

Schlussbericht

Thema:

Verbundvorhaben: Emissionsminderungsstrategien zur umweltverträglichen Verbrennung (UVV) auf Basis von aktuellen Forschungsergebnissen

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH – Theoretische und Experimentelle Untersuchungen, Koordination

Teilvorhaben 2: Institut für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), Hochschule Karlsruhe – Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Gassensorik an Biomassefeuerungen

Teilvorhaben 3: A. P. Bioenergietechnik GmbH – Konzeptentwicklung von Kessel und Abscheider, experimentelle Untersuchungen

Teilvorhaben 4: LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG – Entwicklung von Gassensoren, Aufbau Prototypen, Tests und Langzeitstabilität

Teilvorhaben 5: Lehrstuhl für Funktionsmaterialien an der Universität Bayreuth – Einsatz von Sensorelementen und experimentelle Untersuchungen, Validierung

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: FKZ 22038418

Teilvorhaben 2: FKZ 22038718

Teilvorhaben 3: FKZ 22038818

Teilvorhaben 4: FKZ 22038618

Teilvorhaben 5: FKZ 22038518

Laufzeit:

01.04.2019 bis 31.03.2022

Monat der Erstellung:

10/2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Schlussbericht	1
I. Ziele	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Stand der Technik	5
2.1 Scheitholz-Einzelraumfeuerungsanlagen	5
2.2 Automatisch beschickte Kessel	6
3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
II. Ergebnisse	14
1. Erzielte Ergebnisse	14
1.1 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 1: Theoretische und Experimentelle Untersuchungen, Koordination, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH	14
1.2 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 2: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Gassensorik an Biomassefeuerungen, Hochschule Karlsruhe	27
1.3 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 3: Konzeptentwicklung von Kessel und Abscheider, experimentelle Untersuchungen, A.P. Bioenergietechnik GmbH	48
1.4 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 4: Entwicklung von Gassensoren, Aufbau Prototypen, Tests und Langzeitstabilität, LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG	60
1.5 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 5: Einsatz von Sensorelementen und experimentelle Untersuchungen, Validierung, Universität Bayreuth	71
2. Verwertung	82
3. Erkenntnisse von Dritten	83
4. Veröffentlichungen	84
Literatur	85
ANHANG	88
Teilvorhaben 1: DBFZ, 22038418 Theoretische und Experimentelle Untersuchungen, Koordination	88
Teilvorhaben 2: Institut für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), Hochschule Karlsruhe, FKZ 22038718, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Gassensorik an Biomassefeuerungen	89
Teilvorhaben 3: A. P. Bioenergietechnik GmbH, 22038818, Konzeptentwicklung von Kessel und Abscheider, experimentelle Untersuchungen	90
Teilvorhaben 4: LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG, FKZ 22038618, Entwicklung von Gassensoren, Aufbau Prototypen, Tests und Langzeitstabilität	91
Teilvorhaben 5: Lehrstuhl für Funktionsmaterialien an der Universität Bayreuth, FKZ 22038518, Einsatz von Sensorelementen und experimentelle Untersuchungen, Validierung	92

I. Ziele

1. Aufgabenstellung

Die langfristige Nutzung von Biomasse, insbesondere Holz, wird vor allem davon abhängen, ob es gelingt, die thermische Konversion dieses CO₂-neutralen, regenerativen Energieträgers bei erheblich geringeren Emissionen an toxischen Gaskomponenten und mit Organik beladenen Feinstaubfrachten zu realisieren, als dies bisher aus Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung der Fall ist.

Ergebnisse und Erkenntnisse aus im Vorfeld abgeschlossenen Forschungsprojekten (z.B. „SenSTEF“, „SCR-Filter“, „SCRCOAT“, „Wood Stove 2020“, „Wärme aus Holz“, „BMU-Kat-II“) haben gezeigt, dass bei Anwendung von innovativen Verbrennungsluft-Regelungsmethoden und katalytisch gestützter Emissionsminderung sowie entsprechender zusätzlicher Abscheidertechnik Verbesserungen um mehr als 80 % gegenüber dem heutigen Stand der Technik realistisch sind. Allerdings waren noch vor wenigen Jahren weder langzeitstabile Sensoren noch Oxidationskatalysatoren und ausgereifte Abscheidetechnik marktnah und wirtschaftlich verfügbar, um diese neue Feuerungstechnologie im Markt der Kleinf Feuerungsanlagen einzuführen. Die sehr vielversprechenden Erkenntnisse aus den oben genannten Vorläuferprojekten wurden herangezogen, um unter Nutzung von jüngsten, bedeutenden Fortschritten auf dem Gebiet der in-situ-Hochtemperatur-Gassensorik sowie Katalysator- und Abscheidertechnik umfassende Emissionsminderungsstrategien und auf diesem Weg die „Nächste Generation Biomassefeuerungsanlagen“ zu entwickeln, die erstmals substanzielle Emissionsminderungen im Praxisbetrieb versprechen, welche die aktuellen Grenzwerte der 1. BImSchV, der TA Luft und der MCPD-Richtlinie weit unterschreiten werden. Die Wirksamkeit dieses neuen Emissionsminderungsansatzes wurde an zwei marktnahen nichtkommerziellen Prototypfeuerungen vom Typ:

1. vollautomatischer Holzhackschnitzelkessel
2. handbeschickte Scheitholzeinzelraumfeuerungen

demonstriert. Die praxisnahen Entwicklungsergebnisse sollen nach Projektende an beiden Feuerungstypen für eine zügige Marktumsetzung genutzt werden, um die zukünftig steigenden gesetzlichen Emissionsanforderungen (1. BImSchV, novellierte TA Luft und nationale Umsetzung MCPD-Richtlinie) erfüllen zu können und damit die umweltverträgliche Holzbrennstoffnutzung zu sichern.

Die nachfolgend aufgeführten Verbundpartner und Unterauftragnehmer haben die notwendigen partnerspezifischen Entwicklungsaufgaben bearbeitet.

Verbundpartner	Projektbeiträge
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig	Projektleitung, Gesamtanlagenentwicklung, Regelungsentwicklung Kessel, Durchführung und Auswertung von Prüfstands- und Feldmessungen
Hochschule Karlsruhe	Entwicklung eines Calorimetrischen Sensor-Chips für Abgasanwendungen, Bewertung der Sensitivität von CO/HC Gassensoren, die nach dem Mischpotenzialprinzip arbeiten. Evaluation eines feldfähigen Mess- und elektrochemischen Regenerierverfahrens zum Langzeitbetrieb von CO/HC-Mischpotenzial-Gassensoren. Sensorsignalauswertung (Datenanalyse), Regelungsentwicklung ERF, Begleitung und Auswertung von Prüfstands- und Feldmessungen
A.P. Bioenergie-technik GmbH	Kesselentwicklung, Abscheiderentwicklung, Feldanlagenbetreuung, SPS-Regelung
Universität Bayreuth	Sensorikentwicklung, Sensorintegration, Datenanalyse
LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG	Sensorentwicklung hinsichtlich einer marktverfügbaren preisgünstigen CO/HC-Sensors

Unterauftragnehmer	Aufgaben der Unteraufträge
Brunner GmbH	Bereitstellung und Feldmessungen ERF
ETE EmTechEngineering GmbH	Katalysatorentwicklung und Feldmessung Kessel
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft	Projektleitung und wiss. Begleitung der Beiträge des ISIS ab März 2020 durch Prof. Dr. Heinz Kohler nach dessen Pensionierung.

Assoziierte Partner	Aufgabe der Beiträge
Robert Bosch GmbH	Bereitstellung und Beratung Sensortechnik
Sick AG	Beratung bei Programmierung und Elektronik

Das Projekt hat durch eine intelligente Verbrennungsluft- und Prozessregelung von Holzverbrennungsprozessen kombiniert mit katalytischer Nachverbrennung und Staubabscheidung eine deutliche Schadgas- und Feinstaubminderung unter typischen Praxisbedingungen ermöglicht:

- An einem handbeschickten Scheitholzofen wurde eine neuartige sensorbasierte Verbrennungsluftregelung adaptiert und durch einen in die Feuerung integrierten Oxidationskatalysator ergänzt. Unter diesen Voraussetzungen wurden die Minderungsmöglichkeiten der un- und teilverbrannten Abgaskomponenten und von Feinstaubpartikeln untersucht und daraus ein neues Verfahren zur Verbrennungsluftregelung entwickelt. Dabei sollten die Staubemissionen die gültigen Grenzwerte von 40 mg/m³ unter praktischen Betriebsbedingungen um mindestens 50 % (Zielwert < 20 mg/m³) unterschreiten und die CO-Emissionen in der Hochtemperatur-Verbrennungsphase auf deutlich unter 200 mg/m³ gesenkt werden (Grenzwert der 1.BImSchV: 1250 mg/m³ i.N.).

Ergebnis: Nach der Parametrisierung und Weiterentwicklung eines Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmus für die Einzelraum-Feuerstätte HKD7 (Brunner GmbH) wurde erstmals unter Einbeziehung von Feldtests über insgesamt 472 Feuerungsbetriebsstunden gezeigt, dass die gasförmigen Schadstoffe und Staubemissionen gegenüber dem ungeregelten Betrieb ohne Katalysator um mehr als 80 % gesenkt werden. Die oben genannten Zielwerte werden damit deutlich unterschritten. Auch im Hinblick auf die zu untersuchende Langzeitstabilität des Mischpotenzial-CO/HC-Sensors bzw. der Verbrennungsluftregelung ist dieses Ergebnis außerordentlich vielversprechend. Es wurden insbesondere bei Einsatz des neu entwickelten, elektrochemischen Sensortest- und Regenerierverfahrens keine Alterungserscheinungen im Testzeitraum festgestellt. Somit bleibt festzustellen, dass die Technologie zur weiteren, erheblichen Absenkung der Emissionen von Scheitholzöfen kleiner Leistung jetzt verfügbar ist. Durch Gesetzgebung und Förderung müssen nun Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit sich dieses höchst innovative Scheitholz-Verbrennungssystem mit der notwendigen Durchdringung zum Schutz von Mensch und Umwelt/Klima auf dem Markt durchsetzen kann, unabhängig von den damit verbundenen zusätzlichen Kosten.

- An einem automatisch beschickten Hackschnitzelkessel wurde in Kombination mit einer neuartigen sensorbasierten Verbrennungs- und Prozessregelung und einem an die Kesselanlage adaptierten Staubabscheider die Minderung der un- und teilverbrannten Abgaskomponenten aus instationären Phasen (Anfahrphase, Lastwechsel, Teillast) und von Staubpartikeln untersucht. Dabei sollten die Staubemissionen die gültigen Grenzwerte von 20 mg/m³ unter praktischen Betriebsbedingungen um mindestens 75 % unterschreiten; Zielwert < 5 mg/m³. Weiterhin war ein Algorithmus zu entwickeln, der basierend auf verschiedenen Abgasparametern die Bestimmung der Verbrennungsqualität erlaubt und auf diese Weise die Notwendigkeit von Service-Maßnahmen rechtzeitig signalisiert.

Die für die zukünftige Nutzung von CO₂-neutralen Holzfeuerungsanlagen anzustrebende effiziente und bedeutende Senkung der Emissionen aus Holzfeuerungen kann nur durch einen flächendeckenden Einsatz von geregelten und überwachten Verbrennungsprozessen erzielt werden. Der flächendeckende Einsatz solcher Verbrennungsluftregelungen in häuslichen Feuerungsstätten ist nur dann möglich, wenn die Verfügbarkeit preisgünstiger und wartungsfreier Anlagen sichergestellt werden kann. Die dafür benötigte preisgünstige Sensorik ist dafür als eine wesentliche technische Maßnahme zu nennen, um die Nutzer-, Betriebs- und Brennstoffeinflüsse auf die Qualität der Verbrennung zu regulieren, d. h., die Effizienz zu erhöhen und die Emissionen bei der Holzverbrennung weitestgehend zu mindern. Mit den in diesem Vorhaben entwickelten Gesamtsystemen für sowohl handbeschickte als auch automatisch beschickte Holzfeuerungen kleiner und mittlerer Leistung kann ein erheblicher Technologiesprung ermöglicht werden, so dass eine weitere Absenkung der Emissionsgrenzwerte von Holzfeuerungen technisch machbar ist. Aus

diesem Grund war es das Ziel des Projektkonsortiums in dem beantragten Vorhaben, die derzeit bekannten, vielversprechenden Sensorprinzipien zu evaluieren, in Gesamtsysteme bestehend aus Feuerung, Sensorik, Verbrennungsluft-Regelung, Katalysator im Falle der Einzelraumfeuerungen und zusätzlich einen Staubabscheider an dem Hackschnitzelkessel zu integrieren und durch umfangreiche Feldmess- und Demonstrationsuntersuchungen deren Wirksamkeit für die anschließende Markteinführung zu demonstrieren. Sowohl für eine handbeschickte Scheitholzfeuerungen der Firma Brunner Feuerungstechnik GmbH als auch für eine automatisch beschickte Hackschnitzelanlage der Firma A.P. Bioenergietechnik GmbH wurden dafür jeweils eine komplette Demonstrationsanlage bestehend aus allen notwendigen Komponenten konzipiert, entwickelt und unter Praxisbedingungen getestet.

2. Stand der Technik

2.1 Scheitholz-Einzelraumfeuerungsanlagen

Die Scheitholz-Einzelraumfeuerungsanlagen niedriger Nennleistung, die weite Verbreitung in privaten Haushalten gefunden haben, werden nach dem Stand der Technik sehr überwiegend ohne automatische Verbrennungsluftregelung, d. h. mit händischer Verbrennungsluftstellung betrieben. Wenige Hersteller von Kachelofeneinsätzen (z.B. Brunner GmbH, Leda GmbH) haben in den vergangenen 25 Jahren eine temperaturgesteuerte Verbrennungsluftbegrenzung eingeführt. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Erreichung weitaus besserer Verbrennungsqualität bzw. niedrigerer Emissionen sind hingegen auf ungleich fortgeschrittenem Stand. Bereits 1989 veröffentlichte Nussbaumer /Nus89/ eine Untersuchung zur Abhängigkeit der gasförmigen Emissionen von der Verbrennungstemperatur und zum Einfluss der Restsauerstoffkonzentration (ROC) im Abgas. Allerdings führten diese wissenschaftlichen Kenntnisse in den folgenden Jahren nicht zu innovativen Verbrennungsluft-Regelungskonzepten für Holzfeuerungen. Die Berücksichtigung der Verbrennungstemperatur und der ROC im Regelungsalgorithmus wurde dann erstmals für Scheitholz-Heizkessel eingeführt. Die in der Automobiltechnik seit vielen Jahren bereits angewendete Lambda-Sonde (Sprungsonde) zur Erfassung der ROC fand in diesem Zuge Anwendung, ist aber für den Betrieb im Sauerstoffüberschuss, wie es für die Holzverbrennung üblich ist, eher ungeeignet, weil die Sensitivität für Lambdawerte größer 1,4 gering ist. Deshalb ist dieses Signal zu wenig aussagekräftig und störanfällig. Diesbezüglich steht aber mittlerweile mit Breitband-Lambdasonden (z. B. Bosch GmbH: LSU 4.9) ein bewährtes Messprinzip zur Verfügung, das sich sowohl in der Automobiltechnik als auch in den Vorläuferprojekten der Projektpartner (z.B. SenSTEF) beim Einsatz im Abgas von Scheitholzfeuerungen bewährt hat.

Bis heute gibt es jedoch keine Verbrennungsluftregelung auf dem Markt, die neben der Verbrennungstemperatur und ROC auch den Gehalt an un- und teiloxidierten Abgaskomponenten im Regelungsalgorithmus berücksichtigt, obwohl erste vielversprechende Experimente bereits von den Antragstellern im Jahr 2009 veröffentlicht wurden /But09, Koh13/ und ein deutlicher Technologiesprung zur Minimierung der Emissionen hiervon zu erwarten ist. Der Grund hierfür liegt in der bisher nicht ausreichenden Stabilität der auf dem Markt verfügbaren CO/HC-Gassensoren beim Betrieb unter den harschen Praxisbedingungen im Hinblick auf aggressive Gaskomponenten (organische Säuren, Alkohole, Aldehyde und andere) und mit Organik beladenen Stäuben sowie Ruß bei Temperaturen bis zu 500 °C, wie diese im Abgas von Holzverbrennungsanlagen vorliegen können.

Erst im Jahr 2016 wurde schließlich anhand von begleitenden Abgasanalysen gezeigt /Ojh17-01/, dass keine strenge Korrelation zwischen Verbrennungstemperatur, ROC und CO/HC-Gehalt besteht, sondern vielmehr alle drei Parameter separat sensorisch erfasst werden müssen, um den Verbrennungsluft-Regelungsprozess von Holzverbrennungssystemen genügend gut zu beschreiben und auf diesen Signalen eine deutlich verbesserte Verbrennungsluft-Regelung aufzubauen. Dabei bestand das Ziel darin, die Emissionen durch diese Primärmaßnahme weit unter die gültigen Emissionsobergrenzen (1. BImSchV) abzusenken. Durch vergleichende Feuerungsexperimente an einem scheitholzbefeuerten Kaminofeneinsatz (VariaR, Spartherm GmbH) wurde damals gezeigt, dass bei Anwendung des oben beschriebenen Verbrennungsluft-Regelungsverfahrens eine Emissionsreduzierung von CO um ca. 80 % erreicht wird /Ojh17-01/. Daraus ergab sich damals die klare Notwendigkeit, langzeitstabile, genügend empfindliche und preisgünstige CO/HC-Sensoren zu entwickeln, um das oben genannte Ziel in langzeitstabilen, robusten Verbrennungsluft-Regelungsverfahren zu erreichen.

Die in UVV zur Evaluation vorgesehenen CO/HC-Sensortypen waren:

- (1) Thermoelektrischer Sensor (Prototyp der Universität Bayreuth)
- (2) Kalorimetrischer Sensorchip (Eigenentwicklung des ISIS)
- (3) Mischpotenzial Gassensor CarboSen (Lamtec GmbH, Walldorf)

Sensor-Typ (3) wurde im Vorprojekt SenSTEF experimentell als zwar grundsätzlich geeignet eingestuft, jedoch wurden von Sensorelement zu Sensorelement unterschiedlich deutliche Sensitivitätsverluste über längere Betriebszeiten im Abgas beobachtet (Exemplarstreuung). Parallele Arbeiten am ISIS (Dissertation

Zhang) haben allerdings gegen Ende von SenSTEF die Situation völlig verändert: Es konnte ein neues Verfahren entwickelt werden, das es erlaubt, die Sensitivität in Feuerungspausen am Einbauort elektrochemisch wiederkehrend zu bestimmen und bei Bedarf den Sensor zu regenerieren /Koh17/. Der Hersteller (LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG) ist an diesem Verfahren sehr interessiert, weil es die Einsatzmöglichkeiten dieses Sensortyps erheblich erweitern kann.

Als weitere Option zur CO/HC-Analyse im Abgas verspricht Sensor-Typ (2) Vorteile hinsichtlich Wirkprinzip, Herstellkosten (wenig Pt-Einsatz) und Einfachheit der Messtechnik (simples DC-Brückensignal) (vgl. Abbildung 1). Dieser Sensortyp war am ISIS bereits hergestellt und im Labor unter Beaufschlagung von Modellgasen getestet worden. Die Sensitivität und Signalstabilität sind sehr gut. Die Sensitivitätsgrenzen betragen im ersten Entwurf 19 ppm für CO und 4 ppm für Propen /III18/.

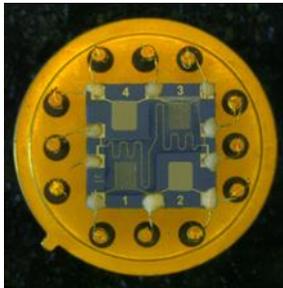


Abbildung 1: Sensor-Typ (2) – Kalorimetrisches Messprinzip, aufgebaut auf LTCC-Substrat (ISIS), rückseitig beheizter, temperatureregelter Sensorchip (7x7mm²), vier Widerstandsmäander bilden einer Wheatstone Messbrücke, ein resistiver Temperatursensor ist integriert, je zwei diagonal angeordnete Mäander sind mit einer katalytisch aktiven Schicht bzw. mit einer chemisch inerten Glasschicht abgedeckt.

Sensortyp (1) ist hinsichtlich des Wirkprinzips sehr verwandt mit Sensortyp (2). Die Entwicklung und Herstellung wurde am Lehrstuhl für Funktionsmaterialien der Universität Bayreuth vorgenommen. In Zusammenarbeit mit dem ISIS wurde der Sensor bereits im Abgas erprobt und die Signale mit der Abgaszusammensetzung korreliert /Ojh17-02, Hag17_2/.

Die Chancen, wenn möglich alle, jedoch zumindest einen der oben genannten Sensortypen zur kontinuierlichen Bestimmung des CO/HC-Gehaltes im Abgas von Holzverbrennungsprozessen zu ertüchtigen, wurden als ausgesprochen gut eingeschätzt. Allerdings war nach dem damaligen Kenntnisstand offensichtlich, dass zuerst eine gründliche wissenschaftliche Evaluation in Kombination mit Optimierungsschritten bzw. mit Regenerationsverfahren (Sensortyp (3)) notwendig sein würde, bevor eine Markteinführung in Betracht gezogen werden konnte. Zusammen mit verfahrenstechnischen Maßnahmen, wie der katalytischen Oxidation, sollte es dann gelingen, so der Projektansatz, innovative Verbrennungsluft-Regelungsverfahren zu entwickeln, um auf diese Weise die Emissionen von un- und teilverbrannten Abgaskomponenten in allen Phasen der Verbrennung gegenüber dem Stand der Technik auch im Praxisbetrieb bedeutend, d.h. um mehr als 80 %, zu reduzieren.

Allerdings sind der Verbrennungsluftregelung Grenzen gesetzt. Die Verbrennungstemperaturen müssen hoch genug sein, um eine genügend hohe Reaktionsgeschwindigkeit zur Totaloxidation zu erreichen. Dies ist vor allem in der Zünd- und der Ausbrandphase eines Chargenabbrandes oder auch bei instationären Verbrennungsphasen sowie Teillastzuständen von automatisch beschickten Anlagen nicht gegeben. Die Installation eines Oxidationskatalysators in der Nachbrennkammer kann hier zu sehr wirksamen Verbesserungen führen /But09, Bin12/. Katalysatoren sind zwar marktverfügbar, jedoch wird nur dann eine wirksame katalytische Emissionsminderung erreicht, wenn diese unter Beachtung von entsprechenden verfahrenstechnischen Bedingungen wie Temperatur, Raumgeschwindigkeit (Verhältnis von Volumenstrom zu Katalysatorvolumen), Anström- und Durchströmungsbedingungen usw. in die Feuerungsanlage eingefügt sind. Eine entsprechend passgenaue Adaptierung des Katalysators an die Brennraumgeometrie sowie die vorherrschenden Prozessbedingungen ist entsprechend notwendig. Dazu ist die Verbrennungsluftregelung spezifisch für Anwendungen mit Oxidationskatalysator zu parametrisieren.

Fazit: Eine wesentliche Senkung der Emissionen von Holzfeuerungsanlagen kleiner Leistung ist nur dann zu erwarten, wenn es gelingt (i) CO/HC-Sensoren herzustellen bzw. zu verbessern und deren Eignung zu evaluieren, (ii) geeignete Oxidationskatalysatoren und Abscheidetechniken in die Anlage zu integrieren und (iii) innovative Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen unter Einbeziehung der CO/HC-Sensorik zu etablieren. Diese Aussage gilt in ähnlicher Form sowohl für manuell beschickte Scheitholzfeuerungsanlagen als auch für automatisch beschickte Hackschnitzel- und Pelletfeuerungsanlagen.

2.2 Automatisch beschickte Kessel

Untersuchungen am DBFZ /Döh12/ zu den verschiedenen Einflüssen auf Schadstoffemissionen aus Holzfeuerungen zeigten umfangreiche Minderungsansätze auf. Je nach Aufbereitungsform des Holzes ergeben sich dabei unterschiedliche Anforderungen an einen emissionsarmen Verbrennungsprozess.

Nachfolgend wird anhand des Brennstoffes Holzhackschnitzel (HHS) aufgezeigt, wie auf Basis der Ergebnisse Gesamtmaßnahmen für eine emissionsarme Verbrennung an einer HHS-Verbrennungsanlage umgesetzt werden können.

Anschließend wird ein Schema zur Verallgemeinerung auf unterschiedliche Kombinationen von Brennstoff und Feuerungsanlage vorgestellt und die sich ergebenden zusätzlichen Punkte beschrieben.

Aus den Einzelmaßnahmen lässt sich am Beispiel „Vollautomatische Kesselanlage für HHS im Leistungsbereich unter 100 kW“ wie in Abbildung 2 dargestellt die Gesamtminderungsmaßnahme ableiten.

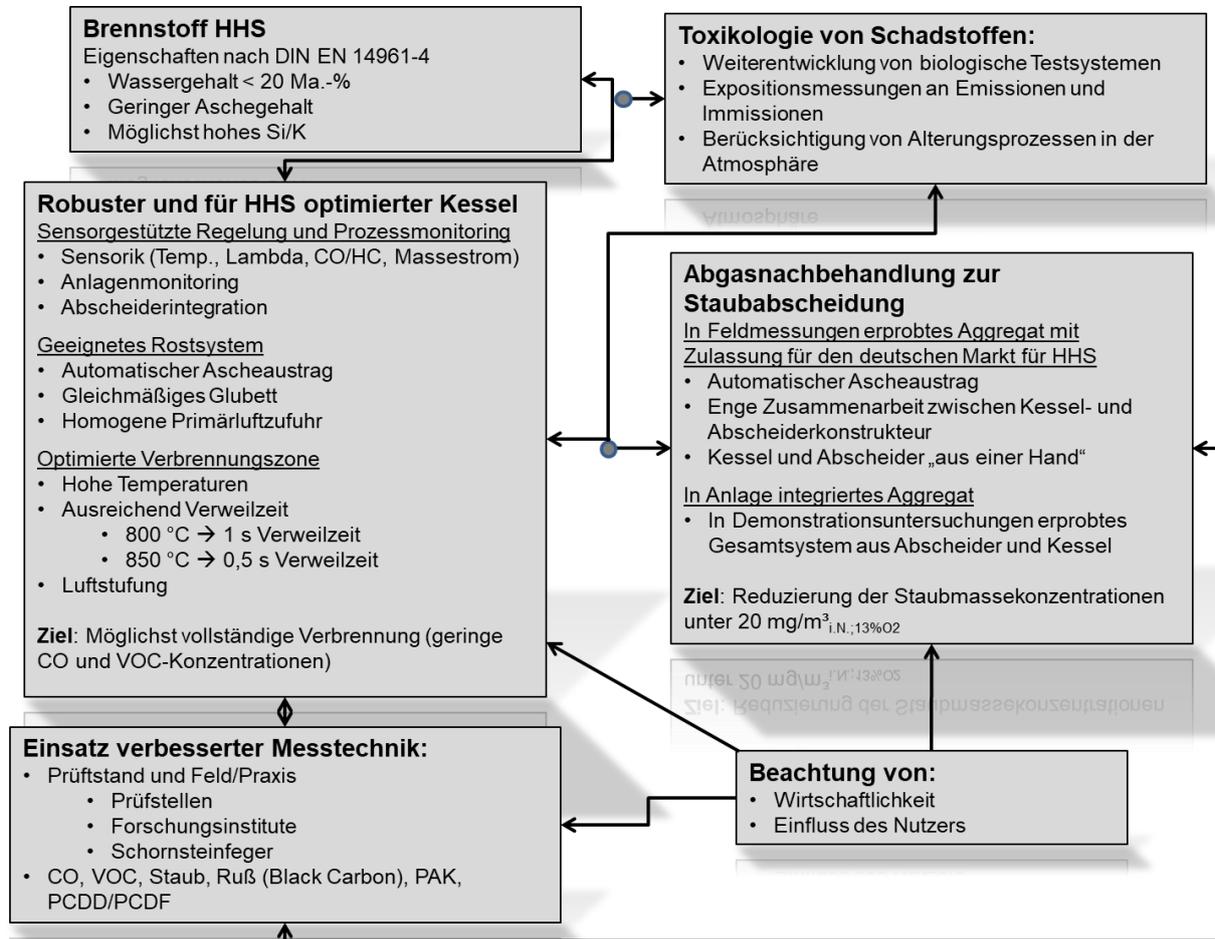


Abbildung 2: Gesamtmaßnahme zur Reduzierung der Emissionen aus HHS-Kesseln nach /Döh12/ (modifiziert)

Anlagenseitige Minderungsmaßnahmen

Untersuchungen mit einem Holzhackschnitzelkessel /Döh12/ zeigten, dass einerseits die Brennstoffeigenschaften wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Schadstoffemissionen haben, andererseits aber auch, dass mit einer ausgereiften robusten Feuerungstechnik inklusive guter Regelungsalgorithmen HHS selbst bei vergleichsweise hohen Wasser- und Aschegehalten gut mit niedrigen CO- und VOC-Konzentrationen verbrannt werden können. Der Kessel muss ein für die HHS-Eigenschaften ausgelegtes Rostsystem mit automatischem Ascheaustrag enthalten. Durch gezielte Luftstufung und automatische Verbrennungsreglung muss der Kessel auf veränderliche Brennstoffparameter, vor allem auf den Wassergehalt, automatisch reagieren können. Der Kessel muss in der Verbrennungszone ausreichend hohe Temperaturen von größer 850 °C bei Verweilzeiten größer 0,5 s ermöglichen. Bei geringeren Gasphasentemperaturen sind die Verweilzeiten (t) für den Gasausbrand entsprechend zu erhöhen, z.B. $T = 800 \text{ °C} \Rightarrow t > 1 \text{ s}$. Daraus kann abgeleitet werden, dass HHS bei Einsatz einer guten und optimierten Feuerungstechnik nahezu vollständig und damit emissionsarm verbrannt werden können. Andererseits muss jedoch auch auf die Höhe der Staubkonzentrationen verwiesen werden, die trotz des guten Gasausbrandes mit geringen Rußanteilen oberhalb der Grenzwerte der 2. Stufe der 1.BImSchV von 20 mg/m³ liegen können. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass moderne Holzhackschnitzelfeuerungen hinsichtlich der CO- und VOC-Emissionen in Phasen stationärer Verbrennung unter Nennlastbedingungen unproblematisch sind, jedoch grundsätzlich für die Einhaltung der Staubkonzentrationen eine Abgasnachbehandlung (Sekundäre Emissionsminderung) in Form eines Staubabscheiders benötigen.

Eine Abgasnachbehandlung an HHS-Feuerungen mit Nennleistungen unter 100 kW kann aufgrund des begrenzten Marktangebotes derzeit nur durch Elektroabscheider erfolgen. Ab Leistungsgrößen über 100 kW

werden Gewebefilterlösungen wirtschaftlich relevant. Durch Arbeiten zur Abscheiderentwicklung wurden zwei am Markt verfügbarer Abscheiderprinzipien identifiziert /Ul11/ und beispielsweise am DBFZ untersucht, die nach derzeitiger Kenntnis für HHS-Feuerungen gut geeignet sind. Grundsätzlich ist es jedoch auch in den genannten Leistungsbereichen hinsichtlich des Praxisbetriebs und möglichst hoher Abscheidegrade sinnvoll, die Kesseltechnik zusammen mit für den Anwendungsfall angepasster Abscheidertechnik zu realisieren. Idealerweise wäre es sogar notwendig, für jeden Anwendungsfall einen dafür optimierten Abscheider in Einzelanfertigung zur Verfügung zu stellen. Dies ist aber nur möglich, wenn Kessel und Abscheider aus einer Hand bzw. in sehr enger Kooperation zwischen Kessel- und Abscheider-Konstrukteur angeboten werden. Hier ist jedoch auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen in diesem Leistungsbereich zu verweisen, da Einzelanfertigungen sehr kostenintensiv sind.

Dem DBFZ sind einige wenige Anlagen eines Kesselherstellers bekannt, die im Leistungsbereich über 100 kW mit individuellen Abscheideranlagen in der Praxis betrieben werden. Aus vertraulichen Informationen sind jedoch auch die Investitionskosten bekannt, die eine Wirtschaftlichkeit derzeit als nicht gegeben erscheinen lassen. Eine Leistungsreduktion wirkt sich nicht auch im gleichen Maße auf die Investitionskosten aus und führt im Gegenteil eher zu höheren relativen Anschaffungskosten der Sekundärmaßnahmen bei Leistungen unter 100 kW.

Weitere Entwicklungen unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit bei Elektroabscheidern sind derzeit in der Bearbeitung. Neben dem Elektroabscheider-System der CCA-Carola Clean Air GmbH, an dessen Entwicklung das KIT maßgeblich beteiligt war, wurde am DBFZ in Zusammenarbeit mit der BTU Cottbus und der Firma A.P. Bioenergietechnik GmbH in einem von der BMU geförderten Projekt an der Entwicklung von integrierten Abscheiderlösungen gearbeitet. Beide Entwicklungen werden als vielversprechend eingestuft. Nach Informationen der CCA-Carola Clean Air GmbH wurden umfangreiche Feldmessungen durchgeführt, die den Nachweis der Praxistauglichkeit zum Ziel hatten. Auch die integrierte Abscheiderlösung speziell für den Kessel Ökotherm der Firma A.P. Bioenergietechnik GmbH wurde als Prototyp in einer größeren Feldmesskampagne demonstriert.

Mit Anwendung neuer verbesserter und kontinuierlicher Messverfahren durch Prüfstellen, Forschungsinstitute und Schornsteinfeger ist zu erwarten, dass die Emissionen besser, d.h. vollständiger und genauer in Form von Emissionsfaktoren erfasst werden können. Wenn detaillierte Kenntnisse zu den Emissionsfaktoren von CO, VOC, Staub, Ruß, NO_x, PAK sowie polychlorierten Dioxinen und Furanen (PCDD/PCDF) in Abhängigkeit von Brennstoff, Feuerungsprozess, Nutzerprofil und -verhalten sowohl am Prüfstand als auch in der Praxis vorliegen, können weitere Maßnahmen und Strategien aufgezeigt und in die Praxis von häuslichen Biomassefeuerungen überführt werden.

Verallgemeinerung für Brennstoff-Feuerungskombinationen

In Abbildung 3 ist ein Schema zur Verallgemeinerung und Systematisierung der im Rahmen dieses Projektes untersuchten und aus der Literatur recherchierten Minderungsmaßnahmen mit kumuliertem Minderungspotenzial für Emissionen heutiger Anlagen aufgeführt. Verschiedene Kombinationen von Brennstoffen mit Feuerungsanlagen wurden dabei betrachtet. Das Minderungspotenzial ist auf den Praxisbetrieb bezogen.

Wie schon vom DBFZ untersucht /Har14/, haben die Brennstoffeigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Staubemissionen. Zusätzlich können regional verfügbare Brennstoffe entscheidend zur Wahl der Feuerung beitragen: Ein Privatwaldbesitzer mit ländlich gelegenen Grundstück wird sich vermutlich für eine Stückholzfeuerung (Einzelraumfeuerung oder Kessel) entscheiden, während für stadtnahe Ein- und Zweifamilienhäuser eher Pelletkessel oder Pelletöfen sowie für größere Mehrfamilienhäuser und Gewerbe/Landwirtschaftsbetriebe eher allgemein Kessel zum Einsatz kommen.

An dieser Stelle kommt der Auslegung der Leistungsgröße, je nach zu beheizender Wohnfläche, unter Berücksichtigung des Wärmedämmstandards des Gebäudes (Berechnung des Wärmebedarfs) eine bedeutende Rolle zu. Eine Überdimensionierung sollte in jedem Fall vermieden werden. Diese führt neben zu hohen Investitionskosten vor allem zu einem häufigen Teillastbetrieb, kurzen Betriebszeiten und häufigen Kesselstarts, die zu einer Verminderung der Jahresnutzungsgrade und zu steigenden Emissionen beitragen.

Zudem sollte durch entsprechende Änderungen der Richtlinien für Typenprüfungen und wiederkehrende Messungen vermieden werden, dass Kesselhersteller die Anlagen nur noch auf die Typenprüfung (Nennlast und kleinste Teillast) sowie Nennlast im Feld hin optimieren, sich aber nicht mehr um instationäre Phasen sowie die Anheizphase, die Betriebsdauer und die Ausbrandphase kümmern. Ein erster Ansatz könnte darin bestehen, bei der Typenprüfung einen „Norm“betriebszyklus, wie beispielsweise von BE2020+ (Wieselburg, Österreich) und TFZ (Straubing) vorgeschlagen wird, für die Kesselzulassung vorzuschreiben. Entsprechend dem Sinn der wiederkehrenden Messung, technische Störungen und einen mangelhaften Wartungs- und Reinigungszustand zu erkennen, dürfte bei den Feldmessungen die bereits verpflichtende Nennlastprüfung ausreichend sein.

Stückholz	Pellets	Holzhack-schnitzel	Maßnahmen/ Bedingungen/ Anforderungen	Minderungs- potenzial/ Reduzierte Emission	Minderungs- Potenzial kumuliert/ Erreichbare Emissionen
Praxisemissionen heutiger Kleinf Feuerungsanlagen (Bezugswert, im Normzustand, 13 % O ₂)				100 mg/m ³	
				5 mg/m ³ 5 %	95 mg/m ³ 5 %
				25 mg/m ³ 25 %	70 mg/m ³ 30 %
				20 mg/m ³ 20 %	50 mg/m ³ 50 %
				25 mg/m ³ 25 %	25 mg/m ³ 75 %
				20 mg/m ³ 20 %	5 mg/m ³ 95 %

Abbildung 3: Maßnahmenschema zur Emissionsminderung an häuslichen Holzfeuerungen (BS: Brennstoff) /Har12/

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Weiterentwicklung der Feuerungstechnik. Die Nachrüstung von Bestandsanlagen mit angepasster und optimierter Technik (Regelung, Brennraumeinbauten, Wärmeübertragerreinigung) könnte durch entsprechende Förderungen am Markt umgesetzt werden. Dabei ist jedoch durch ein entsprechendes Messprotokoll einer Prüfstelle der Nachweis zu erbringen, dass die Nachrüstsätze eine Emissionsminderung von mehr als 30 % ermöglichen.

