über zur Verfügung stehende Anbauflächen, zu erwartende Getreideerträge und Aufwand- und Ertragsrechnungen vor, fallen bereits jetzt durch den für die Ernährung durchgeführten Getreideanbau große Mengen Stroh, Minder- und Abfallgetreide (nicht für den Verzehr oder als Futtermittel geeignetes Getreide, z.B. aufgrund Pilzbefall oder Lagerschäden) sowie Getreideausputz (Getreidereststoffe aus der Auf- und Weiterverarbeitung des Getreides) an, die zum Teil stofflich aber auch energetisch genutzt werden könnten.

Aufgrund der besonderen Brennstoffnachteile von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh, wie z.B. hohe Aschegehalte, niedrige Ascheschmelzpunkte, hohe Chlor-, Kalium- und Stickstoffgehalte, geringe Schüttdichte und hoher Feinanteil von z.B. Stroh und einigen Fraktionen vom Getreideausputz, ergeben sich, wenn ein emissionsarmer und zuverlässiger Betrieb der Feuerungen gefordert wird, höhere technische und finanzielle Aufwendungen für diese Anlagen. Dies und das relativ geringe Marktpotential (Nischenmarkt) hemmen das Interesse und die Aktivitäten vieler im Bereich von Holzfeuerungen tätigen Hersteller. Dies erklärt, weshalb derzeit die Anlagentechnik für diese Biomassen von vielen noch als unausgereift und nicht praxistauglich angesehen wird.

Die vergleichsweise **niedrigen Ascheschmelzpunkte** dieser Biomassen führen zu Verschlackungen im Brennstoffbett und zu Verschmutzungen im Feuerraum- und im Wärmetauscherbereich. Dadurch ergeben sich unzureichende Betriebszeiten und ein erhöhter Reinigungsaufwand. Bisherige Erfahrungen zeigten, dass u.U. der Feuerraum und der Wärmetauscher des Kessels täglich gereinigt werden müssen.

Eine verstärkte Schlackebildung im Brennstoffbett kann zu Störungen im Verbrennungsablauf und damit zu erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung führen. Außerdem können Störungen beim automatischen Ascheaustrag auftreten, die letztlich zum Abschalten der Anlage führen.

Verschmutzungen der Wärmetauscherflächen behindern den Wärmeübergang vom Heizgas zum Heizwasser und führen zu erhöhten Abgastemperaturen. Hierdurch sinkt der thermische Wirkungsgrad der Feuerung.

Hohe **Partikelmissionen (Staubemissionen)** können sich bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen (z.B. bei Anfahren der Anlagen, im Teillastbetrieb, bei Störungen des Brennstoffbetts durch intensive Schlackebildung oder bei mangelhafter Einstellung der Verbrennungsluftmengen), aufgrund der hohen Alkalienkonzentrationen im Brennstoff und durch den Austrag von Feinanteilen des Brennstoffes ergeben.

Die, z.B. im Vergleich zu naturbelassenen Hölzern, hohen Stickstoffgehalte von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh im Bereich von 0,4 bis 2,3 Massen-% (bezogen auf die Trockenmasse), führen zu entsprechend höheren **NO_x-Emissionen**.

Aufgrund dieser unbefriedigenden Situation ist eine Weiterentwicklung der Feuerungstechnik notwendig. Hierzu soll mit diesem Projekt ein Beitrag geleistet werden. Um die Projektziele zu erreichen, soll zunächst der Stand der Technik am Beispiel von 2 installierten Anlagen untersucht werden. Hier liegen bisher keine ausreichenden Messungen vor.

Aufbauend auf den Messungen an den installierten Anlagen und auf Prüfstandsmessungen an einem bereits am Markt erhältlichen speziellen Heizkessel für Getreidebrennstoffe, soll dann eine Optimierung und Weiterentwicklung der Feuerungstechnik speziell für diese Brennstoffpalette durchgeführt werden. Wesentliche Ziele sind hierbei: Reduzierung des Wartungsaufwandes, Begrenzung der Partikelemissionen auf ~ 50 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) und Minderung der NO_x-Emissionen auf Werte < 500 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂).

Diese Ziele sollen mit definierten Brennstoffen erreicht werden, die Einhaltung soll im Rahmen eines Langzeittests und einer Abnahmemessung durch ein zugelassenes Prüfinstitut nachgewiesen werden.

Es ist zu erwarten, dass auch mit einer weiterentwickelten Anlagentechnik Staubgrenzwerte unterhalb von 50 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) mit Getreide, Getreidereststoffen und Stroh in der Praxis nur schwer einzuhalten sein werden. Deshalb soll in diesem Projekt auch ein externer Staubabscheider für diese Anwendung modifiziert werden. Hierzu wird eine vorhandene Technik, welche bereits an Hackschnitzelfeuerungen erfolgreich getestet wurde, intensiv untersucht und bis zur Praxistauglichkeit weiterentwickelt.

2 Zielsetzung des Vorhabens und Vorgehensweise

Wesentliches Ziel des Projekts war die Weiterentwicklung und Charakterisierung des Standes der Technik von Verbrennungsanlagen für Getreide, Getreidereststoffe und Stroh im Leistungsbereich kleiner 1 MW, um die Betriebs- und Genehmigungsfähigkeit solcher Anlagen zu erreichen und auch zu belegen. Hierzu gehört die sichere Einhaltung der Emissionsgrenzwerte (CO und Gesamtstaub) der 1. BImSchV bzw. der TA-Luft ebenso wie der Nachweis, dass die Feuerungsanlagen im Dauerbetrieb stabil und weitgehend störungsfrei zu betreiben sind. Im einzelnen wurden folgende Ziele verfolgt:

Problemanalyse an Praxisanlagen: An zwei bestehenden Praxisanlagen wurden in mehr-tägigen Messkampagnen folgende Informationen ermittelt:

- Mittelwerte ($\frac{1}{2}$ bzw. $\frac{1}{4}$ Stundenmittelwerte) der kontinuierlich erfassten Abgaskomponenten CO, NO_x, VOC, CO₂ und O₂ sowie Mittelwerte über die Probenahmezeiträume für Gesamtstaub und der Partikelgrößenverteilung sowie der HCl-Konzentrationen für unterschiedliche Brennstoffe
- Verlauf oder Mittelwerte von Betriebs- und Brennstoffparametern
- Charakterisierung der Verbrennungsrückstände.

Dauerbetrieb möglich: Die Genehmigungsfähigkeit von Anlagen beinhaltet auch Anforderungen an einen stabilen, sicheren und dauerhaften Betrieb. Die Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten im Projekt verfolgten hierzu folgende Ziele:

- ein mindestens zweiwöchiger Betrieb ohne manuelle Reinigung des Feuerraums, des Wärmetauschers und der Abgaswege soll möglich sein.
- eine Verschlackung der Primär- und Sekundärluftdüsen, des Brennstoffbettes und des Ascheaustrages muss wirksam und in allen regulären Betriebszuständen vermieden werden.

Diese Ziele sollen mit von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) für das Vorhaben zur Verfügung gestellten Brennstoffen erreicht werden. Die Einhaltung der Anforderungen werden im Rahmen eines Langzeittests und einer Abnahmemessung durch ein zugelassenes Prüfinstitut nachgewiesen.

NO_x-Emissionen reduziert: Aufgrund des hohen Brennstoffstickstoffgehalts ist eine signifikante NO_x-Minderung erforderlich. Dies ist eine besondere Herausforderung, die mit herkömmlichen Luftstufungssystemen nur schwer zu gewährleisten ist. Deshalb wurde zum einen der im Feldtest ermittelte Stand der Technik gezielt weiter optimiert und zum anderen wurde die Luftstufung zur NO_x-Minderung am Beispiel einer Kesselentwicklung eingesetzt. Ziel war hierbei, mit Getreidekörnern als Brennstoff eine NO_x-Konzentration von 500 mg/m³ (berechnet als NO₂ und bezogen auf 13 Vol% O₂) zu unterschreiten.

Partikel-Emissionen reduziert: Hohe Alkalien- und Aschegehalte im Getreide und in Getreidereinigungsresten führen nicht nur zu Verschmutzungsproblemen im Kessel sondern können auch erhebliche Staubemissionen verursachen. Mit einer weiterentwickelten Verbrennungstechnik können moderate Grenzwertverschärfungen für Staub ohne Sekun-

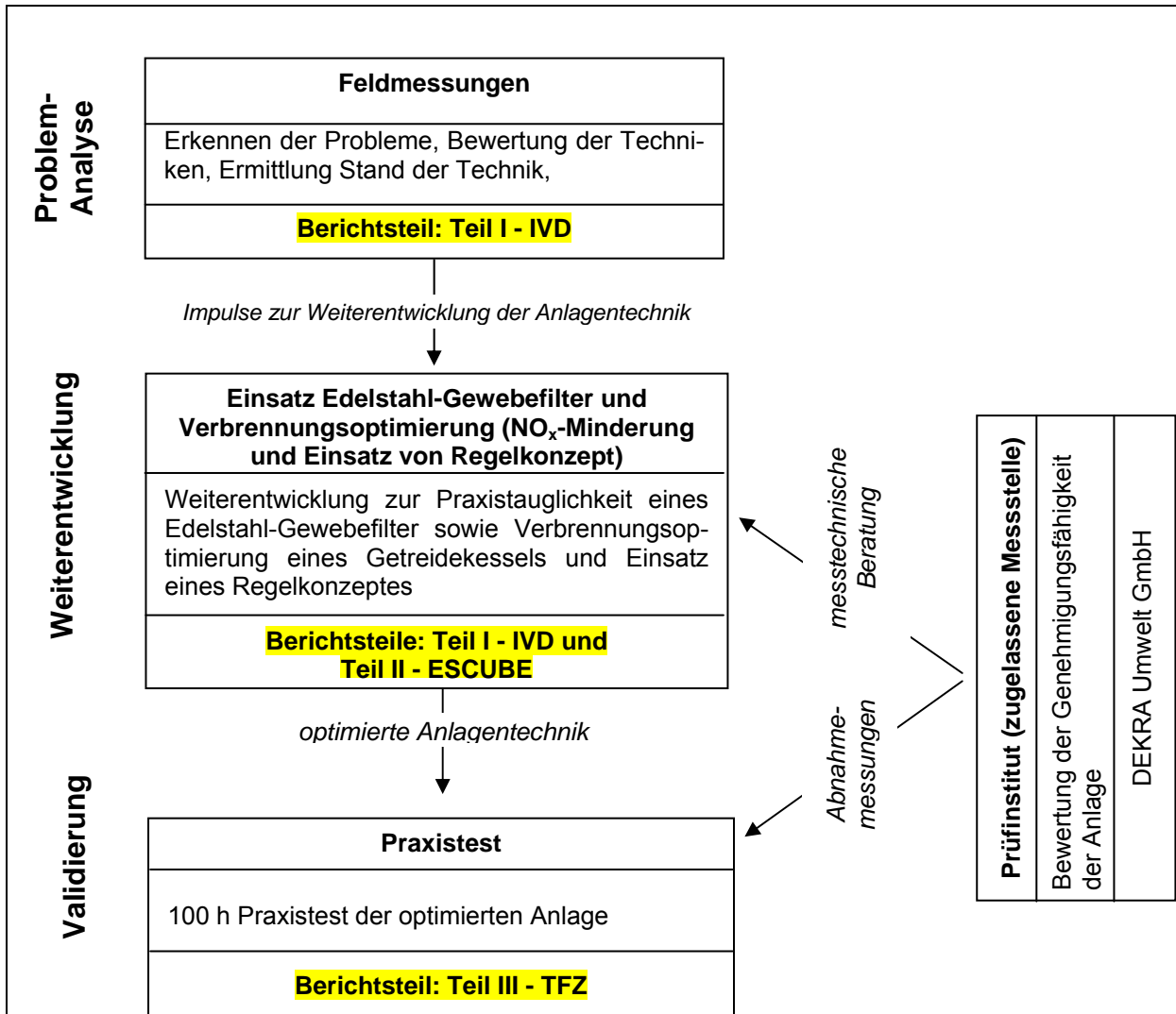
därmaßnahmen eingehalten werden. Bei schärferen Staubgrenzwerten ist der Einsatz von Staubabscheidern kaum noch vermeidbar. Deshalb wurde ein externer Staubabscheider (Edelstahl-Gewebefilter) an verschiedenen Feuerungsanlagen, die mit unterschiedlichen Getreidearten, Pellets aus Getreide und Resten der Getreidereinigung, Strohpellets und Getreideausputz betrieben wurden, installiert, eingehend untersucht und die Betriebsweise optimiert.

2.1 Projektpartner und Arbeitsteilung

Das Projekt wurde vom Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart koordiniert. Neben den drei Projektpartnern Technologie- und Förderzentrum (TFZ), ESCUBE und Oskar Winkel war der Technologielieferant Agroflam Feuerungstechnik und das Prüfinstitut DEKRA am Vorhaben beteiligt. Diese Institutionen und deren Aufgaben im Projekt sind im folgenden dargestellt:

Stellung im Projekt	Institution	Aufgabe
Forschungsnehmer und Koordinator	Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Universität Stuttgart	Problemanalyse und Weiterentwicklung der Verbrennungstechnik und Staubabscheidung
Projektpartner	Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Straubing	Validierung der weiterentwickelten Verbrennungstechnik und Bewertung der Wirtschaftlichkeit
	ESCUBE GmbH & Co. KG, Stuttgart	Weiterentwicklung und Adaption Sensortechnik an Getreidefeuerungen
	Oskar Winkel, Amberg	Weiterentwicklung und Modifikation eines Edelstahl-Gewebefilter zur Staubabscheidung
Technologielieferant	Agroflam Feuerungstechnik GmbH, Overath-	Bereitstellung des neu auf dem Markt befindlichen Heizkessels Agro 40
Prüfinstitut (zugelassene Messstelle)	DEKRA Umwelt GmbH, Stuttgart	messtechnische Beratung, Abnahmemessungen und Bewertung der Genehmigungsfähigkeit

Das folgende Diagramm gibt eine Übersicht über die Projekt- und Berichtsstruktur und den Ablauf des Vorhabens:



Die Teilberichte wurden von den Projektpartnern jeweils eigenverantwortlich verfasst.

3 Zusammenfassungen der verschiedenen Berichtsteile

Teil I:

Zur Weiterentwicklung der Feuerungsanlagentechnik wurde mit diesem Projekt ein Beitrag geleistet. So wurde ein neuer, speziell für Getreidebrennstoffe konstruierter Heizkessel (Agro 40 des Herstellers Agroflamm, Overath) soweit weiterentwickelt, dass unter Prüfstandbedingungen mit Getreide- und Stroh brennstoffen bei richtiger Kesseleinstellung die Partikelemissionen $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ und die NO_x -Emissionen $\leq 500 \text{ mg/m}^3$ (jeweils bezogen auf 13 Vol% O_2) betragen. Durch den Einsatz einer Drehzahlregelung für das Abgasgebläse in Verbindung mit einem CO/HC-Sensor (Typ CarboSen der Firma ESCUBE) konnte ein stabiler Dauerbetrieb mit hohem feuerungstechnischen Wirkungsgrad bei geringen CO- und VOC-Konzentrationen im Abgas realisiert werden.

Darüber hinaus wurde ein externer Staubabscheider (Edelstahl-Gewebefilter der Firma Oskar Winkel, Amberg) für die Anwendung bei Getreide- und Strohfeuerungen erfolgreich modifiziert. Im Reingas nach dem Staubfilter wurden bei allen Brennstoffen und allen Betriebsbedingungen durchgängig **Staubkonzentrationen unter 10 mg/m^3** (bei 13 Vol% O_2) gemessen. Stäube aus der Verbrennung von Getreideausputz, Strohpellets und Hafer ließen sich von der Filteroberfläche problemlos abreinigen. Hier war ein zuverlässiger Dauerbetrieb des Gewebefilters bei konstantem Druckverlustbereich möglich. Die Verbrennungstäube anderer Getreidearten, wie Gerste oder Weizen, können nur dann zuverlässig vom Gewebefilter abgereinigt werden, wenn den Brennstoffen Branntkalk zugegeben wird. Durch eine elektrische Zusatzheizung in den Filterpatronen konnte eine Korrosion auf dem Edelstahl- und Stützgewebe zuverlässig verhindert werden.

Teil II:

Zunächst wurde der „Stand der Technik“ für die Tauchsonde CarboSen zum Zeitpunkt des Projektstarts beschrieben und ein erster Prototyp einer mittels Sinterfilter geschützten Tauchsonde, die für Temperaturen von bis zu $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ertüchtigt wurde, wurde vorgestellt. Anschließend wurde Die Agroflamm-40 Anlage analysiert und mögliche Mess- und Einbaupositionen für die CarboSen-Sonde definiert und nach der Untersuchung der Randbedingungen an den Messstellen wurden zwei geeignete Positionen bestimmt; eine Erste zwischen Wärmetauscher und Ausbrandglocke, die Zweite im Kaminzug. Für die hohen Temperaturen und die lange Eintauchtiefe an der ersten Messstelle sowie für die teilweise kondensierenden Bedingungen an der zweiten Messstelle wurden unterschiedliche Tauchsonden konzipiert und aufgebaut. Anhand der Messdaten am Agroflamm-40 und der zu erwartenden CO-Konzentrationen fiel die Sensorauswahl auf den sensitiveren CarboSen1.000.

Ausgehend vom Stand der Technik wurden zwei prototypische Tauchsonden mit Sinterkappen zum Schutz des Sensors vor Schmutz und Partikeln entwickelt. Der fortgeschrittene Prototyp mit abnehmbarer Frontkappe wurde für die Feldmessungen eingesetzt.

Die Frontkappe mit integriertem Sinterfilter (Porengröße 200 μ m) hat einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Sensitivität des Sensors. Vermutet wird eine Adsorption und katalytische Abreaktion von oxidierbaren Gasen an den Wänden beim Durchtritt des Messgases durch den Sinterfilter. Die Sensitivität des Sensors hinter dem Sinterfilter ist jedoch noch groß genug und auf dessen Schutz vor Partikeln, Spritzwasser etc. konnte bei den Tests nicht verzichtet werden. Am Ende des Projekts stand eine neue Sonde mit Spritzschutzsieb zur Verfügung, die jedoch nicht mehr vermessen werden konnte. Ein vergleichbarere Sensitivitätsverlust des Sensors durch das dünne Sieb wird nicht mehr erwartet.

Bei den Laborvermessungen wurde nachgewiesen, dass der Sensor auf CO aber auch auf andere Kohlenwasserstoffe und vor allem auf H₂ sehr sensibel reagiert. Im Abgas liefert der Sensor ein Summensignal aller oxidierbaren Gase CO_e. Dies ist ein Vorteil, denn alle diese unverbrannten Gase entstehen bei einer unvollständigen Verbrennung und sämtliche Bestandteile die der Sensor sieht können zur Erkennung einer schlechten Verbrennung herangezogen werden.

Eine leichte O₂-Querempfindlichkeit konnte festgestellt werden, die jedoch im nominellen Betriebsbereich der Feuerungsanlage nicht kompensiert werden muss. Mit sinkendem O₂-Gehalt wird der Sensor sensitiver gegenüber brennbaren Gasen, was in unserem Fall den Vorteil einer früheren Erkennung der Emissionskante mit sich bringt.

Die Abhängigkeit der Sensorcharakteristik von der Sensorbetriebstemperatur wurde untersucht. Die höchste Sensitivität hat der Sensor bei einer Betriebstemperatur von 580°C. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Messungen untereinander zu ermöglichen wurden sämtliche Laborcharakterisierungen bei dieser Temperatur durchgeführt. Die Sensorbetriebstemperatur für die Feldtests wurde jedoch auf 630°C festgelegt. Dort ist der Sensor zwar etwas weniger sensitiv, zeigte aber eine größere Robustheit und schnellere Signaldynamik, die für die schnelle Optimierung der dynamischen Verbrennungsvorgänge vorteilhaft ist.

Als wesentliches Ergebnis bei den Untersuchungen mit unterschiedlichen Getreidebrennstoffen konnte festgestellt werden, dass beide Sonden an beiden Messpositionen funktionieren. Eine Zuordnung zwischen den Sensorsignalen U_{Sen} in mV und den mittels Abgasanalysator gewonnenen Parallelmessungen CO in ppm ist nach einer Zeitkorrektur eindeutig möglich, denn die in-situ Tauchsonde spricht 25s vor der ex-situ Parallelmessung an. Der Zeitverzug zwischen den unterschiedlichen Messpositionen ist vernachlässigbar und eine schnelle Regelung der Anlage durch eine Sonde am Kaminzug ist möglich. Dort herrschen maximal 180°C. Dies ermöglicht den Aufbau und den Einsatz einer kurzen Tauchsonde, die auch für die Serie kostengünstig realisiert werden kann.

Der Verbrennungsprozess ist bei gleicher Brennstoffgüte reproduzierbar und damit die Voraussetzung für eine Optimierung der Verbrennungsanlage gegeben. Unterschiedliche Brennstoffe / Brennstoffgüte bewirken jedoch unterschiedliche Schadstoff (CO_e) - Niveaus. Eine Kalibrierung und damit Messung der CO_e mittels Tauchsonde ist daher nicht einfach möglich. Eine Einstellung der Anlage aufgrund absoluter Sensorsignale erscheint nicht zielführend. Erste Ideen für eine Verbrennungsoptimierung anhand relativer Sensorsignale bzw. anhand der auftretenden Sensordynamik wurden vorgestellt. Dies macht vorteilhafterweise eine alters- und drifttolerante Optimierungsstrategie möglich, wie sie seit Jahren in der indus-

triellen Verbrennungstechnik erfolgreich eingesetzt und für öl- und gasbetriebene Feuerungsanlagen kleiner Leistung bereits demonstriert werden konnte. Strategie, sowie die erforderliche Hard- und Software wurden dem IVD zur Verfügung gestellt.

Die Funktionalität, Effektivität und Zuverlässigkeit der Regelstrategie konnte im Rahmen des Projekts nachgewiesen werden. Der Luftüberschuss der Anlage konnte von durchschnittlich 9% im ungeregelten Fall auf bis zu 4% O₂, bei gleichzeitig minimierten CO- und NO_x-Emissionen, reduziert werden.

Ein Einfluss hoher NO_x-Konzentrationen von bis zu ca. 900 mg/m³ auf das Sensorsignal konnte nicht festgestellt werden, d.h. NO_x-Schwankungen stören den Sensor und die realisierte Optimierungsstrategie nicht.

Ein Lebensdauernachweis für die dem aggressiven Abgas ausgesetzte Sonde konnte im Rahmen des Projekts aufgrund niedriger Betriebsstundenzahlen nicht abschließend erbracht werden. Die Ursprünglich ausgelieferte Tauchsonde funktionierte jedoch nach Projektende nach wie vor. Dies zeigte der Vergleich der Sensorkennlinien nach der Erstcharakterisierung mit den Labormessungen nach 8, 12 und 24 Monaten Projektlaufzeit.

Eine Drift der Sensorsignale konnte ebenfalls nicht eindeutig festgestellt werden. Wenn überhaupt, so zeigt sich eher eine Sensitivitätszunahme des CarboSen-Sensors über die Projektlaufzeit. D.h. der Sensor reagiert früher und sensibler auf CO_e. Für die realisierte Optimierungsstrategie bedeutet dies, dass eine schlechte Verbrennung früher erkannt und die Anlage schneller an den optimalen Betriebspunkt herangeführt werden kann; also auch aus sicherheitsrelevanten Aspekten ein Vorteil.

Zur Steigerung der Betriebssicherheit der Anlage können neben der Sensorsignalspannung auch andere Sensorgrößen wie z.B. dessen Heizleistungsaufnahme herangezogen werden. Eine Heizleistungsabnahme von 3 W auf 2,6 W lässt beispielsweise eine erfolgreiche Zündung der Agroflam-40 Anlage erkennen. Eine weitere Reduktion der Heizleistungsaufnahme um 0,4 W lässt z.B. auf den Anstieg der Abgastemperatur im Kamin von nominellen 140°C auf 220°C schließen. Diese Temperaturerhöhung resultierte aus der zunehmenden Verschmutzung der Wärmetauscherwände. Damit kann eine bedarfsgerechte Reinigung/Wartung durchgeführt werden.

Durch die kontinuierliche CO_e-Überwachung mittels CarboSen-Sensor insbesondere durch die Betrachtung der Sensorsignaldynamik kann eine defekte Anlage sofort erkannt und Gegenmaßnahmen frühzeitig eingeleitet werden.

Insgesamt wird durch den Einsatz des CarboSen-Sensors in Verbindung mit der CO_e-Emissionskantenoptimierung die Effizienz, die Zuverlässigkeit und die Betriebssicherheit der Anlage gesteigert - im Sinne für den Menschen und für eine saubere Umwelt.

Teil III:

Verglichen mit Holzbrennstoffen stellt die thermische Nutzung von Getreidekörnern bzw. getreidebürtigen Brennstoffen technologisch eine große Herausforderung dar, da die heutigen aber vor allem auch die zukünftig erwarteten Grenzwerte für Schadstoffemissionen wegen der besonderen Nachteile dieser Brennstoffe (hohe Aschegehalte, niedrige Ascheschmelzpunkte, hohe Chlor-, Kalium- und Stickstoffgehalte, teilweise geringe Schüttdichte und hoher Feinanteil) nur schwer zu unterschreiten sind und zudem ein erhöhtes Korrosionsrisiko besteht. Verschiedene Hersteller – unter ihnen die Firma Agroflam – haben sich dennoch dieser Herausforderung gestellt. Eine entsprechende Feuerungsanlage (Agroflam-40 mit 40 kW Nennwärmeleistung) wurde für die Versuche bereitgestellt, nachdem sie zuvor am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart hinsichtlich Regelungstechnik und Luftführung optimiert worden war.

Für die Feuerung wurde am TFZ ein Langzeit-Prüfstand mit geregelter Leistungs- und Abgasmessung aufgebaut. Die Anlage wurde in verschiedenen Vor- und Hauptversuchen über vier verschiedene ununterbrochene Zeiträume mit einer Dauer von jeweils zwischen 12 bis 173 Stunden mit dem Brennstoff Wintergerste betrieben. Dabei wurden die Abgasparameter sowie weitere für die Beurteilung interessante Beobachtungen erfasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass die NO_x -Emission zu den konstantesten Messgrößen unter den gemessenen Abgasparametern zählen. Beim NO_x lag der Gesamtmittelwert – bezogen auf 13 % O_2 – in den beiden längsten Versuchen relativ gleich bleibend bei 531 mg/Nm^3 bzw. 579 mg/Nm^3 , wobei der Variationskoeffizient mit 11 bzw. 8 % vergleichsweise niedrig war.

Bei den Emissionen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen (angegeben als Ges.-C) wurden kaum messbar niedrige Werte festgestellt. Dadurch wird die hohe Ausbrandqualität bestätigt, die auch durch die niedrigen mittleren Kohlenmonoxid(CO)-Emissionen in Höhe von 28 bzw. 25 mg/Nm^3 in den beiden längsten Versuchen angezeigt wird. Für die beiden Parameter SO_2 und HCl wurden Mittelwerte von 257 mg/Nm^3 bzw. 66 mg/Nm^3 gemessen. Somit kommt es bei diesen Messgrößen zu einer bemerkenswerten Übereinstimmung zu den HCl- und SO_2 -Emissionen, die auch in anderen Messungen an einer getreidetauglichen Feuerungen (30 kW Vorschubrostfeuerungen) mit Wintergerste als Brennstoff festgestellt wurden. Die HCl- und SO_2 -Emissionen werden hauptsächlich durch den Gehalt der entsprechenden Elementgehalte beeinflusst.

Besonders hervorzuheben ist aber der relativ geringe Wert für die Staubemission, der in den beiden längsten Versuchen einen relativ einheitlichen Mittelwert von 50 bzw. 51 mg/Nm^3 ergab (Spannweite von 38 bis 64 mg/Nm^3). Im Vergleich zu anderen Feuerungsanlagen, welche laut Hersteller ebenfalls eine Eignung für Nicht-Holzbrennstoffe wie Getreide aufweisen, fällt die gemessene Staubemission besonders günstig aus. Mit anderen Feuerungen werden in der Regel kaum einmal Staubemissionen im Rohabgas von weniger als 100 mg/Nm^3 erzielt, sie liegen statt dessen in den meisten Fällen bei Werten zwischen 100 und 200 mg/Nm^3 , wobei allerdings auch hier mit dem Einsatz von sekundären Staubabscheidern günstige Staubemissionswerte erzielt werden können.

Aufgrund der hier durchgeführten Messungen kann davon ausgegangen werden, dass die untersuchte Agroflamm-40-Feuerung mit Getreidebrennstoff den derzeitigen Staubemissionsgrenzwert von $0,15 \text{ g/Nm}^3$ auch im Praxiseinsatz relativ problemlos unterschreitet. Auch bei einer zukünftigen Absenkung des Grenzwertes auf ein Niveau von $0,10 \text{ g/Nm}^3$ – gemäß dem aktuellen Vorschlag für die Novellierung der 1.BImSchV – könnte der Grenzwert noch ohne sekundäre Staubminderungsmaßnahmen wie z. B. Metallgewebefilter oder elektrostatische Abscheider eingehalten werden, zumal auch über die Dauer des durchgeführten Langzeitversuches von über 170 Stunden kein signifikanter Anstieg der Staubemissionen beobachtet wurde.

Allerdings kommt es bei einer längeren Betriebsdauer von 7 bis 14 Tagen – je nach Brennstoffdurchsatz – zu Staubablagerungen in der Feuerung und im Wärmetauscher, durch die die Abgastemperatur um mehr als 20 % ansteigt. Bei derartigen Temperaturänderungen ist üblicherweise eine manuelle Reinigung des Kessels bzw. des Wärmetauschers empfehlenswert, um unnötige Wirkungsgradverluste zu vermeiden. Im Vergleich zu Holzbrennstoffen handelt es sich somit um ein sehr kurzes Wartungsintervall, dessen Einhaltung in der Praxis kaum gefordert bzw. durchgesetzt werden kann. Neben den Staubablagerungen wurden Korrosionserscheinungen an den metallischen Bauteilen der Feuerung beobachtet, durch die die Lebensdauer der Anlage beeinträchtigt werden kann.

Teilbericht I:

Feld- und Prüfstandsmessungen zur Anlagenoptimierung und Adaption eines externen Staubabscheiders

Die Bearbeitung von Teil I erfolgte durch:



Universität Stuttgart

Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD)
der Universität Stuttgart
(Institutsdirektor: Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht)

Dr.-Ing. Michael Struschka
Dipl.-Ing. Joachim Kiess
Dipl.-Ing. Mariusz Zieba
Dipl.-Ing. Alexander Rieder
Dipl.-Ing. (BA) M. Sc. Winfried Juschka
Dipl.-Ing. Anja Schuster

IVD, Pfaffenwaldring 23, D-70569 Stuttgart
Tel. 0711-685-63487, Fax 0711-685-63491
Internet: <http://www.ivd.uni-stuttgart.de>

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1 Einleitung	15
2 Überblick über Technik und Brennstoffe	17
3 Rechtliche Rahmenbedingungen	23
4 Messungen an installierten Anlagen	26
4.1 Eingesetzte Messtechnik	26
4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung	28
4.3 Feldmessungen am Heizkessel Agroflamm Agro 40.....	28
4.4 Feldmessungen am Heizkessel Passat Compact C8.....	35
5 Einsatz von Edelstahlgewebefiltern zur Abgasreinigung	44
5.1 Untersuchungen am Heizkessel Passat Compact C8.....	44
5.2 Untersuchungen am Heizkessel Ökotherm Compact C0	49
6 Prüfstandsmessungen am Heizkessel Agro 40	60
6.1 Bei den Prüfstandsmessungen eingesetzte Messtechnik	60
6.2 Betriebserfahrungen	63
6.3 Eingesetzte Brennstoffe.....	63
6.4 Ergebnisse der Abgasmessungen.....	65
6.5 Ergebnisse der Profilmessungen.....	68
6.6 Schlussfolgerungen	72
7 Optimierungsmaßnahmen am Heizkessel Agro 40	73
7.1 Realisierung einer Luftstufung	73
7.2 Regelungskonzept für Langzeitversuche	77
8 Zusammenfassung	83
9 Literatur	85

1 Einleitung

Die energetische Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Rückstände und Nebenprodukte als CO₂-neutrale Brennstoffe können einen Beitrag zur Schonung fossiler Ressourcen, zum Klimaschutz und zur Verbesserung der wirtschaftlichen Ergebnisse der landwirtschaftlichen Betriebe leisten. Vor diesem Hintergrund wird seitens der Deutschen Landwirtschaft verstärkt gefordert, die rechtlichen Voraussetzungen zu schaffen, damit Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung für Getreide und Getreideverarbeitungsreststoffe, die in den Geltungsbereich der 1. BImSchV (z.B. bis zu einer Nennwärmeleistung von 100 kW) oder der TA-Luft fallen (z.B. im Leistungsbereich über 100 bis 1.000 kW), legal und problemlos betrieben werden können. Hierbei erscheinen die Leistungsbereiche von 50 bis ca. 90 kW und von etwa 200 bis 350 kW besonders interessant, da der kleinere Leistungsbereich in etwa den Wärmebedarf der Wohn- und Betriebsgebäude und der obere Leistungsbereich den Wärmebedarf (Grundlast) kleinerer Nahwärmenetze oder z.B. von Unterglasflächen abdeckt. In diesen Leistungsbereichen könnte eine thermische Nutzung dieser Biomassen durch die landwirtschaftlichen Betriebe selbst oder z.B. durch diesen angegliederte Betreiberfirmen erfolgen.

Eine Mitverbrennung der hier betrachteten Biomassen in größeren Feuerungsanlagen (z.B. Kohlekraftwerke) wäre technisch zwar prinzipiell möglich, würde aber die Einkommenssituation der landwirtschaftlichen Betriebe nicht oder nur bei besonders positiven Randbedingungen verbessern.

Neben einem möglichen gezielten Anbau von Getreide zur energetischen Nutzung, hier liegen bereits vielfach Schätzungen über zur Verfügung stehende Anbauflächen, zu erwartende Getreideerträge und Aufwand- und Ertragsrechnungen vor, fallen bereits jetzt durch den für die Ernährung durchgeführten Getreideanbau große Mengen Stroh, Minder- und Abfallgetreide (nicht für den Verzehr oder als Futtermittel geeignetes Getreide, z.B. aufgrund Pilzbefall oder Lagerschäden) sowie Getreideausputz (Getreidereststoffe aus der Auf- und Weiterverarbeitung des Getreides) an, die zum Teil stofflich aber auch energetisch genutzt werden könnten.

Aufgrund der besonderen Brennstoffnachteile von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh, wie z.B. hohe Aschegehalte, niedrige Ascheschmelzpunkte, hohe Chlor-, Kalium- und Stickstoffgehalte, geringe Schüttdichte und hoher Feinanteil von z.B. Stroh und einigen Fraktionen vom Getreideausputz, ergeben sich, wenn ein emissionsarmer und zuverlässiger Betrieb der Feuerungen gefordert wird, höhere technische und finanzielle Aufwendungen für diese Anlagen. Dies und das relativ geringe Marktpotential (Nischenmarkt) hemmen das Interesse und die Aktivitäten vieler im Bereich von Holzfeuerungen tätigen Hersteller. Dies erklärt, weshalb derzeit die Anlagentechnik für diese Biomassen von vielen noch als unausgereift und nicht praxistauglich angesehen wird.

Die vergleichsweise **niedrigen Ascheschmelzpunkte** dieser Biomassen führen zu Verschlackungen im Brennstoffbett und zu Verschmutzungen im Feuerraum- und im Wärmetauscherbereich. Dadurch ergeben sich unzureichende Betriebszeiten und ein erhöhter Reinigungsaufwand. Bisherige Erfahrungen zeigten, dass u.U. der Feuerraum und der Wärmetauscher des Kessels täglich gereinigt werden müssen.

Eine verstärkte Schlackebildung im Brennstoffbett kann zu Störungen im Verbrennungsablauf und damit zu erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung führen. Außerdem können Störungen beim automatischen Ascheaustrag auftreten, die letztlich zum Abschalten der Anlage führen.

Verschmutzungen der Wärmetauscherflächen behindern den Wärmeübergang vom Heizgas zum Heizwasser und führen zu erhöhten Abgastemperaturen. Hierdurch sinkt der thermische Wirkungsgrad der Feuerung.

Hohe **Partikelemissionen (Staubemissionen)** können sich bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen (z.B. bei Anfahren der Anlagen, im Teillastbetrieb, bei Störungen des Brennstoffbetts durch intensive Schlackebildung oder bei mangelhafter Einstellung der Verbrennungsluftmengen), aufgrund der hohen Alkalienkonzentrationen im Brennstoff und durch den Austrag von Feinanteilen des Brennstoffes ergeben.

Die, z.B. im Vergleich zu naturbelassenen Hölzern, hohen Stickstoffgehalte von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh im Bereich von 0,4 bis 2,3 Massen-% (bezogen auf die Trockenmasse), führen zu entsprechend höheren **NO_x-Emissionen**.

Aufgrund dieser unbefriedigenden Situation ist eine Weiterentwicklung der Feuerungstechnik notwendig. Hierzu soll mit diesem Projekt ein Beitrag geleistet werden. Um die Projektziele zu erreichen, soll zunächst der Stand der Technik am Beispiel von 2 installierten Anlagen untersucht werden. Hier liegen bisher keine ausreichenden Messungen vor.

Aufbauend auf den Messungen an den installierten Anlagen und auf Prüfstandsmessungen an einem bereits am Markt erhältlichen Heizkessel, soll dann eine Optimierung und Weiterentwicklung der Feuerungstechnik speziell für diese Brennstoffpalette durchgeführt werden. Wesentliche Ziele sind hierbei: Reduzierung des Wartungsaufwandes, Begrenzung der Partikelemissionen auf ~ 50 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) und Minderung der NO_x-Emissionen auf Werte < 500 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂).

Diese Ziele sollen mit definierten Brennstoffen erreicht werden, die Einhaltung soll im Rahmen eines Langzeittests und einer Abnahmemessung durch ein zugelassenes Prüfinstitut nachgewiesen werden.

Es ist zu erwarten, dass auch mit einer weiterentwickelten Anlagentechnik Staubgrenzwerte unterhalb von 50 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) mit Getreide, Getreidereststoffen und Stroh in der Praxis nur schwer einzuhalten sein werden. Deshalb soll in diesem Projekt auch ein externer Staubabscheider für diese Anwendung weiterentwickelt werden. Hierzu wird eine vorhandene Technik, welche bereits an Hackschnitzelfeuerungen erfolgreich getestet wurde, intensiv untersucht und bis zur Praxistauglichkeit weiterentwickelt.

2 Überblick über Technik und Brennstoffe

Um eine akzeptable Betriebssicherheit und möglichst niedrige Emissionen (Staub, Produkte unvollständiger Verbrennung und NO_x) der Getreide- und Strohfeuerungen sicher zu stellen, muss eine Anpassung der Feuerungen an diese speziellen Brennstoffe vorgenommen werden. So sind vor allem Maßnahmen zur Minderung der Schlackebildung notwendig, um einen ungestörten Entgasungs- und Verbrennungsprozess zu ermöglichen, sowie eine sichere und weitgehend wartungsfreie Entaschung zu erreichen. Bisher wurden hierzu folgende Verfahren eingesetzt:

- reduzierte Temperaturen im Bereich des Brennstoffbettes durch spezielle Luftführung oder Kühlung durch z.B. gekühlte Roste
- Bewegung des Brennstoffes während der Entgasung durch Röhreinrichtungen oder verstärkte Rostbewegung
- Umsetzung eines zweistufigen Prozesses, d.h. Brennstoffentgasung und Verbrennung des Restkohlenstoffes wird räumlich getrennt
- Zugabe von Additiven zum Brennstoff – z.B. Kalk.

Die einzelnen Verfahren können auch kombiniert werden und sind, je nach Detailausführung und aktuellem Betriebszustand der Feuerung, mehr oder weniger wirksam. Es können sich allerdings auch neue Betriebsprobleme ergeben. So kann eine Reduzierung der Temperaturen im Bereich des Brennstoffbettes zu einer Verschlechterung der Verbrennungsqualität oder des Ausbrandes in manchen Betriebspunkten führen, da die Temperatur für eine vollständige Oxidation der Entgasungsprodukte oberhalb des Brennstoffbettes nicht mehr ausreicht. Bei schlechtem Brennstoffausbrand können noch hohe bis sehr hohe Kohlenstoffkonzentrationen in der Rostasche vorhanden sein. Außerdem können, in Verbindung mit einer starken Bewegung des Brennstoffbettes, die Emissionen bei Kesselstart über einen längeren Zeitraum deutlich erhöht sein. Die Zugabe von Kalk erhöht in jedem Fall den Ascheanfall.

Aufgrund der zeitweise gestiegenen Nachfrage nach Getreidekesseln werden inzwischen von einigen Herstellern entsprechende Feuerungsanlagen angeboten, die z.T. gezielt für diese schwierigen Brennstoffe entwickelt oder zumindest modifiziert wurden. Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, sind in **Tabelle 2.1** die Daten und Hersteller einiger Kessel aufgelistet. Aufgrund der im letzten Jahr stark gestiegenen Getreidepreise, des seit Jahren laufenden Novellierungsverfahrens zur 1. BImSchV und der vielfältigen technischen Probleme bei der Entwicklung dieser speziellen Feuerungsanlagen hat das Interesse potentieller Betreiber und auch der Hersteller an der Weiterentwicklung der Anlagen inzwischen deutlich nachgelassen.

Im **Bild 2.1** sind drei Beispiele für derzeit am Markt erhältliche Getreidekessel gezeigt.

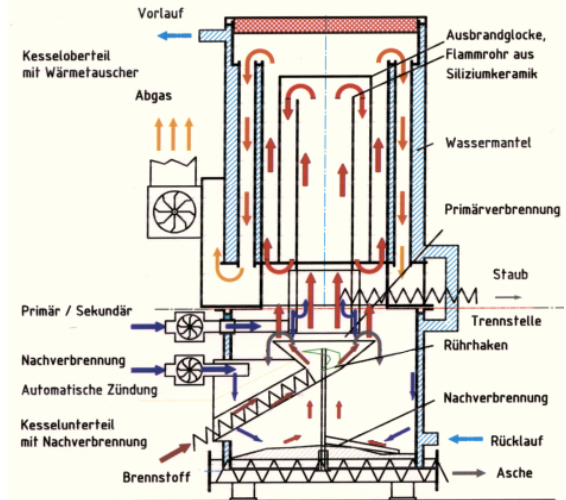
Tabelle 2.1: Übersicht von verfügbaren Feuerungsanlagen für Getreidebrennstoffe

Hersteller und Kesseltyp bzw. Baureihe	NWL in kW	Bauart der Feuerung			
		Unter-schub	Stufen-rost	Querein-schub	Sons-tige
Agroflamm Feuerungstechnik GmbH, 51491 Overath Agro 40	40	X			
Föbi Zentralheizungsherde GmbH, 83673 Bichl Multi-Heat 1.5 / 2.5 / 4.0	15, 25, 40			X	
FERRO Wärmetechnik GmbH, 91126 Schwabach FERRO BIOMAT	15 - 1.000		X		
Gerlinger Biokompakt Heiztechnik, A-4391 Waldhausen Biokompakt	30			X	
Guntamatic Heiztechnik GmbH, A-4722 Peuerbach Powercorn	30, 50		X		
Heizomat GmbH, 91710 Gunzenhausen Heizomat	15 - 300				X
Passat Energi A/S, DK-7800 Skive Comapct	42 - 185		X		
P&H Energy, DK-7800 Skive PH 12, 23, 47	12 - 47			X	
Maskinfabrikken REKA, DK 9600 HKRST 20 - 250	20 - 250		X		
Verner a.s., CZ-54941 Červený Kostelec Verner A251 G, A501G	23, 45			X	
REFO ENERGI, DK 4681 Herfølge, REFO 30, 40, 50, 80, 120	30 - 120			X	
A.P. Bioenergietechnik GmbH, 92242 Hirschau, Ökotherm	50 - 800			X	

* NWL Nennwärmeleistung
Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit

Hersteller: Agroflam, Overath
 Typ: Agro 40

Unterschubfeuerung mit Rührhaken gegen Verschlackung, niedrige Temperatur im Brennstoffbett. Umsetzung eines zweistufigen Prozesses – Entgasung und Verbrennung des Restkohlenstoffes räumlich getrennt



Hersteller: Guntamatic, A-Peuerbach
 Typ: Powercorn

Rostfeuerung mit beweglichem Vorschubrost, Verbrennungsregelung mit Lamdasonde. Stehender Wärmetauscher mit Reinigungseinrichtung



Hersteller: Gerlinger, A-Waldhausen
 Typ: Biokompakt AWK

Quereinschubfeuerung, Getreide mit Kalkzugabe. Verbrennungsregelung mit Lambdasonde. Modulierender Betrieb (Leistungsbereich ca. 50-100%) mit Gluterhalt. Stehender Wärmetauscher

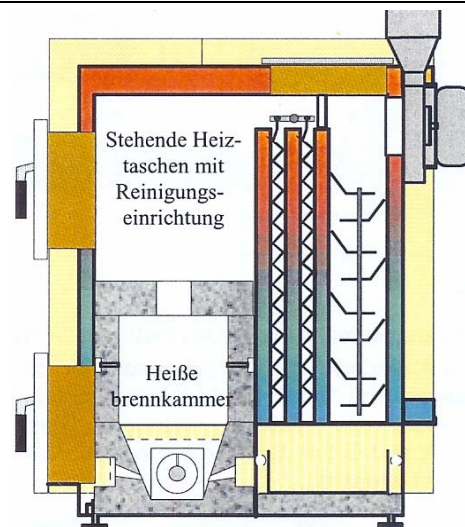


Bild 2.1: Beispiele für Getreidekessel (Nennwärmeleistungen ca. 40-50 kW) (Schematische Darstellung, jeweils aus Herstellerangaben übernommen)

Getreidefeuerungen können erhöhte Staubemissionen aufweisen. Hierfür sind im Wesentlichen drei Gründe zu sehen. Bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen (z.B. bei Anfahren der Anlagen, im Teillastbetrieb, bei Störungen des Brennstoffbetts durch intensive Schlackebildung oder bei mangelhafter Einstellung der Verbrennungsluftmengen) steigen die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung stark an. Hierbei werden neben CO, verstärkt Ruß und auch organische Verbindungen emittiert, die teilweise bei sinkenden Abgastemperaturen kondensieren und somit zur Partikelemission beitragen. Außerdem führen hohe Alkalienkonzentrationen zur Verdampfung von Salzen in der Feuerung und zur Bildung von feinen Salzaerosolen, die sich aufgrund der geringen Partikelgrößen weder vollständig im Kesselbereich ablagern, noch in einfachen und im unteren Leistungsbereich im wesentlichen eingesetzten konventionellen Schwerkraftabscheidern (Zyklone bzw. Multizyklone) effektiv abgeschieden werden können. Des Weiteren können auch ausgetragene Feinanteile des Brennstoffes zur Staubemission beitragen. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Brennstoffbett, die z.B. durch eine ungünstige Abstimmung der Verbrennungsluft-Teilströme oder die nur örtlich durch eine ungleiche Strömungsverteilung verursacht wird, können zum Austrag erheblicher Brennstoff-Feinanteile führen. Sind die ausgetragenen Teilchen zu fein oder wird der nachgeschaltete Staubabscheider überlastet, treten dann bei diesen Betriebsbedingungen auch erhöhte Partikelemissionen auf.

Die, z.B. im Vergleich zu naturbelassenen Hölzern, hohen Stickstoffgehalte von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh im Bereich von 0,4 bis 2,3 Massen-% (bezogen auf die Trockenmasse) führen zu höheren NO_x-Emissionen.

Nach derzeitigem Kenntnisstand liegen bei Nennwärmeleistung der Anlagen die Emissionen von Staub bei einfacher Verbrennungstechnik meist über 100 mg/m³ und bei weiterentwickelter Verbrennungstechnik zwischen 50 – 100 mg/m³ (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂). Beim NO_x werden, in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt im Brennstoff, in der Praxis oft Konzentrationen über 500 bis über 1.000 mg/m³ (bezogen auf 13 Vol% O₂) gemessen.

Sekundärmaßnahmen zur Staubabscheidung werden bei der Getreideverbrennung, auch bei weiterentwickelter Verbrennungstechnik, für viele Kesselkonstruktionen notwendig werden, wenn in der Praxis Staubgrenzwerte von < 50 mg/m³ (bezogen auf 13 Vol% O₂) einzuhalten sind. Zur Minderung der Staubemissionen befinden sich derzeit unterschiedlich erprobte Entwicklungen in der praktischen und prüfstandtechnischen Anwendung.

Grundsätzlich können zur Staubabscheidung folgende Verfahren eingesetzt werden:

- Elektrofilter
- filternde Abscheider wie Gewebe- oder Keramikfilter
- Fliehkraftabscheider (Zyklone, Multizyklone)
- Abgaskondensation.

Wesentliche Kriterien für die Auswahl des Reinigungsverfahrens sind die Größenverteilungen der Staubpartikel, die notwendige Reinigungsleistung, das Betriebsverhalten der Heizkessel, der gerätetechnische und betriebsmäßige Aufwand sowie der Platzbedarf.

Mit vergleichsweise kostengünstigen Fliehkraftabscheidern können geringe Staubgrenzwerte aufgrund der Feinheit der im Abgas vorhandenen Partikel nicht eingehalten werden. Hohe Abscheidleistungen und geringe Reingasstaubkonzentrationen können prinzipiell mit filternden Abscheidern und Elektrofiltern erreicht werden. Allerdings befindet sich der Einsatz von Elektrofiltern für kleine und mittlere Heizkessel nach gegenwärtigem Wissensstand größtenteils noch im Entwicklungsstadium bzw. in der Vorbereitung zur Markterprobung (Spanner, 2008). Zuverlässige standardisierte Lösungen, die auch zu vertretbaren Kosten angeboten werden, sind bisher noch nicht erhältlich. Eine ähnliche Situation gilt für filternde Abscheider. Auch hier sind mehrere Techniken im Entwicklungsstadium, z.B. Metallgewebefilter (Winkel, 2004) oder Keramikfilter (Mocker et al., 2007), die aufgrund ihrer Temperaturbeständigkeit und ihrer hohen Abscheidleistung eine interessante Minderungsmaßnahme darstellen. Nachteilig bei diesen Techniken ist der hohe technische Aufwand, der u.a. zur Abreinigung der Filterflächen notwendig ist.

Alternativ hierzu werden derzeit schon Sekundärwärmetauscher zur Staubabscheidung (Merkl, 2006) angeboten, die aber im Wesentlichen eine Wirkungsgraderhöhung der Anlagen durch eine mögliche Brennwertnutzung zum Ziel haben. Inwieweit diese Geräte auch bei hohen Eingangstaubkonzentrationen eine hohe Minderungsleistung für Feinstäube erzielen, kann derzeit nicht abschließend beurteilt werden.

Die **Brennstoffeigenschaften** kann man nach physikalischen und chemisch-stofflichen Merkmalen untergliedern. Getreide, Getreideausputz oder Pellets (aus z.B. Resten der Getreidereinigung, Stroh oder Heu) weisen einige positive physikalische Merkmale auf. Diese Stoffe sind gut rieselfähig und damit gut dosierbar, sie weisen, sofern es sich um lagerfähiges Getreide handelt, relativ geringe und gleichmäßige Wassergehalte auf und sind damit, abhängig von der Getreideart, auch einigermaßen gut zündfähig.

Problematischer sind einige chemisch-stoffliche Merkmale, die Verschlackungen im Brennstoffbett, Verschmutzungen im Wärmetauscher, Korrosionen und erhöhte Stickstoffoxid-Emissionen verursachen können. So führen hohe Kaliumkonzentrationen im Brennstoff zu niedrigen Ascheschmelzpunkten. Hierdurch können Verschlackungen im Brennstoffbett und Verschmutzungen im Feuerraum- und im Wärmetauscherbereich auftreten. Dadurch ergeben sich unzureichende Betriebszeiten und ein erhöhter Reinigungsaufwand. Eine verstärkte Schlackebildung im Brennstoffbett kann Störungen im Verbrennungsablauf durch veränderte Strömungsbedingungen und damit erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung und Staub verursachen. Außerdem können Störungen beim automatischen Ascheaustrag (z.B. mit Schnecken) auftreten, die letztlich zum Abschalten der Anlage führen. Verschmutzungen der Wärmetauscherflächen behindern den Wärmeübergang vom heißen Abgas zum Heizwasser und führen zu erhöhten Abgastemperaturen. Hierdurch sinkt der thermische Wirkungsgrad der Feuerung.

Vergleichsweise hohe Chlorkonzentrationen im Brennstoff können u.U. lokal, in sehr heißen Bereichen des Feuerraumes, eine Hochtemperaturkorrosion verursachen. Kritischer ist allerdings eher, dass in kälteren Bereichen des Wärmetauschers bzw. im Abgassystem (Verbindungsstück vom Kessel zum Schornstein oder im Schornstein selbst) zeitweise (z.B. beim Anfahren des Kessels) oder auch über einen längeren Zeitraum (z.B. im Teillastbetrieb) der Wasserdampftaupunkt unterschritten wird. In dem sich dann bildenden Kondensat lösen sich

auch Chlorverbindungen (z.B. Chlorwasserstoff - HCl), wodurch sich starke Säuren ergeben, die eine Niedertemperaturkorrosion verursachen können.

In **Tabelle 2.2** sind wesentliche physikalische und chemisch-stoffliche Merkmale für die betrachteten Biomassen sowie deren wichtigsten Auswirkungen auf den Betrieb der Feuerungsanlage und deren Emissionsverhalten zusammengestellt.

Tabelle 2.2: Charakterisierung von Getreide- und Strohbiomassen

Qualitätsmerkmal	wichtigste Auswirkung
<i>chemisch-stoffliche Merkmale:</i>	
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Verluste, Selbstentzündung
Heizwert	Brennstoffausnutzung, Anlagenauslegung
Elementgehalte:	
Cl	HCl-, PCDD/F-Bildung, Korrosionspotential
N	NO _x -, HCN- und N ₂ O-Emissionen
S	SO _x -Emissionen, Korrosion
K	Hochtemperaturkorrosion, Ascheerweichungsverhalten
Mg, Ca, P	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemissionen, zum Teil katalytische Wirkung bei PCDD/F-Bildung
Aschegehalt	Partikelemissionen (Staub), Rückstandsbildung und -verwertung
Ascheerweichungspunkt	Anlagenbetriebsicherheit, Niveau des Schadstoffausstoßes
Pilzsporen	Gesundheitsrisiken
<i>physikalische Merkmale:</i>	
Lagerungsdichte	Transport- und Lageraufwendungen, Logistikplanung
Teilchendichte	Feuerungseigenschaften (spezifische Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate)
Größenverteilung	Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Trocknungseigenschaften, Staubbildung
Feinanteil	Lagerdichte, Lagerfähigkeit, Staubbildung
Abriebsfestigkeit	Entmischung, Verluste

3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen für Holz- und andere Biomassebrennstoffe liegen im Geltungsbereich der 1. BImSchV (2001), die den Betrieb, die Emissionsbegrenzung und die Überwachung der Anlagen regelt. Hierin sind für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe mit einer Nennwärmeleistung > 15 kW Emissionsanforderungen festgelegt. Beim Einsatz von Biomassen in den betreffenden Feuerungsanlagen sind Grenzwerte für CO und Staub einzuhalten. Diese Grenzwerte gelten für Feuerungsanlagen für naturbelassene Hölzer sowie Resthölzer bis zu einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW, für andere Biomassen (Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe) lediglich bis zu einer Feuerungswärmeleistung der Anlage bis 100 kW. Liegt die Leistung der Feuerungsanlage darüber, sind die erhöhten Anforderungen von genehmigungsbedürftigen Anlagen einzuhalten. Welche Anlagen im Einzelnen genehmigungsbedürftig sind, wird in der 4. BImSchV (1997, Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) geregelt.

Die Überwachung der Emissionsanforderungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV, sowie die Überprüfung der Betriebs- und Brandsicherheit der Feuerungsanlagen, erfolgt durch das Schornsteinfegerhandwerk. Die Einhaltung der Emissionsanforderungen wird durch einmalige oder wiederkehrende Messung überprüft. Mechanisch beschickte Anlagen mit einer Nennwärmeleistung über 15 kW unterliegen einer jährlichen Messpflicht. Zur Begrenzung des Überwachungsaufwandes wird hierzu eine relativ einfache und der Aufgabe angemessene Messtechnik eingesetzt.

Die CO-Grenzwerte in der 1. BImSchV für Biomassenfeuerungsanlagen unterscheiden sich je nach eingesetztem Brennstoff und nach der Nennwärmeleistung der Feuerungsanlage. Für Staub gilt bisher ein einheitlicher Grenzwert von $0,15 \text{ g/m}^3$ (bei 13 Vol% O_2). Welche Biomassen in den nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen eingesetzt werden dürfen, ist ebenfalls in der 1. BImSchV im §3 geregelt. Brennstoffe, die in dieser Aufzählung nicht genannt bzw. nach geltender Auffassung hier auch nicht hinzugezählt werden können, dürfen in den Feuerungsanlagen nicht verfeuert werden. Hierzu zählen auch Getreide- bzw. Bruchkörner, die bisher nicht als Regelbrennstoff zugelassen sind. **Tabelle 3.1** enthält eine Zusammenstellung der Anforderungen und der Überwachungsregelungen der 1. BImSchV für Biomassen.

Die derzeitigen Emissionsanforderungen für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe wurden im Wesentlichen bei der Novellierung im Jahr 1988 festgelegt und entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik. Deshalb ist bei der anstehenden Novellierung der 1. BImSchV auch mit einer deutlichen Verschärfung der CO- und Staubgrenzwerte zu rechnen (1. BImSchV, Entwurf 2007). Nach diesem Entwurf wären unter Brennstoff Nr. 8 Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe, Getreideganzpflanzen, Getreidekörner und -bruchkörner, Pellets aus Getreideganzpflanzen oder Getreidekörnern, Getreideausputz, Getreidespelzen und -halmreste als Brennstoffe zulässig, dürfen aber vorläufig nur von einem eingeschränkten Betreiberkreis genutzt werden.

Tabelle 3.1: Anforderungen an Feuerungsanlagen für Biomassen bezüglich der CO- und Staubemissionen und Überwachungsregelungen in der 1. BImSchV (2001)

Brennstoffe nach § 3 (1. BImSchV)		Nennwärmeleistung in kW	Anforderung in g/m ³ für	
Nr.	Beschreibung		CO *	Staub *
4 bis 5a **	naturbelassenes stückiges und nichtstückiges Holz sowie Preßlinge aus naturbelassenem Holz	>15-<50	4	0,15
		>50-150	2	
		>150-500	1	
		>500	0,5	
6 und 7 ***	Resthölzer	50-<100	0,8	0,15
		>100-500	0,5	
		>500	0,3	
8 **	Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe	>15-<100	4	0,15
Überwachung der Anlagen mit Messung:		einmalig bei neuer und wesentlich geänderter Feuerungsanlage mit festgelegten Emissionsanforderungen für CO und Staub jährlich wiederkehrend bei mechanisch beschickter Feuerungsanlage für Brennstoffe Nr. 4 bis 5a und 8 mit einer NWL von >15 kW oder Feuerungsanlage für Brennstoffe Nr. 6 und 7 mit einer NWL ab 50 kW		

NWL Nennwärmeleistungen

* die Anforderungen gelten bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol%

** Betrieb von handbeschickten Anlagen mit diesen Brennstoffen nur bei Volllast, wozu meist ein ausreichend bemessener Wärmespeicher notwendig ist. Hierauf kann verzichtet werden, wenn Anforderungen auch im Teillastbetrieb eingehalten werden

*** Brennstoffe dürfen nur in Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von mindestens 50 kW und nur in Betrieben der Holzbearbeitung und Holzverarbeitung eingesetzt werden

Neben speziellen Anforderungen an die NO_x- und Dioxin/Furan-Emissionen bei der Typenprüfung gelten als Grenzwerte (jeweils bei 13 Vol% O₂) für die Stufe 1 (Anlagen die bis 31.12.2014 für errichtet werden) für CO 1 g/m³ und für Staub 0,10 g/m³. Für die Stufe 2 (Anlagen die nach dem 31.12.2014 für errichtet werden) wurden als Grenzwerte für CO 0,4 g/m³ und für Staub 0,02 g/m³ vorgeschlagen. Bis zur Verabschiedung der Novelle ist die derzeitige Fassung der 1. BImSchV gültig.

Diese sieht nach § 20 vor, dass die zuständige Behörde auf Antrag auch Ausnahmen von den Anforderungen an die Brennstoffe, Emissionen und Ableitungsbedingungen der Abgase zulassen kann, soweit diese im Einzelfall wegen besonderer Umstände durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen und schädliche Umwelteinwirkungen nicht zu befürchten sind. Seit November 2005 sind nun per Erlass des Umweltministerium Baden-Württemberg (UM, 2005) die Bedingungen festgelegt, unter denen entsprechende Ausnahmegenehmigungen für die Getreideverbrennung erteilt werden können. In einigen anderen Bundesländern wurden vergleichbare Regelungen getroffen. So sind in Baden-Württemberg als Brennstoffe Getreide bzw. Bruchkörner, unabhängig von ihrer Qualität, sowie bei der Getreidereinigung anfallende Nebenprodukte (z.B. Getreideausputz und Halmreste) sowie Getreidepellets zugelassen.

Diese Brennstoffe dürfen nur in bauartgeprüften und hierfür geeigneten Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von 15 bis 100 kW eingesetzt werden. Emissionsanforderungen sind für die Bauartprüfung und für den späteren Betrieb der Anlage festgelegt. Bei der Bauartprüfung ist die Feuerung hierzu mit 100 % Getreide zu betreiben, spezielle Anforderungen an den Brennstoff (z.B. Wassergehalt, Stickstoffgehalt) sind nicht beschrieben. Die Emissionsanforderungen sind abhängig von der Nennwärmeleistung der Feuerung und dem Betreiberkreis. Für Betriebe der Land- und Forstwirtschaft, des Gartenbaus und des agrar-gewerblichen Sektors gelten, da deren Lage im Hinblick auf Nachbarschaftsbelästigungen als weniger kritisch angesehen wird, weniger strenge Staubgrenzwerte. In allen anderen Anwendungsfällen müssen verschärfte Staubgrenzwerte eingehalten werden. In **Tabelle 3.2** sind die Anforderungen für eine Erteilung einer Ausnahmegenehmigung nach § 20 der 1. BImSchV in Baden-Württemberg zusammengestellt.

Tabelle 3.2: Anforderungen an Getreidefeuerungen zur Erteilung einer Ausnahmegenehmigung nach § 20 der 1. BImSchV in Baden-Württemberg (UM, 2005)

Anlagengröße – NWL	Anforderungen	
15 bis 100 kW	zugelassene Brennstoffe: Getreidekörner bzw. Bruchkörner Nebenprodukte der Getreidereinigung Getreidepellets	
bei Bauartprüfung 15 kW bis 50 kW > 50 bis 100 kW	CO: 0,5 g/m ³ 0,25 g/m ³	NOx: 500 mg/m ³ Staub: 75 mg/m ³
im Betrieb eingeschränkter Betreiberkreis * 15 kW bis 50 kW > 50 bis 100 kW	CO: 1,0 g/m ³ 0,5 g/m ³	Staub: 100 mg/m ³ 75 mg/m ³
im Betrieb – alle anderen Betreiber 15 kW bis 50 kW > 50 bis 100 kW	CO: 1,0 g/m ³ 0,5 g/m ³	Staub: 20 mg/m ³ 20 mg/m ³

NWL – Nennwärmeleistung

alle Emissionsangaben sind auf 13 Vol% O₂ bezogen und gelten für 100% Getreideinsatz

* Betriebe der Land- und Forstwirtschaft, des Gartenbaus und des agrargewerblichen Sektors

4 Messungen an installierten Anlagen

Im Rahmen des Projektes waren Feldmessungen an 2 installierten Anlagen vorgesehen, die unter Praxisbedingungen betrieben werden. Diese Bestandsaufnahme sollte Auskunft über das Emissionsverhalten der Anlagen im *praktischen* Betrieb, bei unterschiedlichen und wechselnden Betriebsbedingungen (z.B. Wärmeleistungen, Brennstoffband, Regelverhalten), geben. Letztlich wurden Feldmessungen an 3 Heizkesseln durchgeführt, da für die Weiterentwicklung des Gewebefilters zusätzliche Messungen notwendig wurden. Es wurden folgende Anlagen untersucht:

- Agro 40 des Herstellers Agroflam Feuerungstechnik GmbH, Overath,
- Passat Compact C8 des Herstellers Passat Energi A/S, DK-Skive mit Gewebefilter und
- Ökotherm Compact C0 des Herstellers A.P. Bioenergietechnik GmbH, Hirschau mit Gewebefilter.

Der Heizkessel Agro 40 war zu Beginn des Projektes neu auf dem Markt, es waren bis zu diesem Zeitpunkt nur einige Anlagen installiert und in Betrieb. Diese Technik wurde aufgrund ihrer konsequenten Entwicklung für Getreidebrennstoffe und ihres technischen Potentials zur weiteren Optimierung der Verbrennung und des Betriebsverhaltens ausgewählt. Neuentwicklungen anderer Hersteller waren zum Auswahlzeitpunkt erst im Prototypenstadium. Bereits vorliegende Messergebnisse zu diesem Heizkessel ließen erwarten, dass moderate Grenzwertverschärfungen für Staub mit dem Kessel ohne Sekundärmaßnahmen einhaltbar sind. Für die Minderung der hohen NO_x-Konzentrationen wurde Entwicklungspotential gesehen.

Der Heizkessel Passat Compact C8 wurde als Vertreter von vergleichsweise einfach aufgebauten Rostfeuerungen ausgewählt, die bei derzeitigem Kenntnisstand kaum in der Lage sein werden, verschärfte Staubgrenzwerte ohne den Einsatz von Sekundärmaßnahmen einzuhalten. Bei diesem Kessel handelt es sich eigentlich um eine Hackschnitzelfeuerung, die nur bedingt für den Einsatz anderer Biomassen geeignet ist. Im Rahmen der Messungen am Passat-Heizkessel wurde außerdem ein externer Staubabscheider (Edelstahl-Gewebefilter) des Projektpartners Firma Winkel an der Anlage installiert, eingehend untersucht und die Betriebsweise optimiert. Die Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 5 vorgestellt. Die Ergebnisse am Heizkessel Ökotherm werden nur in Kapitel 5 vorgestellt, da hier keine Emissionsmessungen durchgeführt wurden, sondern lediglich Untersuchungen zum Abreinigungsverhalten des Gewebefilters.

4.1 Eingesetzte Messtechnik

In **Tabelle 4.1** sind die bei den Feldmessungen am Agroflam- und Passat-Heizkessel verwendeten Messgeräte, die Prüfgaskonzentrationen und die eingesetzten Filtersubstrate für das Planfilterkopfgerät zur Bestimmung der Gesamtstaubkonzentration und den Kaskadenimpaktor zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung aufgelistet.

Tabelle 4.1: Angaben zur verwendeten Messtechnik

Messgröße (Messprinzip) Messgerätetyp, Hersteller	Messbereich	Prüfgaskonzentration ² Filtersubstrate / Waschlösung	Einheit
CO ₂ (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS-Reihe. Fisher-Rosemount	0-20 Vol%	12,1 Vol% CO ₂ in N ₂	Vol%
CO (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS-Reihe. Fisher-Rosemount	0-3 Vol% 0-1.000 ppm v/v	0,77 Vol% CO in N ₂ 102 ppm v/v CO in N ₂	mg/m ³
O ₂ (Paramagnetismus): Oxynos-Reihe. Fisher-Rosemount	0-25 Vol%	8,0 Vol% O ₂ in N ₂	Vol %
VOC (Flammenionisation) ¹ : FID 123. Testa	0-1.000 ppm v/v	81 ppm v/v Propan in N ₂	mgC/m ³
NO _x (Chemilumineszenz): NOx Analyser 42 C, Thermo Env. Inst.	0-1.000 mg/m ³	251 ppm v/v NO in N ₂	mgNO ₂ /m ³
Temperaturen (Thermoelektrizität): Ni-CrNi-Thermoelemente	0-150 °C und 0-490 °C	-	°C
Gesamtstaubkonzentration mit Planfilterkopfgerät (Gravimetrie): Staubmesseinrichtung STE Firma Ströhlein	-	Filtersubstrate: Quartz Microfibre MK 360, Φ 50 mm, Firma Munktel Filter AB, S-Grycksbo	mg/m ³
Partikelgrößenverteilung mit Impaktor ³ : (Strömungstrennverfahren): Mark III (TR 76-900023, Rev. A) Firma Andersen Instruments Incorporated, Smyrna, GA, USA	-	<u>Trennstufen:</u> Filtereinsätze für Andersen Mark III, Firma K. Schäfer Gesellschaft für Verfahrenstechnik, D-Langen <u>Endfilter:</u> Glass Microfibre Filter 18279237, Grade-AH, Φ 63 mm, Firma Whatman Internat. Ltd., GB-Maidstone	%
HCl: Probenahme nach VDI-Richtlinie 3480, Analyse mit Ionenchromatographie	-	destilliertes Wasser, teils mit Zugabe von H ₂ O ₂ -Lösung	mg/m ³

¹ bei den VOC-Messungen wurde eine beheizte Probenahmeleitung verwendet. Diese Leitung und der FID waren auf ca. 160 °C beheizt. Im FID ist ein Feinfilter vorhanden. Gemessen wurde die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) im feuchten Abgas, es wird die Kohlenstoffmasse angegeben

² die Überprüfung der Nullpunkte der Gasanalytoren erfolgte mit Stickstoff 5.0

³ Partikelgrößenverteilung: anteilige Partikelmasse in % der Trennstufen und des Endfilters bezogen auf die insgesamt im Impaktor abgeschiedene Masse

Für die Staubbmessungen wurden die verwendeten Filtersubstrate vor der Probenahme im Trockenofen mindestens 2 Stunden bei 240 °C getrocknet, dann mindestens 24 Stunden im Exsikkator (Trockenmittel Silikagel) gelagert und anschließend gewogen. Der Einbau der Filtersubstrate erfolgte unmittelbar vor den Messungen in die gereinigten Filterhalter. Nach der Messung wurden die Filter für mindestens 24 h im mit Trockenmittel gefüllten Exsikkator konditioniert und dann erneut gewogen. Aus der Massendifferenz der Wägung vor und nach der Probenahme und dem abgesaugten Probenahmenvolumen wurden die Staubkonzentrationen berechnet. Als Waage wurde das Modell MC 1 RC 210 P der Firma Sartorius AG verwendet. Die Waage weist eine Reproduzierbarkeit und Linearitätsabweichung im genutzten Wägebereich bis 5 g von jeweils 0,02 mg auf. Die Waage ist in einem speziellen Wägeraum untergebracht.