Auch der Austausch von manuell beschickten und ohne Regelung ausgestatteten Altgeräten durch vollautomatische Anlagen nach neuestem Stand der Technik sollte durch politische Rahmenbedingungen gefördert werden. Nur so ist die Weiterentwicklung der Feuerungstechnik für die Anlagenhersteller wirtschaftlich darstellbar. Langfristig müssen auch bei Einzelraumfeuerstätten Geräte verfügbar sein, die weitgehend vollautomatisch funktionieren und nicht mehr manuell beschickt werden müssen. Ggf. wäre eine Regelung zu überlegen, nach welcher einfache Geräte (ohne Vollautomatik) nur noch dann erworben werden dürfen, wenn ein Altgerät verschrottet wird und eine Bescheinigung des Bezirksschornsteinfegers vorliegt, dass das Altgerät tatsächlich für eine gewisse Mindestzeit im Haus betrieben wurde und eine Feuerstätte für die Wärmeversorgung nötig ist.

Bereits aus früheren Versuchen ist bekannt, dass ein zu hoher Schornsteinzug zu einer Erhöhung der Emissionen führen kann. Außerdem führt der Schornsteinzug zu einer schnellen Auskühlung der Kessel, dabei sind seit langem sowohl Zugbegrenzer für Schornsteine als auch motorisch betriebene Abgasklappen bekannt, die nach Ende der Ausbrandphase den Abgaskanal bis auf einen kleinen Sicherheitsspalt verschließen, um den Auskühlprozess deutlich zu verlangsamen. Da sich beide sinnvolle Optionen bisher im Markt nicht durchgesetzt haben, ist zu überlegen, diese verpflichtend einzuführen.

Wie auch schon im Verkehrssektor eingeführt, sollten Umweltzonen eingerichtet werden, die nur noch den Betrieb von besonders emissionsarmen Feuerungen zulassen. Eine Aus- bzw. Nachrüstung von Feuerungen mit integrierten Abgasreinigungsverfahren (integrierter Katalysator bzw. für die Feuerung vom Hersteller adaptierter Staubabscheider) sollte mittel- und langfristige entsprechend positiv berücksichtigt werden, um eine vereinfachte Betriebszulassung zu erwirken. In Europa werden solche Entwicklungsansätze in den letzten Jahren verstärkt verfolgt. In Nordamerika (USA/Kanada) werden schon

seit vielen Jahren handbeschickte Feuerungen angeboten, die mit Katalysatoren ausgerüstet sind. Entsprechend groß ist dabei die Auswahl an Katalysatoren mit angepasster Geometrie je nach Fabrikat und Typ. Eine Übertragung auf den europäischen Markt und auf automatisch beschickte Anlagen würde eine erhebliche Minderung von toxischen Kohlenwasserstoffemissionen ermöglichen.

Langfristig sollte unabhängig von Brennstoff, Feuerungsart und Zusatzeinrichtung bzw. technischer Ausstattung eine wiederkehrende Messpflicht für häusliche Feuerungsanlagen gesetzlich vorgeschrieben werden, d. h. auch die große Zahl an Einzelraumfeuerstätten ist regelmäßig im Betrieb zu messen. Hiermit könnte verstärkt sichergestellt werden, dass insbesondere Einzelraumfeuerstätten auch hinsichtlich des Praxisbetriebes nach Stand der Technik und damit emissionsarm betrieben werden.

Eine jährliche Wartungspflicht an Kesseln (für Stückholz, Pellets und HHS) durch den Hersteller unabhängig von der Schornsteinfegermessung sollte nach derzeitigem Kenntnisstand eine erhebliche Emissionsminderung ermöglichen können. Die jährlichen Wartungen sollten die Prüfung aller Sensoren (Temperatur, Druck, Lambda usw.) und der Regelungseinstellung sowie die Reinigung des Feuerraumes, der Wärmeübertragerzone und der Ascheaustrageeinrichtungen beinhalten. Zusätzlich sollten alle verschleißanfälligen Bauteile auf Korrosion, Risse und sonstige Defekte hin zumindest augenscheinlich untersucht werden. Integrierte und nachgerüstete Bauteile zur Abgasreinigung sollten ebenfalls Bestandteil der jährlichen Wartung sein. Defekte Bauteile sollten vor einer Wiederinbetriebnahme ausgetauscht werden müssen. Der entsprechende Nachweis von Betriebs- und Wartungsdaten sollte einerseits durch ein Protokollheft dokumentiert werden und könnte andererseits mit entsprechend verfügbaren Monitorsystemen auf erweiterter Sensorbasis wie CO/HC-Sensorelementen erheblich zur Minderung der Praxisemissionen beitragen. Entsprechend könnten sowohl die Feuerungsanlagen allgemein als auch die Abgasreinigungssysteme nachvollziehbar überwacht werden.

An den Anlagen betriebene Abgasreinigungssysteme sollten ebenfalls der jährlichen Wartung/Überwachung unterliegen und in Verbrennungsmonitoreinrichtungen automatisch aufgezeichnet werden. An Feuerung und Abscheider mitlaufende Datenlogger als Betriebsstundenzähler sind vorzusehen, um eine Nachvollziehbarkeit des Feuerungsbetriebs ermöglichen zu können.

Da es derzeit nur wenige Daten zu Abscheidern im Praxisbetrieb gibt, ist die Dauerbetriebssicherheit noch nicht garantiert. Diese muss aber erreicht werden, um Abscheider als zielführende Option zur Emissionsminderung zu erschließen. Dies wird letztlich nur bei einer stärkeren Verbreitung von Abscheidern im praktischen Einsatz möglich sein, wobei die Betriebsdaten und Störungen als Input für eine Optimierung dienen. Damit die Nutzenden, welche die nicht unerheblichen Kosten für einen Abscheider in Kauf nehmen, nicht durch mögliche Betriebsstörungen während der wiederkehrenden Messung bedroht sind, sollte zumindest für eine gewisse Übergangszeit bei Überschreitung der Emissionsgrenzwerte nach dem Abscheider mittels einer zweiten Messung der Staubgehalt vor dem Abscheider ermittelt werden und dann der zertifizierte Abscheidegrad des Abscheiders rechnerisch zum Ansatz kommen. Natürlich ist der Abscheider umgehend nach der Messung durch den Hersteller instand zu setzen.

Um einen flächendeckenden Technologieeinsatz von CO/HC-sensorbasierten Regelungssystemen und auch von Abscheidern schneller zu erreichen, muss die breite Markteinführung intensiv wissenschaftlich begleitet werden. Die Erfahrungen sollten direkt zentral an alle interessierten Abscheider- und Kesselhersteller zurückgekoppelt werden. Zudem sollte versucht werden, die Abscheider- und die Kesselhersteller dazu zu bewegen, ihre Produkte in geschlossenen Paketen für die Kunden anzubieten, damit die Effizienz der Umsetzung verbessert wird.

Feuerungsseitige Emissionsminderung

Das 2012 abgeschlossene und vom damaligen BMU geförderte Projekt „Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen“ /Har12/ hat gezeigt, dass die in der 1. BImSchV festgesetzten Grenzwerte für Gesamtstaub von 20 mg/m³i.N. bei einem Bezugssauerstoff von 13 Vol.-% nur von modernen vollautomatischen Holzpelletfeuerungen bei Einsatz von standardisierten ENPlus-Holzpellets sicher eingehalten werden. Einzelraumfeuerstätten sowie Stückholz- und Hackschnitzelkessel müssen jedoch bei Beginn der 2. Stufe der 1. BImSchV ggf. mit Sekundärmaßnahmen zur weiteren Schadstoffreduzierung ausgerüstet werden.

Bekannt und in der Fachwelt anerkannte Grundsätze zur primärseitigen bzw. feuerungstechnischen Emissionsreduzierung werden nachfolgend aufgezählt und mit den theoretischen und experimentellen Erkenntnissen aus dem Projekt „Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen“ erweitert bzw. präzisiert.

Gleichmäßigkeit der Brennstoffdosierung: Die Zufuhr des Brennstoffes in die primäre Reaktionszone muss kontinuierlich oder zumindest quasikontinuierlich in einem großen Leistungsbereich ohne große Schwankungen und möglichst ohne markante Pulse erfolgen. Dabei darf die Brennstoffdosierung keine größeren Störungen des Glutbettes hervorrufen.

Glutbetteinheitlichkeit: Durch die Form des Rostes bzw. der Brennermulde oder des Brennertopfes soll ein gleichmäßig hohes und möglichst ungestörtes Glutbett gewährleistet werden. Das definierte Schüren des

Feuers soll durch bewegliche Elemente erfolgen, d. h. durch eine gleichmäßige langsame Bewegung des Glutbettes ist eine ausreichend hohe Reaktionsrate des entstehenden Gemisches aus Restkoks und Asche sicherzustellen. Dabei soll eine mechanische Trennung von unbrennbarer mineralischer Asche und Restkohlenstoff bzw. Glut und ggf. eine Zerkleinerung größerer Glutstücke bewirkt werden, so dass die aus der Gasphase reagierenden Oxidations- und Vergasungsmittel besser zur reaktiven Oberfläche gelangen können. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Bewegungen im Glutbett nicht zu stark oder ungleichmäßig sind, um eine Aufwirbelung von größeren brennbaren Partikeln zu vermeiden.

Homogenität der Primärluftzufuhr: Die zur Zersetzung und Vergasung notwendigen gasförmigen Oxidations- und Vergasungsmittel sollen in der primären Reaktionszone möglichst gleichmäßig und ohne Erzeugung großer Turbulenzen dem reagierenden Glutbett zur Verfügung gestellt werden. Die Aufwirbelung von Asche und teil- bzw. unverbrannten Feststoffen durch lokale Spitzen der Strömungsgeschwindigkeiten ist zu vermeiden.

Ascheaustragskontinuität: Die bei der Biomasseverbrennung anfallende, ausgebrannte und noch heiße mineralische Asche ist in regelmäßigen Abständen aus der primären Verbrennungszone zu entfernen. Die Zeitintervalle des Ascheaustrages sind hinsichtlich des Aschegehaltes und der Aschezusammensetzung des Brennstoffes zu optimieren. Idealerweise sollte durch die Konstruktion einer geeigneten Rostgeometrie und durch eine speziell angepasste Mechanik ein kontinuierlicher Ascheaustrag und kein punktueller Ascheaustrag erfolgen.

Unterstöchiometrie in der Primärzone (Glutbett): Die definierte unterstöchiometrische Luftzugabe in der primären Reaktionszone zur pyrolytischen Zersetzung und Feststoffvergasung, unter Bildung ausreichend großer Mengen von flüchtigen brennbaren C1- und C2-Kohlenwasserstoffen sowie CO, ist sicher zu stellen. Hierfür ist insbesondere ein definierter und regelbarer Zuluftweg in Verbindung mit einer ansonsten luftdichten Konstruktion notwendig.

Zonierung durch Luftstufung: Eine ausreichende Luftstufung zwischen Primär- und Sekundärreaktionszone ist durch örtlich voneinander getrennte Primär- bzw. Sekundärlufteinlässe vorzusehen. Die möglichst vollständige Verbrennung der noch nicht oxidierten Brenngase zu CO₂ und H₂O (Totaloxidation) bei einem Restsauerstoffanteil im Abgas von typisch ≥ 6 Vol.-% ist zu gewährleisten. Dazu sind der Einsatz geeigneter Sensoren und eine gut einstellbare Sekundärluftzufuhr notwendig. Außerdem ist durch die Gestaltung des Übergangs von Primär- zu Sekundärzone eine Rückdiffusion des Sauerstoffs auszuschließen.

3-T-Regel: In der Verbrennungszone ist, durch entsprechende Auslegung, eine ausreichend hohe aber nicht zu große Verweilzeit bei möglichst hohen Temperaturen und möglichst guter Vermischung von Brenngasen mit dem Oxidationsmittel Sauerstoff einzustellen. Hierfür wird die 3-T-Regel als Faustformel angewandt: „Time (Verweilzeit): $> 0,5$ s; Temperature: $T > 850$ °C; Turbulence: $Re > 2300$ “. Mit sinkender Verbrennungstemperatur muss eine entsprechend höhere Verweilzeit realisiert werden.

Hohe Verbrennungseintrittstemperatur: Die für die Verbrennung benötigte Sekundärluft definiert den Beginn der Sekundärreaktionszone. Deshalb ist zur Erzielung großer Oxidationsgeschwindigkeiten, eine möglichst hohe Gasphasentemperatur (möglichst größer 1000 °C) der gasförmigen Reaktionsmischung bei Eintritt in die Reaktionszone sicherzustellen.

Homogene Sekundärlufteindüsung: Die Eindüsung der Sekundärverbrennungsluft muss eine gute Vermischung von Oxidationsmittel und Brenngasen ermöglichen und darf keine lokale Flammeneinkühlung hervorrufen. Die Geometrie der Sekundärlufteinlässe ist dementsprechend auszulegen und erfordert eine in-situ-Vorwärmung des Sekundärluftstromes durch indirekte Wärmeübertragung zwischen Primärreaktionszone und Sekundärluft.

Kein Flammenanschlag: Durch Auslegung und entsprechende geometrische Gestaltung der Verbrennungszone ist ein Anschlagen von Flammen an den kalten Reaktorwänden möglichst zu vermeiden, um eine lokale starke Auskühlung der Reaktionszone mit einhergehender Auslöschung der Flamme zu verhindern.

Kein Flammenabriss: Trotz einer möglichst hohen Turbulenz zur Erzielung einer guten Durchmischung in der Verbrennungszone ist ein Abreißen der äußeren Flammenbereiche zu vermeiden, weil dies zu einer lokalen Auskühlung der Reaktionszone bzw. zu einer vorzeitigen Auslöschung der Flamme führen kann.

Automatischer Ascheaustrag aus der Verbrennungskammer: Die bei der Verbrennung von aschehaltiger Biomasse entstehenden mineralischen Aerosole werden je nach Ausführung und Gestaltung der Wärmeübertrager an den inneren Flächen des Wärmeübertragers angelagert. Um die Bildung größerer Beläge oder Flocken und den möglicherweise damit einhergehenden Wiedereintrag bereits abgeschiedener Staubpartikel zu verhindern, müssen die Wärmeübertrager in regelmäßigen Abständen automatisch gereinigt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass bei der Abreinigung kein Wiedereintrag der Partikel in den Abgasstrom erfolgt.

Abgasrückführung (AGR): Um bei der Nutzung von asche- und/oder stickstoffreichen Brennstoffen in automatischen Feuerungen eine Brennstoffumsetzung mit reduzierten Staub- und Stickstoffoxidemissionen

zu erzielen, kann eine Abgasrückführung eingesetzt werden. Dadurch wird die Sauerstoffkonzentration des Verbrennungsluftzustroms in der Primärreaktionszone herabgesetzt, weil zur Primärluft mit 21 Vol.-% O₂ eine bestimmte Menge an Abgas mit Sauerstoffkonzentrationen von 6,5 bis 10 Vol.-% zugemischt wird. Die AGR soll bei entsprechender Anpassung der Regelungsparameter dazu führen, dass es bei unterstöchiometrischer Fahrweise in der Primärreaktionszone zu einer Reduzierung des Sauerstoff-Brennstoff-Verhältnisses kommt, wodurch eine Kühlung des Glutbettes durch Herabsetzen der Reaktionstemperatur in der Primärzone erfolgen kann. Dieser Effekt kann die Verflüchtigung mineralischer Aschebestandteile verhindern. Um gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeiten in der Primärzone beizubehalten und in der Sekundärzone mehr Sauerstoff zur Verfügung zu stellen, müssen Primär- und Sekundärluft getrennt und unabhängig voneinander regelbar sein.

Sturzbrand: Der Einsatz einer Feuerung mit nach unten gerichteter Flamme – sogenanntes Unterbrandprinzip oder Sturzbrandprinzip – kann vor allem bei Stückholz eine staub-reduzierte Verbrennung ermöglichen. Bei Stückholzkesseln ist der Einsatz des Unterbrandes Stand der Technik, wobei die Kessel als Stückholzvergaser am Markt angeboten werden. Aber auch vereinzelt bei Stückholzkaminöfen wird das Sturzbrandprinzip genutzt. Zudem werden in Europa lediglich von einem einzigen bekannten Hersteller Pellet- und Hackschnitzelkessel mit Sturzbrand im Nennleistungsbereich von 10 bis 70 kW angeboten. Die emissionsreduzierende Wirkung kann durch die bessere Zonierung der Temperaturprofile im Glutbett begründet werden. Die Primärluft wird dabei in gleicher Richtung der Reaktionsfront im Glutbett geführt, so dass mit steigender Verweilzeit im Glutbett die Gastemperatur steigt. Vor allem bei automatisch beschickten Feuerungen kann durch die Art der Zuführung des Brennstoffes – der Brennstoff wird nicht direkt im „Gegen- oder Querstrom“ zu der Flammenfront dem Glutbett zugeführt – eine ungestörtere Reaktionsfront im Glutbett ermöglicht werden.

Ein weiterer Grund für geringere Emissionen an CO und VOC wird in der katalytischen Wirkung der bei der Biomasseverbrennung gebildeten heißen mineralischen bzw. oxidischen Aschen gesehen. Zudem kommen die Brenngase intensiv mit den glühenden Brennstoffpartikeln in Kontakt. Die bei der Zersetzung und Vergasung des Feststoffes entstehenden organischen flüchtigen Spezies werden an der Oberfläche der heißen Asche oder dem reagierenden Restkoks weiter zersetzt und dabei in reaktive C1- und C2-Gasphasenspezies überführt, die bei ausreichend hohen Temperaturen und definierter Zumischung von Verbrennungsluft schnell zu den Zielprodukten der vollständigen Verbrennung (CO₂, H₂O) oxidiert werden.

Katalytische Emissionsminderung

Zusätzlich zur Minderung von Staub- und CO-Emissionen ist die Reduzierung organischer Verbindungen aus Holzfeuerungen notwendig. Grundsätzlich können oxidierbare flüchtige Kohlenwasserstoffe durch eine katalytische Nachverbrennung abgebaut werden. Deshalb wurden in abgeschlossenen Projekten /Bin11-01/ und einem Verbundvorhaben mit Demonstrationscharakter /DBF12/ Untersuchungen zum Katalysatoreinsatz an Biomassekleinfeuerungsanlagen durchgeführt. Im Abschlussbericht /Bin11-01/ ist eine umfangreiche Übersicht zu Katalysatorsystemen und Abscheidern aus Forschung und Praxiseinsatz vorhanden. Zudem wurden Abgaskomponenten und -eigenschaften analysiert und die Entwicklung einer Katalysatorversuchsanlage mit realem Abgas durchgeführt. Zusammenfassende Darstellungen der Ergebnisse finden sich in den Publikationen /Har10/, /Bin11-02/ und /Bin11-03/, wobei die vorgestellten experimentellen Untersuchungen nachfolgende Ergebnisse zeigten /Bin11-01/.

Eine katalytische Minderung sowohl von CO als auch von organischen Verbindungen an Einzelraumfeuerstätten ist möglich /Bin11-04/. Neben der Entwicklung speziell adaptierter Katalysatoren ist es notwendig, durch kombinierte Verfahren eine vorgeschaltete Staubabscheidung zu erzielen, weil Katalysatoren grundsätzlich nicht zur Abscheidung und Zurückhaltung von nicht oxidierbaren Partikeln geeignet sind, da die Wirkung durch Staubablagerungen auf der aktiven Oberfläche sinkt.

Die analysierten Staubproben zeigten eine Bandbreite verschiedener organischer Kohlenstoffverbindungen, darunter aliphatische Verbindungen, Benzolderivate und PAK. Der Staub aus der Verbrennung des eingesetzten Fichtenholzes zeigte deutlich höhere PAK-Gehalte und auch eine höhere Vielfalt an polyzyklischen aromatischen Verbindungen im Vergleich zum verwendeten Buchenholz.

Die elektrostatische Vorreinigung der staubbeladenen Abgase konnte die Staubbelastung des Katalysators deutlich reduzieren. Damit lässt sich eine Verblockung des freien Strömungsquerschnittes verhindern, wodurch die Standzeit erhöht und die Reinigungsintervalle verlängert werden können.

Ein Einfluss der katalytischen Abgasnachbehandlung auf die Staubzusammensetzung konnte anhand der vorliegenden Untersuchungen nicht eindeutig nachgewiesen werden. Zur Verifizierung der Ergebnisse ist es notwendig, die Staubprobenahme auf Basis von speziellen Prüfverfahren in einer größeren Messreihe durchzuführen. Die größere Stichprobe ist dann auf Basis von GC/MS-Verfahren hinsichtlich der PAK- und PCDD/PCDF-Gehalte zu analysieren.

Um die Wirksamkeit des Katalysators für Kleinfeuerungsanlagen während des gesamten Verbrennungsvorganges zu gewährleisten, muss dieser zu jedem Zeitpunkt der Verbrennung die für die

katalytische Umsetzung erforderliche Mindesttemperatur aufweisen. Wie die durchgeführten Messungen /But09/ ergeben haben, ist eine Beheizung des Katalysators in den Anfahr- und Ausbrandphasen bzw. beim Nachlegen hilfreich. In der stationären Verbrennungsphase entstehen bei einer guten Verbrennungsluftregelung in der Regel nur geringe Mengen an Schadstoffen.

Weiterhin kann es bei längerem Betrieb zu einer Verblockung des Katalysators durch Ruß- und Aschebestandteile kommen. Daher ist ein Abbrandmodus notwendig, bei dem der Katalysator auf eine hohe Temperatur gebracht wird, so dass Rußablagerungen oxidiert werden. Ebenso sollte ein manueller oder auch automatischer Reinigungsmechanismus vorgesehen werden, durch den die Aschebestandteile vom Katalysator entfernt werden.

Selbstverständlich ist zur optimalen Wirkung einer katalytisch gestützten Abgasnachbehandlung eine optimale Verbrennungsluftregelung eine Voraussetzung /But09/. Die Argumente hinsichtlich der hierfür notwendigen Abgassensorik beim Betrieb einer HHS-Anlage sind sehr ähnlich zu denen, die bereits im Hinblick auf die katalytisch gestützte Abgasnachbehandlung für scheitholzbetriebene ERF genannt wurden.

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen von Beratungen und Workshops sowie auf Tagungen und Veranstaltungen wurden Erkenntnisse vorgestellt und diskutiert. Ansonsten erfolgte keine weitergehende Zusammenarbeit mit anderen Stellen, welche direkt diesem Vorhaben zuzuordnen sind.

Das Projektkonsortium (Verbundpartner, Auftragnehmer und assoziierte Partner) ist in Abschnitt I.1 aufgeführt.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

1.1 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 1: Theoretische und Experimentelle Untersuchungen, Koordination, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Katalysatorkonzept, Katalysatoradaption und -integration an der Einzelraumfeuerung

Am DBFZ wurde eine von der Firma Brunner ausgewählte und zur Verfügung gestellte Scheitholzeinzelraumfeuerung getestet, mit integrierten Katalysatoren ausgestattet (siehe Abbildung 4) und dann erneut auf dem Prüfstand gemessen. Das Integrationskonzept wurde mit den FuE-Fremdleistern Brunner und ETE abgestimmt und die Ergebnisse gemeinsam diskutiert. Zudem wurden in Vorversuchen Messungen mit einem Elektroabscheider durchgeführt, der jedoch noch nicht auf die Abgasbedingungen des Scheitholzofens abgestimmt war. Diese Messungen haben gezeigt, dass zu hohe Temperaturen für den Standard-ESP (Electrostatic precipitator) am Hochspannungsisolator auftraten, damit Kriechströme eine Schwächung des Feldes verursachten und daraus nicht ausreichende Abscheidegrade resultierten. Mit dem integrierten Katalysator konnten die CO und VOC-Emissionen um ca. 50 % gemindert werden. Zu beachten ist noch, dass die Werte an einer modifizierten Brunner-Feuerung gemessen wurden, wobei die grundsätzlich elektronisch zu steuernden Klappen händisch nach festgelegtem Programm gestellt wurden. Die Werte können somit nicht auf die marktverfügbare Einzelraumfeuerung von Brunner übertragen werden. Dies war erst möglich, nachdem die Arbeiten am ISIS der Hochschule Karlsruhe zur Verbrennungsluftregelung stattfanden und die Luftklappen elektronisch angesteuert werden konnten. In Tabelle 1 sind die Daten der Emissionsmessungen aufgeführt.

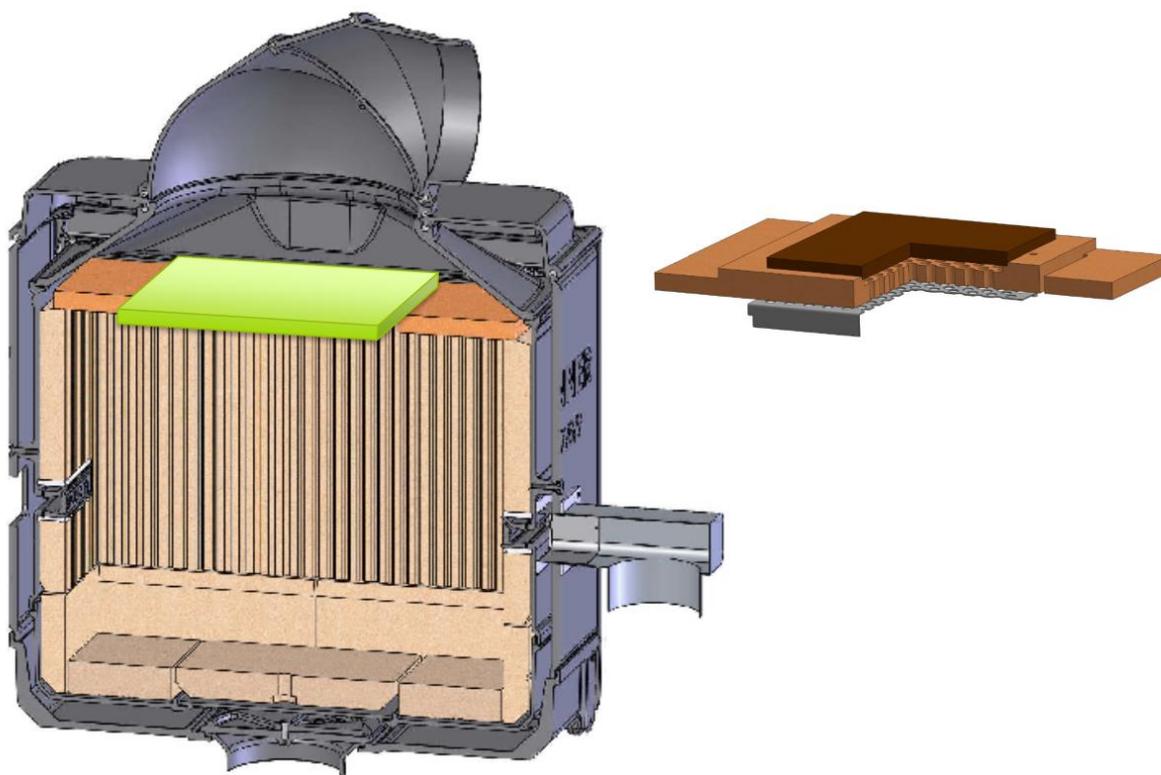


Abbildung 4: Katalysator-Positionierung in Brunner-Feuerung (links) und Halterungskonzept (rechts)

Die Ergebnisse zeigten, dass weiteres Optimierungspotenzial vorhanden war. Daher wurde die Katalysatorintegration in Absprache von Brunner, ETE und DBFZ angepasst, vgl. Abbildung 5. In dieser Variante wurden die Umlenkplatte und der Katalysator voneinander getrennt. Durch die zusätzliche Umlenkung sollte eine bessere Anströmung und damit höhere Minderungsgrade erreicht werden.

Diese so ausgestattete Feuerstätte wurde nach Umbau durch Firma Brunner wieder zur weiteren Messung am DBFZ getestet und mit nachgeschaltetem ESP erneut einem ausführlichen Vergleichstest unterzogen. Diese Messungen dienen als Vorbereitung der geplanten Feldtests an der Brunner-Feuerung in den nachfolgenden Heizperioden.

Zudem wurde ein 2-stufiges Katalysatorsystem konzeptioniert, welches zusätzlich getestet wurde. Hierbei können auf der Anströmseite der Flammprallplatten jeweils Katalysatoren zur Staubbminderung zusätzlich

angebracht werden. Diese Messungen konnten jedoch wegen Zeitmangel nicht im Rahmen dieses Projekt durchgeführt werden.

Tabelle 1: Emissionswerte an der Brunner-Einzelraumfeuerung mit und ohne Katalysator

Aufbau	Datum	Messung	O ₂ / Vol.-%	CO	VOC	PM Gravi.	PM SMPS
Ohne Katalysator	12.09.2019	Ohne ESP	15,6	3070	298	48	21
	12.09.2019	Mit ESP	15,1	2056	163	42	26
	18.09.2019	Ohne ESP	15,9	3524	228	58	33
	18.09.2019	Mit ESP	16,5	2975	171	36	18
Mit Katalysator	25.09.2019	Ohne ESP	14,7	1524	137	71	81
	25.09.2019	Mit ESP	14,2	1062	42	47	35
	01.10.2019	Ohne ESP	15,1	1705	223	33	113
	01.10.2019	Mit ESP	15,6	563	65	55	18
Mittelwert ohne Kat			15,8	2906	215	46	24
Mittelwert mit Kat			14,9	1214	117	51	62
Änderung			6%	58%	46%	-11%	-154%

Hartmann, Ingo:
Staubmessung ungültig!
Abgesaugtes Volumen
nur geschätzt!

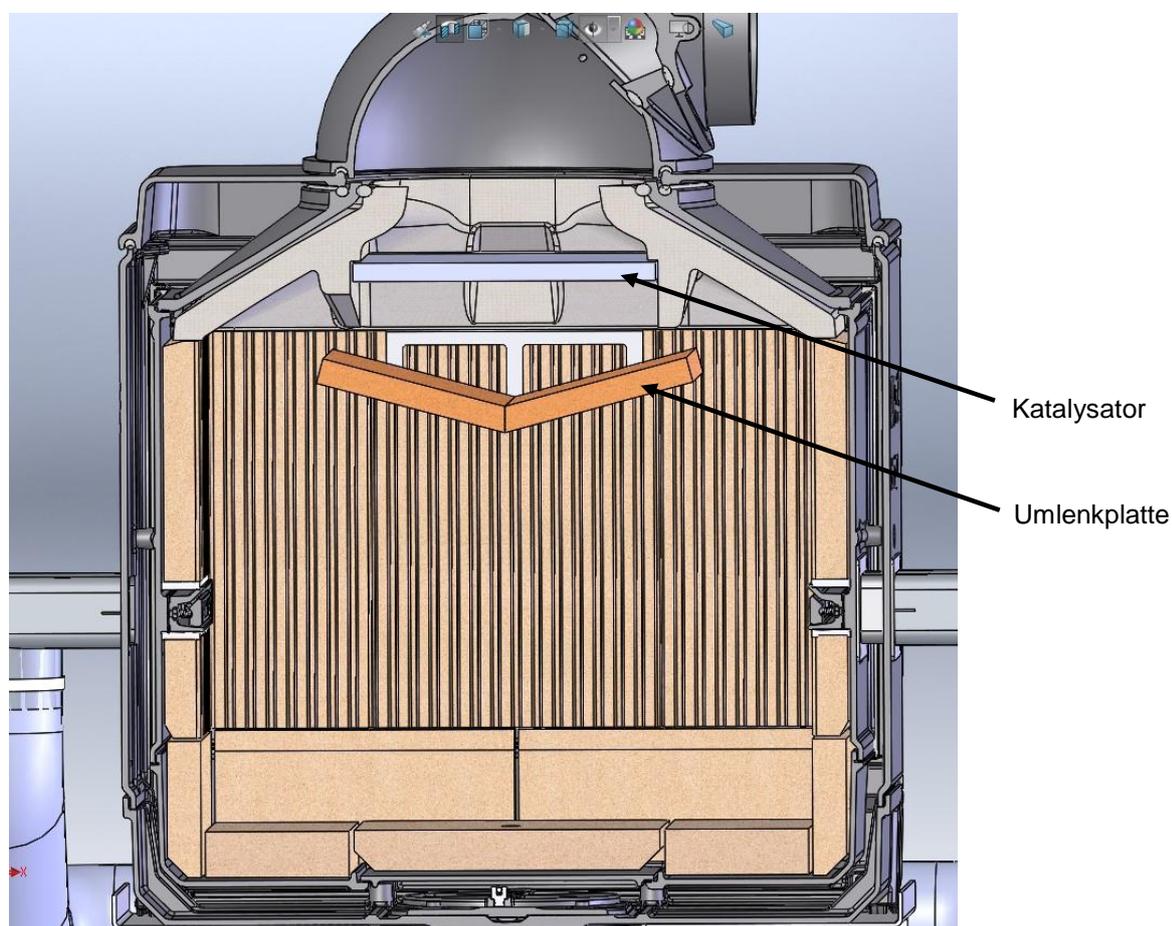


Abbildung 5: Neues Katalysatorkonzept Brunner-Einzelraumfeuerung

Anlagenkonzept, Aufbau, Installation und Inbetriebnahme Kessel und Abscheider

Die Entwicklung der Kesselanlage mit SPS-basierter Regelung und dem von A.P. Bioenergietechnik GmbH ausgelegten ESP wurde vom DBFZ in Abstimmung mit A.P. Bioenergietechnik GmbH durchgeführt. Die Anlage am DBFZ und am Feldstandort in Hirschau wurde aufgebaut (vgl. Abbildung 6). Diese beiden Anlagen (1. Prüfstand am DBFZ, 2. Feldanlage in Hirschau) beinhalten einen Kessel, jeweils eine SPS und den Elektroabscheider, der in Abbildung 7 als Zeichnung (DBFZ-Variante) dargestellt ist.



Abbildung 6: Installierter ESP und Installation der SPS

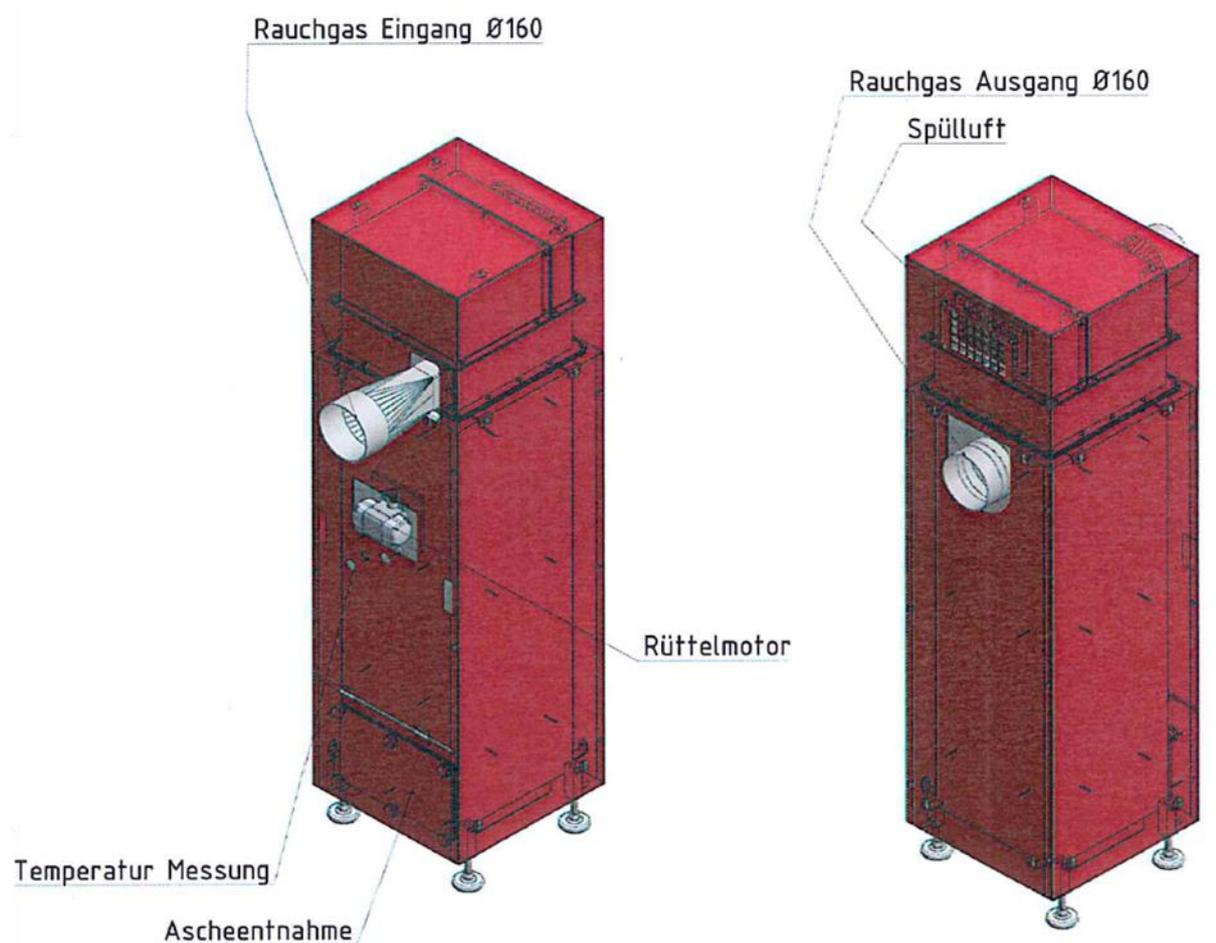


Abbildung 7: ESP für die Kesselanlagen von Ökotherm-Kessel des DBFZ

In der ersten Heizperiode im Projekt (2019-2020) wurden erste Messungen an der Feldanlage in Hirschau mit dem Daten-Monitor der Firma Sick aus dem Vorläuferprojekt SenSTEF und den verfügbaren Sensoren durchgeführt. Die Daten wurden ausgewertet und die Sensoren überprüft.

Im Rahmen der Vorbereitung für die Demonstrationsphase wurde gemeinsam mit dem Verbundpartner A.P. Bioenergietechnik GmbH ein Monitor am Feldmessstandort in Hirschau aufgebaut und in Betrieb genommen. Des Weiteren erfolgte die Installation von fünf, gemeinsam im Verbund ausgewählten CO/HC-Sensoren [1 x CarboSen 1K, 1 x CarboSen 10K, 1 x KS1D, (alle LAMTEC), 2 x TGS 823 (Figaro Inc.)] in einer speziell angefertigten Messtrecke im Abgas der Feldanlage. Der prinzipielle Aufbau des Monitors und der Sensoren können der Abbildung 8 entnommen werden. Neben der Installation der CO/HC-Sensoren wurde die Anlage zusätzlich mit zwei Massenströmsensoren [HMF7 (Bosch)] sowie einer Lambdasonde [LSU 4.9 (Bosch)] ausgerüstet. Die Temperaturen der Feldanlage wurden mit Thermoelementen (Typ K) im Brennraum und an zwei unterschiedlichen Stellen im Abgasrohr bestimmt.