4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Probenahmedauer für die diskontinuierlich erfassten Abgaskomponenten (Gesamtstaub, HCl) richtete sich nach den erwarteten Konzentrationen und betrug bei Staub zwischen 15 und 60 Minuten (Messungen hinter Staubabscheider). Bei der Bestimmung der HCl-Konzentrationen erfolgte die Probenahme jeweils über 15 Minuten. Die Ergebnisse liegen somit als Mittelwert über die jeweilige Probenahmezeit vor. Die kontinuierlich erfassten Größen wurden als 10-Sekunden-Mittelwerte registriert und entsprechend den Probenahmezeiten der diskontinuierlichen Größen ebenfalls als Mittelwert berechnet. Die Umrechnung der gemessenen CO-, VOC-, Staub-, HCl-Konzentrationen auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% erfolgte mittels der gemessenen O₂-Konzentration nach 1. BImSchV (2001):

$$E_B = \frac{21 - O_{2,B}}{21 - O_{2,M}} * E_M \quad [\text{mg/m}^3] \quad (4.1)$$

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

4.3 Feldmessungen am Heizkessel Agroflam Aggro 40

Der Heizkessel Agro 40, siehe **Bild 4.1**, wurde speziell für Getreidebrennstoffe entwickelt und zeichnet sich durch eine spezielle Luftführung im Bereich des Brennstoffbettes, die regelmäßige Bewegung des Brennstoffs und den zweistufigen Verbrennungsprozess - Brennstoffentgasung und Verbrennung des Restkohlenstoffes sind räumlich getrennt - aus. Der Kessel ist als Unterschubfeuerungen konzipiert, Brennstoff wird automatisch mit einer Schnecke einer Brennschale aus Siliziumkeramik zugeführt. Die zur Verbrennung notwendige Primärluft wird über einen Luftdüsenring von oben auf den Brennstoff in der Brennschale geleitet. Ein Bewegungselement hält den Brennstoff in Bewegung und verhindert so Verbackungen im Brennstoff. Die Flamme aus der Entgasungszone steigt in ein Flammrohr aus Siliziumkeramik, in dem Sekundärluft eingeblasen wird. In einem Flammrohr findet dann die weitere Verbrennung statt. Dieses mündet in einer Ausbrandglocke, ebenfalls aus Siliziumkeramik. Die heißen Gase werden umgelenkt und verlassen die Glocke am unteren Ende um dann von unten in den Wärmetauscher einzutreten. Nach der erneuten Umlenkung der Verbrennungsgase am oberen Austritt des Wärmetauschers strömen diese in die Rauchrohre des Wärmetauschers. Hier wird das Gas auf die Abgasaustrittstemperatur abgekühlt.

Der in der Brennschale vorhandene Brennstoff wird durch das Röhrelement regelmäßig bewegt und zum Rand der Brennschale hin transportiert. Hier fällt dann der weitgehend entgaste Brennstoff, der dann im Wesentlichen aus Kohlenstoff besteht, in die zweite Verbrennungsstufe im unteren Teil der Feuerung. Durch das Volumen dieses Verbrennungsraumes und dessen Konstruktion wird die notwendige lange Verweilzeit in diesem Bereich des Kessels gewährleistet. Durch die große Oberfläche des angehäuften Brennstoffes ist eine ausreichende Versorgung mit Luftsauerstoff sicher gestellt.

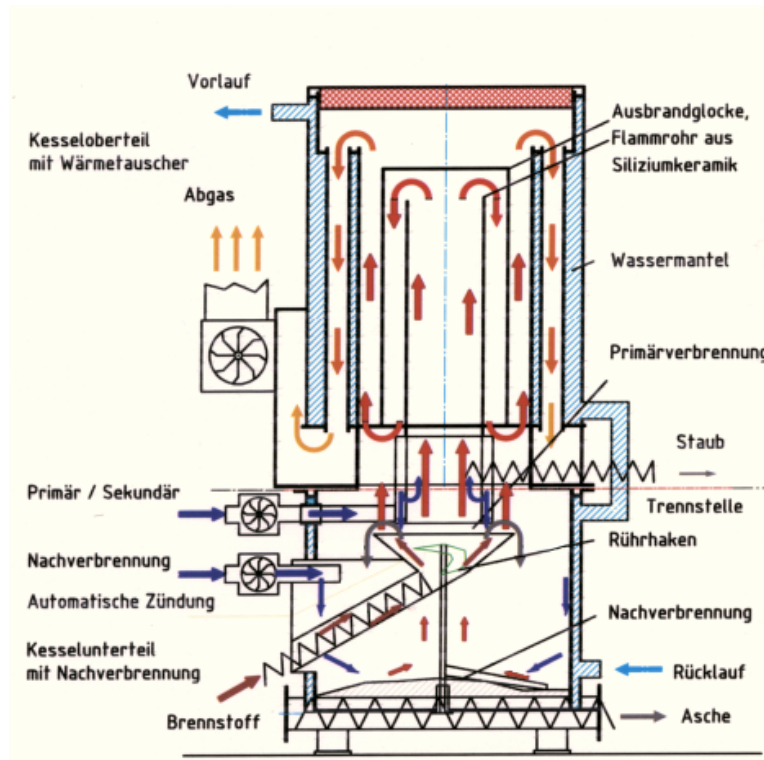


Bild 4.1: Schnittbild vom untersuchten Agroflam-Heizkessel Agro 40 (oben) und Einbausituation bei den Messungen mit Ausschnitt der Brennkammer

Bei ständiger Bewegung des glühenden Brennstoffes und durch die Zufuhr von Verbrennungsluft oberhalb des Glutbettes wird der Kohlenstoff verbrannt. Die CO-haltigen Verbrennungsgase steigen nach oben in das Flammrohr und vermischen sich dort mit dem Verbrennungsgas der ersten Stufe.

Der Agroflamm-Heizkessel wird mit einer konstanten und fest eingestellten Wärmeleistung (z.B. der Nennwärmeleistung) betrieben. Die Anpassung der Heizanlage an den aktuellen Wärmebedarf des Gebäudes erfolgt über den Pufferspeicher, der bei diesem Heizkessel laut Herstellerangaben unbedingt notwendig ist. Die Ladezeiten des Pufferspeichers ergeben sich durch die Pufferspeichertemperaturen. Wird eine vorgegebene Temperatur unterschritten, startet der Kessel automatisch. Brennstoff wird in den mehr oder weniger kalten Feuerraum gefördert und mit einem Heißluftgebläse gezündet. Wird die vorgegebene höchste Speichertemperatur erreicht, schaltet der Heizkessel wieder ab. Hierbei wird die Brennstoffzufuhr gestoppt, der noch im Kessel befindliche Brennstoff weitgehend verbrannt und die Verbrennungsreste ausgetragen. In **Tabelle 4.2** sind wesentliche Daten des Heizkessels und des installierten Pufferspeichers enthalten.

Tabelle 4.2: Angaben zum installierten Agroflamm-Heizkessel

Hersteller	Agroflamm Feuerungstechnik GmbH, D-51494 Overath
Typ	Agro 40
Bauart	Unterschubfeuerung (Einschub des Brennstoffes von unten in Brennerschale)
Baujahr	2004
Nennwärmeleistung in kW	40
Wasserinhalt in l	147
Betrieb	keine Leistungsregelung, Kessel wird bei fest eingestellter Last bis Erreichen von Sollwert der Kesselwassertemperatur konstant betrieben
Pufferspeicher	2.000 l
Warmwasserspeicher	400 l

Untersuchte Brennstoffe

Das Verbrennungsverhalten des Agro 40 wurde mit Wintergerste, Winterweizen und Strohpellets aus Weizenstroh untersucht. Wesentliche Merkmale der untersuchten Brennstoffe sind in **Tabelle 4.3** aufgelistet.

Tabelle 4.3: Wesentliche Merkmale der am Agro 40 untersuchten Brennstoffe

Brennstoff	Wintergerste	Winterweizen	Strohpellets *
Heizwert H _U in kJ/kg	15.187	15.015	15.221
in Massen-%, Bezug: verfeuerter Brennstoff			
Wasser	11,8	12,9	11,6
Asche	2,0	1,2	7,4
Kohlenstoff (C)	41,5	41,0	40,3
Wasserstoff (H)	6,6	6,8	5,8
Sauerstoff (O)	35,9	35,9	34,3
Stickstoff (N)	2,1	2,2	0,5
Schwefel (S) **	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Chlor (Cl)	0,08	0,04	0,13
in Massen-%, Bezug: wasserfreier Brennstoff			
flüchtige Stoffe	78,5	80,3	74,2
Fixed C	19,2	18,4	17,4
Asche-Schmelzverhalten in °C			
Erweichungstemperatur	770	780	920
Fließtemperatur	1.380	930	1.250
in Massen-%, Bezug: wasserfreie Brennstoffasche			
Siliziumoxid (SiO ₂)	19,5	1,7	56,5
Calciumoxid (CaO)	3,7	4,0	5,2
Magnesiumoxid (MgO)	8,7	13,8	2,2
Kaliumoxid (K ₂ O)	26,7	30,5	24,9
Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)	39,8	46,8	1,4
Mangan (Mn)	0,10	0,28	0,03

* Strohpellets aus Weizenstroh

** Analysenwerte liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze

Messprogramm und Ablauf

Gemessen wurde jeweils bei konstantem Betrieb mit der vom Kundendienst eingestellten Kesselleistung. Messungen beim Kesselstart bzw. beim Abschalten des Heizkessels wurden nicht durchgeführt, da der Kessel für diese Betriebszustände noch nicht korrekt eingestellt wurde. Der Heizkessel wurde bisher vom Betreiber nur mit Holzpellets betrieben und auch nicht für den regulären Heizbetrieb eingesetzt, da sich das Gebäude noch in der Ausbauphase befand. Somit war der Kesselbetrieb im Rahmen des Projektes der erste längere Belastungstest für den Heizkessel mit Getreidebrennstoffen.

Während der Messungen kam es zu mehreren Kesselausfällen, die Reparaturen und Messverzögerungen zur Folge hatten. So brach am Bewegungselement in der Brennerschale (als Rührhacken in Bild 4.1 bezeichnet) nach einigen Stunden Betriebszeit ein Metallstück ab

(siehe **Bild 4.2**), welches die Brennstoffverteilung und die Brennstoffbewegung zum Rand der Brennerschale hin bewirkt. Hierdurch kam es dann zu einer Überfüllung der Brennerschale und damit der primären Verbrennungszone, was die Verbrennungsbedingungen negativ beeinflusste. Die Folge waren stark erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung und ein massiver Leistungsabfall des Heizkessels. Die Versuche konnten erst nach der Reparatur des Bauteils vorgesetzt werden.



Bild 4.2 Rührhacken mit abgebrochenem Metallstück (links) und überfüllte Brennerschale (rechts) bei Heizkessel Agro 40

Weitere Messunterbrechungen ergaben sich durch den Ausfall der Flammenüberwachung, der hierfür eingesetzte Thermofühler wurde durch die vorangegangene Kesselreparatur für den Austausch des Rührhacken beschädigt und durch abgebrochene Führungsbolzen des Ausbrandtellers im Kesselunterteil. Diese Führungsbolzen blockierten die Asche-Austragschnecke.

Vor allem bei den Versuchen mit den beiden Getreidearten war der Ausbrand des Brennstoffes nicht vollständig, der Ascheaustrag bestand überwiegend aus nicht vollständig verbranntem Kohlenstoff, die Form der Getreidekörner war zum Teil noch erkennbar (siehe **Bild 4.3**).



Bild 4.3 Verbrennungsrückstand aus dem Ascheaustrag bei Versuchen mit Getreidekörnern beim Heizkessel Agro 40

Ergebnisse

In **Tabellen 4.4** sind die Ergebnisse der Felduntersuchungen am Agroflamm-Heizkessel zusammengefasst aufgeführt.

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Felduntersuchungen am Heizkessel Agro 40

Agro 40		Wintergerste	Winterweizen	Strohpellets
Heizwert	in kJ/kg	15.187	15.015	15.221
Wassergehalt	in Massen-%	11,8	12,9	11,6
Stickstoffgehalt		2,1	2,2	0,5
Chlorgehalt		0,08	0,04	0,13
Versuchsdauer	in min	15 / 30	15 / 30	15 / 30
Wärmeleistung WL	in kW	33,3	36,1	36,7
WL in % der Nennwärmeleistung		83,4	90,3	91,8
Kesseltemperatur *	in °C	60 / 74	66 / 76	75 / 77
Abgastemperatur	in °C	153	167	178
Wirkungsgrad **	in %	87,1	88,6	89,0
CO ₂	in Vol%	9,8	12,3	13,3
O ₂	in Vol%	10,5	8,0	7,1
CO	in mg/m ³ bezogen auf 13 Vol% O ₂	43	43	45
VOC als C		6	16	3
NO _x als NO ₂		963	987	396
Staub		16	10	24
HCl		52	33	66

* Kesseltemperatur bei Versuchsbeginn / am Versuchsende

** feuerungstechnischer Wirkungsgrad, Bezug: Heizwert des Brennstoffes

Beim Agroflamm-Heizkessel wurden für die Versuche unter stationären Betriebsbedingungen relativ hohe feuerungstechnische Wirkungsgrade zwischen rund 87 bis 89 % ermittelt. Die Wärmeleistung lag hierbei im Bereich von rund 33 bis 37 kW und damit unterhalb der vom Hersteller angegebenen Nennwärmeleistung des Heizkessels.

Bei den Messungen wurden, unabhängig vom Brennstoff und der eingestellten Wärmeleistung des Heizkessels, im Dauerbetrieb niedrige CO- und VOC-Emissionen ermittelt. Auch die gemessenen Staubkonzentrationen waren mit Werten < 25 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) vergleichsweise niedrig. Es ergaben sich geringe Unterschiede zwischen den Brennstoffen Getreidekörnern und Strohpellets. Deutlich vom Brennstoff anhängig sind die NO_x- und HCl-Emissionen. Höhere Gehalte von Stickstoff und Cl im Brennstoff führen auch zu entsprechend höheren Emissionen. Besonders auffällig sind die NO_x-Konzentrationen bei der Verbrennung von Getreidekörnern, die nur knapp unter 1.000 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) liegen.

Für die Bestimmung der Größenverteilung der emittierten Partikel wurde ein 8-stufiger Kaskadenimpaktor mit Endfilter (Typ: Andersen Mark III) verwendet. Die gemessenen Partikelgrößenverteilungen für Winterweizen und Strohpellets sind in **Bild 4.4** dargestellt. Bei der Verbrennung von Winterweizen und Strohpellets im Agro 40 wurden bei beiden Brennstoffen rund 70 % der Partikelmasse auf dem Endfilter abgeschieden und weisen somit aerodynamische Durchmesser $< 0,4 \mu\text{m}$ auf. Nahezu 90 % der emittierten Partikel haben einen aerodynamische Durchmesser von $< 1 \mu\text{m}$.

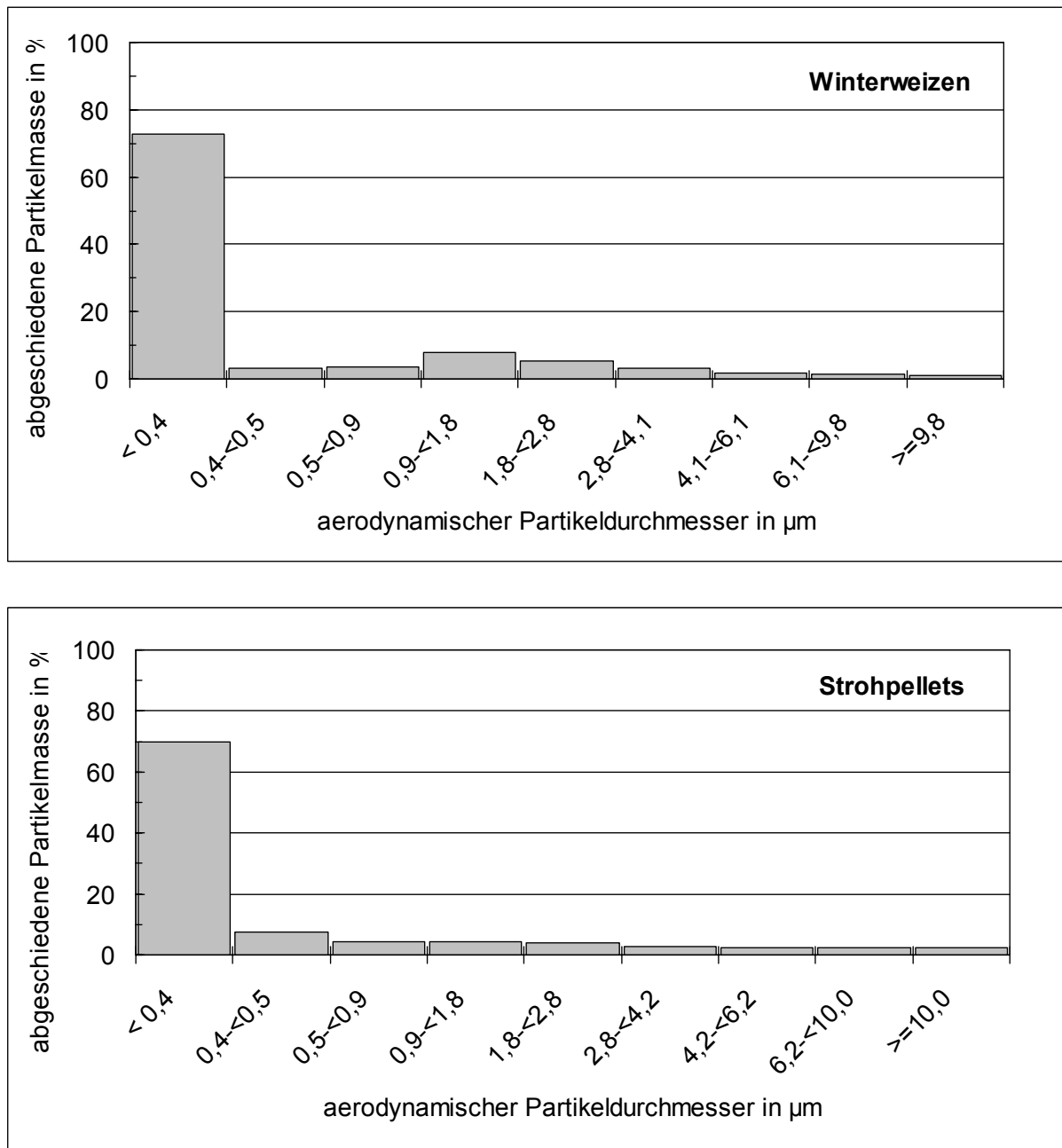


Bild 4.4: Größenverteilung der Partikel beim Heizkessel Agro 40 bei der Verbrennung von Winterweizen und Strohpellets (Betrieb im Bereich der Nennwärmeleistung)

In **Tabelle 4.5** sind für den Agroflam-Heizkessel die Ergebnisse der Analysen der Verbrennungsrückstände aufgeführt.

Tabelle 4.5: Analysen der Verbrennungsrückstände - Heizkessel Agro 40 (Feldmessungen)

Verbrennungsrückstände *	Wintergerste	Winterweizen	Strohpellets **
in Massen-%, Bezug: Asche wie aus Aschebehälter entnommen			
Kohlenstoff (C)	43,2	72,0	39,7
Wasserstoff (H)	1,3	1,5	1,5
Stickstoff (N)	4,0	4,2	0,5
in Massen-%, Bezug: wasserfreie Brennstoffasche			
Siliziumoxid (SiO ₂)	18,5	7,7	53,8
Calciumoxid (CaO)	3,6	3,3	5,1
Magnesiumoxid (MgO)	8,3	11,5	2,1
Kaliumoxid (K ₂ O)	24,3	30,0	23,4
Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)	37,8	40,7	2,0
Mangan (Mn)	0,10	0,22	0,03

* aus dem Aschebehälter des Heizkessels entnommen

** Strohpellets aus Weizenstroh

Aufgrund des unvollständigen Brennstoffausbrandes weisen die Verbrennungsrückstände noch höhere Gehalte an Kohlenstoff auf. Dies stellt ein Heizwertverlust dar und erhöht den Anfall an Verbrennungsrückständen, die entsorgt werden müssen. Bei den Getreidebrennstoffen sind die Hauptbestandteile der kohlenstofffreien Brennstoffasche Kaliumoxid und Phosphorpentoxid, bei den Strohpellets sind dies Siliziumoxid und Kaliumoxid.

4.4 Feldmessungen am Heizkessel Passat Compact C8

Beim untersuchten Passat-Heizkessel handelt es sich um eine Rostfeuerung, bei der Brennstoff über einen mechanischen Schuboden in die Brennkammer eingebracht wird. Verbrennungsluft wird als Primärluft unter dem Rost und als Sekundärluft oberhalb des Brennstoffbettes zugeführt. Nach Angaben des Kesselherstellers kann die Feuerung wahlweise mit Hackschnitzeln, Holzpellets oder Getreidereststoffen betrieben werden. Im nachfolgenden **Bild 4.5** ist der Kessel mit Feuerraum und Wärmetauscher abgebildet und in der **Tabelle 4.6** sind die wesentlichen Daten der Feuerungsanlage aufgeführt.

Die Kesselleistung wird in 3 Stufen (Stufe 2 – maximale Leistung - Vollast, Stufe 1 – Teillast, Feuerhaltung oder Gluterhaltung) dem aktuellen Wärmebedarf angepasst, Führungsgröße ist die Kesselwassertemperatur. Das Saugzuggebläse wurde, da eine vorhandene Verbrennungsregelung (Sauerstoff-Regelung) während den Messungen nicht aktiviert war, in Abhängigkeit der Kesselleistung über fest eingestellte Parameter geregelt. Wird keine Wärme mehr aus dem Heizkreis entnommen, schaltet die Anlage auf Gluterhaltung, das Saugzuggebläse wird dann abgeschaltet.



Bild 4.5: Ansicht des Passat-Heizkessel Compact C8 mit Wärmetauscher und Feuerraum

Tabelle 4.6: Angaben zum installierten Passat-Heizkessel

Hersteller	Passat Energi A/S, DK
Typ	Compact C8
Bauart	Rostfeuerung mit Schubbodeneintrag
Baujahr	2002
Nennwärmeleistung in kW	94 (mit Hackschnitzeln)
Wasserinhalt in l	290
Kesselklasse nach EN 303-5	3
Leistungsbedarf in W	145
Betrieb	Leistungsregelung mittels Kesselwassertemperatur. Verbrennungsregelung mit Sauerstoffmessung im Abgas nicht aktiviert

An diesem Passat-Heizkessel wurden auch das Betriebsverhalten und die Abscheideleistung des Edelstahl-Gewebefilters untersucht. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 5 beschrieben.

Untersuchte Brennstoffe

Bei den Verbrennungsversuchen am Passat-Heizkessel wurden als Brennstoffe Getreideausputz (Nebenprodukt der Getreidereinigung - Austrag aus Aspirateur und Steigsichter, Mischung aus Weizen- und Gersteausputz), pelletierte Reinigungsreste (Reinigungspellets - Stäube der Getreidereinigung vor dem Mahlprozess - Weißreinigung), Weizenpellets mit Kalkzugabe und Futterweizen eingesetzt. In **Tabelle 4.7** sind wesentliche Merkmale der untersuchten Brennstoffe zusammengestellt.

Tabelle 4.7: Wesentliche Merkmale der am Compact C 8 untersuchten Brennstoffe

Brennstoff	Getreideausputz	Reinigungspellets	Weizenpellets *	Futterweizen
Heizwert H _U in kJ/kg	15.272	14.893	14.143	14.903
in Massen-%, Bezug: verfeuerter Brennstoff				
Wasser	11,6	10,2	14,1	10,5
Asche	2,6	4,4	2,9	1,7
Kohlenstoff (C)	40,3	40,4	38,9	40,6
Wasserstoff (H)	6,4	6,6	6,5	6,8
Sauerstoff (O)	37,0	36,2	35,4	38,4
Stickstoff (N)	2,0	2,2	2,1	2,0
Schwefel (S) **	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Chlor (Cl)	0,08	0,10	0,13	0,05
in Massen-%, Bezug: wasserfreier Brennstoff				
flüchtige Stoffe	78,8	77,5	79	79,7
Fixed C	18,2	17,6	17,9	18,5
Asche-Schmelzverhalten in °C				
Erweichungstemperatur	900	1.170	820	880
Fließtemperatur	1.250	1.280	>1.500	1.070
in Massen-%, Bezug: wasserfreie Brennstoffasche				
Siliziumoxid (SiO ₂)	33,1	18,0	1,9	12,4
Calciumoxid (CaO)	4,7	27,9	35,9	3,8
Magnesiumoxid (MgO)	7,2	4,6	5,2	11,6
Kaliumoxid (K ₂ O)	24,2	12,2	12,9	27,6
Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)	25,0	18,3	19,7	41,0
Mangan (Mn)	0,10	0,15	0,12	0,21

* Weizenpellets mit Kalkzugabe

** Analysenwerte liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze

Die Heizwerte und Wassergehalte der verschiedenen Brennstoffe sind ähnlich, größere Unterschiede zwischen den Brennstoffen sind in den Asche- und Chlorgehalten vorhanden. So weisen die verfeuerten Reinigungspellets mit 4,4 Massen-% Asche und die Weizenpellets mit 0,13 Massen-% Chlor die höchsten Werte auf. Im Futterweizen liegt der Asche- bzw. Chlorgehalt am niedrigsten. Die Pelletierung der Reinigungsreste und des Weizens war ohne Zuschlagsstoffe möglich, Kalk wurde nur beim Weizen beigemischt.

Ergebnisse

Die Messungen am Passat-Heizkessel wurden bei verschiedenen Wärmeleistungen durchgeführt. Dargestellt sind jeweils Mittelwerte einer unterschiedlichen Anzahl von Messungen, wobei Wärmeleistungen zwischen 50 und 75 und > 75 % der Nennwärmeleistung des Heizkessels zusammengefasst wurden. In **Tabelle 4.8** sind die Messergebnisse für die untersuchten Brennstoffe aufgelistet.

Tabelle 4.8: Ergebnisse der Felduntersuchungen am Heizkessel Passat Compact C8

Passat Compact C8		Getreideausputz		Reinigungspellets	Weizenpellets		Futterweizen
Heizwert	in kJ/kg	15.272		14.893	14.143		14.903
Wassergehalt	in Massen-%	11,6		10,2	14,1		10,5
Stickstoffgehalt		2,0		2,2	2,1		2,0
Chlorgehalt		0,08		0,10	0,13		0,05
Versuchsdauer	in min	15 / 30		15 / 30	15 / 30		15 / 30
WL in % der Nennwärmeleistung		> 75	50 - 75	> 75	> 75	50 - 75	50 - 75
CO ₂	in Vol%	10,9	7,3	8,2	10,4	9,2	5,9
CO	in mg/m ³ bezogen auf 13 Vol% O ₂	96	211	39	240	248	866
VOC als C		2	2	1	5	3	167
NO _x als NO ₂		599	711	509	629	648	795
Staub		214	279	746	171	206	402
HCl *		87	62	30	66	59	20

* Wärmeleistung (WL) bei Reinigungspellets zwischen 68 und 72 % der Nennwärmeleistung

Mit abnehmender Wärmeleistung der Feuerungsanlage nimmt beim Getreideausputz und bei den Weizenpellets auch die CO₂-Konzentration im Abgas ab und dem zu Folge der Luftüberschuss zu. Beim Futterweizen konnte ein störungsfreier Betrieb nicht eingestellt werden, weshalb die mittlere CO₂-Konzentration so gering ist. Aufgrund des Ascheschmelzverhaltens des verfeuerten Futterweizens (Ascheerweichungstemperatur 880 °C, Fließtemperatur 1.070 °C) kam es hier zu großflächigen Verschlackungen im Brennstoffbett, wodurch zum einen die Nennwärmeleistung des Heizkessels nicht mehr erreicht werden konnte und zum anderen ein längerer störungsfreier Betrieb unmöglich war. Die Folge waren erhöhte Emissionen von CO und vor allem VOC. Bei den anderen Brennstoffen waren die VOC-Emissionen durchweg sehr gering, die CO-Konzentrationen waren vom Brennstoff und der Wärmeleistung des Kessels abhängig, lagen aber noch auf vergleichsweise niedrigem Niveau.

Im Mittel lagen die Staubkonzentrationen, bezogen auf 13 Vol% O₂, in einem Bereich von etwa 170 (Weizenpellets) bis über 700 mg/m³ (Reinigungspellets) und damit durchgängig über dem gültigen Staubgrenzwert der 1. BImSchV von 150 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) für Holzbrennstoffe oder Stroh bzw. strohähnliche Brennstoffe. Die beiden eingesetzten Pelletsbrennstoffe wurden für diese Versuche hergestellt. Es sollte untersucht werden, ob sich staubförmige Reinigungsreste nach einer Pelletierung als Brennstoff in derartigen Anlagen einsetzen lassen und ob Getreidekörner nach einer Aufbereitung (Pelletierung und Kalkzugabe) in Rostfeuerungen eingesetzt werden können.

Mit den beiden Pelletsqualitäten war im Prinzip ein störungsfreier Betrieb der Anlage möglich, allerdings sollten die Reinigungspellets aufgrund der extrem hohen Staubkonzentrationen im Abgas und der schnellen Verschmutzung des Wärmetauschers nicht als Brennstoff in diesen kleinen Anlagen eingesetzt werden (siehe **Bild 4.6**).



Bild 4.6: Wärmetauscherverschmutzung des Passat-Heizkessel Compact C8 nach einem mehrstündigen Betrieb mit Reinigungspellets

Die Höhe der NO_x - und HCl-Emissionen werden einerseits vom N- und Cl-Gehalt im Brennstoff und andererseits von den aktuellen Verbrennungsbedingungen (z.B. Temperatur- und Sauerstoffverteilung im Brennstoffbett) bestimmt. Mit zunehmenden Konzentrationen dieser Stoffe im Brennstoff steigen in der Tendenz auch die Abgaskonzentrationen an. Dieser Zusammenhang kann aber durch die Verbrennungsbedingungen oder die Ascheeigenschaften überlagert werden. Dies ist in **Bild 4.7** gezeigt, in dem die mittleren NO_x - bzw. HCl-Konzentrationen im Abgas für die Wärmeleistungen 50 bis 75 % und > 75 % der Nennwärmeleistung über den Stickstoff- bzw. Chlorkonzentrationen im Brennstoff dargestellt sind.

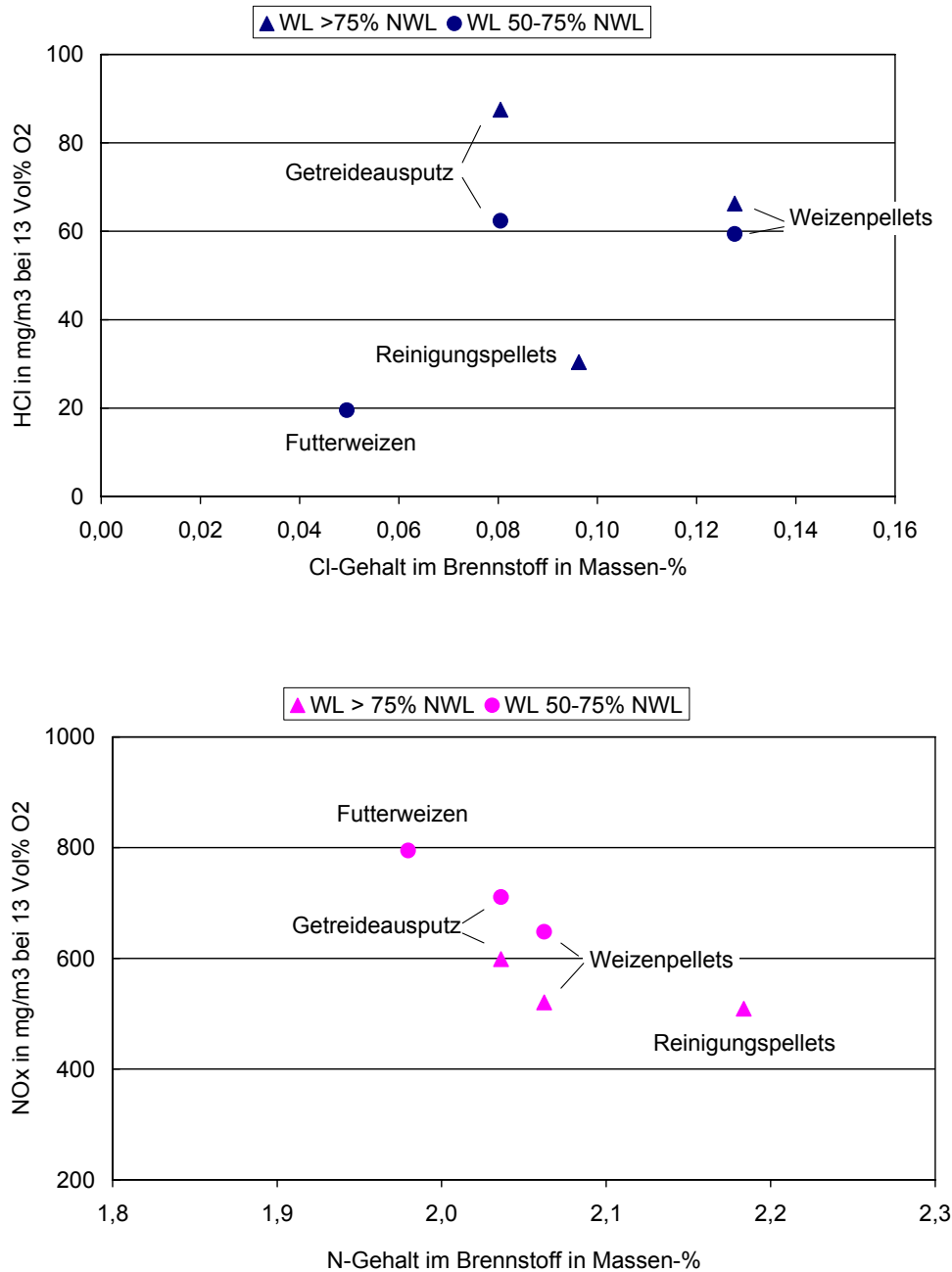


Bild 4.7: Mittelwerte der HCl- und NO_x-Konzentrationen im Abgas für die Wärmeleistungen (WL) > 75 % und 50 bis 75 % der Nennwärmeleistung (NWL) in Abhängigkeit der Chlor- und Stickstoffgehalte in den Brennstoffen

Futterweizen mit einem Chlorgehalt von 0,05 Massen-% weist mit 20 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) die niedrigste HCl-Konzentration im Abgas auf. Mit zunehmendem Chlorgehalt im Brennstoff steigen die mittleren HCl-Emissionen in der Tendenz an. Der Anstieg ist allerdings nicht durchgängig proportional zur Chlorkonzentration im Brennstoff. So wurden bei den Weizenpellets mit dem höchsten Chlorgehalt im Brennstoff nicht die höchsten Chlorkonzentrationen im Abgas gemessen. Ursache hierfür könnten zum einen die unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen im Bereich des Brennstoffbettes und die verschiedenen Aschegehalte

der Brennstoffe sein, wodurch sich unterschiedliche Konvertierungs- und Einbindungsraten für Chlor ergeben können. Ebenso könnten die Art der Chloreinbindung in den Brennstoff und die Ascheeigenschaften eine Rolle spielen.

Die Umwandlung von Brennstoff-Stickstoff zu NO, die weitaus überwiegend die NO-Emission dieser Feuerungsanlagen bestimmt (thermisches oder promptes NO spielt nur eine untergeordnete Rolle) hängt, ebenfalls von den Verbrennungsbedingungen und von der Art der Stickstoffeinbindung in den Brennstoff ab. Vor allem die Verbrennungsbedingungen im Bereich des Brennstoffbettes (Sauerstoff- und Temperaturverteilung, Aufenthaltszeiten) bestimmen das Niveau der NO_x-Emissionen. So nimmt bei abnehmender Wärmeleistung des Kessels die CO₂-Konzentration im Abgas ebenfalls ab und damit die O₂-Konzentration zu. Der höhere Luftüberschuss in der Feuerung bewirkt eine höhere Umsetzungsrate von Brennstoffstickstoff zu NO und damit höhere NO_x-Konzentrationen im Abgas, wie am Beispiel des Getreideausputzes und der Weizenpellets gezeigt ist.

Beim Passat-Heizkessel wurde ebenfalls die Größenverteilung der emittierten Partikel mit dem 8-stufiger Kaskadenimpaktor mit Endfilter (Typ: Andersen Mark III) ermittelt. Die gemessenen Partikelgrößenverteilungen für Getreideausputz und Weizenpellets sind in **Bild 4.8** dargestellt. Hierbei wurden bei den beiden Brennstoffen nur 40 % der Partikelmasse auf dem Endfilter abgeschieden, diese weisen aerodynamische Durchmesser $< 0,3$ bzw. $< 0,4 \mu\text{m}$ auf. Beim Getreideausputz weisen nur rund 60 % der emittierten Partikel einen aerodynamischen Durchmesser von $< 1 \mu\text{m}$ auf, bei den Weizenpellets sind dies rund 70 % der Partikelmasse.

Während den Verbrennungsversuchen mit Getreideausputz und Reinigungspellets wurden auch Ascheproben aus dem Feuerraum im Bereich des Ascheaustrags entnommen und analysiert. Die Versuche mit Futterweizen konnten nicht lange genug durchgeführt werden, um Ascheproben zu entnehmen. In **Tabelle 4.9** sind die Ergebnisse der Ascheanalysen aufgeführt.

Bei der Verfeuerung von Getreideausputz konnten Verbackungen im Brennstoffbett nicht gänzlich verhindert werden, wodurch kein vollständiger Ausbrand des Brennstoffes erzielt wurde. Hierdurch weist der Verbrennungsrückstand einen vergleichsweise hohen Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt auf. Wesentliche Bestandteile sind Oxide vom Silizium, Kalium und Phosphor. Bei den Verbrennungsrückständen der Reinigungspellets war der Hauptbestandteil hingegen Calciumoxid. Bei den Weizenpellets waren die Hauptbestandteile in den Rückständen Silizium-, Kalzium-, Kalium- und Phosphorpentoxid. Die Konzentrationen von Phosphorpentoxid in den Verbrennungsrückständen lagen bei allen untersuchten Brennstoffen in vergleichbarer Größenordnung.

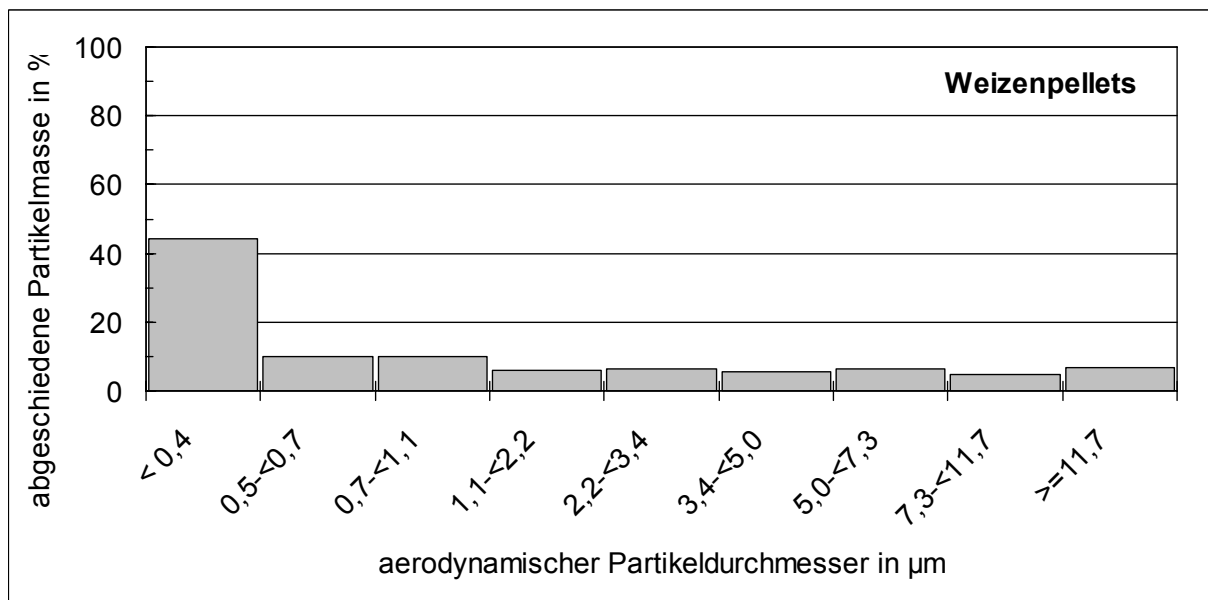
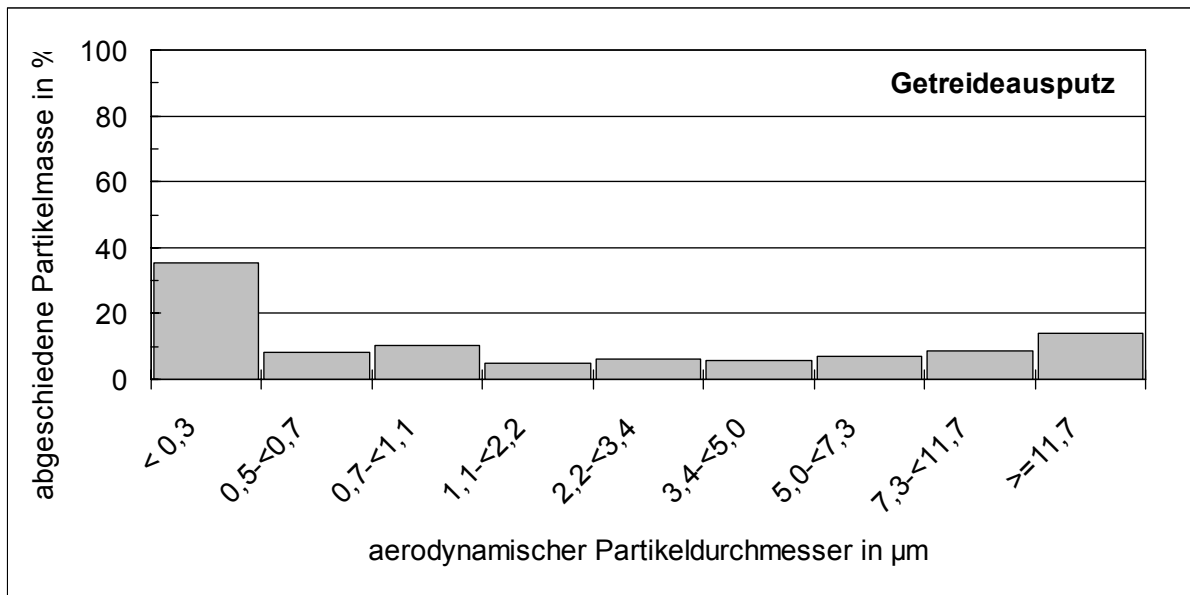


Bild 4.8: Größenverteilung der Partikel beim Heizkessel Compact C8 bei der Verbrennung von Getreideausputz und Weizenpellets (Betrieb bei 101 % (Getreideausputz) bzw. 74 % (Weizenpellets) der Nennwärmeleistung)

Tabelle 4.9: Analysen der Verbrennungsrückstände - Heizkessel Compact C8 (Feldmessungen)

Verbrennungsrückstände *	Getreideausputz	Reinigungspellets	Weizenpellets **
in Massen-%, Bezug: Asche wie aus Feuerraum entnommen			
Kohlenstoff (C)	16,4	1,0	5,3
Wasserstoff (H)	< 0,3	0,4	0,4
Stickstoff (N)	0,7	< 0,3	0,3
Chlor (Cl)	0,08	0,05	0,09
in Massen-%, Bezug: wasserfreie Brennstoffasche			
Siliziumoxid (SiO ₂)	39,2	3,5	10,9
Calciumoxid (CaO)	7,3	46,9	37,7
Magnesiumoxid (MgO)	7,0	7,0	7,1
Kaliumoxid (K ₂ O)	19,2	7,7	13,2
Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)	20,2	24,3	24,8
Mangan (Mn)	0,12	0,16	0,15

* aus dem Feuerraum des Heizkessels im Bereich des Ascheaustrags entnommen

** Weizenpellets mit Kalkzugabe

5 Einsatz von Edelstahlgewebefiltern zur Abgasreinigung

5.1 Untersuchungen am Heizkessel Passat Compact C8

Am Passat-Heizkessel Compact C8 wurde als externer Staubabscheider ein Edelstahlgewebefilter eingesetzt. Dieser war als VersuchsfILTER für einen Teilstrom des Abgases (ca. 50 % des Abgasvolumenstroms bei Nennwärmeleistung) dimensioniert. Der Abgasteilstrom wurde direkt am Kesselausgang entnommen. Das Filter besitzt 3 unabhängige Filterpatronen, die mit einer innen liegenden elektrischen Beheizung versehen sind. Die Filterpatronen waren in separaten wärmeisolierten Kammern untergebracht. Das Abgas (Rohgas) strömte von außen nach innen. Das gereinigte Gas (Reingas) wurde mit einem Saugzuggebläse in einen Behelfsschornstein gefördert. **Bild 5.1** zeigt den Versuchsaufbau und eine Filterpatrone in der geöffneten Filterkammer.

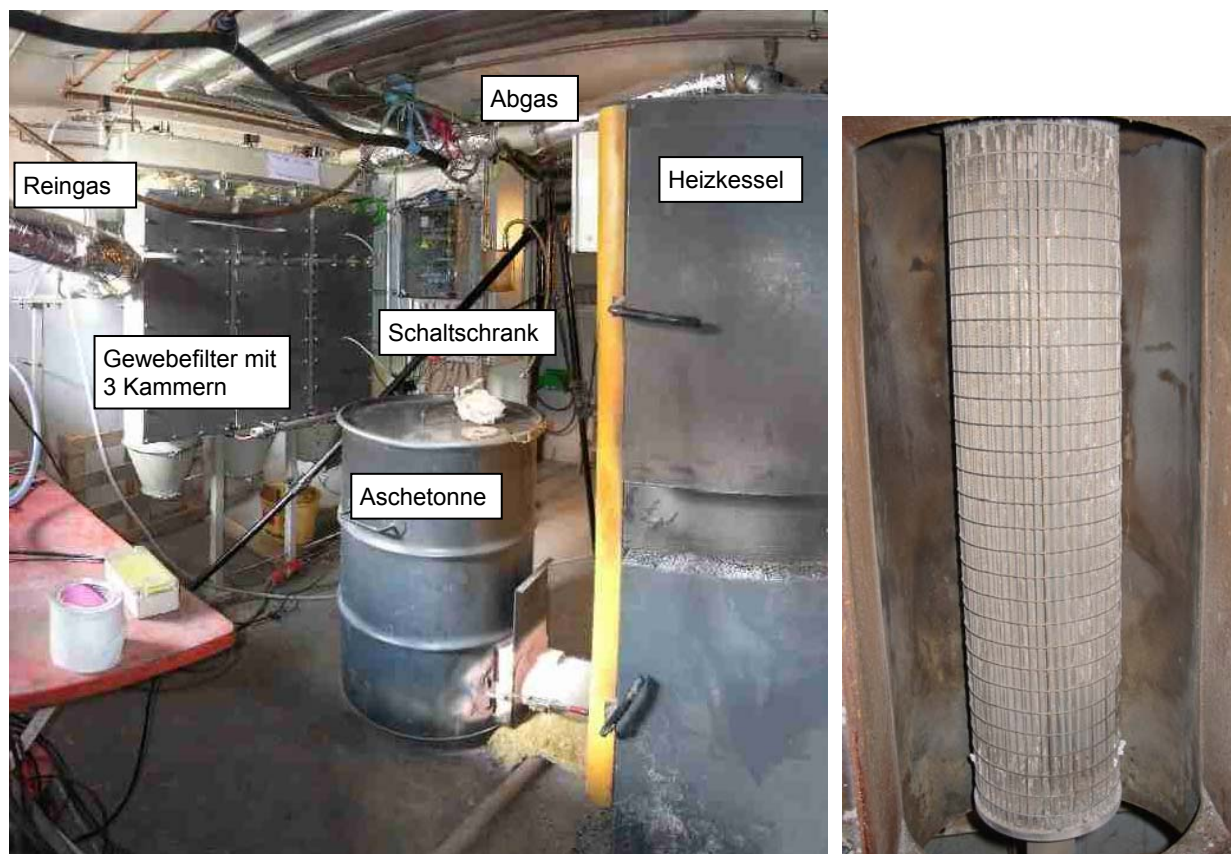


Bild 5.1: Aufbau des Edelstahlgewebefilters mit Schaltschrank sowie Abgas- und Reingasrohren im Heizraum des Passat-Heizkessels Compact C8 und Filterpatrone aus Edelstahlgewebe in geöffneten Filterkammer

In **Tabelle 5.1** sind die wesentlichen Daten des eingesetzten Edelstahlgewebefilters aufgeführt. Die Abreinigung der Filterpatronen erfolgte durch Druckluft. Die Abreinigungsintervalle konnten über eine einstellbare Zeitsteuerung festgelegt werden.

Tabelle 5.1: Angaben zum eingesetzten Edelstahl-Gewebefilter

Hersteller	Oskar Winkel Filtertechnik, Amberg
Typ	VersuchsfILTER-Prototyp
Bauart	Edelstahl-Gewebefilter mit elektrischer Beheizung und Druckluftabreinigung
Baujahr	2005
Anzahl Filterpatronen	3
Filterfläche je Filterpatrone in m ²	1,25
Auslegungsdaten	
Gasdurchsatz in m ³ /h bei 130 °C	110 (bei Betriebsbedingungen – feucht)
spez. Filterflächenbelastung in m ³ /h	44
Abreinigungsdruck in bar	4-6
Filterwiderstand in Pa (in mbar)	ca. 1.200 – 1.400 (ca. 12 - 14)

Die Untersuchungen zum Abreinigungs- und Betriebsverhalten des Filters wurden mit den in Tabelle 4.7 aufgeführten Brennstoffen bei unterschiedlichen Wärmeleistungen des Heizkessels durchgeführt. Im Reingas, d.h. nach dem Staubfilter, wurden bei allen Brennstoffen und allen Betriebsbedingungen durchgängig **Staubkonzentrationen unter 10 mg/m³** (bei 13 Vol% O₂) gemessen. Da die Staubkonzentrationen im Reingas unabhängig von der Staub-Eingangskonzentration und der Betriebsweise des Filters (Staubmessung mit oder ohne Abreinigung, Abreinigungsdruck) immer auf diesem niedrigen Niveau lagen und keine Zusammenhänge zu Betriebsparametern ersichtlich sind, wird auf eine grafische bzw. tabellarische Darstellung der gemessenen Staubkonzentrationen verzichtet. Mit diesem Staubfilter können auch die strengeren Anforderungen der TA-Luft (2002) sicher eingehalten werden. In Bezug auf die Abscheideleistung hat sich das Filter mit Edelmetallgewebe überzeugend bewährt.

Dies gilt auch für das Abreinigungs- und Betriebsverhalten des Filters mit dem Brennstoff Getreideausputz. Hier wurden auch nach mehrmonatigem Praxisbetrieb (ab September bis Anfang Dezember 2005) keine Minderung der Abscheideleistung, kein ungewöhnlicher Anstieg des Druckverlustes und keine Probleme mit der Filterabreinigung festgestellt. Nicht mehr entfernbare Anbackungen oder Verklebungen traten nicht auf. Teerablagerungen oder Korrosionserscheinungen an den Filterelementen konnten nach Ende der Messungen nicht festgestellt werden. Die gewählte Filterkonstruktion und die Filterbetriebsweise sind für diesen Brennstoff grundsätzlich praxistauglich.

Für die untersuchten Brennstoffe Weizenpellets und Futterweizen war die Betriebszeit des Filters vergleichsweise kurz, so dass eine abschließende Bewertung nicht möglich ist. Während des Filterbetriebs ließen sich die abgeschiedenen Stäube aus der Verbrennung von

Weizenpellets und Futterweizen auch wieder abreinigen. Futterweizen konnte, da für diese Heizkessel überhaupt nicht geeignet, nur wenige Stunden verbrannt werden. Diese kurze Betriebszeit lässt Rückschlüsse auf das Betriebsverhalten des Filters nicht zu.

Der bei der Verbrennung der Reinigungspellets entstandene Staub wurde zwar ebenfalls nahezu vollständig auf dem Gewebefilter abgeschieden, konnte aber durch Druckluft nicht mehr gut abgereinigt werden. So bildete sich im Versuchsverlauf ein immer mehr anwachsender Filterkuchen auf dem Gewebe aus, der schließlich zu einem zu hohen Druckabfall am Filter führte. Nach Ausbau der Filterelemente konnten diese problemlos vollständig mit einer Bürste gereinigt werden. Die Stäube erwiesen sich als stark hygroskopisch mit klebrigen Eigenschaften. Letztlich ist der Brennstoff damit für den Betrieb der Feuerung mit Gewebefilter nicht geeignet.

Untersuchungsprogramm

Die 3 unabhängigen Filterpatronen des Gewebefilters waren in separaten wärmeisolierten Kammern untergebracht. Diese Kammern konnten einzeln mittels Klappen abgesperrt werden. Hierdurch war es möglich, zum einen die Filterauslegung (Filterflächenbelastung) zu überprüfen und zum anderen konnte die Filterkammer während der Abreinigung abgeschottert werden. An der Steuerung zur Abreinigung der Filter mit Druckluft konnten ebenfalls Parameter (z.B. Impulsdauer der Druckluft, Anzahl der Druckluftstöße) variiert werden. Ebenso konnte der Abreinigungsdruck zwischen 4 bis 6 bar verändert werden. In einer mehrwöchigen Messkampagne wurden unterschiedliche Einstellungen der Filterparameter mit den verschiedenen Brennstoffen intensiv untersucht. Das Versuchsprogramm ist zusammengefasst in **Tabelle 5.2** aufgelistet.

Tabelle 5.2: Versuchsprogramm am Edelstahlgewebefilter

Datum	Brennstoff	Filterbelastung	Anzahl beaufschlagte Filterpatronen	Klappe bei Reinigung	Reinigungsintervall	Parameter Filterabreinigung	Messstelle
17.06.05	Getreideausputz	gering	3	zu	jeweils ein / aus	Variationen von Druck, Impulsdauer und Anzahl Druckluftstöße	jeweils Roh- und Reingas
20.06.05		gering	3	zu			
21.06.05		gering	3	offen			
22.06.05		gering	3	offen			
04.07.05		gering	3	offen			
06.07.05		sehr hoch	1	zu			
07.07.05		hoch	2	offen			
08.07.05	Weizenpellets	hoch	2	offen			
11.07.05		hoch	2	zu			
12.07.05		hoch	2	offen			
12.07.05		gering	3	offen			
13.07.05		gering	3	zu			
13.07.05	Reinigungspellets	gering	3	zu			
13.07.05		gering	3	offen			
18.07.05		hoch	2	offen			
19.07.05		hoch	2	zu			
20.07.05		hoch	2	zu			
20.07.05	Futterweizen	gering	3	zu			

Die Sollwerttemperatur der Filterbeheizung wurde konstant gehalten und so gewählt, dass eine Wasserdampfkondensation auf den Filterelementen beim Anfahren des Heizkessels oder im Teillastbetrieb nicht auftrat.

Insgesamt wurden rund 70 Versuche mit 15 bzw. 30 Minuten Versuchsdauer mit unterschiedlichsten Parametervariationen gefahren.

Ergebnisse der Parametervariationen

Die **Filterflächenbelastung** wurde etwa um den Faktor 2,2 variiert. Mit zunehmender Filterflächenbelastung steigt der Druckverlust erwartungsgemäß, wodurch höhere Gebläseleistungen erforderlich werden. **Bild 5.2** zeigt den Zusammenhang zwischen Druckverlust und spezifischer Filterflächenbelastung für den untersuchten Gewebefilter.

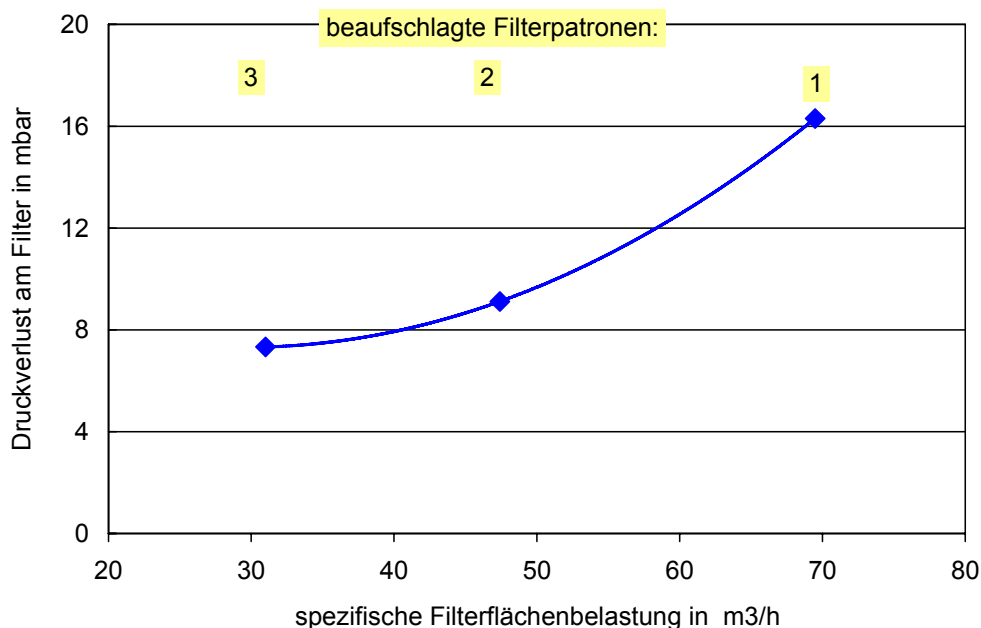


Bild 5.2: Zusammenhang zwischen Druckverlust an einem Filterelement und spezifischer Filterflächenbelastung beim eingesetzten Edelstahlgewebefilter

Im Auslegungspunkt (siehe Tabelle 5.1) bei einer spezifischen Filterflächenbelastung von 44 m³/h wurde ein Druckverlust von 12 bis 14 mbar angenommen. Beim Einsatz von 2 Filterpatronen wurde eine spezifische Filterflächenbelastung von rund 47 m³/h und ein Druckverlust von im Mittel 9 mbar gemessen. Dies zeigt, dass die Filterauslegung gut gewählt wurde, ein mittlerer Druckverlust in der Größenordnung von 10 mbar ist durchaus akzeptabel, da kostengünstige Gebläse verfügbar sind und die Betriebskosten nicht zu stark ansteigen.

Bei der Projektierung des Gewebefilters bestanden Bedenken, dass eine Abreinigung der Filterelemente mit Druckluft nicht gut funktionieren würde, wenn diese gleichzeitig mit Abgas

beaufschlagt werden. Deshalb wurden Versuche gefahren, bei denen die einzelnen Filterkammern während der Abreinigung abgeschottet wurden. Es hat sich allerdings gezeigt, dass unter den Bedingungen des Feldtests keine Unterschiede im Abreinigungsverhalten und im Verlauf des Unterdrucks zwischen den Reinigungsintervallen auftraten, wenn die Kammern während der Reinigung abgeschottet wurden.

Wenig Einfluss auf das Abreinigungsverhalten hatte auch die Variation der Impulsdauer der Druckluft und die Anzahl der Druckluftstöße. Für die meisten Versuche wurde eine Impulsdauer von 200 ms für den Druckluftstoß und 3 bis 5 Druckluftstöße je Reinigungsvorgang an einem Filterelement festgelegt. Die Häufigkeit der Abreinigung hängt von der Staubkonzentration im Rohgas und den Staubeigenschaften ab. Bei ungünstigen Staubeigenschaften (z.B. klebrige Stäube, sehr hoher Feinanteil), die zu sehr kompakten und dichten Filterkuchen auf der Filteroberfläche führen, muss der Filter öfters gereinigt werden. Dies ist am Beispiel für die Verbrennung von Weizenpellets in **Bild 5.3** gezeigt, bei denen die einzelnen Filterelemente etwa alle 10 Minuten abgereinigt werden mussten.

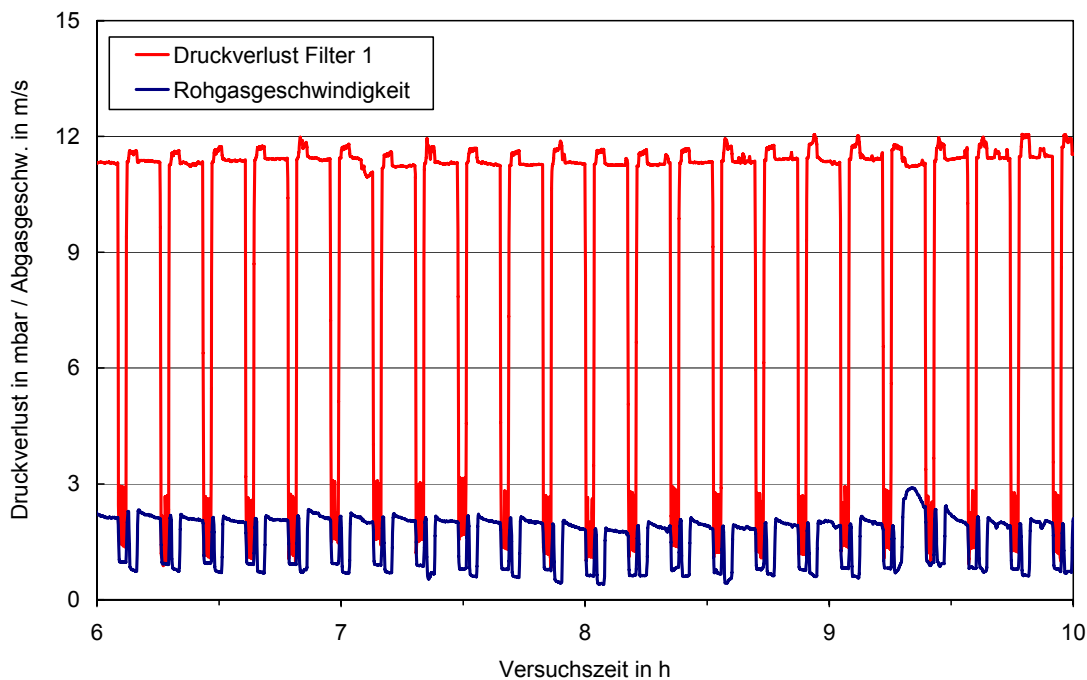


Bild 5.3: Verlauf von Druckverlust und Rohgasgeschwindigkeit am Gewebefilter bei der Verbrennung von Weizenpellets

Wesentlich längere Pausen zwischen den Abreinigungen konnten beim Getreideausputz eingestellt werden. Hier mussten die Filter etwa alle 60 bis 90 Minuten abgereinigt werden. Der optimale Reinigungsdruck lag bei etwa 5 bar. Ist der Druck für die Druckluft zu niedrig (z.B. 3 bar), erfolgt keine ausreichende Abreinigung der Filterelemente, was einen langsamen Anstieg des Druckverlustes über die Betriebszeit zur Folge hat.

5.2 Untersuchungen am Heizkessel Ökotherm Compact C0

Bei den bisherigen Untersuchungen am Passat-Heizkessel waren die möglichen Betriebszeiten für Getreidekörner aufgrund der mangelnden Eignung der Feuerungsanlage für diese Brennstoffe sehr kurz. Eine abschließende Bewertung der Filterreinigung für diesen Anwendungsfall war daher nicht möglich. Deshalb wurden weitere Untersuchungen an einem Heizkessel der Firma A.P. Bioenergietechnik GmbH vom Typ Ökotherm Compact C0 mit unterschiedlichen Getreidearten in Kombination mit einem Edelstahlgewebefilter durchgeführt. In **Bild 5.4** ist der eingesetzte Heizkessel schematisch dargestellt.

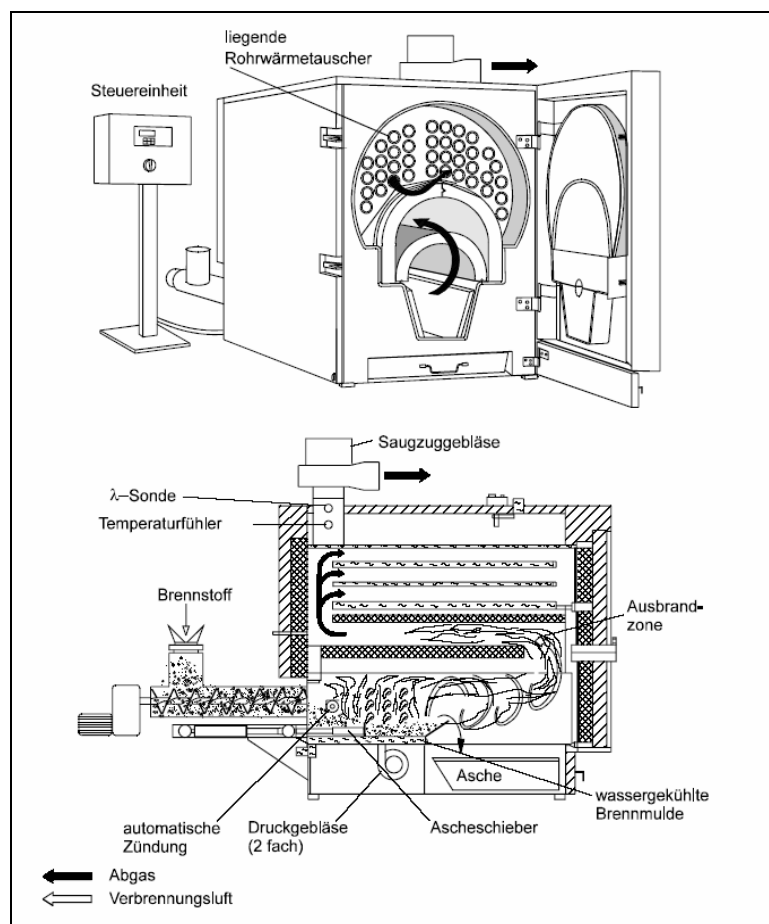


Bild 5.3: Schematische Darstellung der Feuerungsanlage Ökotherm Compact C0 (Launhardt et al., 2000)

Für diese Untersuchungen wurde ein Gewebefilter mit denselben 3 Filterpatronen wie beim Passat-Heizkessel eingesetzt, diesmal waren die Patronen allerdings in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Die Abreinigung erfolgte ebenfalls mit Druckluft, das Filtergehäuse war zusätzlich elektrisch beheizt, um eine Kondensation von Wasserdampf bei zu geringen Rohgastemperaturen (z.B. im Teillast- oder Gluterhaltbetrieb des Kessels) zu verhindern. Der Schaltschrank zur Filterabreinigung und Regelung der Filterheizung wurde von den Versuchen am Passat-Heizkessel übernommen. Zur Beaufschlagung des Gewebefilters wurde ein Teilstrom des Abgases direkt am Kesselausgang entnommen. Hierzu und zur Überwindung des Druckverlustes der Filterpatronen war das Filter mit einem eigenen Saugzuggeblä-

se ausgerüstet. Das **Bild 5.4** zeigt die Anordnung der Filterpatronen im Filtergehäuse und einen Ausschnitt der Filteroberfläche.

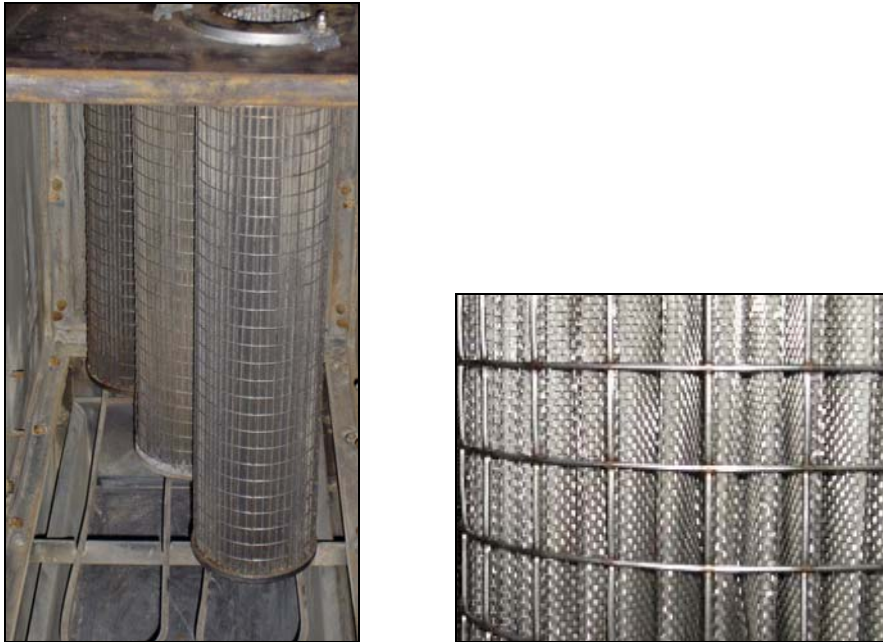


Bild 5.4: Anordnung der Filterpatronen im Filtergehäuse und Ausschnitt der Filteroberfläche bei den Versuchen am Heizkessel Ökotherm Compact C0

Um das Abreinigungsverhalten des Gewebefilters zu untersuchen, wurden insgesamt vier verschiedene Brennstoffe in der Feuerungsanlage eingesetzt und die jeweiligen Auswirkungen auf das Staubfilter überprüft. Nach jedem Versuch wurden Filterstaub- und Brennstoffproben entnommen und analysiert.

Eingesetzte Brennstoffe

Bei den Untersuchungen wurden Gerste-, Hafer- und Weizenkörner und Pellets aus Roggenstroh (Strohpellets) verbrannt. Die Strohpellets wurden als Referenzbrennstoff ausgewählt, um ein bei reinen Getreidebrennstoffen abweichendes Abreinigungsverhalten des Filters zu verdeutlichen. In **Tabelle 5.3** sind die wesentlichen Merkmale der untersuchten Brennstoffe zusammengestellt.

Die verschiedenen Brennstoffe unterscheiden sich nur wenig, größere Unterschiede sind bei den Wasser-, Asche- und Chlorgehalten vorhanden. So hat Gerste mit 13,9 % den höchsten Wassergehalt und Hafer mit 5,9 % niedrigsten. Insgesamt bewegt sich der Wassergehalt der Brennstoffe jedoch auf einem niedrigen Niveau, wodurch bei den Versuchen keine Probleme beim Zündvorgang auftraten.

Strohpellets haben etwa den 3fachen Chlorgehalt wie Weizen. Beim Aschegehalt heben sich die Strohpellets mit 4,6 % von den Getreidearten Hafer mit 2,7, Gerste mit 2,0 sowie Weizen mit 1,7 % deutlich ab. In Folge dessen war der Ascheanfall im Feuerraum bei den Strohpellets größer als bei den übrigen Brennstoffen.

Tabelle 5.3: Wesentliche Merkmale der am Heizkessel Ökotherm eingesetzten Brennstoffe

Brennstoff	Gerste	Strohpellets	Hafer	Weizen
Bezugszustand *	an	an	an	an
Wasser in %	13,9	11,5	5,9	7,6
Brennwert H _O in kJ/kg	16.447	17.239	17.660	17.055
Heizwert H _U in kJ/kg	14.983	15.776	16.262	15.549
Asche in %	2,0	4,6	2,7	1,7
Kohlenstoff (C) in %	40,8	42,9	43,3	42,0
Wasserstoff (H) in %	6,7	6,7	6,4	6,9
Stickstoff (N) in %	1,8	1,4	2,3	1,8
Chlor (Cl) in %	0,07	0,17	0,075	0,05
Bezugszustand*	a (550°C)	a (550°C)	a (550°C)	a (550°C)
Erweichungstemperatur in °C	720	710	620	710
Fließtemperatur in °C	1.320	1.230	1.100	830

* Bezugszustand: an = analysenfeucht, a (550°C) = Veraschungstemperatur 550 °C
% Massen-%

Die Ascheerweichungstemperaturen liegen mit Werten um 700°C auf einem durchweg niedrigen Niveau. Die daraus resultierende hohe Verschlackungsgefahr im Glutbett wurde aber durch den Einsatz der angepassten Feuerungsanlage in Grenzen gehalten. Ein störungsfreier Betrieb war daher während der gesamten Versuche möglich.

Betriebsbedingungen von Kessel und Gewebefilter

Die Kesselleistung kann im Bereich von 30 bis 100 % modulierend an den aktuellen Wärmebedarf angepasst werden. Vorhanden war auch ein Pufferspeicher mit einem Wasserinhalt von 1.700 l, der Heizkessel hat einen Wasserinhalt von 135 l. Beim Erreichen der Solltemperatur im Pufferspeicher schaltet die Anlage in den Gluterhaltungsbetrieb. Dieser ist aufgrund von schwelendem Getreide mit erhöhten Geruchsemissionen verbunden. Durch den stetigen Wechsel von Brenn- und Gluterhaltungsbetrieb des Heizkessels traten große Temperaturschwankungen im Abgas auf, die sich direkt am Kesselausgang von etwa 95 °C bis zu rund 265 °C bewegten. Diese Temperaturschwankungen im Abgas führten zu Änderungen des Volumenstroms und damit des Druckverlustes am Filter.

Der Abgasteilstrom durch das Gewebefilter wurde über die Drehzahl des Saugzuggebläses angepasst und möglichst konstant gehalten. Zur Volumenstromregelung wurde die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur am Kesselausgang und der Temperatur am Eingang des Filtergehäuses verwendet. Zur Bewertung der Abreinigungswirkung wurde das Filter ab einem Druckverlust von 6 mbar manuell mit Druckluft zwischen 5 und 6 bar gereinigt. Die Abreinigung wirkte sich auf die Änderung des Druckverlustes nicht sehr stark aus, der Rückgang des Differenzdruckes zwischen Filtereingang und Ausgang lag nach der Regeneration bei maximal 0,3 mbar. Ausschlaggebend für die Beurteilung eines guten bzw. schlechten

Abreinigungsverhaltens war somit weniger der Rückgang des Druckverlustes am Filter nach der Abreinigung, als vielmehr die abgereinigte Staubmenge im Aschekasten und das Aussehen der Filterpatronen (Filterkuchen) nach der Abreinigung. Anders stellte es sich dar, wenn sich die Filterpatronen nicht mehr abreinigen ließen. Der Differenzdruck stieg hier kontinuierlich auf Werte weit über 10 mbar an und nach der Abreinigung befand sich keine Asche im Aschekasten.

Abreinigungsverhalten des Gewebefilters

Das Gewebefilter konnte bei den Verbrennungsversuchen mit **Gerste** mit Druckluft nicht mehr abgereinigt werden. Auch eine Erhöhung des Abreinigungsdruckes führt zu keine Verbesserung, nach dem Abreinigungsverfahren war keine Abnahme des Filterdifferenzdrucks festzustellen und der Aschekasten enthielt keine Filterasche. Der Differenzdruck stieg während der Betriebszeit (~ 40 Stunden) stetig von 1,1 mbar (sauberer Filter bei Versuchsbeginn) auf Werte weit über 10 mbar an, der Abgasvolumenstrom durch das Filter nahm entsprechend stark ab. Die Filteroberfläche war nach Versuchsende gleichmäßig mit einer dünnen Staubschicht belegt, ein Filterkuchen hatte sich nicht gebildet. Das Filtergewebe ist noch gut zu erkennen, es zeigt sich keine übermäßige Belegung der Filteroberfläche mit Staub, siehe **Bild 5.5**.

Bei den Versuchen mit **Strohpellets** konnte das Gewebefilter mit Druckluft bei einem Abreinigungsdruck von 5 bar gut abgereinigt werden. Bei jeder Abreinigung nahm der Filterdifferenzdrucks um 0,1 bis 0,3 mbar ab. Die drei Patronen des Gewebefilters waren ungefähr 45 Stunden in Betrieb. Der Differenzdruck pendelte sich dann für den belegten Filter auf Werte um 9 mbar ein. Im Aschekasten befanden sich nach der Abreinigung schwarze, große, agglomerierte Staubplättchen. Auf der Filteroberfläche bildete sich ein dichter, poröser Filterkuchen. Die glänzenden Stellen auf der Filteroberfläche sind durch die Abreinigung der Staubschicht mit Druckluft entstanden. Das Filtergewebe ist kaum noch zu erkennen und auch das äußere Stützgewebe ist mit einer Staubschicht belegt, siehe Bild 5.5.

Mit Strohpellets kam es zu massiven Störungen in der Brennstoffzuführung, so dass ein kontinuierlicher Betrieb des Gewebefilters nur für den genannten Zeitraum möglich war.

Die Patronen des Gewebefilters konnten auch bei der Verbrennung von **Hafer** mit Druckluft gut gereinigt werden. Die Abreinigung erfolgte mit einem Druck von 5 bar. Nach jeder Abreinigung war eine Abnahme des Differenzdrucks um 0,1 bis 0,2 mbar zu beobachten. Das Gewebefilter war ungefähr 150 Stunden in Betrieb. Der Differenzdruck stieg dabei von 1,1 mbar bei Beginn der Versuche auf Werte um 9,5 mbar an und konnte dann durch die regelmäßige Reinigung konstant gehalten werden. Im Aschekasten befanden sich nach der Abreinigung schwarz-graue, agglomerierte Staubplättchen. Auf der Filteroberfläche bildete sich ein dicker, poröser Filterkuchen, siehe Bild 5.5.

Bei den Versuchen mit **Weizen** war eine Filterabreinigung mit Druckluft nicht möglich, auch nicht beim maximalen Reinigungsdruck von 6 bar. Nach dem Reinigungsvorgang nahm der Druckverlust der Filterpatronen nicht ab und es befand sich keine Filterasche im Aschekasten. Das Gewebefilter war ungefähr 149 Stunden in Betrieb, hierbei stieg der Filterdruckver-

lust von 1,1 mbar auf weit über 10 mbar an. Auf den Filterpatronen hatte sich eine feine, dünne Staubschicht gebildet, die Filterstrukturen sind noch gut zuerkennen, siehe Bild 5.5.

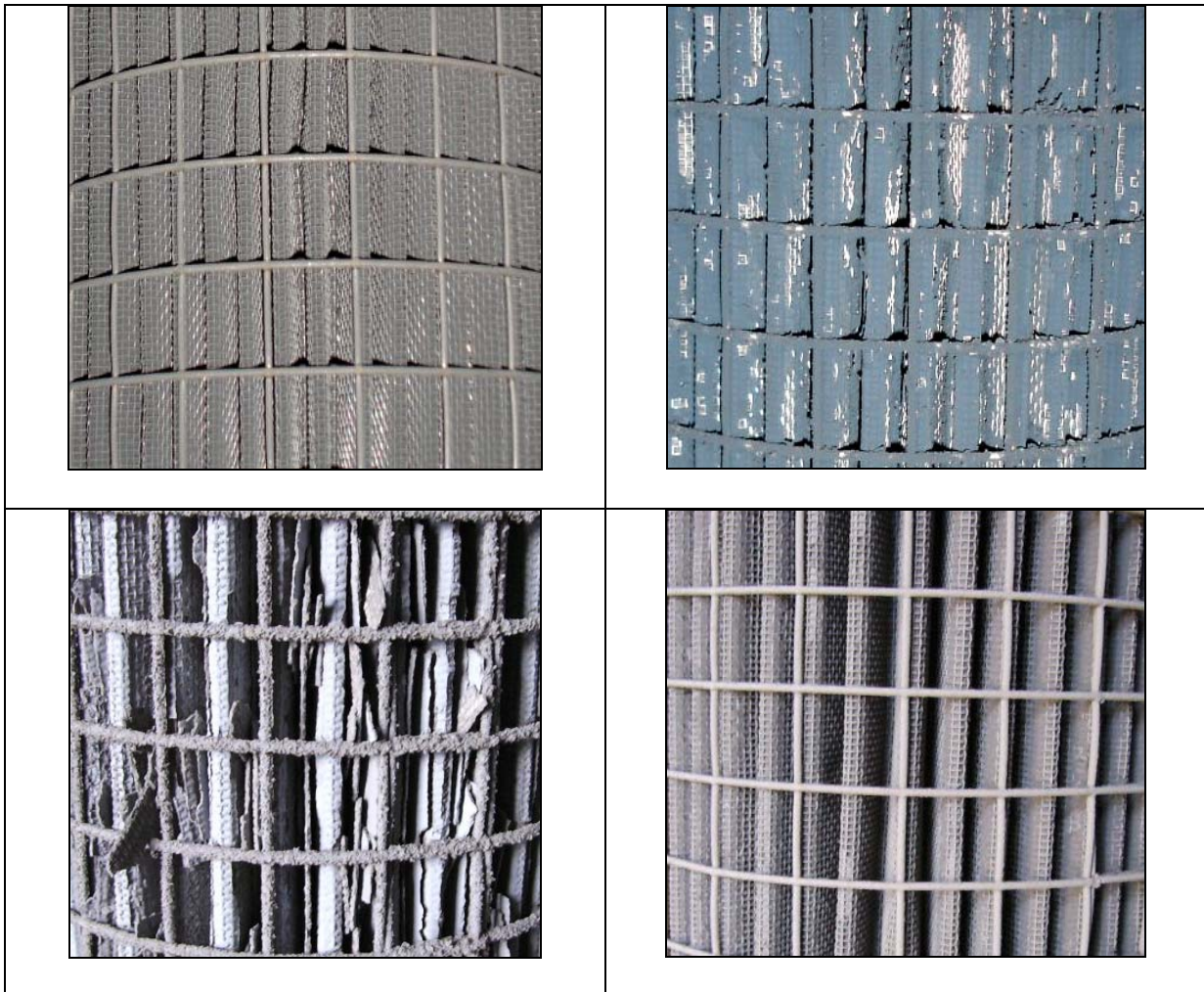


Bild 5.5: Oberflächen der Filterpatronen nach den Verbrennungsversuchen mit Gerste (oben links), Strohpellets (oben rechts), Hafer (unten links) und Weizen (unten rechts)

Ergebnisse der Filterstaubanalysen

Die Zusammensetzung der vier verschiedenen Filteraschen wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt und ist in **Tabelle 5.4** dargestellt.

Besonders auffällig ist der hohe Kohlenstoffanteil (25,1 Massen-%) in der Filterasche der Strohpellets, der sich aufgrund der schlechten Verbrennungsbedingungen für diesen Brennstoff ergab. Weitere wesentliche Bestandteile der Filteraschen sind Chlor, Kaliumoxid und Phosphorpentoxid. Auffallend sind die hohen Chlorgehalte von 24,9 und 18,9 Massen-% in den Filteraschen der Strohpellets und des Hafers im Vergleich zu den niedrigen Chlorgehalten von 2,3 und 2,8 % in den Filteraschen der Gerste und des Weizens. Bei den Phosphorpentoxidgehalten verhält es sich genau umgekehrt. So weisen die Filteraschen des Weizens und der Gerste mit 42,2 und 38,9 Massen-% erstaunlich hohe Anteile auf, während in der Filterasche der Strohpellets mit 5,6 % ein relativ niedriger Anteil zu finden ist. Die Filterasche

des Hafers nimmt beim Phosphorpentoxid mit einem Anteil von 20 Massen-% eine mittlere Position ein. Die Kaliumoxidgehalte liegen bei allen vier Filteraschen auf einem vergleichbar hohen Niveau im Bereich von rund 30 bis 40 %.

Tabelle 5.4: Wesentliche Merkmale der untersuchten Filteraschen (Verbrennungsversuche am Heizkessel Ökotherm Compact C0)

Filterasche des Brennstoffs	Gerste	Strohpellets	Hafer	Weizen
Kohlenstoff (C) in %	4,8	25,1	5,9	2,9
Stickstoff (N) in %	0,36	0,31	0,48	< 0,3
Schwefel (S) in %	1,4	3,5	3,1	1,7
Chlor (Cl) in %	2,3	24,9	18,9	2,8
Kaliumoxid (K ₂ O) in %	30,1	40,1	37,6	35,4
Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅) in %	38,9	5,6	20,0	42,2
Zink (Zn) in mg/kg	4.200	2.250	2.800	3.300

Bezugszustand der Angaben ist analysenfeucht, % = Massen-%

Angabe mit < Analysenwert unterhalb der Bestimmungsgrenze

In **Bild 5.6** sind die wesentlichen Bestandteile der vier analysierten Filteraschen zusammengestellt und auf 100 % normiert. Dabei wurden nur die Hauptbestandteile Chlor, Kalium und Phosphor berücksichtigt und die Oxide wurden auf die Elementmassen umgerechnet.

Hierbei zeigt sich, dass die Anteile der dargestellten Hauptbestandteile der Filteraschen für Gerste und für Weizen fast identisch sind. Die Filterasche der Strohpellets und des Hafers weisen dagegen deutlich höhere Chlorgehalte und niedrigere Phosphorgehalte auf. Die Kaliumgehalte liegen bei allen vier Filteraschen etwa in der gleichen Größenordnung.

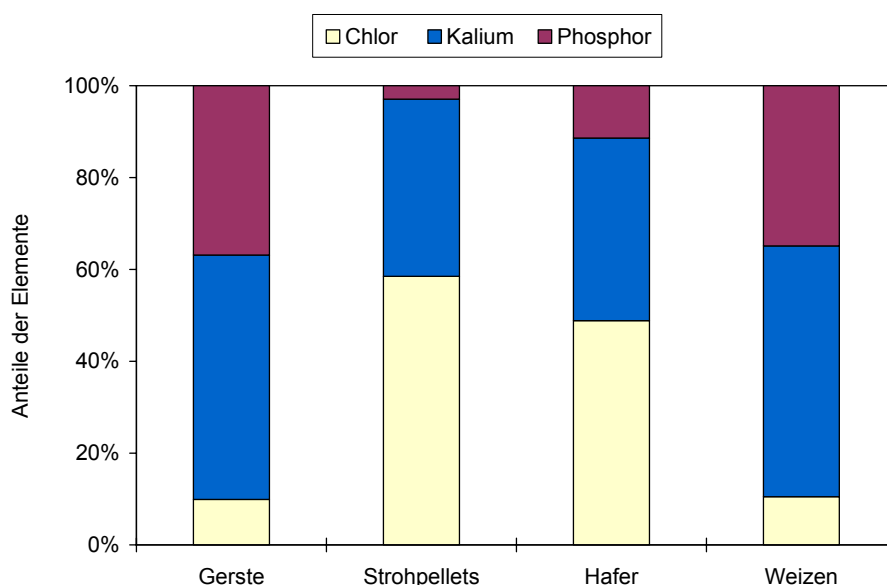


Bild 5.6: Anteil von Chlor, Kalium und Phosphor in den untersuchten Filteraschen der Verbrennungsversuche mit dem Gewebefilter am Heizkessel Ökotherm

Das **Ascheschmelzverhalten** der Filteraschen aus der Verbrennung von Strohpellets, Hafer und des Weizens wurde ebenfalls untersucht. Bei den Aschen des Hafers und Weizens waren keine größeren Unterschiede feststellbar, bei beiden Filteraschen lagen die Erweichungs- bzw. Fließtemperaturen im Bereich von 550 bzw. 640 °C. Die Erweichungs- und Fließtemperatur bei der Filterasche der Strohpellets lag mit 600 bzw. 710 °C etwas höher.

Stellvertretend für ein schlechtes Abreinigungsverhalten des Gewebefilters wurden die Filterasche der Gerste und stellvertretend für ein gutes Abreinigungsverhalten die Filteraschen der Strohpellets und des Hafers mit einem Röntgendiffraktometer und einer Elektronenstrahl-Mikrosonde untersucht. Das Röntgendiffraktometer eignet sich zur qualitativen und halb-quantitativen Identifikation einzelner Verbindungen. Mit Hilfe der Elektronenstrahl-Mikrosonde ist es möglich, die Partikelstruktur und die Verteilung der Elemente auf bzw. in den Partikeln zu bestimmen. Die möglichen Verbindungen in den Filteraschen wurden durch einen Vergleich der Röntgenstrahlung-Beugungsmuster im Diffraktogramm mit Referenzmustern bekannter Verbindungen identifiziert. Anhand der Peakfläche der einzelnen Verbindungen können halb-quantitative Aussagen über ihr Vorkommen (hoher, mittlerer oder niedriger Anteil) gemacht werden.

In den drei Filteraschen wurden im Wesentlichen die Verbindungen Kaliumchlorid (KCl), Kaliumsulfat (K_2SO_4), Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4) und Siliziumoxid (SiO_2) identifiziert. Die Filterasche der Strohpellets weist dabei einen hohen Anteil an Kaliumchlorid (KCl), einen mittleren Anteil an Kaliumsulfat (K_2SO_4) und einen niedrigen Anteil an Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4) auf. Bei der Filterasche des Hafers wurde ein hoher Anteil an Kaliumchlorid (KCl), ein mittlerer Anteil an Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4) und ein niedriger Anteil an Kaliumsulfat (K_2SO_4) nachgewiesen. Die Filterasche der Gerste weist dagegen einen hohen Anteil an Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4), einen mittleren Anteil an Kaliumchlorid (KCl) und einen niedrigen Anteil an Siliziumoxid (SiO_2) auf.

In **Bild 5.7** sind Aufnahmen der Elektronenstrahl-Mikrosonde für die Filteraschen aus der Verbrennung von Strohpellets und Gerste dargestellt.

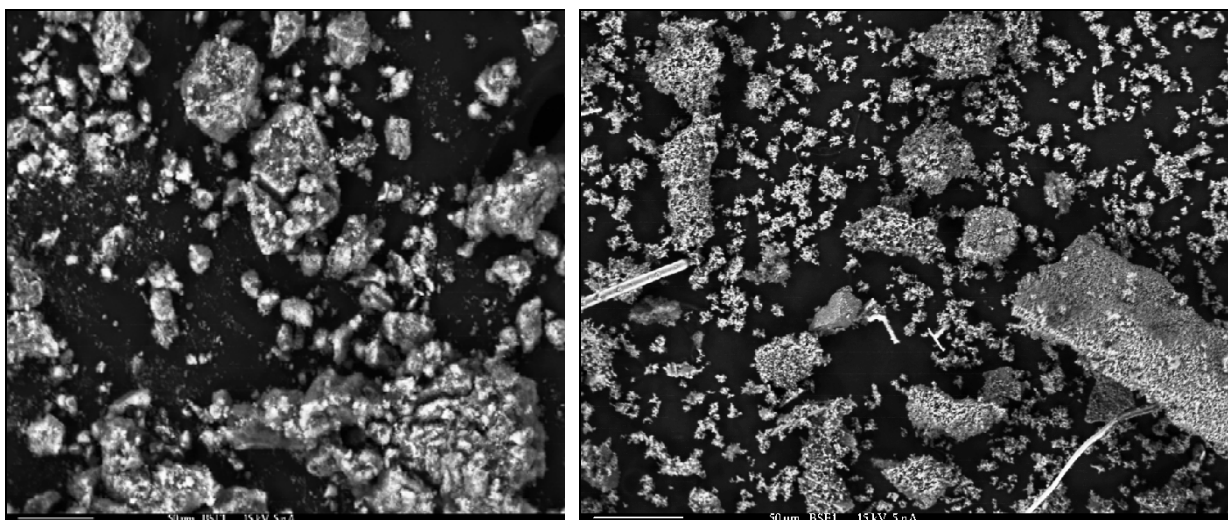


Bild 5.7: Elektronenstrahl-Mikroskopenaufnahmen der Filteraschen von Strohpellets (links) und Gerste (rechte)

Bei der Filterasche der Strohpellets sind die großen agglomerierten Partikel gut zu erkennen, die Struktur der Partikel ist eher rund als scharfkantig. Bei der Filterasche der Gerste haben kleine, nicht agglomerierte Partikel einen hohen Anteil und die Struktur der Partikel ist eher scharfkantig als rund.

Die Verteilung der einzelnen Elemente in bzw. auf den Partikeln der Filterasche ist für Strohpellets in **Bild 5.8** dargestellt. Es wird deutlich, dass die großen, agglomerierten Partikel hauptsächlich aus Chlor und Kalium, d.h. Kaliumchlorid, und geringen Mengen an Schwefel in Form von Kaliumsulfat bestehen. Das Element Phosphor kommt dagegen nur in geringen Mengen vor und ist vor allem in den kleinen Partikeln in Form von Kaliumdihydrogenphosphat zu finden.

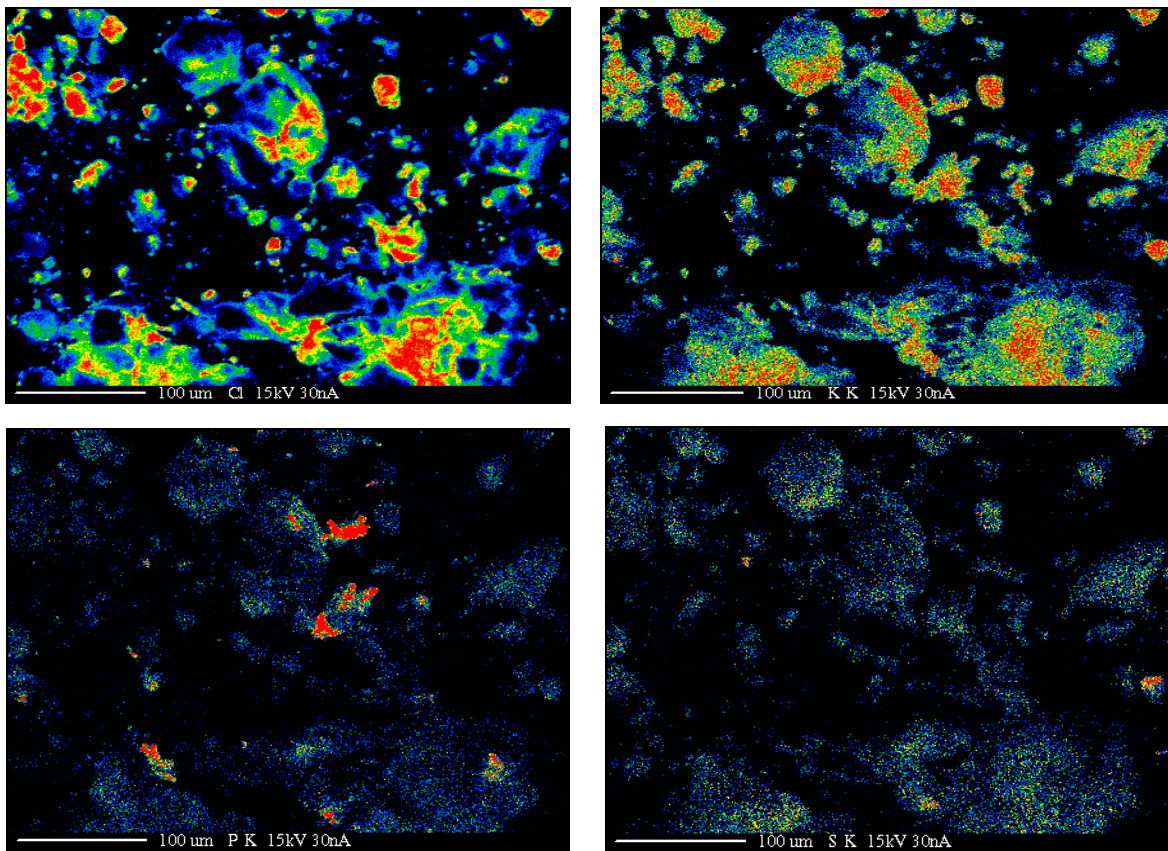


Bild 5.8: Elementarverteilungskarte in der Filterasche der Strohpellets (oben: links Chlor, rechts Kalium; unten: links Phosphor, rechts Schwefel)

Die Verteilung der Elemente Chlor, Kalium, Phosphor und Silizium in der Filterasche der Gerste ist in **Bild 5.9** zu sehen. Siliziumoxid wurde zwar analysiert aber in Tabelle 5.4 nicht dargestellt, da nur bei Gerste die Analysenwerte mit einem Anteil von 3,1 Massen-% über der Bestimmungsgrenze von 2,6 Massen-% lagen. Die Elementarverteilungskarte zeigt, dass die kleinen, nicht agglomerierten Partikeln hauptsächlich aus Phosphor und Kalium in Form von Kaliumdihydrogenphosphat bestehen. Auffallend sind die nadelähnlichen Strukturen, die aus Verunreinigungen stammen könnten und hauptsächlich aus Chlor und Kalium, d.h. Kaliumchlorid, bestehen. Das Element Silizium kommt nur in sehr geringen Mengen vor und könnte ebenfalls aus Verunreinigungen stammen.

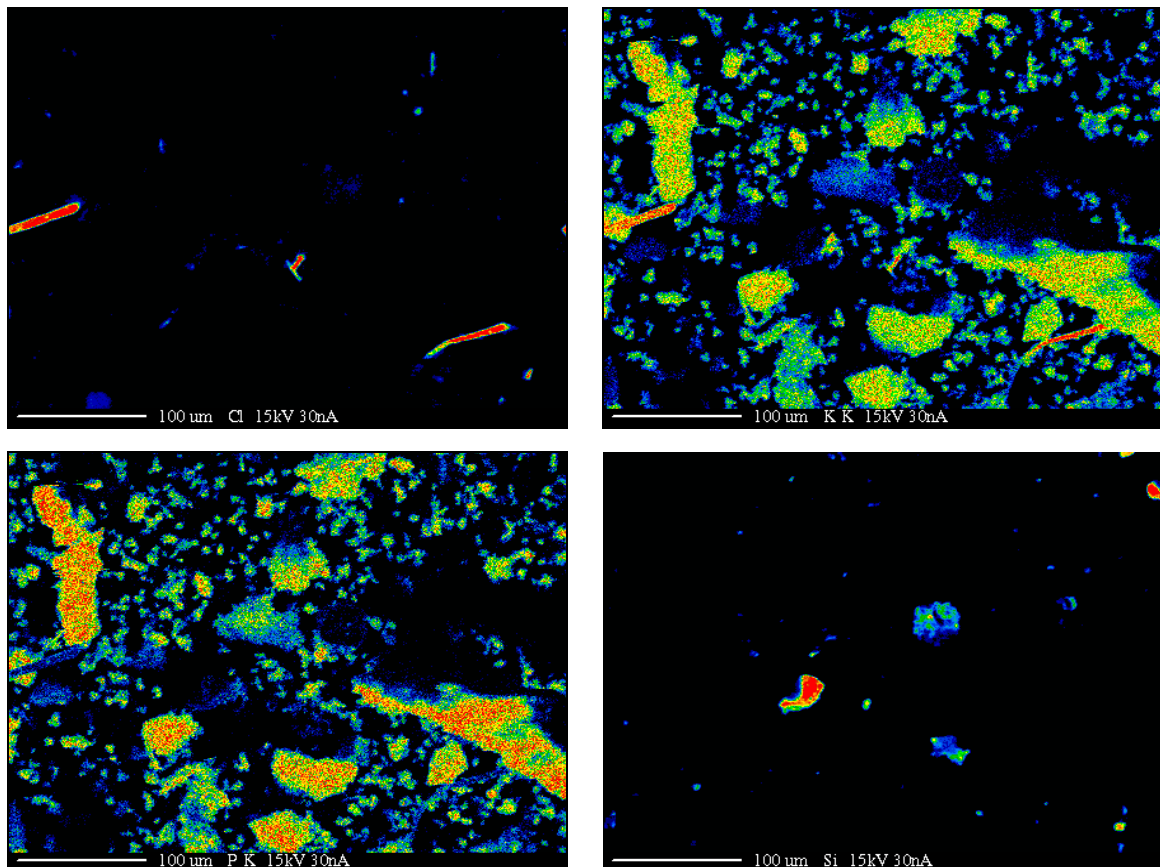


Bild 5.9: Elementarverteilungskarte in der Filterasche der Gerste (oben: links Chlor, rechts Kalium; unten: links Phosphor, rechts Silizium)

Filterversuche mit Gerste und Kalkmischung

Zur Klärung der Frage, weshalb sich das Gewebefilter bei der Verbrennung von Gerste und Weizen nicht mit Druckluft abreinigen lässt und als mögliche Problemlösung, wurden zusätzliche Versuche mit dem Getreidebrennstoff Gerste und einem Zuschlagstoff in Form von Branntkalk durchgeführt. Der verwendete Branntkalk bestand zu 90 % aus Calciumoxid (CaO) und wurde der Gerste im Fallrohr der Brennstoffzuführung mit einem Anteil von 1,5 bis 3 % der Brennstoffmenge zugemischt. In **Bild 5.10** ist die Kalkdosierung im Fallrohr zwischen der Steigschnecke (aus Brennstoffsilo) und der Stokerschnecke zu erkennen.

Durch die Zugabe von Branntkalk zur Gerste konnte das Abreinigungsverhalten (Abreinigungsdruck: 5 bar) des Filters soweit verbessert werden, dass ein Dauerbetrieb möglich wurde. Nach jedem Reinigungsvorgang nahm der Druckverlust des Filters um 0,1 bis 0,2 mbar ab. Die drei Filterelemente des Gewebefilters waren ca. 380 Stunden in Betrieb. Der Differenzdruck stieg dabei von 1,1 mbar bei Beginn dieser Verbrennungsversuche auf Werte um 10 mbar an. Dieser Druckverlust konnte dann durch die regelmäßige Druckluftabreinigung stabil gehalten werden. Im Aschekasten befanden sich nach der Abreinigung schwarze, agglomerierte Staubplättchen.



Bild 5.10: Kalkdosierung im Fallrohr zwischen Steigschnecke und Stokerschnecke beim Heizkessel Ökothem

Das Aussehen der Filterpatronen unterschied sich grundlegend zu den Versuchen mit Gerste ohne Zuschlagstoff. Auf der Filteroberfläche bildete sich jetzt während der Filtration ein dichter, poröser Filterkuchen. Die glänzenden Stellen auf der Filteroberfläche sind durch die Abreinigung der Staubschicht mit Druckluft entstanden, teilweise sind auch noch die schwarz-grauen Staubplättchen zu erkennen, siehe **Bild 5.11**.



Bild 5.11: Oberfläche der Filterpatrone nach den Verbrennungsversuchen mit Gerste und Zuschlagsstoff Branntkalk

Schlussfolgerungen der Versuche mit Gewebefilter am Heizkessel Ökothem

Das Gewebefilter konnte bei der Verbrennung von Gerste und Weizen nicht mit Druckluft abgereinigt werden. Auf der Filteroberfläche bildete sich während der Filtration kein poröser Filterkuchen sondern eine sehr feine, dünne Staubschicht, die sich durch die Druckluftabreinigung nicht entfernen lässt. Die Filterasche der Gerste und des Weizens lag in Form von kleinen, nicht agglomerierten Staubpartikeln vor. Wird der Gerste als Zuschlagsstoff Branntkalk zugemischt, verbessert sich das Abreinigungsverhalten des Filters deutlich, ein störungsfreier Dauerbetrieb wird möglich.

Die Ursache für das unterschiedliche Abreinigungsverhalten der Brennstoffstäube könnte in deren unterschiedlichen Zusammensetzung liegen. So weisen die untersuchten Stäube bezüglich der Phosphor-, Kalium- und Chlorgehalte eindeutige Unterschiede auf.

Eine besondere Rolle scheinen hierbei die Konzentrationen von Phosphor bzw. die Verhältnisse von Phosphor zu den beiden anderen Elementen zu spielen. Höhere Konzentrationen von Phosphor in der Filterasche bewirken geringere Verhältnisse von Kalium zu Phosphor und Chlor zu Phosphor, wie dies hauptsächlich bei Gerste und Weizen aufgetreten ist. Wird der Gerste Branntkalk zugegeben, bewegen sich die Verhältnisse Kalium zu Phosphor und Chlor zu Phosphor hin zu den Brennstoffen ohne Abreinigungsprobleme. Diese Zusammenhänge sind in **Bild 5.12** dargestellt. Mit aufgeführt sind hierbei die beim Passat-Heizkessel eingesetzten Brennstoffe Getreideausputz und Weizenpellets, bei denen während den Verbrennungsversuchen keine Abreinigungsprobleme auftraten.

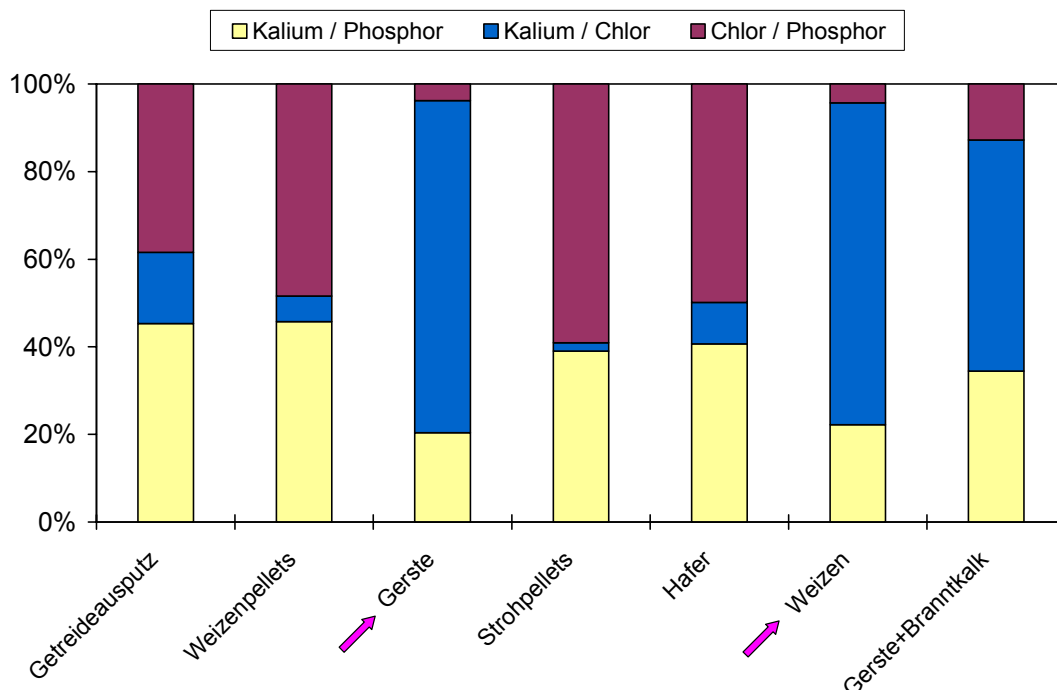


Bild 5.12: Anteile der Verhältnisse Kalium zu Phosphor, Kalium zu Chlor und Chlor zu Phosphor in den untersuchten Filteraschen der Verbrennungsversuche mit Gewebefiltern an den Heizkesseln Ökotherm und Passat

Ein wesentlicher Einfluss der Verbrennungsqualität auf die Staubeigenschaften (nur bezüglich dem Abreinigungsverhalten) und auf das Abreinigungsverhalten des Gewebefilters konnte bei den Versuchen nicht festgestellt werden, obwohl der gesamte Leistungsbereich (Volllast, Teillast und Gluterhaltungsbetrieb) wiederholt durchfahren wurde. Eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur in dem beheizten Filtergehäuse kann als mögliche Ursache für das Abreinigungsproblem des Gewebefilters ausgeschlossen werden, da das Filtergehäuse je nach Kesselleistung eine Temperatur zwischen 80 und 120°C aufwies. Auch hygroskopische Partikeleigenschaften in Form von nassen, klebrigen und verklumpten Stäuben wurden bei den Versuchen nicht beobachtet.

6 Prüfstandsmessungen am Heizkessel Agro 40

Für die Prüfstandsmessungen wurde im Technikum des Instituts ein Versuchsstand mit entsprechender Messtechnik und Anschlüsse für Heizungswasser und Abgas aufgebaut. Die vom Kessel erzeugte Heizenergie wurde über einen Kühlkreislauf abgeführt. Der Anschluss erfolgte über eine Rücklaufanhebung um zu vermeiden, dass Kühlwasser unter 60 °C in den Wärmetauscher des Heizkessels eingespeist wird. Der nötige Kühlwasservolumenstrom wird durch eine Heizungsumwälzpumpe gewährleistet. Bei Nennlast stellt sich eine Temperaturerhöhung zwischen Vor- und Rücklauf von ca. 25 K ein.

Der Anschluss an das Abgassystem im Technikum erfolgte mittels eines Edelstahlrohres, an das Stutzen zum Anbringen der Messgasabsaugsonden und der Staubprobenahme (mit Planfiltergerät) angeschweißt wurden. Der Unterdruck im Abgasrohr am Kesselstutzen wurde mit einem einstellbaren Zugbegrenzer auf ~ 10 Pa eingeregelt.

Da vom Hersteller nur der Kessel bezogen wurde, musste ein Aschebehälter und ein Tagesbehälter für den Brennstoff gebaut und an die Anlage integriert werden. **Bild 6.1** zeigt den Versuchsaufbau.

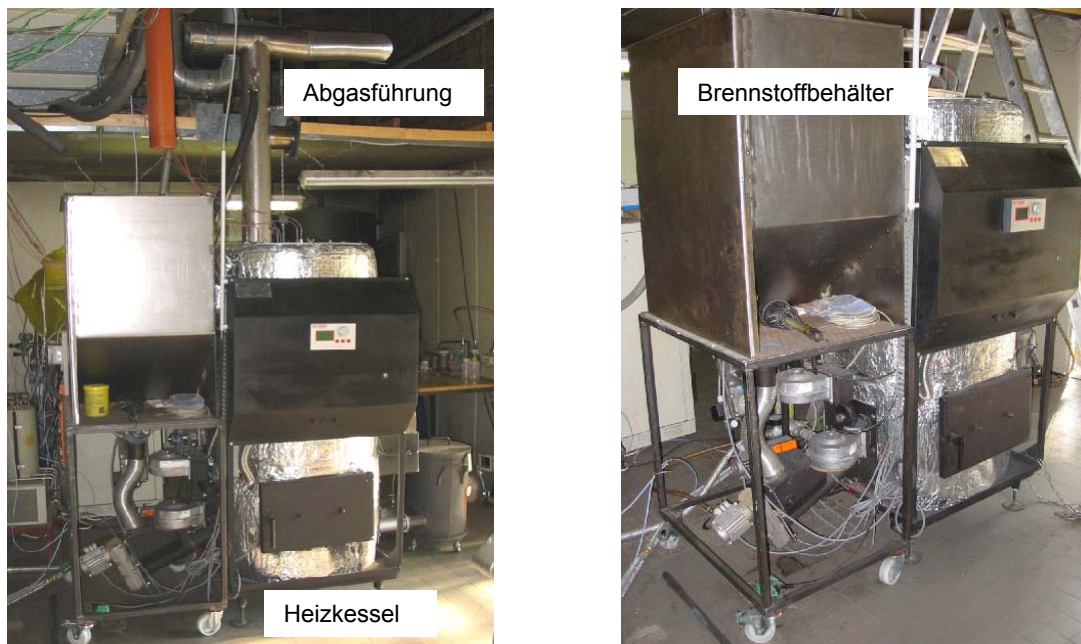


Bild 6.1: Versuchsaufbau für den Heizkessel Agro 40

6.1 Bei den Prüfstandsmessungen eingesetzte Messtechnik

In **Tabelle 6.1** sind die bei den Prüfstandsmessungen am Agroflam-Heizkessel verwendeten Messgeräte, die Prüfgaskonzentrationen und die eingesetzten Filtersubstrat für das Planfilterkopfgerät zur Bestimmung der Gesamtstaubkonzentration aufgeführt.

Tabelle 6.1: Angaben zur verwendeten Messtechnik für die Prüfstandsmessungen

Messgröße (Messprinzip) Messgerätetyp, Hersteller	Messbereich	Prüfgaskonzentration ² Filtersubstrate / Waschlösung	Einheit
CO ₂ (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS-Reihe. Fisher-Rosemount	0-20 Vol%	12,1 Vol% CO ₂ in N ₂	Vol%
CO (nicht dispersive Infrarotabsorption): BINOS-Reihe. Fisher-Rosemount und EL 3020 von ABB	0-1 Vol% 0-3.000 ppm v/v	0,77 Vol% CO in N ₂ 102 ppm v/v CO in N ₂	mg/m ³
O ₂ (Paramagnetismus): EL 3020 von ABB	0-25 Vol%	8,0 Vol% O ₂ in N ₂	Vol %
VOC (Flammenionisation) ¹ : FID 123. Testa	0-1.000 ppm v/v	81 ppm v/v Propan in N ₂	mgC/m ³
NO _x (Chemilumineszenz): NOx Analyser 42 C, Thermo Env. Inst.	0-1.000 mg/m ³	251 ppm v/v NO in N ₂	mgNO ₂ /m ³
Temperaturen (Thermoelektrizität): Ni-CrNi-Thermoelemente	0-150 °C und 0-490 °C	-	°C
Gesamtstaubkonzentration mit Planfilterkopfggerät (Gravimetrie): Staubmesseinrichtung STE Firma Ströhlein	-	Filtersubstrate: Quartz Microfibre MK 360, Φ 50 mm, Firma Munktell Filter AB, S-Grycksbo	mg/m ³
für die Profilmessungen wurden Messgeräte des Herstellers ABB eingesetzt: H ₂ : Caldos 17 Messbereich 0-100 Vol%, O ₂ : Magnos 106 Messbereich 0-25 Vol%, CO: Uras 14 Messbereich 0-50 Vol%, CO ₂ : Uras 14 Messbereich 0-30 Vol%, CH ₄ : Uras 14 Messbereich 0-20 Vol			

¹ bei den VOC-Messungen wurde eine beheizte Probenahmeleitung verwendet. Diese Leitung und der FID waren auf ca. 160 °C beheizt. Im FID ist ein Feinfilter vorhanden. Gemessen wurde die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) im feuchten Abgas, es wird die Kohlenstoffmasse angegeben. Alle anderen Gaskomponenten wurden im trockenen Abgas bestimmt

² die Überprüfung der Nullpunkte der Gasanalysatoren erfolgte mit Stickstoff 5.0

Die Staubprobenahme erfolgte isokinetisch als 15- oder 30-Minuten-Mittelwert, analog hierzu wurden die Gaskonzentrationen berechnet. Für die Staubmessungen wurden die verwendeten Filtersubstrate vor der Probenahme im Trockenofen mindestens 2 Stunden bei 240 °C getrocknet, dann mindestens 24 Stunden im Exsikkator (mit Silikagel als Trockenmittel) gelagert und anschließend gewogen. Der Einbau der Filtersubstrate erfolgte unmittelbar vor den Messungen in den gereinigten Filterhalter. Nach der Messung wurden die Filter für mindestens 24 h im mit Trockenmittel gefüllten Exsikkator getrocknet und dann erneut gewogen. Aus der Massendifferenz der Wägung vor und nach der Probenahme und dem abgesaugten Probenahmenvolumen wurden die Staubkonzentrationen berechnet.

Als Waage wurde das Modell MC 1 RC 210 P der Firma Sartorius AG verwendet. Die Waage weist eine Reproduzierbarkeit und Linearitätsabweichung im genutzten Wägebereich bis 5 g von jeweils 0,02 mg auf. Die Waage ist in einem speziellen Wägeraum untergebracht.

Zusätzlich zu den Gaskonzentrationen wurden die Abgastemperatur, die Vor- und Rücklauftemperaturen des Kühlwassers, Temperaturen im Wärmetauscher und die abgeführte Wärmeleistung der Anlage gemessen. In **Bild 6.2** sind die Temperaturmessstellen im Flammrohr und zwischen Ausbrandglocke und Wärmetauscher des Heizkessels dargestellt.

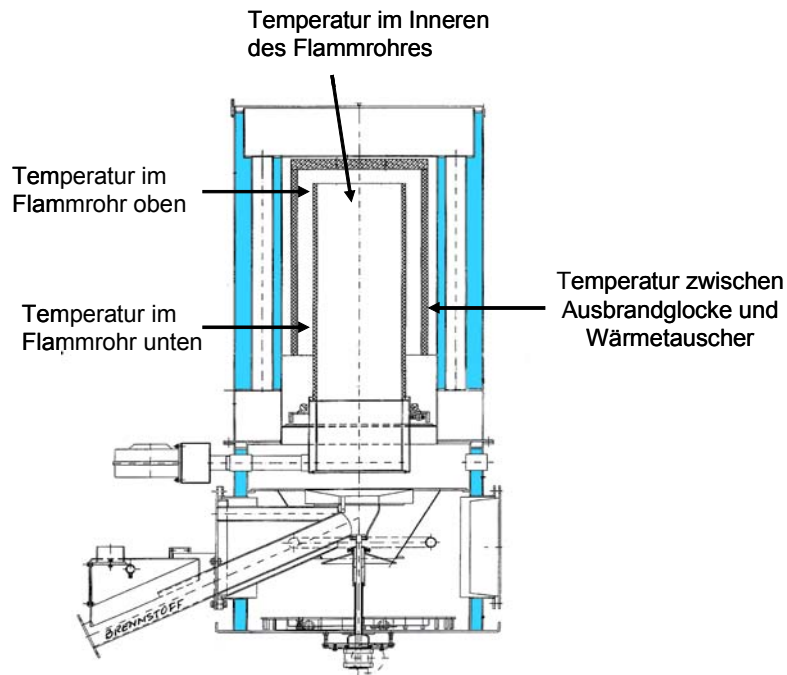


Bild 6.2: Temperaturmessstellen im Flammrohr und zwischen Ausbrandglocke und Wärmetaucher beim Heizkessel Agro 40

Zusätzlich zu den Messungen im Abgas des Heizkessels wurden auch Profilmessungen der Gaskonzentrationen im Flammrohr durchgeführt. Für die Gasprobenahme wurde eine wassergekühlte Sonde mit den Abmessungen 2.200 Länge x \varnothing 10 mm eingesetzt. Mit der Sonde wurden im Flammrohr Probenahmen in 10 unterschiedlichen Höhen an vier verschiedenen Messpunkten im jeweiligen Messquerschnitt vorgenommen, siehe **Bild 6.3**. Die Dauer der Messungen pro Messpunkt betrug 3-5 Minuten.

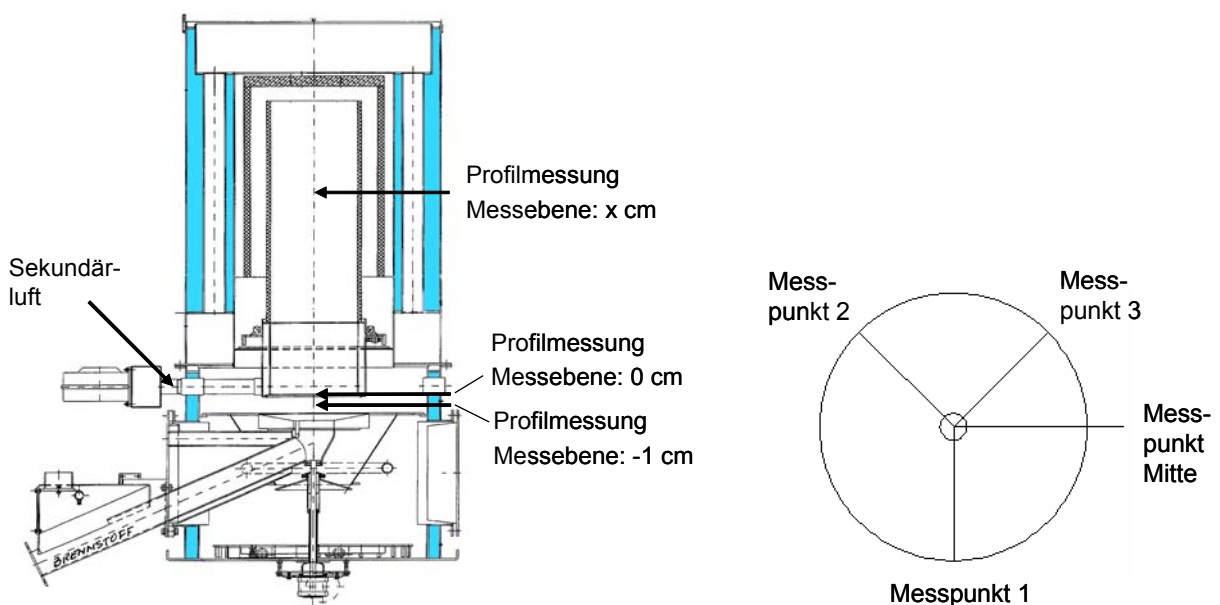


Bild 6.3: Messpositionen für Profilmessungen im Flammrohr des Heizkessels Agro 40

6.2 Betriebserfahrungen

Während des Versuchsbetriebs des Heizkessels ergaben sich einige Probleme die verdeutlichen, dass der Heizkessel, aufgrund der kurzen Zeitspanne seit der Markteinführung, noch nicht vollständig praxistauglich war. So konnte der Brennstoff bei der Inbetriebnahme nicht gezündet werden, da kein Durchgang für Heißluft vorhanden war, die Austragungsschnecke für die Flugasche war falsch dimensioniert und das Heißluftgebläse zur Brennstoffzündung fiel nach kurzer Betriebszeit aus. Außerdem förderte das Sekundärluftgebläse nicht genügend Verbrennungsluft in den Feuerraum. Nach vergleichsweise kurzer Betriebszeit brach das Bewegungselement zur Brennstoffförderung, wie bei den Feldmessungen, ab. Außerdem wurde die Steuereinheit defekt. Insgesamt wurden folgende Betriebserfahrungen gewonnen:

- Werden optimale Einstellungen der Verbrennungsparameter für einen Brennstoff eingestellt, ist ein stabiler und zuverlässiger Dauerbetrieb der Anlage bei niedrigen CO- und VOC-Emissionen und, im Vergleich zu anderen Getreidefeuerungen, niedrigen Staubemissionen erreichbar.
- Der Heizkessel reagiert empfindlich auf Änderungen der Brennstoffqualität oder auf einen Brennstoffwechsel. Jeder Brennstoff und jede größere Qualitätsänderung des Brennstoffs verlangt eine separate und exakte Kesseleinstellung, um einen guten Brennstoffausbrand (niedriger Kohlenstoffgehalt in der Asche) und niedrige CO- und VOC-Konzentrationen Abgas zu erhalten.
- Das Anfahren des Heizkessels war bei Getreidebrennstoffen schwierig und langwierig, zum Teil gar nicht möglich. Ein zuverlässiger und praxisingerechter Anfahrbetrieb konnte mit Getreidebrennstoffen nicht realisiert werden. Auch konnte, aufgrund fehlender Zugriffsmöglichkeiten auf die Regelung, keine Optimierung des Anfahrvorganges vorgenommen werden.
- Die Vielzahl der einstellbaren Parameter und die unverständlichen und unvollständig dokumentierten Parameter erschweren zusätzlich die optimale Anlageneinstellung. Hierdurch werden Bedienungsfehler erleichtert und die Anforderungen an den Kundendienst werden unnötig erhöht.
- Für manche Brennstoffe (z.B. Strohpellets) ist eine optimale Einstellung der Verbrennungsparameter auch deswegen wichtig, um Verschlackungen im Feuerraum und Ascheanbackungen im Flammrohr und in der Ausbrandglocke zu verhindern.

6.3 Eingesetzte Brennstoffe

Bei den Prüfstandsmessungen am Agroflam-Heizkessel wurden als Brennstoffe Gersten- und Weizenkörner sowie Strohpellets eingesetzt. In **Tabelle 6.2** sind wesentliche Merkmale der untersuchten Brennstoffe zusammengestellt.

Tabelle 6.2: Wesentliche Merkmale der am Agro 40 untersuchten Brennstoffe

Brennstoff	Wi-Gerste_TLL	Wi-Weizen_TLL	Strohpellets(W)_TLL	Strohpellets(R)_TLL	So-Gerste_IH	Wi-Weizen_IH
Bezeichnung im Bericht	Gerste_Ref	Weizen_Ref	Stroh(W)_Ref	Stroh(R)_Ref	Gerste_IH	Weizen_IH
Heizwert H _U in kJ/kg		15.313	15.902		14.426	14.606
in Massen-%, Bezug: analysenfeuchter Brennstoff						
Wasser		5,8	10,0		9,8	10,1
Asche		1,6	4,7		2,1	1,6
Kohlenstoff (C)		40,9	43,2		40,9	39,7
Wasserstoff (H)		6,9	6,3		6,9	6,5
Stickstoff (N)		2,3	0,5		2,3	1,8
Schwefel (S)	0,11 *	0,15 *	0,07 *	0,09 *	< 0,3	< 0,3
Chlor (Cl)	0,07 *	0,06	0,03	0,25 *	0,04	0,04
in Massen-%, Bezug: wasserfreier Brennstoff						
flüchtige Stoffe		74,8	72,0		71,7	71,9
Fixed C		17,8	15,3		16,4	16,4
Asche-Schmelzverhalten in °C						
Erweichungstemperatur		700	690		710	710
Fließtemperatur		950	1.200		1.410	850
in Massen-%, Bezug: wasserfreie Brennstoffasche						
Siliziumoxid (SiO ₂)		5,9	58,8		20,7	2,9
Calciumoxid (CaO)		3,4	13,7		2,1	2,7
Magnesiumoxid (MgO)		13,2	2,8		9,5	11,7
Kaliumoxid (K ₂ O)		26,7	11,1		24,5	30,2
Phosphorpentoxid (P ₂ O ₅)		43,4	1,2		39,6	47,4
Mangan (Mn)		0,14	0,03		0,05	0,23

Wi: Winter / So: Sommer und W: Weizen / R: Roggen

TLL Brennstoffe wurden als Referenzbrennstoffe von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) in Dornburg geliefert

IH Brennstoffe wurden vom Ihinger Hof (Versuchsstation für Pflanzenbau und Pflanzenschutz der Universität Hohenheim) kostenlos für das Projekt zur Verfügung gestellt

Angaben mit <: Analysenwerte liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze

* Analyseergebnisse der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) vom März 2006

Mit diesen Brennstoffen wurden Verbrennungsversuche bei konstanten Wärmeleistungen des Heizkessels durchgeführt. Hierbei wurden die Emissionen im Abgas gemessen und auch Profilmessungen der Gaskonzentrationen und Temperaturen im Flammrohr des Heizkessels durchgeführt.

In **Bild 6.4** ist für ausgewählte Brennstoffe das Ascheschmelzverhalten im Vergleich dargestellt.

Im Folgenden werden dann die Ergebnisse der Prüfstandsmessungen am Agro 40 mit den getesteten Brennstoffen beschrieben.

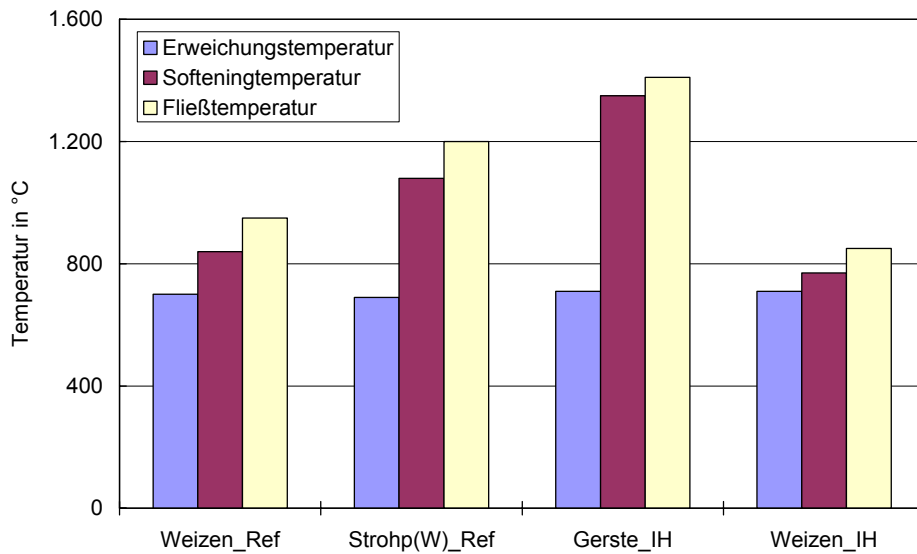


Bild 6.4: Ascheschmelzverhalten der Brennstoffe Weizen, Gerste und Strohpellets

6.4 Ergebnisse der Abgasmessungen

In **Bild 6.5** sind beispielhaft typische Verläufe der CO₂-, CO- und NO_x-Konzentrationen beim Kesselbetrieb mit Gerste_IH dargestellt, beginnend vom Kesselstart, über die optimale Einstellung der Kesselparameter bis zum stabilen Betrieb. In der stabilen Betriebsphase werden vergleichsweise hohe CO₂-Konzentrationen und niedrige CO-Konzentrationen gemessen.

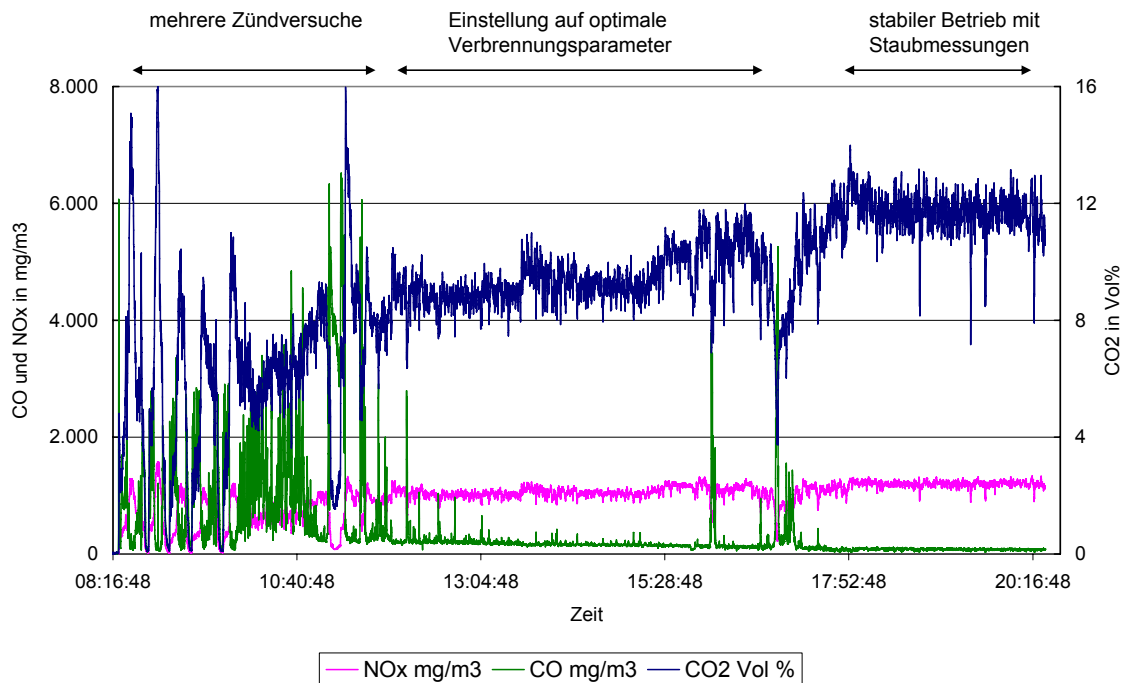


Bild 6.5: Typische Verläufe der CO₂-, CO- und NO_x-Konzentrationen beim Versuchsbetrieb des Heizkessels Agro 40 mit Gerste_IH

In **Tabelle 6.3** sind die Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Heizkessel Agro 40 bei stationären Betriebsbedingungen zusammengefasst dargestellt. Die bei den Versuchen eingestellte Wärmeleistung liegt zwischen rund 24 bis 42 kW. Bei einigen Brennstoffen war es nicht möglich, die Nennwärmeleistung zu erreichen. Entweder wurde bei höherer Wärmeleistung der Ausbrand des Brennstoffes zu schlecht, so dass auch nur teilweise verbrannter Brennstoff in die Aschetonne gefördert wurde, oder die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung nahmen stark zu.

Tabelle 6.3: Prüfstandsergebnisse für den Heizkessel Agro 40

Brennstoff	CO ₂ in Vol %	NOx * in mgNO ₂ /m ³	CO * in mg/m ³	VOC * in mgC/m ³	Staub * in mg/m ³	Wärmeleistung in kW
Gerste_Ref	15,8	707	22	1	27	41,2
Weizen_Ref	12,3	878	37	2	63	34,0
Weizen_Ref	16,4	789	80	6	28	42,4
Stroh(W)_Ref	12,4	549	43	0	31	23,7
Stroh(R)_Ref	14,1	554	62	0	60	38,0
Gerste_IH	11,7	759	53	2	48	33,0
Weizen_IH	12,9	852	44	1	100	35,0

* bezogen auf 13 Vol% O₂ im Abgas und ½ Stundenmittelwerte

Brennstoff	Temperatur (-bereich) in °C an Messposition				Wärmeleistung
	Flammrohr			zwischen Glocke und Wärmetauscher	
	innen	oben	unten		
Gerste_Ref	946	859	691	563 - 592	41,2
Weizen_Ref	772	698	526	466 - 472	34,0
Weizen_Ref	974	341	776	568 - 608	42,4
Stroh(W)_Ref	872	811	690	463-484	24,0
Stroh(R)_Ref	938	939	501	563 - 595	38,0
Gerste_IH	760	690	511	455 - 475	33,0
Weizen_IH	783	701	523	468 - 478	35,0

Bei allen Brennstoffen wurden geringe CO- und VOC-Konzentrationen im stationären Dauerbetrieb ermittelt. Die Staubkonzentrationen lagen in den günstigsten Fällen im Bereich von 30 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) und im ungünstigsten Fall bei 100 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂). Im Mittel über alle Brennstoffe ergibt sich eine Staubkonzentration von rund 50 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂).

Die Stickstoffoxidkonzentrationen liegen im Bereich von rund 550 bis 880 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) und folgen in der Tendenz dem Stickstoffgehalt im Brennstoff.

Die im Heizkessel gemessenen Temperaturen nehmen in Strömungsrichtung von der Messposition Flammrohr innen bis zur Messposition zwischen Ausbrandglocke und Wärmetauscher erwartungsgemäß ab. Das Temperaturniveau hängt, da die Heizwerte der Brennstoffe und der eingestellte Luftüberschuss ähnlich waren, im Wesentlichen von der eingestellten Wärmeleistung ab.

Bild 6.6 zeigt für ausgewählte Emissionskomponenten die gemessenen Konzentrationen im Vergleich der Brennstoffe.

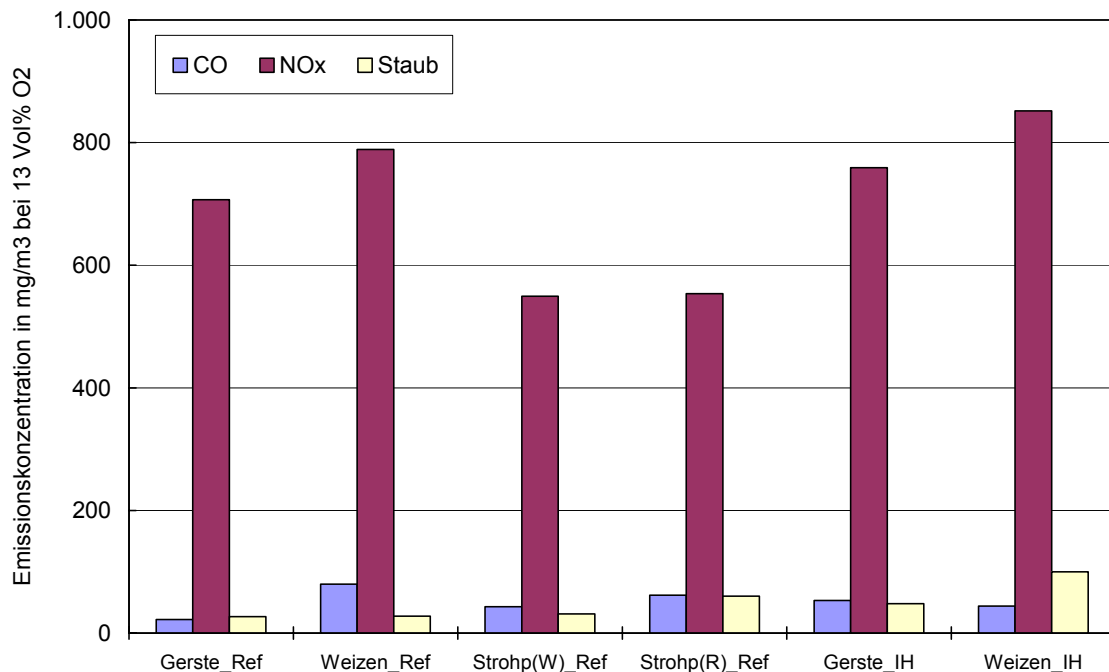


Bild 6.6: Vergleich der CO-, NOx- und Staubkonzentrationen für die untersuchten Brennstoffe beim Agro 40 (½ Stundenmittelwerte)

In **Tabelle 6.4** sind die Analyseergebnisse der Verbrennungsrückstände für den Heizkessel Agro 40 aufgeführt.