Abbildung 8: Monitor und Sensoren an der Feldtest-Hackschnitzelanlage der Firma A.P. Bioenergietechnik in Hirschau. Links: Abgassensorik mit Verkabelung. Rechts: Feuerungsprozessmonitor Sick AG

Entwicklung und Adaptierung der Emissionsminderungsmaßnahmen am HHS-Kessel

Zur Untersuchung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Sensoren wurden Messungen an der automatischen Hackschnitzelanlage vorgenommen. Bei der am Feldstandort in Hirschau eingesetzten Anlage handelte es sich um einen Multifuelkessel mit 88 kW Nennleistung, welcher mit Holzhackschnitzeln betrieben wurde. Mittels Monitor erfolgte die Datenaufzeichnung aller Sensoren kontinuierlich über die gesamte Heizperiode 2019/2020. Zusätzlich wurden 3 Feldmessungen vor Ort, jeweils im Abstand von ca. 4 Wochen, durchgeführt. Im Rahmen der vor Ort stattgefundenen Messungen kam ein mobiles Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) zum Einsatz, welches die entstehenden Abgaskomponenten quantitativ erfasste. Diese Daten dienten als Grundlage zur Auswertung und Interpretation der jeweiligen Sensorsignale. Die Bestimmung der Staub- bzw. Partikelmasse erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1: „Staubmessung in strömenden Gasen – gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung“. Für die Messung erfolgte eine isokinetische Teilstromentnahme aus dem Kernstrom des Abgases. Um isokinetische Bedingungen zu gewährleisten, wurde eine automatische Isokinetikregelung ITES der Paul Gothe GmbH eingesetzt. Insgesamt wurden pro Feldmessung 3 gravimetrische Staubmessungen durchgeführt. Die mittels Monitor aufgezeichneten Daten wurden regelmäßig durch das DBFZ ausgewertet und mit den Verbundpartnern diskutiert. Der Zugriff auf den Monitor vor Ort funktionierte über die gesamte Heizperiode problemlos. Der Betrieb der Sensoren erfolgte während der gesamten Demonstrationsphase ebenfalls stabil. Die Auswertung der Messungen vor Ort zeigte dabei eine gute Übereinstimmung zwischen dem mittels Messgerät ermittelten CO-Verlauf und den Signalen der CO/HC-Sensoren. Die Signalstärke der einzelnen untersuchten Sensoren wurde jedoch von Messung zu Messung etwas geringer, was auf einen Sensitivitätsverlust schließen lässt. Der Signalverlauf der untersuchten CO/HC-Sensoren aufgetragen gegenüber den mittels mobilem FTIR gemessenen CO-Konzentrationen an der Feldanlage im Rahmen der Demonstrationsuntersuchungen kann der Abbildung 9 entnommen werden.

Die während der Demonstrationsphase eingesetzten O₂-Sonden lieferten durchgängig über die gesamte Heizperiode plausible Werte (vgl. Abbildung 10).

Während der Messungen vor Ort wurden jeweils drei Staubproben gravimetrisch entnommen. Werden jeweils die Mittelwerte über drei Staubproben an den einzelnen Messtagen verglichen, so ergaben sich an allen Messtagen jeweils eine Konzentration (ohne Abscheider) von rund 100 mg/m³ i.N. (bei 13 % Vol.-% O₂).

Die Feldmessungen im Rahmen der Heizperiode wurden aufgrund der Wettersituation bereits Ende Februar und somit eher als ursprünglich geplant unterbrochen. Die Sensoren sowie der Monitor an der Feldanlage wurden zurückgebaut. Danach erfolgte der Aufbau des Monitors und ausgewählter Sensoren auf dem Prüfstand im Technikum des DBFZ für weiterführende Messungen.

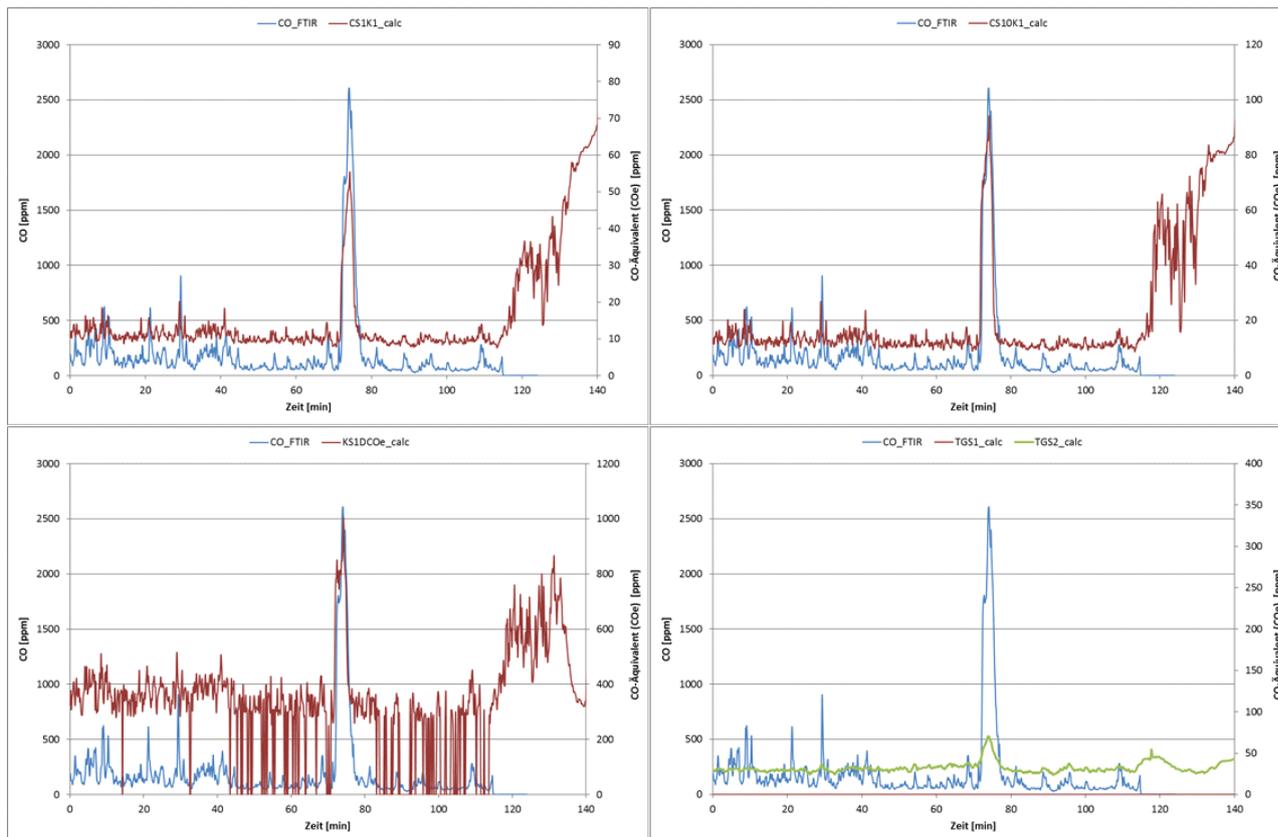


Abbildung 9: Vergleich der Signalverläufe der untersuchten CO/HC-Sensoren und den mittels mobilem FTIR gemessenen CO-Konzentrationen an der Feldanlage im Rahmen der Demonstrationsuntersuchungen

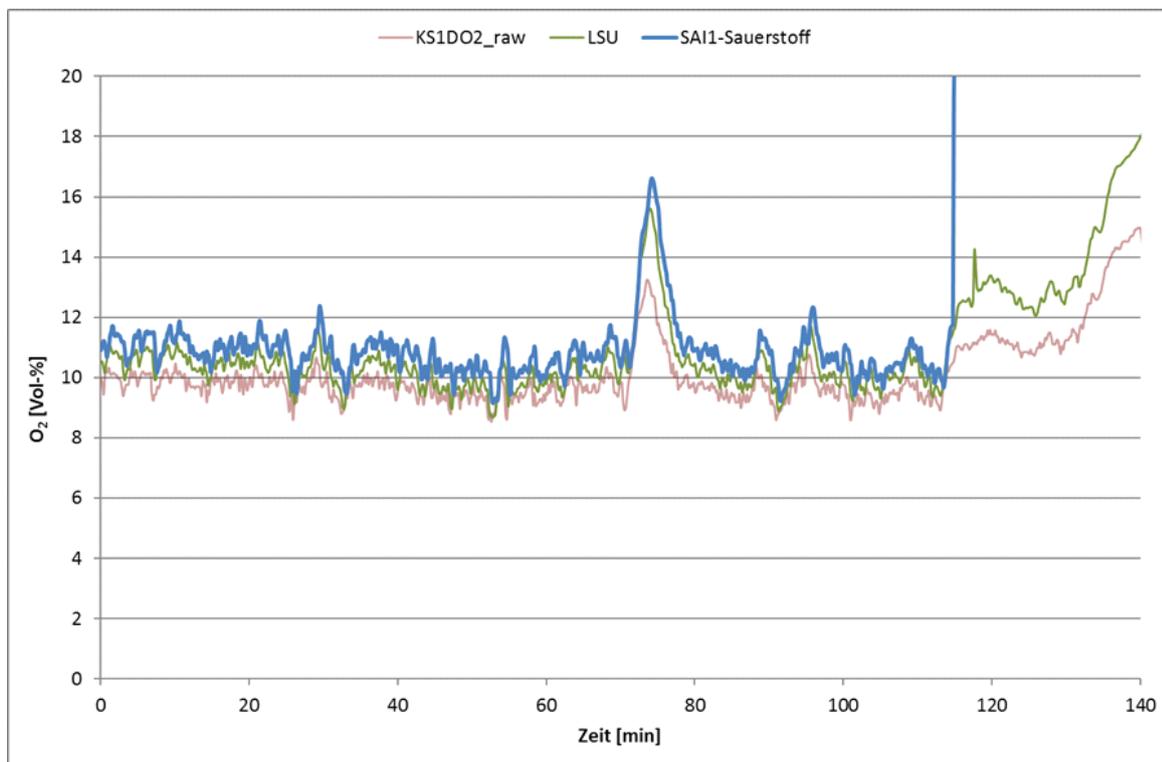


Abbildung 10: Vergleich der Signalverläufe der eingesetzten O₂-Sonden und der mittels mobilem FTIR gemessenen O₂-Konzentrationen an der Feldanlage im Rahmen der Demonstrationsuntersuchungen

Regelungsentwicklung auf Basis einer SPS und Integration der CO/HC-Sensoren

Der Aufbau und die Inbetriebnahme bzw. die Weiterentwicklung der SPS wurde im Technikum am DBFZ durchgeführt. Die Zusammenarbeit erfolgte in enger Abstimmung mit den Mitarbeitern des Projektpartners A.P. Bioenergietechnik GmbH.

So wurden am Prüfstand im Technikum des DBFZ sowohl die SPS als auch der Elektroabscheider aufgebaut und in Betrieb genommen. Der entsprechende Aufbau der Anlage kann der Abbildung 11 entnommen werden.



Abbildung 11: Aufbau der Versuchsanlage auf dem Prüfstand am DBFZ; oben links: Multifuelkessel Ökotherm mit 49 kW Nennleistung; oben rechts: Elektroabscheider mit nachgeschalteter Messstrecke und CO/HC-Sensoren; unten SPS

Als Steuerung wurde eine S7-1510SP 1 PN verbaut, welche zunächst 10 Module umfasste und auf maximal 12 Module erweitert werden kann. Der größte Teil der Steuerungsmodule waren DI/DO Module, die für die Steuerung des Kessels benötigt wurden. Des Weiteren wurden Thermoeminent- und PT100-Module sowie 3

Spannungsmodule eingebaut, um Temperaturen sowie den Sauerstoffgehalt über eine Bosch-Lambdasonde (LSU4.0) zu erfassen.

Nach dem erfolgreichen Aufbau und der Inbetriebnahme der neuen Kesselsteuerung wurden an dieser Ausbaustufe zahlreiche Anpassungen und Weiterentwicklungen durchgeführt. So war eine angestrebte kontinuierliche Brennstoffzuführung der Hackschnitzel mit dem bisher verbauten Motor mit seinen vorhandenen elektrischen Eigenschaften an der Brennstoffschnecke nicht möglich. Außerdem konnte der Kessel nicht mehr in Teillast betrieben werden, da eine Überhitzung des Motors nicht ausgeschlossen werden konnte. Deshalb wurde ein neuer Motor beschafft und installiert und in die SPS eingebunden. Somit ist nun eine über den gesamten Versuchstag kontinuierliche Brennstoffdosierung sowie ein Teillastbetrieb des Kessels möglich. Die ersten Versuchsreihen zur Untersuchung der Sensoren mussten noch im Taktbetrieb und somit unter Volllast erfolgen. In einem weiteren Schritt wurden die vom Projektpartner LAMTEC zur Verfügung gestellten CO/HC-Sensoren (LH64 und LH68) in die SPS integriert. Diese konnten damit ebenfalls direkt über die Kesselsteuerung ausgelesen werden. Die optische Visualisierung erfolgte über das HMI-Panel, wodurch auch während des Versuchsbetriebs eine Kontrolle der jeweils aktuellen Messwerte der Sensoren ermöglicht wurde (vgl. Abbildung 12).



Abbildung 12: Visualisierung der Sensordaten an der SPS im Technikum am DBFZ mittels HMI-Panels

Des Weiteren wurde der Sensor der Universität Bayreuth im Abgasstutzen installiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Dieser wurde nicht über die Kesselsteuerung, sondern mittels Datenlogger ausgelesen. Die jeweiligen Messdaten wurden nach Abschluss eines Versuchstages dem Projektpartner der Universität Bayreuth zur Auswertung zur Verfügung gestellt. Zusätzlich zu den Sensoren wurden weitere wichtige Messwertaufnehmer in die SPS eingebunden. So war es abschließend möglich, über die SPS den Druck zur Ermittlung des Gasvolumenstroms in der Abgasanlage zu erfassen. Zwei Massenstromsensoren der Firma Bosch wurden ebenfalls integriert, womit nun die kontinuierliche Erfassung der einzelnen Luftströme (Primär-, Sekundärluft) erfolgt. Durch ein zusätzliches Softwareupdate, welches durch den Projektpartner A.P. Bioenergietechnik GmbH nach Vorgaben des DBFZ zur Verfügung gestellt wurde, konnten sämtliche Kesseldaten über das HMI-Panel auf einem USB-Stick gespeichert und ausgewertet werden. Im Rahmen der Prüfstandsuntersuchungen sowie einer Bachelorarbeit wurde die SPS unter Berücksichtigung der Signale der CO/HC-Sensoren weiterentwickelt.

Prüfstandsuntersuchungen am Kessel mit SPS-Regelung sowie Staubabscheider

Am Prüfstand im Technikum des DBFZ erfolgten Emissionsmessungen am Hackschnitzelkessel mit der neuen SPS. Neben dem Elektroabscheider waren drei CO/HC-Sensoren verbaut. Zwei Sensoren wurden vom Projektpartner LAMTEC (LH64 und LH68) zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wurde der Sensor der Universität Bayreuth eingesetzt. Alle Sensoren wurden über einen Stutzen in der Abgasanlage des Hackschnitzelkessels in reales Abgas eingebracht. Die Messdaten der beiden Sensoren der Firma LAMTEC wurden ausgewertet und grafisch aufbereitet. Die Ergebnisse des Sensors der Universität Bayreuth wurden dem Projektpartner zur Verfügung gestellt und auch von diesem ausgewertet. Die Messungen erfolgten immer über einen Versuchstag mit ca. 5 Stunden Volllastbetrieb des Kessels. Dabei erfolgte die Gasanalytik mittels FTIR kontinuierlich über die gesamte Versuchsdauer. Auf diese Weise ließen sich die Sensorsignale mit dem Summensignal der gemessenen Gaskonzentrationen vergleichen. In der Abbildung 13 sind die Signalverläufe der beiden Sensoren LH64 und LH68 exemplarisch für einen Versuchstag dargestellt. Beim Vergleich der beiden Signalverläufe wird deutlich, dass beide Sensoren vor allem während der quasistationären Phase (Volllastbetrieb) sehr gut übereinstimmen. Geringe Abweichungen zeigen die

Sensoren untereinander hingegen in der Start- als auch in der Ausbrandphase des Kessels. Vor allem in der Ausbrandphase zeigte sich der Sensor LH68 im Vergleich zum LH64 etwas sensitiver.

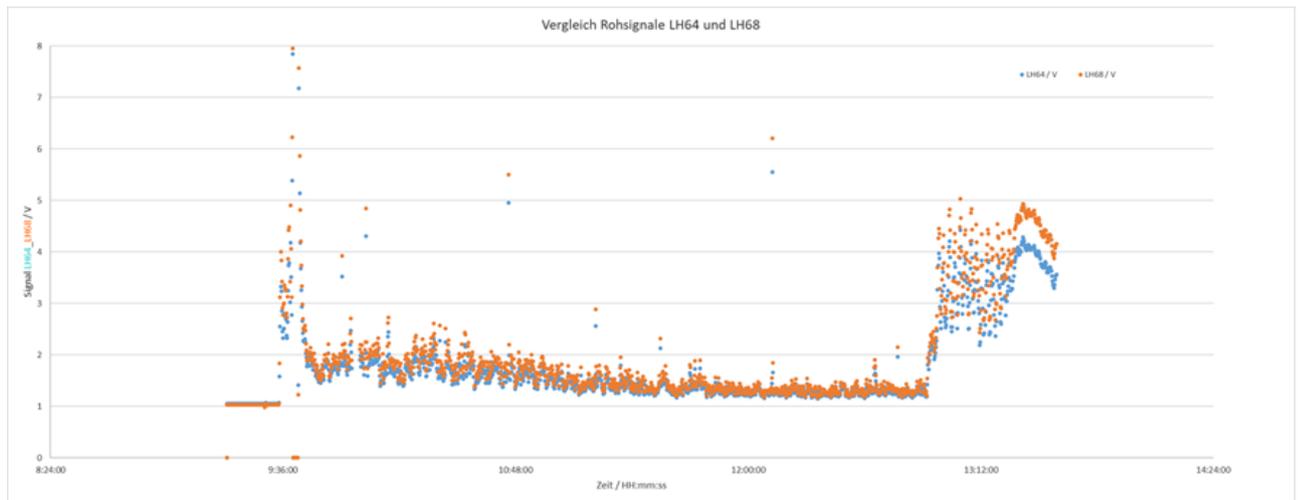


Abbildung 13: Vergleich der gemessenen Rohsignale für die Sensoren LH46 und LH68 an einem Versuchstag

Um einen Vergleich der Sensorsignale mit den mittels FTIR gemessenen Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffen zu ermöglichen, wurde ein Summsignal aus beiden Konzentrationen gebildet. Dazu wurden beide Konzentrationen anhand von Erfahrungswerten aus Vorgängerprojekten durch unterschiedliche Faktoren gewichtet und anschließend zu einem Summsignal aufaddiert. Der Verlauf der mittels FTIR gemessenen Konzentrationen für Kohlenstoffmonoxid, flüchtige organische Verbindungen sowie das Summsignal aus beiden Konzentrationen kann der Abbildung 14 entnommen werden.

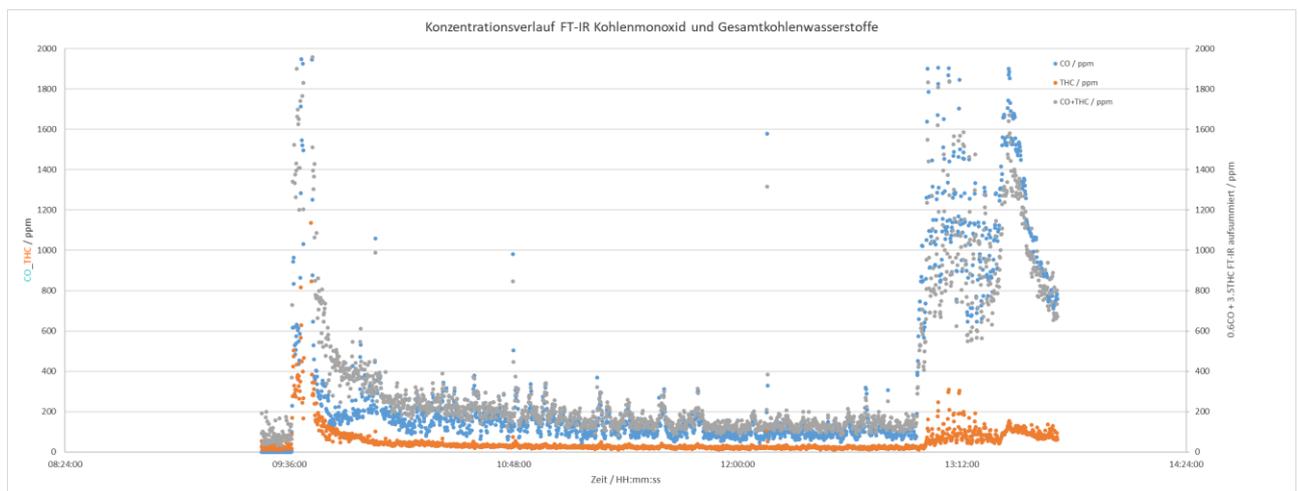


Abbildung 14: Konzentrationsverlauf für Kohlenstoffmonoxid, Gesamtkohlenwasserstoffe sowie Summsignal aus beiden gasförmigen Bestandteilen

Der Abbildung 15 bzw. Abbildung 16 kann der jeweilige Signalverlauf des CO/HC-Sensors LH64 bzw. LH68 entnommen werden. In der Abbildung 15 (oben) ist der Verlauf des Summsignals aus Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenwasserstoffen gegenüber den Signalen des CO/HC-Sensors LH64 aufgetragen. Im Hinblick auf den Verlauf gab es eine sehr gute Übereinstimmung. Das Sensorsignal zeigte jedoch im Vergleich zum Summsignal eine geringere Intensität. Dies wird wiederum vor allem in der Start- und der Ausbrandphase sehr deutlich. Deshalb wurden die zuvor für Kohlenstoffmonoxid und Gesamtkohlenwasserstoffe festgelegten Gewichtungsfaktoren noch einmal angepasst. Während der Faktor zuvor für Kohlenstoffmonoxid bei 0,6 und für Gesamtkohlenwasserstoffe bei 3,5 lag, betragen diese nach erfolgter Anpassung für Kohlenstoffmonoxid 0,4 und für die Gesamtkohlenwasserstoffe 2,9. Beim erneuten Vergleich des Verlaufs von Summsignals und Sensorsignal ergab sich eine vor allem in der Start- und Ausbrandphase deutlich genauere Übereinstimmung der beiden Signalverläufe (siehe Abbildung 15 unten). Diese Auswerteroutine wurde auf alle nachfolgenden Messtage übertragen, wodurch Rückschlüsse auf die jeweilige Sensorstabilität mit zunehmender Betriebsdauer möglich waren. Im Rahmen der Messungen über mehrere Wochen konnte dabei ein leichter Intensitätsverlust hinsichtlich des detektierten Sensorsignals beobachtet werden.

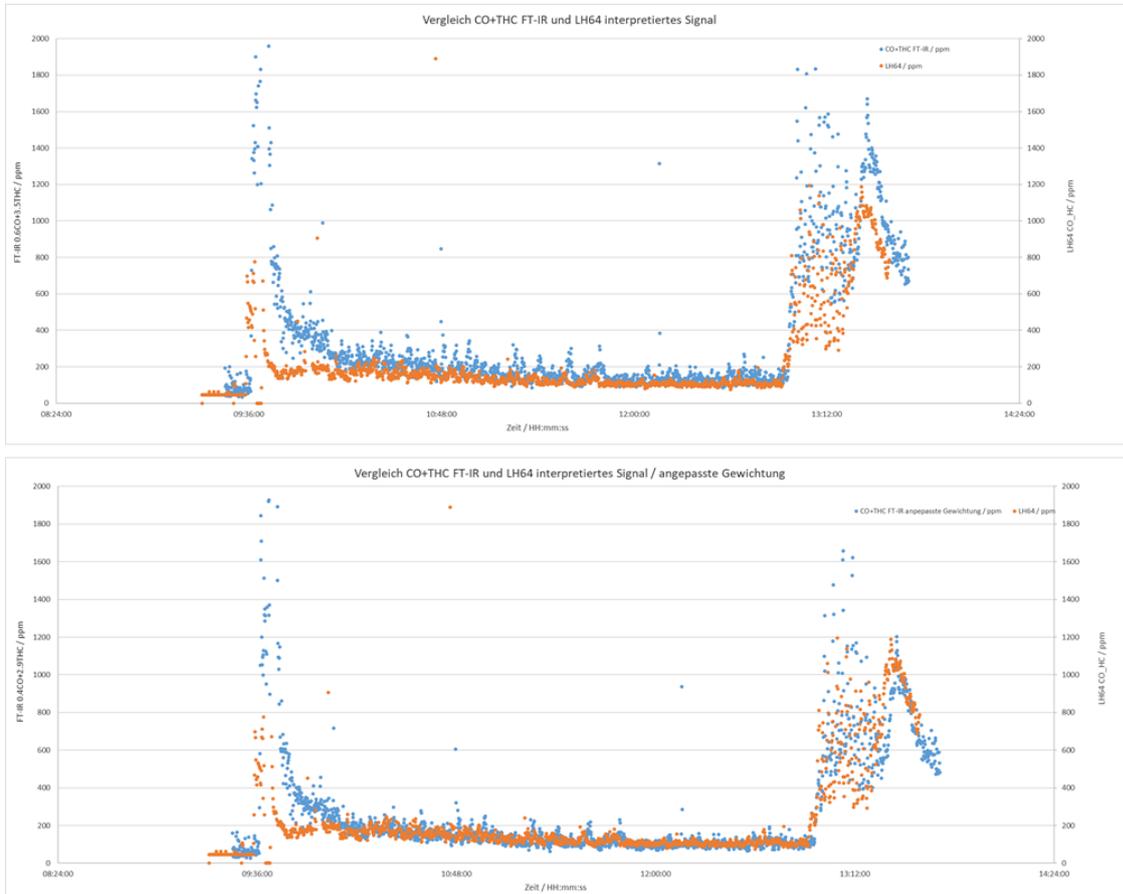


Abbildung 15: Vergleich zwischen Summensignal und Sensorsignal, oben mit alten Gewichtungsfaktoren, unten mit angepassten Gewichtungsfaktoren für den Sensor LH64



Abbildung 16: Vergleich zwischen Summensignal und Sensorsignal, oben mit alten Gewichtungsfaktoren, unten mit angepassten Gewichtungsfaktoren für den Sensor LH68

Der Intensitätsverlust betrug am Ende etwa 15 % im Vergleich zum Beginn der Messkampagne und hatte sich auf diesem Niveau stabilisiert. Die letzten Messergebnisse zeigten teilweise wieder eine leichte Zunahme der Signalintensität.

Messungen ohne und mit Emissionsminderungsmaßnahmen und schrittweisen Optimierungen

Es wurden im weiteren Verlaufe des Projektes zahlreiche Messungen am Kessel auf dem Prüfstand durchgeführt. Den erreichten Stand bezüglich der Verbrennungsgüte (Berechnung nach SenSTEF) vor der abschließenden Demonstrationsphase in der Heizperiode 2021/2022 zeigt Abbildung 17.

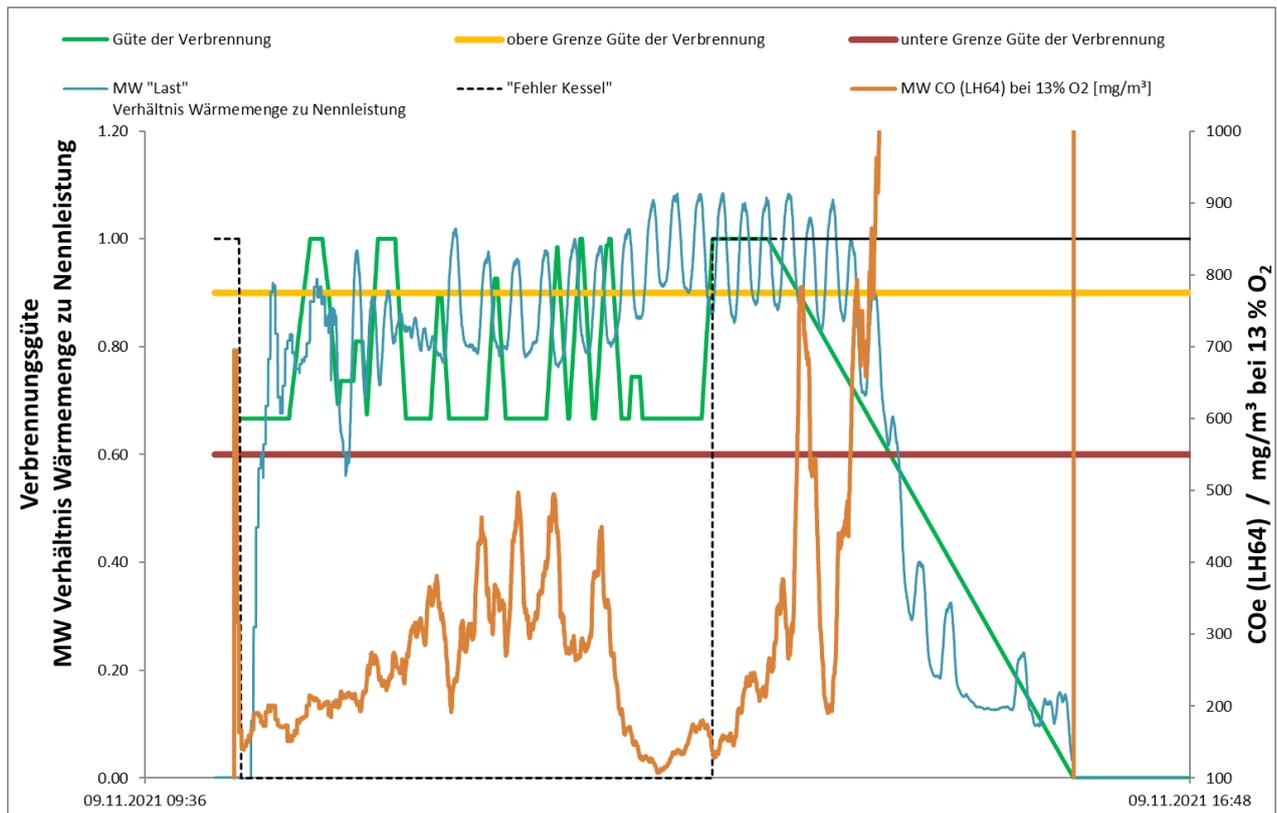


Abbildung 17: Erreichter Stand zur Verbrennungsgüte am Prüfstand vor der Demonstrationsphase (vor Heizperiode 2021/2022)

Die gemessene Staubwerte mit optimiertem ESP lagen bei 3 mg/m^3 i.N. bezogen auf 13 Vol.-% O_2 .

Da die CO-Emissionen nur knapp unter dem Grenzwert von $0,4 \text{ g/m}^3$ i.N. bezogen auf 13 Vol.-% O_2 lagen, wurden in den Wärmeübertragerrohren des Kessels am Gaseintritt speziell ausgelegte metallfoliengetragene Katalysatoren der Firma Blue Fire GmbH integriert und getestet. Die Ergebnisse bezüglich CO und VOC mit und ohne Katalysator sind in Abbildung 18 zum Vergleich dargestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Katalysator vor allem hinsichtlich Kohlenstoffmonoxid eine erhebliche weitere Minderung ermöglicht. Die Werte ohne Katalysator von etwa $0,4 \text{ g/m}^3$ i.N. bezogen auf 13 Vol.-% O_2 konnten durch den Katalysator auf deutlich unter $0,1 \text{ g/m}^3$ i.N. bezogen auf 13 Vol.-% O_2 abgesenkt werden und sind damit sehr positiv zu bewerten.

Praxismessungen mit den Katalysatoren konnten im Rahmen des Projektes an der Feldanlage leider nicht durchgeführt werden.

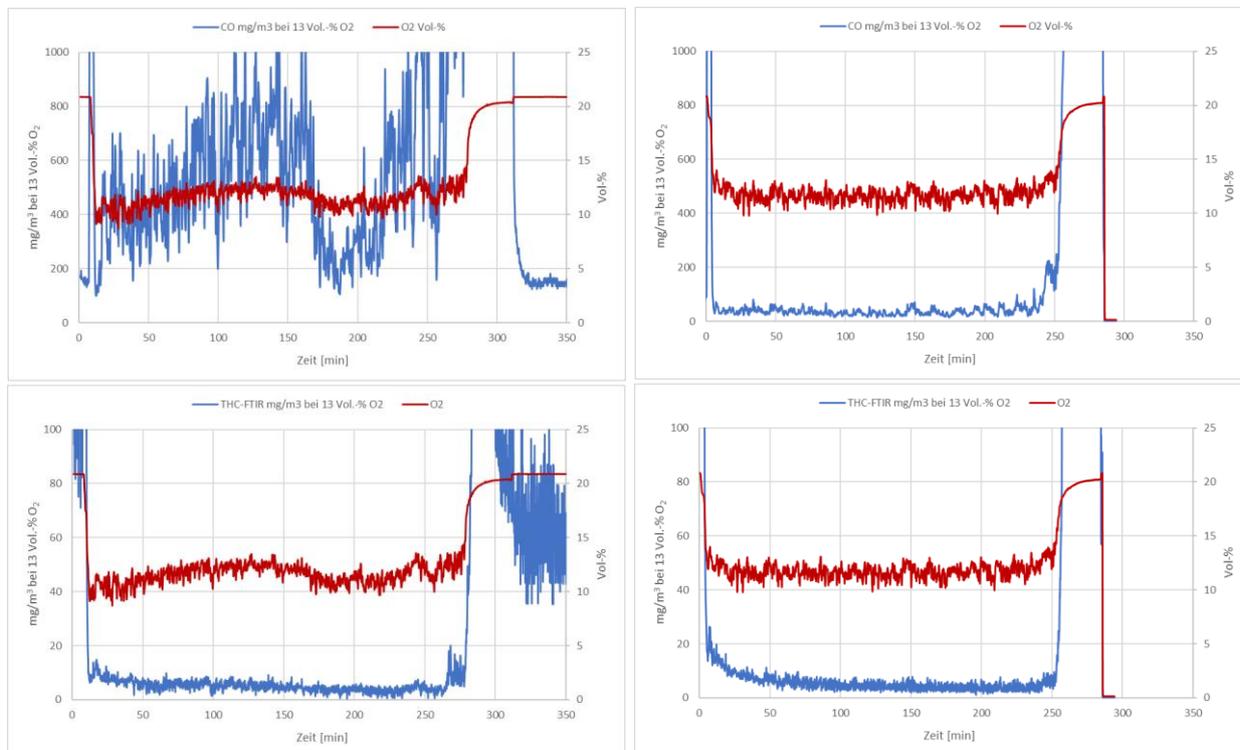


Abbildung 18: Emissionen an Kohlenstoffmonoxid (oben) und Kohlenwasserstoffen (unten) am Kessel ohne Katalysator (links) und mit Katalysator (rechts)

Feldmessungen am HHS-Kessel mit optimierter SPS-Regelung

Im Rahmen der Feldmesskampagne konnte aufgrund der Corona-Pandemie lediglich ein Termin zu Beginn der Heizperiode 20/21 (Oktober 2020) unter Beteiligung von DBFZ-Mitarbeitenden durchgeführt werden. Dazu wurde der Daten-Monitor (Firma Sick) aus dem Vorgängerprojekt SenSTEF an der Feldanlage in Hirschau aufgebaut und in Betrieb genommen. Durch die nachfolgend wieder verschärften Corona-Einschränkungen konnten zunächst keine weiteren Feldmessungen durch das DBFZ an der Feldanlage durchgeführt werden. Die Messungen an der Feldanlage erfolgten deswegen durch Mitarbeitende des Partners A.P. Bioenergie-technik GmbH. Eine Übersicht zu den Messergebnissen (Angabe der Messwerte ohne Abzug der Messunsicherheiten) der Feldanlage kann der nachfolgenden Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Übersicht der Ergebnisse aus den Feldmessungen am MFK der Heizperiode 2020/2021

Messort	Datum	Zeitraum	Startzeit	O2	Staub	CO	NO	Abgastemp.	Feuerraumt.	Leistung	Abscheider	Abscheidegrad
	TT.MM.JJ	hh:mm	Testo	Vol.-%	ng/m ³ i.N. (Sauerstoffbezug 13 % O ₂)			°C	°C	kW	(30 kV)	%
Rohgas	11.03.2021	13:53-14:08	13:53	8,3	26	44	122	167		85	an	
Rohgas	11.03.2021	14:29-14:44	14:29	8,6	25	39	124	169		90	an	
Rohgas	11.03.2021	15:01-15:16	15:01	8,8	27	41	125	174		90	an	
Rohgas	12.03.2021	10:07-10:22	10:07	8,3	21	46	124	163		85	an	
Rohgas	12.03.2021	10:39-10:54	10:39	7,9	22	30	128	168		90	an	
Reingas	12.03.2021	11:13-11:28	11:13	10,4	3	32	133	126		90	an	
Reingas	12.03.2021	11:46-12:01	11:46	9,8	3	31	146	128		90	an	86,05
Rohgas	29.03.2021	10:00-10:15	10:18	9,0	47	211	122	193	710	80	an	
Rohgas	29.03.2021	10:30-10:45	10:49	9,2	41	211	126	195	685	76	an	
Reingas	29.03.2021	11:06-11:21	11:24	10,7	9	167	126	203	725	76	an	
Reingas	29.03.2021	11:38-11:53	11:56	11,4	6	211	126	204	717	80	an	82,95
Rohgas	30.03.2021	09:37-09:52	9:56	9,5	45	195	123	203	684	72	an	
Rohgas	07.04.2021	10:06-10:21	10:06	8,1	48	48	132	208	726	84	an	
Reingas	07.04.2021	10:36-10:51	10:36	10,8	10	83	133	212	717	80	an	80,39
Rohgas	07.04.2021	11:09-11:24	11:09	8,8	54	110	133	209	726	72	an	
Reingas	09.04.2021	06:45-07:00	6:43	11,4	14	267	130	211	673	68	an	
Reingas	09.04.2021	07:17-07:32	7:17	11,4	12	289	129	208	674	84	an	66,67
Rohgas	09.04.2021	07:48-08:03	7:49	9,5	39	227	131	211	665	72	an	
Rohgas	13.04.2021	11:17-11:32	11:17	8,8	49	181	138	213	665	72	an	
Reingas	13.04.2021	11:47-12:02	11:47	11,0	18	131	144	217	676	80	an	63,27
Reingas	13.04.2021	12:16-12:31	12:16	10,6	18	145	151	220	694	76	an	

Anfang 2021 wurde gemeinsam mit dem gesamten Projektkonsortium beschlossen, den Monitor aus dem Vorgängerprojekt abzubauen. Die CO/HC-Sensoren und alle bisher erfassten Messwerte wurden in die SPS eingebunden und anschließend über diese erfasst. Im März 2021 wurden diese Umbauarbeiten durchgeführt. Somit wurden nun neben den CO/HC-Sensoren auch eine Prandtl-Sonde mit Drucksensoren, ein zusätzlicher Brennraumtemperaturfühler, ein Verbrennungslufttemperaturfühler sowie der Wärmemengenzähler direkt über die neue SPS erfasst. Damit entsprach die Feldanlage in Hirschau nun hinsichtlich der Konfiguration dem Aufbau auf dem Prüfstand im Technikum des DBFZ.