Tabelle 6.4: Analysen der Verbrennungsrückstände - Heizkessel Agro 40 (Prüfstandsmessungen)

Verbrennungsrückstände *	Gerste_Ref	Weizen_Ref	Stroh(W)_Ref
in Massen-%, Bezug: Asche wie aus Aschebehälter entnommen			
Kohlenstoff (C)	42,0	72,9	37,4
Wasserstoff (H)	1,0	1,8	1,4
Stickstoff (N)	1,7	3,8	0,54
in Massen-%, Bezug: wasserfreie Brennstoffasche			
Siliziumoxid (SiO2)	21,4	19,8	64,6
Calziumoxid (CaO)	2,9	4,7	8,1
Magnesiumoxid (MgO)	11,8	12,6	3,8
Kaliumoxid (K2O)	25,9	27,1	13,2
Phosphorpentoxid (P2O5)	42,2	38,9	4,7
Mangan (Mn)	0,08	0,13	0,04

Auch bei den Prüfstandsmessungen weisen die Verbrennungsrückstände, aufgrund des unvollständigen Brennstoffausbrandes, noch höhere Gehalte an Kohlenstoff auf. Dies stellt ein Heizwertverlust dar und erhöht den Anfall an Verbrennungsrückständen, die entsorgt werden müssen. Bei den Getreidebrennstoffen sind die Hauptbestandteile der Verbrennungsrückstände Kaliumoxid und Phosphorpentoxid, bei den Strohpellets sind dies Siliziumoxid und Kaliumoxid.

6.5 Ergebnisse der Profilmessungen

In **Bild 6.7** sind beispielhaft die Profile der CO_2 -, O_2 - und CO -Konzentrationen für Weizen_Ref und Strohp(W)_Ref im Flammrohr des Agro 40 an den Messpunkten 1 und 3 gegenübergestellt.

Die Sauerstoffkonzentrationen liegen bei den Verbrennungsversuchen mit Weizen_Ref auf den verschiedenen Messebenen und in den einzelnen Messpunkten meist im Bereich von 4 bis 7 Vol%, mit Spitzen in der Messebene 24. Bei den Versuchen mit Strohpellets liegen die O_2 -Konzentrationen in der Tendenz höher, die höchsten Werte wurden in den unteren Messebenen gemessen.

Der CO -Abbau findet in den unteren Bereichen bis zu den Höhen 17 und 23 cm statt. Gut erkennbar ist dies beim Weizen auch am Messpunkt 1. Bei den Versuchen mit Strohpellets ergibt sich für alle Messpositionen im Grundsatz ein vergleichbarer Verlauf der CO -Konzentration über der Flammrohrhöhe wie beim Weizen. Allerdings erfolgt bei den Versuchen mit Strohp(W)_Ref durchweg ein Anstieg der CO -Konzentration in einem Bereich zwischen 40 und 50 cm des Flammrohres.

Die Sekundärluft wird ungefähr in der Messebene 4 cm dem Feuerraum zugeführt. Ein entscheidender Einfluss auf den Verbrennungsprozess ist anhand der Profilmessungen allerdings nicht erkennbar.

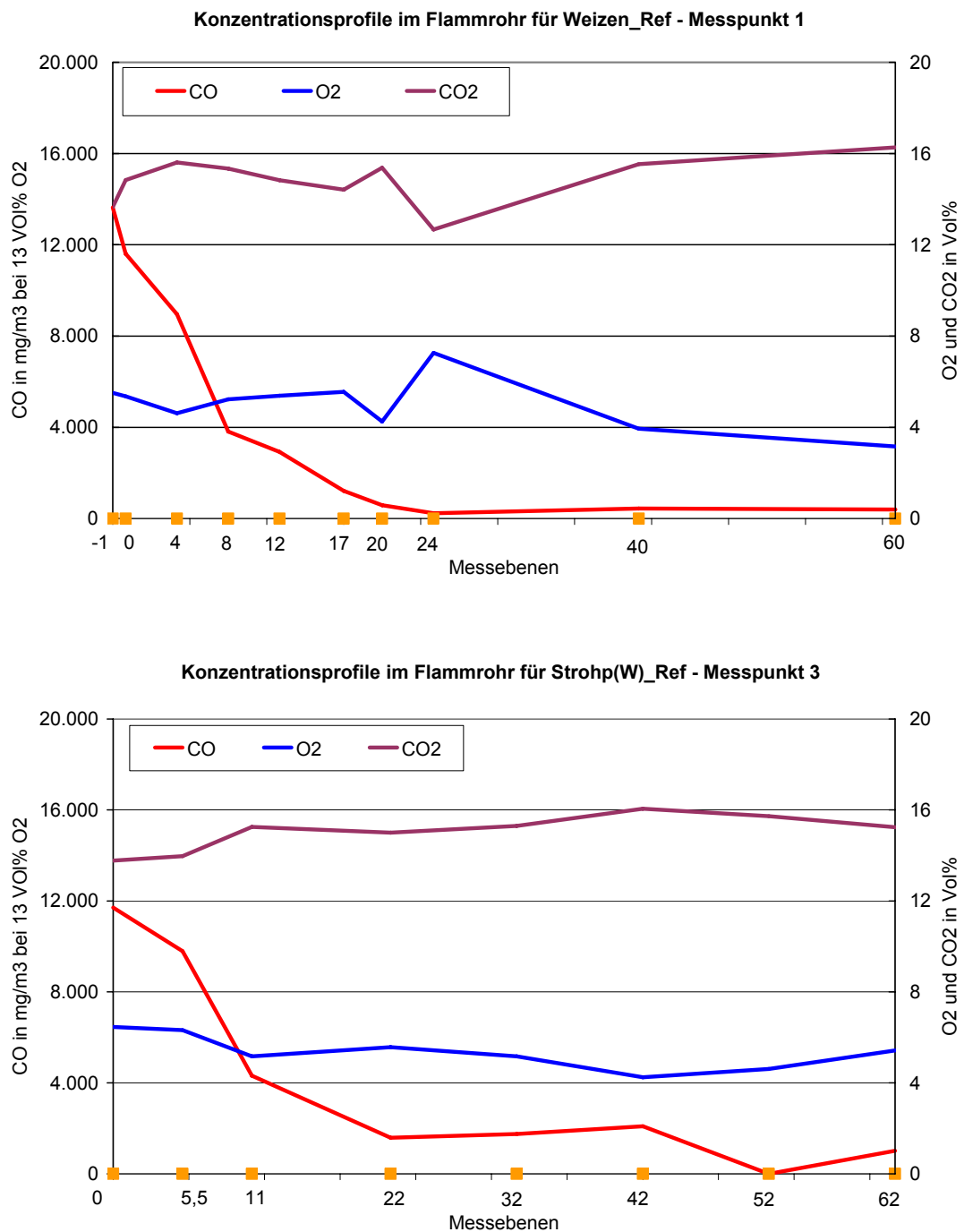


Bild 6.7: Konzentrationsprofile im Flammrohr des Agro 40 beim Betrieb mit Weizen_Ref am Messpunkt 1 und Stroh(W)_Ref am Messpunkt 3

Im **Bild 6.8** sind für die verschiedenen Messebenen und Messpositionen die O₂- und CO₂-Konzentrationen und in **Bild 6.9** die CO-Konzentrationen für die beiden untersuchten Brennstoffe Weizen_Ref und Stroh(W)_Ref vergleichend dargestellt. Insgesamt liegen die Sauerstoffkonzentrationen bei den Versuchen mit Strohpellets höher als bei den Weizenabbränden, dies wird an den Positionen 1 und 2 besonders deutlich. An der Messposition 3 gilt dies nicht für alle Messebenen.

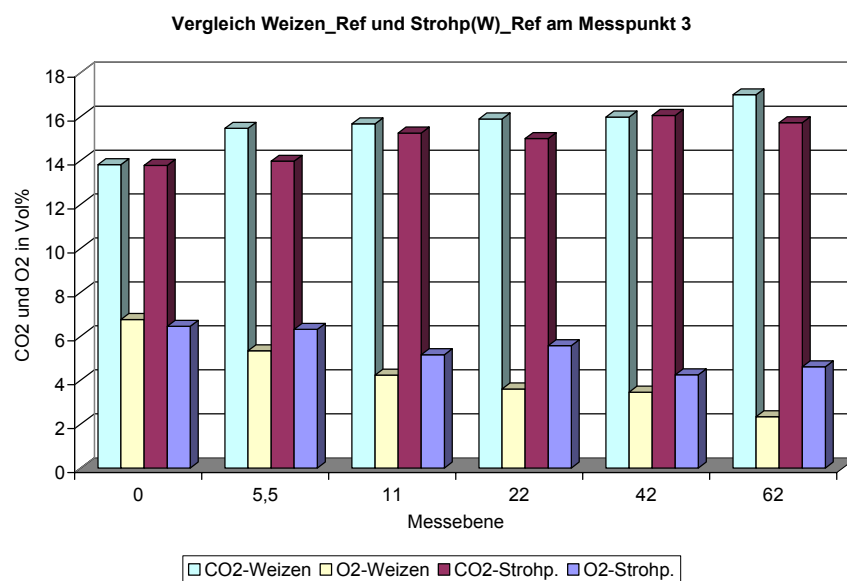
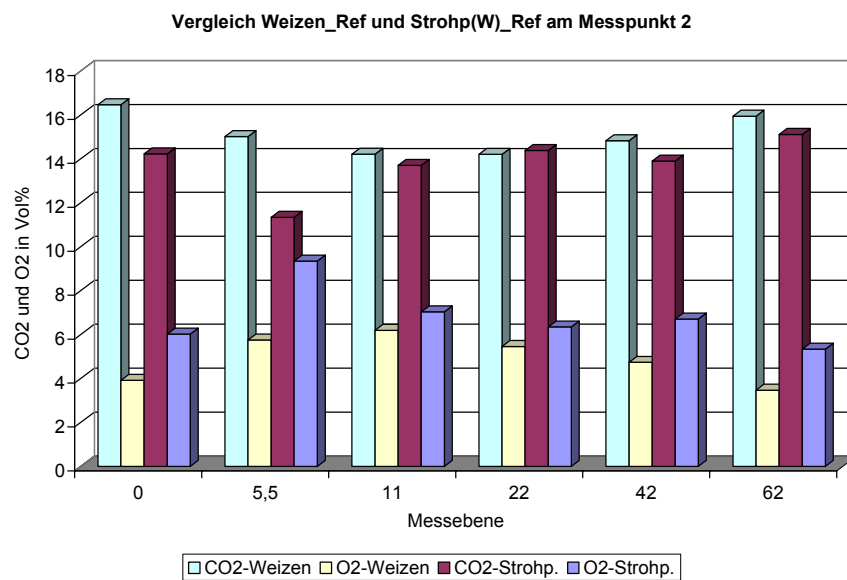
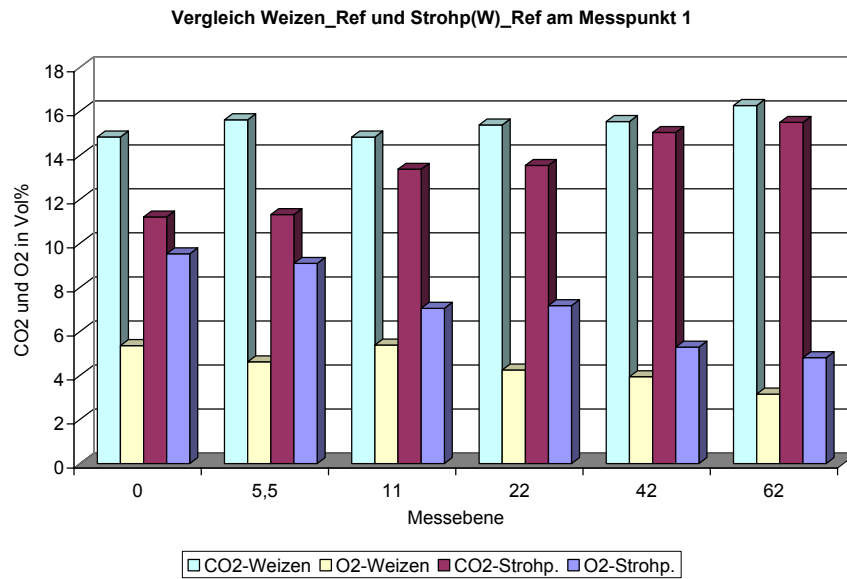


Bild 6.8: CO₂- und O₂-Konzentrationen in den verschiedenen Messebenen und Messpunkten im Flammrohr des Agro 40 beim Betrieb mit Weizen_Ref und Stroh(W)_Ref

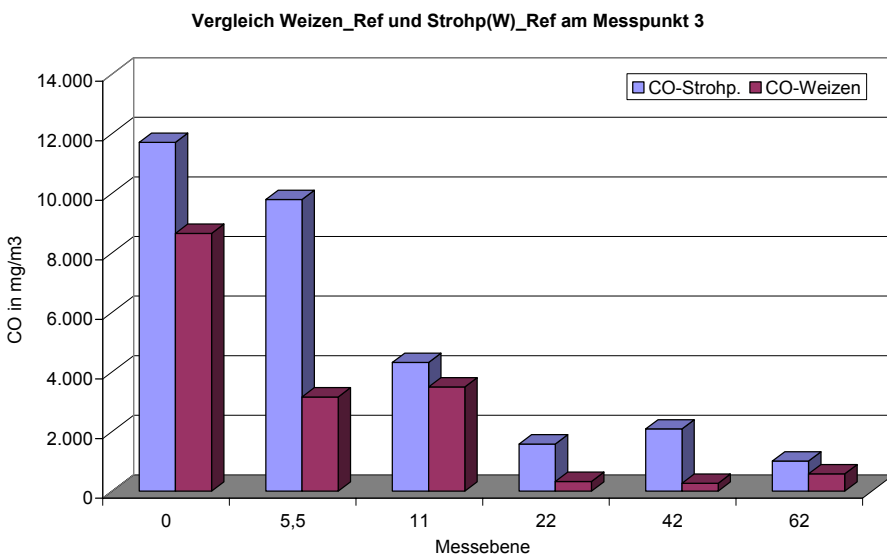
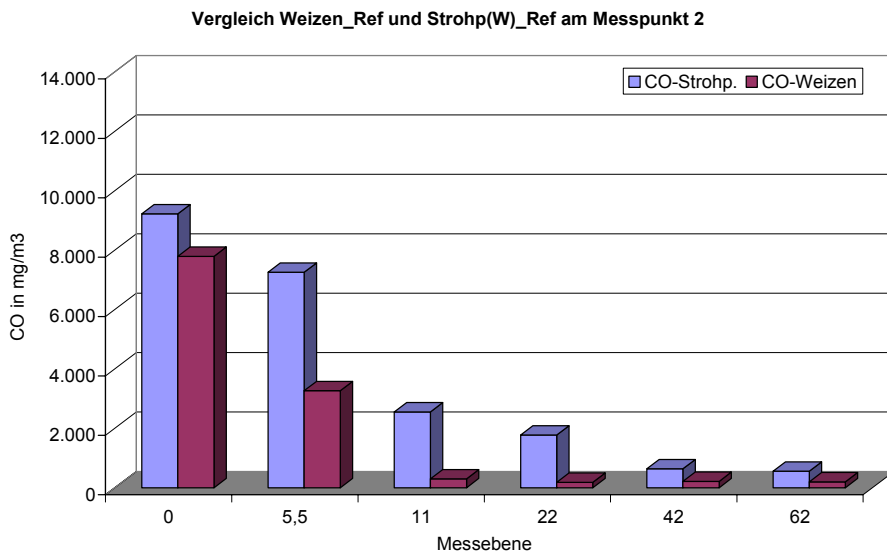
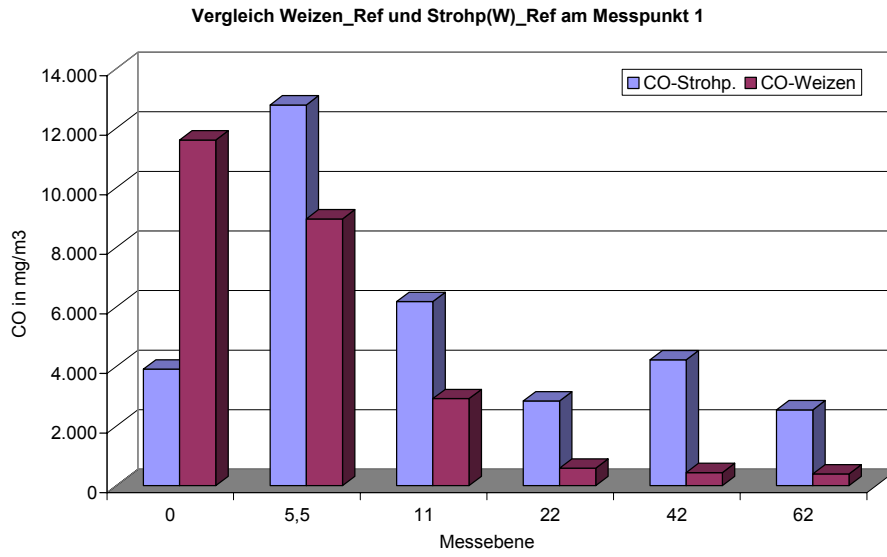


Bild 6.9: CO-Konzentrationen (bezogen auf 13 Vol% O₂) in den verschiedenen Messebenen und Messpunkten im Flammrohr des Agro 40 (Betrieb mit Weizen_Ref und Stroh(W)_Ref)

6.6 Schlussfolgerungen

Bei optimaler Einstellung des Heizkessels werden im stationären Dauerbetrieb unabhängig vom eingesetzten Brennstoff und der aktuellen Wärmeleistung geringe Konzentrationen von Produkten unvollständiger Verbrennung (CO und VOC) im Abgas gemessen. Größere Konzentrationsschwankungen traten bei den Staubemissionen auf. Beim Weizen_IH wurde mit 100 mg/m^3 (bei 13 Vol% O_2) die höchste Abgaskonzentration ermittelt, alle anderen Brennstoff lagen beim Staub unter 65 mg/m^3 (bei 13 Vol%), besonders niedrige Werte wurden mit Gerste_Ref und Stroh(W)_Ref ermittelt, die im Bereich von 30 mg/m^3 (bei 13 Vol%) lagen. Bei den Strohpellets wurde diese niedrige Staubkonzentration allerdings bei einer stark reduzierten Wärmeleistung (~ 60 % der Nennwärmeleistung) gemessen. Höhere Wärmeleistung führen bei Strohpellets (vgl. hierzu Stroh(R)_Ref) auch zu höheren Staubkonzentrationen im Abgas.

Hohe bis sehr hohe Konzentrationen wurden beim NO_x gemessen, die vom Stickstoffgehalt im Brennstoff und von den Verbrennungsbedingungen abhängen. Diese Konzentrationen sind so hoch, dass auch unter definierten Prüfstandsbedingungen bei Getreidekörnern davon auszugehen ist, dass die in den § 20 (1. BImSchV) Erlassen einiger Bundesländer (z.B. (UM, 2005) oder im Entwurf zur Novelle der 1. BImSchV (1. BImSchV, Entwurf 2007) genannten NO_x -Anforderungen an diese Heizkessel nicht eingehalten werden können. Deshalb wurde für diese Emissionskomponente beim Agro 40 ein besonderer Entwicklungsbedarf gesehen. Als möglicher Lösungsansatz wird die Umsetzung einer gestuften Verbrennung angesehen.

Die Ergebnisse der Profilmessungen zeigten, dass die Sauerstoffkonzentrationen in allen Messebenen relativ hoch sind. Außerdem nahm im Bereich der Sekundärluftzuführung die Sauerstoffkonzentration nicht erkennbar zu. Dies deutet auf eine zu geringe Sekundärluftmenge bzw. zu geringe Eindringtiefe der Sekundärluft in die Ausbrandglocke hin.

Für die Umsetzung einer gestuften Verbrennung zur Minderung der hohen NO_x -Konzentrationen muss allerdings eine funktionierende Luftstufung vorhanden sein. D.h. im Entgasungsbereich über dem Brennstoffbett müssen unterstöchiometrische Bedingungen vorliegen. In dieser Reduktionszone kann bereits gebildetes NO wieder zu elementarem Stickstoff reduziert werden. Durch Zugabe von Sekundärluft oberhalb der Reduktionszone wird dann eine weitgehend vollständige Oxidation der brennbaren Bestandteile erreicht. Zur Umsetzung einer gestuften Verbrennung muss die Luftführung und Verteilung im Heizkessel verändert werden.

7 Optimierungsmaßnahmen am Heizkessel Agro 40

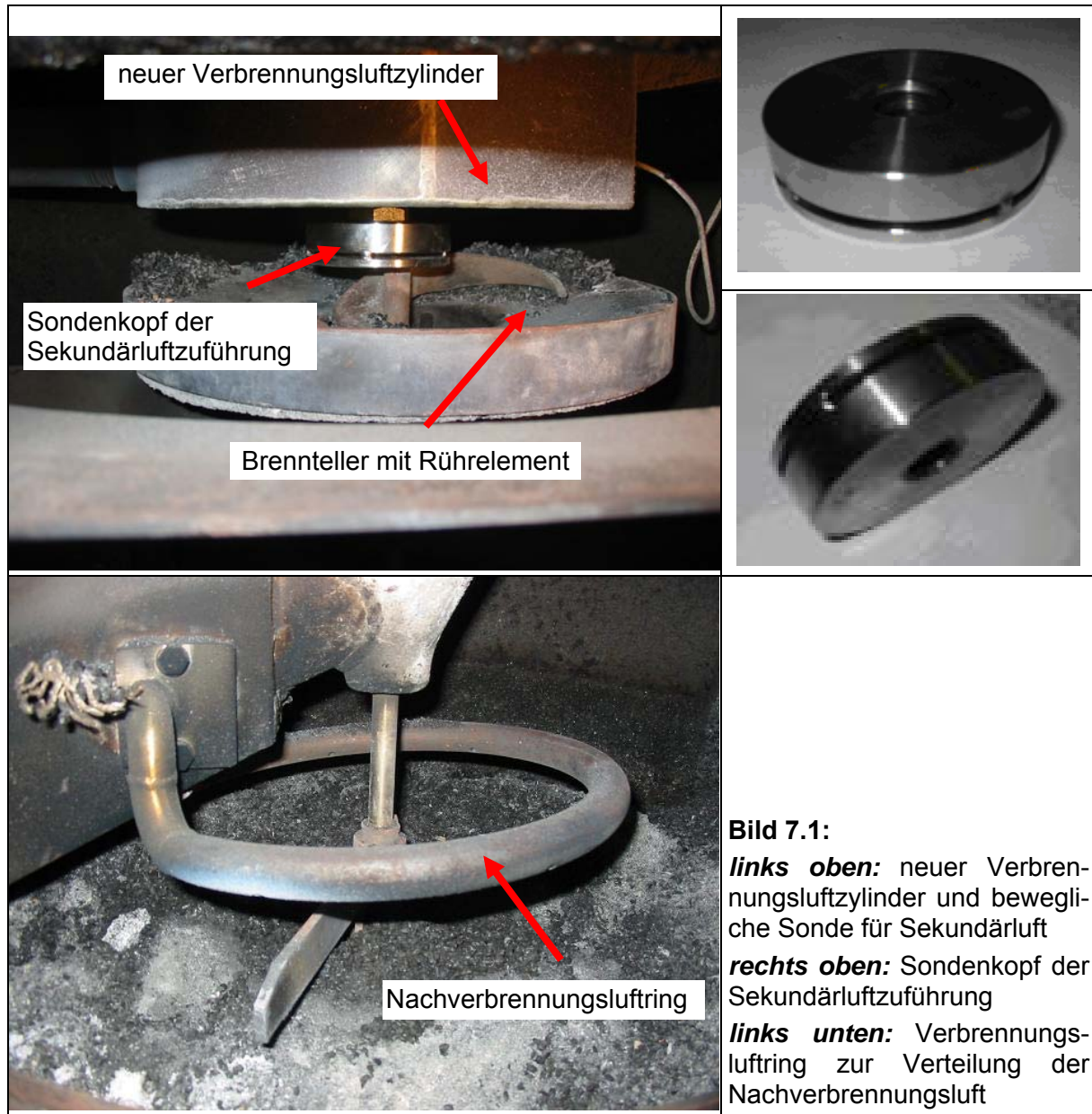
Zur Minderung der hohen NO_x -Konzentrationen wurde im Agroflam Heizkessel eine gestufte Verbrennung realisiert. Hierzu musste die Luftführung und Verteilung im Heizkessel verändert werden. Außerdem wurde der Heizkessel mit einer Verbrennungsregelung ausgerüstet, um den Verbrennungsprozess weiter zu verbessern und die Langzeitstabilität zu erhöhen.

7.1 Realisierung einer Luftstufung

Die Ursache für die vergleichsweise hohen NO_x -Emissionen des Heizkessels Agro40 liegt in der besonderen Luftverteilung im Heizkessel. Der zweistufige Verbrennungsprozess (Entgasung des Brennstoffs und Ausbrand des Kohlenstoffes sind räumlich getrennt) erfordert auch eine separate Luftzuführung und Verteilung in den Reaktionszonen des Heizkessels. So wird Primär- und Sekundärluft mit einem Gebläse in einen Verbrennungsluftzylinder gefördert und dort primärseitig direkt in Brennstoffrichtung und sekundärseitig in das Flammrohr über Bohrungen eingeblasen. Ein separates Gebläse fördert Verbrennungsluft über eine Luftverteilung zum unteren Brennteller, auf dem die Verbrennung des weitgehend entgasten Brennstoffes stattfindet. Die Entgasung des Brennstoffes und der Kohlenstoffabbrand finden hierbei zwar räumlich getrennt statt, aber gasseitig besteht ein Luftverbund, da überschüssige Verbrennungsluft und die Reaktionsprodukte aus dem Kohlenstoffabbrand am oberen Brennteller vorbei in die Ausbrandglocke strömen. Ein hoher Luftüberschuss aus dem Kohlenstoffabbrand verhindert hierbei die Ausbildung von unterstöchiometrischen Bereichen oberhalb der Brennstoffentgasung. Hierdurch können sich keine reduzierenden Verbrennungsbedingungen einstellen. Um dies zu ändern, musste die Luftzuführung und Verteilung des Heizkessels in folgenden Punkten verändert werden:

- Einsatz eines neuen Verbrennungsluftzylinders, mit dem nur Primärluft durch Bohrungen in der Bodenfläche des Zylinders zugeführt wird
- Zuführung der Sekundärluft über eine bewegliche Sonde im Zentrum des Flammrohres
- Austausch des Lufttellers für die Verbrennungsluftverteilung im Bereich des Kohlenstoffabbrandes durch einen Verbrennungsluftring mit Bohrungen für die Zuführung der Nachverbrennungsluft.

In **Bild 7.1** ist der neue Verbrennungsluftzylinder, der Sondenkopf für die Sekundärluftzuführung und der neue Ring zur Verteilung der Nachverbrennungsluft gezeigt.



Beim neuen Verbrennungsluftzylinder wurde die Anzahl der Bohrungen und der Bohrungsdurchmesser für die Primärluftzuführung verändert. Die Zuführung der Sekundärluft über eine bewegliche Sonde im Zentrum der Ausbrandglocke ermöglicht eine optimale Position für die Sekundärluftzugabe festzulegen, der Sondenkopf ist so ausgebildet, dass sich die Sekundärluft im Flammrohr besonders gut verteilt. Mit der ringförmigen Zuführung der Verbrennungsluft für den Kohlenstoffabbrandes wird eine bessere Anströmung der Glutoberfläche erreicht. Für die Verbrennungsversuche mit der geänderten Luftzuführung wurden alle Luftgebläse entfernt. Die Verbrennungsluftversorgung erfolgte mit Druckluft.

Als Brennstoff für die Optimierungsversuche wurde Gerste_Ref benutzt. Der Einfluss der Luftstufung auf die NO_x -Konzentration ist in **Bild 7.2** dargestellt. Beim ungestuften Betrieb (Verbrennungsluft wird nur durch den Verbrennungsluftzylinder zugeführt) liegt die NO_x -Konzentration bei ca. 750 mg/m^3 . Wird Verbrennungsluft sowohl über den Zylinder als auch über die Sekundärluftsonde zugeführt, nimmt die NO_x -Konzentration im Abgas deutlich ab

und liegt im Bereich von 530 mg/m^3 , was einem Rückgang von rund 30 % entspricht. Beim Betrieb mit Luftstufung wurde die Primärluftmenge reduziert und die Sekundärluftmenge so eingestellt, dass im Abgas ungefähr derselbe Luftüberschuss wie beim Betrieb ohne Luftstufung vorhanden war.

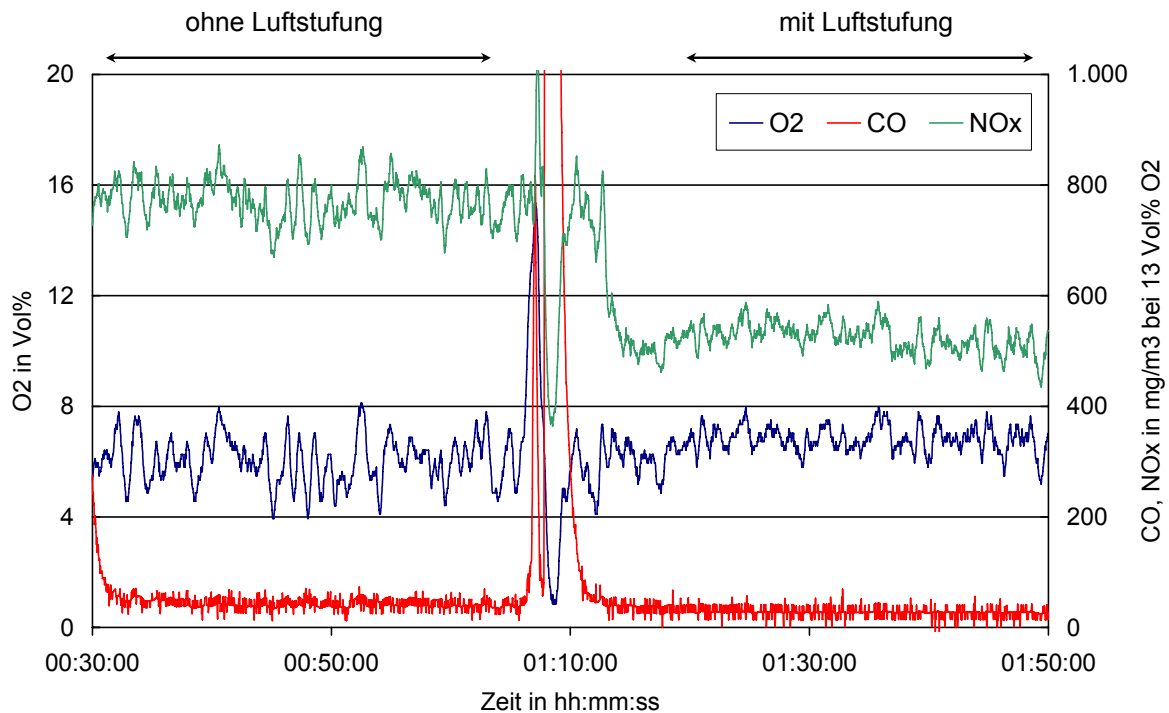


Bild 7.2: O_2 -, CO - und NO_x -Konzentrationen im Abgas des Agro 40 beim Betrieb mit und ohne Luftstufung (Brennstoff: Gerste_Ref)

Der Einfluss der Reduktionszonenhöhe, und damit der Abstand zwischen Verbrennungsteller (Entgasungszone) und Sekundärluftzugabe (d.h. Position der Unterkante des Sondenkopfes der Sekundärluftsonde), auf die NO_x -Konzentration ist in **Bild 7.3** dargestellt.

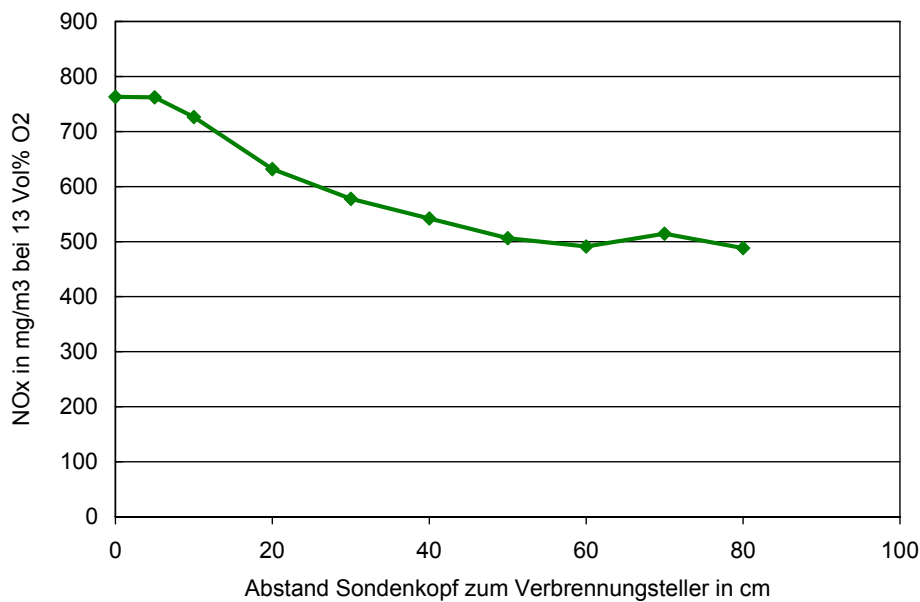


Bild 7.3: Zusammenhang zwischen NO_x-Konzentrationen im Abgas des Agro 40 und Abstand des Sondenkopfes für die Sekundärluft zum Verbrennungsteller (Brennstoff: Gerste_Ref)

Der Abstand des Sondenkopfes vom Verbrennungsteller wurde zwischen 5 bis 80 cm variiert. Mit zunehmender Entfernung der Sekundärluftzugabe vom Verbrennungsteller nimmt die NO_x-Konzentration im Abgas des Heizkessels ab. Wird der Abstand zwischen Entgasungszone und Sekundärluftzugabe zu groß, ab ca. 50 cm, ist keine weitere NO_x-Minderung mehr feststellbar. Für eine maximal mögliche NO_x-Minderung und einen stabilen Betrieb im Bereich der Nennwärmeleistung sollte die Reduktionszone eine Länge von 60 – 80 cm aufweisen. Dann sind beim Brennstoff Gerste_Ref NO_x-Konzentrationen im Bereich von 500 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) erreichbar.

Weiteres Verbesserungspotential ergab sich durch den Austausch des vorhandenen Lufttellers für die Verbrennungsluftverteilung im Bereich des Kohlenstoffabbrandes durch einen Verbrennungsluftring mit Bohrungen für die Zuführung der Nachverbrennungsluft. Beim vorhandenen Luftteller waren die Verteilung der Verbrennungsluft über dem Verbrennungsteller und die Anströmung der Glut nicht besonders günstig. Hierdurch wurden für die Verbrennung des Kohlenstoffes zu große Luftmengen benötigt und der Ausbrand war in vielen Fällen trotzdem nicht besonders gut, was zu hohen Kohlenstoffgehalten in der Asche führte. Bei der geänderten Luftzuführung wurde deshalb die Anzahl der Luftöffnungen im Verteilerring reduziert, damit die Luft mit höherer Geschwindigkeit austritt, und der Ring wurde 7 cm tiefer montiert, damit die Verbrennungsluft das Glutbett besser erreicht. Die Abbrandversuche zeigten, dass der Kohlenstoff mit der verbesserten Luftzuführung wesentlich intensiver und gleichmäßiger abbrennt und sich beim Start des Heizkessels auch leichter entzündet.

Um die zugeführte Luftmenge für den Kohlenstoffabbrand und die anderen Teilluftströme zu optimieren, wurden Versuche mit verschiedenen Lufteinstellungen im gestuften und ungestuften Betrieb durchgeführt. In **Tabelle 7.1** sind die Ergebnisse dieser Messungen zusammengefasst aufgeführt.

Tabelle 7.1: Ergebnisse der Abbrandversuche zur Optimierung der Verbrennungsluftmengen beim Heizkessel Agro 40 mit Gerste_Ref

Versuchsbezeichnung	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4
Betrieb	ungestuft	gestuft	gestuft	gestuft
Wärmeleistung in kW	40,0	39,0	38,0	37,5
Primärluft *	72	46	49	53
Sekundärluft *	0	31	33	36
Nachverbrennungsluft *	28	23	18	11
Abstand Sekundärluftsonde zu Verbrennungsteller in cm	-	60	60	60
Temperaturen im Heizkessel **				
Flammrohr innen in °C	860	862	855	850
Flammrohr oben in °C	613	611	608	603
Flammrohr unten in °C	545	539	534	529
Gaskonzentrationen ***				
CO ₂ in Vol%	14,8	13,9	14,0	13,9
O ₂ in Vol%	5,6	6,6	6,3	6,4
CO in mg/m ³	67	18	16	49
NO _x in mgNO ₂ /m ³	656	563	479	477

* Angaben in % bezogen auf die jeweilige Gesamtverbrennungsluft

** siehe auch Tabelle 6.3

* bezogen auf 13 Vol% O₂ im Abgas

Durch eine gute Abstimmung der einzelnen Teilluftströme kann die NO_x-Konzentration weiter abgesenkt werden. Prüfstandswerte unterhalb von 500 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) konnten beim Versuch Gr3 und Gr4 mit dem Brennstoff Gerste_Ref erreicht werden.

7.2 Regelungskonzept für Langzeitversuche

Das Regelungskonzept für die Langzeitversuche beim Projektpartner Technologie- und Förderzentrum in Straubing (TFZ) wurde auf Basis der beschriebenen Kesseloptimierung festgelegt. Dabei hat sich folgende Regelstrategie als am Besten herausgestellt:

- die Verbrennungsluftverteilung und die Teilvolumenströme der Verbrennungsluft werden auf den aktuellen Brennstoff (Art, Qualität) und die gewählte Feuerungswärmeleistung des Kessels eingestellt
- mit der Drehzahl des Abgasgebläses wird die Gesamtluftmenge für die Verbrennung online geregelt.

Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass das sensible Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Teilströmen der Verbrennungsluft nicht immer neu eingestellt bzw. einzeln nachgeregelt werden muss, sondern mit einem Parameter eine kontinuierliche Regelung erfolgen kann. Um dieses Konzept zu verifizieren, wurde die Drehzahl des Abgasgebläses schrittweise reduziert und dabei die Konzentrationen von CO, NO_x, CO₂ und O₂ aufgezeichnet. **Bild 7.4** zeigt den Einfluss der Gebläsedrehzahl auf die Gaskonzentrationen. Bei einem Vorgabewert des Saugzugs von 135 wird ein minimaler CO Wert und eine NO_x-Konzentration deutlich unter 500 mg/m³ (bei 13 Vol% O₂) erreicht.

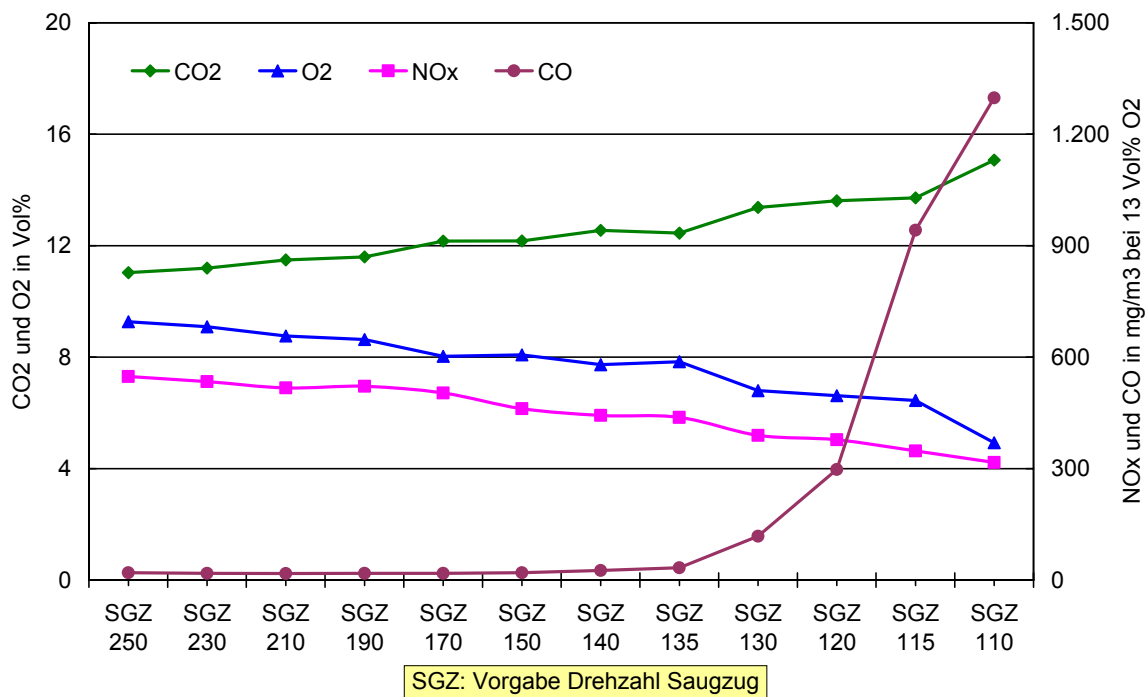


Bild 7.4: Einfluss der Abgasgebläsedrehzahl auf die Emissionen beim optimierten Agro 40 (Brennstoff: Gerste_Ref)

Der dargestellte Zusammenhang zwischen Abgaskonzentrationen und Drehzahl des Saugzuggebläses zeigt, dass bei fest eingestellten Teilvolumenströmen der Verbrennungsluft anhand der Drehzahl des Abgasgebläses die Verbrennung optimiert und geregelt werden kann. Für diese Regelaufgabe stellte die Firma Lamtec einen adaptiven Regler (Etamatic) auf Basis der Software Labview[®] der Firma National Instruments kostenfrei zur Verfügung. Dieser Regler erkennt die so genannte CO-Kante, also den Anstieg von CO, und optimiert den Regelparameter (hier: Drehzahl vom Abgasgebläse) so, dass er immer kurz vor diesem Anstieg liegt. Die CO-Konzentration wurde beim Dauerversuch mit dem CO/H₂-Sensorsystem „CarboSen“ des Projektpartners ESCUBE GmbH & Co. KG gemessen. Das **Bild 7.5** zeigt das vereinfachte Schema des umgesetzten Regelungskonzepts.

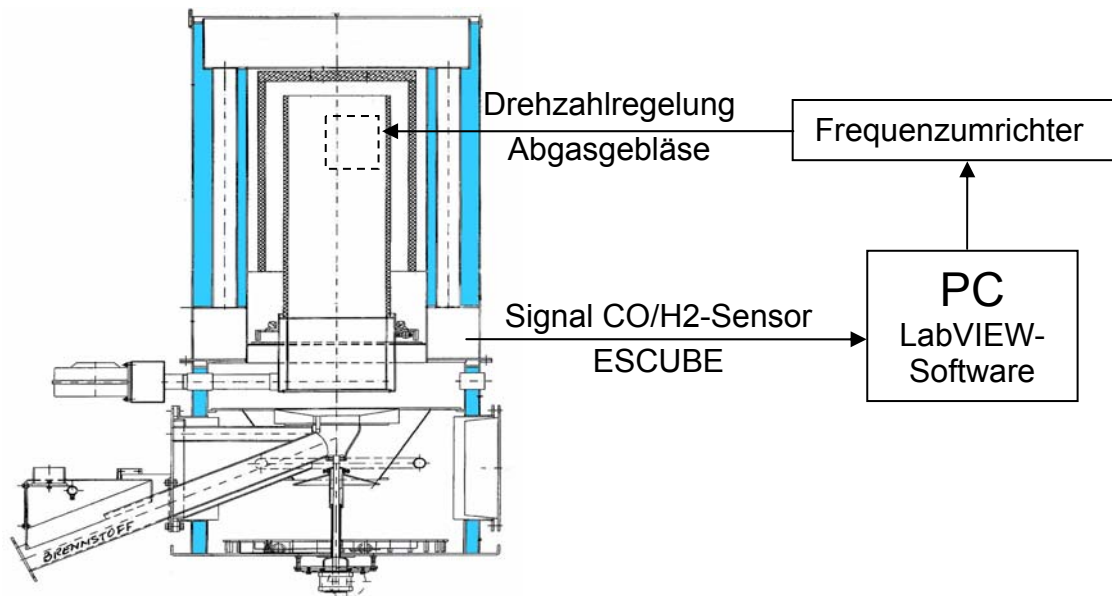


Bild 7.5: Regelungskonzept zur Drehzahlregelung des Abgasgebläses beim optimierten Agro 40 anhand des Signals vom CO/H₂-Sensorssystem „CarboSen“ von ESCUBE

Um die Drehzahl des Abgasgebläses anhand des CarboSen-Signals zu regeln, wurde ein von der Kesselsteuerung unabhängiger Regler eingesetzt. Der Regler basiert auf der LabVIEW-Software der Firma Lamtec für Gas- und Ölbrenner und wurde vom IVD für diesen Anwendungsbereich angepasst. Für die Regelaufgabe wird das Signal des CarboSen in einem Embedded-PC mit angeschlossenen Busklemmen eingelesen und anschließend in LabVIEW verarbeitet. Das Programm regelt dann über einen Frequenzumrichter die Abgasgebläsedrehzahl, **Bild 7.6** zeigt den Schaltschrankaufbau. Für eine spätere Auswertung der Daten werden diese abgespeichert. Das ursprüngliche Abgasgebläse des Heizkessels wurde durch ein Drehstromgebläse mit Frequenzumrichter ersetzt.

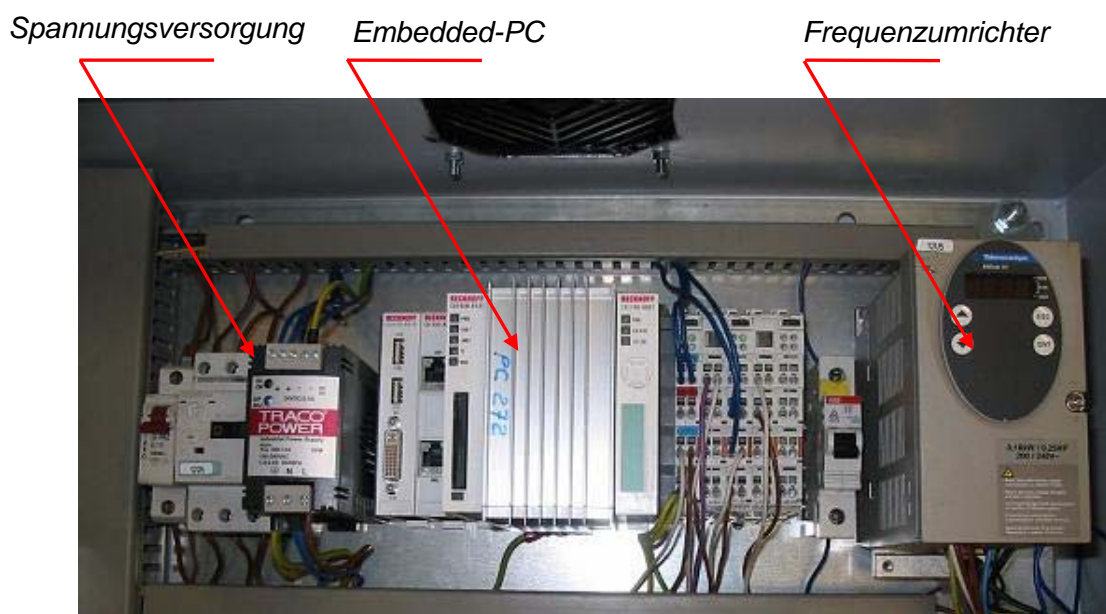


Bild 7.6: Aufbau des Schaltschrankaufbaus zur Drehzahlregelung beim optimierten Agro 40

Adaptation und Optimierung des Regelungsprogramms

Das von der Firma Lamtec gelieferte Programm wurde ursprünglich für schnell reagierende Gas- und Ölbrenner entwickelt. Dieses musste an die Betriebsweise von Heizkesseln für Festbrennstoffe adaptiert werden. Die größten Unterschiede liegen hierbei in den Reaktionszeiten der Heizkessel auf Änderungen von Regelgrößen und dem spezifischen Verhalten der Anlagen. Deswegen mussten alle Zeitkonstanten angepasst werden. Außerdem war es nötig, das ursprüngliche Programm zu erweitern.

Das Programm kann man in zwei Betriebsarten nutzen, dem manuellen und dem automatischen Betrieb. Im manuellen Betrieb kann man die Drehzahl des Abgasgebläses vorgeben. Dieser Zustand ist zum Beispiel für das Anfahren des Heizkessels Agro 40 gedacht. Wenn ein stabiler Betriebszustand der Anlage erreicht ist, dann wechselt man in den Automatikbetrieb. Der Regelalgorithmus wird mit dem Versuchsverlauf in **Bild 7.7** beschrieben.

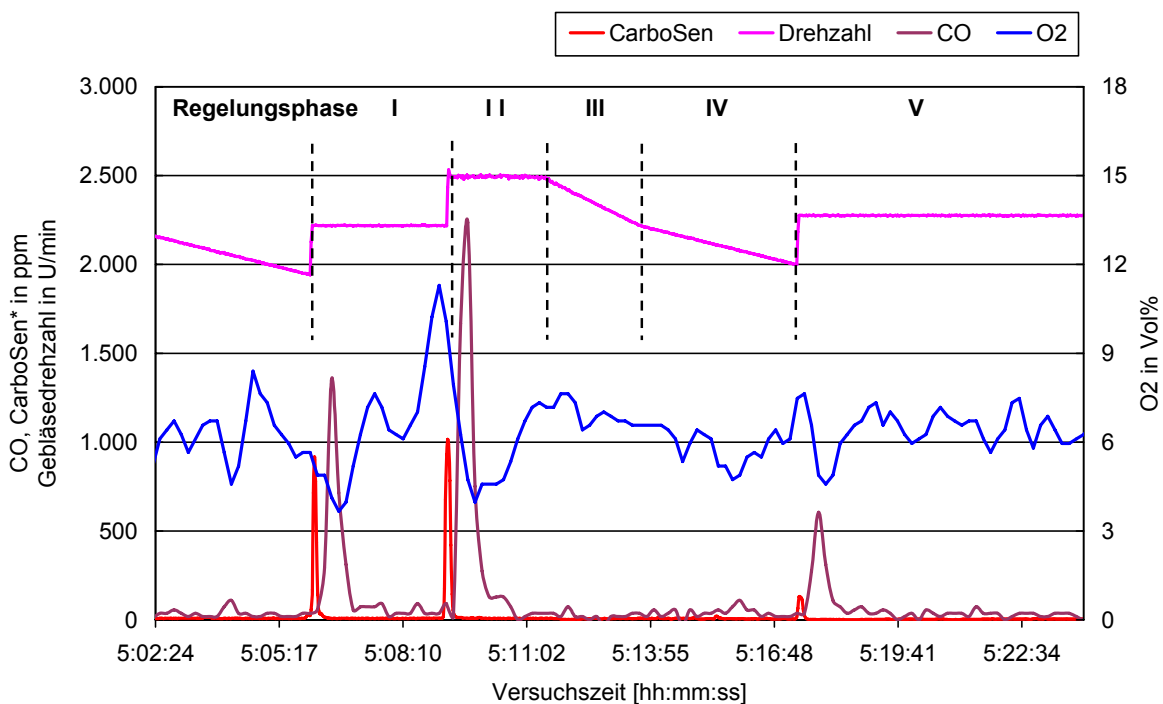


Bild 7.7: Veranschaulichung des Regelungsprinzips zur Drehzahlregelung beim optimierten Agro 40 (* Angabe ppm für CarboSen nur näherungsweise)

In einem stabilen Zustand überwacht das Programm, ob ein vorgegebener Gradient oder eine vorgegebene Schwellenwert des CarboSen-Signals überschritten wird. In dieser Zeit ist der Regler nicht aktiv (**Regelungsphase I**). Erhöht sich das CarboSen-Signal, wird der Regler aktiv und erhöht die Drehzahl des Abgasgebläses um einen vorgegebenen Wert. Da die Antwortzeit der Anlage relativ lang ist, wird die Drehzahl für eine bestimmte Wartezeit unverändert gelassen, unabhängig von der Signalhöhe der CarboSen-Sonde (**Regelungsphase II**). Nach dieser Zeit versucht der Regler einen neuen adaptiven Arbeitspunkt zu finden. Die Drehzahl wird langsam gesenkt bis zum Punkt wo es zum nächsten CO-Anstieg kommt. Die Rücknahme der Drehzahl ist mit zwei verschiedenen Gradienten realisiert. Zuerst mit

einem größeren Gradienten, solange die Drehzahl höher ist als im letzten adaptiven Arbeitspunkt, danach entsprechend langsamer (**Regelungsphasen III und IV**).

Nach dem Auftreten eines höheren CarboSen-Signals wird zum momentanen Drehzahlwert ein Pufferwert addiert. Der Regler geht in die **Regelungsphase V** über. In dieser Phase wird die momentane Drehzahl solange konstant gehalten, bis das Sensorsignal einen Schwellenwert übersteigt. Tritt während 60 Minuten kein Schwellenwert auf, wird in den aktiven Modus umgeschaltet. Der Regler versucht einen neuen, besseren Arbeitspunkt zu finden.

Trotz eines optimalen Arbeitspunktes für den Heizkessel, kann es aufgrund von kurzzeitigen Störungen oder Schwankungen in der Brennstoffzufuhr und im Verbrennungsprozess zu unerwarteten Emissionsspitzen kommen. Deswegen sollte nicht jeder auftretende Schwellenwert für den Regler als ein Einschaltimpuls interpretiert werden. Wenn ein Signal zu kurz oder zu schwach ist, wird es ignoriert, was beispielhaft in **Bild 7.8** dargestellt ist.

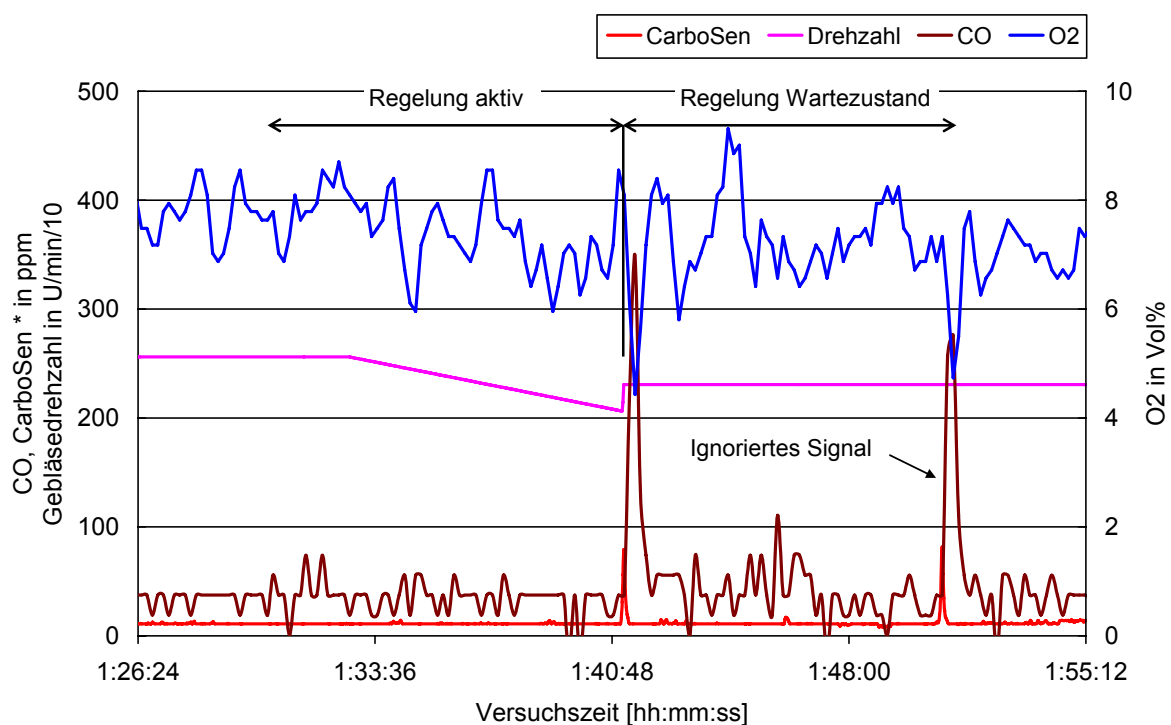


Bild 7.8: Beispiel für ein ignoriertes Signal beim Regelungskonzept für den optimierten Agro 40 (* Angabe ppm für CarboSen nur näherungsweise)

Da bei diesem Heizkessel keine Unterdruckmessung vorhanden ist, muss die minimale Drehzahl des Abgasgebläses fest eingegeben werden. Somit ist es möglich, die Anlage sicher und mit optimierten O₂-Gehalt im Abgas zu führen. Dies haben die im TFZ durchgeführten Dauerversuche bestätigt. In **Bild 7.9** sind hierzu 2 Versuchsverläufe gegenüber gestellt. Einer repräsentiert die Ergebnisse ohne Regler und der Andere nach der Reglerimplementierung. Es ist zu sehen, dass der O₂-Gehalt im Abgas durch den Reglereinsatz abgesenkt werden konnte, bei im Mittel geringerer CO-Emission. Da der Regler immer versucht an der Grenze zum CO-Anstieg zu arbeiten, verursacht er kurzzeitige CO-Konzentrationsspitzen im Abgas.

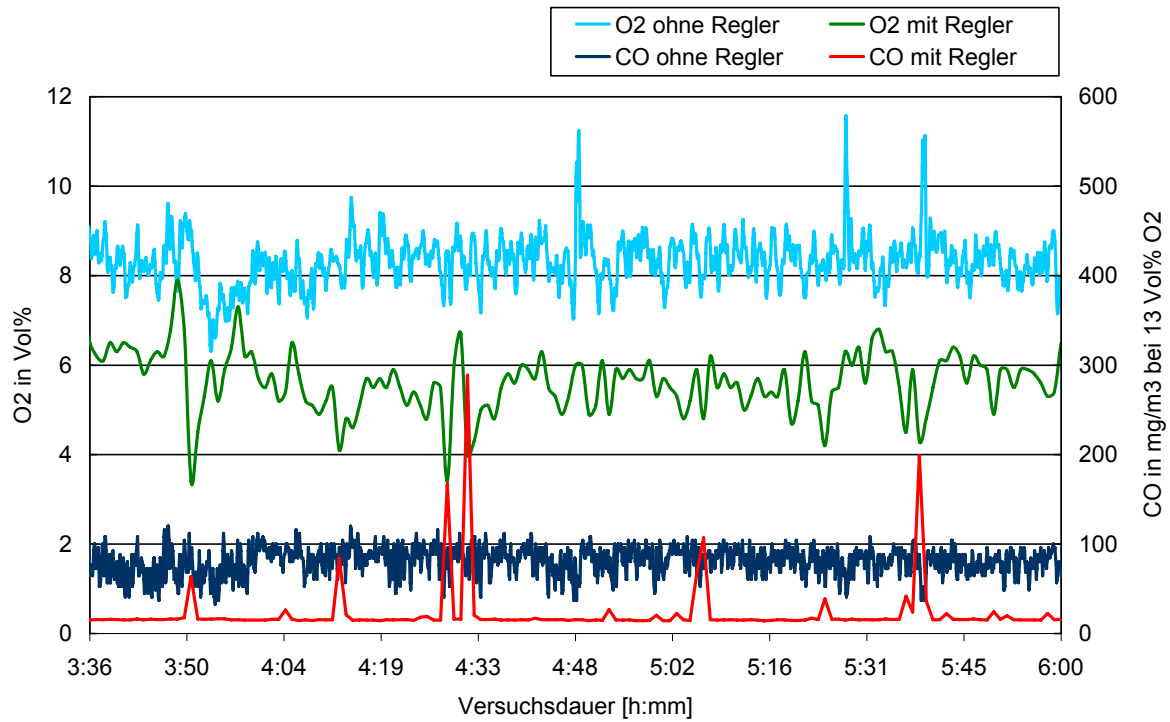


Bild 7.9: Vergleich der O₂- und CO-Konzentrationen im Abgas des Heizkessels Agro 40 mit und ohne Drehzahlregelung des Gebläses

8 Zusammenfassung

Die energetische Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Rückstände und Nebenprodukte als CO₂-neutrale Brennstoffe können einen Beitrag zur Schonung fossiler Ressourcen, zum Klimaschutz und zur Verbesserung der wirtschaftlichen Ergebnisse der landwirtschaftlichen Betriebe leisten. Vor diesem Hintergrund wird seitens der Deutschen Landwirtschaft verstärkt gefordert, die rechtlichen Voraussetzungen zu schaffen, damit Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung für Getreide und Getreideverarbeitungsreststoffe, die in den Geltungsbereich der 1. BImSchV (z.B. bis zu einer Nennwärmeleistung von 100 kW) oder der TA-Luft fallen (z.B. im Leistungsbereich über 100 bis 1.000 kW), legal und problemlos betrieben werden können. Hierbei erscheinen die Leistungsbereiche von 50 bis ca. 90 kW und von etwa 200 bis 350 kW besonders interessant, da der kleinere Leistungsbereich in etwa den Wärmebedarf der Wohn- und Betriebsgebäude und der obere Leistungsbereich den Wärmebedarf (Grundlast) kleinerer Nahwärmenetze oder z.B. von Unterglasflächen abdeckt. In diesen Leistungsbereichen könnte eine thermische Nutzung dieser Biomassen durch die landwirtschaftlichen Betriebe selbst oder z.B. durch diesen angegliederte Betreiberfirmen erfolgen.

Durch die besonderen Brennstoffnachteile von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh, wie z.B. hohe Aschegehalte, niedrige Ascheschmelzpunkte, hohe Chlor-, Kalium- und Stickstoffgehalte, geringe Schüttdichte und hoher Feinanteil von z.B. Stroh und einigen Fraktionen vom Getreideausputz, ergeben sich, wenn ein emissionsarmer und zuverlässiger Betrieb der Feuerungen gefordert wird, höhere technische und finanzielle Aufwendungen für diese Anlagen. Dies und das relativ geringe Marktpotential (Nischenmarkt) hemmen das Interesse und die Aktivitäten vieler im Bereich von Holzfeuerungen tätigen Hersteller. Dies erklärt, weshalb derzeit die Anlagentechnik für diese Biomassen von vielen noch als unausgereift und nicht praxistauglich angesehen wird.

Aufgrund dieser unbefriedigenden Situation ist eine Weiterentwicklung der Feuerungsanlagentechnik notwendig. Hierzu wurde mit diesem Projekt ein Beitrag geleistet. So wurde ein neu speziell für Getreidebrennstoffe entwickelter **Heizkessel** (Agro 40 des Herstellers Agroflam, Overath) soweit weiterentwickelt, dass unter Prüfstandbedingungen mit Getreide- und Strohreststoffen bei richtiger Kesseleinstellung die **Partikelemissionen $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ und die NO_x-Emissionen $\leq 500 \text{ mg/m}^3$** (jeweils bezogen auf 13 Vol% O₂) betragen. Durch den Einsatz einer Drehzahlregelung für das Abgasgebläse in Verbindung mit einem CO/HC-Sensor (Typ CarboSen von Firma ESCUBE) konnte ein stabiler Dauerbetrieb mit hohem feuerungstechnischen Wirkungsgrad bei geringen CO- und VOC-Konzentrationen im Abgas realisiert werden.

Darüber hinaus wurde ein **externer Staubabscheider** (Edelstahl-Gewebefilter der Firma Oskar Winkel, Amberg) für die Anwendung bei Getreide- und Strohfeuerungen erfolgreich weiterentwickelt. Im Reingas nach dem Staubfilter wurden bei allen Brennstoffen und allen Betriebsbedingungen durchgängig **Staubkonzentrationen unter 10 mg/m^3** (bei 13 Vol% O₂) gemessen. Stäube aus der Verbrennung von Getreideausputz, Strohpellets und Hafer ließen sich von der Filteroberfläche problemlos abreinigen. Hier war ein zuverlässiger Dauerbetrieb des Gewebefilters bei konstantem Druckverlustbereich möglich. Die Verbrennungstäube anderer Getreidearten, wie Gerste oder Weizen, können nur dann zuverlässig vom Gewebe-

filter abgereinigt werden, wenn den Brennstoffen Branntkalk zugegeben wird. Durch eine elektrische Zusatzheizung in den Filterpatronen konnte eine Korrosion auf dem Edelstahl- und Stützgewebe verhindert werden.

9 Literatur

1. BImSchV. 2001.

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 27. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1950)

1. BImSchV. Entwurf 2007.

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV). Entwurf zur Novelle der Verordnung vom Juli 2007

4. BImSchV. 1997.

Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftigen Anlagen) vom 14. März 1997.

Launhardt, T.; Hartmann, H; Link, H.; Schmid, V. 2000.

Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinf Feuerungsanlage - Emissionen und Aschequalität. Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU). Umwelt & Entwicklung. Materialien 156. München.

Merkel, R. 2006.

Produktvorstellung Hydrobox, Fa. Schröder, 10. Arbeitskreissitzung „Holzfeuerung“, 17.05.2006. Straubing: Technologie- und Förderzentrum

Mocker, M.; Quicker, P.; Faulstich, M.; Berger, R.; Beer, S. 2007.

Kleinf Feuerungsanlage für Getreide und Stroh - eine Gemeinschaftsentwicklung in der Region Amberg-Sulzbach. ATZ Entwicklungszentrum Sulzbach-Rosenberg.

Spanner. 2008.

Produktbeschreibung zum neu entwickelten Elektro-Filter „Spanner-Feinstaub-Filter“. Firma Spanner Re² GmbH, Neufahrn/Ndb.

TA-Luft. 2002.

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft- TA Luft) vom 24.07.2002

UM. 2005.

Verbrennung von Getreide in Kleinf Feuerungsanlagen. Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV): Ausnahmegenehmigungen gemäß § 20. Schreiben des Umweltministeriums Baden-Württemberg an die Regierungspräsidien mit Datum 16.11.2005, Aktenzeichen 43-8820.20-1.VO/124.

Winkel, O. 2004.

Entwicklung eines Entstaubungsaggregates für Abgase aus Holz-Kleinf Feuerungsanlagen. Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg.

Teilbericht II:

Entwicklung und Bereitstellung von für Biomassefeuerungen einsetzbaren Abgassensoren

Die Bearbeitung von Teil II erfolgte durch:



Dr.-Ing. Frank Hammer

ESCUBE GmbH & Co. KG • Nobelstraße 15 • 70569 Stuttgart

Bericht-Nr.: S3 08-EB-03

(Version 1.0, Stand 29.07.2008)

Erstellt für die

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

FNR-Vorhaben 22018903

Inhalt

1	Einleitung	89
2	Aufgabenstellung im Gesamtprojekt	90
3	Methodisches Vorgehen	90
4	Die Messumgebung Agroflam-40.....	91
5.1.	In-Situ Messung	91
5.2.	Mögliche Messpositionen.....	91
5.3.	Auswahl der Messstelle	91
5	Das CO _e -Sensorsystem „CarboSen“	93
5.1	Das Sensorelement	93
5.2	Das Sondentauchrohr:	94
5.3	Der Sondenaufbau.....	95
5.4	Die Elektronik.....	96
5.5	Die Software	96
6	Messungen im Labor.....	97
6.1	Das Gasmesslabor	97
6.2	Die Charakterisierung der CarboSen-Sonde	98
6.2.1	Die CO-Kennlinie	99
6.2.2	Die H ₂ -Kennlinie.....	99
6.2.3	Die O ₂ Abhängigkeit.....	100
6.2.4	Die Temperaturabhängigkeit	102
6.2.5	Der Einfluss der Frontkappe	103
6.2.6	Erste Aussagen zur Lebensdauer	107
7	Messungen im Feld.....	108
7.1	Messung mit reinem Weizen (Weizen_Ref).....	108
7.1.1	Korrelation zwischen Sensorsignal und CO	110
7.1.2	Zeitlicher Versatz zwischen In-situ und ex-situ Messung	110
7.2	Messung mit reiner Gerste (Gerste_Ref).....	112
7.3	Messung mit Weizenpellets und Harnstoffzusatz (Weizen_Harn)	114
7.3.1	Erkennung eines Anlagendefektes	115
7.4	Messung mit reinen Roggenstrohpellets (Stohp_Ref_Rg).....	116
7.5	Messung mit reinen Weizenpellets (Weizen_Ref)	118
7.6	Funktionsüberprüfung der Sonden	119
7.6.1	Manuelle Funktionsüberprüfung	119
7.6.2	Automatische Funktionsüberprüfung (Selbstcheck)	120
7.6.3	Erkennung einer Kesselverschmutzung / Veraschung des Wärmetauschers	122
7.6.4	Erkennung eines Fehlstarts	123
8	Die Strategie zur Verbrennungsoptimierung	123
8.1	Ziele einer modernen Feuerungsregelung.....	123
8.2	Die Emissionskantenregelung	124
9	Zusammenfassung und Ausblick	126
9.1	Zusammenfassung	126
9.2	. Ausblick.....	129
10	Literatur.....	130

1 Einleitung

Die energetische Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Rückstände und Nebenprodukte als CO₂-neutrale Brennstoffe kann einen Beitrag zur Schonung fossiler Ressourcen, zum Klimaschutz und zur Verbesserung der wirtschaftlichen Ergebnisse der landwirtschaftlichen Betriebe leisten. Vor diesem Hintergrund wird seitens der Deutschen Landwirtschaft verstärkt gefordert, die rechtlichen Voraussetzungen zu schaffen, damit Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung für Getreide und Getreideverarbeitungsreststoffe, die in den Geltungsbereich der 1.BImSchV (z.B. bis zu einer Nennwärmeleistung von 100 kW) oder der TA-Luft fallen (z.B. im Leistungsbereich über 100 bis 1.000 kW), legal und problemlos betrieben werden können. Hierbei erscheinen die Leistungsbereiche von 50 bis ca. 90 kW und von etwa 200 bis 350 kW besonders interessant, da der kleinere Leistungsbereich in etwa den Wärmebedarf der Wohn- und Betriebsgebäude und der obere Leistungsbereich den Wärmebedarf (Grundlast) kleinerer Nahwärmenetze oder auch von Unterglasflächen abdeckt. In diesen Leistungsbereichen könnte eine thermische Nutzung dieser Biomassen durch die landwirtschaftlichen Betriebe selbst oder durch diesen angegliederte Betreiberfirmen erfolgen.

Vor diesem Hintergrund bieten inzwischen einige Feuerungshersteller entsprechende Anlagen an, die für die Verbrennung von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh geeignet sein sollen. Deutlich mehr Feuerungshersteller geben an, dass eine Zumischung dieser Brennstoffe zu z.B. Hackschnitzeln in der Größenordnung von 10 % (Masse) in ihren Feuerungen zu keinen Betriebs- oder Emissionsproblemen führt.

Aufgrund der besonderen Nachteile von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh bei der Verbrennung (hohe Aschegehalte, niedrige Ascheschmelzpunkte, hohe Chlor-, Kalium- und Stickstoffgehalte, teilweise geringe Schüttdichte und hoher Feinanteil von Stroh und einigen Fraktionen vom Getreideausputz) ergeben sich, unter der Voraussetzung eines emissionsarmen und zuverlässigen Betriebs der Feuerungen, höhere technische und finanzielle Aufwendungen für diese Anlagen. Zusammen mit einem relativ geringen Marktpotenzial (Nischenmarkt) hemmt dies das Interesse und die Aktivitäten vieler im Bereich von Holzfeuerungen tätigen Hersteller. Deshalb wird derzeit die Anlagentechnik für die Verbrennung dieser Biomassen von vielen noch als unausgereift und nicht praxistauglich angesehen.

Um die Zuverlässigkeit, die Betriebssicherheit und die Effizienz dieser Anlagen weiter zu steigern, sollte der vom IVD während des Projekts ertüchtigte Kessel „Agroflam 40“ mittels einer In-situ Prozessüberwachung auf Basis innovativer CO_e-Abgassensoren CarboSen (s. Bild 1) aufgerüstet und die Funktionalität des Sensors und der Regelung demonstriert werden.

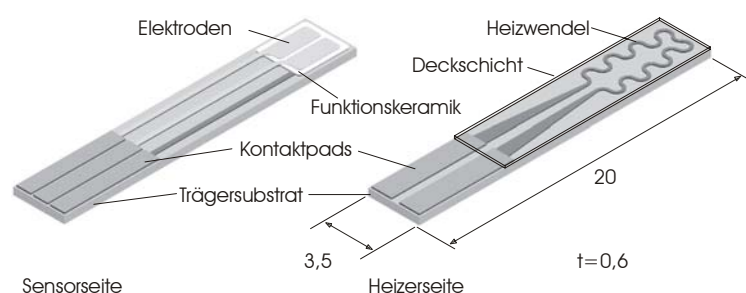


Bild 1: Aufbau des CarboSen Sensorelements

2 Aufgabenstellung im Gesamtprojekt

Innerhalb des Gesamtvorhabens hatte die ESCUBE GmbH & Co. KG das Thema „Entwicklung und Bereitstellung von für Biomassefeuerungen einsetzbaren Abgassensoren“ zu bearbeiten. Um eine reibungslose Integration der im Laufe des Projekts entwickelten und modifizierten Sensoren/Sensorsysteme inkl. Einbindung der Regelung/Optimierung zu erreichen, wurden alle Arbeiten in enger Abstimmung mit dem IVD durchgeführt.

3 Methodisches Vorgehen

Zunächst erfolgte die Definition möglicher Einbauorte für das CarboSen-Sensorsystem zur Verbrennungsoptimierung am AgroFlam-40 (s. Bild 2). Die Umgebungsbedingungen wurden dort analysiert geeignete Messpositionen bestimmt. Die Randbedingungen lieferten die Vorgabe für die Entwicklung und den Aufbau eines prototypischen Sensorsystems. Erfahrungen im Labor und im Feld führten zu einem fortgeschrittenen Prototypen in unterschiedlichen Ausführungen. Die generelle Funktion der CarboSen-Sonden wurde nachgewiesen. Parallelmessungen mit Abgasanalysatoren wurden durchgeführt, um die Zuordnung CO-Konzentration/Sensorsignal nachzuweisen. Die Sonden wurden nach einiger Zeit aus der Agroflam-40 Anlage ausgebaut und bei ESCUBE (nach)charakterisiert, um eine eventuelle Drift/Alterung zu erkennen. Danach wurden die Tauchsonden optisch, elektrisch und mechanisch inspiziert. Aus den Im Betrieb und im Labor gewonnenen Daten der Prototypen wurden Optimierungsmaßnahmen definiert und realisiert. Optimierte Tauchsonden wurden an das IVD ausgeliefert und in die vorbereitete Feldtestanlage integriert. An der Feldtestanlage wurde die Regelstrategie zur Verbrennungsoptimierung mittels CO_e-Sensoren erarbeitet und umgesetzt. Die ursprünglich für die Optimierung von Öl- und Gasfeuerungen entwickelte Regelstrategie sowie die dazu erforderliche Hardware wurden dem IVD zur Verfügung gestellt. Gemeinsam mit dem IVD wurde die Regelstrategie diskutiert, modifiziert und an die besonderen Gegebenheiten der trägen Feststoffverbrennungsanlage angepasst. Die Details zu diesen Arbeiten können den Berichten [5-7] entnommen werden.

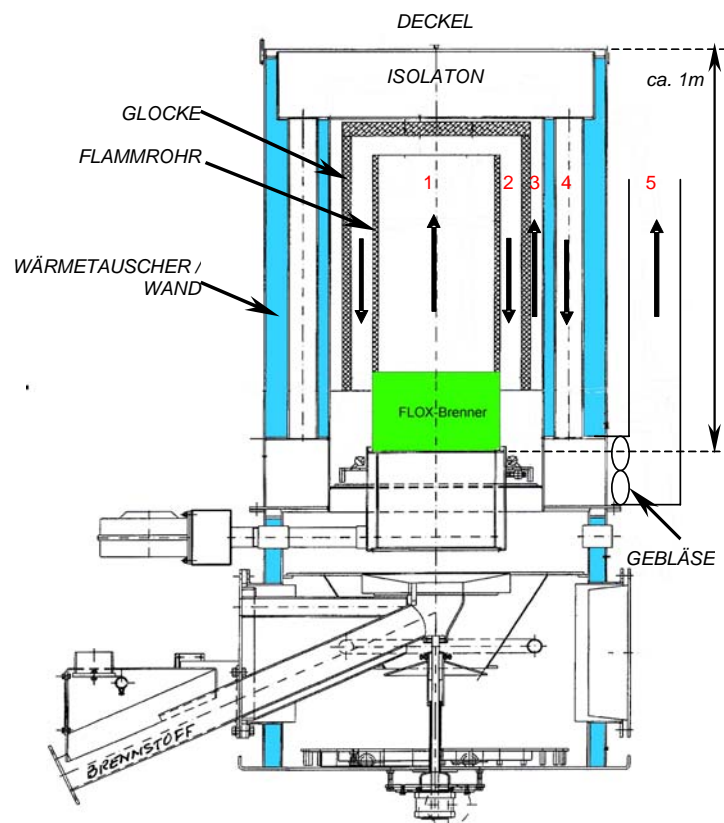


Bild 2: Innerer Aufbau des Agroflam 40 Kessels.

4 Die Messumgebung Agroflam-40

5.1. In-Situ Messung

Zur Verbrennungsoptimierung wird der Sensor direkt im Rauchzugsystem der Feuerungsanlage eingebaut und damit eine in-situ Messung realisiert. Dadurch entfällt der Aufwand für eine ex-situ Probennahme mit Extraktion durch Pumpe über Schlauchleitung mit Kühlung, Kondensatfalle, Filter etc. zum Analysator (Sensor). Das Resultat ist ein robustes, einfaches und potentiell kostengünstiges System zur kontinuierlichen und schnellen Prozessregelung.

5.2. Mögliche Messpositionen

In Bild 2 ist die Agroflam 40 Anlage in ihrem inneren Aufbau skizziert. Die roten Ziffern 1-5 kennzeichnen dabei die möglichen Meßpositionen für die in-situ Gassensorik im Rauchzugsystem des Agroflam 40 im 1) im inneren Flammrohr; 2) zwischen Flammrohr und Glocke; 3) zwischen Glocke und Wärmetauscher; 4) im Wärmetauscher ; 5) im Abzug hinter dem Wärmetauscher.

Kritischster Punkt ist die Temperatur an der Messstelle. Hierzu wurden an unterschiedlichen Messpositionen Temperaturmessungen durchgeführt, und zwar jeweils oben und unten, um eine Information über die ideale Eintauchtiefe der Tauchsonde zu erhalten. Die Anlage wurde dabei mit unterschiedlichen Brennstoffen bei maximal erreichbarer Betriebslast gefahren, um die oberen Temperaturgrenzen festzustellen. Das Ergebnis ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Versuche Technikum IVD, Agroflam 40 Heizkessel, Temperaturen.

Brennstoff	Messstelle				Wärmeleistung
	1	2, oben	2, unten	3	
Gerste_IHof	760°C	690°C	511°C	455-475°C	33
Weizen_IHof	783°C	701°C	523°C	468-478°C	35
Weizen_Ref	772°C	698°C	526°C	466-472°C	34
Stroh_Ref	872°C	811°C	690°C	463-484°C	25

5.3. Auswahl der Messstelle

Messstellen 3 und 5 wurden zunächst als geeignete Messstellen ausgewählt. Die Randbedingungen an den beiden Messstellen wurden genau bestimmt [6], da diese einen Einfluss auf den Aufbau der jeweiligen Sonde haben. Tabelle 2 zeigt die abschließende Bewertungsmatrix.

Aus Tabelle 2 geht Messposition 5 im Kaminzug als vorteilhaft hervor. Dort sitzt bereits eine Temperatursonde. Zudem wurde eine Lambda-Sonde zur Messung des Restsauerstoffgehaltes dort installiert. Der CarboSen an Pos. 5 schafft somit eine direkte zeitliche Zuordnungsmöglichkeit der gemessenen T, O₂ und CO/H₂-Werte. Kritisch an der Messstelle ist dabei die Gefahr durch Anlagerung von Partikeln und die Bildung von Schlacke an der Tauchrohrspitze, die sich schließlich zu einer zunehmenden Gasdiffusionsbarriere entwickeln könnte sowie eine erhöhte Gefahr durch Kriechströme bzw. Kurzschlüsse zwischen den leitenden Sensorstrukturen, wenn sich kondensierende Feuchte niederschlägt.

Speziell der Aspekt der Verschmutzung/Verschlackung und der Einfluss auf die Gasdiffusion und Lebensdauer des Sensors wurde näher untersucht und das Ergebnis in Kapitel 7 vorgestellt.

Tabelle 2: Bewertungsmatrix für die Messpositionen.

Merkmal	Messposition 3	Messposition 5
Einbaulage	vertikal => Wärme- und Gasstau an Sondenspitze	horizontal => guter Messgasan- und -abtransport zu/von Sondenspitze
Zugänglichkeit	Durchgang durch Deckel mit Isolation* => hoher Integrationsaufwand	Durchgang durch Kaminblech (t=1-2mm, D=200mm) => Einfache Integration-auch nachträglich möglich
Eintauchtiefe l	l > 0,2m => lange Tauchsonde, teuer	l < 0,2m => kurze Tauchsonde, günstig
Strömungsrichtung	aufwärts, von vorne => keine Anlagerung von Partikeln	aufwärts, von der Seite => Gefahr der Anlagerung von Partikeln / Verschlackung
Temperatur T_{max}	T _{max} > 480°C => teure htemperaturfeste Materialien (Keramik) nötig	T _{max} < 200°C => niedrigere Beanspruchung, günstigere Materialien
Feuchte	nicht kondensierend	teilw. kondensierend => Kriechstrom und Kurzschlussgefahr
Strömungsgeschwindigkeit v	v < 2m/s	v > 2m/s => bessere Dynamik, Durchmischung

*: Die Bohrung in der Isolation führt zu thermomechanischen Spannungen im Material während des Betriebs und zur Zerstörung des Wärmeschutzisolators (s. Bild 3 [8]).



Bild 3: Deckel des Agroflam-40 mit Bohrungen für Temperatur- und CarboSen-Sonden. Die Risse sind durch Thermospannungen verursacht [8].

5 Das CO_e-Sensorsystem „CarboSen“

Der CarboSen Sensor ist ein Festkörperelektrolytsensor nach dem Non-Nernst'schen Prinzip zur Messung brennbarer Gase wie CO, H₂, HC [1]. Im Feuerungsabgas liefert der Sensor ein Summensignal über alle oxidierbaren Gase. Je mehr „Unverbranntes“ durch den Sensor detektiert wird, desto schlechter ist die „Güte“ der Verbrennung unter den Gesichtspunkten Wirkungsgrad, Emission und Brennstoffverbrauch. In der Verbrennung wird Unverbranntes auch als CO_e (CO_{equivalent}) bezeichnet, weil die Signale dem CO-Verlauf folgen.

Der CarboSen ist als CS1.000 bzw. der CS10.000 in unterschiedlichen Sensitivitäten verfügbar. Die empfohlenen Meßbereiche sind entsprechend 0-1.000ppm bzw. 0-10.000ppm. Messungen im IVD-Labor im Mai 2006 zeigten eine CO-Konzentration im Rauchgases von 65ppm_{CO} bis 715 ppm_{CO}. Daher wurde der CarboSen CS1.000 (s. Bild 1) als geeignet gefunden und wird im Rahmen des Projektes eingesetzt [6].

5.1 Das Sensorelement

Das planare Sensorelement CarboSen ist mehrschichtig aufgebaut und hat etwa die Größe eines Streichholzes (s. Bild 4). Die Heizerwendel beheizt den Sensorkopf bzw. die dort angebrachten Elektroden auf die nominelle Betriebstemperatur von etwa 500-600°C. Dafür benötigt der Sensor bei Normbedingungen und ohne Strömung etwa 3W Heizleistung.

Die Temperatur an der Spitze des Sensorelements, genauer gesagt die Temperatur an den Elektroden, muß während des Betriebs konstant gehalten werden, sonst ändert sich die Charakteristik des Sensors (s. Kap. 6.2.4). Hierfür wird der Sensor mittels einer schnellen Elektronik temperatur- bzw. volumenstromkompensiert betrieben. D.h. bei steigender Messgastemperatur benötigt der Sensor <3W Heizleistung, um seine Betriebstemperatur zu halten. Diese Zusatzinformation vom CarboSen kann dafür herangezogen werden die Rauchgastemperatur im Kamin und damit den Zustand des Kessels (z.B. Verschmutzung, Verbrennung an/aus) zu überwachen. Dies wird in den Kapiteln 7.6.3 und 7.6.4 detaillierter untersucht.

Auf der der Heizerwendel gegenüberliegenden Seite befindet sich die innere Referenzelektrode, die über den Festkörperelektrolyten mit den beiden oben liegenden Arbeitselektroden verbunden ist. Zwischen Referenz- und Arbeitselektrode baut sich die Sensorspannung U_s aufgrund von CO/H₂ im Abgas auf. Aus Redundanzgründen sind zwei

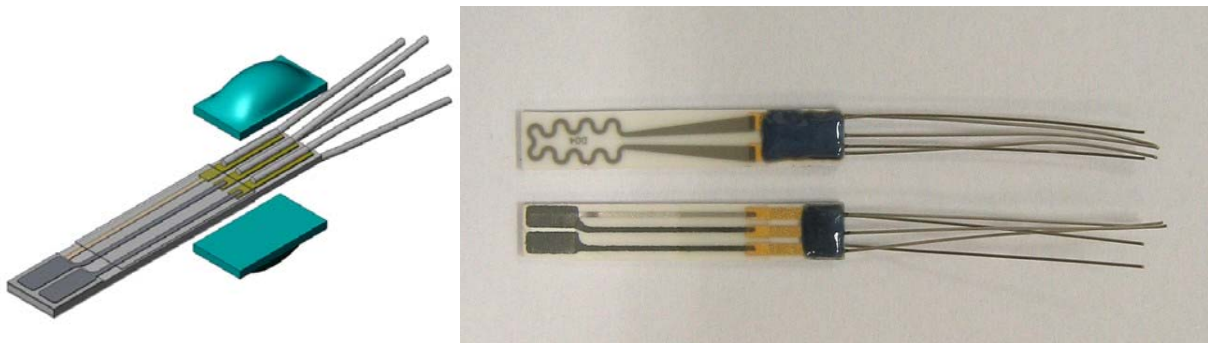


Bild 4: CarboSen Sensorelement mit 5 Drähten (l=30mm) und Glasfixierung.

identische Arbeitselektroden nebeneinander angeordnet. Sollte sich eine verändern, so kann die zweite die Messaufgabe bis zum nächsten Sensorwechsel übernehmen. Die beiden Sensorsignale U_{S1} (zwischen AE_1 und RE) bzw. U_{S2} (zwischen AE_2 und RE) werden ständig miteinander elektronisch verglichen. Bei Überschreiten einer maximalen Differenz zwischen den beiden Elektrodensignalen gibt die Elektronik eine Fehlermeldung / Wartungsmeldung aus.

5.2 Das Sondentauchrohr:

In [5-7] ist die Evolution des Tauchrohrs und die Adaption an die hier erforderlichen Randbedingungen detailliert beschrieben. Hier werden nochmals die einzelnen Entwicklungsstadien der Tauchrohre mit den wesentlichen Merkmalen aufgelistet:

- a. Stand der Technik – ungeschützt: Durchgehende Ni-Drähte im Edelstahlrohr ($D_a=8\text{mm}$); Stirnseite/Sensorelement ohne Schutz; vergossen an Sensorfuß mit HT-beständiger Keramik für T bis 500°C .
- b. Prototyp – geschützt: Ni-Drähte mit Glasfixierung am Sensorfuß (s. Bild 4) Übergang auf



a) Stand der Technik (vor Projektstart)



b) Erster Prototyp mit festem Sinterfilter (ab ca. Feb. 05)



c) Fortgeschrittener Prototyp mit abschraubbarer Frontkappe/Sinterfilter (ab ca. Jun. 2006)



d) Optimierter Prototyp mit Filtersieb (ab ca. Mai 2008; nach Projektende)

Bild 5: Die Evolution der Tauchsonde CarboSen1.000HT.

Ni-Drähte im kalten Bereich; Edelstahlrohr ($D_{a1}=8\text{mm}$); Stirnseite/Sensorelement geschützt mit Keramikfilter (Procelit) hinter angeschweißter Edelstahlkappe ($D_{a2}=10\text{mm}$); vergossen an Sensorfuß mit HT-beständiger Keramik für T bis 500°C .

- c. Fortschrittlicher Prototyp: Pt-Drähte mit Glasfixierung am Sensorfuß (s. Bild 4); Übergang auf Ni-Drähte im kalten Bereich; Edelstahlrohr ($D_{a1}=8\text{mm}$); Stirnseite/Sensorelement geschützt durch abschraubbare Frontkappe mit Edelstahl-Sinterfilter ($D_{a2}=6-8\text{mm}$; Porengröße $200\mu\text{m}$); vergossen an Sensorfuß mit HT-beständiger Keramik für T bis 500°C .
- d. Optimierter Prototyp (Vorserie): Durchgehende Au-Drähte im Edelstahlrohr mit Lochsieb an Stirnseite ($D_a=8\text{mm}$; Lochdurchmesser ca. $0,2\text{mm}$); kein Verguss am Sensorfuß; Fixierung des Sensorelements mittels Stützring.

Schritt a) nach b) gewährleistet den Schutz des Sensorelements vor Partikeln. Durch die angeschweißte Edelstahlschutzkappe konnte die Sonde jedoch nicht mehr einfach in den Prozess eingebaut werden. Schritt b) nach c) ermöglichte Messungen mit und ohne Frontkappe um deren Einfluss zu untersuchen. Durch die Reduzierung des Frontkappendurchmessers konnte die Sonde einfach in den Prozess eingebracht werden. Ni-Draht korrodiert nach kurzer Zeit bei hohen Temperaturen und oxidierenden Umgebungsbedingungen im Abgas. Umstieg auf Pt-Drähte erhöhen die Lebensdauer der Sonde. Schritt c) nach d) verringert den Widerstand der Zuleitung und ermöglicht einen besseren temperatur-kompensierten Betrieb der Sonde. Das dünne Lochsieb zum Sensorschutz direkt an der Stirnseite des Edelstahlrohrs minimiert das Totraumvolumen verkürzt die Diffusionswege des Gases, welches auf dem Weg zum Sensor nun nicht mehr abreagieren kann. Der Verzicht auf die poröse Vergussmasse ermöglicht den Betrieb der Sonde auch unter kondensierenden Bedingungen im Kaminzug.

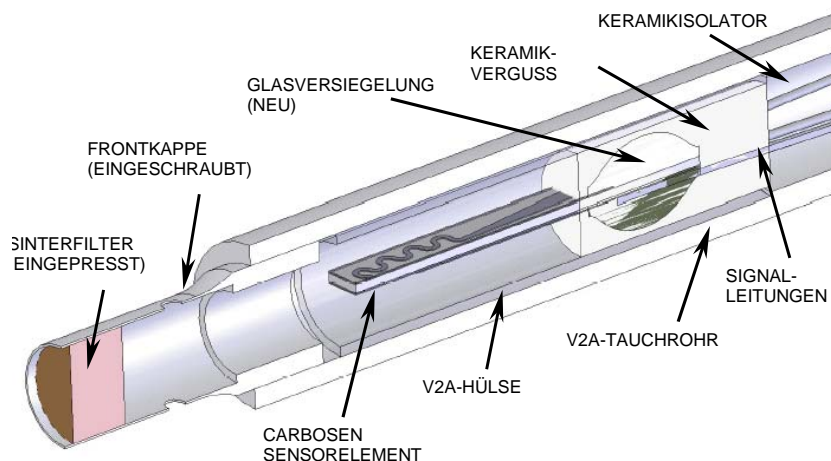


Bild 6: Schnitt durch die Tauchrohrspitze mit integriertem CarboSen. Die Vorseriensonde konnte nicht mehr im Rahmen des Projekts eingesetzt werden.

5.3 Der Sondenaufbau

Der Sondenaufbau sowie die einzelnen Integrationsstufen sind bereits in [6] detailliert beschrieben. Bild 6 zeigt einen Schnitt durch die Spitze des fortgeschrittenen Prototypen des Tauchrohrs.

5.4 Die Elektronik

Für den Betrieb der Sensoren wurden zwei unterschiedliche XC164-Elektroniken eingesetzt (s. Bild 7). Die digitalen Elektroniken mit programmierbarem Mikroprozessor sind nach Industriestandard gefertigt und CE-geprüft. Die Versorgungsspannung ist 24V DC. Die Elektronik hat zwei Ausgänge; 1 x Analog 0/4-20mV und 1 x CAN Bus.

In der Hutschienenausführung (Bild 7, links) wird der Sensor über ein 1,5m langes, 5-poliges, geschirmtes Sensorkabel inkl. DIN Stecker mit der Elektronik verbunden. Die Elektronikplatine ist in ein Hutschienengehäuse integriert, bereits für den Schaltschrankbau. Diese Ausführung ist dann sinnvoll, wenn nicht genügend Einbauraum für die on-board Elektronik zur Verfügung steht. Dabei darf die Länge des Sensorkabels 1,5m nicht überschreiten, da über die Zuleitungen der Sensorheizstrom von ca. 0,35A transportiert wird. Zunehmende Kabellänge bedeutet zunehmende Ohm'sche Verluste und Verfälschung der aktuellen Temperaturregelung die nach dem Prinzip der Konstanthaltung des gesamten Heißwiderstandes über die Heizerwendel arbeitet. Weitere Details sind dem Handbuch „CarboSen1.000 / HydroSen1.000 mit Elektronik XC164“ zu entnehmen [3].

In der „on-board“ Ausführung (Bild 7, rechts) bilden Sensor und Elektronik eine Einheit. Die on-board Elektronik sitzt direkt in einem spritzwassergeschützten (IP65) Elektronikgehäuse. Das Tauchrohr ist dabei in das Elektronikgehäuse eingeschraubt. Details sind dem Handbuch „CarboSen1.000 / HydroSen1.000 in der Ausführung ST“ zu entnehmen [4].

5.5 Die Software

Für die Parametrierung der Digitalelektronik wurden die Sensorsysteme mit einer entsprechenden Parametrierungssoftware „LAMTEC.exe“ ausgeliefert. Vor allem die Sensorbetriebstemperatur – und damit die Charakteristik des Sensors sowie die Schwellwerte zur internen Funktions- und Sicherheitsüberprüfung können hier an die jeweilige Messsituation angepasst werden. Die Beschreibung der Parameter und die werkseitigen Einstellungen sind ebenfalls in den Handbüchern zu finden [2-4].

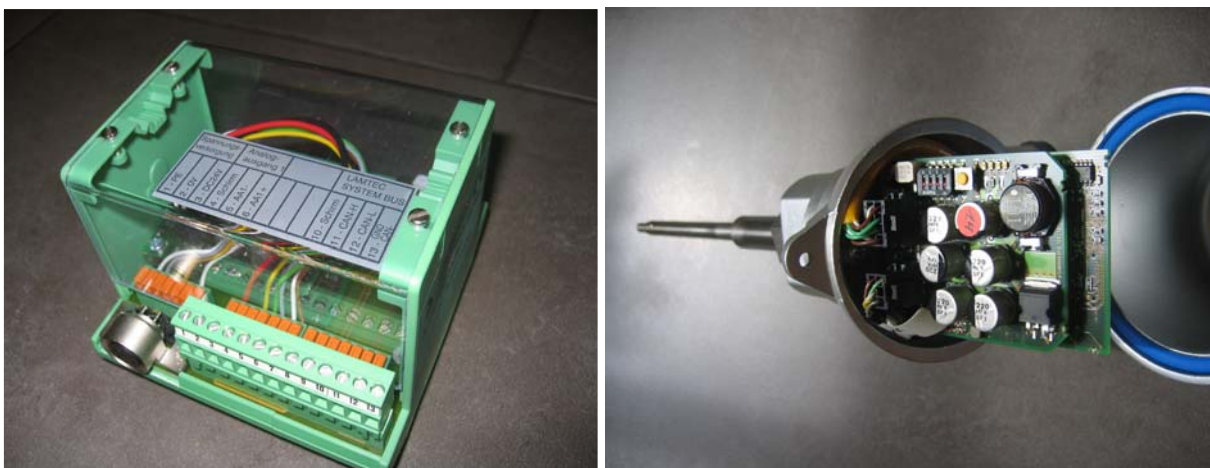
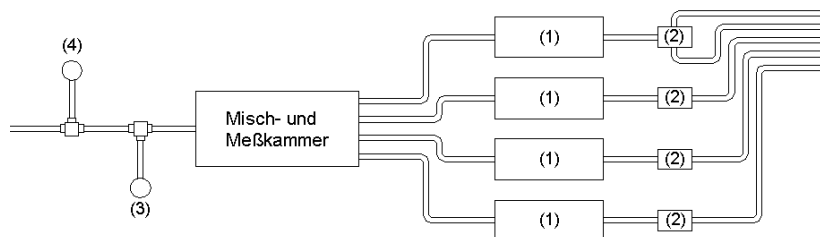


Bild 7: Die digitale Sensorelektronik XC164 im Hutschienengehäuse (links) und im Sondenkopfgewäuse „on-board“ (rechts).

6 Messungen im Labor

6.1 Das Gasmesslabor

Im Gasmesslabor (s. Bild 8) wurden die eingesetzten Sonden erst-, zwischen- und endcharakterisiert. Hierfür werden die gewünschten Prüfgase programmgesteuert (PC, LabView) über die Massenflussregler volumenstromkontrolliert in die Misch- und Messkammer geleitet. Verfügbare Prüfgase waren CO, H₂ und O₂ aus Einzelgasflaschen der Qualität 4.5 bis 5.0. Die Tauchsonden wurden in die Messkammer eingesteckt, auf die gewünschte Temperatur gebracht und dann die standardisierten Messprogramme gestartet. Die Charakterisierung geschieht automatisiert. Alle relevanten Messdaten des Gasesstandes und der Sonde werden in ein Messfile geschrieben, gespeichert, danach in MS Excel eingelesen, mittels Makro (Visual BASIC) ausgewertet und schließlich visualisiert. Nachfolgend sind die Ergebnisse dargestellt.



(1) Durchflussmesser (2) Handventil (3) Druckmessdose (4) Temperaturmessstelle



Bild 8: Schematische Darstellung (oben) und Ansicht auf den ESCUBE Gasmessstand (unten).

6.2 Die Charakterisierung der CarboSen-Sonde

Vor der Auslieferung wurden die beiden Sensoren CS00605C3 und CS00604C3 (vgl. Tabelle 3) am 22.08.2006 im Gasesstand charakterisiert. Ein typisches Histogramm ist in Bild 9 zu sehen. Beide Sensoren wurden bei einer Sensortemperatur von $T_S=580^\circ\text{C}$ ($t_f=2,35$) betrieben. Ab ca. $t=2000\text{s}$ wird die CO-Konzentration stufenförmig von 0ppm CO auf bis zu 1000ppm CO in Luft (21% O_2 , Rest N_2) hoch und wieder zu null gefahren. Ab ca. $t=5000\text{s}$ beginnt die H_2 -Treppe von 0 auf 100ppm und zurück. Ab ca. $t=8000\text{s}$ wird bei zwei unterschiedlichen CO Konzentrationen jeweils der Restsauerstoff von 21% auf bis zu 1% reduziert, um die O_2 -Querempfindlichkeit zu bestimmen. Ab ca. $t=11000\text{s}$ wird auf die gleiche Art und Weise die H_2 -Querempfindlichkeit bestimmt. Man erkennt:

- 1) steigende Sensorsignale bei steigenden CO und H_2 Konzentrationen
- 2) eine höhere Sensitivität des Sensors auf H_2 als auf CO
- 3) steigende Sensorsignale bei sinkendem O_2 -Gehalt

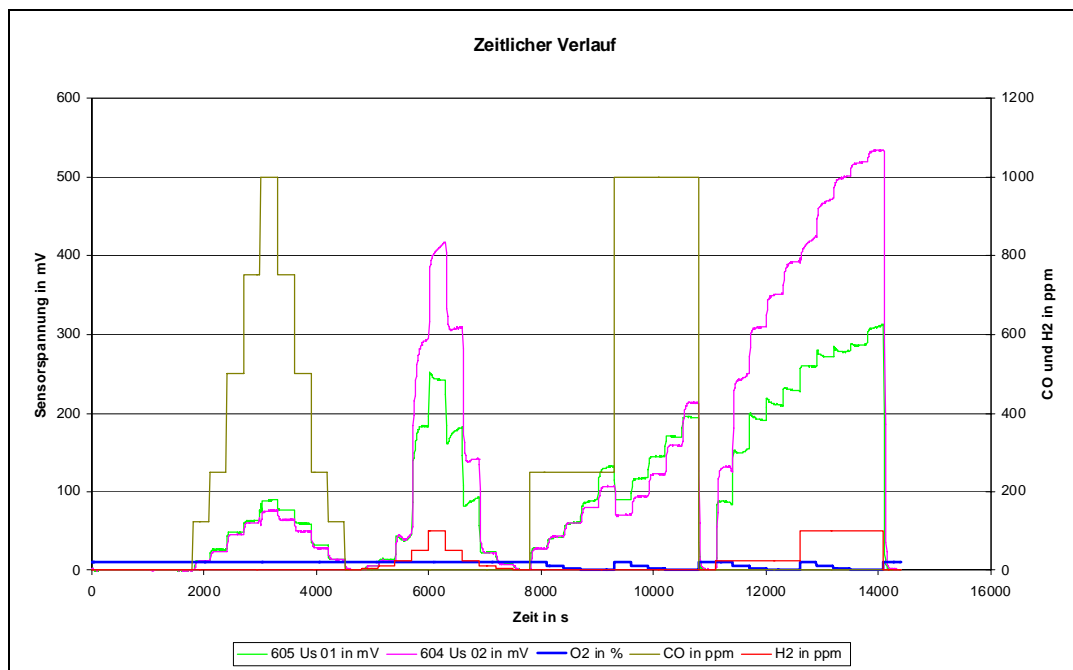


Bild 9: Erstcharakterisierung der CarboSen1.000 Tauchsonden am 02.08.2006 bei $T_S=580^\circ\text{C}$. Dargestellt ist das Histogramm der beiden Sensoren CS00605C3 und CS00604C3 (vgl. Tabelle 3).

Der CarboSen reagiert nicht nur auf CO (70-90mV bei 1.000ppm CO in Luft) sondern auch auf andere oxidierbare Gase. Insbesondere auf H_2 reagiert er am stärksten (250-400mV bei 100ppm H_2 in Luft). Im Abgas der Feuerung sind CO, H_2 aber auch eine Vielzahl anderer oxidierbarer unverbrannter Gase vorhanden. Deren Kennlinien (hier nicht bestimmt) ordnen sich zwischen der CO- und der H_2 -Kennlinie ein. Bei Koexistenz mehrerer brennbarer Gase bildet sich demnach ein Summensignal (bis zu 750mV!) aus. Eine selektive Messung von CO ist daher nicht möglich. Parallel zu CO steigen bei schlechter Verbrennung jedoch alle anderen brennbaren Gase ebenfalls an und damit auch das Sensorsignal. Sinkt das Sensorsignal auf die nominelle Offsetspannung von ca. 0mV ab, so haben wir entweder

reine Umgebungsluft oder aber eine saubere Verbrennung ohne unverbrannte Gase. Bei der unregelmäßigen Getreideverbrennung erwarten wir im Abgas einen Restsauerstoffgehalt von 8-12%. Bei geregelter bzw. optimierter Anlage erwarten wir O_2 bis hinunter zu 4-5%. D.h. am optimalen Betriebspunkt der Anlage haben wir geringe Restsauerstoffkonzentrationen und damit einen sensitiveren Sensor mit höherem Sensorsignalhub. Eine frühere Erkennung unverbrannter Bestandteile an der Emissionskante ist daher gewährleistet. Die festgestellte O_2 -Querempfindlichkeit ist daher für die umzusetzende Regelstrategie ein entscheidender Vorteil. Nachfolgend werden die Messdaten analysiert, grafisch dargestellt und diskutiert.

6.2.1 Die CO-Kennlinie

Bild 10 zeigt die CO-Kennlinie der beiden Sensoren CS00605C3 und CS00604C3 in Luft bei einer eingestellten Sensortemperatur von $T_S=580^\circ C$. Man erkennt einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen Sensorsignal U_S und CO-Konzentration c_{CO} . U_S steigt dabei von 0mV bei 0ppm CO auf bis zu 90 bzw. 76mV bei 1.000ppm CO an. Beide Sensorsignale unterscheiden sich kaum.

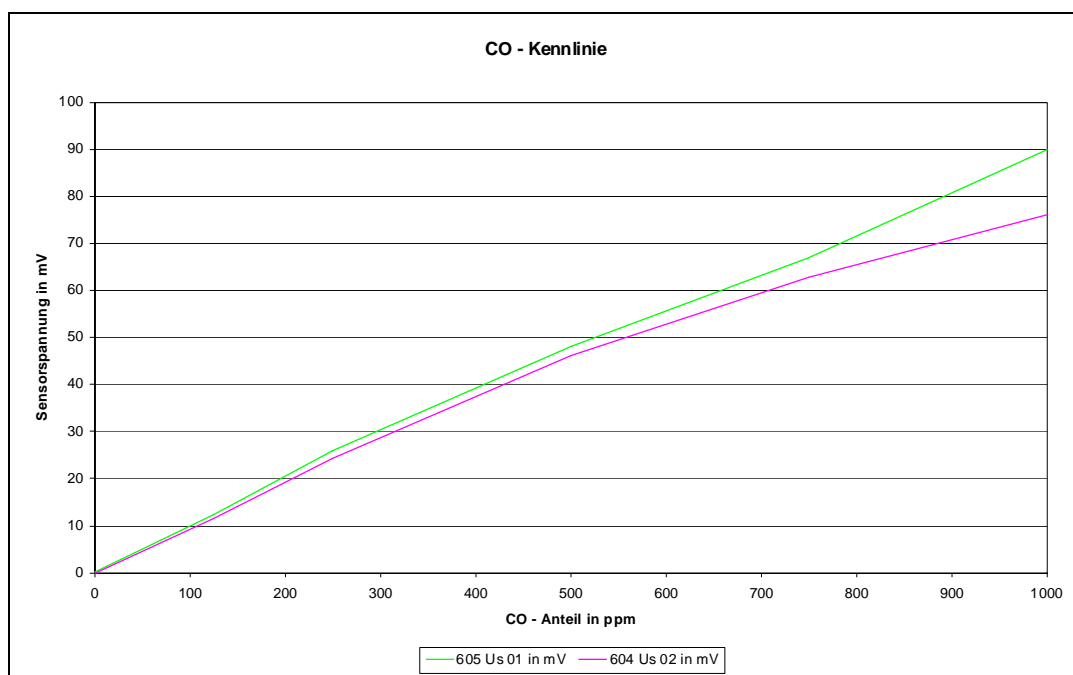


Bild 10: CO-Kennlinie der beiden Sensoren CS00605C3 und CS00604C3. Aufgetragen ist das Sensorsignal U_S in mV über der kommandierten CO-Konzentration c_{CO} in ppm in synthetischer Luft, bei $T_S=580^\circ C$ (Erstcharakterisierung am 02.08.2006).

6.2.2 Die H₂-Kennlinie

Bild 11 zeigt die H₂-Kennlinie der beiden Sensoren CS00605C3 und CS00604C3 in Luft bei einer eingestellten Sensortemperatur von $T_S=580^\circ C$. Man erkennt einen eher logarithmischen Zusammenhang zwischen Sensorsignal U_S und H₂-Konzentration c_{H_2} . U_S steigt dabei von 0mV bei 0ppm H₂ auf bis zu 240 bzw. 420mV bei 100ppm H₂ an.

Gegenüber ca. 10mV bei 100ppm CO haben die beiden Sensoren bei 100ppm H₂ also ein um den Faktor 25 bis 42 höheres Sensorsignal.

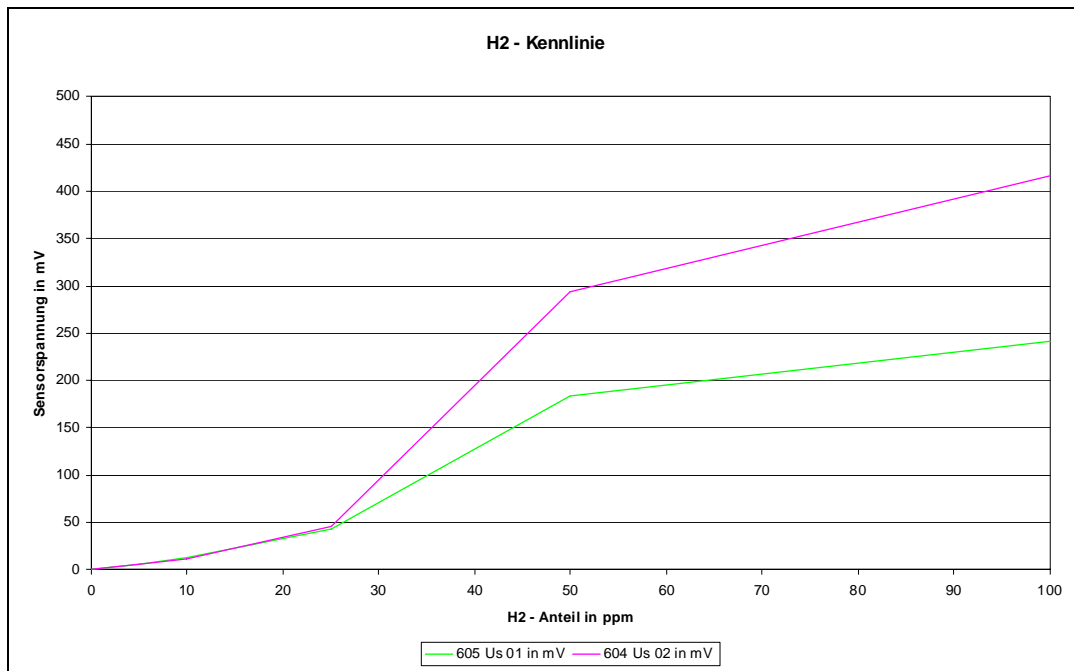


Bild 11: H₂-Kennlinie der beiden Sensoren CS00605C3 und CS00604C3. Aufgetragen ist das Sensorsignal U_S in mV über der kommandierten H₂-Konzentration c_{H_2} in ppm in synthetischer Luft, bei $T_S=580^\circ\text{C}$ (Erstcharakterisierung am 02.08.2006).

6.2.3 Die O₂ Abhängigkeit

In Bild 12 ist die O₂-Querempfindlichkeit des Sensors bezüglich CO dargestellt. Bei konstanter CO-Konzentration von 1000ppm erhöht sich das Sensorsignal der beiden Sonden von 90mV / 76mV bei 21% O₂ auf bis zu 190mV / 220mV bei 1% O₂.

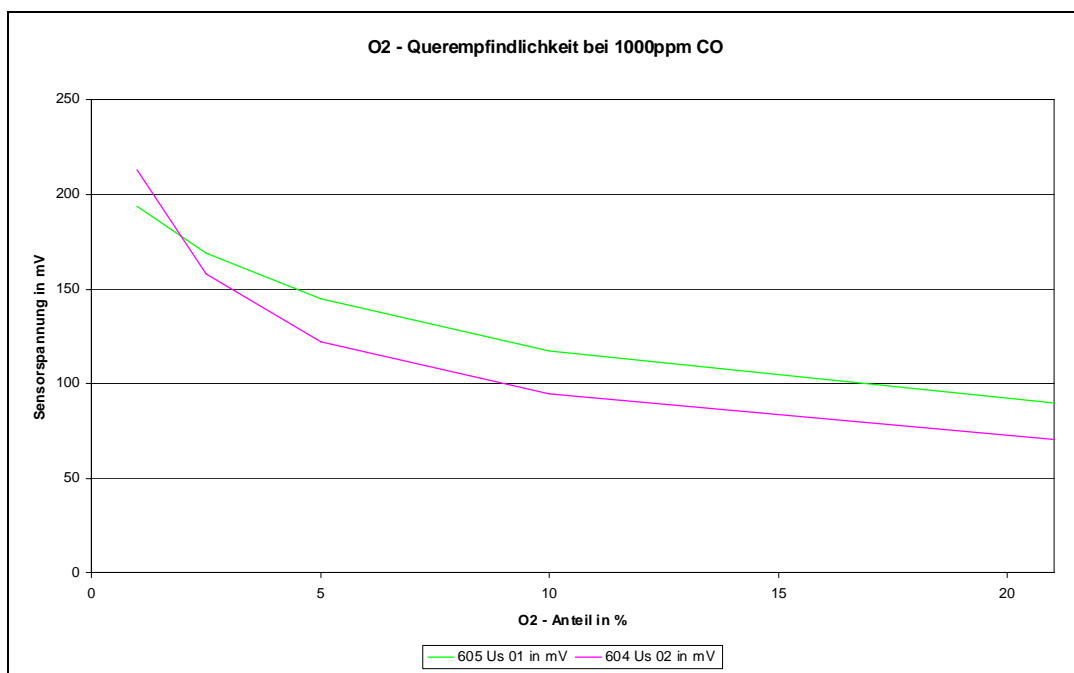


Bild 12: O₂-Querempfindlichkeit der beiden Sensoren CS00605C3 und CS00604C3. Aufgetragen ist das Sensorsignal U_S in mV bei konstanter CO-Konzentration $c_{CO}=1000\text{ppm}$ über variierendem Sauerstoffanteil in Vol.-% bei $T_S=580^\circ\text{C}$ (Erstcharakterisierung am 02.08.2006).

Betrachtet man den erwarteten nominellen Betriebsbereich der Verbrennungsanlage zwischen 10% (nicht verbrennungsoptimiert) und 5 % O₂ (verbrennungsoptimiert), so steigt das Sensorsignal von 95mV bzw. 120mV um jeweils ca. 20% auf 120mV bzw. 145mV an.

In Bild 13 ist die O₂-Querempfindlichkeit des Sensors bezüglich H₂ dargestellt. Betrachtet man den erwarteten nominellen Betriebsbereich der Verbrennungsanlage zwischen 10% (nicht verbrennungsoptimiert) und 5% O₂ (verbrennungsoptimiert), so steigt das Sensorsignal von 280mV / 480mV um ca. 10% auf 290mV / 500mV an.

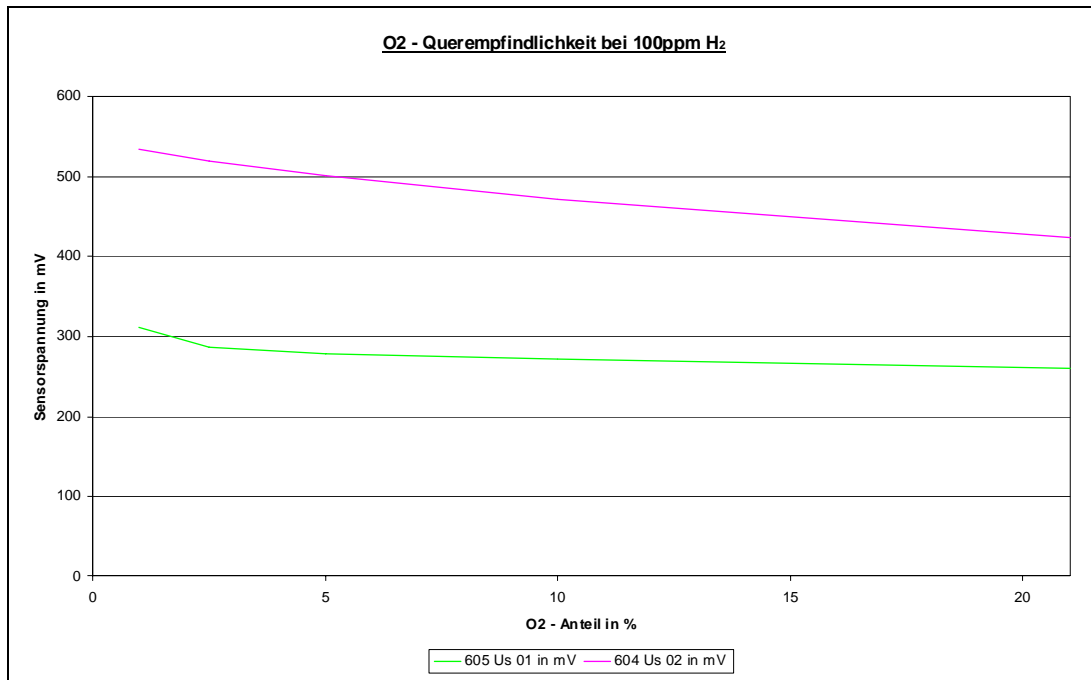


Bild 13: O₂-Querempfindlichkeit der beiden Sensoren CS00605C3 und CS00604C3. Aufgetragen ist das Sensorsignal U_S in mV bei konstanter H₂-Konzentration $c_{H_2}=100ppm$ über variierendem Sauerstoffanteil in Vol.-% bei $T_S=580^\circ C$ (Erstcharakterisierung am 02.08.2006).

Dieser Sensitivitätsanstieg bei konstantem H₂- bzw. CO-Gehalt mit sinkendem O₂-Gehalt im nominellen Betriebsbereich der Anlage ist für die hier angewendete Optimierungsstrategie vorteilhaft, da mit einer verbesserten Verbrennung ein Betriebspunkt mit niedrigerem O₂-Gehalt eingestellt wird, und der sensitivere Sensor dort früher den Anstieg von Unverbranntem anzeigt. D.h. im Bereich der Emissionskante ist die Sensorkennlinie steiler und die Empfindlichkeit höher. Die Emissionskante kann dadurch schneller, früher und zuverlässiger detektiert werden.

Die Sensorsignalabweichungen der beiden betrachteten Sonden liegt in deren unterschiedlichen Aufbau begründet. Bei der 1000mm langen Tauchsonde „CO_lang“ wurden hochtemperaturbeständige Materialien mit vergleichbar geringer elektrischer Leitfähigkeit verwendet. Daraus resultiert ein nicht mehr vernachlässigbarer Zuleitungswiderstand R_{zul} , der bei der 100mm kurzen Tauchsonde „CO_kurz“ nicht auftritt. Da beide Sonden mit der XC164 Elektronik und gleicher Softwareroutine zur Temperatureinstellung betrieben wurden, resultierte daraus eine höhere Sensortemperatur

für die Sonde CO_lang. Eine höhere Sondentemperatur bedeutet eine geringere Sensitivität und daher niedrigere Sensorsignale, wie im nächsten Kapitel gezeigt wird.

6.2.4 Die Temperaturabhängigkeit

Bild 14 zeigt die Temperaturabhängigkeit des Sensorsignals beim CarboSen Sensor. Zu sehen sind die CO- und H₂-Kennlinien der beiden Sonden CO_lang (605) und CO_kurz (604), jeweils bei $T_s=580^\circ\text{C}$ und bei 630°C Sensortemperatur.

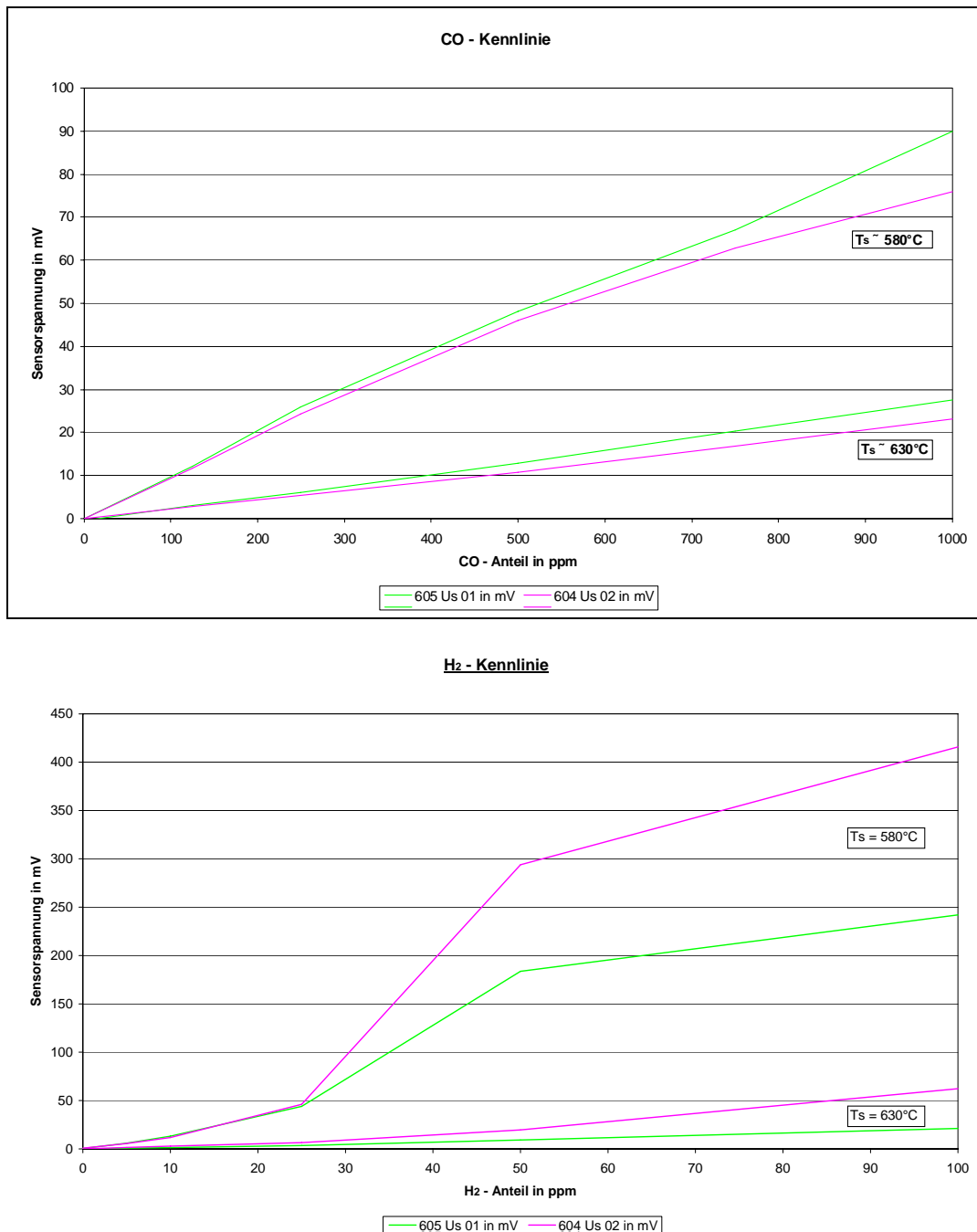


Bild 14: CO- bzw. H₂-Kennlinien der beiden Sonden CS00605C3 und CS00604C3 bei unterschiedlichen Sensortemperaturen T_s . Aufgetragen ist das jeweilige Sensorsignal U_s in mV über der CO- bzw. H₂-Konzentration in ppm.

Bei 1000ppm CO werden bei 580°C Signale in Höhe von 76mV bis 90mV erreicht. Erhöht man die Sondentemperatur auf 630°C so sinken die Signale bei identischer CO-Konzentration auf 60 bis 25mV.

Bei 100ppm H₂ werden bei 580°C Signale in Höhe von 240mV bis 420mV erreicht. Erhöht man die Sondentemperatur auf 630°C so sinken die Signale bei identischer H₂-Konzentration auf 23 bis 27mV.

Daraus wird ersichtlich, wie wichtig es ist die Sonde auf die anwendungsspezifisch ideale Betriebstemperatur aufzuheizen und vor allem bei dieser eingestellten Betriebstemperatur zu halten. Die XC164 Elektronik ermöglicht daher den temperaturkompensierten Betrieb der Sonde auch bei wechselnden Umgebungsbedingungen.

Da der Sensor bei höheren Temperaturen dynamischer und schneller reagiert, wurden die beiden Sonden im Feldtest mit ca. TS=630°C betrieben. Wie später nachgewiesen wird, ist die Empfindlichkeit der Sonde zur Auffindung der Emissionskante ist auch bei dieser hohen Temperatur genügend hoch.

6.2.5 Der Einfluss der Frontkappe

Am Beispiel des fortgeschrittenen Prototypen (s. Bild 5c) wird in Bild 15 der nicht zu vernachlässigende Einfluss der Frontkappe auf die CO- bzw. H₂-Kennlinie der Sonde gezeigt. Mit der Frontkappe sinkt das Sensorsignal bei 1000ppm CO von 90mV auf 40mV, und bei 100ppm H₂ von 240mV auf 170mV. Adsorption und katalytische Abreaktionen der oxidierbaren Bestandteile an den Wänden beim Durchgang durch die Poren des Sinterfilters können hierfür verantwortlich gemacht werden. Auf die Frontkappe kann im Feld jedoch nicht verzichtet werden, da sie den Sensor vor zu hohen Volumenströmen, sowie mechanisch vor Tropfen und Partikeln im Rauchgasstrom schützt. So wurden die beiden Feldtestsonden mit dem in Bild 5c dargestellten Sinterfilter ausgestattet.

Bei den Feldtests sollte festgestellt werden, ob die Frontkappe den Sensor ausreichend schützt und dabei die Sensitivität hinter dem Filter für die Emissionskantenregelung groß genug ist. Zudem sollte untersucht werden, ob beispielsweise durch zunehmende Veraschung bzw. Verschlackung die Frontkappe den notwendigen Gasaustausch zwischen Messgas und Sensor verhindern.

Zum Projektende wurden beide Sonden ausgebaut und optisch inspiziert. Optisch konnte nicht auf den negativen Einfluss einer zu starken Veraschung/Verschmutzung der Frontkappe geschlossen werden. Bild 17 zeigt zwar geringe Ablagerungen auf beiden Sonden, die jedoch nicht offensichtlich auf eine Verminderung des Gasaustausches schließen lassen.

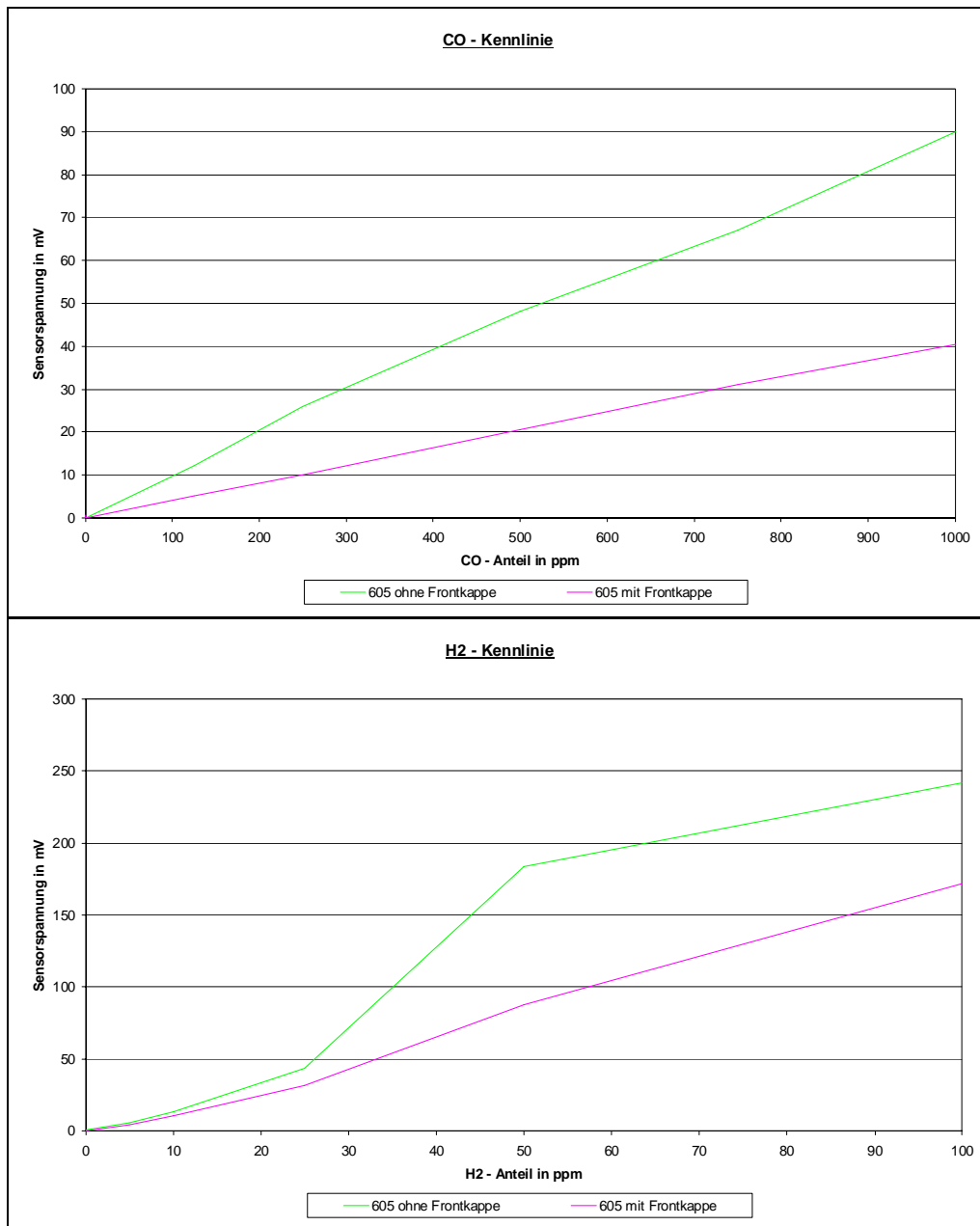
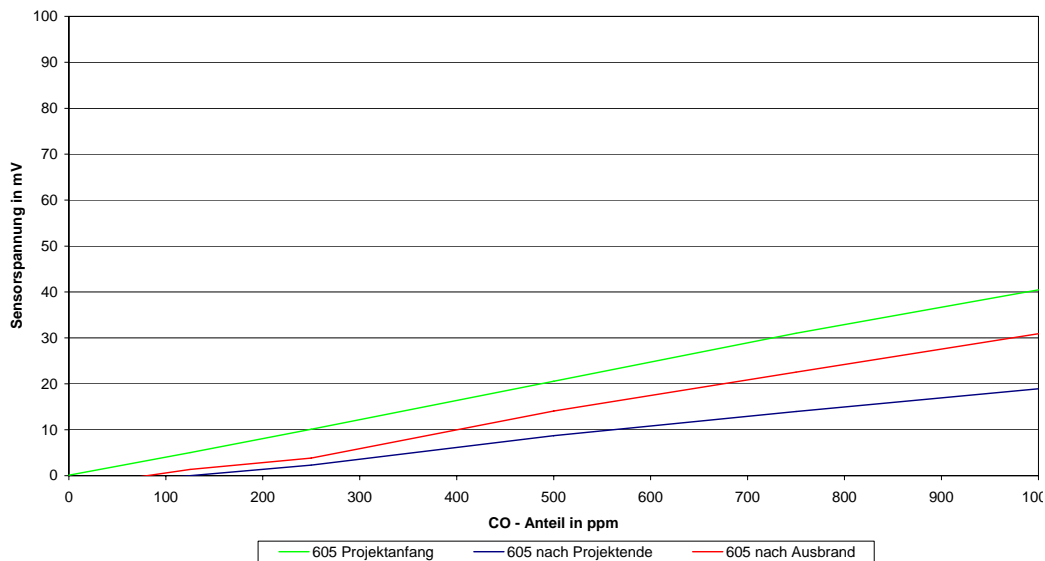


Bild 15: Einfluss der Frontkappe bei der Sonde CS00605C3. Dargestellt sind die CO-Kennlinien (oben) und die H₂-Kennlinien (unten) bei $T_S=580^\circ\text{C}$ jeweils mit und ohne Frontkappe zum Zeitpunkt der Erstcharakterisierung 02.08.2006.

Bild 16 zeigt, dass die Sonde CO_kurz bei 1000ppm CO nur noch 20mV (zu Projektbeginn 40mV) und bei 100ppm H₂ nur noch 50mV (zu Projektbeginn 170mV) liefert. Da die Sonde mit und ohne Frontkappe vermessen wurden, war schnell klar, dass dieser Sensitivitätsrückgang von der Frontkappe verursacht wurde - also keine Alterung/Drift des Sensor darstellt (vgl. Kapitel 6.2.6.). Eine allzu starke Verschmutzung bzw. Verschlackung der Frontkappe, die die Andifusion des Messgases hätte verhindern können, war jedoch auch nicht sichtbar (s. Bild 17). Daher wurde die Frontkappe abschließend abgeschraubt und im Hochtemperaturofen für 4h bei 1000°C ausgeheizt. Danach wurde die Frontkappe wieder aufgeschraubt und die Endcharakterisierung nochmals durchgeführt.

CO - Kennlinie mit FK



H₂- Kennlinie mit FK

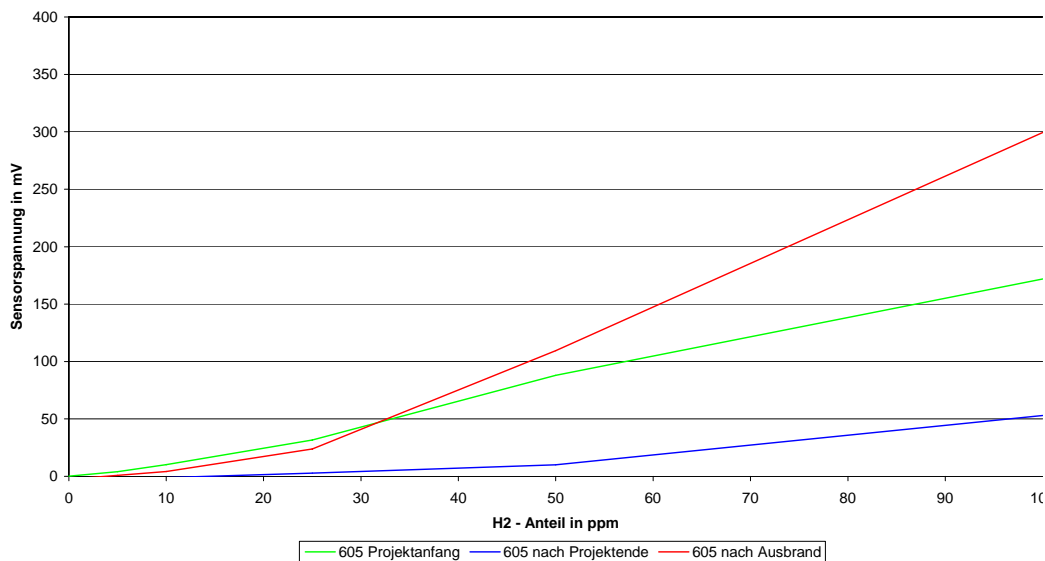


Bild 16: Einfluss der Frontkappe bei der Sonde CS00605C3. Dargestellt sind die CO-Kennlinien (oben) und die H₂-Kennlinien (unten) bei T_S=580°C jeweils zum Zeitpunkt der Erstcharakterisierung am 02.08.2006 und der Endcharakterisierung am 21.07.2008. Die Endcharakterisierung erfolgte zunächst mit der unbehandelten Frontkappe (nach Projektende) und zusätzlich nach der thermischen Behandlung der Frontkappe (nach Ausbrand).

Die roten Kurven in Bild 16 zeigen die CO- bzw. H₂-Charakteristik der Sonde mit der ausgeheizten Frontkappe. Bei 1000ppm CO zeigt die Sonde nun 30mV, also nahezu den Anfangswert in 2006 von 40mV. Bei 100ppm H₂ zeigt die Sonde nun sogar 300mV und übertrifft den Ausgangswert in 2006 von 170mV. Die Ursache für den anfänglich beobachtete

Sensitivitätsverlust ist also nachweislich beim Sinterfilter zu suchen. Es wird vermutet, dass sich Kohlenstoff an den Wänden des Sinterfilters abgelagert hat. Für das Messgas wirkt die karbonbeladene Frontkappe möglicherweise wie ein Aktivkohlefilter, der die oxidierbaren Gase abreagiert bevor sie den dahinter liegenden Sensor erreichen können

Da der sensitivitätsmindernde Einfluss der Frontkappen bereits vor dem Feldteststart bekannt war, wurde parallel an einer neuen Lösung gearbeitet. Am Ende des Projekts war diese Lösung mit einem Spritzschutzsieb verfügbar (s. Bild 5d). Der Prototyp mit Spritzschutzsieb konnte jedoch nicht mehr in der Praxis erprobt werden.

Bild 17 zeigt die beiden zur Zwischencharakterisierung am 22.03.2007 ausgebauten Tauchsonden. Im vorderen Bereich der Tauchsonden ist eine deutliche Braunfärbung zu sehen, die sich auch nach Abschluss des Projekts nicht mehr verändert hat. Vor allem beim Tauchrohr CO_lang (CS00604C3; an Messposition 3) sind Anhaftungen von schwarzem Ruß zu erkennen. Eine optische Inspektion der innenliegenden Sensorelemente zeigte, dass diese unbeschädigt und unverschmutzt geblieben sind.



Bild 17: Die beiden Sonden CO_kurz (CS00605C3, links) und CO_lang (CS00604C3; rechts und unten) nach Ihrem Ausbau zu einer Zwischencharakterisierung am 22.07.2007.

Die Funktion der beiden Sonden ist nach wie vor gegeben. Die Kaltwiderstände der Heizwendel blieben seit der Inbetriebnahme unverändert.

6.2.6 Erste Aussagen zur Lebensdauer

Die beiden Sonden CO_kurz und CO_lang wurden vor, während und nach den Feldtests mehrfach ausgebaut und im Gasmesslabor charakterisiert. Bild 18 zeigt exemplarisch den Verlauf der CO- und H₂-Kennlinie der Sonde CO_kurz vor dem Einbau in die Feldtestanlage, nach 8 Monaten, nach 10 Monaten und nach 24 Monaten Projektlaufzeit.