Um trotz der Corona bedingten Einschränkungen Daten aus der Feldanlage zu bekommen, erfolgten weitere regelmäßige Messungen durch den Projektpartner A.P. Bioenergietechnik GmbH mit einem Testo380 Feinstaubmessgerät. Die jeweiligen Messergebnisse wurden regelmäßig zusammen mit den Daten aus der SPS dem DBFZ zur Verfügung gestellt.

Es erfolgten nach Optimierungen zu Beginn der Demonstrationsmessungen in der Heizperiode 2021/2022 entsprechende Messungen mit einer Brennstoffmischung aus Hackschnitzeln und Miscanthus zur Darstellung. Die Tabelle 3 fasst die entsprechenden Messwerte zusammen und in Abbildung 19 sind die Werte grafisch dargestellt.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Messdaten am Kessel auf dem Prüfstand nach stufenweiser Optimierung und installiertem ESP

Bezeichnung	Durchgang	Staubemission	CO	OrgC _{FTIR}
		mg/m ³ i.N. 13 % O ₂	mg/m ³ i.N. 13 % O ₂	mg/m ³ i.N. 13 % O ₂
Abscheider an	1	44.0	205.3	4.6
Abscheider aus	2	81.0	181.3	4.5
Abscheider an	3	21.0	149.1	4.5
Abscheider aus	4	81.0	176.7	4.7
Abscheider an	5	26.0	141.4	4.9
Abscheider aus	6	80.0	120.1	5.0
Abscheider an	Mittelwert	30.3	165.3	4.6
Abscheider aus	Mittelwert	80.7	159.4	4.7

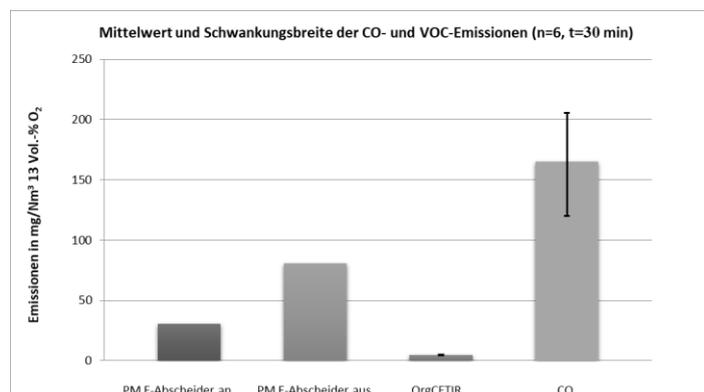


Abbildung 19: Darstellung der Messdaten am Kessel auf dem Prüfstand nach stufenweiser Optimierung und installiertem ESP

Während die Anlage die Grenz- und Zielwerte mit Hackschnitzel sehr deutlich unterschreiten konnte, war der Betrieb mit einer Mischung aus 50:50 Holz-Miscanthus-Häcksel deutlich emissionsreicher. Hier konnte der ESP zwar eine Minderung erzielen, jedoch nicht bis auf die gewünschten Zielkonzentrationen. Für den Einsatz von Miscanthus als Brennstoff mit dem Kessel und ESP sind daher weitere Optimierungsarbeiten notwendig.

Feldmessungen an der Einzelraumfeuerung

Im Dezember 2020 wurde die am DBFZ getestete Brunner-Feuerstätte zusammen mit dem integrierten Katalysator vom DBFZ zu den Feldmessungen bei der Firma Brunner geschickt und dort von den Brunner-Mitarbeitern auf einem Prüfstand aufgebaut. Die Feldmessungen wurden in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Als Katalysatorelement wurde das Bauteil verwendet, welches bereits schon in den Prüfstandsmessungen am DBFZ zum Einsatz kam. Dementsprechend konnte dieser Katalysator auf eine mögliche Desaktivierung hin untersucht werden. Ein baugleiches Katalysatorelement wurde vom DBFZ ebenfalls der Hochschule Karlsruhe zur Verfügung gestellt, um parallel zu den ersten Messungen bei der Firma Brunner die Regelungsentwicklung an dem Feuerungsmodell mit Katalysator und eine

Weiterentwicklung des Regelungsalgorithmus mit Katalysatorintegration durch die Hochschule Karlsruhe ermöglichen zu können.

Ab Juli 2021 wurde von der Firma Brunner zusätzlich ein Elektroabscheider der Firma Ökosolve eingebaut. Die bei Firma Brunner gewonnenen Messergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Übersicht der Ergebnisse aus den Feldmessungen an der ERF der Heizperiode 2020/21

18. und 19.01.2021	Einheit	Kaltstart	Nennlast	Volllast	01.03.2021	Einheit	Kaltstart	Nennlast	Volllast
CO mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	312	371	232	CO mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	706	333	280
CO ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	1227	706	471	CO ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	1227	706	471
Änderung	%	75%	47%	51%	Änderung	%	42%	53%	40%
Staub mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	57	49	Staub mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	44	56
Staub ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	48	67	Staub ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	48	67
Änderung	%	NN	-19%	27%	Änderung	%	NN	7%	17%

19.04.2021	Einheit	Kaltstart	Nennlast	Volllast	14.07.2021 / ESP	Einheit	Kaltstart	Nennlast	Volllast
CO mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	487	294	320	CO mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	744	359	193
CO ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	1227	706	471	CO ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	1227	706	471
Änderung	%	60%	58%	32%	Änderung	%	39%	49%	59%
Staub mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	32	54	Staub mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	32	37
Staub ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	48	67	Staub ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	48	67
Änderung	%	NN	34%	20%	Änderung	%	NN	32%	45%

14.09.2021 / ESP	Einheit	Kaltstart	Nennlast	Volllast	07.10.2021 / ESP	Einheit	Kaltstart	Nennlast	Volllast
CO mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	1229	319	628	CO mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	1321	586	405
CO ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	1227	706	471	CO ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	1227	706	471
Änderung	%	0%	55%	-33%	Änderung	%	-8%	17%	14%
Staub mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	28	50	Staub mit Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	39	26
Staub ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	48	67	Staub ohne Kat	mg/m ³ bei 13 O ₂	NN	48	67
Änderung	%	NN	41%	26%	Änderung	%	NN	18%	61%

Die Ergebnisse zeigen, dass der Katalysator bei der Firma Brunner vergleichbare Ergebnisse zu den Prüfstandmessungen am DBFZ erzielte. Am Anfang der Feldmessungen war keine Desaktivierung an den Messdaten ersichtlich. Erst die Daten ab Juli 2021 deuten eine leichte Desaktivierung an. Entsprechende Untersuchungen und Ausführungen finden sich dazu im Berichtsteil des Teilvorhabens der Hochschule Karlsruhe.

Durch die weiteren Feldmessungen in Eggenfelden bei der Firma Brunner wurde durch die Hochschule Karlsruhe die Regelungsentwicklung getestet und optimiert, um an der Brunner-Feuerstätte mit integriertem Katalysator und Elektroabscheider eine weitere deutliche Minderung der Emissionen erreichen zu können.

Aufzählung der Arbeitspakete des DBFZ

- APD1 Katalysatorkonzept Einzelraumfeuerung
Entwicklung eines Integrationskonzeptes für den hochtemperaturstabilen Katalysator auf Basis Keramikschwamm in der Einzelraumfeuerung in enger Abstimmung mit ETE und der Hochschule Karlsruhe sowie Brunner
- APD2 Katalysatoradaption und -integration an der Einzelraumfeuerung in enger Abstimmung mit ETE
Durchführung der Katalysatorauslegung und vereinfachte strömungsmechanische Betrachtung der Katalysatoradaption an die geometrischen und feuerungstechnischen Parameter der ERF von Firma Brunner auf dem Feuerungsprüfstand des ISIS (HS Karlsruhe)
- APD3 Anlagenkonzept Kessel und Abscheider
Entwicklung des Anlagenkonzeptes für den HHS-Kessel als ganzheitlicher Ansatz inklusive des CO/HC-sensorbasierten Regelungs- und Monitoringverfahrens auf Grundlage einer SPS sowie den Komponenten Abscheider und Wärmeabnahme
- APD4 Aufbau, Installation und Inbetriebnahme der Komponenten der HHS-Anlage im DBFZ-Technikum

	Aufbau, Installation und Inbetriebnahme der Gesamtanlage inklusive aller Komponenten
APD5	Entwicklung und Adaption der feuerungstechnischen, regelungstechnischen und nachgeschalteten Emissionsminderungsmaßnahmen am HHS-Kessel zur Emissionsminderung am HHS-Kessel auf dem DBFZ-Prüfstand
APD6	Regelungsentwicklung auf Basis einer SPS Entwicklung des Regelungsalgorithmus sowie Programmierung der SPS-basierten Regelung für den HHS-Kessel unter Verwendung von CO/HC-Sensorik, Abscheidern und ggf. Katalysatoren
APD7	Integration der CO/HC-Sensorik in die SPS-Regelung Erweiterte Integration der CO/HC-Sensorik in die Feuerungsregelung in Abhängigkeit von den untersuchten Sensoren
APD8	Prüfstandsuntersuchungen HHS-Feuerungen mit SPS-Regelung sowie Staubabscheider Durchführung von Prüfstandsuntersuchungen an dem HHS-Kessel unter Variation des Lastprofils und der Brennstoffeigenschaften inklusive der Aufnahme von Emissionen sowie Temperatur- und Strömungsverteilungen
APD9	Messungen ohne Emissionsminderungsmaßnahmen An Typenprüfungen angelegte Emissionsmessungen ohne Minderungsmaßnahmen
APD10	Messungen mit Emissionsminderungsmaßnahmen An Typenprüfungen angelegte Emissionsmessungen mit Minderungsmaßnahmen
APD11	Optimierung der Emissionsminderungsmaßnahmen und der SPS-Regelung Ableitung und Durchführung von Optimierungsmaßnahmen an der Gesamtanlage
APD12	Feldmessungen am HHS-Kessel mit optimierter SPS-Regelung Durchführung von periodischen Emissionsmessungen (alle 2 bis 3 Wochen) an der Feldanlage des HHS-Kessels sowie Überwachung des Feldanlagenbetriebs
APD13	Datenauswertung und Evaluierung der Feldmessungen Auswertung der laufend anfallenden Daten aus der Feldmessung und der periodisch stattfindenden Emissionsmessungen
APD14	Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation

1.2 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 2: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Gassensorik an Biomassefeuerungen, Hochschule Karlsruhe

Das Teilvorhaben 2 wurde am ISIS bearbeitet. Wie in Kap. 1.1. bereits kurz dargestellt, hat dieses Teilprojekt zum Ziel, die Qualität der Scheitholz-Verbrennung mit geeigneten Gassensoren kontinuierlich abzubilden und daraus mit Stellgliedern und Luftmassenströmungssensoren die aktuell notwendige Dosierung der Verbrennungsluft nach einem theoretischen Modell abzuleiten /But09, Koh13/, um auf diese Weise den Verbrennungsprozess zu optimieren, d.h. die Emissionen von Schadgasen (insbesondere von CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen) zu minimieren. Diese Aufgabenstellung wurde anhand einer Einzelraumfeuerstätte (HKD7, Brunner GmbH, Eggenfelden) bearbeitet. Die Anlage wurde mit Sensoren zur Bestimmung (i) der Verbrennungsluftströme (HFM7, Bosch GmbH), (ii) der Verbrennungstemperatur, (iii) der Restsauerstoffkonzentration im Abgas (ROC) (LSU4.9, Bosch GmbH), (iv) des Gehalts der teil- bzw. unverbrannten Kohlenwasserstoffe (CO/HC) im Abgas (LAMTEC) und mit einem Oxidationskatalysator (EmTechEngineering GmbH, Leipzig) nachgerüstet. Die Untersuchungen wurden in Kooperation mit den Partnern sowohl experimentell als auch theoretisch im Technikum des ISIS und in ausgedehnten Feldtests durchgeführt. Im Einzelnen waren folgende Teilaspekte zu bearbeiten:

- (1) Auswahl der am besten geeigneten und im Abgas über lange Zeit stabilen Hochtemperatur-Gassensoren zur kontinuierlichen Analyse der un- oder teilverbrannten Abgaskomponenten (CO/HC-Komponenten)
- (2) Entwicklung eines kalorimetrischen Gassensor-Chips zur Analyse der CO/HC-Komponenten mit Evaluation im Abgas
- (3) Untersuchung der Sensitivität und der Langzeitstabilität von CO/HC-Hochtemperatur-Gassensoren, die nach dem Mischpotenzialprinzip arbeiten (MPGS) und Einführung geeigneter Kalibrierverfahren
- (4) Entwicklung des elektrochemischen Verfahrens zur Bestimmung der Sensitivität und zur Regenerierung von MPGS vom Au,Pt/YSZ/Pt-Typ
- (5) Weiterentwicklung und Anpassung der Verbrennungsluft-Regelungssoftware an die Verbrennungsbedingungen in der HKD7-Feuerstätte bei Betrieb mit Oxidationskatalysator
- (6) Evaluation der Verbrennungsluftregelung im Feldtest unter Naturzugbedingungen
- (7) Adaption der Verbrennungsluftregelung an die Holzart
- (8) Untersuchungen zur Signal-Langzeitstabilität der MPGS

Auswahl der am besten geeigneten CO/HC Gassensoren

Hochtemperatur-Gassensoren zur kontinuierlichen Abgasanalyse von Biomasse-Verbrennungsprozessen, die den hohen Ansprüchen an Robustheit, Langzeitstabilität und Wirtschaftlichkeit genügen, sind auf dem

Markt nur für die ROC-Analyse in Form der bekannten Lambda-Sonde verfügbar. Da bei der Feststoffverbrennung immer im Sauerstoffüberschuss-Konzentrationsbereich zu regeln ist, kam sowohl im Vorprojekt SenSTEF als auch im aktuellen Projekt die LSU 4.9 Breitband-Lambda-Sonde von Bosch zum Einsatz, die sich über Jahre bewährt hat.

Hinsichtlich der kontinuierlichen Analyse der CO/HC-Komponenten im Abgas sind kaum Alternativen von geeigneten hochtemperaturfesten Sensoren auf dem Markt verfügbar. Ausschließlich Sensortypen auf Keramikbasis kommen für Einsatztemperaturen oberhalb 250 °C in Frage. Zum Zeitpunkt der Antragstellung waren folgende alternativen Sensorkonzepte bekannt, wobei die technologische Umsetzung der Wirkprinzipien teilweise noch im Forschungsstadium war bzw. ist:

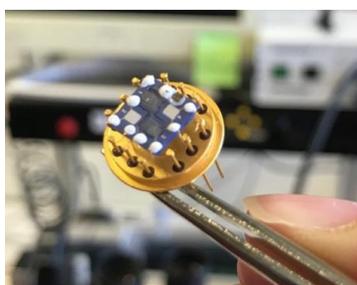
- 1) Metalloxid-Gassensoren (Chemoresistives Messprinzip, Anwendung in Abgasen von Verbrennungsprozessen im Forschungsstadium, Teilprojekt des Vorprojektes SenSTEF)
- 2) Thermoelektrische Gassensoren (Kalorimetrisch-thermoelektrisches Messprinzip, im Forschungsstadium, Projektpartner Universität Bayreuth)
- 3) Kalorimetrische Gassensoren (Kalorimetrisch-resistives Messprinzip, im Forschungsstadium, Entwicklung am ISIS)
- 4) Mischpotenzialsensoren auf Au,Pt/YSZ/Pt – Basis (MPGS) (kommerziell verfügbare Sensoren der LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH&Co KG, Walldorf)

Da einerseits im Hinblick auf Sensitivität und insbesondere Signalstabilität dieser Sensoren im Abgas von Holzverbrennungsprozessen nur unzureichende Erfahrung bestand, andererseits im Vorprojekt SenSTEF die Untersuchung der Eignung von Metalloxid-Gassensoren für diesen Anwendungszweck insbesondere wegen der hohen Feuchteempfindlichkeit dieses Sensortyps keine positive Perspektive für die Anwendbarkeit in den kommenden Jahren erwarten lässt, wurde dieser Sensortyp aus der engeren Auswahl ausgeschlossen. Hingegen schienen die Sensortypen 2) bis 4) vielversprechend. Insbesondere die MPGS des Projektpartners LAMTEC waren bereits auf dem Markt der Feuerungstechnik eingeführt, waren aber im Vorprojekt SenSTEF wegen Instabilitäten aufgefallen. Über Jahre durchgeführte Forschungsarbeiten am ISIS /Zng18; Zng21/ hatten allerdings ergeben, dass bei geeigneter Betriebsweise dieses Sensortyps nicht nur verbesserte Stabilität erreicht werden kann, sondern auch der Sensitivitätszustand der Sensoren bei Umgebungsbedingungen mit elektrochemischen Methoden ermittelt werden kann sowie bei Bedarf der Sensor wieder regeneriert werden kann /Koh19/.

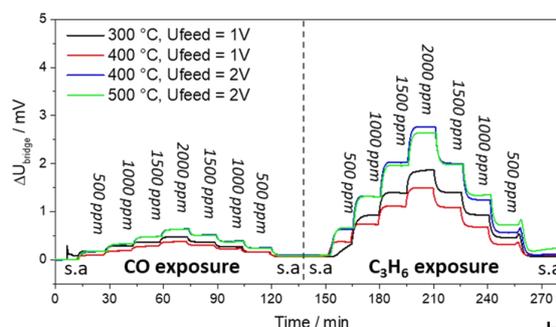
Die Entwicklung thermoelektrischer Gassensoren bzw. deren Modifikation bzgl. der Sensitivität und der Einhausung im Rahmen des UVV-Projektes wurde vom Projektpartner der Universität Bayreuth vorgenommen bzw. in dessen Beitrag zum Schlussbericht beschrieben. Tests dieser Sensoren im Abgas unter Prüfstandsbedingungen wurden im Feuerungstechnikum des ISIS durchgeführt.

Entwicklung eines kalorimetrischen Gassensor-Chips zur Analyse der CO/HC-Komponenten – Evaluation im Abgas

Das kalorimetrische Messprinzip basiert auf der exothermen Verbrennung von unvollständig oxidierten Abgaskomponenten auf katalytisch aktivierten gassensitiven Schichten. Die damit einhergehende Temperaturerhöhung wird durch die Widerstandserhöhung der unter der Schicht liegenden und mikrostrukturierten Pt-Schicht (Mäanderstruktur) detektiert. Werden je zwei reaktive gegen zwei chemisch inerte Schichten auf einem Chip (vgl. Abbildung 20) zu einer Wheatstone-Brücke verschaltet, dann kann die Änderung von exothermen Gasreaktionen sehr empfindlich anhand der Brückenspannung detektiert werden.



a)



b)

Abbildung 20: Sensorchip, mikrostrukturiert auf LTCC-Substrat, a) Vorderseite mit den vier mikrostrukturierten Mäandern und einem resistiven Temperatursensor in Pt-Dünnschichttechnik, kontaktiert in einem TO8-Gehäuse, b) Sensorsignal (ΔU_{bridge}) bei Beaufschlagung mit CO (Abbildung b) links) bzw. Propen (Abbildung b) rechts) in synthetischer Luft bei verschiedenen Konzentrationsstufen und Betriebstemperaturen

Der am ISIS in Mikrostrukturtechnik hergestellte kalorimetrische Sensorchip (7x7 mm²) trägt auf der Vorderseite einen Temperatursensor und je zwei aktive bzw. inerte Schichten auf in Pt-Dünnschichttechnik mikrostrukturierten Widerstandsmäandern /III18/ und auf der Rückseite die in Pt-Dünnschichttechnik ausgeführte Heizerstruktur. Letztere wurde eigens unter Verwendung numerischer Simulationsmethoden (ANSYS-Software) hinsichtlich möglichst homogener Temperaturverteilung über den Chip optimiert /Kro19/.

Die Sensitivitätstests im Labor bei Beaufschlagung mit verschiedenen Konzentrationen von CO bzw. Propen in synthetischer Luft illustrieren eine gute, mit wenig Aufwand messbare Sensitivität im mV-Bereich und eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Sensorsignale. Wie aus Abbildung 20 ebenfalls zu entnehmen ist, war die Sensitivität erwartungsgemäß aufgrund unterschiedlicher Verbrennungsenthalpien und Diffusionsgeschwindigkeiten für verschiedene Gaskomponenten unterschiedlich (III18). Im Abgas von Holzfeuerungen treten allerdings eine Vielzahl von teil- bzw. unverbrannten Gaskomponenten auf /Koh18/, die alle mit verschiedenen Anteilen in ein Summensignal eingehen.

Die ersten in-situ Messungen im Abgas einer Holzfeuerung wurden mit einem Gehäuse aus dem Vorprojekt SenSTEF durchgeführt. Die Abbildung 21 zeigt den Verlauf des Signals über ein typisches Scheitholzabbrand zusammen mit dem Verlauf des Signals eines neuentwickelten thermoelektrischen Sensors (siehe Beitrag des Projektpartners der Universität Bayreuth zu diesem Schlussbericht) und bei gleichzeitiger Analyse der Abgase mittels eines FTIR-Abgasanalyseystems (Gaset, Ansyco GmbH, Karlsruhe). Die gute Übereinstimmung der Sensorsignaländerungen mit der Änderung der Abgaszusammensetzung ist leicht zu erkennen. Nach Korrektur der Sensorsignale hinsichtlich der Chip-temperatur (wird durch einen integrierten Temperatursensor mitgemessen), insbesondere in der Phase hoher Verbrennungskinetik (hohe Verbrennungstemperatur T_Sek), scheint die Beschreibung der Emissionen (blaue Kurve, Abbildung 21) nochmals verbessert.

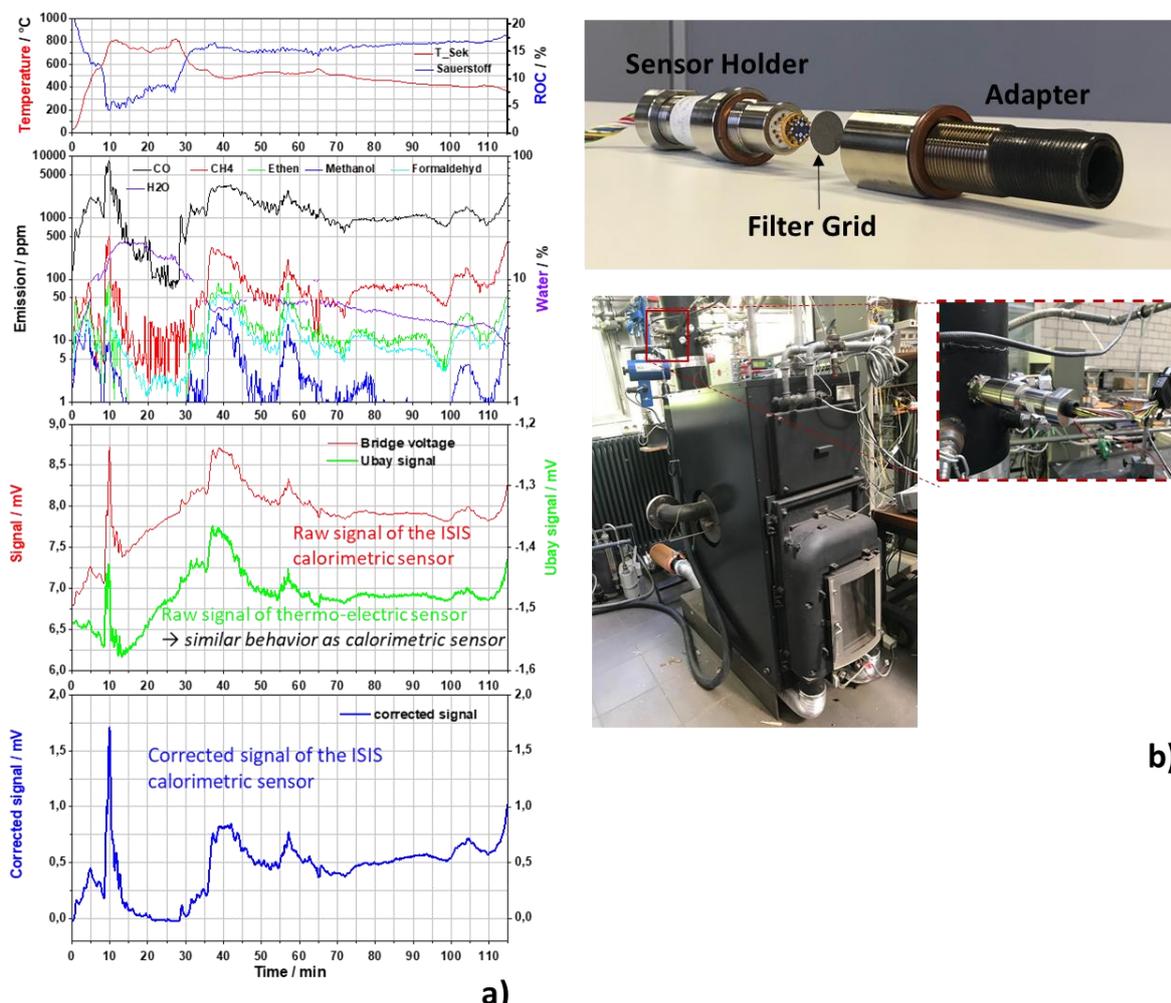


Abbildung 21: Sensorsignale eines am ISIS entwickelten kalorimetrischen Gassensor Chips und eines thermoelektrischen Sensors (Entwicklung Universität Bayreuth), a) Verlauf der Signale während eines Feuerungsexperiments im SF10SK Kachelofeneinsatz (Brunner GmbH, Eggenfelden) bei gleichzeitiger Analyse der Abgaszusammensetzung und Registrierung des Restsauerstoffgehalts (ROC) und der Verbrennungstemperatur (T_Sek), b) Schema der Einhausung des Gassensorchips und Einbau des Sensors in das Abgasrohr der Feuerstätte

Weitere Experimente im Abgas bei Feuerungsexperimenten offenbarten allerdings eine deutliche Abnahme der Sensitivität. Insofern sind diese Ergebnisse als grundlegende Untersuchungen zu betrachten. Weitergehende Untersuchungen sind notwendig, um die Ursachen für den Sensitivitätsverlust (z.B. Belegung der sensitiven Schichten mit Ruß bzw. Staub) offenzulegen. Diese konnten allerdings aufgrund begrenzter Personalverfügbarkeit im Rahmen des UVV-Projektes nicht weitergeführt werden.

Untersuchung der Sensitivität und Langzeitstabilität von MPGS

Mit der Zielsetzung, dass nach Ende des UVV-Projektes eine zügige Marktumsetzung der Emissionsminderungsstrategien angestrebt werden kann, war die Beherrschung der Sensorik insbesondere zur kontinuierlichen Bestimmung der CO/HC-Emissionen, die in diesem Kontext eine tragende Rolle spielt, eine unverzichtbare Voraussetzung. Insofern war es folgerichtig, einen Schwerpunkt der Arbeiten am ISIS auf die Untersuchung der Sensitivität und Langzeitstabilität der MPGS zu legen. MPGS sind neben den Metalloxid-Gassensoren die einzigen am Markt verfügbaren Hochtemperatur-Gassensoren, weisen jedoch eine weitaus geringere Querempfindlichkeit in Bezug auf den bei der Biomasseverbrennung entstehenden Wasserdampf als die Metalloxid-Gassensoren auf und sind somit als Sensortyp vorzuziehen. Allerdings war zu Beginn des Projektes UVV bei der Anwendung der MPGS die deutliche Sensitivitätsabnahme der Sensoren mit steigender Einsatzzeit im Abgas von Holzfeuerungen als Herausforderung zu beachten, was aus SenSTEF bekannt war.

Vor diesem Hintergrund wurden umfangreiche Tests mit insgesamt sechs MPGS-Exemplaren im Abgas des SF10SK-Kachelofeneinsatzes (Brunner GmbH, Eggenfelden) durchgeführt. Für die Tests wurden je zwei gleiche Exemplare aus der MPGS-Produktion des Projektpartners LAMTEC herangezogen, die zwar alle zur Familie der Au,Pt/YSZ/Pt-Mischpotenzialsensoren gehören, jedoch im Hinblick auf die Zusammensetzung der Au,Pt-Mischpotenzialelektrode variierten. Im Einzelnen wurden folgende Exemplare untersucht:

- CarboSen 10000 (CS10K), Au-Dünnschicht auf Pt/YSZ-Elektrode
- LH64, Au,Pt/YSZ-Mischelektrode
- LH68, Au,Pt/YSZ-Mischelektrode

Die LH64 und LH68 MPGS unterscheiden sich durch verschiedene Au/Pt-Verhältnisse.

Die Feuerungsanlage und die Testergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt.

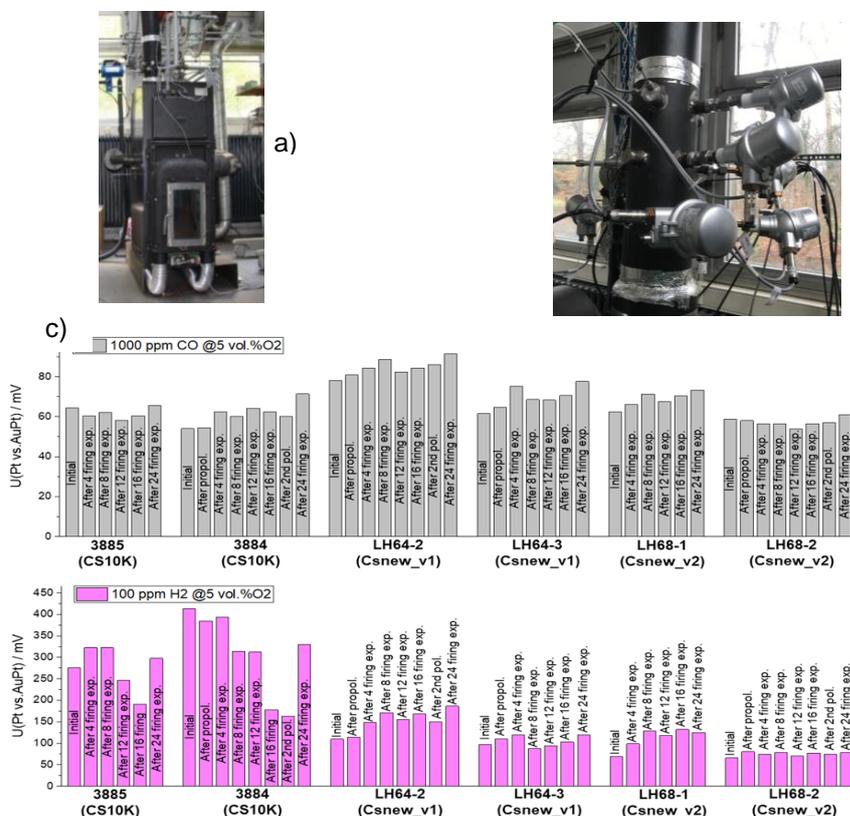


Abbildung 22: Ergebnisse der wiederkehrenden Sensitivitätstests in Modellgasen, a) Feuerungsanlage SF10SK (Brunner GmbH, Eggenfelden), b) Flansche zur Aufnahme der Gassensoren bei Betrieb im Abgas, c) Sensitivitätstestergebnisse nach verschiedenen Betriebszeiten im Abgas bzw. Vorbehandlungen

Vorgehensweise: Das Mischpotenzial wurde gegen die Pt/YSZ-Referenzelektrode bei verschiedenen Modellgaszusammensetzungen gemessen, die mittels einer automatisierten Gassensor-Testanlage /Jer02/ beaufschlagt wurden. Als Modellgase wurden 1000 ppm CO bzw. 100 ppm H₂ bei 5 Vol.-% O₂ gewählt, welche durch Zumischung von synthetischer Luft und N₂ zu den entsprechenden Prüfgasen eingestellt wurden. Nach erstmaliger Charakterisierung der Sensoren wurden diese anschließend im Abgas von typischerweise vier nacheinander durchgeführten Feuerungsexperimenten eingesetzt, die Sensorsignale über die Zeit des Abbrandes aufgenommen und die Abgaszusammensetzung mittels eines FTIR-Abgasanalysegerätes (Gasmeter, Ansyco GmbH, Karlsruhe) registriert. In periodischen Abständen wurden die Sensoren mit den oben benannten Modellgasen beaufschlagt, um ggf. auftretende Sensitivitätsänderungen bzw. deren Signalstabilität unter reproduzierbaren Umgebungsbedingungen zu untersuchen /Ran20/.

Die Testergebnisse zeigen die Stabilität der Signale bei Beaufschlagung der Modellgase nach verschiedenen Betriebszeiten im Abgas. Für jeden Feuerungsdurchlauf wurde ungefähr eine Betriebszeit im Abgas von 4 Std. erreicht, so dass diese Sensoren insgesamt über ca. 96 Std. im Abgas betrieben wurden. Die Ergebnisse zeigen dabei, dass insbesondere die LH-Sensoren zwar eine gewisse Streuung in der Reproduzierbarkeit aufwiesen, jedoch keine signifikante Signalabnahme über die gesamte Testzeit feststellbar war. Insbesondere ragte der LH68-2 durch besonders gute Signalstabilität heraus. Insgesamt war die Sensitivität aller Exemplare gegenüber Wasserstoff deutlich höher als gegenüber CO. Eine signifikant höhere Sensitivität zeigten die CS10K-Sensoren bei Beaufschlagung mit Wasserstoff im Vergleich zu den LH-Sensoren, allerdings bei deutlich höherer Signalstreuung.

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass im Vergleich zu den Langzeituntersuchungen im Vorläuferprojekt SenSTEF alle MPGS-Exemplare erheblich verbesserte Langzeitstabilität aufwiesen. Diese Verbesserung ist in erster Linie auf den optimierten Betrieb der Sensoren hinsichtlich der Betriebstemperatur und auf die deutlich stabilere Elektrodenmorphologie der LH-Sensoren zurückzuführen. Diese Schlussfolgerungen basieren sowohl auf den hier vorgestellten Ergebnissen als auch auf umfangreichen Untersuchungen, die in den zurückliegenden Jahren an CarboSen-MPGS im Rahmen einer Dissertation /Zhg18/ am ISIS durchgeführt wurden.

Elektrochemisches Verfahren zur Bestimmung der Sensitivität und zur Regenerierung von MPGS vom Au,Pt/YSZ-Typ

Auf die Notwendigkeit, langzeitstabile Gassensoren zur Verfügung zu haben, um mittels sensorbasierter Verbrennungsluftregelung unter Einsatz eines wirksamen Oxidationskatalysators die Emissionen von Scheitholz- oder allgemein Biomasseverbrennungsprozessen zum Schutz der Umwelt wirksam zu verringern, wurde bereits hingewiesen. Da mit Ende des Vorläuferprojektes SenSTEF und anhand einer Dissertation /Zhg18/ erkannt worden war, dass es grundsätzlich einen Weg gibt, MPGS am Einsatzort zwischen zwei Abbränden, also im Zustand der belüfteten Feuerungsanlage hinsichtlich des Sensitivitätszustandes zu testen und bei Bedarf sogar zu regenerieren, sollte dieses Verfahren /Koh19/ hinsichtlich der Praxistauglichkeit im Rahmen des UVV-Projektes untersucht und möglichst in den automatisierten Feuerungsprozess integriert werden. Bei Anwendung in diskontinuierlichen Feuerungen (batch firing) über einen Zeitraum von einer oder mehreren Heizperioden stellt sich dann dieser Sensor-Regenerierprozess wie in Abbildung 23 gezeigt dar.

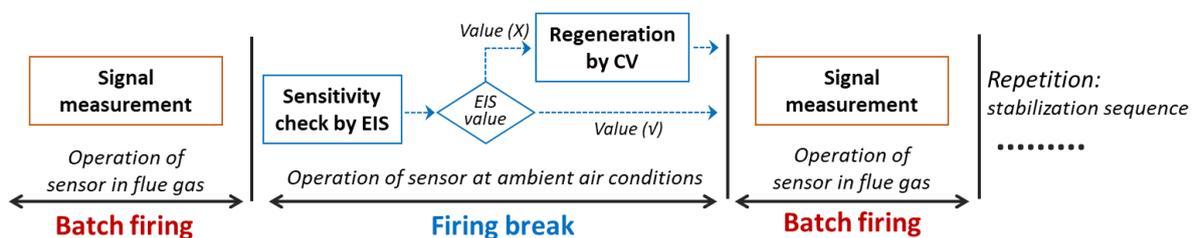


Abbildung 23: Ablauf des elektrochemischen Verfahrens zum periodischen Test der Sensitivität und Regenerierung von MPGS, Messung der elektrochemischen Impedanz (EIS) und Regenerierung durch kathodische Polarisation (CV)

In diesem Ansatz wird nach einem fest vorgebbaren Betriebsintervall der Feuerungsanlage zuerst ein „Sensitivity-Check“ durchgeführt. Ergibt sich aus diesem Test eine Sensitivitätsabnahme, dann wird eine Regenerierprozedur gestartet, die ggf. durch einen weiteren Sensitivitätstest abgeschlossen werden kann. War die Regenerierung erfolgreich, kann der MPGS anschließend weiter an der Feuerung betrieben werden.

Gelingt die Regenerierung nicht (was aber bisher noch nicht beobachtet wurde), kann die Regenerierprozedur wiederholt und im Bedarfsfall ein Service-Signal ausgegeben werden.

Der „Sensitivity-Check“ beruht auf der Messung der elektrochemischen Impedanz (EIS) des Sensorelements. Umfangreiche Experimente hatten als Ergebnis aufgezeigt, dass die EIS streng korreliert ist mit der Sensitivität. Die elektrochemische Regenerierung erfolgt durch kathodische Polarisation (CV) der Au,Pt/YSZ-Sensorelektrode bei erhöhter Betriebstemperatur. Details zu diesem Verfahren werden zukünftig vor Fachpublikum vorgestellt und veröffentlicht [Zhg22]. Einen Überblick über das System gibt Abbildung 24.

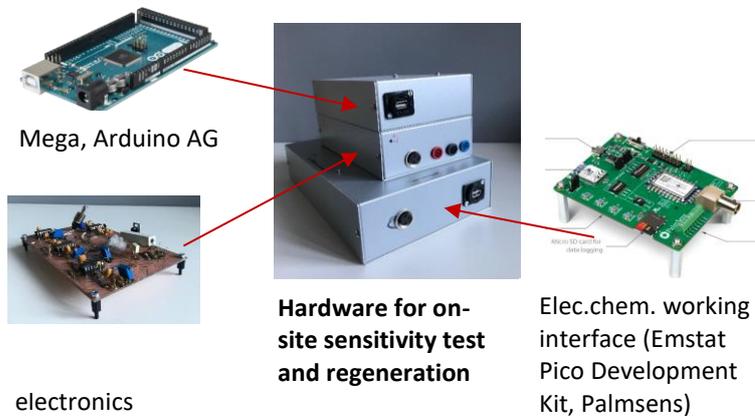


Abbildung 24: Aufbau des elektrochemischen Sensitivitätstest- und Regeneriersystems (Funktionsmuster)

Um dieses Verfahren für feuerungstechnische Anwendungen zu qualifizieren, wurde die Hard- und Software für die automatische Einstellung der MFGS-Betriebstemperatur, die periodische Durchführung von EIS und die Regenerierung durch kathodische Polarisation in Form eines Funktionsmusters aufgebaut und am Feuerungssystem im Technikum des ISIS erfolgreich getestet.

Das Elec.chem. working interface dient zur Durchführung der EIS-Messungen und der kathodischen Polarisationsprozedur. Dieses Board hat sich im Funktionsmuster zur Evaluation des Verfahrens bewährt, sollte jedoch bei Überführung des Verfahrens in ein kommerzielles Produkt durch eine kostengünstigere Komponente ersetzt werden.

Die Installation des Systems am Experimentiermessstand Abbildung 25a) und der erstmalige automatisierte Betrieb mit der Feuerungsprozess-Software bestätigten die Funktionalität des Systems im Feuerungsprozess. Der Testablauf ist in Abbildung 25b) dargestellt und Beispiele für die EIS-Messungen und die kathodische Polarisationsprozedur zur Regenerierung sind in Abbildung 25c) und Abbildung 25d) illustriert.

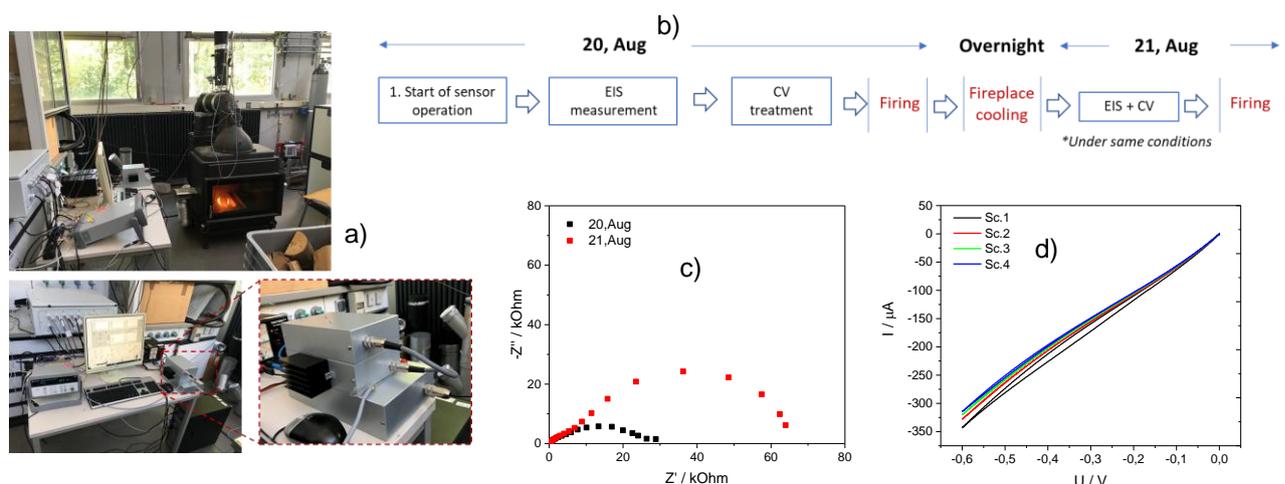


Abbildung 25: Erste Tests des Sensitivitätstest- und Regeneriersystems im ISIS-Feuerungstechnikum, a) Testaufbau mit HFD7 Einzelraumfeuerungsanlage und den Installationen des Test- und Regeneriersystems, b) Schematisierter Testverlauf, c) Automatisiert aufgenommene EIS-Messungen vor und nach der Feuerung, d) I/U-Kurven, aufgenommen bei vier kathodischen Polarisationszyklen

Damit wurde gezeigt, dass aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich der EIS und wenn benötigt die kathodische Polarisation zur Regenerierung des MFGS von vergleichbarer Qualität wie im Labor auch am

Einsatzort möglich sind. Trotz dieser sehr vielversprechenden Evaluation musste aufgrund von Zeit- und Personalmangel davon abgesehen werden, dieses Messsystem zusammen mit dem automatisierten Verbrennungsluft-Regelungssystem auch den Feldtests über mehrere Monate zu unterziehen. Diese noch ausstehenden Langzeituntersuchungen sollen in ein Nachfolgeprojekt verschoben werden. Allerdings wurden nach Beendigung der Feldtests die Sensoren LH 64-3 und LH68-2 am ISIS nochmals dem Sensitivitätstest unterzogen und mit den Werten, die vor den Feldtests gemessen worden waren, verglichen.

Weiterentwicklung und Anpassung der Verbrennungsluft-Regelungssoftware an die Verbrennungsbedingungen in der HKD7-Einzelraumfeuerstätte (ERF) bei Betrieb mit Oxidationskatalysator

Das Verfahren zur automatischen Verbrennungsluftregelung von Scheitholz-Einzelraumfeuerungen wurde bereits in Vorläuferprojekten wie z.B. SenSTEF oder „Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen an einer Einzelraumfeuerstätte“, Förderinitiative Energetische Biomassenutzung, BMU (Jan. 2012 bis März 2014) eingeführt, im UVV-Projekt verifiziert und insbesondere für die Anwendung zur Optimierung der Verbrennung in der HKD7-Feuerstätte mit Oxidationskatalysator neu parametrisiert. Damit sollte das Ziel erreicht werden, die Emissionen insbesondere bei Betrieb mit einem neu implementierten Katalysator zu minimieren. Das Automatisierungskonzept ist schematisch in Abbildung 26 dargestellt.

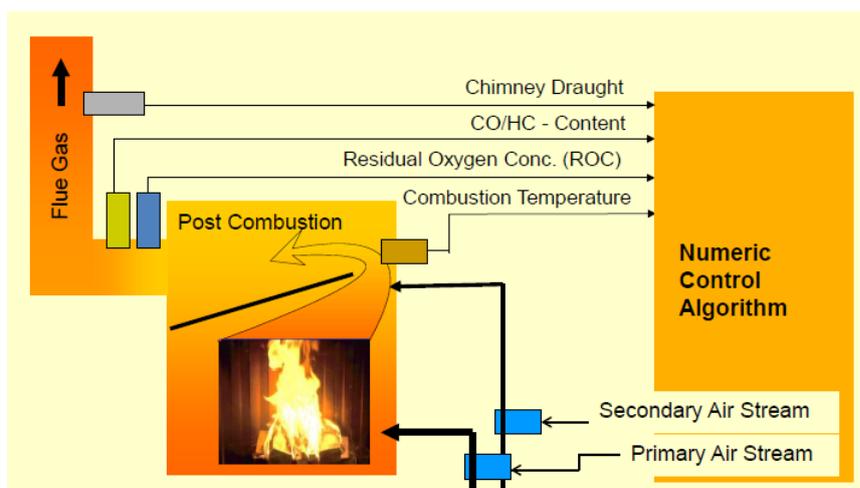


Abbildung 26: Schema des Verbrennungsluft-Regelungskonzeptes für Scheitholz-ERF

Nach einem numerischen Regelalgorithmus wird der Primärluftstrom mittels den Sensorsignalen Verbrennungstemperatur (T_{Brenn}) und Restsauerstoffkonzentration (ROC) und der Sekundärluftstrom mittels den Signalen aus der Verbrennungstemperatur und dem CO/HC-Gehalt im Abgas zu jedem Zeitpunkt eines Chargenabbrandes definiert und über ein motorbetriebenes Blendensystem eingestellt. Im Laufe der Entwicklung dieses Verbrennungsluft-Regelungskonzeptes hatte sich gezeigt, dass ein Chargenabbrand mit Scheitholz-Nachlegeoption durch insgesamt fünf Verbrennungsluft-Regelungsphasen beschrieben werden muss, um die unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen regelungstechnisch abzubilden. Entsprechend umfangreich ist die Anzahl der Parameter, die individuell für den Ofentyp und für die einzelnen Verbrennungsphasen experimentell zu bestimmen sind. Nach dem momentanen Stand der Entwicklung sind insgesamt ca. 90 Parameter zu Regelung der Verbrennungsluftströme zu definieren, wobei zukünftig vermutlich einige Parameter zusammengefasst werden können. Die aus den oben angesprochenen Sensorsignalen nach dem Regelalgorithmus resultierenden Verbrennungsluftströme (Sollwerte) werden über ein motorbetriebenes Blendensystem (Brunner GmbH) in einem zweiten Regelkreis mit Luftmassenströmungssensoren (HFM7, Bosch, aus der Automobiltechnik verfügbar), weitgehend unabhängig vom Kaminzug in Regelungsintervallen von 15 s eingestellt.

Bestimmung der Verbrennungsqualität aus dem CO/HC-Signal von MPGS

Wie oben bereits erwähnt, basiert das Verbrennungsluft-Regelungskonzept auf der Kalkulation des Primärluftstromes aus der Verbrennungstemperatur und dem Restsauerstoffgehalt (ROC) im Abgas und des Sekundärluftstromes aus der Verbrennungstemperatur und dem CO/HC-Gehalt im Abgas. Zur experimentell basierten Weiterentwicklung des aus dem SenSTEF-Projekt vorliegenden Standes der Verbrennungsluft-Regelungssoftware wurde entschieden, die MPGS-Sensoren zur Bestimmung des Gehaltes der un- bzw. teilverbrannten Abgaskomponenten (CO/HC) einzusetzen und daraus die Kalkulation des Sekundärluftstromes durchzuführen. Dieser Sensortyp ist technologisch und im Hinblick auf bereits

vorhandene Gehäusung für in-situ-Hochtemperaturanwendungen und der zu erwartenden Signalstabilität bei Langzeitbetrieb im Abgas am weitesten fortgeschritten.

Diese Auswahl zog allerdings weitere Untersuchungen zur Interpretation der Signale von MPGS bei Nutzung im Abgas von Biomassefeuerungen nach sich, um diese als Eingangsgröße für die Verbrennungsluftregelung einsetzen zu können. Die Abgase von Scheitholzfeuerungen setzen sich bekanntermaßen aus Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf, Restsauerstoff und einer Vielzahl von brennbaren Komponenten (Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe, zusammengefasst als CO/HC) zusammen /Koh18/. Von den CO/HC-Komponenten ist das CO die Leitkomponente, jedoch reagieren MPGS nicht nur auf CO, sondern (teilweise sogar empfindlicher) auch auf HC-Komponenten wie Ethen, Alkohole, Aldehyde oder Alkane (Methan), die allerdings überwiegend in deutlich geringerer Konzentration auftreten. Es musste somit untersucht werden, in welchem Zusammenhang das MPGS-Signal zur Verbrennungsqualität steht, da diese Größe als Eingangsgröße zur numerischen Bestimmung der Sekundärluft im Regelungsprozess dienen sollte.

Zur Abhängigkeit des MPGS-Signals von der O₂-Konzentration und vom CO- bzw. vom H₂-Anteil einer Gas-mischung liegen eine Reihe von Untersuchungen vor. Mittlerweile besteht Konsens darüber, dass das Mischpotenzialmodell anzuwenden ist. Nach Miura et al /Miu14/ lässt sich die Abhängigkeit des Sensorsignals φ_m von der Abgaszusammensetzung nach Gl. 1 formulieren.

$$\varphi_m = \varphi_o - a \ln c(\text{CO}) - \sum_i b_i \ln c_i(\text{HC}) + c \ln c(\text{O}_2) \quad \text{Gl. 1}$$

Hierbei sind φ_o , a und b_i und c die zu kalibrierenden Koeffizienten. Mit $c_i(\text{HC})$ werden die Konzentrationen der verschiedenen HC-Komponenten und mit $c(\text{O}_2)$ wird die Konzentration des Restsauerstoffes (ROC) bezeichnet. Numerische Simulationen der Sensorsignale φ_m aus den Abgasanalysedaten von Feuerungsexperimenten haben allerdings gezeigt, dass die Berücksichtigung der CO-Konzentration $c(\text{CO})$ und der $c(\text{O}_2)$ in den meisten Situationen für eine recht gute Beschreibung der Abgasqualität ausreichend ist /Keu20/. Allerdings resultiert nach der oben genannten Koeffizientenbestimmung aus Kalibrierexperimenten mit CO/O₂-Modellgasgemischen bei Anwendung von Gl. 1 auf die tatsächlich gemessenen Gasanalysedaten (bestimmt mittels FTIR bzw. Lambda-Sonde) ein Signalverlauf (rote Kurve, Abbildung 27), der zwar die Variation der Abgaszusammensetzung über einen Chargenabbrand recht gut repräsentiert, jedoch lag der berechnete Wert immer deutlich niedriger als der tatsächlich gemessene Wert (schwarze Kurve, Abbildung 27). Dies ist eine Konsequenz aus der Kalibrierung des MPGS-Signals mit CO/O₂-Gemischen, welche die komplexe Zusammensetzung der Verbrennungsabgase nur unzulänglich repräsentieren. Dieser Aspekt wurde im Detail untersucht /Kun21/ und dabei festgestellt, dass die aus den Kalibrierdaten generierte Funktion φ_m mit Hilfe einer über einen numerischen Fit generierten, einfachen linearen Funktion in Signale transformiert werden kann (blaue Kurve, Abbildung 27), die den gemessenen Signal-Werten in den überwiegenden Zeitbereichen recht nahe kommen.

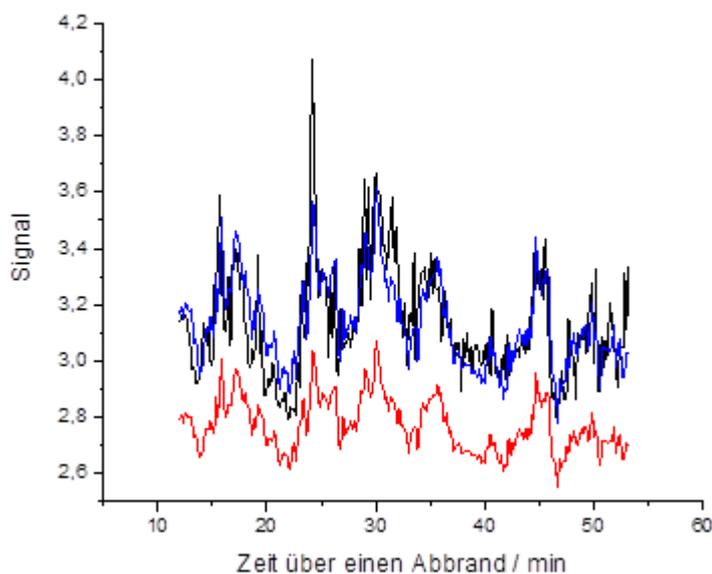


Abbildung 27: Ausschnitt aus dem Verlauf der unterschiedlich generierten MPGS-Signale eines Scheitholz-Feuerungsexperimentes, rote Kurve: Signalwerte aus den Kalibrierdaten und der Abgasanalyse (CO, O₂) berechnet nach Gl. 1, blaue Kurve: Signalverlauf nach linearer Transformation des roten Signalverlaufs, schwarze Kurve: Verlauf des Signalverlaufs aus der Abgasmessung

Dies bedeutet, dass bei Anwendung der Umkehrtransformation von Gl. 1 aus dem Signal des MPGS in allen Zeitbereichen eines Chargenabbrandes eine CO-äquivalente Konzentration CO_e bestimmt werden kann, die dann zusammen mit der Verbrennungstemperatur als Eingangsgröße zur Bestimmung des

Sekundärluftstromes im Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmus herangezogen wird. Wie in Abbildung 27 dargestellt, kann auf diese Weise der Signalverlauf über einen Chargenabbrand in weiten Zeitbereichen gut abgebildet werden. Da nach Gl. 1 das MPGS-Signal durch alle CO/HC-Komponenten (mit allerdings unterschiedlicher Sensitivität) gebildet wird, wird somit eine Regelungseingangsgröße erhalten, welche die zeitliche Abhängigkeit der Abgasqualität gut repräsentiert.

Nachrüstung der HKD7-Feuerstätte

Bereits im Vorläuferprojekt SenSTEF war die HKD7-Feuerstätte mit Unterstützung des Herstellers (Brunner GmbH, Eggenfelden) mit separat ansteuerbaren Kanälen für Primär- und Sekundärluft nachgerüstet worden. Am ISIS wurde die Verrohrung der Verbrennungsluft realisiert und mit Luftmassenströmungssensoren (HFM7, Bosch) versehen (Abbildung 28), wobei der Verbrennungsluftzutritt über zwei große, aus der Automobiltechnik verfügbare Staubfilter (Bosch GmbH) zum Schutz der Luftmassenströmungssensoren und der mittels Schrittmotoren ansteuerbaren Blenden (Brunner GmbH) von Partikeln gereinigt wurde. Zur Erfassung der meisten Sensorsignale und Steuerung der Aktoren wurde vorerst der im Projekt SenSTEF entwickelte Sick-Monitor eingesetzt, der dann auch später in den Feldtests Verwendung finden sollte.

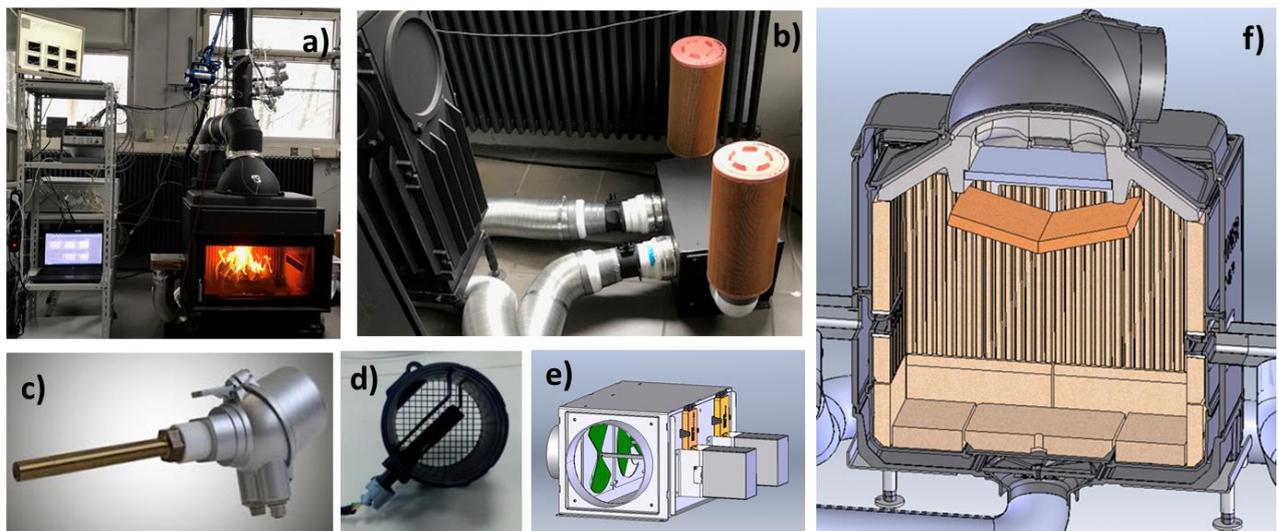


Abbildung 28: Aufbau der HKD7-Feuerstätte im ISIS-Technikum, a) HKD7-Feuerstätte mit seitlicher Zuführung der Sekundärluft (Nachrüstung) und den Gassensoren bzw. der Gasentnahmesonde im Abgasrohr und Messtechnik/Sensorik, b) Übersicht über die Verbrennungsluftzuführung mit den HFM7-Luftmassenströmungssensoren, der Blendenbox und den Verbrennungsluftfiltern, c) CO/HC-Gassensor (LH-Serie, LAMTEC), d) Detail des Luftmassenströmungssensors (HFM7, Bosch GmbH), e) Schrittmotor gesteuerte Blendenbox zur Einstellung der Verbrennungsluftströme (Brunner GmbH), f) Schematische Darstellung der HKD7-Brennkammer (Skizze Brunner GmbH) mit den Verbrennungsluftzuführungen, den Abgas-Umlenkplatten (orange) und der Positionierung des plattenförmigen Oxidationskatalysators (grau)

Ergebnis der Adaption der Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen an die HKD7-Feuerstätte bei Betrieb mit Oxidationskatalysator

Anhand einer Vielzahl von Feuerungsexperimenten und unter Einsatz des FTIR-Gasanalyzesystems (Gasmet, Ansyco GmbH, Karlsruhe) zur Referenzierung der Abgasqualität wurden die Regelungsparameter ausgehend von der im Vorläuferprojekt SenSTEF entwickelten Verbrennungsluft-Regelungssoftware am ISIS iterativ an die HKD7-ERF neu angepasst, wobei jetzt die Version mit Oxidationskatalysator zum Einsatz kam. Bereits nach den ersten Experimenten zeigte sich, dass die funktionale Abhängigkeit der Verbrennungsluftströme im Vergleich zum Betrieb ohne Katalysator erheblich verändert werden musste. Dies hat folgende Gründe:

- Infolge der generellen Herabsetzung der Aktivierungsenergien der Oxidationsreaktionen an Katalysatoren setzt die Reaktion dieser Prozesse bereits bei niedrigeren Temperaturen (oberhalb ca. 200 °C) ein.
- Die Kontaktzeit der Abgase mit dem Katalysator spielt neben der Katalysortemperatur die wichtigste Rolle im Hinblick auf die Umsetzungsgrade. Diese wird durch dessen Querschnittsfläche, Dicke, Porosität und den Abgasvolumenstrom bestimmt. Dies bedeutet, dass bei gegebener Katalysatorgröße und -porosität die Verbrennungsluftströme eher gering zu halten sind, um eine möglichst lange Kontaktzeit zu erreichen. Selbstverständlich müssen in diesem Bestreben jegliche Verbrennungssituationen unter Luftmangel vermieden werden.

Es mussten somit Regelungsalgorithmen in den verschiedenen Phasen des Chargenabbrandes gefunden werden, die eine Annäherung an den Zustand der katalytisch gestützten vollständigen Verbrennung darstellen, wobei die Verbrennungsluftströme (Primär- und Sekundärluft) so zu wählen sind, dass die Zündphase (hohe Emissionen) möglichst schnell überwunden wird und die Hochtemperaturphase (niedrige Emissionen) möglichst lange erhalten bleibt, um die Emissionen über den gesamten Chargenabbrand zu minimieren. Hierbei hatte die Minimierung der Emissionen mittels sensorbasierter Regelung der vergleichsweise geringen Verbrennungsluftströme, die im Gegensatz zur Erreichung eines „lebhaften Flammenbildes“ stehen kann, absolute Priorität, um dem Anspruch der wirksamen Absenkung der Emissionen im Vergleich zu den Grenzwerten der 1. BImSchV gerecht zu werden. Damit wurde aber auch offenbart, dass dieser Zustand der Minimierung der Emissionen sowohl im Hinblick auf die gasförmigen Komponenten als auch unter dem Aspekt des Staubausstößes in jeder Phase eines Chargenabbrandes nur im automatisierten Betrieb unter Einsatz geeigneter Abgassensorik erreichbar und damit jeder Handsteuerung durch den Benutzer bei Weitem überlegen ist. Dieser Aspekt wird in diesem Bericht weiter unten bei der Diskussion der Feldtestergebnisse nochmals im Detail aufgegriffen und anhand von Daten konkretisiert. In diesem Kapitel werden die Daten vorgestellt, die den finalen Zustand des Verbrennungsluft-Regelungsprozesses repräsentieren, der nach einer Experimentierphase über 10 Monate im Technikum des ISIS erreicht worden war.

Ein typischer, repräsentativer Datensatz eines Scheitholz-Chargenabbrandes mit drei Nachlegephasen nach Abschluss der Verbrennungsluftregelungssoftware-Entwicklung ist in Abbildung 29 dargestellt.

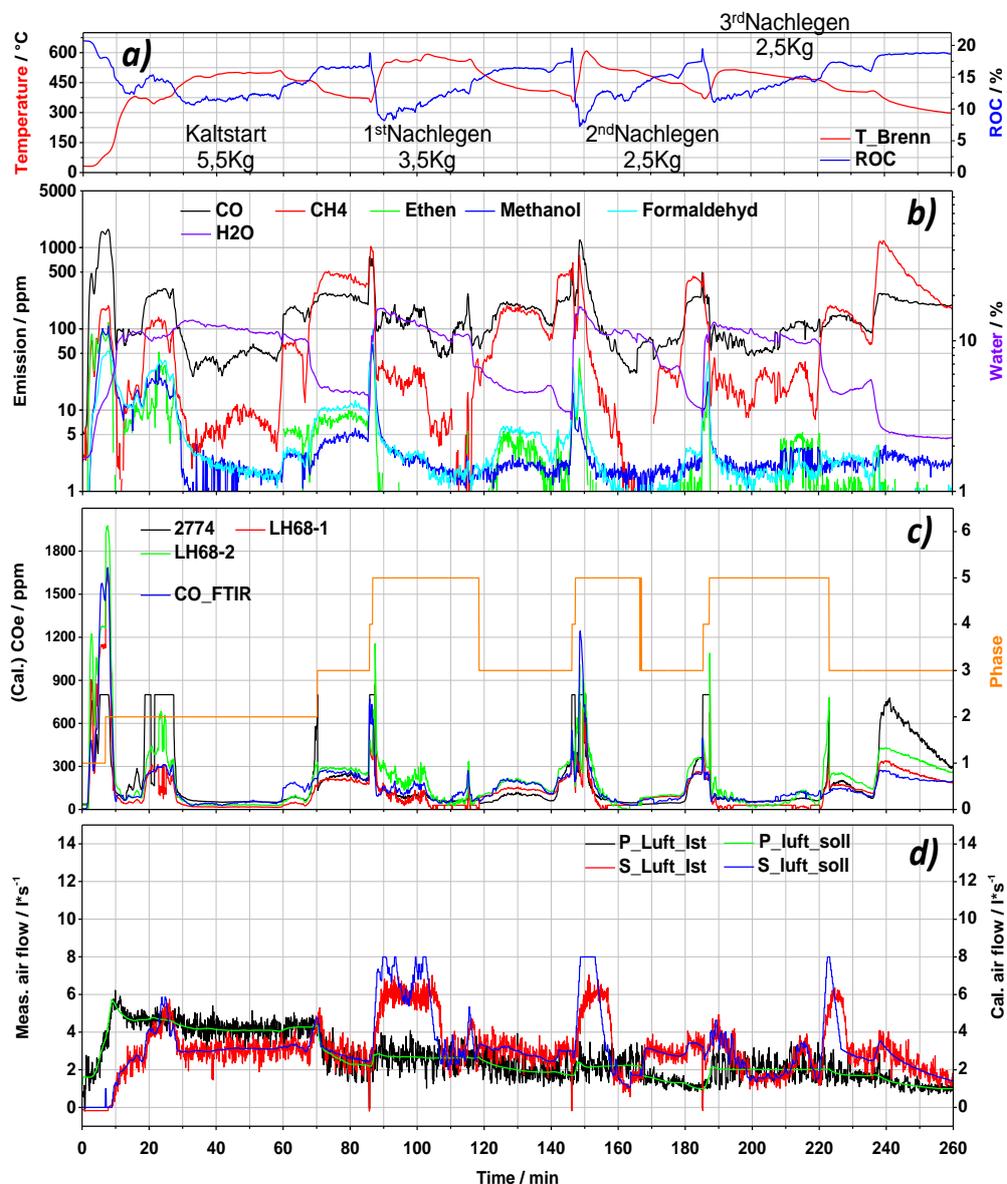


Abbildung 29: Typischer Verlauf eines Chargenabbrandes mit Buchenholz bestehend aus dem Kaltstart und nachfolgend drei Nachlegevorgängen bei Minute 90, 150 und 190 a) Verlauf der Verbrennungstemperatur und der ROC, b) CO/HC-Analyse der Abgaszusammensetzung (nur IR-aktive Komponenten), c) Verlauf der MPGS-Signale und der CO-Konzentration in den verschiedenen Phasen 1-5 der Verbrennung (dargestellt als orange Linie), d) Primär- und Sekundär-Verbrennungsluftströme (Soll- und Ist-Werte)

Der Datensatz basiert auf der Messung von ROC (LSU 4.9, Bosch) im Abgasrohr, der Messung der Katalysator Temperatur T_{Brenn} mittels eines Thermoelements, welches die Katalysatorplatte auf der Rückseite (stromabwärts) berührt (Abbildung 29a), der FTIR-Analyse nach kontinuierlicher Gasentnahme aus dem Abgasrohr (Abbildung 29b), der Messung der MPGS-Signale (Abbildung 29c) und der kontinuierlichen Messung der Verbrennungsluftströme mit den beiden Luftmassenströmungssensoren (HFM7, Bosch) (Abbildung 29d).

In Phase 1 nach der Zündung (Kaltstart) wird der Primärluftstrom mit der Temperatur kontinuierlich erhöht. Die Sekundärluft bleibt in dieser Phase geschlossen, da der Katalysator noch nicht seine Mindestbetriebstemperatur erreicht hat (ca. 200 °C).

Sobald die Mindestbetriebstemperatur des Katalysators erreicht ist, geht die Regelung in Phase 2, die Hochtemperaturphase, über. In dieser Phase wird der Primärluftstrom mit weiter steigender Temperatur und zunehmender ROC verringert und der Sekundärluftstrom wird abhängig von Temperatur und CO_e geregelt.

Abbildung 29b zeigt die relativ hohen CO-Emissionen (> 1000 ppm) während der kurzen Zündphase, die anschließend sehr steil auf recht niedrige CO-Konzentrationswerte zwischen typisch ca. 30 bis 300 ppm in Phase 2 fallen. Auch in der anschließenden Ausbrandphase (Phase 3) wird dieser Wertebereich kaum überschritten. Wie der Vergleich mit entsprechenden Ergebnissen aus dem SenSTEF-Projekt zeigt, ist dies eine Folge der sehr moderaten Zudosierung und der günstigen Verteilung der Verbrennungsluft sowie der hohen katalytischen Aktivität des Oxidationskatalysators in diesen Verbrennungsphasen, in denen die Katalysator Temperatur immer über 300 °C lag.

Wird Scheitholz nachgelegt, dann bedeutet dies eine völlig andere Verbrennungssituation im Vergleich zur Zündphase. Während beim Kaltstart (Phase 1) im oberen Bereich des Holzstapels gezündet wird (vgl. Abbildung 31), muss beim Nachlegen auf die heiße Glut aufgelegt werden. In dieser Situation wird das Holzsplit von unten gezündet, was bei schneller, großflächiger Zündung mit einem sehr hohen Sauerstoffbedarf verbunden sein kann. Dieser extrem instationäre Prozess ist entsprechend durch kurze Emissionsspitzen (Abbildung 29b) gekennzeichnet und wird softwareseitig durch die Regelungsphase 4 abgebildet. Der steile Anstieg von T_{Brenn} in dieser kurzen Phase korreliert mit einem steilen Abfall von ROC. Um sauerstoffdefizitäre Verbrennung möglichst zu vermeiden, wird mit schnell zunehmender T_{Brenn} und der CO/HC-Konzentrationen hauptsächlich der Sekundärluftstrom sehr zügig gesteigert. Bei Überschreitung einer bestimmten Temperaturschwelle geht die Regelung anschließend in Phase 5 über, in der dann die Emissionen wieder sehr schnell auf CO-Werte im Bereich von ca. 30 bis 200 ppm abklingen. Die Regelungscharakteristik ähnelt in dieser Phase der von Phase 2, allerdings sind die Regelungsparameter-Werte deutlich unterschiedlich. Fällt in Phase 5 T_{Brenn} unter 85 % der Maximaltemperatur, die in dieser Phase erreicht wurde, und ist gleichzeitig $\text{ROC} > 13,5 \text{ Vol.-%}$, dann wird wieder nach den Algorithmen der Ausbrandphase (Phase 3) geregelt, in der die Emissionen statistisch nicht signifikant höher sind.

Wie Abbildung 29c zeigt, stimmten die aus den Signalen der MPGS ermittelten CO_e -Werte mit den gemessenen Werten (CO_{FTIR}) nicht absolut aber in der Tendenz recht gut überein. Das ist nicht weiter überraschend, da in die Mischpotenzialbildung nahezu alle (teiloxidierten) Abgaskomponenten mit unterschiedlicher Sensitivität eingehen. Die aus den Signalverläufen der beiden MPGS errechneten CO_e -Werte sind allerdings signifikant unterschiedlich. Dies wird auf die unterschiedliche Empfindlichkeit auf die HC-Komponenten zurückgeführt, die bei der Kalibrierung nicht berücksichtigt wurden. Für eine sehr gute Regelung der Verbrennungsluftströme und entsprechend hohe Verbrennungsqualität (im Vergleich zur nach der 1. BImSchV aktuell zulässigen CO-Emissionsobergrenze von 1250 mg/m^3 sind diese Emissionswerte abgesehen von den kurzen Kaltstart- und Nachlegepeaks sehr niedrig) reicht diese eingeschränkte Kalibrierung allerdings vollkommen aus.

Feldtests über vier Monate: Evaluation der Verbrennungsluft-Regelungssoftware an einer scheitholzbefeuerten HKD7-ERF mit Oxidationskatalysator bei Naturzugbedingungen

Nach vorläufigem Abschluss der Entwicklung der Verbrennungsluft-Regelungssoftware für die HKD7-Feuerstätte im Feuerungstechnikum des ISIS wurde der notwendige Teil der Messtechnik zum FuE-Dienstleister Brunner GmbH nach Eggenfelden gebracht, um dort im Rahmen von Feldtests die mit diesem System erreichbare Verbrennungsqualität unter Naturzugbedingungen in einer baugleichen Feuerstätte zu untersuchen. Die gesamte Messtechnik (Datentransfer und Softwareänderungen) wurde vom ISIS aus ferngesteuert, so dass die Feldtests bis auf die manuelle Bestückung mit Scheitholz bzw. den Zündvorgang automatisch ablaufen konnten. Weiterhin ließ die Software alternativ auch den manuellen Betrieb der Anlage zu. In dieser Software-Betriebsart können die Verbrennungsluftströme vom Betreiber (manuell) vorgegeben werden.

Da die vorangegangenen Untersuchungen der MPGS die beste Langzeitstabilität für den Typ LH68 bei Betrieb im Abgas erwarten ließen, wurden zwei LH68-MPGS in den Feldtests eingesetzt, um an diesen

beiden Exemplaren die Langzeit-Stabilitätsuntersuchungen fortzusetzen. Das Ergebnis dieser Langzeitstudie wird nachfolgend vorgestellt.

Zuerst wurden die Experimente an der bereits installierten HKD7-Feuerstätte mit Katalysator vorgenommen und erstmals die Verbrennungsluftregelung bei Naturzugbedingungen überprüft. Der zu diesem Zeitpunkt installierte Katalysator war bereits vorher in Feuerungsexperimenten sowohl beim Partner DBFZ als auch bei der Brunner GmbH eingesetzt worden. Abbildung 30 zeigt exemplarisch den typischen Verlauf eines Abbrandes beim damaligen Zustand der Feuerstätte.

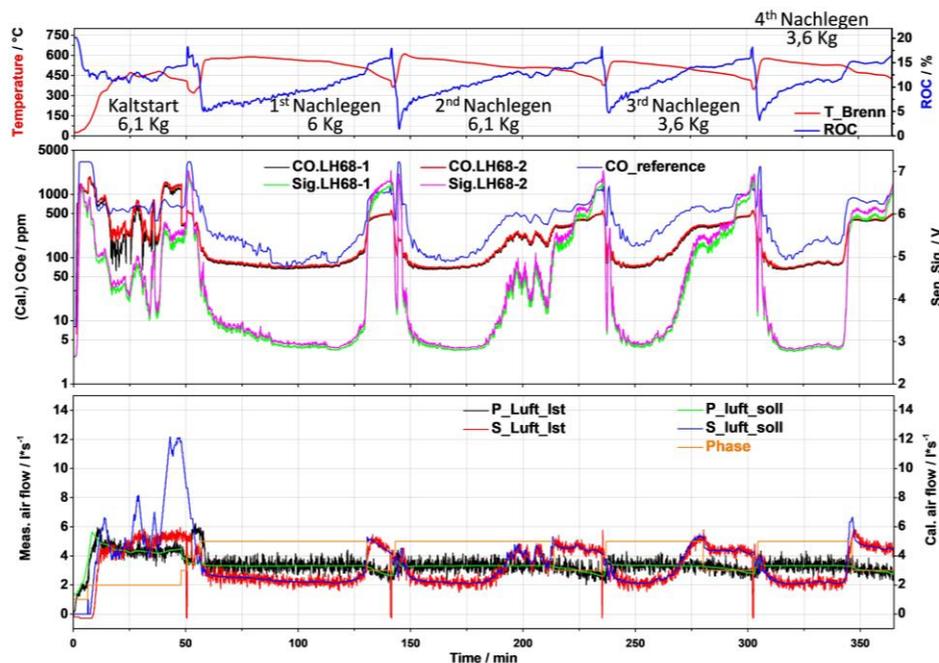


Abbildung 30: Typischer Verlauf eines automatisierten Chargenabbrandes in einer HKD7-ERF mit gealtertem Oxidationskatalysator

Bereits das erste Feuerungsexperiment hat gezeigt, dass auch unter ungünstigsten Bedingungen (Kaltstart mit kaltem Kamin, Kaminzug ca. 4 bis 5 Pa) die Verbrennungsluftregelung nach Softwarevorgabe problemlos arbeitete. Dies stellt im Vergleich zum Stand der Technik bereits einen klaren Fortschritt dar, da mit dieser Verbrennungsluftregelung in gewissen Grenzen eine Unabhängigkeit des Verbrennungsprozesses von den Kamin-Zugbedingungen (Temperatur des Kamins, Witterungsbedingungen) erreicht werden kann. Die aus den LH-Sensorsignalen mittels der Kalibrierdaten kalkulierten CO_e -Werte lagen zwar immer niedriger als die CO-Analysewerte (CO-reference aus Abgasmessung), beschrieben jedoch die Änderungen über den Abbrand gut. Anhand der gleichzeitig vorgenommenen Abgasanalyse (Brunner-Analysesystem: Uras 14, ABB Group) zeigte sich allerdings, dass die teilweise sehr niedrigen CO-Emissionswerte, die entsprechend dem finalen Stand der Softwareentwicklung am ISIS erwartet worden waren, mit dieser ERF im Feldtest nicht erreicht wurden (vgl. Abbildung 29 mit Abbildung 30). CO-Konzentrationen im Bereich 100 bis 4000 ppm wurden beobachtet, während im ISIS-Technikum typische CO-Werte im Bereich 40 bis 1500 ppm gemessen wurden. Alle Abgas-Konzentrationsangaben in ppm sind in diesem Bericht Werte ohne Sauerstoffbezug, d.h., diese sind nicht auf 13 Vol.-% O_2 bezogen, außer es wird explizit darauf hingewiesen.