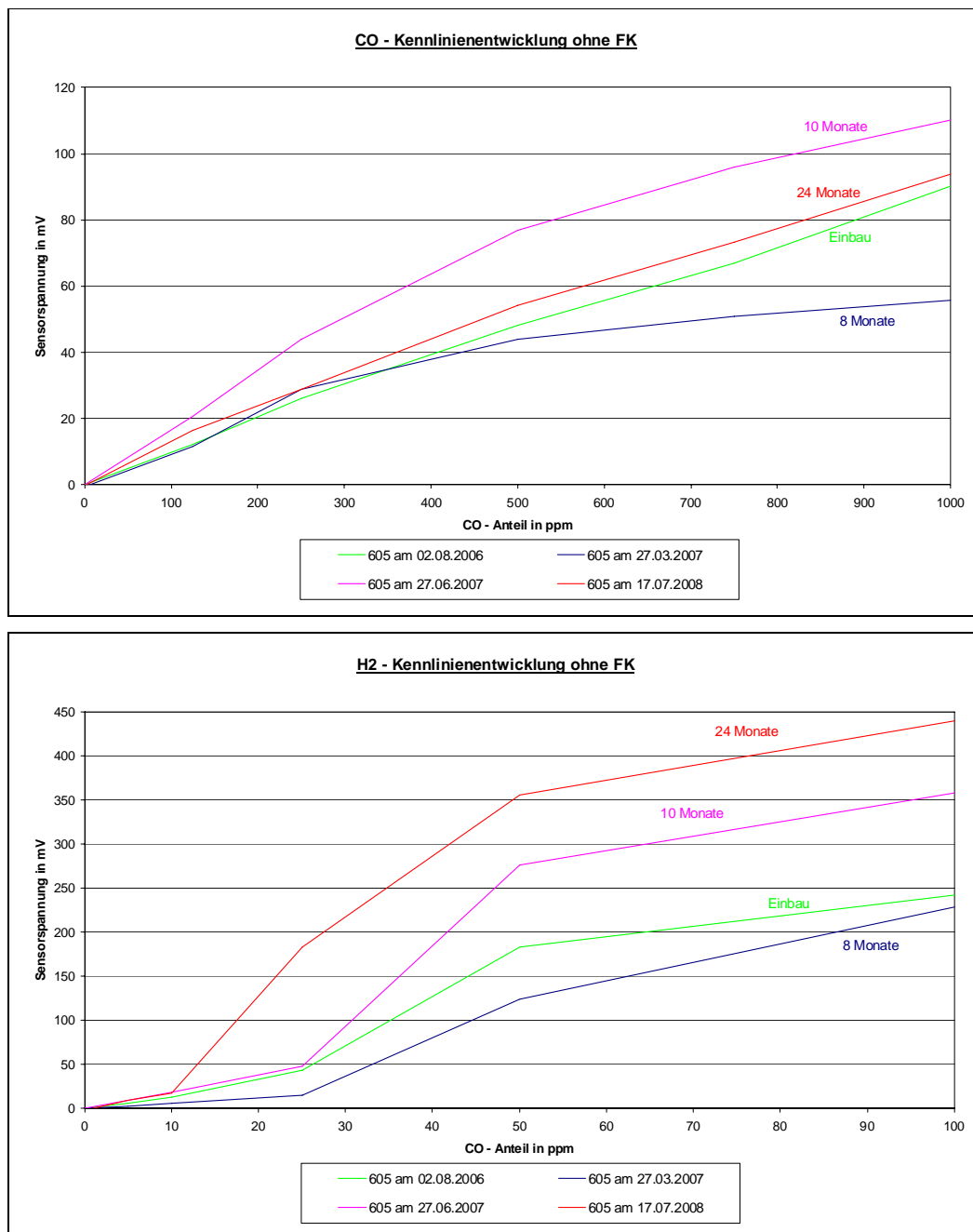


Bild 18: CO-Charakteristiken (oben) und H₂-Charakteristiken (unten) der Sonde CO_kurz (CS00605C3) zu verschiedenen Zeitpunkten während des Projekts.. Vermessen wurde die Sonde bei T_S=580°C jeweils ohne Frontkappe.

Über die wahren Betriebsstunden kann keine Aussage getroffen werden. Um den undefinierten Einfluss der Frontkappe nicht mit abzubilden, wurden sämtliche Charakterisierungsmessungen mit abgeschraubter Frontkappe durchgeführt. Folgende qualitativen Ergebnisse können daraus abgeleitet werden:

- Die Tauchsonde CarboSen1.000 funktioniert nach 24 Monaten im Agroflam 40 nach schwankendem Betrieb mit unterschiedlichen Getreidebrennstoffen einwandfrei.
- Die CO- und H₂-Charakteristiken sind verändert. Ob eine gerichtete Drift oder eine hohe Schwankungsbreite / geringe Reproduzierbarkeit der Grund sind ist schwer zu sagen.
- Nach 24 Monaten zeigen die Sonden eher höhere Signale auf CO und auf H₂. Es ist eine Sensitivitätssteigerung erkennbar und das Sensorelement reagiert am Ende der Projektlaufzeit sensibler auf unverbrannte Abgase als zu Beginn der Projektlaufzeit.

Die hier entwickelte und umgesetzte Regelstrategie zur Verbrennungsoptimierung baut nicht auf absoluten Sensorsignalen auf und ist daher drifftolerant. Der Sensor wird als Schalter zur Auffindung der Emissionskante eingesetzt, eine Verschiebung der Kennlinie ist daher tolerierbar. Es muss lediglich gewährleistet sein, dass der Sensor generell noch funktioniert. Durch die gestiegene Sensitivität des Sensors ist die Emissionskante früher zu erkennen. D.h. die Erkennung einer schlechten Verbrennung und die Einstellung der Anlage auf den optimalen Betriebspunkt geschieht früher, schneller und bei geringeren Schadstoffemissionswerten. Auch unter sicherheitsrelevanten Gesichtspunkten geht die beobachtete Sensorsignaldrift in die gewünschte sichere Richtung. Das Sensorsignalverhalten im Feld wird nun in den nachfolgenden Kapiteln näher betrachtet.

7 Messungen im Feld

Die ersten Messungen im Feld wurden am 22.08.2006 mit zwei unterschiedlich langen CarboSen1.000HT Sonden des fortgeschrittenen Prototyps (s. Bild 5c) gestartet. In Tabelle 3 sind die Sensoren den Messstellen zugeordnet. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt. Weitere Messkampagnen sind in [7] näher beschrieben.

Tabelle 3: Zuordnung Messstelle / CarboSen Sensor

	Sensornummer	Bezeichnung
Messposition 3	CS00604C3	CO_Sonde_kurz
Messposition 1	CS00605C3	CO_Sonde_lang

7.1 Messung mit reinem Weizen (Weizen_Ref)

Am 22.08.2006 wurden die CO_e-Sonden erstmalig im Kessel in Betrieb genommen und die Sensorsignale an die Messwerterfassungsanlage geklemmt. Hierfür wird das 0/4-20mA über einen 500 Ohm Widerstand in eine Sensorspannung von 0-10V umgewandelt, da dies der

nomielle Eingang der Messwerterfassung ist. Bei der Umrechnung wurde ein Fehler gemacht, was zu einem Sensorsignaloffset führt - der „Nullpunkt“ liegt daher bei 300mV.

In Bild 19 sind die beiden Sondensignale zusammen mit der zugehörigen CO-Konzentration im Abgas, gemessen mit einem Abgasanalysator von ABB, aufgetragen. Ab 09:45 AM beginnt der Verbrennungsprozeß. Man erkennt die hohen CO-Konzentrationen teilweise bis über 3000ppm in der Startphase bis sich ein stationärer Zustand um etwa 10:30 Uhr eingestellt hat.

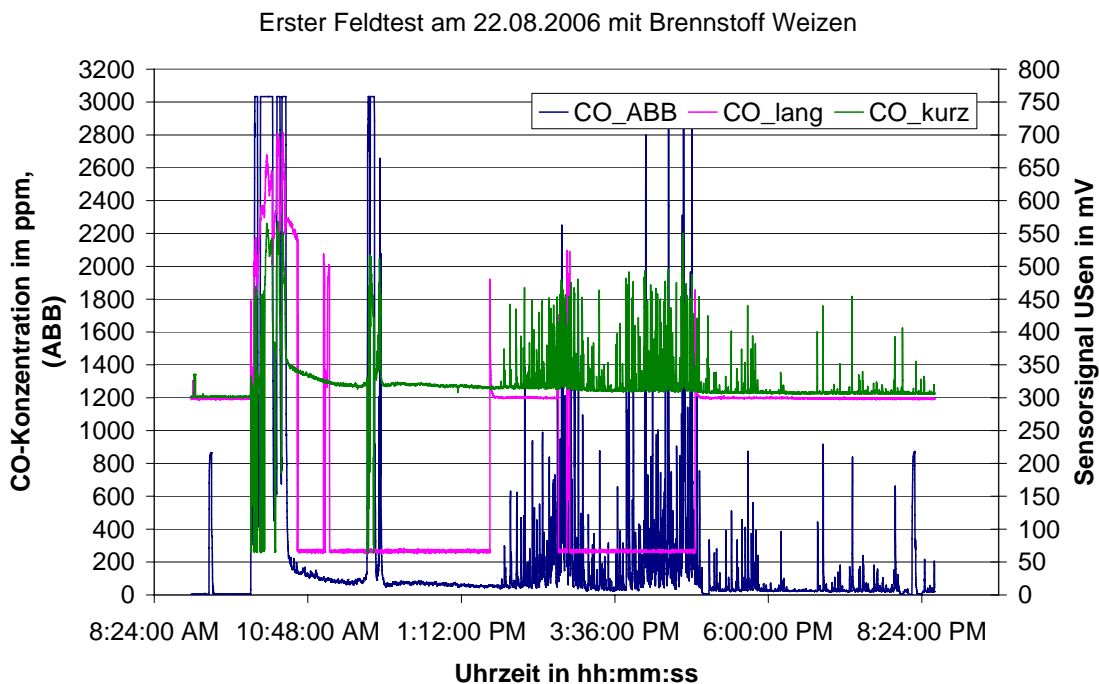


Bild 19: Histogramm des Feldtests am 22.08.2006 mit reinem Weizen. Aufgetragen sind die CO-Konzentration der ABB Abgasanalyseeinheit und die beiden Sondensignale über der Messzeit.

Der CO_Sensor_lang an Messposition 3 wurde während dieser Startphase mit verschiedenen Eintauchtiefen von anfänglichen 60cm (T_{amb} ca. 500°C) bis 20cm (T_{amb} ca. 460°C) getestet, da er sich meistens schnell „abgeschaltet“ hat. Dies ist zwischen 10:38 AM und 1:38 PM sowie zwischen 2:49PM und 4:51PM durch ein konstantes Signal von 66mV zu sehen. Hier läuft die Sensorheizleistungsaufnahme aufgrund zu heißer Umgebung gegen eine fest vorgegebene untere Grenze, was zu einem vorgegebenen Fehlersignal von 0mA führt; dies entspricht bei der fehlerhaften Umrechnung den 66mV. Ab und zu wurde der CO_Sensor_lang ausgebaut und wieder eingebaut, der Filter entfernt und wieder montiert, um das "abschalten" zu verhindern, was in dieser Meßkampagne nicht gelungen ist.

Als Fazit wurde der CO_Sensor_lang ab 12.09.2006 nur noch in der Meßposition 4 eingesetzt – also im Rauchzug zwischen den Wärmetauscherwänden.

7.1.1 Korrelation zwischen Sensorsignal und CO

Betrachtet man daher zunächst das Signal CO_Sensor_kurz, so erkennt man, dass das Sensorsignal der vom Abgasanalysator gemessenen CO-Konzentration qualitativ sehr gut folgt. Dies wird deutlich, wenn man den Zeitraum zwischen 1:40:00 und 5:16:00 Uhr betrachtet (s. Bild 20 oben).

7.1.2 Zeitlicher Versatz zwischen in-situ und ex-situ Messung

Betrachtet man zeitlich hoch aufgelöst ein spezielles Ereignis z.B. eine CO- bzw. Signalspitze über der relativen Versuchszeit, so erkennt man eine zeitliche Differenz der beiden Signale vom $\Delta t=25s$ (s. Bild 20 unten).

Der Zeitversatz kommt daher, dass die CO_Sonde_kurz direkt in-situ im Abgaskanal positioniert ist und dort ohne Zeitverzögerung misst, während das Abgas der extraktiven

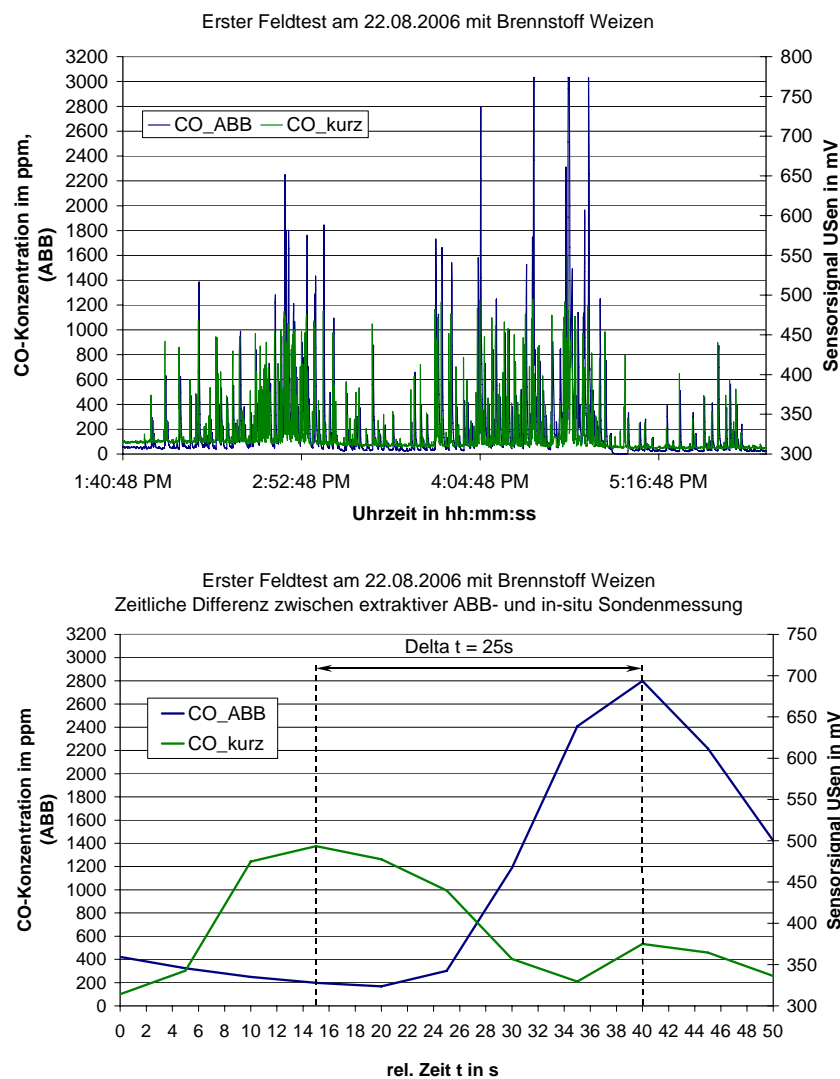


Bild 20: Histogramm des Feldtests am 22.08.2006 mit reinem Weizen. Aufgetragen sind die CO-Konzentration der ABB Abgasanalyseeinheit und die beiden Sondensignale über der Meßzeit (oben), bzw. ein Ausschnitt daraus über der relativen Meßzeit t in s (unten).

Messung der Abgasanalyseeinheit zunächst über lange Schläuche, Pumpen, Filter, Kondensatfallen etc. in die Misch- und Messkammer geleitet werden muss, bevor dort eine Analyse durchgeführt und die Messwerte nach Mittelung ausgegeben werden können. Mit dem in-situ CO_e -Sensor können dynamische Vorgänge schneller und weniger „verwaschen“ dargestellt werden, d.h. die Signalspitzen sind höher und die Flanken steiler. Eine Mittelung über Ereignisse und dadurch ein „Glattbügeln“ dynamischer Vorgänge, wie dies bei der extraktiven Messung geschieht, tritt hier nicht auf. Dadurch wird eine direkte und schnelle Regelung des Verbrennungsprozesses erst möglich.

In allen nachfolgenden Diagrammen sind die Werte der Abgasanalyseeinheit (O_2_{ABB} ; NO_x_{ABB} ; CO_{ABB} ; FID_{ABB} ; $\text{CO}_2_{\text{Rofea}}$) zeitlich um 25s gegenüber den direkten in-situ Messungen (CO_{kurz} ; CO_{lang} ; Lambda) korrigiert. Zudem werden in allen nachfolgenden Diagrammen die Uhrzeiten in absolute Zeit t in s umgerechnet. Der Start der Messung wird dabei auf $t_0=0\text{s}$ gelegt.

7.2 Messung mit reiner Gerste (Gerste_Ref)

In Bild 21 oben sind die Signale der beiden in-situ CO_e -Sensoren sowie das Signal der in-situ Lambda-Sonde zu sehen. Zum Zeitpunkt $t=5525\text{s}$ wird die fehlerhafte Umrechnung der beiden CO_e -Sondensignale in der Meßwerterfassung korrigiert. Danach haben beide CO_e -Sonden einen nominellen Offset von etwa 0mV bei sauberer Verbrennung.

Während der CO_Sensor_kurz wie erwartet dem CO_ABB Signal folgt (s. Bild 21 unten)

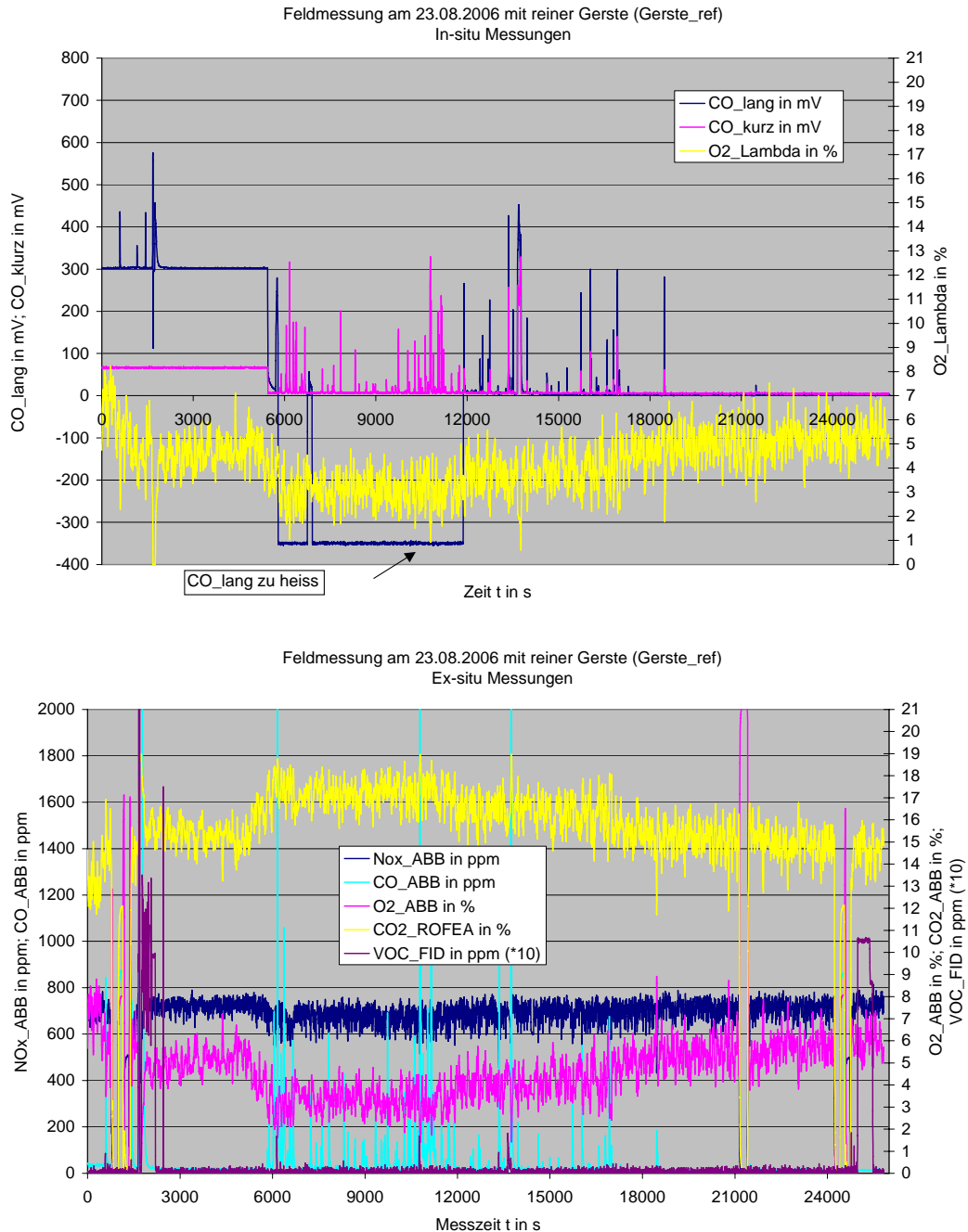


Bild 21: Histogramm des Feldtests am 23.08.2006 mit reiner Gerste. Oben aufgetragen sind die in-situ Signale der beiden CO -Sonden und der Lambda-Sonde. Unten sind die zugehörigen ex-situ Messwerte der Abgasanalyseeinheit aufgetragen.

meldet der CO_Sensor_lang einen Fehler und gibt -350mV aus. Grund hierfür ist eine zu hohe Messgastemperatur und die dadurch eingeleitete Sicherheitsabschaltung. Ab t=11895s wurde der CO_Sensor_lang bis auf 6cm Eintauchtiefe aus dem heißen Bereich herausgezogen. Danach funktioniert er einwandfrei.

Im stationären Zustand nach dem Brennerstart wird die Anlage zwischen t=2400s und 5800s zunächst mit einem hohen Luftüberschuß betrieben; O₂ liegt bei bis zu 6%, CO₂ bei 15%, CO liegt unter 20ppm.

Nun wird der Luftüberschuß reduziert. Zwischen 5800s und 12000s liegt O₂ bei 3%, CO₂ steigt auf bis zu 18%, CO liegt bei 15ppm zeigt jedoch häufige Spitzen (27 x über 200ppm, davon 4 über 1000ppm). Dies entspricht etwa 0,3 Spitzen/min.

Nun wird der Luftüberschuß etwas erhöht. Zwischen 12000s und 17000s liegt O₂ bei 4%, CO₂ sinkt gegenläufig auf bis zu 17%, CO liegt bei 15ppm zeigt jedoch seltene kleinere Spitzen (6 x über 200ppm). Dies entspricht etwa 0,1 Spitzen/min.

Nun wird der Luftüberschuß weiter erhöht. Zwischen 17000s und 25000s liegt O₂ bei 6%, CO₂ sinkt gegenläufig auf bis zu 15%, CO liegt bei 13ppm zeigt jedoch keinerlei Spitzen über 200ppm. Dies entspricht 0 Spitzen/min. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 nochmals zusammengefaßt.

Eine Korrelation zwischen den pro Zeit auftretenden Signalspitzen und dem Restsauerstoffgehalt im Abgas mit $dU_{S,Spitzen}/dt=f(1/O_2)$ ist hier erstmalig erkennbar und eröffnet eine drifftolerante Regelung nach der Dynamik des Sensorsignals.

Tabelle 4: Charakteristische Werte der CO_ABB_Messung und der beiden CO_e-Sondensignale bei variierenden Brenneinstellungen. Betrieb mit reiner Gerste.

Bereich	O2 in %	CO2 in %	CO_ABB in ppm	Spitzen/min (>200ppm)	CO_kurz in mV	Spitzen/min (>50mV)	CO_lang in mV	Spitzen/min (>50mV)
1	6	15	20	Startphase	Startphase	Startphase	Startphase	Startphase
2	3	18	15	0,26	6	0,27	Sondenfehler	Sondenfehler
3	4	17	15	0,07	6	0,08	6	0,19
4	5	15	13	0,00	5	0,01	2	0,01

7.3 Messung mit Weizenpellets und Harnstoffzusatz (Weizen_Harn)

Der CO_Sensor_lang wurde über Nacht mit einer Eintauchtiefe von 20cm betrieben. In der Nacht vom 23. auf den 24.08.06 ist ein Bewegungselement der Anlage gebrochen (s. IVD-Endbericht Bild 4.2). Deshalb gab es dann dort sehr hohe CO-Werte weit über 3000ppm und die Verbrennung war insgesamt sehr schlecht. Die Meßgrenze der CO_ABB

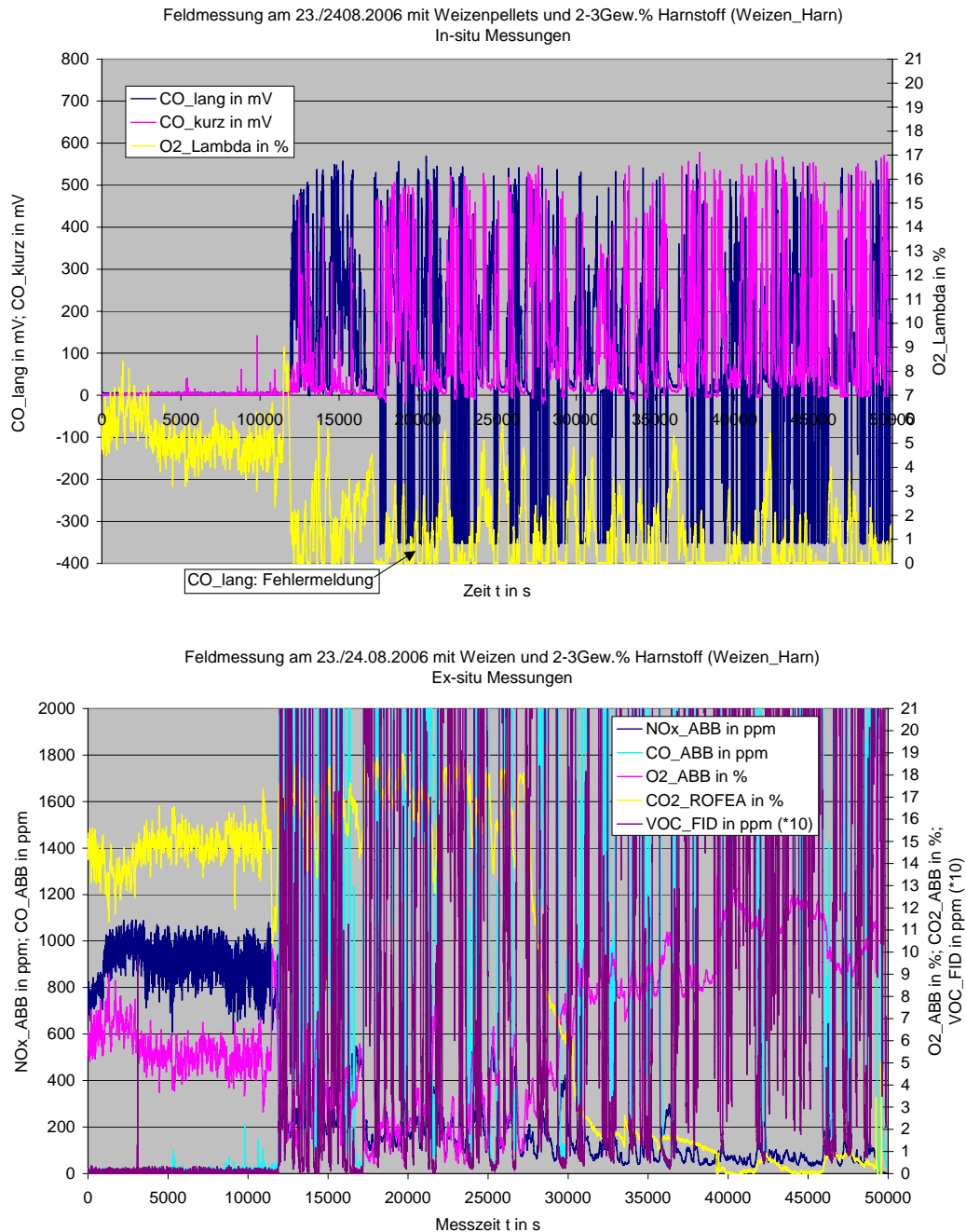


Bild 22: Histogramm des Feldtests vom 23. auf den 24.08.2006 mit Weizen inkl. 2-3 Gew. % Harnstoff. Oben aufgetragen sind die in-situ Signale der beiden CO-Sonden und der Lambda-Sonde. Unten sind die zugehörigen ex-situ Messwerte der Abgasanalyseeinheit aufgetragen.

Abgasanalyseeinheit wurde damit überschritten. Um dennoch eine Zuordnung zwischen den beiden CO-Sensorsignalen und verlässlichen CO-Abgasanalysewerten zu erhalten, wurden in diesem Datenfile zusätzlich noch die Daten eines CO-Messgerätes (ROFEO) im Prozentbereich aufgezeichnet. Diese Daten sind in Bild 22 allerdings nicht mit dargestellt.

In Abbildung 22 unten ist der Effekt der schlechten Verbrennung ab $t=11900s$ deutlich zu erkennen. Sowohl die CO_ABB Werte als auch die VOC_FID Werte schwanken stark und hochfrequent.

In Abbildung 22 oben ist dies an den beiden CO-Sensorsignalverläufen ebenfalls erkennbar. Die Sensorsignale erreichen mit Spitzen über 500mV nahezu den maximal möglichen Signalhub. Dennoch verlieren die Sensoren über die Meßzeit von 48000 Sekunden bei hohen Schadgasbelastungen nicht an Höhe. D.h. eine Drift oder Alterung ist auch bei diesen extremen Bedingungen mit belastetem Weizen nicht erkennbar. Ab $t=17500s$ fallen die CO_e-Sensorsignale der langen Sonde wiederum auf -350mV zurück. Diese Fehlermeldung resultiert entweder aus einer zu hohen Umgebungstemperatur, oder von einer zu hohen Sensorsignaldifferenz zwischen den beiden redundanten Arbeitselektroden. Da nur der Analogausgang und nicht der Can-BUS-Ausgang der XC164 Elektronik an die Messwerterfassung angeschlossen wurde kann dies aus sonst verfügbaren den Sensorüberwachungsdaten nachträglich nicht mehr nachvollzogen werden.

7.3.1 Erkennung eines Anlagendefektes

Der Anlagendefekt selbst könnte z.B. anhand der Signaldynamik wie Amplitude und Frequenz oder einfach durch die Betrachtung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Sensorsignale zuverlässig erkannt und eine Wartungsmeldung gegeben werden. So ergeben sich beispielsweise nach der Offset-Korrektur für die beiden Sonden die in Tabelle 5 aufgezeigten Werte. Eine sehr hohe Standardabweichung - teilweise höher als der Mittelwert selbst - ist zu sehen. Insbesondere das daraus resultierende zyklische Absinken des Sensorsignals in den negativen mV-Bereich lässt auf schlechte Verbrennung bei mangelndem Sauerstoff schließen.

Eine weitergehende Analyse der Meßwerte wird hier aufgrund des aufgetretenen Anlagendefektes nicht durchgeführt.

Tabelle 5: Betrachtung der Sondendynamik zur Erkennung eines nicht-nominellen Betriebszustandes der Agroflam-40 Anlage

Sonden- bezeichnung	Sondensignale U_s in mV nomineller Betrieb bis ca. 12000s		Sondensignale U_s in mV nicht-nom. Betrieb bis ca. 12000s	
	Mittelwert	Standardabw.	Mittelwert	Standardabw.
CO_kurz	3,3	4,1	120,1	147,2
CO_lang	4,7	1,1	69,3	225,0

7.4 Messung mit reinen Roggenstrohpellets (Stohp_Ref_Rg)

Der CO_Sensor_kurz wurde um 9:40 Uhr (ab t=1700s) und um 10:51 Uhr (ab t=5900s) kalibriert. Erst danach wurde er in das Abgasrohr eingebaut. CO_Sensor_lang wurde um 11:00 Uhr (ab t=6700s) kalibriert. Das FID wurde erst um 11:31 Uhr (ab t= 7500) mit dem Abgas verbunden. Der CO_Sensor_lang wurde ab diesem Tag im Wärmetauscher installiert

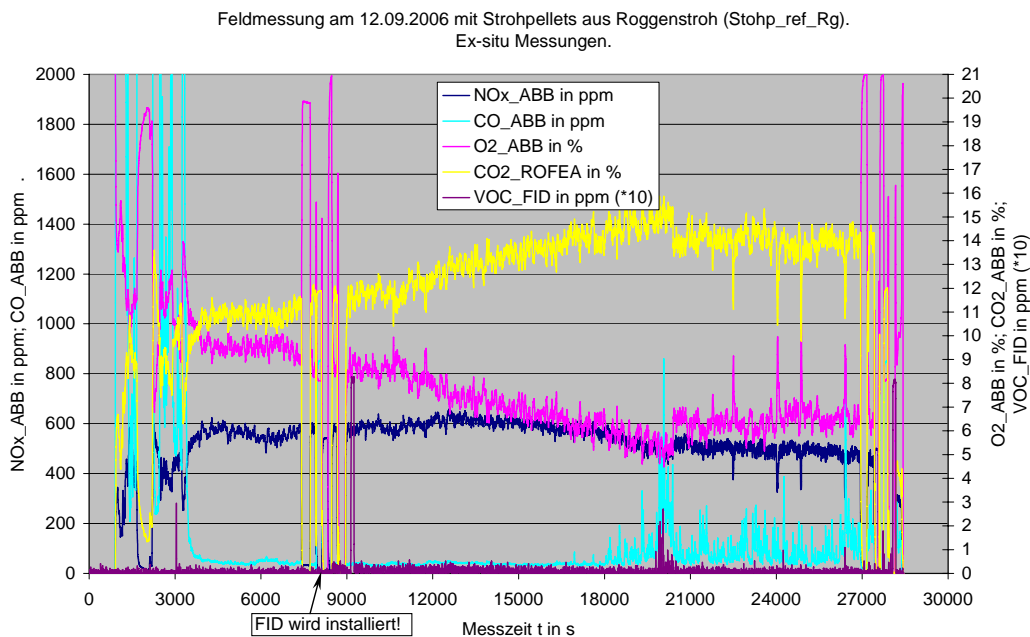
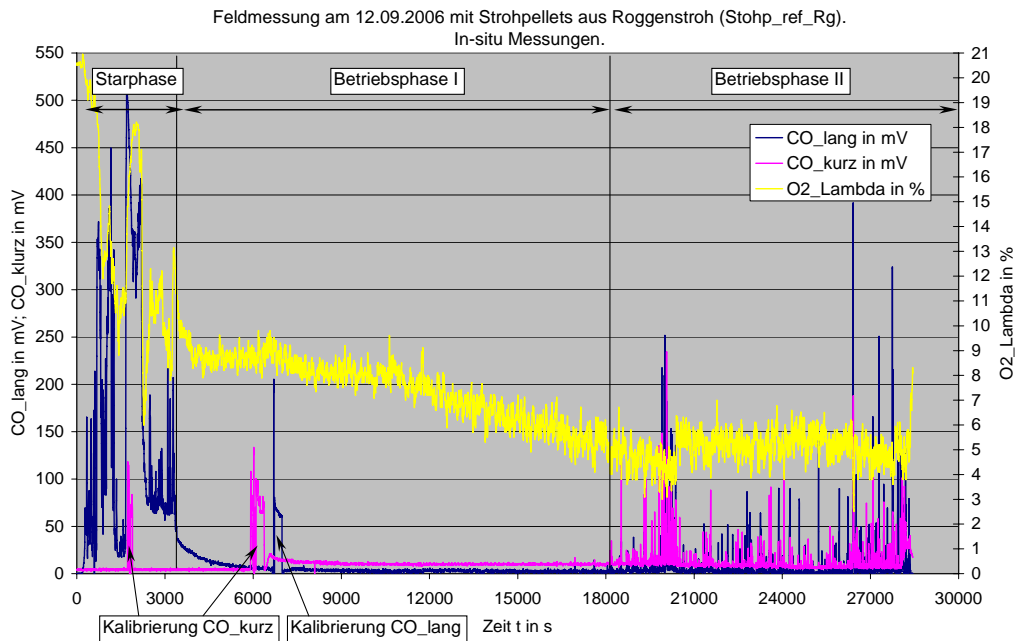


Bild 23: Histogramm des Feldtests am 12.09.2006 mit Strohpellets aus Roggenstroh. Oben aufgetragen sind die in-situ Signale der beiden CO-Sonden und der Lambda-Sonde. Unten sind die zugehörigen ex-situ Messwerte des Abgasanalyseeinheit aufgetragen.

bei einer Eintauchtiefe von 60cm. Ab diesem Zeitpunkt wurden keine Fehlermeldungen von der Sonde beobachtet, da keine Überhitzung mehr aufgetreten ist.

In Bild 23 sind drei Phasen der Verbrennung eingezeichnet:

Startphase: Zwischen $t=0-3500s$ wird die Anlage gezündet und befindet sich in der instationären Startphase mit dynamisch schwankenden CO-Konzentrationen mit Spitzen weit über 2000ppm. Die CO_Sonde_lang zeigt hier Spitzen bis über 500mV. Die CO_Sonde_kurz ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht im Abgaskanal montiert.

Betriebsphase I: Ab $t=3500s$ ist ein stationärer Brennerbetrieb erreicht. Bis zum Zeitpunkt $t=7000s$ läuft die Anlage mit Luftüberschuß bei 9% schadstoffarm mit CO unter 50ppm und NO_x unter 600ppm. Ab $t=7000s$ beginnt die Verbrennungsoptimierung; die Luftzufuhr wird kontinuierlich reduziert auf bis zu 6% O_2 bei $t=18000s$. Dementsprechend erhöht sich CO_2 von 11% auf 15%. CO, NO_x und VOC bleiben nahezu unverändert.

Betriebsphase II: Ab $t=18000$ beginnt bei weiterer Luftreduktion die unvollständige Verbrennung. Der CO-Pegel erhöht sich leicht und es bilden sich die charakteristischen CO-Spitzen aus mit bis zu 860ppm bei 5% O_2 ($t=20000s$). Die beiden Signale der CO-Sonden folgen dem Verlauf und erreichen dort bis zu 250mV. An dieser Stelle wird die Luftzufuhr wieder etwas erhöht auf 6%. CO_2 stellt sich bei 14% ein. Dies ist der gesuchte Betriebspunkt nahe der optimalen Verbrennung. Die dynamischen CO-Spitzen sind noch sichtbar, überschreiten jedoch 400ppm nur ein Mal. Die CO-Sonden bleiben mit Ihren Signalen unter 100mV. Damit diese geringen CO-Spitzen ganz verschwinden müßte O_2 noch geringfügig erhöht werden.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen der „Gerste_Ref“ so wird deutlich, daß der Gerste-Prozess sauberer und besser zu optimieren scheint, als der Roggenstroh-Prozess.

Gleichzeitig wird deutlich, daß eine Optimierung der Anlage, die mit unterschiedlichen Brennstoffen betrieben wird, nur sehr schwer nach den absoluten Werten der CO-Sensoren geführt werden kann. Eine brennstofftolerante Regelstrategie musste daher gefunden und umgesetzt werden (s. Kapitel 8).

7.5 Messung mit reinen Weizenpellets (Weizen_Ref)

Die Feldmessung vom 23. auf den 24.08.2006 mit reinen Weizenpellets (vgl. Kapitel 7.3) wurde nochmals wiederholt. Die CO-Sonden wurden vorher nicht kalibriert.

In Abbildung 24 ist der Verlauf des Feldtests zu sehen. Die Startphase ist nicht mit abgebildet. Die Anlage befindet sich über die gesamte Meßzeit im stationären Betrieb.

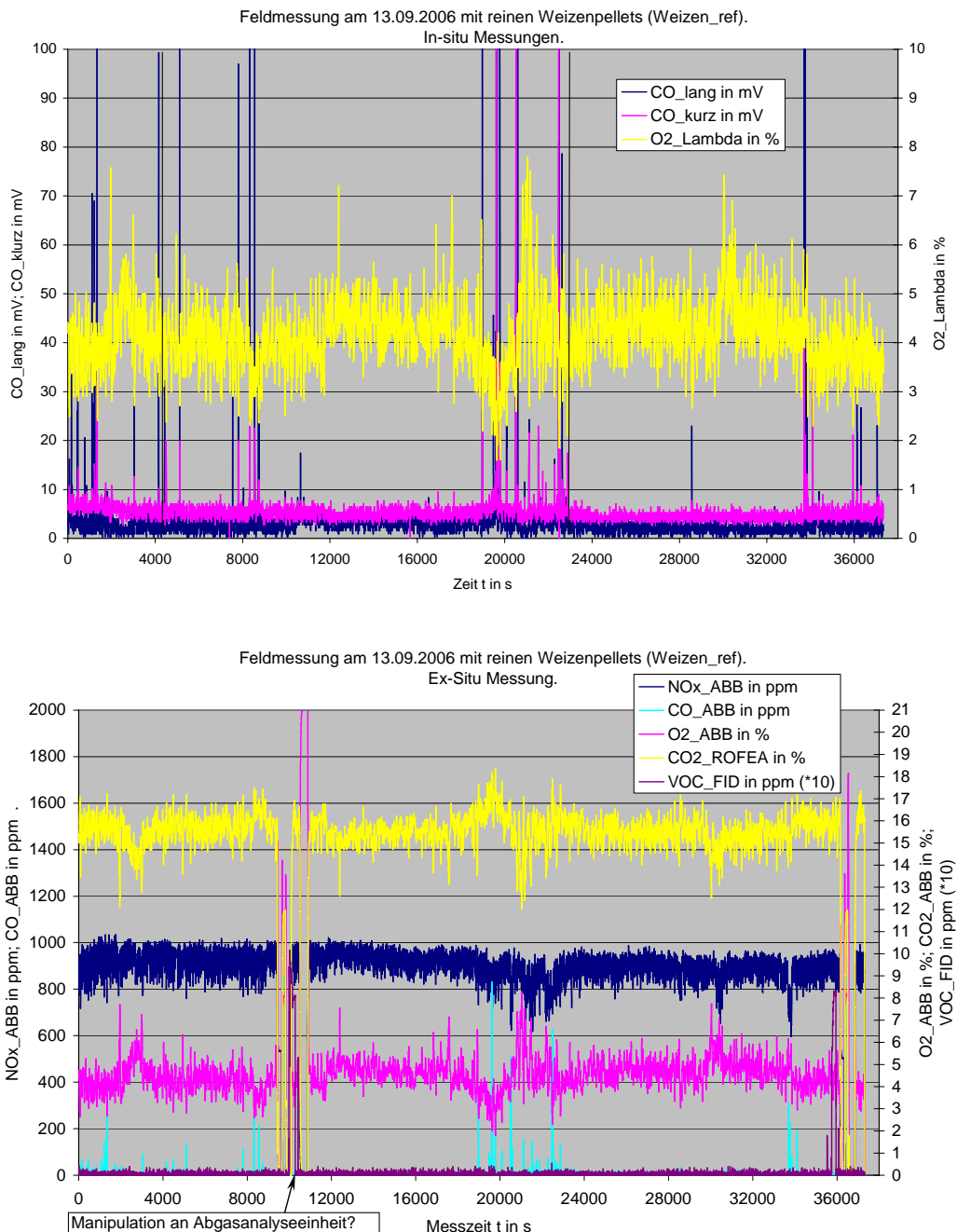


Bild 24: Histogramm des Feldtests am 13.09.2006 mit reinen Weizenpellets. Oben aufgetragen sind die in-situ Signale der beiden CO-Sonden und der Lambda-Sonde. Unten sind die zugehörigen ex-situ Messwerte der Abgasanalyseeinheit aufgetragen.

Nach ca. $t=9500s$ sind im unteren Bild auffällige Schwankungen aller ex-situ Messgrößen der Abgasanalyseeinheit zu sehen. Möglicherweise fand zu diesem Zeitpunkt eine Kalibrierung der Abgasanalyseeinheit statt. Ebenso am Ende des Versuches bei $t=36000s$. Möglicherweise wurde hier die Abgasanalyseeinheit schon aus dem Prozeß herausgezogen und abgeschaltet.

Ein Vergleich dieses Feldtests mit dem Versuch in Kapitel 7.3 ist in der Anfangsphase - vor dem Bruch des Bewegungselements - möglich. O_2 -Werte von 5%, CO_2 -Werte von 15% und relativ hohe NO_x -Werte um 1000ppm werden in beiden Versuchen nahezu identisch erreicht. Dies bestätigt die Reproduzierbarkeit des Prozesses bei identischen Brennstoffqualitäten und daher die gute Steuerbarkeit der Anlage.

Die Signale der beiden Sonden CO_{kurz} und CO_{lang} liegen nahezu identisch übereinander und über den gesamten Zeitraum des Versuchs unterhalb von 10mV. Eine derart saubere Verbrennung – läßt man hier NO_x einmal außer Betracht - wird auch durch die ABB Messung mit Werten unter 10ppm CO angezeigt.

Die Gebiete mit dynamischen CO-Spitzen z.B. bei $t=19000s$ oder $t=33500s$ folgen einem tendenziell leichten Rückgang des O_2 -Gehaltes kurz zuvor und identifizieren den Beginn der unvollständigen Verbrennung. Die Anlage läuft demnach optimal.

7.6 Funktionsüberprüfung der Sonden

7.6.1 Manuelle Funktionsüberprüfung

Vor dem Einbau wurden die Sonden mit Prüfgas (865ppmCO in Luft) getestet. Am IVD wurden hierfür zwei unterschiedliche Begasungsadapter (Hauptstrom; Nebenstrom) aufgebaut, mit dem das Prüfgas an die Sonde herangeführt werden kann. Bild 25 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Messung mit dem Begasungsadapter nach dem Hauptstromprinzip. Ein rascher Sondensignalanstieg auf (100mV) 70mV (CO_{lang}) bzw. auf (100mV) 60mV (CO_{kurz}) bestätigen die Funktion der Sensoren und der Prüfmethode. Weitere Funktionsüberprüfungen sind z.B. auch in Bild 23 erkennbar.

Die Überprüfung der Sonden im angestrebten Dauerbetrieb auf diese Art und Weise ist zeit- und materialintensiv. Man benötigt den Adapter, einen Schlauch, eine Prüfgasflasche mit Druckminderer und muss die Sonde zur Überprüfung aus- und wieder einbauen.

Zudem kann die Funktionsüberprüfung mit dem Prüfgas nicht ohne Weiteres zur „Kalibrierung“ der Sonden herangezogen werden, denn das resultierende Sensorsignal von 60-70mV aufgrund der Prüfgaskonzentration von 865ppm CO in synthetischer Luft entspricht nicht dem Sensorsignal im Abgas der Feuerung bei vergleichbarer CO-Konzentration. Im Abgas führen 900ppm CO etwa auf 150-300mV Sensorsignal. Die wesentlichen Gründe hierfür sind

- Sensor liefert Summensignal aller brennbaren Bestandteile im Abgas (CO, H₂, VOC)
- Sensor hat geringe O₂-Querempfindlichkeit, die während der Verbrennung variiert.

Diese Abhängigkeiten wurden bereits zuvor in Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 diskutiert.

Eine „Kalibrierung“ der Sonden mit Prüfgas ist demnach nicht einfach möglich. Eine genaue quantitative Abschätzung des CO-Gehalts im Abgas ist damit ebenfalls nicht einfach möglich. Generell sind quantitative Aussagen und die Verwendung der absoluten Sensorsignale zur Optimierung des Verbrennungsprozesses auch nicht erforderlich sogar hinderlich, denn eine Veränderung der Sensorcharakteristik z.B. durch Drift oder Alterung kann nie komplett ausgeschlossen werden.

Zur Verbrennungsoptimierung werden vorteilhafterweise relative Sensorsignale, Signaländerungen und qualitative Merkmale herangezogen. Damit wird die Optimierungsstrategie drift- und alterungstolerant und funktioniert auch mit veränderter Sensorkennlinie zuverlässig. Eine aufwändige „Kalibrierung“ des Sensors – wie oben geschildert - ist also unnötig. Eine einfache „Funktionskontrolle“ von Zeit zu Zeit genügt, denn solange der Sensor generell funktioniert kann der Prozess auch weiterhin zuverlässig optimiert werden. Diese Funktionsüberprüfung sollte jedoch möglichst wartungsfrei und autonom durchgeführt werden. Eine automatische Selbstüberprüfung der Funktion des Sensors während des nominellen Betriebs ist möglich und wird nachfolgend kurz vorgestellt.

7.6.2 Automatische Funktionsüberprüfung / Selbstcheck

Neben den doppelt ausgeführten Arbeitselektroden zur Redundanz und zur gegenseitigen Überwachung (identische Signale deuten auf einen „guten“ Sensor hin) sowie anderer elektronikinternen Überprüfungen zur Sicherstellung der nominellen Sensorfunktion bzw. zur Anzeige bei Überschreitung der nominalen Betriebs- und Umgebungsparameter (z.B. Umgebungstemperatur), kann die automatische Funktionsüberprüfung über eine einfache

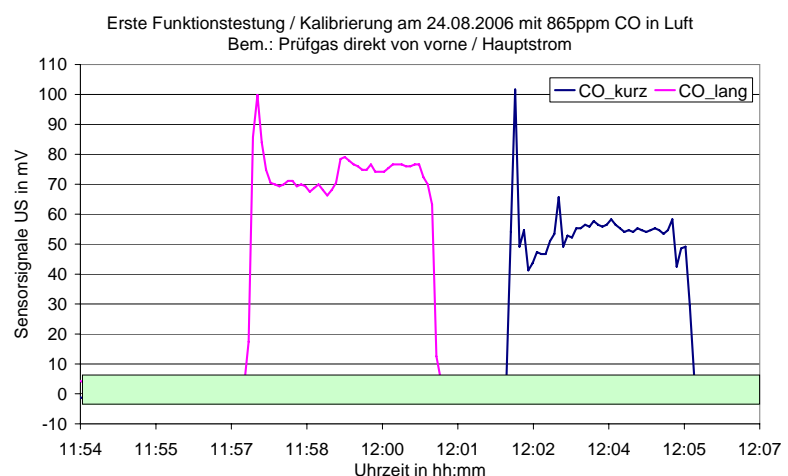


Bild 25: Funktionstestung der CO-Sonden Kalibriergas: 865ppm CO in Luft. Sensor im Hauptstrom.

Plausibilitätsbetrachtung realisiert werden. In Bild 23 wurde der Verlauf einer typischen Verbrennung aufgezeigt mit den drei eingezeichneten und dort beschriebenen Betriebsphasen. Betrachtet man die Daten dieser Feldmessung näher, so kann man daraus eine Strategie zur Funktionsüberprüfung der Sensoren herleiten.

Funktionsüberprüfung bei Verbrennungsstart

Zu Beginn jeder Verbrennung durchfährt die Anlage die unkontrollierbare Startphase. Die Sensorsignale aufgrund unverbrannter Bestandteile zeigen hier Spitzen von bis zu über 500mV. Wenn nach dem Start bei $t_0=0$ nach z.B. $\Delta t_{\text{Start}}=5$ Minuten nicht mindestens 1 x die Sensorsignalschwelle $U_{S,\min}(\Delta t_{\text{Start}})=100\text{mV}$ überschritten wird, kann ein Warn- bzw. Wartungssignal zur Überprüfung der Sonde angezeigt bzw. angegeben werden. Der Prozess fährt dann im Betriebsmodus „ohne Verbrennungsoptimierung“ weiter, bis die Sonde überprüft und das Problem behoben wurde. Übersteigt das Sensorsignal die vorgegebene Schwelle, ist der Nachweis der Funktion erbracht und der Prozess fährt im Betriebsmodus „mit Verbrennungsoptimierung“ weiter.

Im Dauerbetrieb kann die Anlage einige Tage kontinuierlich betrieben werden ohne dass eine Neuzündung erforderlich wird. Auch in dieser Betriebsphase kann mittels geeigneter Plausibilitätsbetrachtung die Sonde automatisch funktionsüberprüft werden. Denn wenn sich die Anlage im Modus „mit Verbrennungsoptimierung“ befindet, dann wird das Luft-/Brennstoffverhältnis von Zeit zu Zeit reduziert und die Emissionskante, die den Beginn der unvollständigen Verbrennung und damit den optimalen Betriebspunkt identifiziert, zyklisch angefahren (s. Kapitel 8). Dort steigen die Produkte unvollständiger Verbrennung CO_e und damit auch das Sensorsignal U_S sprunghaft an. Die Überprüfung eines vorgebbaren Schwellwerts z.B. von $U_{S,\min}(t_{\text{opt}})>100\text{mV}$ gibt Aufschluss über die Funktionalität des Sensors. Alternativ oder zusätzlich dazu kann ein Schwellwert für den Sensorsignalanstieg $dU_S/dt|_{\min}(t_{\text{opt}})$ bzw. $dU_S/dS_i|_{\min}(t_{\text{opt}})$ an der Emissionskante zur Funktionsüberprüfung herangezogen werden. Dadurch muss man nicht mehr so lange und so weit in die schlechte Verbrennung hineinfahren und kann die integralen CO-Emissionen mindern. S_i ist dabei die Stellgliedgröße wie z.B. Gebläsedrehzahl, Klappenöffnungswinkel, Brennstoff-Schneckengeschwindigkeit.

Für den Fall eines unerkannten plötzlichen totalen Sensorausfalls im Dauerbetrieb, speziell bei absolut fehlendem Sensorsignal, fährt man so weit in die schlechte Verbrennung hinein, bis die Verbrennung aufgrund Sauerstoffmangels erlischt. Eine entsprechende Störmeldung, die dann vor dem Wiederezünden quittiert werden muss, gibt dem Betreiber Aufschluss über den notwendigen Wechsel des Sensors. Bis dahin kann die Anlage im Modus „ohne Verbrennungsoptimierung“ weiter betrieben werden.

Ein derartiger plötzlicher totaler Sensorausfall im Dauerbetrieb ist unwahrscheinlich und nur durch einen Sensorbruch bzw. das Durchbrennen der Heizwendel möglich. Beide Ausfallursachen werden elektronikintern sofort erkannt (Heizstrom $I_h=0$) und resultieren in einer Stör-/Wartungsmeldung in Form von 0mA am XC164 Ausgang. Dann schaltet die Feuerungsanlage auf den Modus „ohne Verbrennungsoptimierung“ und kann nominell

weiterbetrieben werden. Das Überschreiten von Emissionswerten durch den massiven Eintritt in die schlechte Verbrennung wird dadurch verhindert.

Wahrscheinlicher ist eine allmähliche Veränderung der Sensorcharakteristik durch Drift, Alterung oder Verstopfung der Gaseintrittsöffnungen des Schutzfilters. Störend wirkt sich dabei nur eine Verschlechterung der Sensitivität mit Abflachung der Sensorkennlinie aus. Da diese Veränderung - wenn überhaupt - sehr allmählich und über eine lange Zeit geschieht, wird ein derartiger Fehler bei einer der nächsten Neuzündungen der Feuerungsanlage (s. oben: „Funktionsüberprüfung bei Brennerstart“) erkannt. Sollte die Sensorveränderung dagegen schnell, z.B. innerhalb weniger Stunden/Tage stattfinden, und die Anlage ohne Neuzündung im kontinuierlichen Dauerbetrieb fahren, so fährt man zur Verbrennungsoptimierung zyklisch immer weiter in die unvollständige Verbrennung hinein bis - wie oben geschildert - die Verbrennung aufgrund Sauerstoffmangels stoppt.

Durch den Einsatz eines zusätzlichen Sauerstoffsensors, der den Eintritt in die schlechte Verbrennung durch Unterschreitung eines minimalen Restsauerstoffgehaltes identifiziert, könnte dieser ungewünschte Stopp der Verbrennung möglicherweise verhindert werden. Ansonsten wird bei der hier vorgestellten Optimierungsstrategie kein zusätzlicher Sauerstoff- oder Abgastempersensor benötigt.

7.6.3 Erkennung einer Kesselverschmutzung / Veraschung des Wärmetauschers

In den Langzeituntersuchungen an der Agroflam-40 Anlage, die im Rahmen des Projekts am TFZ durchgeführt wurden, konnte ein Abgastemperaturanstieg um 5°K pro Tag festgestellt werden (Vgl. Bild 6 in [8]). Die Temperaturzunahme von nominellen 140°C auf bis zu 220°C hängt mit der zunehmenden Verschmutzung / Veraschung der Wärmeübertragungsflächen

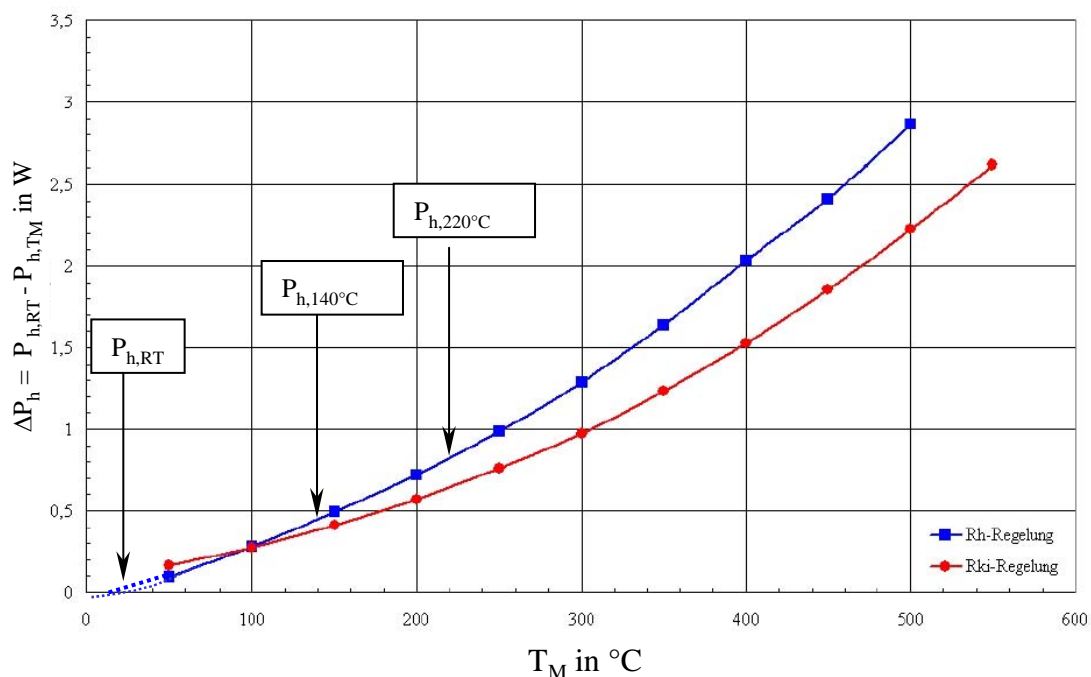


Bild 26: Änderung der aufgenommenen Heizleistung des Sensors CarboSen in Abhängigkeit der Messgastemperatur T_M in °C. Die anfängliche Heizleistungsaufnahme des Sensors bei Raumtemperatur liegt bei etwa 3W.

zusammen. Steigende Abgastemperaturen und verschmutzte Wärmeübertragungsflächen führen zu unerwünschten Wirkungsgradverlusten. Mittels der eingesetzten CarboSen Sensorik könnte zusätzlich die Abgastemperatur überwacht werden, um einen Wirkungsgradverlust aufgrund Anlagenverschmutzung frühzeitig zu erkennen und gleichzeitig den Reinigungszeitpunkt bedarfsgerecht zu bestimmen.

Dies könnte einfach mittels der zusätzlichen Erfassung der Heizleistungsaufnahme $P_h = U_h \cdot I_h$ des CarboSen-Sensors durchgeführt werden. Zum Zeitpunkt der Langzeituntersuchungen am TFZ waren diese Heizleistungssignale des CarboSen jedoch noch nicht an die Messdatenerfassung angeschlossen. Über den BUS-Ausgang der XC164 Elektronik sind diese Sensordaten jedoch jederzeit verfügbar.

Um den Nachweis der Machbarkeit zu erbringen wurde eine CarboSen-Tauchsonde in einen Hochtemperaturofen eingetaucht und ein Temperaturprofil von ca. 50°C bis über 500°C abgefahren. In Bild 26 ist die abnehmende Heizleistungsaufnahme des mittels R_h -Regelung temperaturkompensiert betriebenen Sensors bei steigenden Messgastemperaturen abgebildet (blaue Linie). Die Heizleistungsabnahme im Temperaturintervall zwischen 140°C (saubere Anlage) bis 220°C (verschmutzte Anlage) beträgt demnach $\Delta P_h = P_{h,220^\circ\text{C}} - P_{h,140^\circ\text{C}} = 0,4\text{W}$.

7.6.4 Erkennung eines Fehlstarts

Wiederum bei Betrachtung der Heizleistungsaufnahme P_h kann eine erfolgreiche Zündung durch Abgaserwärmung durch $\Delta P_h = P_{h,RT} - P_{h,140^\circ\text{C}} = 0,4\text{W}$ bzw. eine Fehlzündung wegen $P_{h,RT} = \text{const} = 3\text{W}$ durch $\Delta P_h = 0\text{W}$ identifiziert werden. Bild 26 zeigt die Änderung der aufgenommenen Heizleistung des Sensors CarboSen in Abhängigkeit der Messgastemperatur T_M in °C. Die Messgastemperatur steigt nach erfolgreicher Zündung von Raumtemperatur auf ca. 140°C im nominellen Betrieb der Agroflam-40 Anlage an. Die Heizleistungsaufnahme sinkt dabei um $\Delta P_h = 0,4\text{W}$. D.h. vor Verbrennungsstart in der „kalten“ Anlage beträgt die Heizleistungsaufnahme des CarboSen bei Raumtemperatur etwa $P_{h,RT} = 3\text{W}$, um den Sensor auf seiner Betriebstemperatur von ca. 600°C zu halten. Nach erfolgreicher Zündung der Anlage und der damit einhergehenden Erwärmung des Abgases auf 140°C benötigt der Sensor nur noch $P_{h,140^\circ\text{C}} = 2,6\text{W}$.

8 Die Strategie zur Verbrennungsoptimierung

8.1 Ziele einer modernen Feuerungsregelung

Ziel einer modernen Feuerungsregelung im stationären nominellen Betrieb der Anlage ist die Verringerung des Abgaswärmeverlustes durch die Absenkung des Luftverhältnisses. Die Anlage darf jedoch nicht im Gebiet des Luftmangels betrieben werden, was zu Verlusten durch unvollständige Verbrennung und zu hohen Schadstoffemissionen führen würde.

In Bild 27 werden die Verluste in Abhängigkeit des Restsauerstoffgehalts skizziert. Das Optimum des Betriebs liegt in dem Punkt, an dem die Summe beider Verluste ein Minimum erreichen. Der optimale Betriebspunkt der Anlage wird also gefunden, indem vom Luftüberschussgebiet das Brennstoff/Luft-Verhältnis λ und somit der Sauerstoffgehalt immer weiter verringert wird, bis ein plötzlicher Anstieg von brennbaren Gasen, wie z.B. CO und H₂ diese „Emissionskante“ identifiziert (vgl. Bild 29).

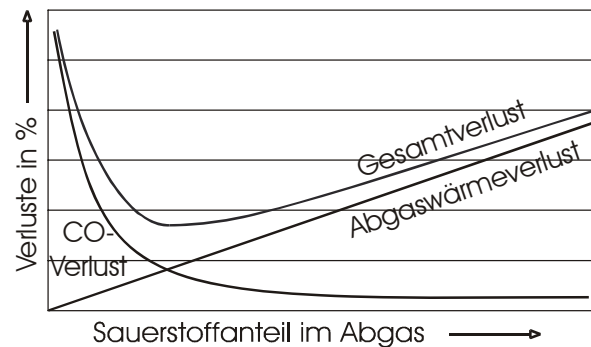


Bild 27: Das Minimum des Gesamtverlusts identifiziert den optimalen Betriebspunkt der Feuerung.

8.2 Die Emissionskantenregelung

Bild 28 zeigt eine typische Feuerungseinheit aus Brenner, Feuerraum und Abgaskanal sowie den an eine Regel- und Überwachungselektronik angeschlossenen Sensor. Die Elektronik steuert das Brennstoff/Luft-Verhältnis über die Stellorgane S_i (z.B. Luftgebläse-Drehzahl, Brennstoff-Schneckengeschwindigkeit). Herangezogen werden hierzu die gemessenen Sensorsignale Sensorspannung U_s und gegebenenfalls die Sensorheizleistung P_h .

Bei vollständiger Verbrennung geht der Anteil oxidierbarer Gase gegen 0 ppm, d.h. die Sensorspannung geht ebenfalls gegen 0 mV. Sobald man nun in den Bereich unvollständiger Verbrennung gelangt, nimmt die Konzentration an Unverbranntem stark zu, d.h. das Sensorsignal steigt dabei deutlich an. Das Spannungssensorsignal wird nun in der Regelungs- und Überwachungselektronik ausgewertet und das Brennstoff/Luft-Verhältnis über eines oder über mehrere Stellorgane entsprechend korrigiert bzw. optimiert. Das Verbrennungsoptimum liegt unmittelbar vor dem steilen Anstieg des Sensorsignals in Richtung Luftmangel – also vor der Emissionskante (s. Bild 29).

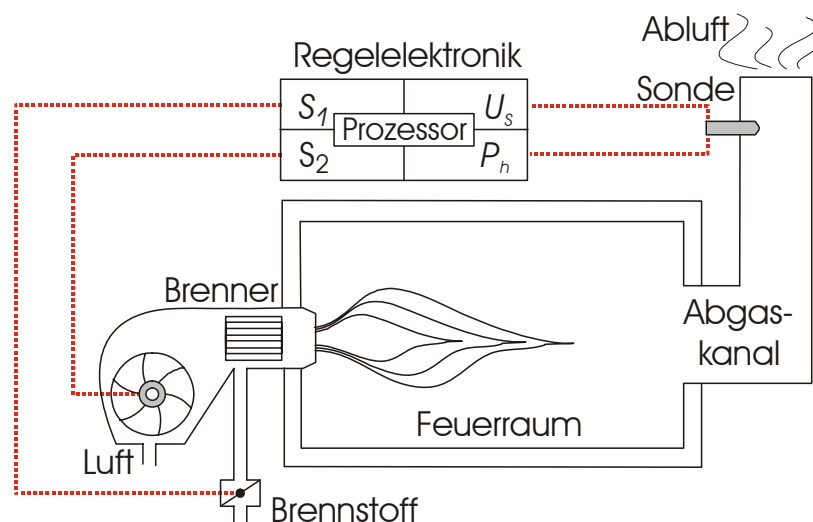


Bild 28: Skizze einer Feuerung mit prozessorgesteuerter Überwachungs- und Regelungselektronik.

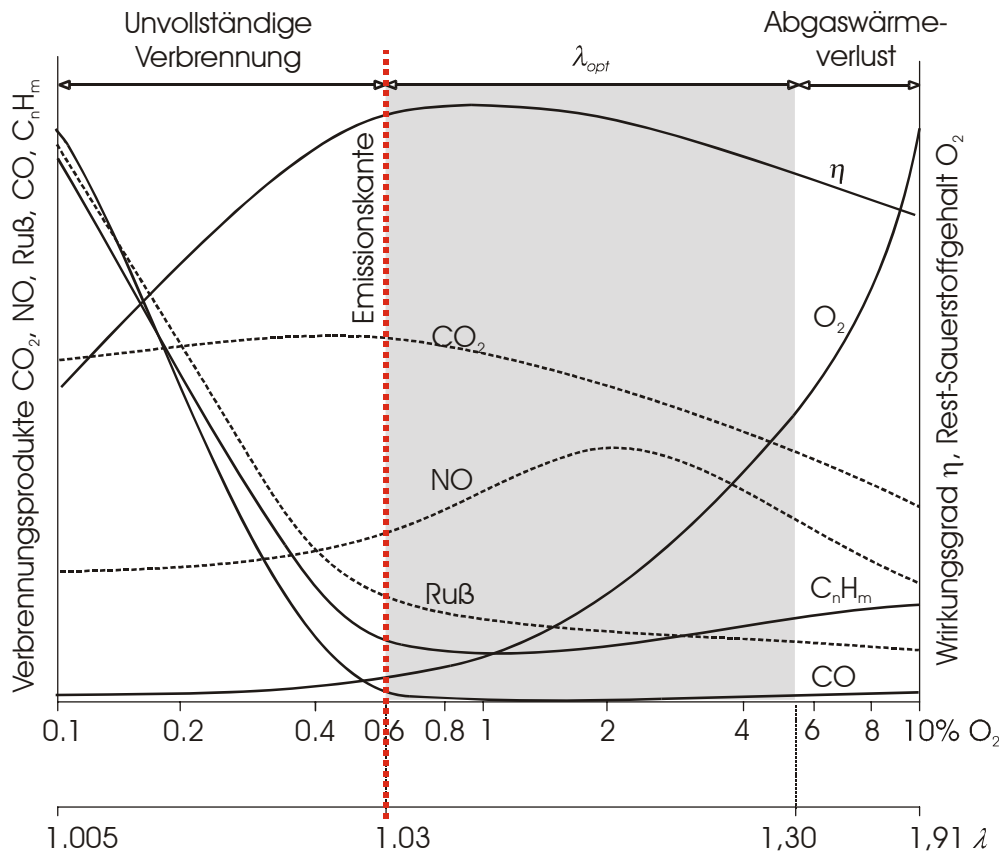


Bild 29: Typische Verläufe der Schadstoffemissionen und des Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom Luftüberschuss. Im Vergleich zu Öl- und Gasfeuerungen liegt die Emissionskante bei kontinuierlich beschickten Feststofffeuerungsanlagen erwartungsgemäß in einem Gebiet mit höherem Luftüberschuss.

Zur Verbrennungsoptimierung können nun mehrere Sensorkenndaten herangezogen werden. Zunächst stehen die direkt messbaren stationären Größen wie die Sensorheizleistung P_h und die Sensorspannung U_s zur Verfügung. Zusätzliche Informationen werden aus dem dynamischen Sensorverhalten dU_s/dt und dP_h/dt gewonnen. Die Regelungs- und Überwachungseinheit berücksichtigt neben den stationären und dynamischen Sensorsignalen auch die Signale der vorhandenen Stellglieder S_i für die Brennstoff/Luft-Zufuhr sowie z.B. auch die Änderung der Stellgliedposition dS_i und deren Auswirkungen auf die Sensorsignale dU_s/dS_i bzw. dP_h/dS_i .

Die hier vorgestellte Verbrennungsoptimierung nach der Emissionskante wurde speziell für Öl- und Gasfeuerungsanlagen entwickelt. Sie wird bei industriellen Feuerungsanlagen seit mehreren Jahren weltweit erfolgreich eingesetzt und ersetzt dort zunehmend die klassische O_2 -Regeleung [9].

Mit dem miniaturisierten Gassensor CarboSen gibt es nun die Möglichkeit auch Feuerungsanlagen mittlerer und kleiner Leistung entsprechend zu optimieren. Der Nachweis für öl- und gasbefeuerte Kleinfeuerungsanlagen wurde bereits erbracht [10, 11].

Im Rahmen dieses Projektes sollte nun die Übertragbarkeit auf einen kontinuierlich beschickten Feuerungsautomaten nachgewiesen werden. Zuvor musste die Strategie an den Getreide-Feststoffkessel Agroflam-40 angepasst, und danach die anlagenspezifischen Regelparameter bestimmt werden. Dem IVD wurde hierzu neben den CarboSen-Sonden die Regelstrategie sowie die erforderliche Hard- und Software zur Realisierung der Verbrennungsoptimierung zur Verfügung gestellt.

Die erarbeiteten Ergebnisse sind sehr vielversprechend und können dem Teil I: „Feld- und Prüfstandsmessungen zur Anlagenoptimierung und Adaption eines externen Staubabscheiders“ des Endberichts des IVD der Universität Stuttgart für das FNR-Vorhaben 22018903 „Energetische Nutzung von Getreide“ entnommen werden.

Insbesondere in Bild 7.4 des o.g. IVD-Abschlussberichts ist die erwartete CO-Emissionskante beim optimierten Agroflam 40 deutlich zu sehen. Das Prinzip der realisierten gebläsedrehzahlabhängigen Optimierung ist in Bild 7.7 des IVD-Abschlussberichts veranschaulicht. Insgesamt konnte durch die CO_e-Optimierung der Restsauerstoffgehalt der Anlage von durchschnittlich 9% O₂ auf bis zu 4% O₂ reduziert werden. Dies wird aus Bild 7.9 des IVD-Abschlussberichts deutlich. Mit der Verringerung des Luftüberschusses konnte der Abgaswärmeverlust vermindert und dadurch der Wirkungsgrad der Anlage vergrößert und der Brennstoffbedarf verringert werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Zunächst wurde der „Stand der Technik“ für die Tauchsonde CarboSen zum Zeitpunkt des Projektstarts beschrieben. Der erste Prototyp einer mittels Sinterfilter geschützten Tauchsonde, die für Temperaturen von bis zu 500°C ertüchtigt wurde, wurde vorgestellt. Erste Hinweise für den Einbau in die Agroflam-40 Anlage wurden gegeben.

Die Agroflam-40 Anlage wurde analysiert und die möglichen Mess- und Einbaupositionen für die CarboSen-Sonde definiert. Die Randbedingungen an den Messstellen wurden untersucht und danach zwei geeignete Positionen bestimmt; eine Erste zwischen Wärmetauscher und Ausbrandglocke, die Zweite im Kaminzug. Für die hohen Temperaturen und die lange Eintauchtiefe an der ersten Messstelle sowie für die teilweise kondensierenden Bedingungen an der zweiten Messstelle wurden unterschiedliche Tauchsonden konzipiert und aufgebaut. Der Aufbau und die Integration der CarboSen-Sensorelemente in die Tauchsonden wurden vorgestellt. Anhand der Messdaten am Agroflam-40 und der zu erwartenden CO-Konzentrationen von bis zu 715 ppm_{CO} bei nominellem Betrieb fiel die Sensorauswahl auf den sensitiveren CarboSen1.000 mit einem empfohlenen Messbereich von 0 - 1.000ppm CO_e.

Ausgehend vom Stand der Technik wurden zwei prototypische Tauchsonden mit Sinterkappen zum Schutz des Sensors vor Schmutz und Partikeln entwickelt. Der fortgeschrittene Prototyp mit abnehmbarer Frontkappe wurde für die Feldmessungen

eingesetzt. Die Geometrie und Charakteristik der eingesetzten Sonde wurden vorgestellt und insbesondere der Einfluss der Frontkappe beschrieben.

Die Frontkappe mit integriertem Sinterfilter (Porengröße 200 μ m) hat einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Sensitivität des Sensors. Vermutet wird eine Adsorption und katalytische Abreaktion von oxidierbaren Gasen an den Wänden beim Durchtritt des Messgases durch den Sinterfilter. Die Sensitivität des Sensors hinter dem Sinterfilter ist jedoch noch groß genug und auf dessen Schutz vor Partikeln, Spritzwasser etc. konnte bei den Tests nicht verzichtet werden. Am Ende des Projekts stand eine neue Sonde mit Spritzschuttsieb zur Verfügung, die jedoch nicht mehr vermessen werden konnte. Ein vergleichbarere Sensitivitätsverlust des Sensors durch das dünne Sieb wird nicht mehr erwartet.

Bei den Laborvermessungen wurde nachgewiesen, dass der Sensor auf CO aber auch auf andere Kohlenwasserstoffe und vor allem auf H₂ sehr sensibel reagiert. Im Abgas liefert der Sensor ein Summensignal aller oxidierbaren Gase CO_e. Dies ist ein Vorteil, denn alle diese unverbrannten Gase entstehen bei einer unvollständigen Verbrennung und sämtliche Bestandteile die der Sensor sieht können zur Erkennung einer schlechten Verbrennung herangezogen werden.

Eine leichte O₂-Querempfindlichkeit konnte festgestellt werden, die jedoch im nominellen Betriebsbereich der Feuerungsanlage nicht kompensiert werden muss. Mit sinkendem O₂-Gehalt wird der Sensor sensitiver gegenüber brennbaren Gasen, was in unserem Fall den Vorteil einer früheren Erkennung der Emissionskante mit sich bringt.

Die Abhängigkeit der Sensorcharakteristik von der Sensorbetriebstemperatur wurde untersucht. Die höchste Sensitivität hat der Sensor bei einer Betriebstemperatur von 580°C. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Messungen untereinander zu ermöglichen wurden sämtliche Laborcharakterisierungen bei dieser Temperatur durchgeführt. Die Sensorbetriebstemperatur für die Feldtests wurde jedoch auf 630°C festgelegt. Dort ist der Sensor zwar etwas weniger sensitiv, zeigte aber eine größere Robustheit und schnellere Signaldynamik, die für die schnelle Optimierung der dynamischen Verbrennungsvorgänge vorteilhaft ist.

Die Inbetriebnahme der beiden Tauchsonden erfolgte im Juni 2006. Die Ergebnisse der Feldtests im August bis September 2006 mit unterschiedlichen Getreidebrennstoffen (Weize_Ref, Gerste_Ref, Weizen_Harnstoff; Strohp_ref_Rg; Weizen_Ref) wurden vorgestellt. Als wesentliches Ergebnis konnte festgestellt werden, dass beide Sonden an beiden Messpositionen funktionieren. Eine Zuordnung zwischen den Sensorsignalen U_{Sen} in mV und den mittels Abgasanalysator gewonnenen Parallelmessungen CO in ppm ist nach einer Zeitkorrektur eindeutig möglich, denn die in-situ Tauchsonde spricht 25s vor der ex-situ Parallelmessung an. Der Zeitverzug zwischen den unterschiedlichen Messpositionen ist vernachlässigbar und eine schnelle Regelung der Anlage durch eine Sonde am Kaminzug ist möglich. Dort herrschen maximal 180°C. Dies ermöglicht den Aufbau und den Einsatz einer kurzen Tauchsonde, die auch für die Serie kostengünstig realisiert werden kann.

Der Verbrennungsprozess ist bei gleicher Brennstoffgüte reproduzierbar und damit die Voraussetzung für eine Optimierung der Verbrennungsanlage gegeben. Unterschiedliche Brennstoffe / Brennstoffgüte bewirken jedoch unterschiedliche Schadstoff (CO_e) - Niveaus. Eine Kalibrierung und damit Messung der CO_e mittels Tauchsonde ist daher nicht einfach möglich. Eine Einstellung der Anlage aufgrund absoluter Sensorsignale erscheint nicht zielführend. Erste Ideen für eine Verbrennungsoptimierung anhand relativer Sensorsignale bzw. anhand der auftretenden Sensordynamik wurden vorgestellt. Dies macht vorteilhafterweise eine alters- und drifftolerante Optimierungsstrategie möglich, wie sie seit Jahren in der industriellen Verbrennungstechnik erfolgreich eingesetzt und für öl- und gasbetriebene Feuerungsanlagen kleiner Leistung bereits demonstriert werden konnte. Strategie, sowie die erforderliche Hard- und Software wurden dem IVD zur Verfügung gestellt.

Die Funktionalität, Effektivität und Zuverlässigkeit der Regelstrategie konnte im Rahmen des Projekts nachgewiesen werden. Der Luftüberschuss der Anlage konnte von durchschnittlich 9% im unregulierten Fall auf bis zu 4% O_2 , bei gleichzeitig minimierten CO - und NO_x -Emissionen, reduziert werden.

Ein Einfluss hoher NO_x -Konzentrationen von bis zu ca. 900 mg/m^3 auf das Sensorsignal konnte nicht festgestellt werden, d.h. NO_x -Schwankungen stören den Sensor und die realisierte Optimierungsstrategie nicht.

Ein Lebensdauernachweis für die dem aggressiven Abgas ausgesetzte Sonde konnte im Rahmen des Projekts aufgrund niedriger Betriebsstundenzahlen nicht abschließend erbracht werden. Die Ursprünglich ausgelieferte Tauchsonde funktionierte jedoch nach Projektende nach wie vor. Dies zeigte der Vergleich der Sensorkennlinien nach der Erstcharakterisierung mit den Labormessungen nach 8, 12 und 24 Monaten Projektlaufzeit.

Eine Drift der Sensorsignale konnte ebenfalls nicht eindeutig festgestellt werden. Wenn überhaupt, so zeigt sich eher eine Sensitivitätszunahme des CarboSen-Sensors über die Projektlaufzeit. D.h. der Sensor reagiert früher und sensibler auf CO_e . Für die realisierte Optimierungsstrategie bedeutet dies, dass eine schlechte Verbrennung früher erkannt und die Anlage schneller an den optimalen Betriebspunkt herangeführt werden kann; also auch aus sicherheitsrelevanten Aspekten ein Vorteil.

Zur Steigerung der Betriebssicherheit der Anlage können neben der Sensorsignalspannung auch andere Sensorgrößen wie z.B. dessen Heizleistungsaufnahme herangezogen werden. Eine Heizleistungsabnahme von 3W auf 2,6 W lässt beispielsweise eine erfolgreiche Zündung der Agroflam-40 Anlage erkennen. Eine weitere Reduktion der Heizleistungsaufnahme um 0,4W lässt z.B. auf den Anstieg der Abgastemperatur im Kamin von nominellen 140°C auf 220°C schließen. Diese Temperaturerhöhung resultierte aus der zunehmenden Verschmutzung / Veraschung der Wärmetauscherwände. Damit kann eine bedarfsgerechte Reinigung/Wartung durchgeführt werden.

Durch die kontinuierliche CO_e-Überwachung mittels CarboSen-Sensor insbesondere durch die Betrachtung der Sensorsignaldynamik kann eine defekte Anlage sofort erkannt und Gegenmassnahmen frühzeitig eingeleitet werden.

Insgesamt wird durch den Einsatz des CarboSen-Sensors in Verbindung mit der CO_e-Emissionskantenoptimierung die Effizienz, die Zuverlässigkeit und die Betriebssicherheit der Anlage gesteigert - im Sinne für den Menschen und für eine saubere Umwelt.

9.2 Ausblick

Die neue optimierte Tauchsonde mit Filtersieb muss systematisch untersucht, im Feld getestet und schließlich qualifiziert werden. Um belastbare Aussagen zum Thema Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und vor allem Lebensdauer treffen zu können, ist eine statistische Anzahl von mindestens 10 Sensoren heranzuziehen.

Um Lebensdaueraussagen treffen zu können, sollte die Anlage möglichst kontinuierlich und für mindestens drei Heizperioden betrieben werden. Vierteljährliche Sensorcharakterisierungen müssen vor Ort an der Anlage durchgeführt werden, um z.B. Transporteinflüsse auszuschließen und reproduzierbare Ergebnisse zu erlangen. Dafür ist eine geeignete Testkammer und Testroutine zu entwickeln und aufzubauen. Während und nach den Feldtests müssen die Sonden analysiert werden. Ein abschließendes Redesign nach betriebswirtschaftlichen Aspekten muss durchgeführt werden, um eine kostenminimale Serienfertigung der Sonde zu ermöglichen.

Gemeinsam mit Feststoffkessel-Herstellern können - in Form eines Leuchtturmprojektes - eine oder mehrere Anlagen mittels einer seriennahen sensorbasierten Verbrennungsoptimierung ausgerüstet und an öffentlichkeits- und politikwirksamer Stelle installiert werden. Die durch die Verbrennungsoptimierung erreichte Wirkungsgradsteigerung, die daraus resultierende CO₂-Einsparung und die aktuelle Anlagenemissionen sollten jederzeit angezeigt oder z.B. über das Internet abgerufen werden können.

Das hierfür entwickelte Sensorsystem CarboSen eignet sich neben mit Getreide beschickten Anlagen auch für andere kontinuierlich mit Festbrennstoffen beschickte Anlagen (z.B. Hackschnitzel, Pellet). Derartige mit Biomasse befeuerte Anlagen werden derzeit von der Bundesregierung als CO₂-neutrale saubere Technologie massiv steuerlich begünstigt. Die CO- und Staubemissionen dieser meist nicht, unzureichend oder gar falsch geregelten Anlagen können um den Faktor 100 bis 1000 höher liegen als die Emissionen von Öl- und Gasfeuerungen nach aktuellem Stand der Technik. Der vermehrte Einsatz von Biomasseanlagen auch im städtischen Bereich führt dort unweigerlich zu erhöhten Emissionen insbesondere auch von toxischen weil lungengängigen Feinstäuben.

Dieser Zustand muss und kann mittels geeigneter Verbrennungsführung z.B. nach der hier vorgeschlagenen CO-Emissionskantenregelung einfach und effektiv verbessert werden. So wird vermutet, dass eine sensorische Verbrennungsoptimierung mit gezielter Ansteuerung der primären- und sekundären Verbrennungszuluft in direktem Zusammenhang mit der Bildung von Stäuben und Feinstäuben steht. Diese werden durch die kontrollierte und

gezügelter Verbrennungsführung in Ihrer Entstehung bereits gehindert. Ein Nachweis für diese Hypothese soll im Rahmen des oben vorgeschlagenen Projektes erbracht werden.

Es ist klar, dass nur ein gut konstruierter Kessel mit getrennt steuerbarer Primär- und Sekundärverbrennungszuluft und entsprechend ausgestaltetem Brennraum eine derartige sensorische Verbrennungsoptimierung zulässt. Aus dem beschriebenen Projekt heraus könnten allgemeingültige Gestaltungsrichtlinien und Hinweise für den Aufbau eines zukunftssicheren neuen Kessels der nächsten Generation gefunden und den Kesselbauern an die Hand gegeben werden.

10 Literatur

- [1] Hammer F.; „Entwicklung eines miniaturisierten Festkörperelektrolytsensors aus der Raumfahrt zur Optimierung von Verbrennungsprozessen“, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr 935, Düsseldorf: VDI Verlag 2002.
- [2] Handbuch: „HydroSen/CarboSen“, ESCUBE GmbH Space Sensor Systems S³, Stuttgart, April 2005.
- [3] Handbuch: „CarboSen1.000 / HydroSen1.000 mit Elektronik XC164“ ESCUBE GmbH & Co. KG, Stand 06/2005.
- [4] Handbuch: „CarboSen1.000 / HydroSen1.000 in der Ausführung ST“ ESCUBE GmbH & Co. KG, Stand 09/2005.
- [5] Externer Bericht S3-05-EB-04: „ Tauchsonde: Beschreibung“; Erster Zwischenbericht im Rahmen des Projekts „Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen“ Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart (Koordinator); 20.01.2005.
- [6] Externer Bericht S3-06-EB-01: „Tauchsonde: Beschreibung Stand der Technik und neue geschützte Ausführung“; Zweiter Zwischenbericht im Rahmen des Projekts „Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen“ Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart (Koordinator); 20.01.2005.
- [7] Externer Bericht S3-06-EB-14: „Tauchsonde: Entwicklung, Aufbau, Einbau“; Dritter Zwischenbericht im Rahmen des Projekts „Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen“ Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart (Koordinator); 28.12.2006.

- [8] Endbericht des TFZ im Rahmen des Projekts „Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh – Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen“
Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart (Koordinator); FNR-Vorhaben 22018903.
- [9] Weber H.: „CO-Regelung die bessere Alternative zur O -Regelung bei Gasfeuerungen“, Fachbeitrag, Gaswärme International, Heft 07 / 2003, S. 448 – 450, Vulkan-Verlag GmbH, Essen.
- [10] Klein B., Völkel M., Hammer F.; „Entwicklung eines sensorgesteuerten modulierenden Ölbrenners“, Forschungsbericht, HLK-Brief 123 des Lehrstuhls für Heiz- und Raumluftechnik der Universität Stuttgart, der Forschungsgesellschaft HLK Stuttgart mbH, der HLK Stuttgart GmbH und des Vereins der Förderer der Forschung im Bereich HLK Stuttgart e.V. (Herausgeber), Stuttgart, Februar 2005.
- [11] Völkel M., Hammer F. „CO_e-Regelung mit Miniatur-Sensor eröffnet neue Perspektiven in der Verbrennungstechnik“, Fachbeitrag, Gaswärme International (54) Nr. 3/2005, S. 174-177, Vulkan-Verlag, Essen, März 2005

Teilbericht III:

Betriebserfahrungen mit einer verbesserten 40 kW Getreidefeuerung

Die Bearbeitung von Teil III erfolgte durch das:



Technologie- und Förderzentrum

im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

Peter Turowski
Paul Roßmann
Dr. Hans Hartmann
Alexander Marks

Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe
Schulgasse 18, D-94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Straubing, März 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	137
2	Aufgabenstellung innerhalb des Gesamtprojektes	138
3	Methodisches Vorgehen	139
3.1	Beschreibung der Feuerungsanlage.....	139
3.2	Versuchsplan	140
3.3	Versuchsbrennstoff	140
3.4	Versuchsaufbau und Messanordnung.....	141
3.4.1	Abgasmessstrecke	141
3.4.2	Wärmeleistungsmessstrecke	143
3.4.3	Überwachungseinrichtungen für den Langzeitversuch	144
3.4.4	Brennstoffverbrauch.....	146
3.4.5	Mess- und Analyseverfahren.....	146
3.5	Versuchsdurchführung und Auswertung	149
3.5.1	Versuchsdurchführung	150
3.5.2	Versuchsauswertung	150
4	Ergebnisse und Diskussion.....	152
4.1	Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen.....	152
4.2	Ergebnisse der Messungen in den Langzeitversuchen.....	153
4.2.1	Standard-Abgasmessgrößen (CO, Ges.-C, NO _x , Staub)	153
4.2.2	Weitere Schadstoffe (HCl, SO ₂).....	156
4.2.3	Abgastemperatur und Kesselleistung	157
4.2.4	Ergebnisse der Abnahmemessungen (durchgeführt von der DEKRA).....	159
4.2.5	Vergleich der Messergebnisse von DEKRA und TFZ.....	161
4.2.6	Untersuchungen zum Ascheausbrand	165
4.3	Betriebserfahrungen	166
5	Zusammenfassung	170
	Quellenverzeichnis.....	172

1 Einleitung

Die energetische Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Rückstände und Nebenprodukte als CO₂-neutrale Brennstoffe kann einen Beitrag zur Schonung fossiler Ressourcen, zum Klimaschutz und zur Verbesserung der wirtschaftlichen Ergebnisse der landwirtschaftlichen Betriebe leisten. Vor diesem Hintergrund wird seitens der Deutschen Landwirtschaft verstärkt gefordert, die rechtlichen Voraussetzungen zu schaffen, damit Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung für Getreide und Getreideverarbeitungsreststoffe, die in den Geltungsbereich der 1.BImSchV (z.B. bis zu einer Nennwärmeleistung von 100 kW) oder der TA-Luft fallen (z.B. im Leistungsbereich über 100 bis 1.000 kW), legal und problemlos betrieben werden können. Hierbei erscheinen die Leistungsbereiche von 50 bis ca. 90 kW und von etwa 200 bis 350 kW besonders interessant, da der kleinere Leistungsbereich in etwa den Wärmebedarf der Wohn- und Betriebsgebäude und der obere Leistungsbereich den Wärmebedarf (Grundlast) kleinerer Nahwärmenetze oder auch von Unterglasflächen abdeckt. In diesen Leistungsbereichen könnte eine thermische Nutzung dieser Biomassen durch die landwirtschaftlichen Betriebe selbst oder durch diesen angegliederte Betreiberfirmen erfolgen.

Vor diesem Hintergrund bieten inzwischen einige Feuerungshersteller entsprechende Anlagen an, die für die Verbrennung von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh geeignet sein sollen. Deutlich mehr Feuerungshersteller geben an, dass eine Zumischung dieser Brennstoffe zu z.B. Hack-schnitzeln in der Größenordnung von 10 % (Masse) in ihren Feuerungen zu keinen Betriebs- oder Emissionsproblemen führt.

Aufgrund der besonderen Nachteile von Getreide, Getreidereststoffen und Stroh bei der Verbrennung (hohe Aschegehalte, niedrige Ascheschmelzpunkte, hohe Chlor-, Kalium- und Stickstoffgehalte, teilweise geringe Schüttdichte und hoher Feinanteil von Stroh und einigen Fraktionen vom Getreideausputz) ergeben sich, unter der Voraussetzung eines emissionsarmen und zuverlässigen Betriebs der Feuerungen, höhere technische und finanzielle Aufwendungen für diese Anlagen. Zusammen mit einem relativ geringen Marktpotenzial (Nischenmarkt) hemmt dies das Interesse und die Aktivitäten vieler im Bereich von Holzfeuerungen tätigen Hersteller. Deshalb wird derzeit die Anlagentechnik für die Verbrennung dieser Biomassen von vielen noch als unausgereift und nicht praxistauglich angesehen.

Ausgehend von einem vielversprechenden Produkt aus diesem Segment wurde eine Feuerungsanlage am IVD weiterentwickelt und optimiert, wobei die Senkung der Partikelemissionen und der Stickoxidemissionen bei gleichzeitiger Verbesserung der Funktionssicherheit im Vordergrund standen. Der Erfolg der Optimierung sollte dann anhand eines Langzeitversuches am Kesselprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) überprüft werden.

2 Aufgabenstellung innerhalb des Gesamtprojektes

Das Technologie- und Förderzentrum (TFZ) hatte innerhalb des gesamten Vorhabens einige eng umrissene Aufgabenstellungen zu bearbeiten, dessen Kernpunkte die Durchführung einer Langzeit-Prüfung einschließlich der zugehörigen Vorbereitungen darstellten. Im Einzelnen waren vom TFZ folgende Vorgänge zu bearbeiten:

- Mitarbeit bei der Auswahl der Feuerungsanlage,
- Aufbau eines geeigneten Langzeit-Prüfstandes,
- Aufbau und Durchführung eines 100 h Praxistests der Neuentwicklung, bzw. der optimierten Anlage einschließlich Datenerfassung, Auswertung und Berichterstattung,
- Betreuung der Anlage während der Abnahmemessungen durch die DEKRA
- Mitwirkung bei der Erarbeitung von Vorschlägen zum Betrieb und zur Überwachung von Getreide-Feuerungsanlagen.

Der Langzeitversuch mit der ausgewählten Anlage sollte auf einem Langzeitprüfstand im neu errichteten Technikum des TFZ, auf dem auch eine kontinuierliche Abnahme der anfallenden Nutzwärme möglich war, erfolgen. Zusätzlich mussten entsprechende Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen für den unbeaufsichtigten Betrieb der Feuerung im Prüfstand entwickelt und errichtet werden. Die Anlage wurde für den Dauerbetrieb angepasst, entsprechende Mess- und Probenahmestellen waren vorzusehen.

Nach einer Phase der Inbetriebnahme mit Vorversuchen sollte die Anlage im 100 h Langzeitversuch rund um die Uhr betrieben werden, sofern ein störungsfreier Betrieb möglich war. Der Betrieb sollte dabei im Leistungsbereich zwischen 70 und 100 % der Nennwärmeleistung erfolgen. Dabei wurden die Hauptabgaskomponenten kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet. Erforderliche Wartungen und Reinigungen, eventuelle Störungen oder Schäden an den Messgeräten wurden dokumentiert.

Die im Langzeitversuch erfolgreich getestete Anlage wurde von einer zugelassenen Messstelle (DEKRA) einer Abnahmemessung unterzogen. Diese Messung sollte die Genehmigungsfähigkeit der Anlage nachweisen.

Die Erfahrungen aus dem Langzeitversuch und der Ergebnisse von Arbeitspaket 1 bieten Anhaltspunkte für den zukünftigen der Betrieb und für die die Überwachung von Getreide-Feuerungsanlagen unter Einhaltung der derzeitigen oder ggf. auch zukünftigen Grenzwerte der 1. BImSchV und der TA-Luft.

3 Methodisches Vorgehen

Beim Betrieb von Feuerungen für biogene Festbrennstoffe treten – anders als bei Feuerungen, die mit homogenen und leicht dosierbaren Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas betrieben werden – stets eine Vielzahl von Einfluss- und Störgrößen auf, die die Aussagekraft und die Verallgemeinerungsfähigkeit von Emissions- und Leistungsmessungen beeinträchtigen. Dazu zählen neben Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften auch dynamische, mehr oder weniger stark schwankende Betriebszustände in der Feuerung, durch die sich die Strömungsverhältnisse in den Mess- und Probenahmestrecken laufend ändern. Messungen an Feuerungen für biogene Festbrennstoffe sind daher stets mit einer relativ hohen Unsicherheit verbunden, mit der die jeweilige Feuerungsart repräsentativ für das gesamte mögliche Einsatzspektrum abgebildet werden kann. Die versuchstechnischen und methodischen Maßnahmen stellen daher notwendigerweise einen Kompromiss zwischen messtechnisch wünschenswertem und wirtschaftlich vertretbarem Aufwand dar. Das gilt nicht nur für die Auswahl der Feuerungsanlage, ihre Betriebszustände und die verwendeten Brennstoffe, sondern auch für die Wiederholbarkeit der Messungen, für Versuchsdurchführung und -aufbau, sowie die messtechnische Ausstattung. Nachfolgend werden der Versuchsplan und die messtechnische Vorgehensweise dargestellt, wobei versucht wurde, die o. g. Unsicherheiten so weit wie möglich zu minimieren.

3.1 Beschreibung der Feuerungsanlage

Eine Getreidefeuerung des Typs Agro 40 des Herstellers Agroflam wurde auf dem Prüfstand des IVD erprobt und optimiert. Hierbei stand die Minderung der Emissionen an Kohlenmonoxid, Stickoxiden und Staub im Mittelpunkt des Interesses. Die Emissionsminderung sollte durch eine verbesserte Anlagenregelung bewirkt werden, die einen CO-Sensor zur Regelung der Luftmenge verwendet. Weiterhin wurden die Luftzufuhr sowie deren Verteilung optimiert. So wurde beispielsweise eine zusätzliche Verbrennungsluftlanze in die Feuerung integriert, die Verbrennungsluft oberhalb der Brennmulde zuführt (siehe Teil I, Kapitel 7.1).

Die durch das IVD ertüchtigte und optimierte Feuerung musste in einigen Punkten für die Durchführung des Langzeitversuches angepasst werden. Für die Versuche am IVD war die automatische Entaschung der Nachbrennkammer außer Betrieb gesetzt, da diese zu Betriebsstörungen führte und für Messungen über kurze Zeiträume nicht erforderlich war. Da der Ascheaustrag im Langzeitversuch genutzt werden sollte, wurde dieser am TFZ nachbearbeitet und mit einer Kurbel versehen, die einen manuellen Betrieb während des Langzeitversuches ermöglichte. Die manuelle Entaschung wurde zweimal pro Tag betätigt.

Die Verbrennungsluft wurde am IVD in Form von Druckluft zugeführt, um auf einfachen Weg die Mengen der Verbrennungsluft variieren zu können. Da das Druckluftsystem im Prüfstand des TFZ die erforderlichen Druckluftmengen nicht liefern konnte, wurde ein Seitenkanalverdichter als Verbrennungsluftgebläse montiert.

Da die Anlage ausschließlich für den Brennstoff Gerste optimiert worden war, musste auf Versuche mit anderen Brennstoffen verzichtet werden.

3.2 Versuchsplan

Ziel der Versuche am Prüfstand des TFZ war die Überprüfung der Eignung der optimierten Feuerungsanlage im Dauerbetrieb. Antragsgemäß sollte daher ein Langzeitversuch über die Dauer von mindestens 100 h durchgeführt werden. Aufgrund von Störungen in den neu entwickelten Überwachungseinrichtungen (s.a. Kap. 3.4.3) musste der Versuch mehrfach begonnen werden. Zur Optimierung der Überwachungseinrichtung waren zwei Vorversuche erforderlich, da es im unbeaufsichtigten Betrieb mehrfach zu unkontrollierten Abschaltungen kam. Nachdem die Überwachungseinrichtung an den Betrieb der Feuerung angepasst war, war ein Dauerbetrieb von zunächst ca. 55 h (DEKRA-Messung) und im Anschluss als Langzeitversuch von ca. 170 h möglich. Insgesamt wurden die in Tabelle 1 beschriebenen Versuche durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsplan

Versuch Nr.	Versuchsbeschreibung	Versuchsbeginn Datum / Uhrzeit	Versuchsende Datum / Uhrzeit	Dauer
1	Vorversuch	24.10. / 13:15	25.10. / 1:30	12,25 h
2	Vorversuch	25.10. / 8:45	26.10. / 5:30	20,75 h
3	DEKRA-Messung	29.10. / 10:00	31.10. / 15:00	55,00 h
4	Langzeitversuch	5.11. / 16:00	14.11. / 15:00	173,00 h

3.3 Versuchsbrennstoff

Der Langzeitversuch wurde mit Gerste als Brennstoff durchgeführt. Die erforderliche Brennstoffmenge wurde über den Landhandel bezogen. Die Gerste war Wintergerste aus der Ernte 2007 und entsprach den Qualitätsanforderungen an Futtergerste. Die Partie, aus der der Brennstoff entnommen wurde, war nicht sortenrein sondern ein Gemenge aus verschiedenen ortsüblichen Sorten.

Der Brennstoffwassergehalt wurde mehrfach während des Verlaufs des Langzeitversuchs in Anlehnung an DIN 51718 [3] bei 105 °C im Trockenschrank bestimmt. Dazu wurde eine Mischprobe aus dem Brennstoffvorrat entnommen. Aus jeder Probe erfolgte jeweils eine Mehrfachbestimmung des Wassergehaltes. Weiterhin wurde für den Brennstoff eine Elementaranalyse (Gehalte an C, H, N und O) und eine Bestimmung des Heizwertes und des Aschegehaltes durchgeführt. Zusätzlich wurden die Gehalte an Schwefel und Chlor im Brennstoff bestimmt, da diesen beiden Elementen als Säurebildnern eine wesentliche Bedeutung hinsichtlich der entstehenden Emissionen sowie der Gefahr von Korrosion im Kessel bzw. Abgassystem zukommt. Die Bestimmung weiterer Parameter (Gehalte an Ca, K, Mg, Na und Si) diente der Beurteilung der Aerosolbildungseigenschaften des Brennstoffs bzw. des Ascheschmelzverhaltens. Die Probenvorbereitung und -homogenisierung erfolgte mit einer Schlagrotormühle. Mit dieser Mühle wurden die Brennstoffproben auf eine Korngröße von < 1 mm zerkleinert. Diese feine Körnung ermöglicht eine repräsentative Teilung der Proben und ist ausreichend für die verschiedenen Aufschluss- und Analyseverfahren in den Labors.

3.4 Versuchsaufbau und Messanordnung

Die Messungen wurden auf dem Feuerungsprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) in Straubing durchgeführt. Die messtechnische Ausstattung wurde entsprechend der Aufgabenstellung gewählt. Abbildung 1 zeigt den Prüfstands Aufbau mit Kessel und Messeinrichtungen.



Abbildung 1: Versuchsaufbau im Prüfstand des TFZ

3.4.1 Abgasmessstrecke

Die Abgasmessstrecke umfasst den Abschnitt des Abgasrohres, in dem alle erforderlichen Messöffnungen angeordnet sind und der sich zwischen Kesselanschluss und der Förderleitung zur Kaminanlage des Prüfstandes befindet. Da an diesem Prüfstands Aufbau auch die Abnahmemessungen der DEKRA durchgeführt wurden, mussten neben den für die Versuche des TFZ erforderlichen Messöffnungen auch die Messöffnungen für die Untersuchungen der DEKRA vorgesehen werden.

Die Abgasmessstrecke verläuft senkrecht, sie ist unmittelbar nach dem Abgasstutzen der Feuerungsanlage angebracht und wurde entsprechend der zu erwartenden Volumenströme mit einem Rohrdurchmesser von 150 mm ausgeführt. In diese Messstrecke wurden alle von beiden Projektpartnern benötigten Messstellen eingebaut, so dass parallel gemessen werden konnte. Für die Messungen der DEKRA wurden 4 Messstellen für folgende Messeinrichtungen vorgesehen:

- Messung von Temperatur und Druck,
- Messung der gasförmigen Abgaskomponenten,
- Probenahme für die Dioxinanalyse,
- Messung des Gesamtstaubgehaltes und Probenahme für die Bestimmung von Schwermetallen, HCl und HF.

Oberhalb dieses Abschnittes der Messstrecke wurden 3 Messstellen für die Messeinrichtungen des TFZ angeordnet, die der Bestimmung folgender Größen dienen:

- Messung der gasförmigen Komponenten,
- Messung von Temperatur und Druck,
- Messung des Gesamtstaubgehaltes.

Vor den einzelnen Messstellen wurde jeweils eine Beruhigungsstrecke mit einer Länge von mindestens 450 mm, entsprechend dem 3-fachen Durchmesser des Abgasrohrs, eingehalten. Der Aufbau der Messstrecken ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

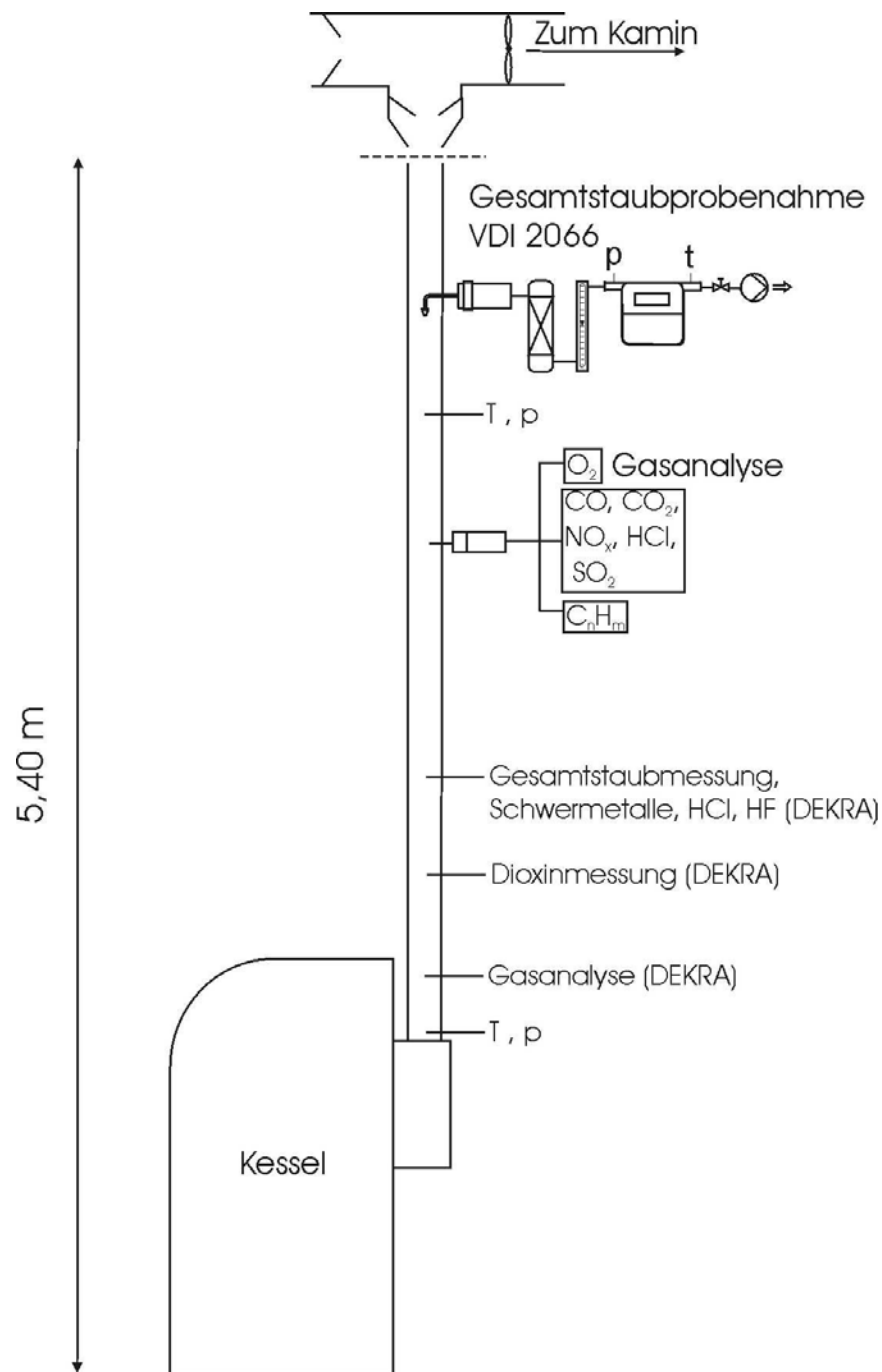


Abbildung 2: Abgasmessstrecke

3.4.2 Wärmeleistungsmessstrecke

Die Kesselanlage wurde wasserseitig an einen speziellen Kühlkreislauf mit direkter Erfassung der vom Kessel abgegebenen Nutzwärme angeschlossen. Die hydraulischen Messstrecken entsprachen dabei den Anforderungen der DIN EN 303 Teil 5 [2] bzw. DIN EN 304 [4]. Die Bestimmung der Wärmeleistung erfolgte über die Messung der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf und den Heizwasserdurchfluss im Kessel bzw. im Sekundärwärmetauscher. Der Heizwasserdurchfluss wurde dabei über die Messzeit konstant gehalten, während die Rücklauftemperatur über ein 3-Wege-Mischventil geregelt wurde. Über zwei Wärmetauscher in der Messstrecke

wurde die Wärme des geprüften Wärmeerzeugers entweder in das Heizungsnetz des Technikums eingespeist oder über Kühlwasser abgeführt. Als Kühlwasser wurde – soweit verfügbar – Regenwasser genutzt, um den Verbrauch an Trinkwasser zu minimieren.

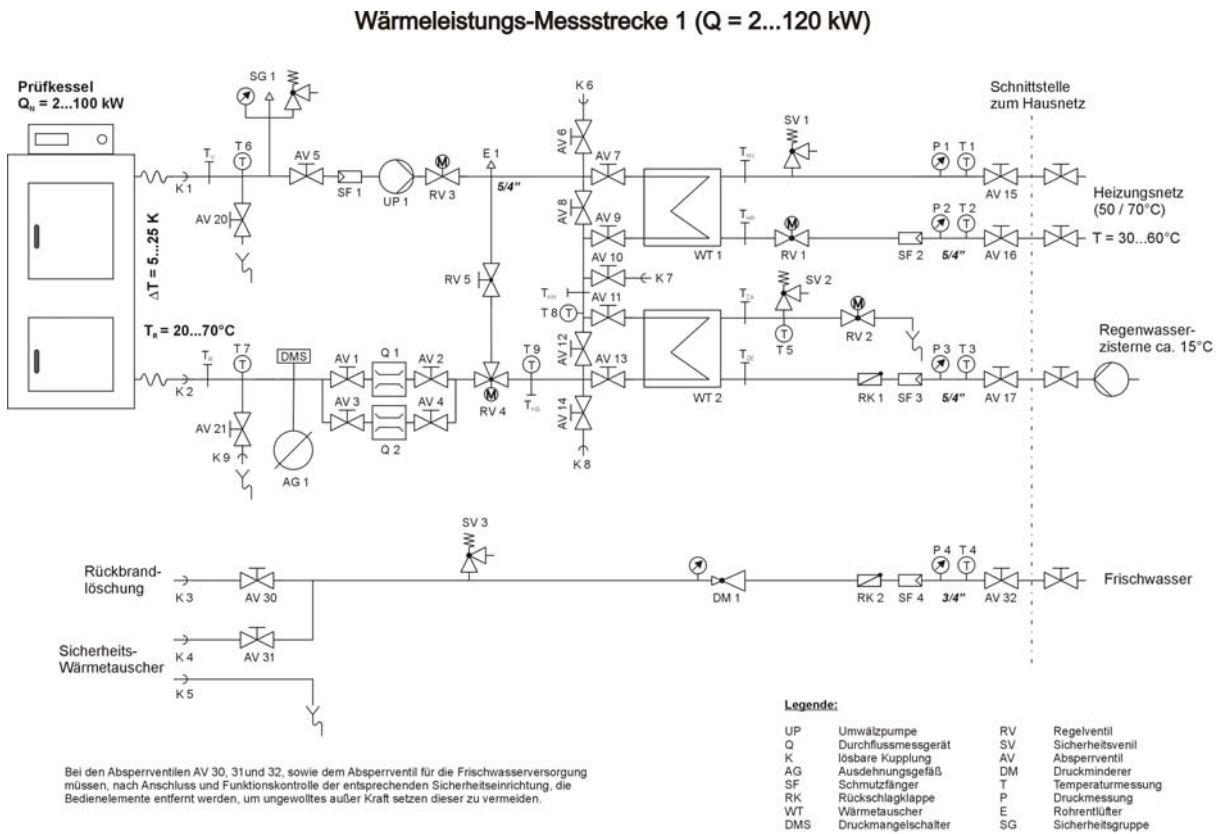


Abbildung 3: Schema der verwendeten Wärmeleistungsmessstrecke

3.4.3 Überwachungseinrichtungen für den Langzeitversuch

Da ein Langzeitversuch auf einem Prüfstand auch längere Phasen im unbeaufsichtigten Betrieb erfordert, müssen zusätzliche Sicherheitseinrichtungen vorgesehen werden, die bei einem normal beaufsichtigten Prüfstandsbetrieb nicht erforderlich sind, um das Auftreten gefährlicher Betriebszustände auszuschließen. Dies betrifft vor allem viele Verbindungen zwischen dem Prüfling und der Peripherie, die – anders als bei einer Festinstallation in Gebäuden – über flexible Leitungen mit lösbaren Verbindungen ausgeführt sind. Dies ist notwendig, da ein häufiger Wechsel der Prüflinge den Aufwand für eine feste Anordnung aller Anschlussleitungen unverhältnismäßig erhöhen würde. Falls Feuerungen zur Bestimmung des Brennstoffverbrauches oder des Nachlegezeitpunktes auf einer Plattformwaage aufgestellt werden müssen, sind flexible Verbindungen zur Vermeidung von Kraftschlüssen unabdingbar.

Die Abführung des Abgases erfolgt am Prüfstand nicht über einen Kamin mit natürlichem Kaminzug, sondern über ein elektrisch betriebenes Saugzuggebläse sowie einer elektronischen Regelungseinrichtung zur Anpassung des notwendigen Förderdrucks. Durch diese Art des Anschlusses können bei Feuerungsanlagen folgende Probleme auftreten:

Unzureichende Abführung des Rauchgases

Dies kann durch Ausfall des elektrischen Saugzuggebläses, Ausfall der elektronischen Regelungseinrichtung zur Anpassung des Förderdruckes oder durch Defekt bzw. Abrutschen von flexiblen Abgasverbindungen verursacht werden. Ein solcher Mangel würde zu Rauchgasaustritt in den Aufstellraum führen. Bei automatisch beschickten Anlagen besteht zusätzlich die Gefahr eines Rückbrandes bei unzureichendem Unterdruck in der Feuerung.

Unzureichende Wärmeabführung bei Kesselanlagen

Ein Defekt der flexiblen Anschlussleitungen des Kessel- bzw. Kühlkreislaufs kann zu Kesselwasseraustritt führen. In diesem Fall ist eine sichere Wärmeabfuhr nicht mehr gewährleistet. Im Normalfall würde die Kesselanlage durch die anlagenintegrierten Sicherheitseinrichtungen wie Sicherheitstemperaturbegrenzer (STB) und ggf. Sicherheitswärmetauscher in einen sicheren Zustand übergehen. Diese Sicherheitseinrichtungen sind jedoch üblicherweise im Wasserkreislauf des Kessels angeordnet und bei ausgelaufenem Kesselwasser nur noch bedingt oder gar nicht mehr funktionstüchtig. Dies kann zu enormen Schäden an der Anlage und dem kompletten Versuchsaufbau führen.

Um diesen Gefahren zu entgegnen werden folgende Parameter permanent überwacht:

- Förderdruck am Abgasstutzen der Feuerung (vor der Entkopplung) sowie
- Wasserdruck im Kessel- bzw. Kühlkreislauf.

Die Überwachung des Kaminzugs erfolgt über einen Differenzdruckwächter mit sehr niedrigem Druckbereich, welcher von 0 – 25 Pa einstellbar ist. Der für Kleinf Feuerungsanlagen notwendige Unterdruck am Abgasstutzen beträgt typischerweise 10 – 15 Pa. Um diesen sicher überwachen zu können, jedoch das Abschalten der Feuerung durch übliche Schwankungen im Förderdruck zu vermeiden, wird ein Schaltpunkt von 4 Pa gewählt. Dies bedeutet, dass die Anlage erst freigegeben wird wenn zwischen Abgasrohr und Aufstellraum ein Unterdruck von mindestens 4 Pa vorhanden ist. Um Anlagenausfällen durch kurzfristiges Abfallen des Unterdrucks unter 4 Pa entgegen zu wirken, z. B. durch Öffnen von Zugangstüren im Prüfstand, erfolgt die Abschaltung der Anlage zeitverzögert, d. h. die Anlage wird erst abgeschaltet, wenn der Unterdruck länger als 20 Sekunden unter 4 Pa abgefallen ist.

Die Überwachung des Wasserdrucks im Kesselkreislauf erfolgt über einen elektrischen Druckschalter. Dieser besitzt zwei Schaltpunkte, welche so eingestellt sind, dass eine Freigabe der Anlage erst erfolgt, wenn durch Auffüllen des Kesselkreises ein Wasserdruck von mindestens 1 bar erreicht wird. Eine Abschaltung der Anlage erfolgt, wenn der Wasserdruck unter 0,3 bar abfällt.

Im Störfall (unzureichender Förderdruck oder Wassermangel) wird die Feuerung abgeschaltet. Die Abschaltung erfolgt nicht durch Eingreifen in die Sicherheitskette der Anlagenregelung. Dies ist zum Teil nicht möglich, oder erfordert detailliertes Fachwissen über die entsprechende Anlagenelektrik. Im Störfall wird die komplette Spannungsversorgung der Anlage abgeschaltet. Dies ist durchaus möglich, da Ausfälle der Netzspannung jederzeit auftreten können und die Anlagen hierbei in einen sicheren Zustand übergehen müssen. Zum Anschluss unterschiedlicher Prüflinge

verfügt die Überwachung über eine Drehstromsteckdose (CEE 400V, 16A) sowie über eine Schuko-Steckdose (230V, 16A).

Der Prüfling wird über einen Taster freigegeben. Bei einer störungsbedingten Abschaltung erfolgt kein automatisches Wiedereinschalten. Hier ist es erforderlich, nach dem Beseitigen der Störungsursache, die Anlage erneut über den Ein-Taster freizugeben. Der Ein-Taster hat noch eine zusätzliche Funktion, durch die ein Abschalten temporär unterbunden werden kann. Erforderlich wird dies beim Wechsel von Probenahmeeinrichtungen in der Abgasmessstrecke, da dadurch der Unterdruck länger als 20 Sekunden unter 4 Pa abfallen kann, was zu einem ungewollten Anlagenausfall führen würde. Diese Einrichtung ist nicht rastend, d. h. die Sicherheitsüberwachung kann dadurch nicht abgeschaltet werden, sondern wird nur über den Zeitraum, in dem der Taster gedrückt wird, inaktiv. Da diese Funktion nur durch entsprechendes Fachpersonal vor Ort genutzt wird, kann beim Außerkraftsetzen der Schutzfunktion und einem gleichzeitig auftretendem Störfall sofort entsprechend reagiert werden.

Folgende Betriebszustände werden über Leuchtmelder angezeigt:

- Störung Kaminzug (rot),
- Druckmangel Kesselkreis (rot),
- Anlage aus (rot) sowie
- Anlage ein (grün).

Die Überwachungseinrichtung verfügt weiterhin über einen Schalter für die Kesselkreispumpe sowie über einen Schalter für die an der Wärmeleistungsmessstrecke angebrachten Messeinrichtungen. Zusätzlich ist ein Hauptschalter vorhanden.

Die Prüflingsüberwachung ersetzt nicht die bei Heizungsanlagen integrierten Sicherheitseinrichtungen wie den Sicherheitstemperaturbegrenzer (STB) und ggf. den Sicherheitswärmetauscher. Diese müssen auch im Prüfstandsbetrieb vorhanden und funktionsfähig sein. Die Prüflingsüberwachung stellt lediglich sicher, dass ein Betrieb der Anlage nur möglich ist, wenn die notwendigen Anschlussbedingungen (Wärmeabnahme, Abführung der Abgase) erfüllt sind.

3.4.4 Brennstoffverbrauch

Zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs während der Versuche wurde der Vorratsbehälter für die Versuchsbrennstoffe auf eine Plattformwaage gestellt. Damit kann die Gewichtsabnahme des Vorratsbehälters über die Versuchsdauer bestimmt werden. Die Erfassung der Gewichte erfolgte automatisch in den voreingestellten Intervallen über die Messdatenerfassung.

3.4.5 Mess- und Analyseverfahren

Im Rahmen des Messprogramms wurden folgende Anlagenparameter und Emissionsmessgrößen erfasst:

Luftverunreinigende Stoffe im Abgas:

- Kohlenmonoxidgehalt (CO),
- Gehalt an flüchtigen organische Stoffen (Ges.-C),
- Stickstoffoxidgehalt (NO_x),
- Gehalt an anorganischen Chlorverbindungen (HCl),
- Schwefeldioxidgehalt (SO₂) und
- Gesamtstaubgehalt.

Betriebsparameter der Feuerungsanlage:

- Sauerstoffgehalt (O₂),
- Kohlendioxidgehalt (CO₂),
- Abgasfeuchte (H₂O),
- Wärmeleistung,
- Brennstoffverbrauch,
- Abgastemperaturen, Vor- und Rücklauftemperaturen, Verbrennungslufttemperatur,
- Förderdruck sowie
- dynamischer Druck am Prandtl-Staurohr.

Umgebungsbedingungen:

- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchte und
- Luftdruck.

Die im Versuchsstand kontinuierlich gemessenen Parameter und die hierfür eingesetzten Messgeräte werden in Tabelle 2 zusammengestellt. Die angewandten Messmethoden entsprechen standardisierten Verfahren und sind teilweise in europäischen oder deutschen Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert. Alle Messdaten werden als Analog- bzw. Digitalsignale über das modulare I/O-System FieldPoint von National Instruments erfasst und von einem Personal Computer zur weiteren Verrechnung und Datenspeicherung aufgenommen. Zur Messdatenerfassung wird ein am Technologie- und Förderzentrum entwickeltes Programm verwendet, das mit der Entwicklungsumgebung LabView 6.1 programmiert wurde. Die Messwerte werden im Sekundentakt aufgezeichnet und als Mittelwert über jeweils 60 s gespeichert. Die Gasgeschwindigkeit wird für jedes Intervall aus den Minutenmittelwerten der Messgrößen dynamischer Druck, Abgaszusammensetzung und Abgastemperatur berechnet.

Tabelle 2: Kontinuierlich erfasste Messgrößen – Technische Daten der Messgeräte

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/ -verfahren	aktiver Messbereich	Prüfgaskon- zentration ²⁾
Umgebungsbedingungen und Betriebsparameter				
Luftdruck	Toss Kombisensor Typ 20500	Piezoresistiver Effekt	900 - 1.100 hPa	---
Lufttemperatur	Toss Kombisensor Typ 20500	temperaturabhängige Widerstandsänderung (Pt 1000)	-40 - 60 °C	---
Luftfeuchte	Toss Kombisensor Typ 20500	Mehrschichtsensor	0 - 100 %	---
Abgastemperatur	Thermoelement (Typ K), Fa. Philips-Thermocoax	Thermoelektrizität	0 - 1.000 °C	---
statischer Druck	Differenzdrucktransmitter, GE LPX 5000	Induktion	-200 Pa - 200 Pa	---
dynamischer Druck	Differenzdrucktransmitter, GE LPX 9000	Induktion	0 - 50 Pa	---
Abgasbestandteile				
CO ₂	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fourier-transformierte Infrarotabsorption	0 - 25 Vol.-%	---
	BINOS 1004, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0 - 20 Vol.-%	18,0 % in N ₂
H ₂ O	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fourier-transformierte Infrarotabsorption	0 - 30 Vol.-%	---
	Hygrophil 4220 B, Fa. Ultrakust	Psychrometrie	10 - 500 g/kg	
Abgasbestandteile				
CO	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fourier-transformierte Infrarotabsorption	0 - 15.000 ppm	---
	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0 - 5.000 ppm ¹⁾	449 ppm in N ₂
	BINOS 1001, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0 - 3 %	2,53 % in N ₂
NO _x ⁴⁾	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fourier-transformierte Infrarotabsorption	0 - 2.000 ppm 0 - 1.500 ppm	
	Modell 951 A, Fa. Beckmann Industrial	Chemolumineszenz	0 – 1.000 ppm	900 ppm NO in N ₂
O ₂	PMA 100-L Fa. M&C Products	Paramagnetismus	0 - 25 Vol.-% ¹⁾	20,9 % Luft-O ₂
	OXYNOS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Paramagnetismus	0 - 21 Vol.-%	20,9 % Luft-O ₂
Ges.-C ³⁾	Thermo-FID Fa. Mess-&Analyse-technik GmbH	Flammenionisation	0 - 10.000 ppm ¹⁾ C ₃ H ₈ -Äquivalent	90 ppm C ₃ H ₈ in N ₂
	FID 3-100, Fa. J.U.M.	Flammenionisation	0-10.000 ppm ¹⁾ C ₃ H ₈ -Äquivalen	90 ppm C ₃ H ₈ in N ₂
HCl	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fourier-transformierte Infrarotabsorption	0 – 2.000 ppm	
SO ₂	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	Fourier-transformierte Infrarotabsorption	0 – 1.000 ppm	

Fortsetzung Tabelle 2

<i>Wärmeleistung und Wirkungsgrad</i>				
Temperatur ⁵⁾	Widerstandsthermometer, paarweise kalibriert; Fa. Thermokon	temperaturabhängige Widerstandsänderung (Pt 100)	0 - 100 °C	---
Kühlwasserstrom	Promag 53 P Fa. Endress+Hauser	Magnetisch-induktives Durchfluss-Messsystem	240 - 6.000 l/h	---
Brennstoffverbrauch	Plattformwaage Mettler Toledo KD 600g	elektromagnetische Kraftkompensation	0 – 600 kg	---

1) in mehreren Messbereichen

2) relative Genauigkeit des Prüfgases: $\pm 1\%$ (lt. Herstellerangabe) Ablesung einmal am Tag

3) Summe der flüchtigen organischen Verbindungen; Messung im heißen Abgas (Probenahme bei 180 °C) gemäß VDI-Richtlinie 3481 Blatt 1, Ergebnisse bezogen auf trockenes Abgas

4) $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$

5) Vor- und Rücklaufwassertemperatur, Kühlwassertemperatur, Raumtemperatur

Die Bestimmung der Staubemissionen als Gesamtstaub erfolgt diskontinuierlich mittels anreichernder Abgasprobenahme gemäß VDI 2066 (Methode mit "Filterkopfgerät" und Methode mit "Planfilterkopfgerät" [8]). Bei dieser Probenahme wird ein staubbelasteter Teilgasstrom unter isokinetischen Bedingungen entnommen und einem Rückhaltesystem zur Staubabscheidung zugeführt. Als Abscheidemedium wird eine mit Quarzwatte gestopfte Filterhülse mit einem nachgeschalteten Glasfaserplanfilter (Retention 99,998 % gemäß DOP (0,3 μm), Durchmesser 45 mm) kombiniert und im Filterkopfgerät eingesetzt, das sich außerhalb des Abgaskanals befindet. Das Rückhaltesystem wird mit einer Heizmanschette beheizt, um eine Unterschreitung des Abgastauptpunktes im Filtersystem zu vermeiden. Nach dem Filterkopfgerät gelangt das Messgas in die Absaugapparatur. Diese besteht aus einer Einheit zur Gastrocknung, den Geräten zur Ermittlung des Volumenstromes sowie des Gaszustandes und einer Saugpumpe. Mit Hilfe eines Schwebekörper-Durchflussmessgerätes wird der für die isokinetische Probenahme erforderliche Volumenstrom am Bypass der Pumpe eingestellt. Die Gesamtstaubprobenahme erfolgt über einen Zeitraum von 30 Minuten, wie er in der VDI 2066 vorgesehen ist, es sei denn die Filterbelastung wird so groß, dass die Leistungsgrenze der Absaugpumpe erreicht wird. Die Staubmasse wird nach Konditionierung der Filter gravimetrisch bestimmt. Dazu werden die Filter unbeladen und beladen mit einer Präzisionswaage (Mettler Toledo XP 56, Maximallast 56 g, Ablesbarkeit 1 μg) gewogen.

3.5 Versuchsdurchführung und Auswertung

Die optimierte Feuerungsanlage wurde auf dem Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums aufgebaut und im Beisein eines Technikers des IVD in Betrieb genommen. Anschließend wurden erste Vorversuche mit dem verwendeten Brennstoff durchgeführt, um die Bedienung der Anlage kennen zu lernen und die erforderliche Dauer bis zum Beharrungszustand zu ermitteln. Während der Vorversuche wurden außerdem der zu erwartende Gesamtstaubgehalt und die Messposition für die Staubprobenahme (Kernstrom) bestimmt sowie ein Messgeräteabgleich durchgeführt. Die Verbrennungsversuche einschließlich dieser Vorbereitungen erfolgten im Oktober und November 2007. Insgesamt wurden mit der Feuerungsanlage 4 Versuche mit Betriebszeiten zwischen 12 und 173 h durchgeführt (s.a. Tabelle 1 in Kap. 3.2). Die Versuchsdurchführung wird nachfolgend beschrieben.

3.5.1 Versuchsdurchführung

Anheizen und Beharrungszustand. Die Feuerungsanlage wurde jeweils nach dem erstmaligen Befüllen des Brennstoffvorratsbehälters mit dem Versuchsbrennstoff eingeschaltet und damit das Zündprogramm der elektronischen Verbrennungsregelung gestartet. Um den Zündvorgang des nur schwer entzündlichen Getreidebrennstoffes zu beschleunigen, wurde ein Hilfsbrennstoff (Hackschnitzel) eingesetzt, der manuell gezündet wurde. In der Phase des Anheizens erfolgte lediglich eine Zirkulation des Heizwassers im Kühlkreislauf. Die Wärmeabnahme setzte erst ab einer Kesselwassertemperatur von ca. 50 °C ein. Dabei wurde der Kaltwasserdurchfluss auf die im Beharrungszustand erforderliche Wärmeleistung eingeregelt. Die Vorlauftemperatur lag abweichend von DIN EN 303-5 [2] bei ca. 50 °C, und die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf betrug meistens 10 bis 15 K.

Der Beharrungszustand war erreicht, nachdem die Betriebs- und Abgasparameter einen weitgehend stabilen Verlauf zeigten. Während der Versuche wurde die automatische Abreinigung der Wärmetauscherzüge der Feuerungsanlage entsprechend der beim IVD gewählten Einstellungen betrieben.

Durchführung der Messungen. Die Messwertaufzeichnung wurde zu Beginn jedes Versuches gestartet und es erfolgte das Kalibrieren der Gasanalysatoren. Vor Beginn jeder Staubmessung wurden die Absaugraten für die VDI-Staubprobenahmen bestimmt. An jedem Versuchstag wurden drei Staubmessungen durchgeführt, wobei an den Wochenenden keine Messungen erfolgten.

Abschalten und Beenden. Nach Abschluss des Versuchs wurde die Messwertaufzeichnung beendet, die Feuerungsanlage wurde ausgeschaltet und über das Kühlsystem nachgekühlt, um ein nachträgliches Überhitzen zu verhindern.

3.5.2 Versuchsauswertung

Zur Auswertung und Verrechnung der Mess- und Analysedaten wurde die am Technologie- und Förderzentrum entwickelte Auswertungsdatei FMDA 9.3 zusammen mit der Tabellenkalkulationssoftware MS Excel verwendet. Die Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben.

Schadstoffemissionen. In einem ersten Auswertungsschritt wurden die Abgaskenngrößen Luftverhältniszahl, Normdichte, Normvolumenstrom und Massenstrom aus den aufgezeichneten Messwerten berechnet. Anschließend wurden die Messwerte für den gesamten Versuchszeitraum zu Halbstunden-Mittelwerten zusammengefasst. Sämtliche erfassten Schadstoffemissionen werden als Massenkonzentrationen (mg/m^3) bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 13 % angegeben.

Wärmeleistung und Wirkungsgrad. Mit den Daten zur Brennstoffzusammensetzung und den Momentanwerten der Abgaskenngrößen, Temperaturen und Kühlwasserdurchsatz erfolgte die Berechnung der Kessel- und Feuerungswärmeleistung, des feuerungstechnischen Wirkungsgrads und des Kesselwirkungsgrads (nach der direkten Methode) gemäß den Berechnungsvorgaben der DIN EN 303-5 [2]. Dazu wurden der Kühlwasservolumenstrom, dessen Temperatur im Kesseleingang und die Vorlauftemperatur kontinuierlich erfasst sowie die verbrauchte Brennstoffmasse be-

stimmt. Die Mittelwertbildung der Momentanwerte wurde wie bei den Schadstoffemissionen über die Dauer der Probenahme (30 Minuten) durchgeführt.

Gesamtstaubgehalt. Die Auswertung der Staubprobenahme erfolgte in eigenen Berechnungsblättern. Dabei wurden zuerst die abgesaugten Normvolumina aus den gemessenen Gasmengen und Gaszuständen bestimmt. Mit diesen Zwischenergebnissen wurden dann die gravimetrisch ermittelten Filterbeladungen auf Massenkonzentrationen umgerechnet.

Die Filtermedien wurden im Trockenschrank bei 160 °C über eine Stunde lang ausgeheizt. Anschließend wurden sie im Exsikkator über eine weitere Stunde abgekühlt und konditioniert. Danach wurden sie einzeln entnommen und mit einer Präzisionswaage (Ablesegenauigkeit: 0,001 mg) gewogen und bis zur weiteren Verwendung staubfrei gelagert. Die belegten Filter wurden wiederum im Trockenschrank bei 120 °C eine Stunde lang getrocknet, eine weitere Stunde im Exsikkator konditioniert und abschließend auf der Waage zurückgewogen.

Brennstoffe. In den Auswertungen wurden die vom jeweiligen Brennstoff ermittelten Elementaranalysen, die Werte für den Wasser- und Aschegehalt sowie der Heizwert berücksichtigt (vgl. hierzu Kapitel 4.1).

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen

Die Analysen zur Bestimmung des Heizwertes und des Aschegehaltes erfolgten nur für die als Brennstoff verwendete Gerste. Die Elementgehalte des Brennstoffs wurden durch ein externes Labor bestimmt. Ursprünglich war für den Langzeitversuch der Einsatz von Getreidebrennstoffen vorgesehen, die zentral von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) für alle Projekte der FNR bereitgestellt wurden. Die durch die TLL zu Beginn des Projektes gelieferte Gerste wurde jedoch aufgrund der langen Lagerdauer von Kornkäfern befallen, so dass sie als Brennstoff untauglich war. Durch das TFZ wurde daher vom Landhandel ein Ersatzbrennstoff beschafft. Die Analysenwerte des TLL-Brennstoffes und der Spannweite der Nawaro-Datenbank [5] sind in Tabelle 3 zum Vergleich dem Versuchsbrennstoff gegenübergestellt.

Tabelle 3: Heizwert und Elementgehalte des verwendeten Brennstoffes mit Vergleichswerten

Brennstoffart	Heizwert H_u (MJ/kg TM)	Elementgehalte, bezogen auf Trockenmasse (TM) (Ma.-% TM)					
		Asche	C	O	H	S	N
Gerste TFZ	17,29	2,6	46,4	42,6	6,0	0,15	2,2
Gerste TLL	17,50	2,2	43,0	47,4	5,6	0,13	1,7
Spannweite Datenbank	16,72-17,22	2,4-3,4	45,9-48,6	39,5-42,7	5,7-7,2	0,08-0,14	1,5-2,2

Die ersatzweise beschaffte Gerste weicht zwar in einigen Parametern von der Zusammensetzung der Gerste der TLL ab, die Abweichungen liegen jedoch größtenteils innerhalb der in Brennstoffdatenbanken ausgewiesenen Spannweite und geben somit nur die natürliche Streuungen von Biomasse verschiedener Herkunft wieder. Im Rahmen des Vorhabens wurde der Brennstoff auch auf seinen Gehalt an den Elementen Ca, K, Mg, Na, Si, S, N und Cl untersucht. Alle Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen sowie die entsprechenden Gehalte der Gerste der TLL als Vergleichsbrennstoffe sind in Tabelle 4 dargestellt. Hinsichtlich der für die Aerosolbildung verantwortlichen Elemente K, Cl und S ist der hier eingesetzte Brennstoff somit als etwas weniger günstig als der TLL-Brennstoff einzustufen. Gleiches gilt auch für den für die Stickoxidbildung verantwortlichen Stickstoffgehalt.

Tabelle 4: Elementgehalte (bezogen auf die Trockenmasse)

Parameter	Gerste TFZ	Gerste TLL
Kalzium (Ca)	517 mg/kg	390 mg/kg
Kalium (K)	4.500 mg/kg	3.060 mg/kg
Magnesium (Mg)	1.180 mg/kg	900 mg/kg
Natrium (Na)	< 50 mg/kg	44 mg/kg
Silizium (Si)	3.090 mg/kg	2.310 mg/kg
Chlor (Cl)	1.040 mg/kg	770 mg/kg

4.2 Ergebnisse der Messungen in den Langzeitversuchen

Mit der Anlage wurden neben den Vorversuchen 2 Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Während der ersten Messung erfolgten parallel die Abnahmemessungen der DEKRA, der zugehörige Bericht ist im Anhang enthalten. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit und die Messung der Emissionen sollten in einem Langzeitversuch über einen Zeitraum von mindestens 100 h erfolgen. In beiden Messungen wurden über einen längeren Versuchszeitraum im Rahmen eines ununterbrochenen Dauerbetriebs mit konstanten Betriebseinstellungen wiederholte (bei Staub) bzw. durchgehende Messungen (für gasförmige Parameter) durchgeführt. Die Ergebnisse für die beiden Messungen werden nachfolgend vorgestellt.