Weitere iterative Optimierungen der Regelungsparameter brachten nur unbedeutende Verbesserungen der Emissionscharakteristik. Darüber hinaus zeigten alle Experimente mit diesem Feldtestaufbau, dass bei Unterschreiten der Katalysatortemperatur T_{Brenn} unter ca. 500 °C die Emissionen mehr oder weniger sprunghaft anstiegen (Abbildung 30). Diese Beobachtungen ließen vermuten, dass der Katalysator durch Alterung weniger aktiv war. Nach Angabe der Partner waren mit diesem Exemplar in vorherigen Experimenten bereits mehr als 2090 kg Buchenholz verbrannt worden. Dies entspricht ca. 580 Betriebsstunden.

Aufgrund der obigen Erkenntnisse wurde im Verbund entschieden, einen neuen Katalysator einzusetzen, der dann Anfang Dezember 2021 in die Feldtestanlage eingebaut wurde. Daraufhin wurden iterativ weitere Optimierungen der Regelungsparameter durchgeführt. Diese führten dann im Januar 2022 zu mehreren Abbrandexperimenten, anhand derer eine herausragende Verbrennungsqualität demonstriert werden konnte. Eine repräsentative Darstellung der Daten ist in Abbildung 31 und in Abbildung 32 zu sehen.

Die Evaluation der abermals modifizierten und auf den neuen Katalysator angepassten Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen bezog sich zuerst auf das Abbrandverhalten bei verschiedenen Scheitholzstapelungs- bzw. -verteilungsarten. Kalt gestartet wurde mit 5,7 kg Buchenscheitholz und

nachgelegt wurden jeweils 3,5 kg Buchenscheiten in verschiedenen Verteilungsarten auf der Glut. Die Korrelation zwischen ROC und der Katalysatortemperatur T_{Brenn} ist deutlich zu sehen. Bei sehr hoher T_{Brenn} ($> 550\text{ }^{\circ}\text{C}$) sank die ROC auf Werte unter 8 Vol.-%. Dies war insbesondere direkt nach der neuerlichen Zündung nach einem Nachlegevorgang mit einem scharfen Minimum der ROC zu beobachten. Dieser regelungstechnisch schwierig zu beherrschende, extrem instationäre Verbrennungsvorgang wurde folgerichtig von einer ebenso scharfen CO-Emissionsspitze ($> 1000\text{ ppm}$) begleitet. Es zeigte sich, dass alleine durch sehr zügige Erhöhung des Sekundärluftstromes dieses kurzzeitige Sauerstoffdefizit nicht zufriedenstellend vermieden werden kann. Eine Verbesserung dieses Sachverhaltes wurde in einem ersten Schritt in der nächsten Iteration zur Optimierung der Regelungssoftware vorgenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 32 zu sehen. Allerdings ist bereits bei diesem Entwicklungsstand anzumerken, dass mit dem neuen Katalysator selbst bei T_{Brenn} deutlich unterhalb $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ vergleichsweise geringe CO-Emissionen von unter 500 ppm über nahezu das gesamte Abbrandexperiment beobachtet wurden.

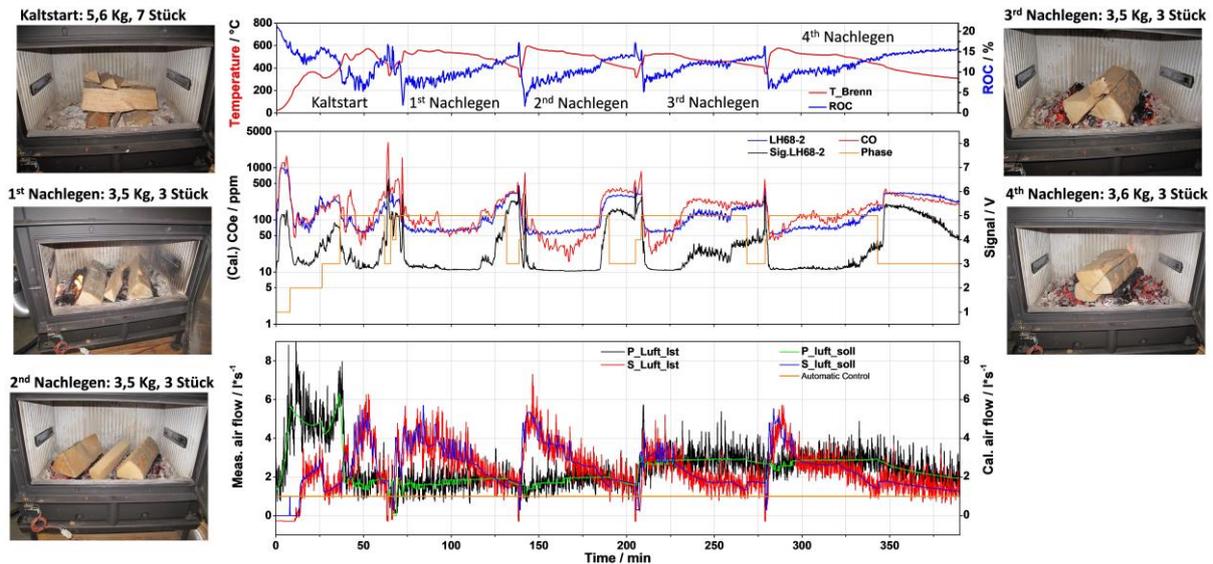
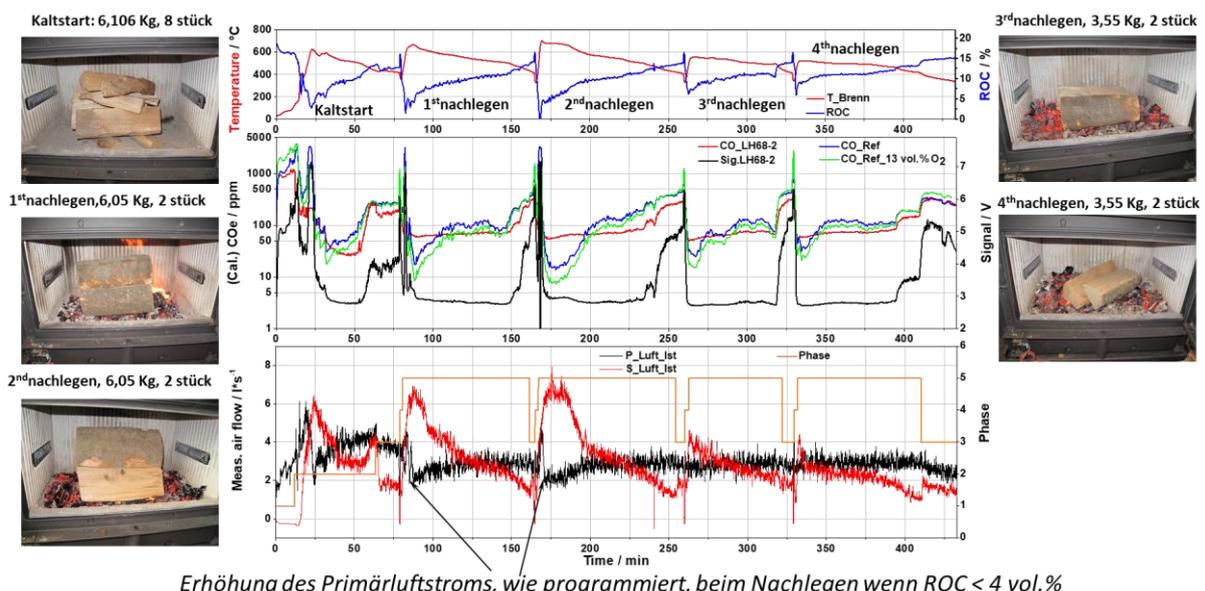


Abbildung 31: Typischer Verlauf eines automatisierten Chargenabbrandes in einer HKD7-ERF nach Einbau eines neuen Oxidationskatalysators (Blue Fire, ETE EmTechEngineering GmbH, Leipzig) und weiterer Optimierung der Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen

Als erstes Zwischenfazit ist somit hervorzuheben, dass sich, abgesehen von sehr kurzen Emissionsspitzen, das gesamte Abbrandgeschehen durchweg durch niedrige CO-Emissionen auszeichnet, die immer unter 500 ppm und in weiten Zeitbereichen sogar deutlich unter 50 ppm ($\cong 62,5\text{ mg/m}^3$) lagen.



Erhöhung des Primärluftstroms, wie programmiert, beim Nachlegen wenn ROC < 4 vol. %

Abbildung 32: Verlauf eines automatisierten Chargenabbrandes (finale Version der Verbrennungsluftregelung) mit Illustration der Scheitholzstapelung, der sensorisch ermittelten Prozessparameterwerte und der CO-Referenzierung (CO-Analysesystem, Brunner GmbH). Der Sprung von Phase 3 nach Phase 4 (orangefarbene Kurve) kennzeichnet den Nachlegezeitpunkt. Die zusätzliche Verbrennungsluftdosierung nach dem Nachlegen bei Unterschreitung der Grenze ROC = 4 Vol.-% ist durch Pfeile gekennzeichnet

Wie oben bereits erwähnt, wurden in einem letzten Iterationsschritt die Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen nochmals speziell zur besseren Regelung der Verbrennungsluftströme direkt nach dem Nachlegevorgang modifiziert. In Abbildung 32 sind die relevanten Prozessdaten für einen Kaltstart mit nachfolgend vier Nachlegevorgängen illustriert. Da die optimale Regelung der Verbrennungsluftströme mit Erhöhung der Scheitholz-Nachlegemenge zunehmend schwieriger wird, wurde in dieser Abbrandsequenz zweimal die Volllast von 6 kg Buchenholz und zweimal eine Teillast 3,5 kg Buchenholz simuliert, um die Effizienz der Verbrennungsluftregelung bei unterschiedlichen Nachlegemengen und die damit einhergehenden Emissionen zu untersuchen. In diesem Software-Entwicklungsschritt wurde im Falle der Unterschreitung der ROC unter die Grenze von 4 Vol.-% der Primärluftstrom zusätzlich erhöht. Die Messergebnisse haben bestätigt, dass auf diese Weise dem manchmal zuvor beobachteten und auch in Abbildung 32 zweimal auftretenden kurzzeitigen Sauerstoffdefizit entgegengewirkt werden kann. Die Minima der ROC unmittelbar nach dem Nachlegen von 6 kg Buchenholz sind im Rahmen der Reproduzierbarkeit nur wenig ausgeprägter als jene, die bei Teillast gemessen wurden. Auch dieses Beispiel untermauert die gute Qualität, die beim momentanen, finalen Stand der Verbrennungsluftregelung erreicht wurde. Kritische instationäre Verbrennungssituationen wurden recht gut regelungstechnisch ausgeglichen und bereits nach wenigen Minuten nach dem Nachlegen ergaben die Emissionen sehr niedrige CO-Werte unter 100 ppm. Generell ist zu beobachten gewesen, von kurzzeitigen Ausnahmen (z.B. Kaltstart solange $T < 200\text{ °C}$) abgesehen, dass über die Gesamtzeit der Abbrände sehr niedrige CO-Emissionen (meist deutlich unter 500 ppm) erreicht wurden. Werden die CO-Emissionswerte zur besseren Vergleichbarkeit auf einen Abgas-Restsauerstoffgehalt von 13 Vol.-% (Abbildung 32, grüne Kurve) umgerechnet, dann überstieg dieser Wert nur kurzzeitig in der Kaltstartphase einen Wert von 1250 mg/m^3 und lag ansonsten immer – abgesehen von extrem kurzen Spitzen beim Nachlegen – unter 500 ppm (625 mg/m^3), in den überwiegenden Zeitbereichen sogar um bzw. deutlich unter 100 ppm (125 mg/m^3) (Abbildung 32).

In Anbetracht der zurzeit gültigen CO-Emissionsobergrenze von 1250 mg/m^3 ist dies zweifellos ein sehr bedeutender Schritt, um generell die Emissionen von Scheitholz-Kleinfeuerungsanlagen weit unter die momentan nach der 1. BImSchV vorgegebenen Obergrenzen abzusenken.

Somit kann anhand obiger Vergleiche hinsichtlich der erreichten Emissionen mit dem Stand der Technik durchaus von einem Technologiesprung auf dem Weg zu erheblich emissionsärmeren Einzelraumfeuerungen gesprochen werden. Diesen Sachverhalt zeigt noch eindrucksvoller ein Vergleich mit einem manuell gesteuerten Abbrand (Abbildung 33), der zusätzlich ohne Katalysator ausgeführt worden war.

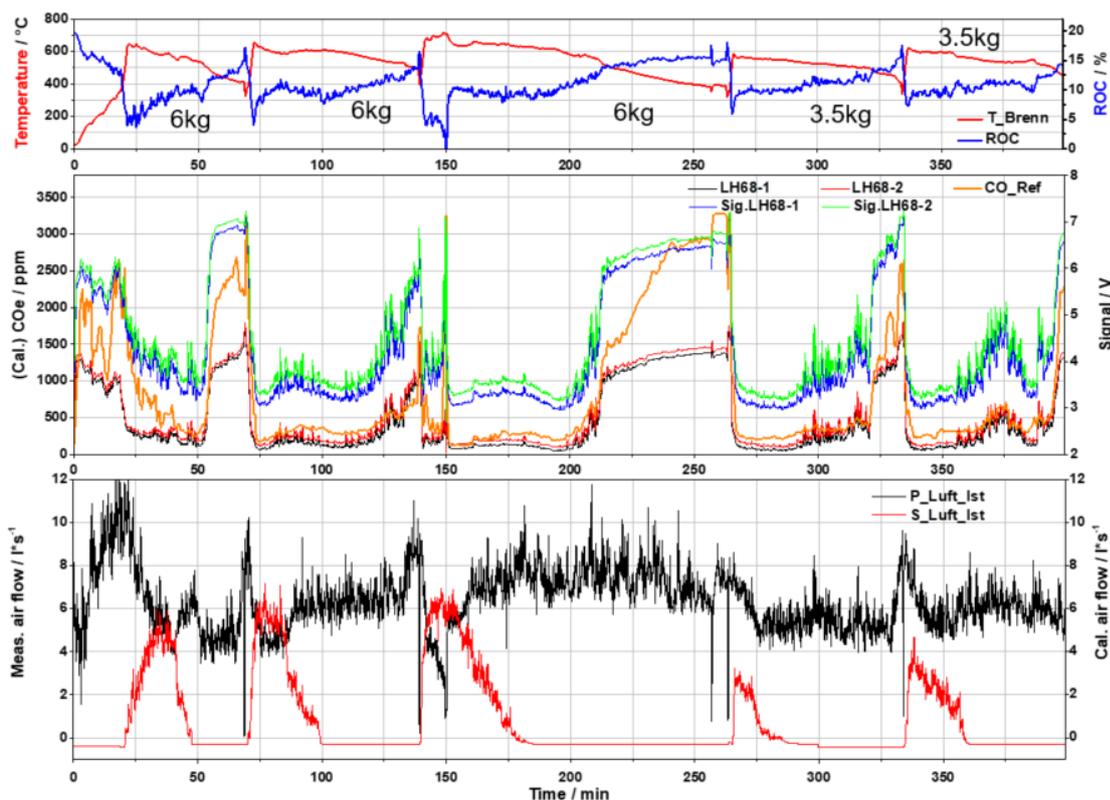


Abbildung 33: Chargenabbrand bei manueller Vorgabe der Verbrennungsluftströme (die eingesetzten Holz mengen sind im oberen Diagramm in kg für jede Verbrennungssequenz separat angegeben)

Der Verlauf der analysierten CO-Emissionen überstieg mehrfach sowohl in der Kaltstartphase als auch nach dem Nachlegen die CO-Emissionsschwelle von 2000 ppm und erreichte zeitweise sogar Emissionswerte von über 3000 ppm. Solche hohen Emissionswerte wurden immer dann beobachtet, wenn die Verbrennungstemperatur unter 500 °C fiel. Auch in den Zeitbereichen höchster Verbrennungstemperatur, in denen die niedrigsten CO-Anteile erwartet werden, wurden immer CO-Anteile von etwa 200 ppm beobachtet, während die entsprechenden Werte bei den dargestellten Experiment mit Regelung (in Abbildung 32) teilweise deutlich unter 50 ppm lagen.

Um näherungsweise auch quantitativ die Emissionen unterschiedlich geführter Feuerungen bei vergleichbaren zur Verfeuerung eingesetzten Scheitholzmenigen darstellen und vergleichen zu können, wurde zuerst die momentane CO-Emission ($COem$) durch Gl. 2 beschrieben.

$$COem = (\sum(P_{Luft_Ist} + S_{Luft_Ist}) c(CO) \Delta t) t_{ges}^{-1} \quad (Gl. 2)$$

$COem$ wird näherungsweise durch das Produkt aus der Summe der beiden Verbrennungsluftströme (P_{Luft_Ist} , S_{Luft_Ist}), $c(CO)$ und dem Messintervall Δt bestimmt. $c(CO)$ wurde in den Experimenten am ISIS mit dem FTIR und bei den Feldtest-Experimenten mit dem Gasanalysesystem der Brunner GmbH gemessen. Das Messintervall betrug immer 5 s. Ermittelt man nun $c(CO)$ in mg/m^3 (1 ppm CO \cong 1,25 mg/m^3 CO bei 0 °C), summiert über alle Messstützpunkte $COem$ und dividiert diese Summe über die Gesamtzeit t_{ges} der Datenerhebung eines Abbrandes, dann erhält man eine mittlere Emission über den gesamten Abbrand in der Einheit mg/min (CO-Massestrom). Dies erlaubt den relativen quantitativen Vergleich der Verbrennungsqualität von Abbränden, die unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt wurden (Abbildung 34).

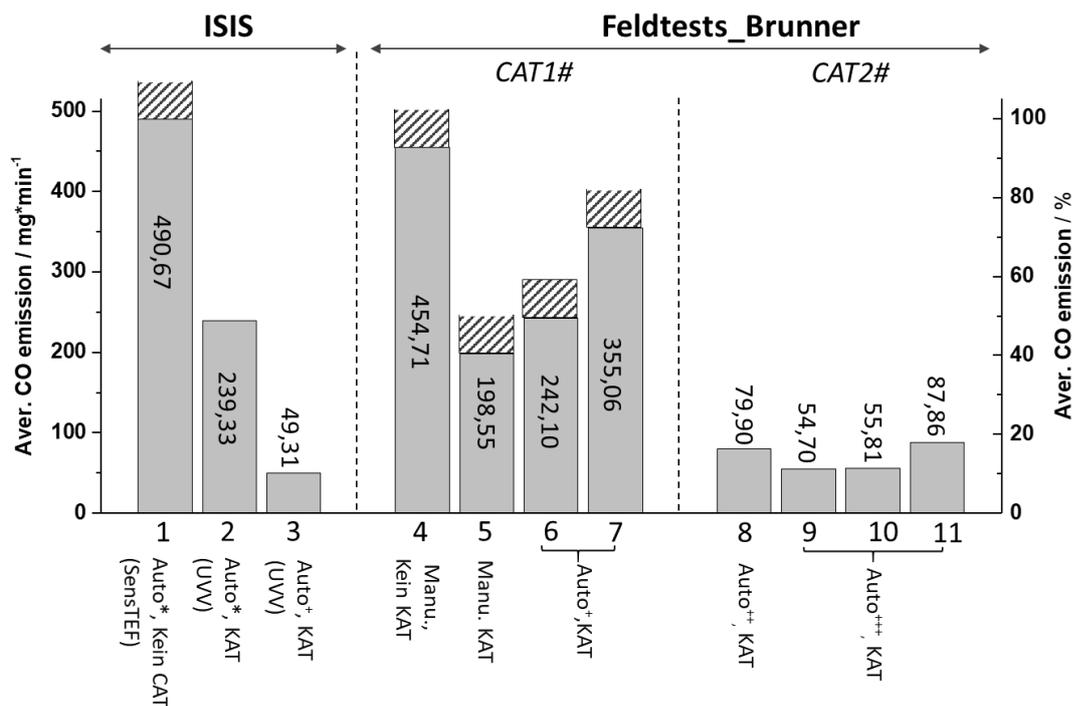


Abbildung 34: Vergleich der gemittelten CO-Emissionen über mehrere Gesamtabbrände (Kaltstart mit mehrfach Nachlegen) bei verschiedenen Betriebsbedingungen der HKD7-Feuerstätte, 1: Abbrand bei automatisierter Verbrennungsluftregelung ohne Katalysator (finaler Stand der Software-Entwicklung aus Vorprojekt SensTEF), 2: Mittlere Emissionen bei Regelung nach dem Stand des Regelungsalgorithmus aus dem SensTEF-Projekt am ISIS, jedoch mit Katalysator, 3: Mittlere Emissionen, gemessen am ISIS bei Regelung nach dem finalen Stand des UVV-Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmus mit Katalysator, 4: Mittlere Emissionen, gemessen beim Feldtest (Brunner GmbH) ohne Katalysator, 5: Mittlere Emissionen bei manueller Nachführung der Verbrennungsluftströme unter Beobachtung der Emissionen/Sensorsignale mit gealtertem Katalysator (CAT1#). Standard Feuerungsbetrieb (Kaltstart mit 6 kg Buchenholz, 2x nachlegen mit je 6 kg gealtertem Katalysator (CAT1#) nach dem damaligen Stand der Verbrennungsluft-Regelungssoftware-Entwicklung bei Standard-Feuerungsbetrieb, 8/9: Mittlere Emissionen bei automatischem Betrieb und modifizierte Version angepasst an neuen Katalysator (CAT2#) (Feuerungsbetrieb: Kaltstart mit 6 kg Buchenholz, 4x nachlegen mit je 3,5 kg Buchenholz, 10: Mittlere Emissionen bei automatischem Betrieb (weitere Optimierung der Software) mit CAT2# (Feuerungsbetrieb: Kaltstart mit 6 kg Buchenholz, 4x nachlegen mit 3,5 kg Buchenholz, 1x nachlegen mit 5,5 kg Buchenholz), 11: Mittlere Emissionen bei automatischem Betrieb (Software-Version wie in 10) mit CAT2# (Standard Feuerungsbetrieb)

Einen Überblick über verschiedene Abbrände mit unterschiedlicher Prozessführung (mit/ohne Katalysator, manuelle/automatische Prozessführung) gibt Tabelle 5. Die Emissionen wurden über den gesamten Abbrand gemittelt, d.h. sowohl die Kaltstartphase, alle Nachlegephasen und die Ausbrandphase bis zur Unterschreitung von 350 bis 450 °C. Diese Unterschiede in der Vergleichbarkeit sind aus den Abbildungen ersichtlich und die damit verbundenen Emissionsbeiträge sind in Abbildung 34 durch die schraffierten Flächen entsprechender Wertebalken angedeutet.

Tabelle 5: Vergleich der mittleren Emissionen von Abbränden mit Buchenscheitholz, die unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt wurden

	Prozessführung	Mittlere CO-Emiss. / mg/min	Feinstaub-emissionen / mg/Nm ³	Bemerkungen
1	Automatisierter Betrieb ohne Katalysator	491	k.A.	Daten aus dem SensTEF-Projekt, Saugzugventilator
3	Automatisierter Betrieb mit Katalysator (neu) am ISIS (Abb. 10)	49	k.A.	Kaminzug ca. 15 Pa (Saugzugventilator)
4	Manueller Betrieb ohne Katalysator Feldtest	455	Volllast: 21,8 Nennlast: 28,7	Naturzug
5	Manueller Betrieb mit CAT1# (gealtert)	199	Volllast: 43,3 Nennlast: 31,0	Naturzug
6	Automatisierter Betrieb mit CAT1# (gealtert) Feldtest	242	Volllast: 26,1 Nennlast: 39	Regelungssoftware nach Entwicklungsstand (3); Parameter nicht final an Bedingungen (CAT1#) adaptiert! Naturzug.
11	Automatisierter Betrieb mit CAT2# (neu) Feldtest	80; 55; 56; 88*	*Volllast: 21,2 *Nennlast: 9	Naturzug

Die in Abbildung 34 visualisierten mittleren CO-Emissionen (siehe auch Tabelle 5), die bei Betrieb von zwei baugleichen HKD7-Feuerstätten am ISIS und bei den Feldtests der Brunner GmbH ermittelt wurden, geben einen Überblick über die Emissionswerte in Abhängigkeit von den Randbedingungen der Prozessführung. Der Betrieb ohne Katalysator führte im Rahmen der Reproduzierbarkeit in etwa zu den gleichen mittleren Emissionen sowohl bei automatisierter Verbrennungsluftregelung (SensTEF) als auch bei manueller Steuerung der Verbrennungsluftströme. Hierbei ist anzumerken, dass unter „manueller Steuerung“ die (manuelle) Nachführung der Verbrennungsluftströme unter Nutzung der Verbrennungslufteinstellsoftware und Berücksichtigung der aktuellen Emissions-Messwerte verstanden wird. Diese Nachführung ist keineswegs vergleichbar mit einer mechanischen Verbrennungslufteinstellung durch eine Person, der keinerlei Informationen, weder über das Abbrandgeschehen noch über die aktuelle Verbrennungsluftzufuhr, vorliegen. Von einer Verbrennungslufteinstellung alleine basierend auf der visuellen Beobachtung des Abbrandgeschehens wird ein vergleichsweise deutlich schlechteres Emissionsergebnis erwartet als bei jenen Werte, die unter den Experimenten 1 und 4 (Tabelle 5) angegeben sind.

Werden die Emissionswerte verglichen, die bei den Feldtests mit CAT1# (Experimente 5 und 6, Tabelle 5) erzielt wurden mit jenen, die ohne Katalysator erreicht wurden (Experimente 1 und 4, Tabelle 5), dann offenbart sich eine deutliche Reduzierung der mittleren CO-Emissionen auf etwa die Hälfte. Diese Emissionswerte waren allerdings erheblich höher als jene, die mit dem finalen Stand der Verbrennungsluft-Regelungssoftware im Technikum des ISIS erzielt worden waren (Experiment 3, Tabelle 5). Zum Zeitpunkt der ersten Feldtests war CAT1# bereits ca. 580 Stunden im Abgas betrieben worden (geschätzt aus Gesamt-Scheitholzmenge von 2090 kg und Annahme eines Holzverbrauchs von 3,6 kg/h). Die Hypothese, dass diese signifikant höheren gasförmigen Emissionen auf eine verringerte Katalysatoraktivität infolge Alterung zurückzuführen waren, wurde durch die Beobachtung steil steigender Emissionen gestärkt, wenn die Katalysatortemperatur in der Ausbrandphase ca. 500 °C unterschritt. Während mit CAT1# bei Unterschreitung von 500 °C die CO-Konzentrationen bei ca. 1000 ppm lagen, wurden mit CAT2# selbst bei Unterschreiten von 400 °C CO-Konzentrationen meist unter 500 ppm beobachtet. Umsatzmessungen vor und nach dem Einsatz des Katalysators, die quantitativen Aufschluss über die Veränderung der

katalytischen Wirkung durch Alterung geben könnten, liegen leider nicht vor, da der Katalysator in die Feuerstätte integriert war und eine Messung vor dem Katalysator nicht einfach möglich war.

Die Emissionsergebnisse, die bei automatisiertem Betrieb mit CAT2#, also einem neuen Katalysator erzielt wurden (Experimente 11, Tabelle 5), zeigen allerdings das hohe Potenzial der Oxidationskatalyse bei sensorgestützter, automatisierter Verbrennungslufteinstellung deutlich auf. Die mittleren CO-Emissionen stellen Reduktionen der Emissionen verglichen mit den Experimenten ohne Katalysator (Experimente 1 und 4, Tabelle 5) um mehr als 80 % dar. Wie oben bereits angemerkt, ist dieses Reduktionspotenzial eher pessimistisch kalkuliert, da die wahren Emissionen bei Handsteuerung durch eine Betriebsperson ohne die Kenntnis der sensorisch ermittelten Prozessinformationen vermutlich erheblich höher zu veranschlagen sind. Die Variation der Emissionswerte der einzelnen Experimente 11 sind hauptsächlich auf die Variation der nachgelegten Holzmengen und deren Verteilung auf der Glut zurückzuführen.

Betrachtung der Feinstaubemissionen

In der folgenden Betrachtung werden die oben diskutierten gasförmigen Emissionen (im Wesentlichen CO) durch gravimetrisch gemessene Feinstaubemissionsdaten ergänzt, die allesamt vom Auftragnehmer Brunner GmbH im Rahmen der Feldtests durchgeführt wurden. Die Staubmessung wurde jeweils über 30 min gravimetrisch durchgeführt und direkt nach dem Nachlegen der Holzscheite auf die Glut gestartet.

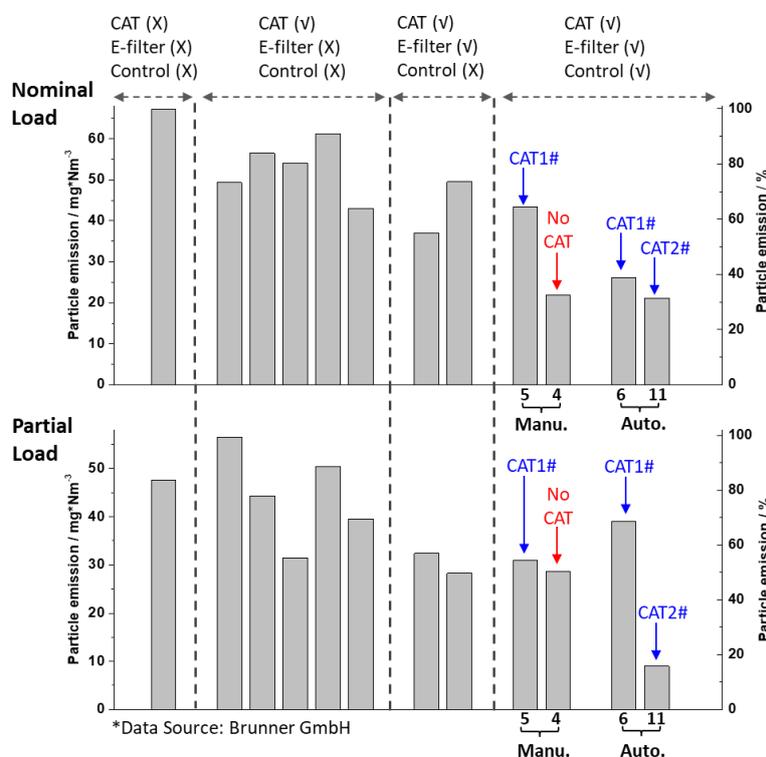


Abbildung 35: Überblick über die Feinstaub-Emissionen der HKD7-Feuerstätte (die Daten wurden für den Nennlast- und Teillastbetrieb getrennt ermittelt, die Unterteilung der Messergebnisse in Betriebsarten mit und ohne Katalysator, mit und ohne Elektroabscheider bzw. mit und ohne automatische Verbrennungsluftregelung ist in der Abbildung gekennzeichnet)

Die Staub-Messungen dargestellt in Abbildung 35 zeigten überwiegend Werte im Bereich 50 bis 70 mg/m³ (i.N. bei 13 Vol.-% O₂) bei Nenn-Heizleistung und etwas geringere Werte bei Teilleistung, wenn kein Elektroabscheider eingesetzt wurde. Mit Elektroabscheider und Katalysator sind die Staubmassekonzentrationen um ca. 30 % geringer.

Werden die Emissionen bei manuellem Betrieb unter Beobachtung der sensorisch ermittelten Emissionen (siehe hierzu die Ausführungen oben) mit denen bei automatischem Betrieb verglichen, dann zeigen diese ersten, noch vorläufigen Ergebnisse, dass bei Einsatz des CAT2# (neuer Katalysator) bei Teilleistung erheblich geringere Gesamtstaubemissionen von unter 10 mg/m³ beobachtet wurden. Insbesondere ergibt sich auch ein signifikanter Unterschied zu den Gesamtstaubkonzentrationen, die bei Betrieb mit CAT1# (gealterter Katalysator) erzielt werden. Diese signifikante und teilweise erhebliche Verringerung der Staubemissionen bei Einsatz eines gut arbeitenden Katalysators können auf die deutlich geringeren Verbrennungsluftströme im Teillast-Betrieb zurückgeführt werden, die zur Erreichung sehr guter Verbrennungsqualität ausreichend (notwendig) sind.

Diese Ergebnisse stellen erste Erkenntnisse dar und sollten durch weitere Untersuchungen unter Verwendung des momentanen Standes der Verbrennungsluft-Regelung erhärtet werden.

Adaption der Verbrennungsluftregelung an die Holzart

Die beschriebene Verbrennungsluftregelung bzw. die aus den zugehörigen Feuerungsexperimenten resultierenden Ergebnisse wurden allesamt mit Buchenholz als Brennstoff erzielt. Wie oben bereits ausgeführt, ist der im UVV-Projekt final erzielte Stand in Bezug auf erzielbare Schadstoffemissionen und Langzeitstabilität der Verbrennungsluftregelung außerordentlich vielversprechend und steht für eine Einführung in den Markt zur Minimierung der Emissionen bereit.

Allerdings wurde die Frage „Wie verhält sich die Verbrennungsluft-Regelung bei Variation der Holzart?“ bisher nicht untersucht. Vergleichende Ergebnisse bei Wechsel der Holzart von Buchenholz auf Kiefernholz werden nachfolgend vorgestellt. Weiterführende Messungen sind dazu notwendig.

Kiefernholz unterscheidet sich hinsichtlich Dichte, Brennwert und Harzanteil (Brennverhalten) deutlich vom Buchenholz. Eine Übersicht wichtiger Eigenschaften gibt Tabelle 6.

Tabelle 6: Übersicht über den Brennwert und die Rohdichte von Buchen- und Kiefernholz

Holzart	Brennwert / kWh/kg	Rohdichte / kg/m ³	Harzanteil
Buche	5,5	720	niedrig
Kiefer	4,4	520	hoch

Aufgrund der Brennwert- und Dichteunterschiede ist zu erwarten, dass bei gleichem Scheitholz-Volumen mit Kiefernholz eine deutlich geringere Wärmemenge frei wird, was zu geringeren Temperaturen im Brennraum und am Katalysator führen könnte und damit die katalytische Oxidation beeinflussen dürfte. Allerdings ist aufgrund der unterschiedlichen Holzeigenschaften (Harzanteil) auch das Abbrandverhalten verschieden, so dass die Regelungsparameter angepasst werden mussten (vgl. Abbildung 36).

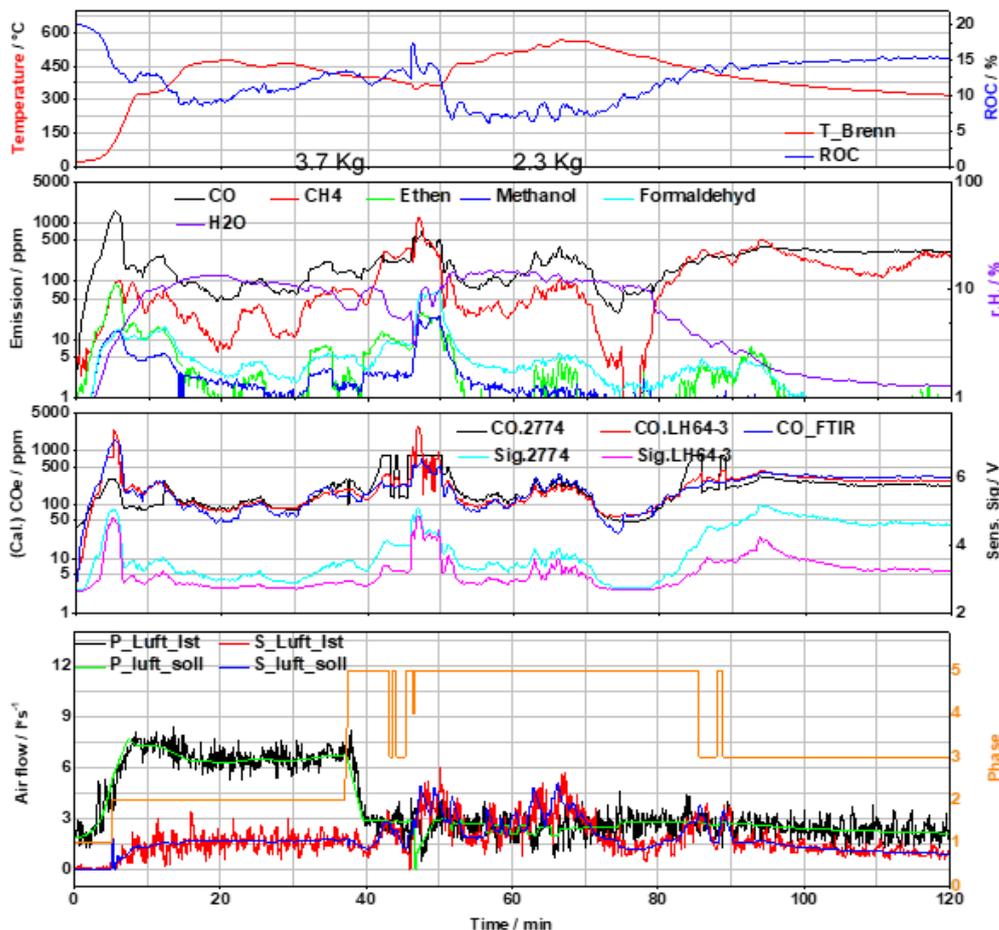


Abbildung 36: Verlauf eines Chargenabbrandes von Kiefernholz bestehend aus dem Kaltstart und nachfolgend einem Nachlegevorgang

Insgesamt wurden zwei Abbrände mit Kiefernholz unter Verwendung des für Buchenholz entwickelten Verbrennungsluftregelungsalgorithmus durchgeführt. Die zur Verbrennung aufgelegten Holzmenngen waren in etwa gleich und hinsichtlich des Volumens vergleichbar mit den Abbrandexperimenten mit Buchenholz. Im Ergebnis zeigte das erste Experiment eine im Vergleich zum Buchenholz deutlich erhöhte Emissionscharakteristik, allerdings bei signifikant niedrigerer Temperatur am Katalysator. Ein Abbrandverlauf bei insgesamt niedrigerer Verbrennungstemperatur war aufgrund der oben angesprochenen Brennwert-Unterschiede erwartet worden. Folglich wurde im zweiten Abbrand-Experiment versucht, die Verbrennungskinetik zu steigern, um auf diese Weise insbesondere eine bessere Oxidation am Katalysator zu erreichen. Hierzu wurde in den Verbrennungsphasen 1, 2, 4 und 5 der Primärluftstrom um den Faktor 1,5 erhöht und der Sekundärluftstrom in allen Verbrennungsphasen halbiert. Das Ergebnis zeigt Abbildung 36. Der Katalysator erreichte Temperaturen (T_{Brenn}) zwischen etwa 400 °C und knapp 600 °C und der ROC wurde in diesem Bereich hoher Verbrennungsgeschwindigkeit mit Werten zwischen 7,5 und 12,5 Vol.-% registriert. Beides erfüllte die Voraussetzungen für einen Abbrandverlauf hoher Qualität. Dies ließ sich auch durch die Abgasanalyse bestätigen. Abgesehen von einem kurzen Peak in der Kaltstartphase lag die CO-Abgaskonzentration während des gesamten Abbrandes unter 500 ppm (625 mg/m³) und in weiten Bereichen sogar unter 100 ppm (125 mg/m³), obwohl der automatische Abbrand (noch) nicht optimal verlief, da die Kriterien für Übergänge zwischen den Abbrandphasen für den Fall eines Kiefernholzabbrandes softwareseitig noch anzupassen sind. Dieser Aspekt stellt aber keine besondere Herausforderung dar, konnte lediglich aus Zeitmangel gegen Ende des Projektes nicht mehr weiter aufgegriffen.