4.2.1 Standard-Abgasmessgrößen (CO, Ges.-C, NO_x, Staub)

Zur Durchführung der Abnahmemessungen wurde die Anlage zwischen dem 29.11.2007 10:00 Uhr und dem 31.10.2007 15:00 Uhr durchgehend über einen Zeitraum von ca. 55 h betrieben. Der eigentliche Langzeitversuch erfolgte vom 5.11.2007 16:00 Uhr bis zum 14.11.2007 15:00 über einen Zeitraum von 173 h. Das ursprüngliche Versuchsziel mit einer Versuchsdauer von 100 h wurde somit deutlich übertroffen. Innerhalb des Langzeitversuchs konnte ein Zeitraum von ca. 18 h nicht ausgewertet werden (11.11.2007 19:00 Uhr bis 12.11.2007 13:00 Uhr), da die Feuerung wegen Brennstoffmangels ausgefallen war und wieder auf Nennleistung hochgefahren werden musste.

Für die Standard-Abgasmessgrößen sind die Ergebnisse aus den beiden Langzeitversuchen in Abbildung 4 dargestellt. Dabei wurde die maximal mögliche Schwankungsbreite aller Messwerte dadurch begrenzt, dass anstelle der in den Messungen aufgezeichneten Minutenmittelwerte hier halbstündige Mittelwerte ausgewertet wurden. Auch bei den Staubmessungen handelt es sich jeweils um Halbstundenmessungen. Insgesamt wurden bei den beiden Versuchen 10 (Abnahmemessungen) bzw. 21 (Langzeitversuch) Staubmessungen durchgeführt.

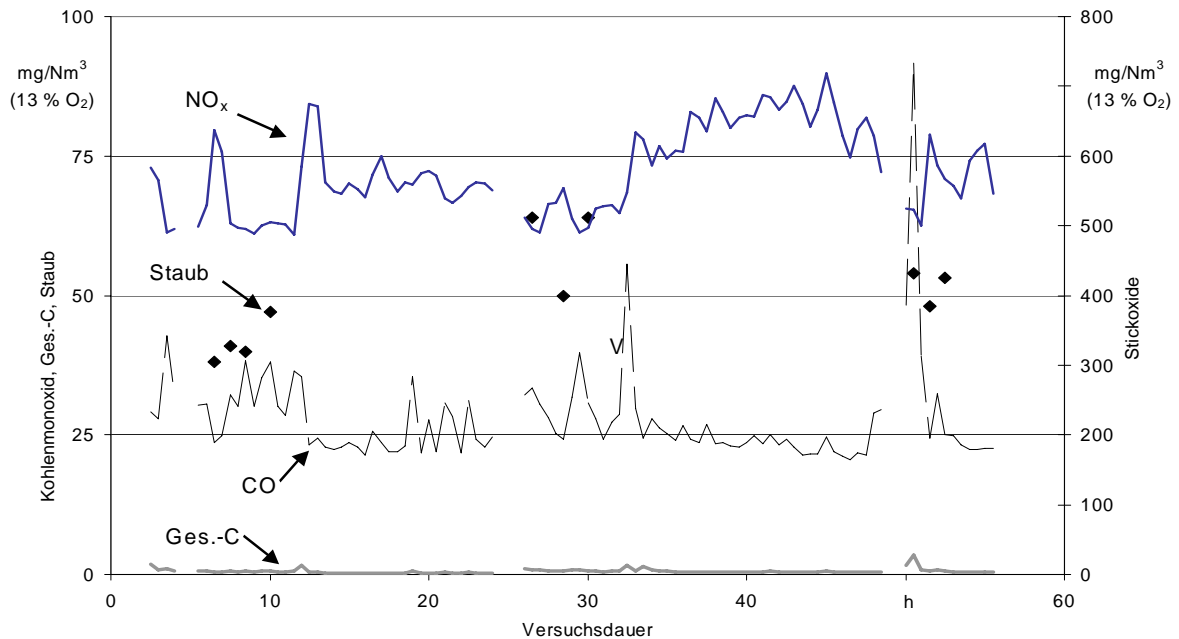
Stickstoffdioxid(NO_x)-Emission. Die Darstellung in Abbildung 4 zeigt, dass die NO_x-Emission neben den Ges.-C-Emissionen einer der konstantesten Parameter unter den dargestellten Standard-Messgrößen ist. Hier liegt der Gesamtmittelwert relativ gleichbleibend bei 531 mg/Nm³ (Abnahmemessungen) bzw. 579 mg/Nm³ (Langzeitversuch), wobei der Variationskoeffizient (d. h. die Standardabweichung der Halbstundenmittelwerte bezogen auf den Gesamtmittelwert) mit 11 bzw. 8 % vergleichsweise niedrig ist (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 6).

In beiden Versuchen lagen die Mittelwerte unterhalb des aktuell diskutierten Grenzwertes von 600 mg/Nm³, der im Rahmen der Novellierung der 1. BImSchV bei Einsatz von Getreidebrennstoffen eingeführt werden soll. Dieser Grenzwert muss jedoch ausschließlich bei der Typenprüfung im Prüfstand nachgewiesen werden, und wird nicht bei den wiederkehrenden Messungen überwacht.

Staubemission. Für eine Getreidefeuerung wurden auffallend niedrige Staubemissionen gemessen, die über beide Versuche in einer Größenordnung von 50 mg/Nm³ liegen. Im Mittel waren die Staubemissionen während der Abnahmemessungen bei 50 mg/Nm³ und während des Langzeitversuchs bei 51 mg/Nm³. Die Spannweite aller Messungen reicht von 38 bis 64 mg/Nm³ und gibt be-

reits einen ersten Hinweis auf die geringe Streuung der Werte. Dies wird durch die niedrigen Variationskoeffizienten bestätigt, die für die Abnahmemessung 17 % und für den Langzeitversuch 11 % betragen.

Betrieb während der Abnahmemessungen



Langzeitversuch

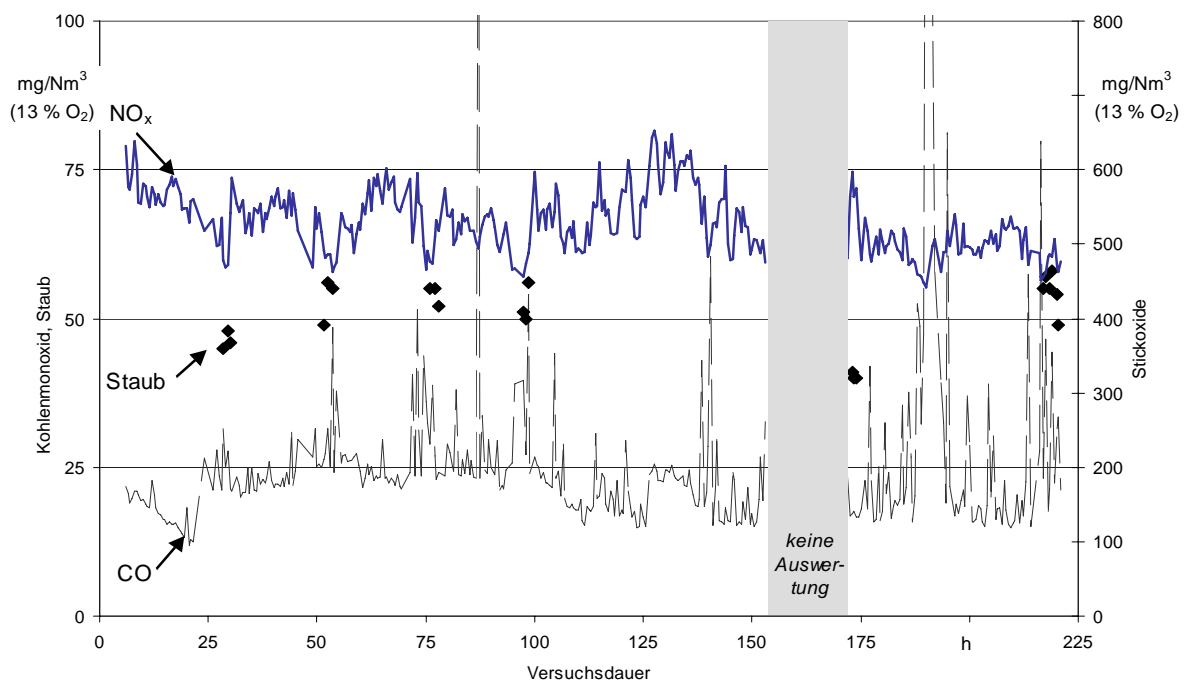


Abbildung 4: Verlauf der Schadstoffemissionen von CO, Ges.-C, NO_x und Staub während der Langzeitversuche bei Nennleistung, Brennstoff: Gerste

Weiterhin fällt positiv auf, dass über die Dauer des Langzeitversuches von über 170 h kein signifikanter Anstieg der Staubemissionen beobachtet wurde. Ein Anstieg mit zunehmender Verschmutzung des Kessels wäre hier aufgrund der Erfahrungen aus anderen Dauerversuchen zu erwarten gewesen [7]. Auch im Vergleich zu anderen Feuerungsanlagen, die laut Hersteller für Nicht-Holzbrennstoffe geeignet sind, fällt die gemessene Staubemission besonders günstig aus. Bisherige Messerfahrungen zeigen, dass deren Gesamtstaubausstoß eher in einer Größenordnung von 100 bis 200 mg/Nm³ zu erwarten ist, wobei sich dieses Niveau allerdings durch den Einsatz sekundärer Staubabscheider drastisch absenken lässt [7].

Kohlenmonoxid(CO)-Emission. Im Vergleich zu den NO_x-Werten stellen die CO-Emissionen einen wesentlich variableren Parameter dar. Hier waren immer wieder kurze sehr steile Messwertspitzen zu beobachten, die durch Unregelmäßigkeiten oder Störungen im Verbrennungsablauf hervorgerufen wurden, obgleich die eingetretenen Schwankungen hier noch auf einem ausgesprochen niedrigen Gesamtniveau lagen. Die mittlere CO-Emission wurde für die Abnahmemessungen mit 28 mg/Nm³ errechnet, beim Langzeitversuch waren es durchschnittlich 25 mg/Nm³. Der letztere Wert liegt damit noch unter dem 10-Jahres-Mittelwert aller Typenprüfergebnisse von Holzpelletkesseln mit vergleichbarer Leistung (vgl. Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen [6]). Hiermit wird der hohe technische Entwicklungsstand der Feuerung und ihrer Regelung hinsichtlich eines vollständigen Ausbrandes dokumentiert.

Gesamt-C-Emission. Diese Emissionen konnten ausschließlich während des Versuchs mit den Abnahmemessungen durchgeführt werden, da das entsprechende Messgerät beim Langzeitversuch ausgefallen war. Die Emissionen an unverbrannten Kohlenstoffverbindungen (Ges.-C) lagen während des Versuches größtenteils an der Nachweisgrenze. Während der Messung über 55 h konnten bei den Halbstundewerten lediglich Höchstwerte von 3 mg/Nm³ beobachtet werden. Die geringen Emissionen bestätigen die Aussagen zum guten Ausbrand des Abgases.

Tabelle 5: Schadstoffemissionen während der Abnahmemessungen (Dauerbetrieb über 55 h bei Nennleistung, Brennstoff Gerstenkörner)

Abgasparameter	Gesamtmittelwert (mg/Nm ³)	Spannweite (Min/Max) (mg/Nm ³)	Variationskoeffizient ^a
CO	28	21 / 92	32 %
Ges.-C	1	0 / 3	76 %
NO _x	579	486 / 718	11 %
Staub	50	38 / 64	17 %
SO ₂	257	234 / 282	3 %
HCl	66	38 / 129	22 %

^a Standardabweichung der Halbstundenmittelwerte, bezogen auf den Gesamtmittelwert

Die in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse können nicht mit den Ergebnissen des Kapitels 4.2.5 verglichen werden, da sie über einen wesentlich längeren Zeitraum gemittelt wurden. Die Werte der Tabelle 5 enthalten alle ½-h-Werte des gesamten Versuchszeitraumes mit einer Dauer von 55 h, während die Messungen der DEKRA und die parallel durchgeführten Messungen des TFZ nur 9 Einzelmessungen mit einer Dauer zwischen 23 und 54 Minuten umfassen (s.a. Tabelle 8). Insbesondere hinsichtlich der NO_x-Konzentration ergeben sich deutliche Unterschiede, da im Mittel über den Langzeitversuch ein Wert von 579 mg/Nm³ bestimmt wurde, während der Mittelwert der Einzelmessungen lediglich bei 504 mg/Nm³ (DEKRA) bzw. 522 mg/Nm³ (TFZ) lag (Abbildung 10). In Abbildung 4 oben ist der Verlauf der NO_x-Emissionen für den Langzeitversuch im Rahmen der DEKRA-Messungen dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die NO_x-Werte stark schwanken und dass es im Zeitraum zwischen Stunde 32 und 48 eine Phase sehr hoher NO_x-Werte gab. Dieser Zeitraum geht in den Mittelwert der Tabelle 5 ein, wurde jedoch nicht durch die Einzelmessungen erfasst, die in Kapitel 4.2.5 beschrieben werden, da er größtenteils in der Nacht zwischen 30. und 31.10. lag. Somit liegt die Begründung für die deutlichen Unterschiede der Mittelwerte in den unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen bei der Mittelwertbildung.

Tabelle 6: Schadstoffemissionen während des Langzeitversuches (Dauerbetrieb über 173 h bei Nennleistung, Brennstoff Gerstenkörner)

Abgasparameter	Gesamtmittelwert (mg/Nm ³)	Spannweite (Min/Max) (mg/Nm ³)	Variationskoeffizient ^a
CO	25	12 / 182	58 %
NO _x	531	443 / 652	8 %
Staub	51	40 / 58	11 %

^a Standardabweichung der Halbstundenmittelwerte, bezogen auf den Gesamtmittelwert

4.2.2 Weitere Schadstoffe (HCl, SO₂)

Die beiden Parameter HCl und SO₂ konnten aufgrund der zur Verfügung stehenden Messausrüstung lediglich während des Betriebs für die Abnahmemessungen bestimmt werden. Da beide Parameter aber wesentlich durch die entsprechenden Elementgehalte im Brennstoff bestimmt werden, ist davon auszugehen, dass auch im Langzeitversuch Emissionen in annähernd gleicher Größenordnung gemessen worden wären.

Bei den Emissionen von sonstigen Schadstoffen (HCl, SO₂) ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Während der SO₂-Messwert sehr konstant bleibt (Mittelwert: 257 mg/Nm³; Variationskoeffizient: 3 %), zeigen die Messwerte für die HCl-Emissionen deutlichere Schwankungen (Abbildung 5). Bei einem Mittelwert von 66 mg/Nm³ wurde hier ein Variationskoeffizient von 22 % berechnet (Tabelle 5).

Die Unterbrechungen der Messreihen, die in Abbildung 5 zu erkennen sind, werden durch die bewusste Ausblendung der hier gemessenen Werte verursacht. Durch den Wechsel des Filters der Gasprobenahmesonde, der die Gasanalysegeräte vor Schäden durch Partikeleintrag schützt,

kommt es bei Langzeitversuchen regelmäßig zu einem deutlichen Abfall der HCl- und SO₂-Emissionen. Mit dem Einbau eines "frischen" Filters (Filtermaterial: gestopfte Quarzwatte) kommt es offenbar zu einer selektiven HCl-Adsorption in der Anfangsphase der anschließenden Messung, in der das Filtermedium zuvor noch nicht in Kontakt mit dem Abgas war. Diese „Fehl-messungen“ aufgrund der Anlagerung von HCl an das Filtermaterial wurden in der Auswertung und der grafischen Darstellung ausgeblendet.

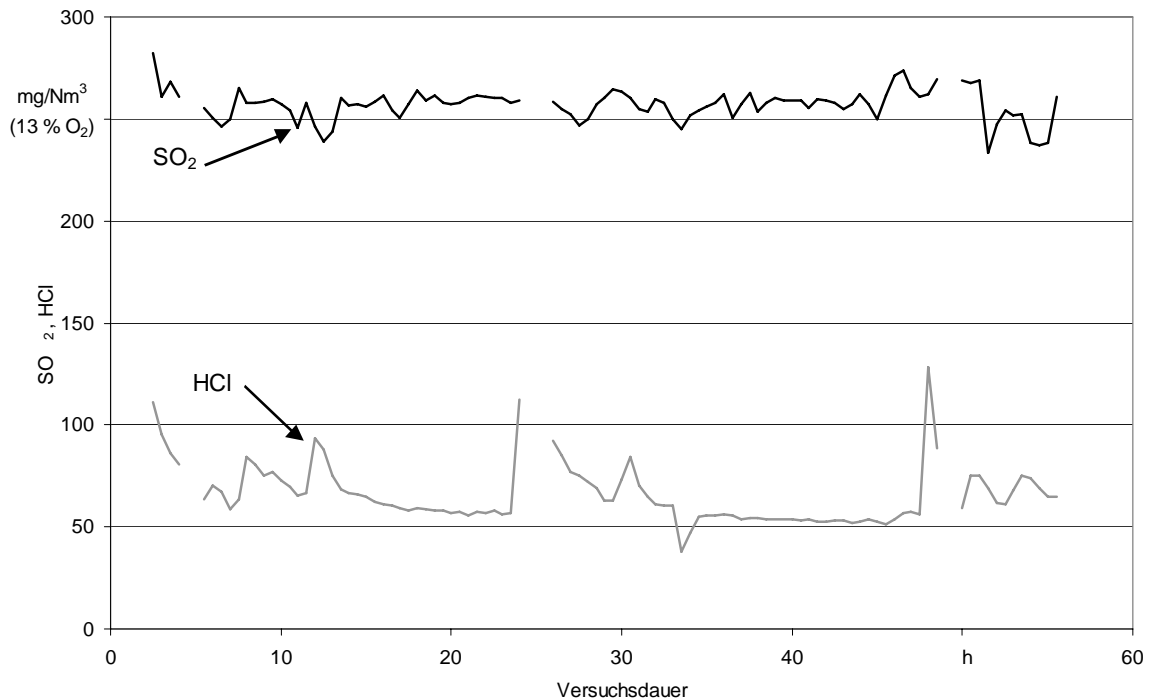


Abbildung 5: Verlauf der Schadstoffemissionen Schwefeldioxid (SO₂) und Chlorwasserstoff (HCl) während der Abnahmemessungen

4.2.3 Abgastemperatur und Kesselleistung

Die Abgastemperatur stellt eine wesentliche Bestimmungsgröße für die Wärmeverluste des Kessels und damit für dessen Wirkungsgrad dar. Innerhalb der gesamten Wärmeverluste des Kessels wird der weitaus größte Anteil durch die fühlbare Wärme im Abgas verursacht. Zu deren Minimierung wird daher neben der Minimierung des Abgasvolumenstromes durch einen geringen Luftüberschuss ein möglichst niedriges Temperaturniveau im Abgas angestrebt. Allerdings können niedrige Abgastemperaturen auch zu lokalen Taupunktunterschreitungen im Kessel oder im weiteren Abgasweg führen. Wenn das Kessel- und Kaminsystem nicht auf derartige Kondensationseffekte ausgelegt ist, kann es durch die aggressiven, sauren Kondensate zu Korrosionsschäden an der Anlage kommen. Das gilt umso mehr, wenn Brennstoffe mit mehr oder weniger hohen Schwefel- und Chlorgehalten verwendet werden, da bei der Verbrennung sowohl HCl als auch SO₂ entstehen und in wässriger Lösung Säuren bilden. Zudem wirken die HCl- und vor allem SO₂-Abgasbestandteile taupunkterhöhend. Das bedeutet, dass eine Kondensation schon im weniger stark abgekühlten Abgas eintritt und somit das Korrosionsrisiko zusätzlich ansteigt. Aus diesem Grund werden Feuerungen mit Nicht-Holzbrennstoffen aus Sicherheitsgründen häufig mit einer höheren Abgastemperatur als bei Holzbrennstoffen betrieben, wobei die Einbußen beim Wir-

kungsgrad hierbei zu Gunsten einer längeren Anlagenlebensdauer in Kauf genommen werden müssen.

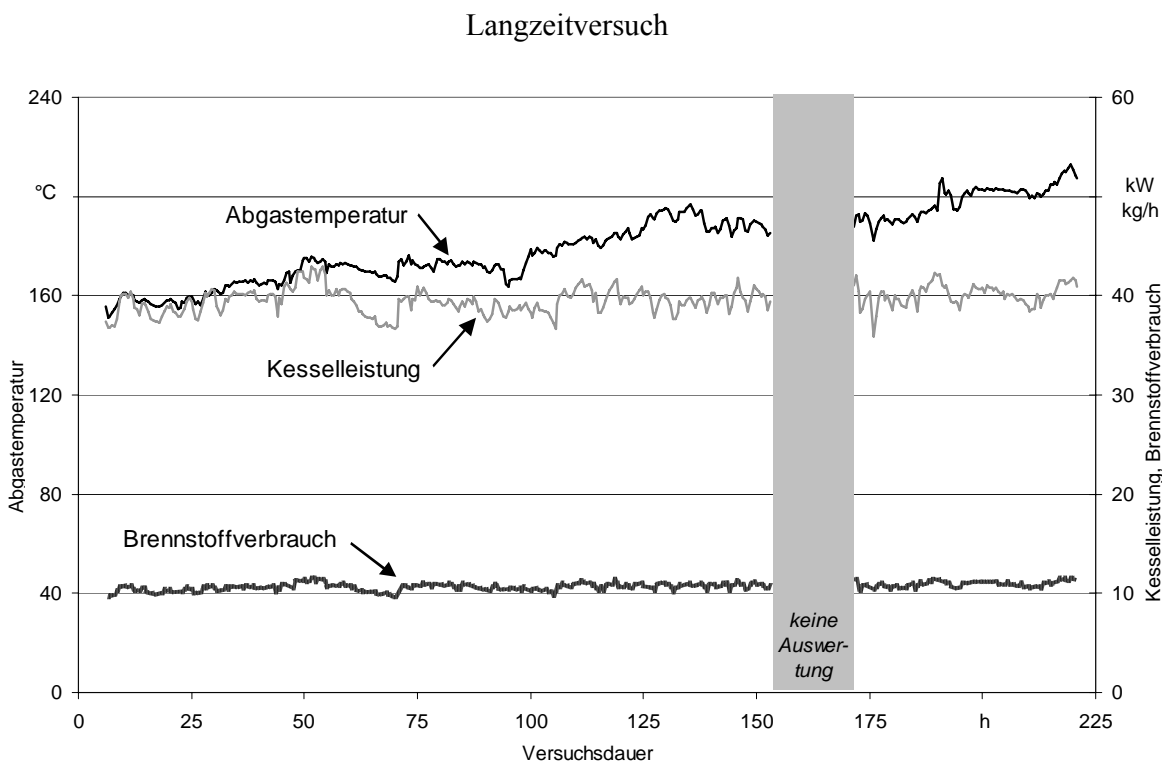
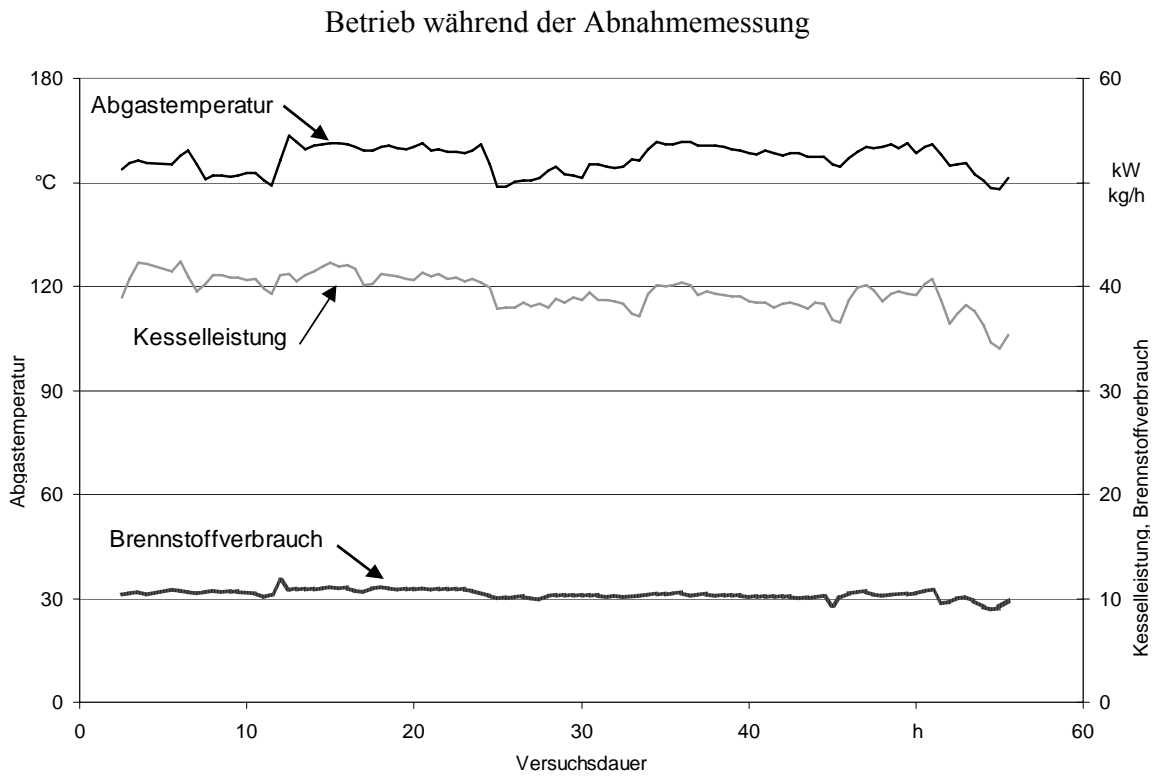


Abbildung 6: Verlauf von Kesselleistung, Brennstoffverbrauch und Abgastemperatur während der beiden Langzeitversuche

Inwieweit diese Zusammenhänge auch bei der hier untersuchten Feuerung berücksichtigt worden waren, ist offen. Allerdings zeigt sich in den Langzeitversuchen, dass die mittlere Abgastemperatur mit über 160 °C deutlich über üblichen Werten für moderne Pelletfeuerungen liegt. Insbesondere beim zweiten Langzeitversuch (Abbildung 6, unten) ist auch ein kontinuierlicher Anstieg der Abgastemperatur über den gesamten Versuchszeitraum zu beobachten. Dieser Anstieg betrug ca. 5 Kelvin pro Tag und ist auf die zunehmende Verschmutzung von Wärmeübertragungsflächen während des Versuchszeitraumes zurückzuführen.

Die Kesselleistung war mit ca. 40 kW während beider Versuche relativ konstant und wies nur geringe Schwankungen auf.

4.2.4 Ergebnisse der Abnahmemessungen (durchgeführt von der DEKRA)

Zusätzlich zu den Messungen durch das TFZ wurden entsprechend den Vorgaben des Arbeitsplans Emissionsmessungen durch eine gemäß § 26 BImSchG zugelassene Messstelle durchgeführt. Mit diesen Arbeiten wurde die DEKRA Stuttgart beauftragt, welche die Messungen am 29., 30. und 31. Oktober 2007 durchführte. Zusätzlich zu den Standardmessgrößen wie CO, NO_x und Staub wurden auch die Emissionen an Schwermetallen sowie an weiteren organischen und anorganischen Schadstoffen bestimmt. Insgesamt wurden durch die DEKRA folgende Parameter bestimmt:

- Staub
- CO
- NO_x
- Ges.-C
- Cd + Tl
- \sum Sb, As, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, V, Sn
- \sum As, BaP, Cd, Co, Cr
- HCl
- HF
- Hg
- PCDD / PCDF

Der vollständige Abdruck des Messberichtes der DEKRA ist im Anhang enthalten, so dass im Folgenden lediglich die wesentlichen Ergebnisse zusammenfassend dargestellt und verglichen werden. Tabelle 7 enthält die Messergebnisse der DEKRA.

Tabelle 7: Durch die DEKRA bestimmte Schadstoffemissionen während der Abnahmemessungen (Alle Werte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (Nm³) und einem Sauerstoffgehalt von 13 %)

Parameter	Mittelwert	Spannweite bzw. Maximalwert	n
Staub	54 mg/m ³	41 - 68 mg/Nm ³	9
CO	36 mg/m ³	30 - 46 mg/Nm ³	9
NO _x	504 mg/m ³	466 - 577 mg/Nm ³	9
Ges.-C	< 2,6 mg/m ³	< 2,8 mg/Nm ³	9
Cd + Tl	0,003 mg/m ³	0,003 mg/Nm ³	9
∑ Sb, As, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, V, Sn	0,061 mg/m ³	0,080 mg/Nm ³	9
∑ As, BaP, Cd, Co, Cr	0,015 mg/m ³	0,020 mg/Nm ³	9
HCl	64 mg/m ³	51 - 81 mg/Nm ³	9
HF	14 µg/m ³	8 - 24 µg/Nm ³	9
Hg	< 0,4 µg/m ³	< 0,07 - 1,8 µg/Nm ³	9
PCDD / PCDF	0,01 ng/m ³	0,01 ng/Nm ³	3

Die Ergebnisse der Abnahmemessungen bestätigen damit im wesentlichen die Messergebnisse des TFZ. Insbesondere für die Parameter Staub, CO, NO_x und Ges.-C ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Messwerte. Eine ausführliche Gegenüberstellung der Messwerte erfolgt in Kapitel 4.2.5.

Bezüglich der Messwerte zu den Schwermetallen und den anderen Schadstoffen existieren für Anlagen kleiner Leistung oder für den Einsatz naturbelassener Brennstoffe keine Grenzwerte. Als Orientierungswerte für die Beurteilung können hier allenfalls die Grenzwerte der TA Luft oder der 17. BImSchV herangezogen werden, die jedoch für Anlagen mit deutlich höherer Leistung bzw. für Abfallverbrennungsanlagen gelten. Zur Beurteilung der Werte für die Schwermetalle können die Grenzwerte der 17. BImSchV (angegeben mit einem Bezugssauerstoffgehalt von 11 %) verwendet werden:

- Cd + Tl: 0,05 mg/Nm³
- ∑ Sb, As, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, V, Sn: 0,5 mg/Nm³
- ∑ As, BaP, Cd, Co, Cr: 0,05mg/Nm³
- Hg: 30 µg/Nm³

Diese Grenzwerte werden von der hier untersuchten Feuerung beim Einsatz von Getreide als Brennstoff deutlich unterschritten. Die Emissionen der Getreidefeuerung liegen oft nur bei 1/10 der Grenzwerte oder darunter.

Zur Beurteilung der HCl- und HF-Emissionen können neben den Grenzwerten der 17. BImSchV (20 bzw. 1 mg/Nm³) auch die Grenzwerte der TA Luft berücksichtigt werden, die unter Ziffer 5.2.4 der TA Luft als allgemeine Grenzwerte für anorganische Verbindungen genannt werden. Für HF werden hier 3 mg/Nm³ und für HCl 30 mg/Nm³ zugelassen. Dabei ist jedoch zu berücksichti-

gen, dass diese Werte erst für wesentlich größere Anlagen gelten, die einen HCl-Massenstrom von über 150 g/h emittieren, während die hier untersuchte Getreidefeuerung lediglich einen Massenstrom von 11 g/h verursacht.

4.2.5 Vergleich der Messergebnisse von DEKRA und TFZ

Während der Abnahmemessungen der DEKRA wurden parallel Messungen durch das TFZ durchgeführt. Insgesamt erfolgten 9 Parallelmessungen, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden. In Tabelle 8 sind die Anfangs- und Endzeiten der 9 Parallelmessungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es nicht in allen Fällen gelungen ist, die Messungen vollkommen zeitgleich durchzuführen. Die Unterschiede in der Startzeit können durch Probleme bei der Abstimmung oder durch technische Probleme beim Start der Staubmesseinrichtung verursacht worden sein. Die unterschiedliche Versuchsdauer wurde meist durch die unterschiedlichen Standzeiten der Filtermedien bei der Staubmessung verursacht. Sobald der Unterdruck aufgrund der zunehmenden Beladung des Filtermediums einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, muss die Messung abgebrochen werden, um eine Schädigung des Filtermediums zu verhindern. Da die Messungen an einer automatisch beschickten Anlage mit sehr stabilem Betriebsverhalten (s.a. Abbildung 4, Abbildung 7 und Abbildung 8) erfolgten, sind die Einflüsse durch den geringen zeitlichen Versatz der Messungen jedoch nicht so gravierend.

Tabelle 8: Versuchszeiten der von DEKRA und TFZ parallel durchgeführten Messungen

Versuch-Nr.	Datum	Messung DEKRA			Messung TFZ		
		Beginn	Ende	Dauer	Beginn	Ende	Dauer
1	29.10.	14:37	15:39	52 min	14:37	15:21	44 min
2	29.10.	16:00	16:53	53 min	15:56	16:50	54 min
3	29.10.	17:57	18:42	45 min	17:18	18:07	49 min
4	30.10.	10:00	10:30	30 min	9:59	10:26	27 min
5	30.10.	11:30	12:20	50 min	11:32	12:19	47 min
6	30.10.	13:25	14:05	40 min	13:26	13:49	23 min
7	31.10.	9:45	10:15	30 min	9:52	10:15	23 min
8	31.10.	10:40	11:25	45 min	10:39	11:24	45 min
9	31.10.	11:45	12:30	45 min	11:49	12:21	32 min

In Abbildung 7 und Abbildung 8 wird jeweils ein Ausschnitt der Messwerte vom 31.10.2007 gegenübergestellt. Hierfür wurden die in der jeweiligen Datenaufzeichnung registrierten Daten ohne weitere Umrechnungen direkt verwendet. Die Messwerte der einzelnen Messgeräte wurden bei beiden Aufzeichnungsgeräten als Minutenmittelwerte gespeichert.

Aus der Darstellung in Abbildung 7 ist zu erkennen, dass die beiden Messungen für CO₂ sehr gut miteinander übereinstimmen während das O₂-Messgerät des TFZ im Mittel eine um ca. 0,7

Vol.-% höhere O_2 -Konzentration ausgibt. Diese Abweichung ist aufgrund der guten Übereinstimmung der CO_2 -Messung nicht zu erklären. Denn ein durch eine Undichtigkeit und den damit verbundenen Lufteintritt möglicherweise verursachte Erhöhung der O_2 -Konzentration müsste gleichzeitig auch zu einer entsprechenden Verringerung der CO_2 -Konzentration führen. Für eine der beiden Messungen ist somit ein fehlerhafter Betrieb festzustellen. Bei vollständiger Ausschöpfung der maximalen Fehlergrenzen aller 4 Geräte und der Unterstellung eines gewissen Falschlufteintrittes wären die Abweichung sogar erklärbar. Die geringfügige Verschiebung der beiden Kurven in Richtung der X-Achse, die besonders deutlich an den einzelnen Peaks erkennbar ist, wird durch die unterschiedliche Anordnung der Messöffnungen sowie durch Unterschiede in der Länge der Messgasleitung verursacht.

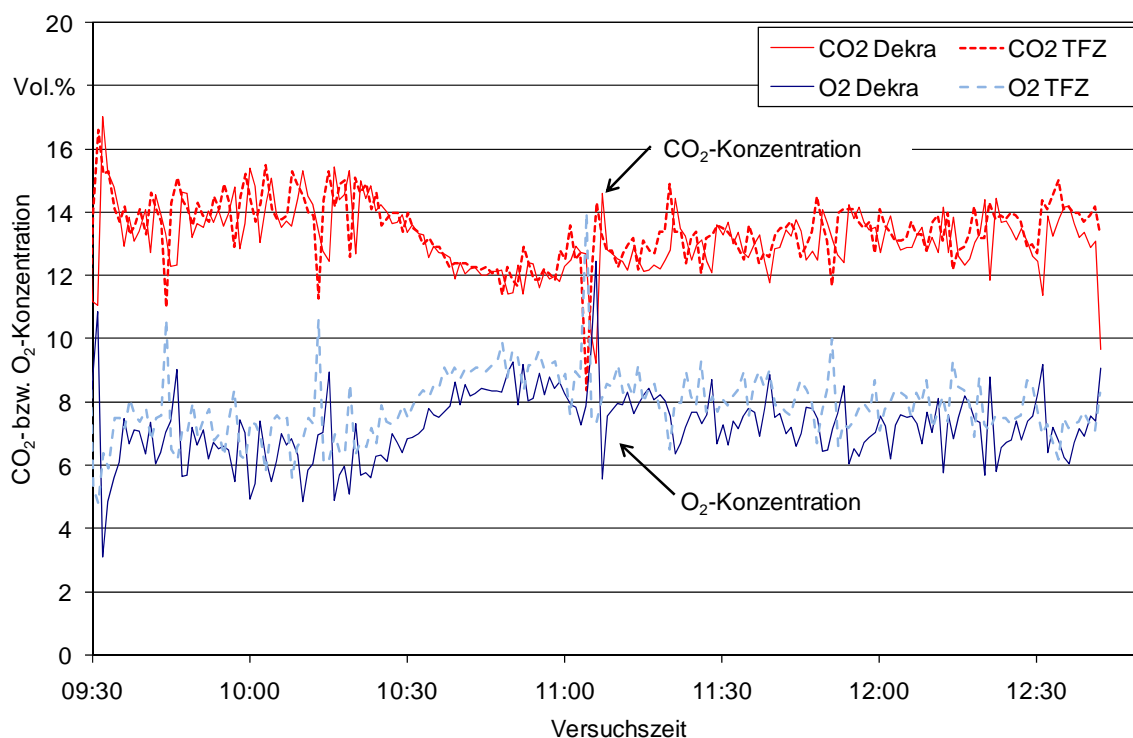


Abbildung 7: Verlauf von CO_2 - und O_2 -Konzentration während einer Parallelmessung

In Abbildung 8 sind die Konzentrationen des CO - und des NO_x -Gehaltes im Abgas der Getreidefeuerung gegenübergestellt. Bei diesem Vergleich ist zu erkennen, dass die NO_x -Messwerte sehr gut übereinstimmen, während die CO -Messwerte des TFZ im Mittel ca. 10 ppm niedriger sind. Diese Differenz sollte jedoch nicht überbewertet werden, da die Messunsicherheit der Messgeräte bei der Messung einem solch geringen Konzentrationsbereich relativ einen größeren Einfluss hat. Eine Differenz von 10 ppm liegt mit großer Wahrscheinlichkeit in der Größenordnung der Summe der Messunsicherheiten beider Messegeräte.

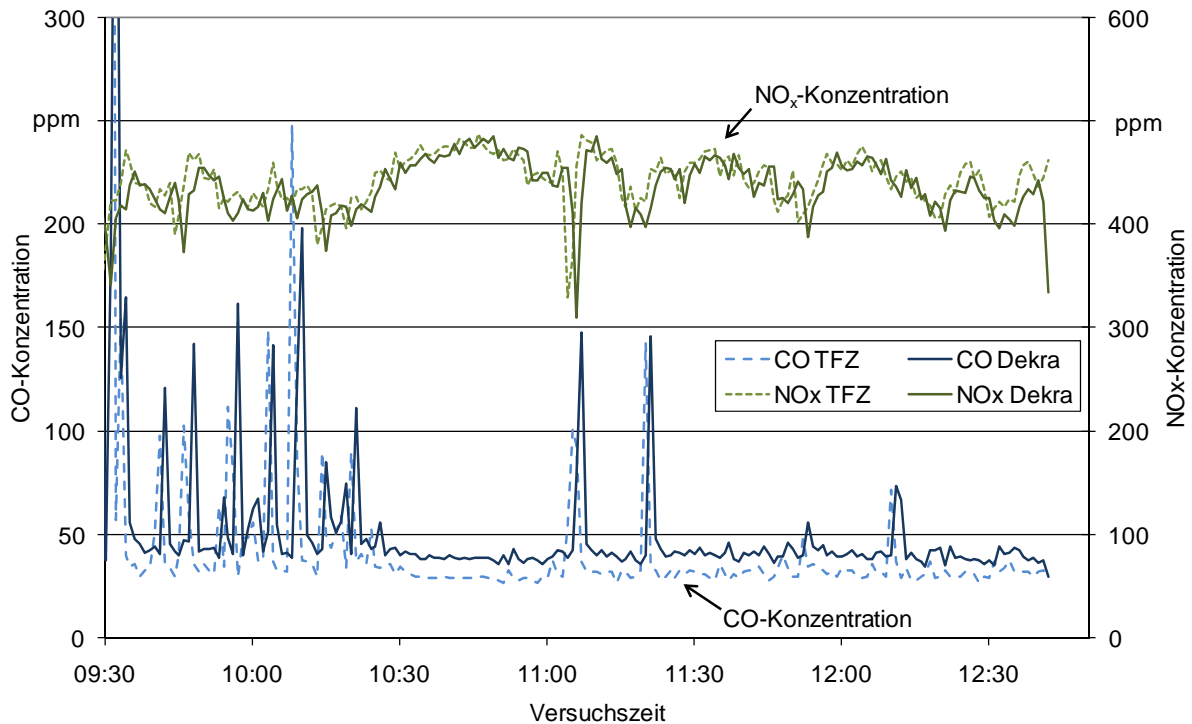


Abbildung 8: Verlauf von NO_x - und CO-Konzentration während einer Parallelmessung

Zusätzlich zu diesen Verläufen wurden auch die Mittelwerte über die 9 in Tabelle 8 beschriebenen Messungen gegenübergestellt. Abbildung 9 zeigt diese Darstellung für die Konzentrationen an O_2 , CO_2 und H_2O , während Abbildung 10 eine Darstellung der Massenkonzentrationen von Staub, CO und NO_x enthält.

Die größten Abweichungen ergeben sich in Abbildung 9 beim Vergleich des Wassergehaltes im Abgas. Hier wurden durch das TFZ im Mittel um 3,2 Vol.-% höhere Wassergehalte bestimmt als bei der DEKRA. Die Ursache hierfür könnte in der eingesetzten Messtechnik zu suchen sein, da dieser Parameter beim TFZ mit dem FTIR kontinuierlich bestimmt wird, während die DEKRA den Wassergehalt diskontinuierlich mit Trockenröhrchen bestimmt hat. Diese Differenz hat jedoch nur geringen Einfluss auf die anderen Messergebnisse, da der Wassergehalt des Abgases lediglich für die Umrechnung des Ges.-C-Gehaltes verwendet wird. Da beide Partner nur sehr geringe Ges.-C-Gehalte gemessen haben, die in der Größenordnung der Nachweisgrenze liegen, hat ein Fehler in der Wassergehaltsbestimmung keine signifikanten Auswirkungen.

Bei den CO_2 - und O_2 -Konzentrationen ergibt sich ein uneinheitlicheres Bild. Hier ist jeweils ein Wechsel zwischen sehr guter Übereinstimmung (Versuche 1, 2 und 3 bei O_2 bzw. Versuche 4, 5 und 9 bei CO_2) und größeren Differenzen zu beobachten. Da die CO_2 -Werte üblicherweise nicht zur weiteren Auswertung verwendet werden, weil die Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt mit den O_2 -Werten erfolgt, haben die Abweichungen bei diesem Parameter keinen Einfluss auf die übrigen Ergebnisse.

Die maximale Abweichung der O_2 -Gehalte liegt auch bei dieser Auswertung in der Größenordnung von 0,7 Vol.-%, wobei diese Abweichung nicht bei allen Messungen zu beobachten ist, so

dass sich insgesamt eine mittlere Abweichung von 0,4 Vol.-% ergibt. Die möglichen Ursachen wurden bereits bei der Diskussion zu Abbildung 7 erörtert.

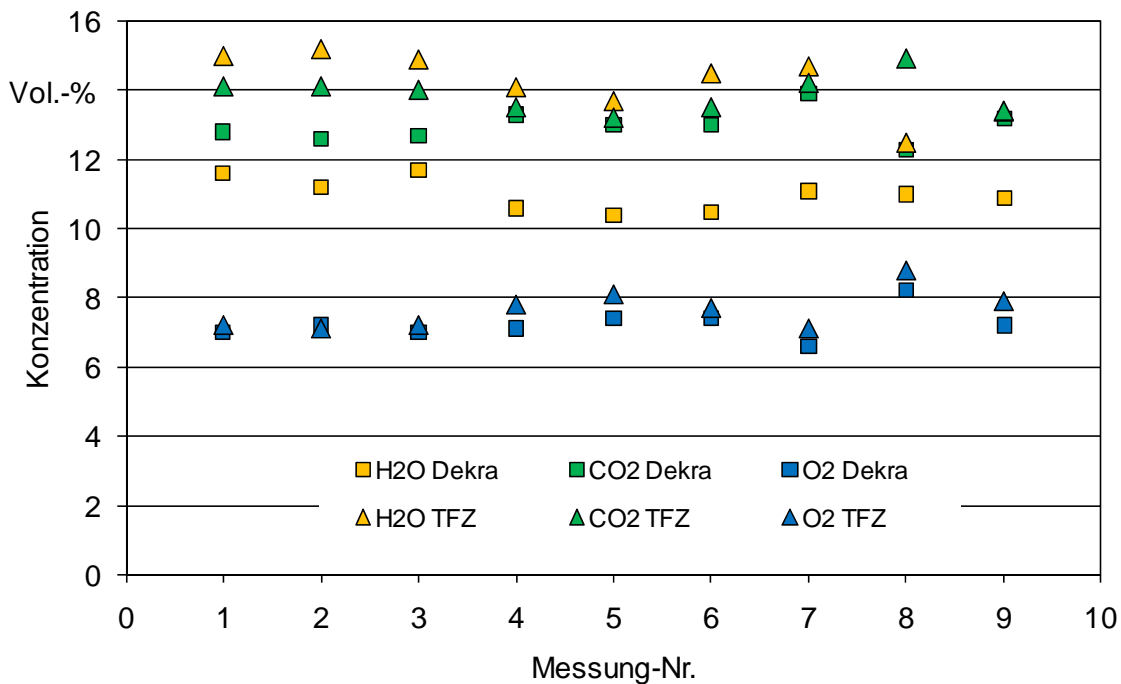


Abbildung 9: Gegenüberstellung der O_2 -, CO_2 - und H_2O -Messwerte bei den 9 Parallelmessungen

In Abbildung 10 sind die Massenkonzentrationen für die Staub-, CO - und NO_x -Emissionen bei den 9 Messungen entsprechend Tabelle 8 gegenübergestellt. Bis auf eine Ausnahme (Messung 2 mit einer Differenz von 13 mg/Nm^3) ergeben sich bei den Staubmessungen Differenzen zwischen 0 und 5 mg/Nm^3 (Mittelwert der Abweichungsbeträge: 3 mg/Nm^3). Der Mittelwert aller Messungen lag mit 51 mg/Nm^3 beim um 3 mg/Nm^3 niedriger als der Mittelwert der DEKRA-Messungen. Dieses Ergebnis ist als sehr gute Übereinstimmung einzuordnen, da diese Differenz deutlich kleiner ist als die Messunsicherheit bei der Staubmessung, die von der DEKRA mit 8 mg/Nm^3 angegeben wird und die auch beim TFZ in dieser Größenordnung liegt.

Auch bei Betrachtung der CO -Emissionen wird für die Messung 2 mit 7 mg/Nm^3 die größte Abweichung ermittelt. Die Differenzen der übrigen Messungen liegen zwischen 2 und 5 mg/Nm^3 und sind damit auch als gering anzusehen, da sich hier die Messgerätefehler wegen der niedrigen Konzentrationen proportional stärker auswirken. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass hier die auf 13 % Sauerstoffkonzentration bezogenen Werte verglichen werden, so dass sich auch die Abweichungen bei der O_2 -Messung auf das Ergebnis der CO -Messung ausgewirkt haben. Der Mittelwert aller Messungen lag mit 33 mg/Nm^3 beim TFZ um 3 mg/Nm^3 niedriger als der Mittelwert der Messungen der DEKRA.

Die größten Abweichungen mit Differenzen von 4 bis 38 mg/Nm^3 wurden bei den NO_x -Konzentrationen festgestellt. Der Mittelwert der Abweichungsbeträge lag hier bei 22 mg/Nm^3 . Er liegt damit auch in der Größenordnung der Summe der Messunsicherheiten für die jeweiligen Messgeräte von DEKRA und TFZ. Auch die relative Abweichung, bezogen auf die mittlere Emis-

sion von ca. 500 mg/Nm^3 , ist mit gut 4 % noch als akzeptabel einzuordnen. Der Mittelwert aller Messwerte lag mit 522 mg/Nm^3 um 18 mg/Nm^3 höher als der Mittelwert der DEKRA-Messungen.

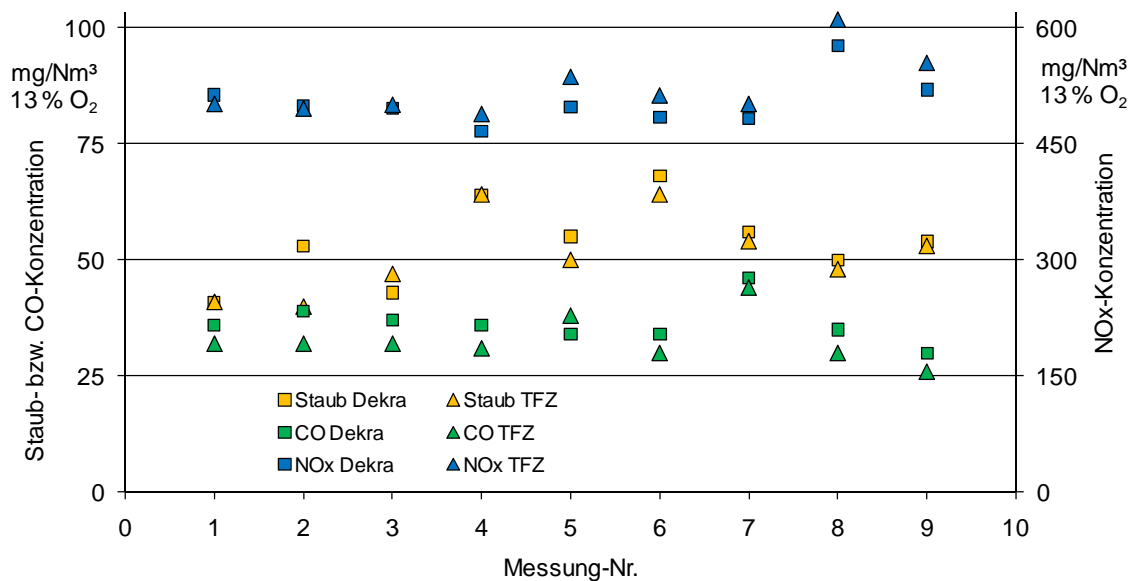


Abbildung 10: Gegenüberstellung der CO- und NO_x-Messwerte bei den 9 Parallelmessungen

4.2.6 Untersuchungen zum Ascheausbrand

Zur Bestimmung der Ausbrandqualität wurden aus der Asche, die während der beiden Langzeitversuche anfiel, Proben entnommen und hinsichtlich ihres Aschgehaltes analysiert. In den Proben wurde der Glührückstand als Maß für die Qualität des Ausbrandes ermittelt. Die Bestimmung erfolgte entsprechend den Vorgaben der prCEN/TS 14775. Der Glührückstand beschreibt den Anteil der Asche im gesamten Ascherückstand. Der zu 100 % fehlende Anteil entspricht dem Glühverlust oder dem Anteil Unverbranntem in der Asche. Für den Versuch während der DEKRA-Messungen wurde ein Glührückstand von 75,1 % oder ein Glühverlust von 24,9 % ermittelt. Während des Langzeitversuchs wurde ein besserer Ausbrand erzielt, da hier ein Glührückstand von 86,5 % bzw. ein Glühverlust von 13,5 % gemessen wurde.

Reine Asche ohne Anteile von Unverbranntem hat einen Glührückstand von 100 % und ist damit ein Indikator für den vollständigen Ausbrand des eingesetzten Brennstoffes. Dieser ideale Betriebsfall wurde in beiden Versuchen nicht erreicht. Die hier bestimmten Werte von 75,1 bzw. 86,5 % Glührückstand sind jedoch positiv zu bewerten, da mit anderen Getreidefeuerungen beim Einsatz von Gerste als Brennstoff Werte zwischen 42 und 57 % ermittelt wurden [7]. Verglichen mit den Werten, die mit modernen Holzfeuerungen erzielt werden, sind die hier bestimmten Werte für den Glührückstand bei der Verwendung von Gerste als Brennstoff noch zu gering und zeigen, dass hier noch ein gewisses Optimierungspotenzial für die Feuerungskonstruktion besteht. Der Glührückstand hat neben seinem Einfluss auf die Aschequalität auch eine besondere Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs, da er in nicht unerheblichem Maße in den Wirkungsgrad der Kesselanlage eingeht. So bewirkt beispielsweise eine Verbesserung des Ausbrandes und die damit verbundene Erhöhung des Glührückstandes in der Asche 80 auf 95 % eine Verbesserung des Wirkungsgrades um 1,7 Prozentpunkte.

4.3 Betriebserfahrungen

Der Betrieb über einen längeren Zeitraum unter intensiver Beobachtung sollte neben den Ergebnissen messbarer Größen (Emissionen, Wärmeleistung, Wirkungsgrad) auch Informationen über mögliche Optimierungsmaßnahmen liefern. Im Folgenden werden daher die Betriebserfahrungen aus den beiden Langzeitversuchen beschrieben. Dabei werden zunächst die Erfahrungen aus dem Betrieb der Anlage betrachtet und daran anschließend werden die Beobachtungen beim Zerlegen der Anlage nach dem Langzeitversuch geschildert. Zum Verständnis der nachfolgenden Aussagen soll zunächst noch einmal die Funktionsweise der Anlage erläutert werden. In Abbildung 11 ist der Aufbau der untersuchten Feuerung schematisch dargestellt. Der Brennstoff gelangt über die Stokerschnecke in eine Brennmulde, in der er durch ein rotierendes Bewegungselement kontinuierlich aufgelockert und langsam nach Außen an den Rand der Brennmulde transportiert wird. Hierbei erfolgt der Ausbrand des Brennstoffes jedoch nur teilweise. Der unvollständig ausgebrannte Restkoks fällt über den Rand der Brennmulde in eine Nachverbrennungszone, in der nun der vollständige Ausbrand erfolgt. Aus dieser Nachverbrennungszone erfolgt eine automatische Entaschung. Zusätzlich ist eine automatische Staubaustragung aus dem Bereich unterhalb des Wärmetauschers vorgesehen, die jedoch aufgrund der hohen Störanfälligkeit vom IVD außer Betrieb genommen wurde. Durch das TFZ wurde diese Staubaustragung soweit überarbeitet, dass während der beiden Langzeitversuche ein manueller Betrieb über eine Kurbel möglich war.

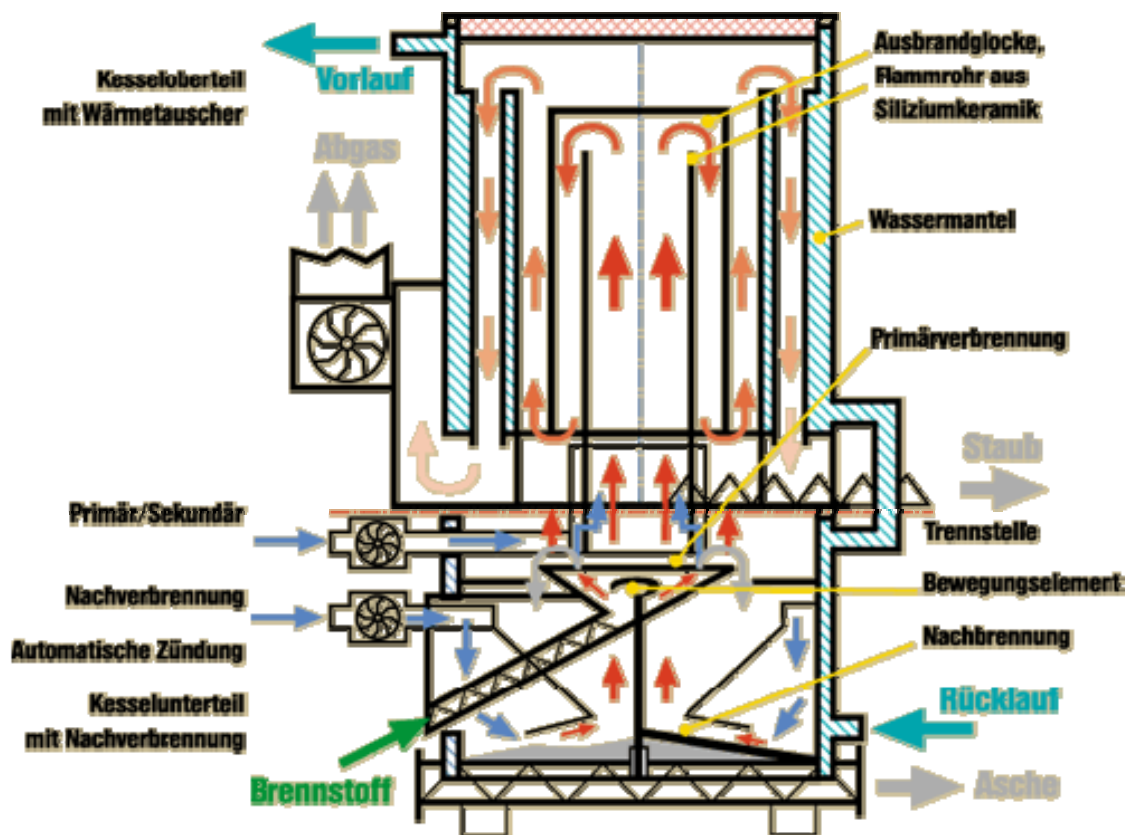


Abbildung 11: Schematische Darstellung der untersuchten Feuerung Agro 40 des Herstellers Agrofamm

Die ursprünglich vom Hersteller vorgesehene automatische Zündung funktionierte beim Betrieb mit Getreide nur unzureichend. Die Anlage musste deshalb manuell gezündet werden, wobei darauf zu achten war, dass auch das untere Glutbett zum Ausbrand des Restkokes zuverlässig gezündet wurde. Dieses untere Glutbett trägt maßgeblich zur Kesselleistung bei und die Nennleistung der Anlage (40 kW) kann nur bei ausreichender Ausbildung des unteren Glutbettes erreicht werden. Dies wird auch aus der Darstellung in Abbildung 11 deutlich, sie zeigt, dass auch die Nachverbrennungszone von wasserdurchströmten Kesselteilen umgeben ist. Die Zündung erfolgte mit einem trockenen zündwilligen Hilfsbrennstoff (Holzhackschnitzel), der sowohl in der oberen Brennmulde als auch in der Nachverbrennung gezündet wurde und dort die Ausbildung eines Glutbettes unterstützte.

Nach Abschluss der Langzeitversuche wurde die Feuerung geöffnet und hinsichtlich Verunreinigungen, Ablagerungen und sonstiger Veränderungen untersucht. Nach dem Öffnen der oberen Umlenkammer, die der Umlenkung der heißen Abgase in den äußeren Wassermantel des Wärmetauschers dient, waren erhebliche Staubablagerungen auf der oberen Abdeckung der Ausbrandglocke zu erkennen. Abbildung 12 zeigt die Ablagerungen, die eine Schichtstärke von 5 bis 7 cm erreichten.



Abbildung 12: Staubablagerungen auf der Abdeckung der Ausbrandglocke

Die Unterseite des Deckels war mit einem weißen, kristallinen Staubbelag bedeckt. Dieser auffallend weiße Staub war auch an anderen Stellen der Feuerung zu finden und ist auch in Abbildung 12 im rechten Bild in den unteren Schichten der Staubablagerung zu sehen. Abbildung 13 zeigt eine Aufnahme des Deckels, wobei zu beachten ist, dass die dort erkennbaren Risse in der keramischen Auskleidung des Deckels schon vor den Versuchen am TFZ bestanden und nicht durch die Langzeitversuche verursacht wurden.



Abbildung 13: Deckel der Feuerung mit Staubablagerungen

Auch in den beiden Zylindern aus Siliziumkeramik, die die Umlenkammern bilden, waren deutliche Staubablagerungen zu erkennen (Abbildung 14). Die Ablagerungen im äußeren Zylinder erreichten eine Schichtdicke von ca. 3 cm (Abbildung 14 rechts). Auch bei diesen Ablagerungen waren wieder die auffallend weißen Stäube zu beobachten.



Abbildung 14: Staubablagerungen in den Umlenkammern

Die in Abbildung 14 auch erkennbaren Staubablagerungen auf der inneren Wand des Wärmetauschers sind wahrscheinlich die Ursache für die im Verlauf des Versuches steigende Abgastemperatur. Durch die isolierende Staubschicht erfolgt an der Innenfläche des zylindrischen Wärmetauschers ein schlechterer Wärmeübergang, der zu höheren Abgastemperaturen und damit zu einem schlechteren Wirkungsgrad führt. Bei einem Anstieg der Abgastemperatur um ca. 20 % wird üblicherweise eine manuelle Reinigung des Kessels bzw. des Wärmetauschers empfohlen. Diese Schwelle wurde im zweiten Langzeitversuch überschritten und die Beobachtungen nach dem Öffnen des Kessels bestätigen diesen Schwellenwert, denn eine manuelle Reinigung des Kessels ist bei den vorgefundenen Staubablagerungen durchaus gerechtfertigt.

Unter der Annahme, dass ein Kessel in der Praxis auch bei höchstem Wärmebedarf lediglich 50 % der Zeit mit Nennleistung betrieben wird, wäre im Praxisbetrieb eine Reinigung nach ca. 2 Wochen erforderlich, da nach den im Langzeitversuch gemachten Erfahrungen in diesem Zeitraum mit einer Erhöhung der Abgastemperatur um ca. 20 % gerechnet werden kann. Dieser Zeitraum kann jedoch als deutlich zu kurz angesehen werden, so dass eine solche Wartungsanforderung in der Praxis wenig Akzeptanz finden dürfte.

Nach dem Entfernen der Staubablagerungen konnten die metallischen Oberflächen des Kesselkörpers begutachtet werden. Es waren erste Anzeichen von Korrosion zu erkennen (Abbildung 15, rechts). Das Ausmaß dieser Korrosion kann jedoch nicht quantifiziert werden, da keine Messungen zu Materialdicken durchgeführt wurden. Auch an der Verbrennungsluftlanze, die vom IVD im Rahmen der Optimierung zentrisch in den inneren Keramikzylinder eingebaut wurde, waren Anzeichen von Korrosion zu erkennen (Abbildung 15, rechts).



Abbildung 15: Korrosionserscheinungen am Wärmetauscher (links) und an der Verbrennungsluftlanze (rechts)

5 Zusammenfassung

Verglichen mit Holzbrennstoffen stellt die thermische Nutzung von Getreidekörnern bzw. getreidebürtigen Brennstoffen technologisch eine große Herausforderung dar, da die heutigen aber vor allem auch die zukünftig erwarteten Grenzwerte für Schadstoffemissionen wegen der besonderen Nachteile dieser Brennstoffe (hohe Aschegehalte, niedrige Ascheschmelzpunkte, hohe Chlor-, Kalium- und Stickstoffgehalte, teilweise geringe Schüttdichte und hoher Feinanteil) nur schwer zu unterschreiten sind und zudem ein erhöhtes Korrosionsrisiko besteht. Verschiedene Hersteller – unter ihnen die Firma Agroflamm – haben sich dennoch dieser Herausforderung gestellt. Eine entsprechende Feuerungsanlage (Agroflamm-40 mit 40 kW Nennwärmeleistung) wurde für die Versuche bereitgestellt, nachdem sie zuvor am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart hinsichtlich Regelungstechnik und Luftführung optimiert worden war.

Für die Feuerung wurde am TFZ ein Langzeit-Prüfstand mit geregelter Leistungs- und Abgasmesung aufgebaut. Die Anlage wurde in verschiedenen Vor- und Hauptversuchen über vier verschiedene ununterbrochene Zeiträume mit einer Dauer von jeweils zwischen 12 bis 173 Stunden mit dem Brennstoff Wintergerste betrieben. Dabei wurden die Abgasparameter sowie weitere für die Beurteilung interessante Beobachtungen erfasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass die NO_x -Emission zu den konstantesten Messgrößen unter den gemessenen Abgasparametern zählen. Beim NO_x lag der Gesamtmittelwert – bezogen auf 13 % O_2 – in den beiden längsten Versuchen relativ gleichbleibend bei 531 mg/Nm^3 bzw. 579 mg/Nm^3 , wobei der Variationskoeffizient mit 11 bzw. 8 % vergleichsweise niedrig war.

Bei den Emissionen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen (angegeben als Ges.-C) wurden kaum messbar niedrige Werte festgestellt. Dadurch wird die hohe Ausbrandqualität bestätigt, die auch durch die niedrigen mittleren Kohlenmonoxid(CO)-Emissionen in Höhe von 28 bzw. 25 mg/Nm^3 in den beiden längsten Versuchen angezeigt wird. Für die beiden Parameter SO_2 und HCl wurden Mittelwerte von 257 mg/Nm^3 bzw. 66 mg/Nm^3 gemessen. Somit kommt es bei diesen Messgrößen zu einer bemerkenswerten Übereinstimmung zu den HCl- und SO_2 -Emissionen, die auch in anderen Messungen an einer getreidetauglichen Feuerungen (30 kW Vorschubrostfeuerungs) mit Wintergerste als Brennstoff festgestellt wurden (vgl. [7]). Die HCl- und SO_2 -Emissionen werden hauptsächlich durch den Gehalt der entsprechenden Elementgehalte beeinflusst.

Besonders hervorzuheben ist aber der relativ geringe Wert für die Staubemission, der in den beiden längsten Versuchen einen relativ einheitlichen Mittelwert von 50 bzw. 51 mg/Nm^3 ergab (Spannweite von 38 bis 64 mg/Nm^3). Im Vergleich zu anderen Feuerungsanlagen, welche laut Hersteller ebenfalls eine Eignung für Nicht-Holzbrennstoffe wie Getreide aufweisen, fällt die gemessene Staubemission besonders günstig aus. Mit anderen Feuerungen werden in der Regel kaum einmal Staubemissionen im Rohabgas von weniger als 100 mg/Nm^3 erzielt, sie liegen statt dessen in den meisten Fällen bei Werten zwischen 100 und 200 mg/Nm^3 , wobei allerdings auch hier mit dem Einsatz von sekundären Staubabscheidern günstige Staubemissionswerte erzielt werden können [7].

Aufgrund der hier durchgeführten Messungen kann davon ausgegangen werden, dass die untersuchte Agroflamm-40-Feuerung mit Getreidebrennstoff den derzeitigen Staubemissionsgrenzwert von $0,15 \text{ g/Nm}^3$ auch im Praxiseinsatz relativ problemlos unterschreitet. Auch bei einer zukünftigen Absenkung des Grenzwertes auf ein Niveau von $0,10 \text{ g/Nm}^3$ – gemäß dem aktuellen Vorschlag für die Novellierung der 1.BImSchV [1] – könnte der Grenzwert noch ohne sekundäre Staubminderungsmaßnahmen wie z. B. Metallgewebefilter oder elektrostatische Abscheider eingehalten werden, zumal auch über die Dauer des durchgeführten Langzeitversuches von über 170 Stunden kein signifikanter Anstieg der Staubemissionen beobachtet wurde.

Allerdings kommt es bei einer längeren Betriebsdauer von 7 bis 14 Tagen – je nach Brennstoffdurchsatz – zu Staubablagerungen in der Feuerung und im Wärmetauscher, durch die die Abgas-temperatur um mehr als 20 % ansteigt. Bei derartigen Temperaturveränderungen ist üblicherweise eine manuelle Reinigung des Kessels bzw. des Wärmetauschers empfehlenswert, um unnötige Wirkungsgradverluste zu vermeiden. Im Vergleich zu Holzbrennstoffen handelt es sich somit um ein sehr kurzes Wartungsintervall, dessen Einhaltung in der Praxis kaum gefordert bzw. durchgesetzt werden kann. Neben den Staubablagerungen wurden Korrosionserscheinungen an den metallischen Bauteilen der Feuerung beobachtet, durch die die Lebensdauer der Anlage beeinträchtigt werden kann.

Quellenverzeichnis

- [1] BMU 2008: Entwurf der Novelle "Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen", 1.BImSchV), Kabinetttvorlage 2008
- [2] Deutsches Institut für Normung (1999): DIN EN 303-5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistungen bis 300 kW; Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Beuth Verlag, Berlin
- [3] Deutsches Institut für Normung (2002): DIN 51718: Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes und der Analysenfeuchtigkeit. Beuth Verlag, Berlin
- [4] Deutsches Institut für Normung (2004): DIN EN 304: Heizkessel - Prüfredeln für Heizkessel mit Ölzerstäubungsbrennern. Beuth Verlag, Berlin
- [5] Hartmann, H.; Böhm, T., Maier, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.). Reihe "Materialien", Nr. 154, München: BstfLU, 155 Seiten (Download: www.tfz.bayern.de)
- [6] Hartmann, H. und Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen (2. vollst. überarbeitete -Auflage). Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2007, 224 S.
- [7] Hartmann, H., P. Roßmann, P. Turowski, F. Ellner-Schubert, N. Hopf, A. Bimüller (2007): Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte. Berichte aus dem TFZ, Nr. 13. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 126 S. (Download: www.tfz.bayern.de)
- [8] Kommission zur Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN-Normenausschuss (1993): VDI 2066, Blatt 7: Messen von Partikeln; Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung; Planfilterkopfgeräte