Nach dem momentanen Entwicklungsstand der Verbrennungsluftregelung ist diese auch für verschiedene Holzarten geeignet, wenn die Verbrennungsluftdosierung durch zwei (globale) Parameter und die Übergangskriterien zwischen den Verbrennungsphasen an die Holzart angepasst werden. Dies bedeutet, dass in einer praxistauglichen Verbrennungsluftregelung vor Feuerungsbeginn die Holzart (ggf. reicht die Unterscheidung zwischen Laub- oder Nadelholz) anzugeben ist, um die Verbrennungsluft-Regelungscharakteristik automatisch an wechselnde Holzarten anzupassen.

Abschließende Untersuchungen zur Langzeitstabilität der MPGS

Nachdem schon zu Beginn des UVV-Projektes ein über das gesamte Projekt gültiger Standard zur experimentellen Ermittlung der Sensitivitätseigenschaften von MPGS-Elementen definiert worden war und die zwei interessantesten Individuen der Serie LH68 über den gesamten experimentellen Untersuchungszeitraum immer wieder diesen Sensitivitätstests unterzogen werden konnten, lagen bis zum Projektende für diese beiden Exemplare Sensitivitätsdaten vor, die in Summe eine Einsatzzeit im Abgas über 472 Stunden repräsentieren. Dies entspricht etwa 80 Betriebstagen. Die Signalverläufe der beiden Testsequenzen bei CO- bzw. bei CO/H₂-Beaufschlagung sind jeweils in Abbildung 37 dargestellt.

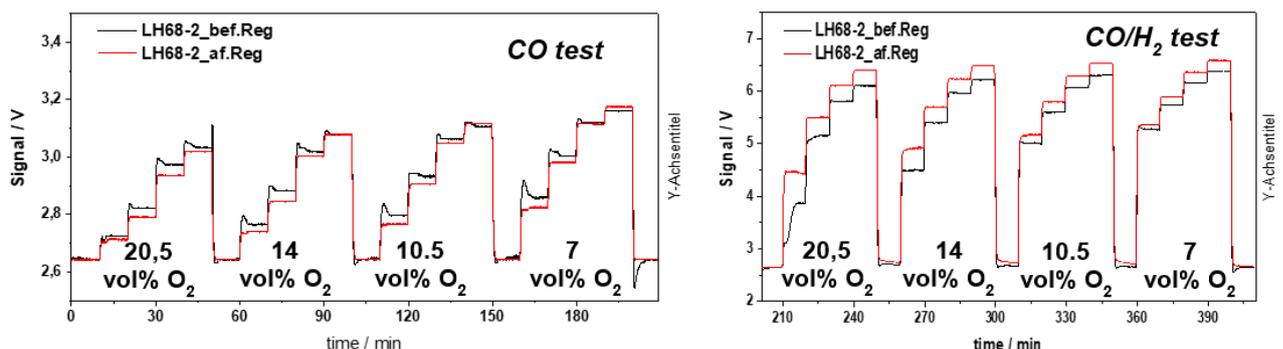


Abbildung 37: Standard Sensitivitätstest-Sequenzen von MPGS mit den Modellgasen CO (a) und CO/H₂ (b) bei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen (Signalverläufe vor (schwarz) und nach (rot) der Regenerierung sind jeweils dargestellt, die Testgas-Konzentrationen betragen jeweils 0, 250 ppm, 500 ppm, 1000 ppm und 1500 ppm, das CO/H₂-Gemisch wurde im Verhältnis 1:1 eingestellt

Die schwarzen Kurven zeigen die Signale, die nach dem letzten Einsatz des LH68_2-MPGS im Feldtest aufgenommen wurden. Anschließend wurden beide LH68-Sensoren einer elektrochemischen Regenerationssequenz unterzogen und dann die Testsequenzen abermals angewandt (rote Kurven). Die Kurvenverläufe nach dem Einsatz im Abgas (schwarz) über eine Zeitspanne von ca. 472 Stunden bei Beaufschlagung mit CO zeigen bei nahezu jeder CO-Konzentrationsstufe eine Signalinstabilität und bei Beaufschlagung mit CO/H₂-Gemischen sowohl eine signifikant geringere Sensitivität bzw. ein etwas verzögertes Ansprechverhalten bei den niedrigeren Konzentrationen im Vergleich zu den Signalen (rote Kurve), die nach der Regeneration gemessen werden. Dieses Ergebnis ist in der Theorie mittlerweile verstanden /Zhg18/ und entsprach den Erwartungen. Durch die lange Einsatzzeit der Sensorelemente im

Abgas kommt es zu einer Oxidbildung an den Drei-Phasen-Kontakten der Au/Pt-Elektrode des MPGS, die bei kathodischer Polarisation nahezu vollständig regeneriert (reduziert) werden kann.

Um quantitative Aussagen hinsichtlich der Signal-Langzeitstabilität treffen zu können, wurden die Sensoren zwischen den Feuerungsexperimenten wiederholt den oben genannten Testsequenzen unterworfen. Das Ergebnis verdeutlicht Abbildung 38. Die Signale streuten über insgesamt 472 Stunden im Abgas der Feuerungsexperimente überwiegend in einem Korridor von $\pm 10\%$, zwei Werte des LH68_2-MPGS lagen sogar oberhalb, d. h., dessen Sensitivität hatte sich im Lauf der Zeit etwas erhöht. Nach der Regeneration (*) lagen alle Signale im entsprechenden Korridor. Unter Berücksichtigung der Signalstreuung war kein signifikanter Drift erkennbar.

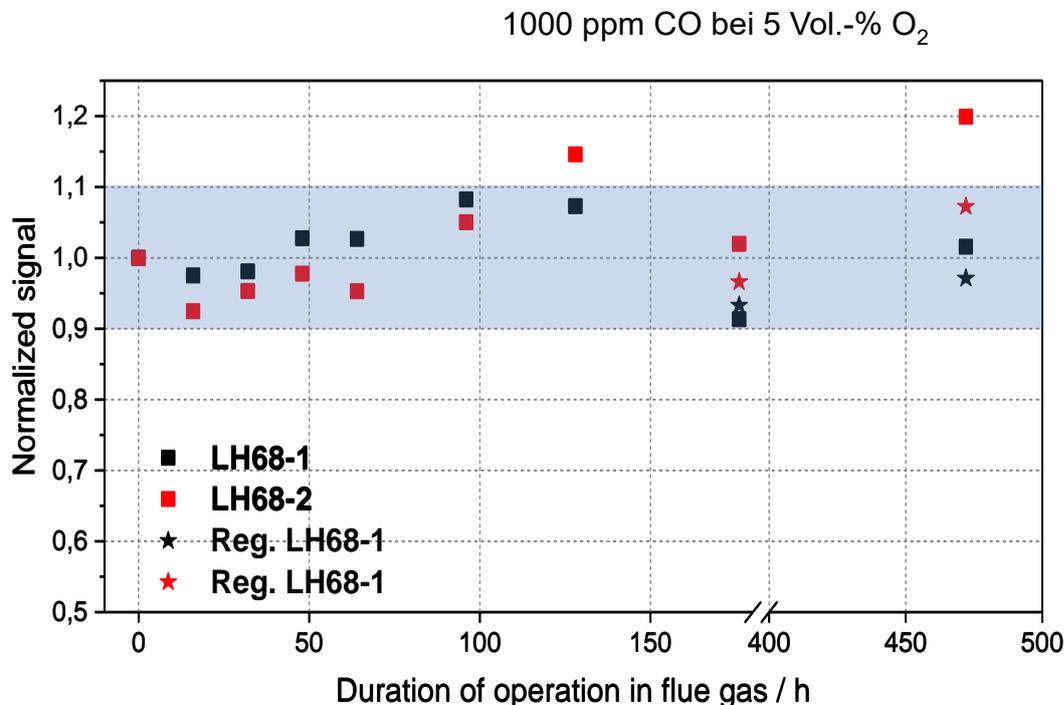


Abbildung 38: Signale der beiden LH68-MPGS dargestellt über die Einsatzzeit im Abgas bei Beaufschlagung mit 1000 ppm CO bei 5 Vol.-% O₂

Als Fazit dieser Untersuchungen ist festzustellen, dass die untersuchten LH68-MPGS die Stabilitätskriterien erfüllten und insbesondere bei wiederkehrender Anwendung der Regenerationssequenz, z. B. nach Auswertung von EIS-Daten über eine Einsatzzeit von 472 h, keine signifikante Signalinstabilität erkennen ließen.

Aufzählung der Arbeitspakete der Hochschule Karlsruhe (ISIS)

- API1 Beschaffung der Abgassensoren LSU 4.9 Sauerstoffsensor (Bosch GmbH), CarboSen 10K CO/HC-Sensor (LAMTEC), Vorbereitung der Flansche, Adapter etc. zur Adaption an die Feuerungsanlage.
- API2 Wiederinbetriebnahme der SF10SK Scheitholzverbrennungsanlage (Brunner GmbH, Eggenfelden, bereits verfügbar aus SenSTEF-Projekt) zur simultanen Untersuchung von drei besonders aussichtsreichen CO/HC-Gassensortypen hinsichtlich deren unterschiedlichen Sensitivität und Langzeitstabilität. Die Scheitholzverbrennungsanlage wird anschließend mit der aus dem SenSTEF-Projekt verfügbaren Verbrennungsluft-Regelungssoftware betrieben.
- API3 Vorbereitung der simultanen Aufnahme der Sensorsignale von drei verschiedenen CO/HC-Gassensortypen (Typ 1-3). Flansche zur Installation im Abgasrohr, abgasfähiges Gehäuse für ISIS-Kalorimetrischen Gassensor (Sensortyp 2), Verkabelung, Modifikation der Messsoftware
- API4 Herstellung von Kalorimetrischen CO/HC-Sensorchips nach am ISIS eingeführten Technologien. (i) Modifizierung der Heizer- und Messstrukturen zur Erzielung einer homogeneren Temperaturverteilung und weiteren Optimierung der Sensitivität (Mikrostruktur - Chip-Design), (ii) Charakterisierung der Sensoreigenschaften bei konstant geregelter Chiptemperatur aber variierenden Umgebungstemperaturen in Modellgasen.
- API5 Umfangreiche Evaluation der drei unterschiedlichen Sensor-Typen (CarboSen 10K, Thermoelektrisch (Uni Bayreuth), Kalorimetrisch (ISIS)) in automatisch geregelten

Abbrandexperimenten an der SF10SK nach im Vorprojekt SenSTEF entwickeltem Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmus. Referenzierung der Abgaszusammensetzung mit einem HT-FTIR Gasanalysesystem. Korrelation der Sensorsignale mit der Abgaszusammensetzung und Untersuchung der sensorspezifischen Abhängigkeiten als Voraussetzung zur weiteren Optimierung der Verbrennungsluftregelung. – Wiederkehrende Sensitivitäts- und Stabilitätskontrolle durch Sensortests in Modellgasen unter Verwendung einer (bestehenden) automatisierten Gasmischanlage. → Aussagen hinsichtlich Langzeitstabilität und Eignung der verschiedenen Sensortypen beim Einsatz im Abgas.

In diesem AP wird auch das neue Verfahren zur Regenerierung der CarboSen-Sensoren nach deren Einsatz im Abgas an mehreren Exemplaren untersucht, um dessen Einsetzbarkeit hinsichtlich Dauereinsatz dieser Sensoren im Feld zu prüfen.

- API6 Hardware-Entwicklung zum Betrieb von CO/HC-Sensoren außerhalb des Technikums, insbesondere für Feldtests:
- Thermoelektrische Sensoren: Hardware ist vorhanden bzw. wird vom Partner Uni Bayreuth zur Verfügung gestellt.
 - Kalorimetrischer Gassensor (ISIS): Hardware für die Heizungsregelung ist als Labormuster vorhanden. Umsetzung der Messelektronik und der Hardware für Heizungsregelung als eine Mess- und Regelungseinheit.
 - Hardware zur elektrochemischen Sensitivitätsbestimmung und zur Regenerierung von CarboSen-Mischpotenzial-CO/HC-Sensoren: In diesem AP ist eine Hardware zu entwickeln, die anhand von Impedanz und/oder cyclo-voltametrischen Messungen am Einbauort des Sensors unter Umgebungsluftbedingungen wiederkehrend die Sensitivität des CarboSen CO/HC-Sensors überprüft und im Falle einer für den weiteren Betrieb unzulässigen Sensitivitätsabnahme eine elektrochemische Regeneriersequenz /KOH17/ anschließt.
- Zum Zeitpunkt der Antragstellung wird davon ausgegangen, dass die verschiedenen Sensortypen unterschiedlich auf die Abgaszusammensetzung reagieren und es ist gut möglich, dass die Evaluierung von zwei oder gar allen drei Sensortypen in den nachfolgenden Feldtests (API12) vorzusehen ist und entsprechend die Betriebshardware für alle drei Sensortypen vorbereitet werden muss.
- API7 Entwicklung von Software
- zur numerischen Analyse der Sensorsignale aus API6 zur Bestimmung einer virtuellen Konzentration der unverbrannten Abgaskomponenten (CO/HC). Diese Software ist generell notwendig, um unter Nutzung von Kalibrierdaten aus dem Sensorsignal die Stellgröße für die Verbrennungsluftregelung ableiten zu können.
 - zur wiederkehrenden Bewertung der Sensitivität von CarboSen-Sensoren und ggf. zur automatischen Regenerierung derselben unter Anwendung der in API6 zu entwickelnden Hardware.
 - Implementierung der Software in das Feuerungsprozess-Regelungs- und Monitoringprogramm
- API8 Unterstützung des Partner DBFZ in Sensorfragen (Sensorauswahl/Rekalibrierungen etc.) zur Optimierung des Verbrennungsprozesses in Hackschnitzelanlagen.
- API9 Installation eines vom Partner Brunner GmbH ausgewählten Stückholz-Ofens am ISIS. Dieser Ofentyp soll mit einem vom Partner DBFZ entwickelten Oxidationskatalysator nachgerüstet werden und ist später für den Feldtest vorgesehen.
- API10 Wiederinbetriebnahme des im Vorprojekt SenSTEF entwickelten Monitors der Firma SICK und ggf. Erweiterung der Soft- und Hardware zur Vorbereitung des Feldtesteinsatzes (beratende Unterstützung der Sick AG wurde zugesichert).
- API11 Analyse der Signale des kalorimetrischen CO/HC-Sensors aus referenzierten Abgasmessungen. Dieses AP ist im Zusammenhang mit den in API5 gewonnenen Datensätzen und der in API7 entwickelten Software-Algorithmen zu sehen. Um eine möglichst zuverlässige Korrelation zwischen den Sensorsignalen und der Abgaszusammensetzung herzustellen, soll eine gründliche numerische Analyse der Datensätze vorgenommen werden. Darüber hinaus ist in diesem AP die enge Zusammenarbeit mit dem Partner an der Uni Bayreuth (APB7) angestrebt, um die Sensitivitäten zu einzelnen Abgaskomponenten anhand von Labormessungen zu bestimmen. Die genaue Kenntnis dieser Zusammenhänge wird die funktionale Interpretation der Sensorsignale zur numerischen Generierung der CO/HC-Einganggröße für die Regelungsalgorithmen deutlich verbessern.
- Entwicklung einer robusten Verbrennungsluft-Regelungssoftware für die in API9 vorbereitete Scheitholz-Verbrennungsanlage und Implementierung in den Sick-Monitor. Vergleich der Emissionen mit/ohne Oxidationskatalysator.
- API12 Durchführung von Feldtests mit der Scheitholz-ERF in enger Kooperation mit der Brunner GmbH unter Nutzung der entwickelten Verbrennungsluft-Regelung (Sick-Monitor) und Einsatz von Oxidationskatalysator.

API13 Betreuung der Feldmessungen an Scheitholz-ERF in enger Kooperation mit der Brunner GmbH
Analyse der Daten aus den Feldtests, Bewertungen, Schlussfolgerungen, Ergebnisverwertung,
Endbericht

1.3 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 3: Konzeptentwicklung von Kessel und Abscheider, experimentelle Untersuchungen, A.P. Bioenergietechnik GmbH

Anlagenkonzept Kessel und Abscheider

Als Feldanlage für die Praxisversuche wurde eine bestehende ÖKOTHERM-Heizanlage vom Typ C1 mit einer Leistung von 88 kW am Firmenstandort ausgewählt (vgl. Abbildung 39). Die Anlage ist als Zentralheizung für die ganzjährige Beheizung von Wohn-, Wirtschafts- und Bürogebäuden ausgelegt. Die Anlage wurde mit den Brennstoffen Miscanthus und Hackschnitzeln betrieben und ist mit einem Pufferspeicher ausgerüstet.

Im Heizraum wurden die Aufstell-Positionen für den Elektro-Abscheider (ESP - electrostatic precipitator) und den Schaltschrank der zu entwickelnden Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) festgelegt.

Aufgrund der bestehenden Platzverhältnisse musste die Abgasverrohrung komplett neu gestaltet werden und die Heizanlage für die SPS mit neuer Verkabelung ausgerüstet werden.

In die Abgasstrecke vor und nach dem ESP wurde jeweils eine Emissionsmessstrecke mit mehreren Messanschlüssen integriert. Um die Vorgaben einer leicht ansteigenden Abgasstrecke in Richtung Kamin einzuhalten, musste der gesamte ESP angehoben und auf ein zusätzlich gefertigtes Gestell positioniert werden.



Abbildung 39: ÖKOTHERM®-Feldanlage und Abgasmesstrecke vor dem ESP

Konzeptentwicklung der Regelung

Die bisher eingesetzte mikrocontroller-basierte Steuerung wurde vollständig auf eine SPS umgestellt. Das Grundkonzept der bisherigen Regelungslogik wurde beibehalten und um weitere Funktionen ergänzt. Die hard- und softwareseitige Umsetzung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma ETF Solutions GmbH.

Die bei diesem Heizanlagentyp bisher standardmäßig getaktete Motoransteuerung wurde durch eine Drehzahlregelung über Frequenzumformer ersetzt (bspw. für Verbrennungsluftgebläse und Brennstoffzuführung).

Die Regelung und Überwachung des ESP wurde in die SPS integriert, so dass beide Systeme - Heizanlage und ESP - über das gleiche Display bedient werden können. Bereits zu Beginn wurden Eingangsmodule für die CO/HC Sensoren vorgesehen, die dann im weiteren Projektverlauf in die Steuerung integriert wurden.

Für die Sensoren aus dem Vorgängerprojekt SenSTEF, die im Laufe des Projekts in die SPS integriert wurden, waren ebenfalls Eingangsmodule vorgesehen, über die dann später die Messdaten aufgezeichnet wurden.

Eine zweite identische SPS wurde aufgebaut, die im Technikum des DBFZ am dortigen Prüfstand zum Einsatz kam. Damit konnte an beiden Standorten mit identischen Systemen gearbeitet werden. Die jeweils aktuelle Programmversion mit Softwareerweiterungen und Funktionen wurden in Absprache mit den Mitarbeitern des DBFZ bei beiden Anlagen auf dem gleichen Stand gehalten.

Auslegung und Konstruktion Abscheider

Der ESP wurde auf die Betriebsdaten der 88 kW Heizanlage ausgelegt. Der Abgasvolumenstrom und der erwartete Rohgasstaubgehalt sind dafür ausschlaggebend. Unter Berücksichtigung der Platzverhältnisse im Heizraum wurde der ESP so skizziert, dass die Maße und damit die Materialkosten möglichst gering blieben, die hohe Abscheidewirkung aber erreicht wurde. Revisionsöffnungen sowie die Hochspannungsdurchführung und die Positionen von Sensoren, Begleitheizung und Rüttelmotor wurden in die Skizze eingefügt.

Der ESP wurde als 2-Rohr-Abscheider im Unterdruckbetrieb ausgelegt (vgl. Abbildung 40). Die Staubabscheidung erfolgt über eine 30 kV neg. Hochspannung mit Stern-Elektroden, zusätzlicher Zyklonwirkung und Raumladungsabscheidung. Ausgerüstet mit automatischer Abreinigung durch einen Rüttelmotor kann der abgeschiedene Staub aus der Aschezone entfernt werden und wird somit nicht zeitversetzt später wieder durch den Kamin in die Atmosphäre abgegeben. Der Abscheider ist generell ohne Bypass ausgelegt und funktionsfähig, so dass auch in den An- und Abfahrphasen des Kessels große Partikel durch die Zyklonwirkung abgeschieden werden können.



Abbildung 40: 2-Rohr-ESP im Heizraum und als 3D-Modell

Nachdem die Skizzen in technische Konstruktionszeichnungen überführt waren, wurde der Abscheider gefertigt, endmontiert und einem Kalttest unterzogen.

Ein weiterer ESP wurde für das Technikum des DBFZ für die dortige 49 kW Ökotherm-Heizanlage konstruiert und gefertigt. Auf Grund der geringeren Abgasvolumenströme konnte der ESP hier als 1-Rohr-Abscheider in kompakter Bauform ausgeführt werden. Alle Funktionen wie Steuerung, Ascheaustrag, Abreinigung waren konstruktiv gleich wie beim 2-Rohr-Abscheider.

Installation des Abscheiders an Feldanlage

Nach dem Abbau der bestehenden Verrohrung wurde der ESP Anfang 2020 in den Heizraum eingebracht, mit Hilfe des Gestells auf die richtige Höhe gebracht und an die neu verlegte Abgasverrohrung mit den Messstrecken angeschlossen. Elektrische Leitungen wurden zum Schaltschrank der SPS verlegt. Das Abgasgebläse ist hinter dem ESP positioniert, um einen Unterdruckbetrieb im gesamten Heizsystem sicherzustellen.

Integration der Regelung an Feldanlage

Nach dem Bau wurde die SPS in den Heizraum eingebracht. Die bestehende Heizanlage und der ESP wurden (neu) verkabelt und mit dem Schaltschrank verbunden. Das Programm für die Regelung wurde geschrieben und in die SPS eingespielt (siehe Abbildung 41).

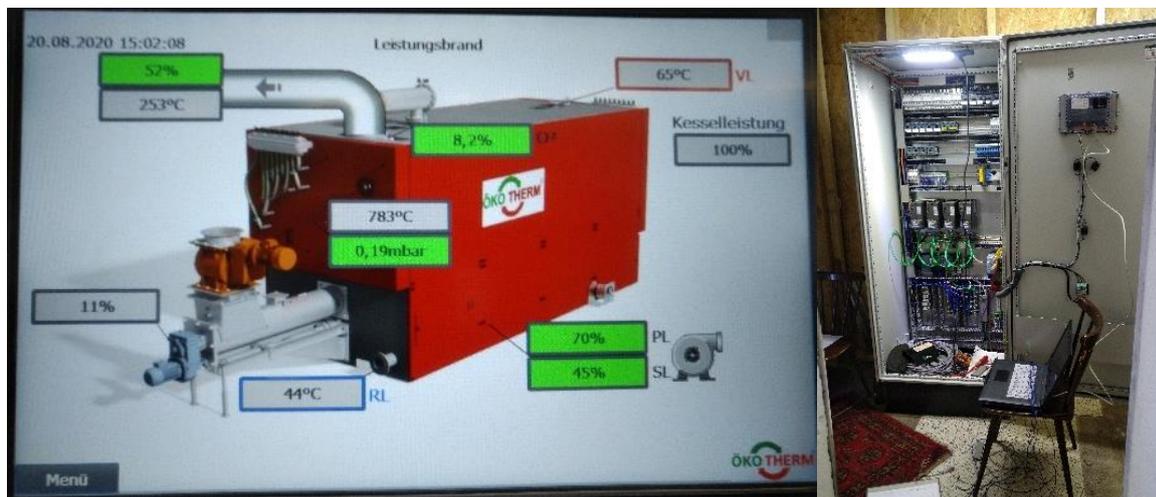


Abbildung 41: Grafische Bedienoberfläche der SPS und Installation des Schaltschanks

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde der im Projekt SenSTEF erstellte Daten-Monitor (Firma Sick) vom Projektpartner DBFZ in deren Technikum abgebaut und an der Feldanlage wieder in Betrieb genommen. Die Datenaufzeichnung erfolgte zunächst in der Heizperiode 2020/2021 wieder über den Daten-Monitor, später wurden die Sensorsignale und die Datenaufzeichnung gemeinsam mit dem DBFZ in die SPS integriert.

Inbetriebnahme der Feldanlage und des Abscheiders

Anfang 2020 wurde das Gesamtsystem Schritt für Schritt in Betrieb genommen. In der ersten Phase wurden die Sensoren und Motoren der Heizanlage überprüft und einem Kalttest unterzogen. Die Betriebsparameter in der SPS wurden für den Brennstoff Holzhackschnitzel eingestellt. Die Heizanlage wurde zunächst für ein paar Tage mit ausgeschaltetem ESP betrieben, und die Funktion der neuen SPS beobachtet. In der zweiten Phase wurde der ESP in Betrieb genommen und die entsprechenden Parameter in der SPS hinterlegt.

Nach der erfolgten Inbetriebnahme wurde über einen Zeitraum von zwei Wochen das System genau überwacht und kleinere Einstellungen weiter angepasst. In dieser Phase wurden auch immer wieder kritische Zustände unter Aufsicht herbeigeführt, um zu überprüfen, wie die Steuerung in sicherheitsrelevanten Betriebsphasen reagiert (z.B. niedriger Sauerstoffgehalt, sehr hohe Abgastemperaturen, hohe Vorlauftemperatur). Nach Abschluss dieser Arbeiten arbeitete das Gesamtsystem aus Heizkessel und ESP zuverlässig in allen Betriebsphasen.

Mitte des Jahres 2020 wurden die im Technikum des DBFZ installierten Systeme ESP und SPS (vgl. Abbildung 42) gemeinsam mit den Mitarbeitern des DBFZ in Betrieb genommen und eine Einweisung vorgenommen. Die Erstinbetriebnahme erfolgte mit dem Brennstoff Holzpellets. Es wurden wieder die Funktionsfähigkeiten der Sensoren und Motoren überprüft und die Anlage gestartet.



Abbildung 42: Installation von SPS und ESP im Technikum in Leipzig

Nach einiger Zeit stellte sich heraus, dass ein neuer Motor und ein Getriebe mit geringerer Übersetzung für die Brennstoffzuführung eingesetzt werden muss, da der Motor mit der drehzahlgeregelten Ansteuerung auch bei sehr geringen Drehzahlen zu viel Brennstoff beförderte. Der Umtausch von Motor und Getriebe wurde vom DBFZ organisiert.

Nach zu Beginn problemlosem Betrieb traten am ESP nach einiger Zeit vermehrt Hochspannungsüberschläge am Isolator und dadurch Schäden am Isolator auf (Abbildung 43). Als Ursache konnte eine zu kurze Distanz zwischen hochspannungsführenden und geerdeten Teilen des ESP identifiziert werden. Durch Anpassung des ESP konnten die Überschläge dauerhaft verhindert werden.

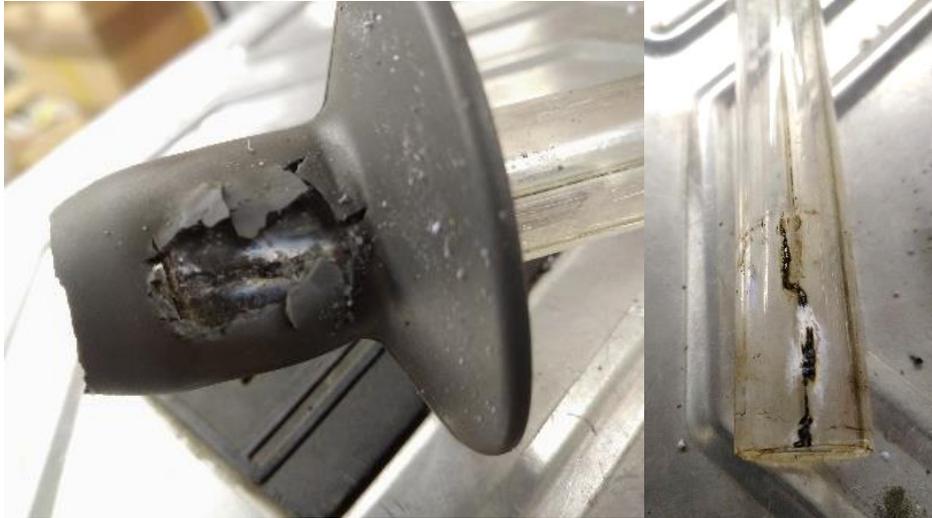


Abbildung 43: Schäden durch Kriechströme am Isolator des ESP

Nachdem die Schwierigkeiten gelöst werden konnten, waren damit die Feldanlage im Technikum der A.P. Bioenergietechnik GmbH und die Technikumsanlage beim DBFZ mit denselben System-Komponenten ausgestattet, betrifft somit also die Heizanlage, ESP und SPS.

Betreuung und Überwachung der Feldanlage

Als Brennstoff für die Feldanlage wurden Holzhackschnitzel von einem lokalen Brennstoffhändler bezogen, der bei Bedarf mehrmals während der Heizperiode kurzfristig die Hackschnitzel anlieferte. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse an beiden automatischen Heizanlagen (Feld- und Technikumsanlage) wurden mehrere Big Bags mit Hackschnitzeln für die Prüfstandversuche an den Projektpartner DBFZ geliefert.

Die über die SPS erfassten Daten wurden auf einen USB-Stick aufgezeichnet und in regelmäßigen Abständen manuell gesichert und dem Projektpartner DBFZ zur weiteren Auswertung zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen der Arbeiten des Projektpartners Universität Bayreuth wurde der dort entwickelte Sensor gemeinsam mit dem Projektpartner an der Feldanlage eingesetzt und erprobt (vgl. Abbildung 44).

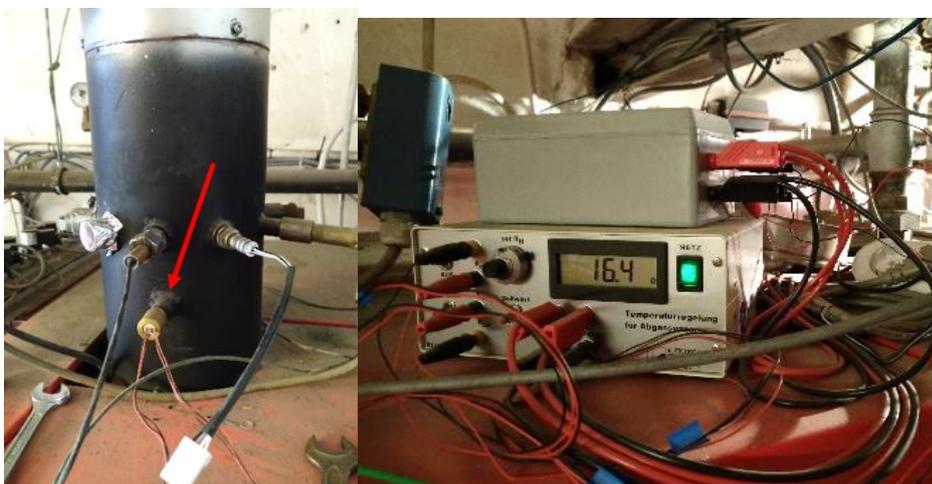


Abbildung 44: Sensor der Universität Bayreuth an der Feldanlage mit Begleitheizung

Es wurden insgesamt zwei von der Universität Bayreuth zur Verfügung gestellte Messstutzen angeschweißt, einer am horizontalen Abgasrohr und einer am vertikalen Abgasrohr. Die Datenaufzeichnung und -sendung erfolgte über die Elektronik der Universität Bayreuth, die regelmäßig auf Funktion überprüft wurde. Zu Beginn war der erste Sensor im horizontalen Rohr positioniert, ab Mitte 2020 wurde die Einbauposition des bis dahin weiterentwickelten Sensors ins vertikale Rohr geändert.

Die Sensoren inklusive deren Begleitheizung waren dauerhaft, also während allen Betriebszuständen der Heizanlage installiert, auch in den Sommermonaten, in denen die Anlage nicht in Betrieb war bzw. nur sehr geringe Laufzeiten hatte.

Während der Laufzeiten der Heizanlage wurden immer wieder eigene Emissionsmessungen vorgenommen, die unter anderem darauf abzielten, die Dauerwirksamkeit der Staubabscheidung nachzuweisen. Die Heizanlage wurde dazu im regulären Betrieb gemessen und es wurden keine speziellen Reinigungs- oder Wartungsarbeiten vorgenommen (Ausnahme: Zeitraum, in dem der ESP im Rahmen einer Master-Thesis untersucht wurde), außer die üblichen notwendigen Standardarbeiten, wie z.B. die Aschetonne entleeren oder bei Bedarf die Reinigung des Heizkessel-Wärmetauschers. Die Messungen wurden mit einem mobilen Feinstaubmessgerät vom Typ Testo380 durchgeführt und auf einen Sauerstoffbezugswert nach 1. BlmSchV §4 (2) von 13 Vol.-% O₂ bezogen.

Bei den gemeinsamen Feldmesskampagnen des DBFZ an der Feldanlage wurden auch direkt mögliche Änderungen der SPS besprochen und die Einbindung der SenSTEF-Monitor-Signale durchgeführt. Aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie konnten weniger gemeinsame Feldmesskampagnen mit dem DBFZ und dessen Messgeräten durchgeführt werden als ursprünglich geplant waren. Somit wurden vermehrt eigene Messungen mit dem Testo380 durchgeführt.

Optimierung der Regelung und Konstruktionsverbesserung des Abscheiders

Nachdem die SPS an der Feldanlage Anfang 2020 installiert und in Betrieb genommen war und die wichtigsten funktionalen Programmbausteine eingearbeitet und geprüft waren, wurden über das Jahr alle erforderlichen Anpassungen und Optimierungen nach und nach in das Programm eingearbeitet und weiter getestet. Ende des Jahres 2020 wurde eine Programmversion mit den Änderungen an das DBFZ gesendet, so dass die dortige SPS an der Technikumsanlage auf den gleichen Stand gebracht werden konnte.

Anfang 2021 wurde im Projektkonsortium gemeinsam beschlossen, alle Sensoren und Messwerte, die bisher über den SenSTEF-Monitor aufgezeichnet wurden, zentral über die SPS zu erfassen. Unter Anleitung eines DBFZ-Technikers wurden gemeinsam die Sensoren vom Monitor auf die SPS umgelegt: CO/HC Sensoren, Prandtl-Sonde mit Drucksensoren, zusätzlicher Brennraumtemperaturfühler, Verbrennungslufttemperaturfühler sowie die Daten des Wärmemengenzählers. Die programmseitige Einbindung der Sensor-Signale in die Datenaufzeichnung wurde bereits vom DBFZ vorbereitet, so dass der Testlauf nach Aufspielen der neuen Programmversion erfolgreich verlief.

Im Rahmen einer von der OTH Amberg-Weiden vergebenen Master-Thesis wurde der Elektroabscheider gemeinsam mit einem Studenten an der Feldanlage in Hirschau weiterentwickelt. Unterschiedliche technische Modifikationen am ESP wurden mit dem Ziel ausgeführt, die Abscheideleistung zu erhöhen bzw. eine Material- und Kosteneinsparung bei gleicher Abscheideleistung zu erreichen.

Die Grundlage für die Modifikationen war eine Strömungssimulation, durch die Zonen im ESP identifiziert werden konnten, in denen bereits abgeschiedener Staub durch Verwirbelungen wieder ins Abgas eingetragen werden kann. Darauf basierend konnten gezielte Gegenmaßnahmen erarbeitet werden.

Mit der Durchführung eines „Härtetests“ wurden die Grenzen des Abscheiders ausgetestet (vgl. Abbildung 45).



Abbildung 45: Stern-Elektroden vor und nach dem Härtetest

Dazu wurde die Abreinigung des Abscheiders (Rütteln) manuell dauerhaft abgeschaltet und es wurde untersucht, ob es bei langen Betriebszeiten zu Ausfällen des Systems oder nur zur Reduzierung der Abscheidewirkung kommt und wie lange ohne entsprechende Abreinigung ein stabiler Betrieb möglich ist.

Es konnten über einen Zeitraum von bis zu zwei Wochen keine Ausfälle des Systems oder Hochspannungsüberschläge beobachtet werden, was bei steigender Verschmutzung normalerweise zu erwarten gewesen wäre. Der Abscheidegrad sank nach und nach auf unter 50 % ab. Da im Vorfeld aber eher mit einem Ausfall der Hochspannung gerechnet wurde, ist das Ergebnis dieses Tests als sehr positiv zu werten.

Nach Abschluss der Versuche und des Härtetests wurde der ESP weiter im automatischen Modus betrieben, lediglich der Staubbunker wurde in unregelmäßigen Abständen bei Bedarf geleert.

Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation

Allgemeine Angaben zum Versuchszeitraum: Der ESP war seit März 2020 dauerhaft in Betrieb. Der ESP wird auslegungsgemäß ohne einen Bypass betrieben. Damit strömen auch die Abgase mit kurzzeitig auftretenden Abgasbestandteile wie Ruß und Teer während der An- und Abfahrphasen der Heizanlage durch den ESP. Insgesamt war die Hochspannung des ESP über den Zeitraum von ca. zwei Jahren an 2451 Stunden in Betrieb.

In Zeitraum von Anfang März 2021 bis Ende Februar 2022 produzierte der Heizkessel eine Gesamt-Wärmemenge von 91,375 MWh, was bei einer Kessel-Nennleistung von 88 kW knapp 1040 Volllastbetriebsstunden entspricht.

In dieser Zeit lief der Kessel 726 h bei 100 % Volllastbetrieb und 212 h in modulierendem Betrieb. Das entspricht einem Anteil von 77,4 % Volllast und 22,6 % modulierend.

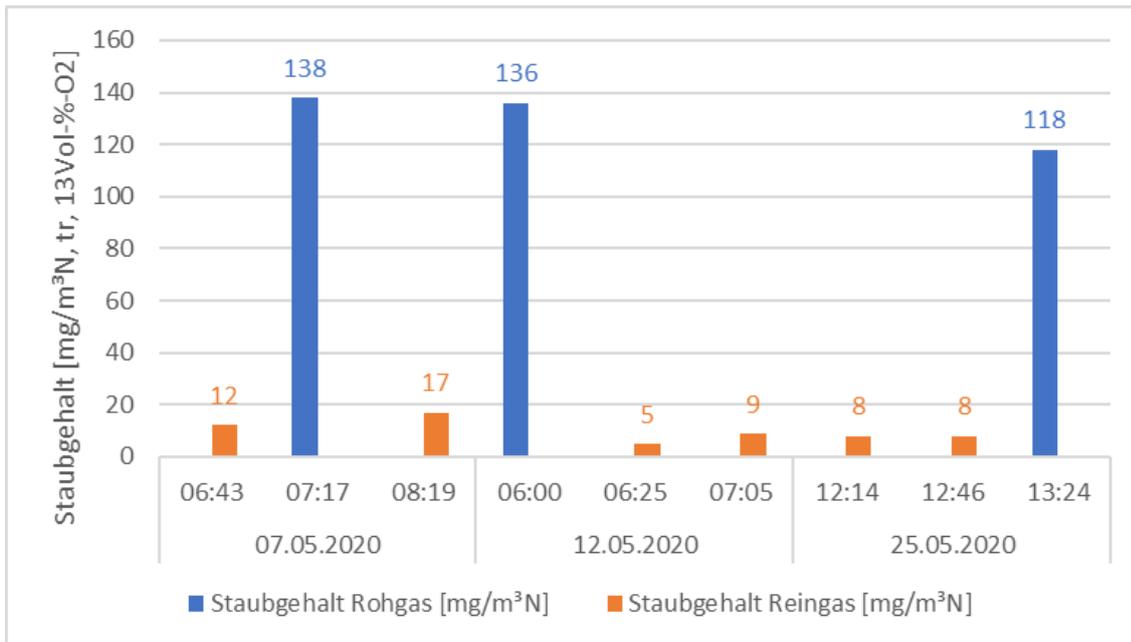
Konstruktionsverbesserung: Für die Versuche im Rahmen der Master-Thesis an der OTH Amberg-Weiden wurde der ESP inklusive der Sprühelektroden und Abscheiderflächen vor jeder Messkampagne gereinigt, um die Ergebnisse besser vergleichbar zu machen. Es wurden mehrere Varianten des ESP getestet. Alle Messergebnisse werden ohne Abzug der Messunsicherheit und mit einem Sauerstoffbezugswert von 13 Vol.-% angegeben. Der aktuell gültige Emissionsgrenzwert für Staub im Abgas liegt bei 20 mg/m³ (1. BImSchV).

Als Brennstoff für die Versuche wurde ein Gemisch aus Holzhackschnitzeln und gehäckseltem Miscanthus verwendet (vgl. Abbildung 46). Das Mischungsverhältnis war bei etwa 50:50.



Abbildung 46: Holz-Miscanthus-Mischung als Brennstoff

Als erste Versuchsreihe wurden zu Beginn die Emissionen in der Original-Ausführung des ESP als Referenzmessung gemessen (siehe Abbildung 47). Es wurde eine hohe Abscheideleistung von 92,5 % erreicht und der Grenzwert von 20 mg/m³ wurde deutlich unterschritten.



Durchschnittswerte während der 15-minütigen Emissionsmessungen							
Staubgehalt Rohgas [mg/m³N]	Staubgehalt Reingas [mg/m³N]	Abscheidegrad [%]	CO [mg/m³N]	O ₂ -Gehalt Reingas [Vol-%]	O ₂ -Gehalt Rohgas [Vol-%]	Abgas-T [°C]	Leistung [kW]
130,7	9,8	92,5	195,6	11,4	9,4	148	81

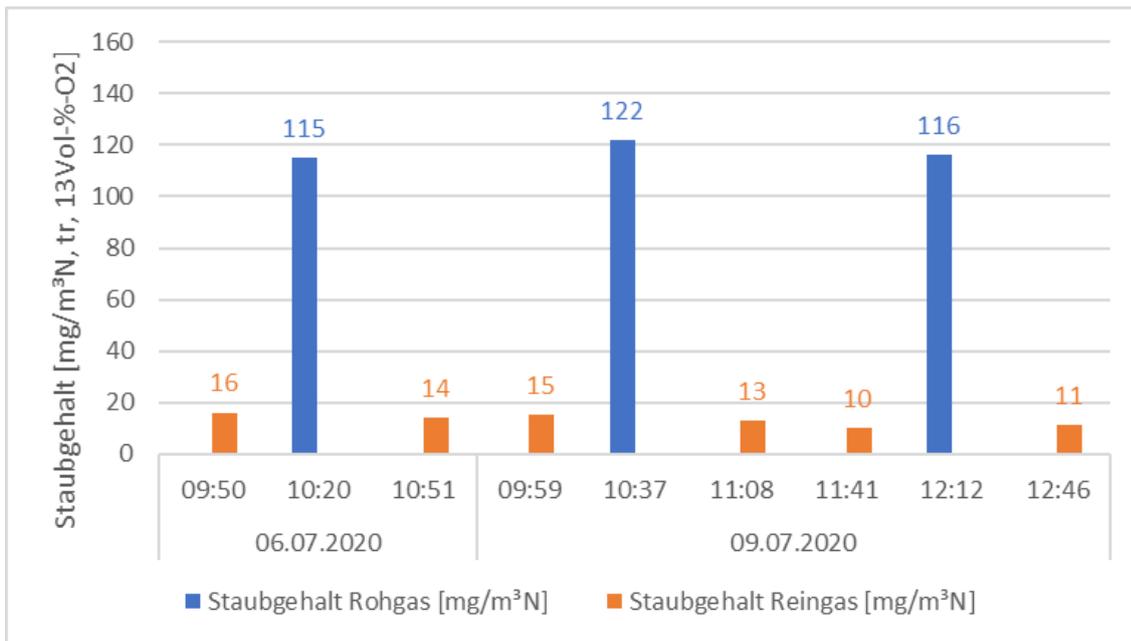
Abbildung 47: Ergebnisse der Referenzmessungen an der Feldanlage mit Original-Ausführung des ESP und einer Brennstoffmischung aus Holz und Miscantus (50:50)

Variante 1 - Kürzere Aufladerstrecke durch Entfernen von Sprühelektroden: Die Aufladerstrecke mit den Sprühelektroden wurde verkürzt, indem vier der neun Sternelektroden entfernt wurden (siehe Abbildung 48).



Abbildung 48: Sprühelektrode im Original mit neun und reduziert auf vier Sternelektroden

Auch mit kürzerer Aufladerstrecke konnte der Grenzwert deutlich unterschritten werden, der Abscheidegrad war mit 88,8 % etwas geringer als bei der Referenzmessung.



Durchschnittswerte während der 15-minütigen Emissionsmessungen							
Staubgehalt Rohgas [mg/m³N]	Staubgehalt Reingas [mg/m³N]	Abscheidegrad [%]	CO [mg/m³N]	O ₂ -Gehalt Reingas [Vol-%]	O ₂ -Gehalt Rohgas [Vol-%]	Abgas-T [°C]	Leistung [kW]
117,7	13,2	88,8	63,4	9,8	6,9	163	81

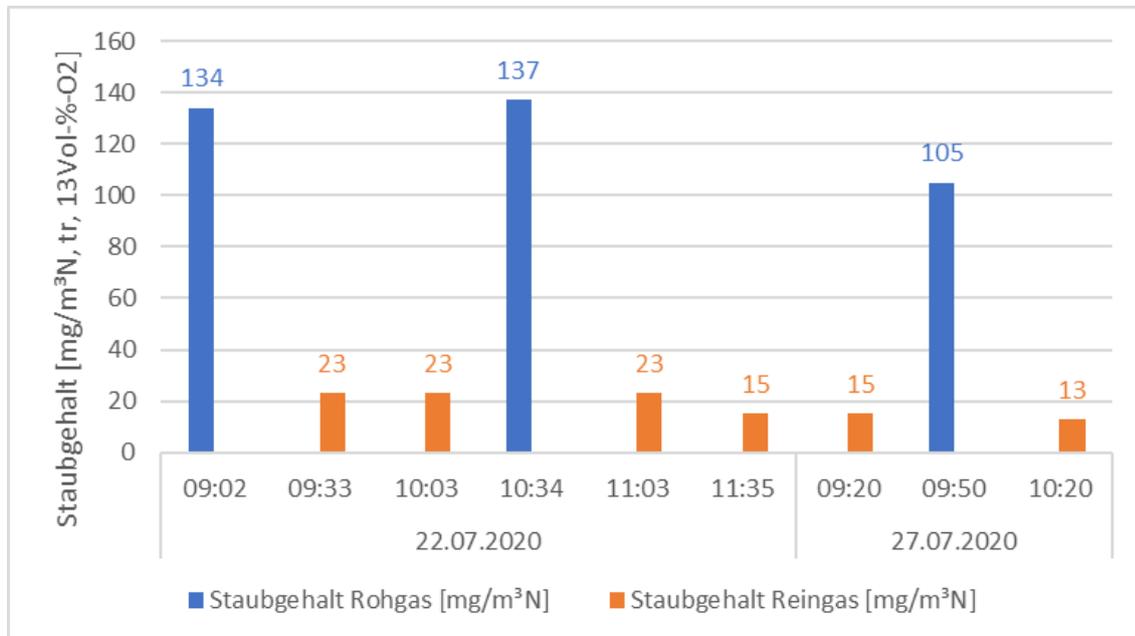
Abbildung 49: Ergebnisse der Messungen an der Feldanlage mit verkürzter Aufladerstrecke und einer Brennstoffmischung aus Holz und Miscantus (50:50)

Variante 2 - Halbierung der Auflade- und Abscheidestrecke: Eines der Abscheiderohre wurde abgedeckt, so dass nur noch ein Rohr mit Abgas beaufschlagt war.



Abbildung 50: Blick in den unteren Bereich des ESP, ein Abscheiderohr von unten abgedeckt und der Luftkanal von oben abgedichtet

Mit halber Auflade- und Abscheidestrecke wurde immer noch ein hoher Abscheidegrad von 85 % erreicht (siehe Abbildung 51), der Grenzwert konnte aber nicht bei jeder Messung eingehalten werden (ohne Abzug der Messunsicherheit).



Durchschnittswerte während der 15-minütigen Emissionsmessungen							
Staubgehalt Rohgas [mg/m³N]	Staubgehalt Reingas [mg/m³N]	Abscheidegrad [%]	CO [mg/m³N]	O ₂ -Gehalt Reingas [Vol-%]	O ₂ -Gehalt Rohgas [Vol-%]	Abgas-T [°C]	Leistung [kW]
125,3	18,7	85,1	90,1	11,5	9,5	165	69

Abbildung 51: Ergebnisse der Messungen an der Feldanlage mit einem von unten verschlossenem Abscheiderrohr (halbe Abscheiderlänge) und einer Brennstoffmischung aus Holz und Miscantus (50:50)

Variante 3 - Weniger Abscheidefläche und verbesserte Strömungsführung durch ein Leitblech: Die gleiche ESP-Modifikation wie in Variante 2 wurde verwendet. Zusätzlich wurde ein Leitblech im Bunkerbereich eingesetzt (vgl. Abbildung 52), um durch veränderte Strömungsführung (vgl. Abbildung 53) weniger Verwirbelungen zu erreichen und eine erhöhte Staubablagerung im ESP zu begünstigen.

Bei Einbau eines Leitblechs konnten die Grenzwerte bei einem Abscheidegrad von 86 % eingehalten werden (vgl. Abbildung 54). An zwei Messtagen waren die Rohgaswerte allerdings niedriger als bei den Messungen zuvor, vermutlich da der Holzanteil in der Brennstoffmischung höher war und dadurch weniger Staub im Rohgas vorlag.



Abbildung 52: Leitblech im Staubbunker des ESP an der Kessel-Feldanlage und weiterhin ein Abscheiderrohr abgedeckt

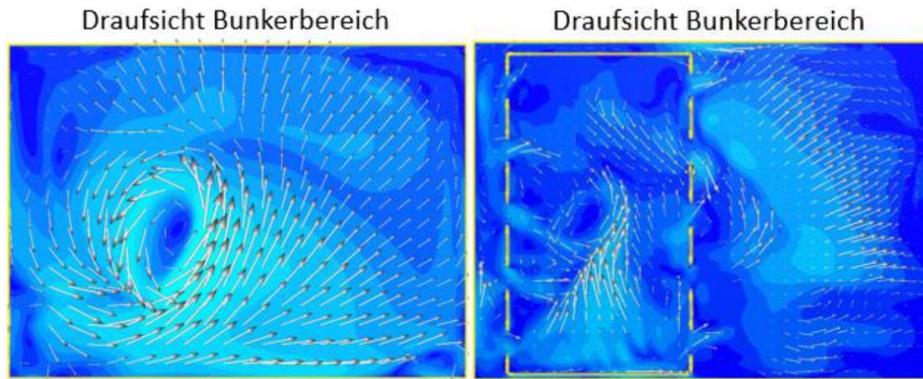
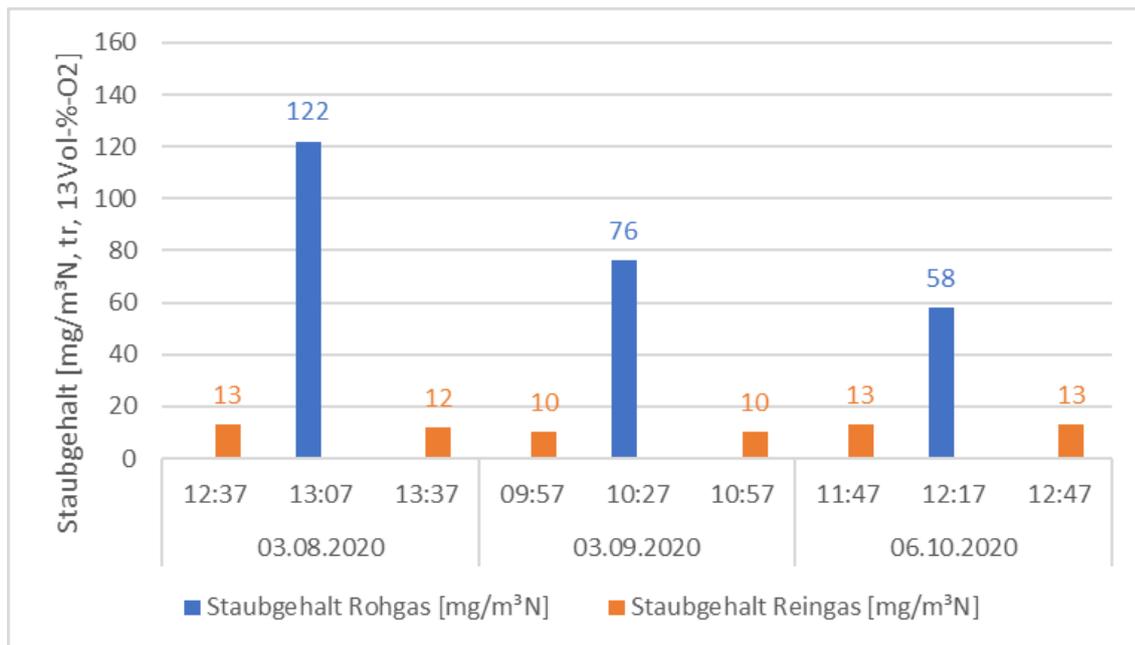


Abbildung 53: Darstellung der Ergebnisse der Strömungssimulation: Bunkerbereich ohne Leitblech (links) und mit Leitblech (rechts) (Quelle: F. Wandres)



Durchschnittswerte während der 15-minütigen Emissionsmessungen							
Staubgehalt Rohgas [mg/m³N]	Staubgehalt Reingas [mg/m³N]	Abscheidegrad [%]	CO [mg/m³N]	O ₂ -Gehalt Reingas [Vol-%]	O ₂ -Gehalt Rohgas [Vol-%]	Abgas-T [°C]	Leistung [kW]
85,3	11,8	86,1	54,3	10,6	8,1	179	78

Abbildung 54: Ergebnisse der Messungen an der Feldanlage mit Leitblech im Bunkerbereich und dadurch veränderte Strömungsführung mit einem von unten verschlossenem Abscheiderrohr (halbe Abscheiderlänge) und einer Brennstoffmischung aus Holz und Miscanthus (50:50)

Variante 4 - Original-Ausführung ESP und spezielles Leitblech: Für die finale Versuchsreihe wurde der ursprüngliche Zustand, allerdings mit einem speziellem Leitblech verwendet (vgl. Abbildung 55), bei dem sich bereits die besten Ergebnisse zeigten. Die Strömungssimulation ergab bei Einsatz eines speziellen Leitblechs eine starke Beruhigung und Minderung der Verwirbelungen im Staubbunker (siehe Abbildung 56). Damit sollte bei hohen Abgasgeschwindigkeiten weniger Staub wieder ins Abgas eingetragen werden.

Sehr gute Ergebnisse lieferte die Original-Ausführung des ESP in Verbindung mit einer Beruhigungszone. Der Abscheidegrad konnte im Vergleich zur Referenzmessung noch weiter gesteigert werden, auf durchschnittlich fast 97 % (vgl. Abbildung 57). Der gültige Staubgrenzwert wurde deutlich unterschritten.



Abbildung 55: Neues Leitblech im Staubbunker zur Schaffung einer Beruhigungszone

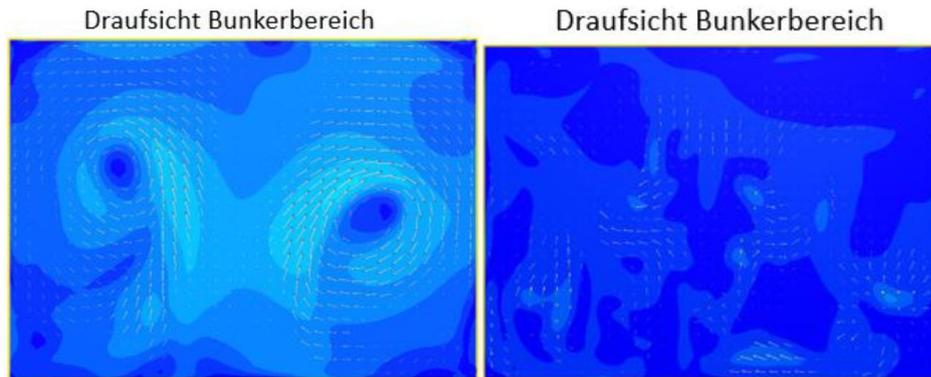
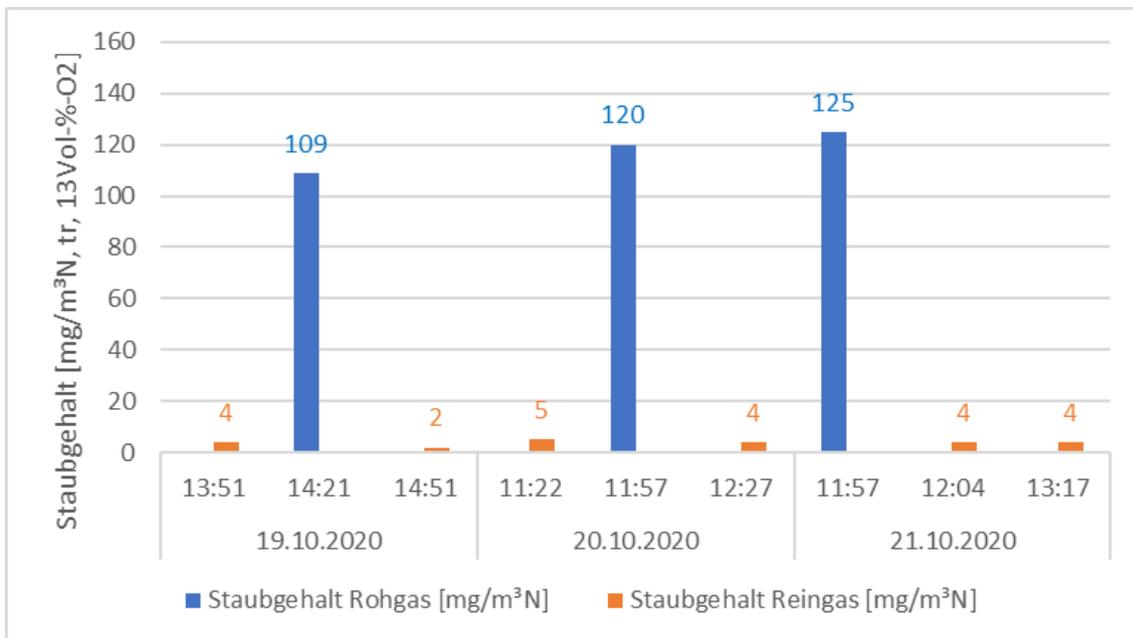


Abbildung 56: Strömungssimulation: Bunkerbereich ohne Einbauten (links) und mit speziellem Leitblech (rechts) (Quelle: F. Wandres)



Durchschnittswerte während der 15-minütigen Emissionsmessungen							
Staubgehalt Rohgas [mg/m³N]	Staubgehalt Reingas [mg/m³N]	Abscheidegrad [%]	CO [mg/m³N]	O ₂ -Gehalt Reingas [Vol-%]	O ₂ -Gehalt Rohgas [Vol-%]	Abgas-T [°C]	Leistung [kW]
118,0	3,8	96,8	19,7	10,2	7,7	185	82

Abbildung 57: Ergebnisse der Messungen an der Feldanlage mit speziellem Leitblech im Bunkerbereich und dadurch optimierte Strömungsführung und einer Brennstoffmischung aus Holz und Miscantus (50:50)

Nach einiger Zeit konnte gut beobachtet werden, dass der Staub in der Beruhigungszone liegen blieb und nicht wieder ins Abgas eingetragen wurde. Auch sehr gut in Abbildung 58 zu erkennen ist die schichtweise Staub-Ablagerung aus den jeweiligen Betriebszyklen der Heizanlage. Daran lässt sich erkennen, dass in der Bunkerzone kaum noch Verwirbelungen entstanden und der Staub auch tatsächlich zurückgehalten wurde.



Abbildung 58: Schichtweise Ablagerung in der Beruhigungszone des Staubbunkers

Fazit: Im Projekt konnte eine neue Steuerungsgeneration als SPS entwickelt werden, mit der das bestehende Heizsystem und der Elektro-Staubabscheider gesteuert und überwacht werden können. Mit der SPS ist es zukünftig möglich, modular weitere Sensoren in die Steuerung einzubinden und eine noch bessere Verbrennungsregelung zu entwickeln.

Mit der Entwicklung und Verbesserung des ESP konnten die gültigen Staubgrenzwerte unterschritten werden und das bei gleichzeitig hoher Dauerwirksamkeit. Im Rahmen der Master-Thesis und der Untersuchung verschiedener Ausrüstungsvarianten hat sich gezeigt, dass für einen betriebssicheren und effizienten Abscheider gewisse Mindestmaße und dadurch erreichbare Verweilzeiten zwingend eingehalten werden müssen.

In weiteren Entwicklungsschritten soll aktiv an der Verbrennungsregelung gearbeitet werden und der ESP gemeinsam mit einer ÖKOTHERM-Heizanlage nach und nach mit weiteren Brennstoffen aus dem Bereich der biogenen Reststoffe betrieben werden.

Aufzählung der Arbeitspakete von A.P. Bioenergietechnik GmbH

- APÖ1 Konzeptentwicklung von Kessel und Abscheider
Die Rahmenbedingungen, Schnittstellen und Aufstellmöglichkeiten für den Abscheider an der Feldanlage werden identifiziert. Festlegung der erforderlichen Ein- und Ausgangswerte von Heizkessel und Abscheider, sowie Sensorik. Feststellen von potentiellen Stör- und Gefahrenquellen.
- APÖ2 Konzeptentwicklung der Regelung
Umsetzung der Ein- und Ausgangsgrößen aus AP1 zu einer Gesamtregelung von Kessel und Abscheider. Sicherheitsregelungen, Hinweis- und Wartungsmeldungen werden festgelegt. Enge Zusammenarbeit mit Softwareprogrammierer(n) in diesem AP.
- APÖ3 Auslegung und Konstruktion Abscheider
Genauere Abmessungen und die Detailkonstruktion des Abscheiders werden festgelegt. Technische Konstruktionszeichnungen werden erstellt nach denen die Bauteile gefertigt werden.
- APÖ4 Installation des Abscheiders an Feldanlage
Aufstellen des Abscheiders im Heizraum, Umbau der bestehenden Abgasverrohrung und Einbindung in die neue Abgasverrohrung. Installation der für den Abscheider benötigten Sensorik.
- APÖ5 Integration der Regelung an Feldanlage
Die Regelung wird an der Feldanlage installiert und mit Kessel und Abscheider verbunden (elektrische Verkabelung und Sensorik wird angeschlossen, Remote-Überwachung wird eingerichtet).
- APÖ6 Inbetriebnahme der Feldanlage und des Abscheiders
Das Gesamtsystem wird in Betrieb genommen und eventuell auftretende Funktionsstörungen werden behoben.
- APÖ7 Betreuung und Überwachung der Feldanlage

Über mehrere Monate Praxisbetrieb werden Messungen, Wartungen und Fehlerbehebung vorgenommen und Verbesserungspotenziale erarbeitet. Erkenntnisse aus AP7 werden dann in AP8 umgesetzt.

- APÖ8 Optimierung der Regelung und Konstruktionsverbesserung des Abscheiders
Mit den Erkenntnissen aus AP7 werden verbesserte Regelalgorithmen programmiert und konstruktive Verbesserungen am Abscheider umgesetzt.
- APÖ9 Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation

1.4 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 4: Entwicklung von Gassensoren, Aufbau Prototypen, Tests und Langzeitstabilität, LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG

Bewertung Langzeitstabilität CarboSen

Die im Projekt verfolgte Verbrennungsregelung beruht auf der Beurteilung der Verbrennungsqualität, insbesondere auch nach den im Abgas vorhandenen Komponenten O_2 (ROC) und CO_e (CO/H_2). Da es sich im Projekt um keine drifttolerante Regelstrategie sondern um eine Regelung nach Absolutwerten handelt, müssen die dafür eingesetzten Gassensoren ausreichend genaue und stabile Messwerte liefern. Eine „schlechte“ Verbrennung – angezeigt durch CO_e – muss früh, hochaufgelöst (hohe Empfindlichkeit) und über eine lange Zeit zuverlässig (geringer Drift) zu erkennen und messbar sein.

Zur Beurteilung der CarboSen-Sensoren (CS) werden die beiden Kriterien „Empfindlichkeit“ und „Drift“ herangezogen. Der CarboSen CS1K hat einen Messbereich von 1000 ppm CO_e bei hoher Empfindlichkeit. Der CarboSen CS10K hat einen größeren Messbereich von 10000 ppm CO_e auf Kosten einer geringeren Empfindlichkeit (vgl. Abbildung 59). Beide Sensortypen wurden bereits im Vorgängerprojekt SenSTEF eingesetzt und zeigten eine zu hohe Drift für eine Absolutwertregelung.

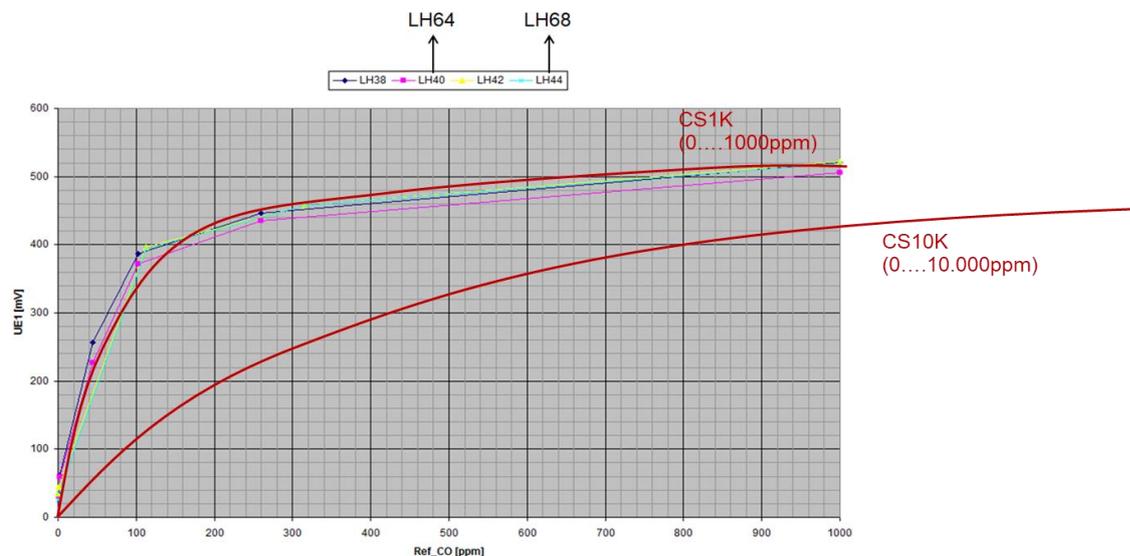


Abbildung 59: Darstellung (rote fette Kurven) der höheren Empfindlichkeit des CS1K (ca. 500 mV bei 1000 ppm CO_e mit 2,5 W) im Vergleich zum CS10K (ca. 400 mV bei 1000 ppm CO_e mit 2,5 W), die Kennlinie des CS1K erreicht bereits bei 1000 ppm CO_e die Sättigung (Messbereichsende)

Am Ende des SenSTEF-Projekts wurde festgestellt, dass die Stabilität des Sensorsignals mit zunehmender Sensortemperatur (abhängig von Heizleistung) zunimmt. Es ist bekannt, dass die Empfindlichkeit mit steigender Temperatur abnimmt. Da für die Absolutwertregelung minimaler Drift wichtiger ist als maximale Empfindlichkeit, wurden sämtliche Sensoren in UVV mit einer Heizleistung von 3 W anstatt der üblichen 2,5 W betrieben.

Im Rahmen eines parallel laufenden Förderprojektes LHCon (BMBF, 02P16K090) wurden LH-Sensoren mit dem Ziel höchster Empfindlichkeit für H_2 -Konzentrationen kleiner 1 ppm entwickelt. Der Unterschied zwischen den CS1K/CS10K und den LH-Sensorelementen liegt in der Art und Weise der Aufbringung der Messelektroden. Der Unterschied zwischen den untersuchten Varianten LH liegt im Mischungsverhältnis der Edelmetallanteile der Messelektrode. Insgesamt wurden 75 Variationen von LHXY Sensorelementen gefertigt.

Für UVV wurde ein Screening insbesondere an den LHXY Sensorvariationen mit sogenannter Mischelektrode durchgeführt, und zwar im Hinblick auf funktionale Eignung und ausreichender

Empfindlichkeit auf CO_e im Abgas einer Feuerungsanlage. Die Abbildung 59 zeigt exemplarisch die Kennlinien der LH38, LH40, LH42 und LH44 (zusätzlich zu CS1K und CS10K) Sensorelemente. Im Messbereich kleiner 10 ppm zeigten vor allem LH40 und LH44 eine höhere Empfindlichkeit als LH38 und LH42. Daher wurden LH40 und LH44 favorisiert und für das Projekt als LH64 (LH40) bzw. LH68 (LH44) nachproduziert. Die Sensoren LH64 und LH68 zeigten ein Sensorsignal von 520 mV bzw. 505 mV bei 1000 ppmCO_e. Die daraus resultierende mittlere Empfindlichkeit von 0,5 mV/ppmCO_e bei 3 W ist bei beiden Varianten sogar vergleichbar der sehr hohen Empfindlichkeit der CS1K-Sensoren, die im Vorgänger-Projekt SenSTEF noch mit 2,5 W betrieben wurden.

Das Ziel im Projekt war es nun, zügig eine zuverlässige Driftaussage zu erhalten, um die favorisierte Variante für den weiteren Einsatz zu fixieren. Zur Beurteilung des Drifts wurde die zeitliche Entwicklung der Sensorsignale bei kontrollierter Beaufschlagung mit Modellgas nach mehreren Abbränden in einer Feuerungsanlage am ISIS herangezogen (siehe Abbildung 60).

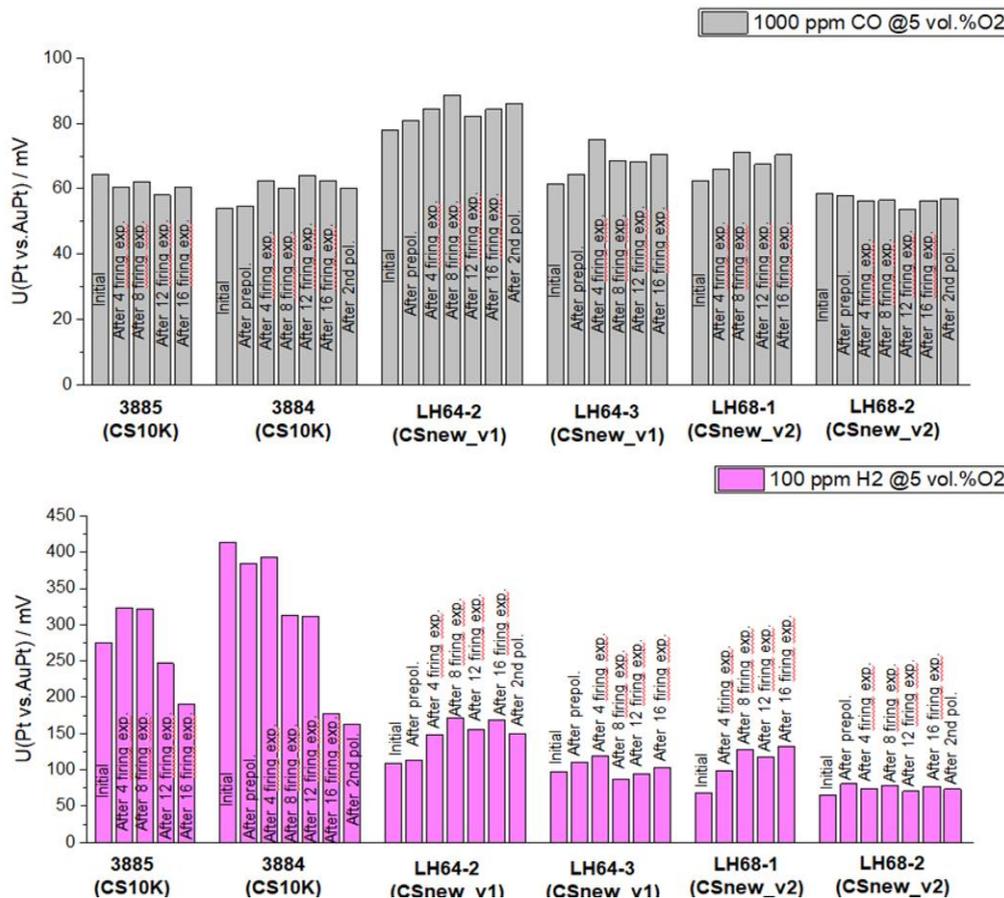


Abbildung 60: Zeitliche Entwicklung der Sensorsignale unterschiedlicher Mischpotenzialsensoren bei Beaufschlagung mit den Modellgasen CO (oben) bzw. H₂ (unten) nach mehreren Abbränden in einer Holzfeuerung

Die Drift wurde als prozentualer Signalverlust aus dem aufgetretenen Maximalwert (100 %) und dem Endwert des Sensorsignals nach 16 Abbränden errechnet. Ein typischer Abbrand dauert dabei 6 h, d. h., der Drift wurde über 64 h im Feuerungsabgas bestimmt. Die Tabelle 7 stellt die Empfindlichkeiten und Driftwerte übersichtlich gegenüber.

Tabelle 7: Empfindlichkeiten und Driftwerte unterschiedlicher Mischpotenzial-Sensoren im Vergleich

	SensTEF (P=2,5W)		UVV (P=3W)		
	CS1K	CS10K	CS10K	LH64	LH68
Empfindlichkeit [mV/ppm]	0,5	0,2	0,2	0,5	0,5
Drift* [%/h]	1,5	0,3	0,4	0,1	0,05

*auf den Maximalwert bezogene Drift zwischen dem maximalen Sensorsignal und dem Endwert des Sensorsignals

Aufgrund des 8-fach geringeren Drifts bei etwa 3-fach höherer Empfindlichkeit gegenüber dem CS10K wurden die LH68-Sensoren im weiteren Verlauf des UVV-Projekts eingesetzt.

Darüber hinaus wurde auch der CS10K weiter im Projekt untersucht. Insbesondere ermöglichte der driftbehaftete CS10K eine leichtere Beurteilung der am ISIS verfolgten Regenerationsstrategien durch zyklische Polarisierung.

Für die folgenden Arbeitspakete wurden die nachproduzierten LH68-Sensoren in HT- bzw. ST-Gehäuse vom Stand der Technik integriert. In Abbildung 61 und Tabelle 8 sind die an die Projektpartner ausgelieferten Komponenten dargestellt bzw. aufgeführt.

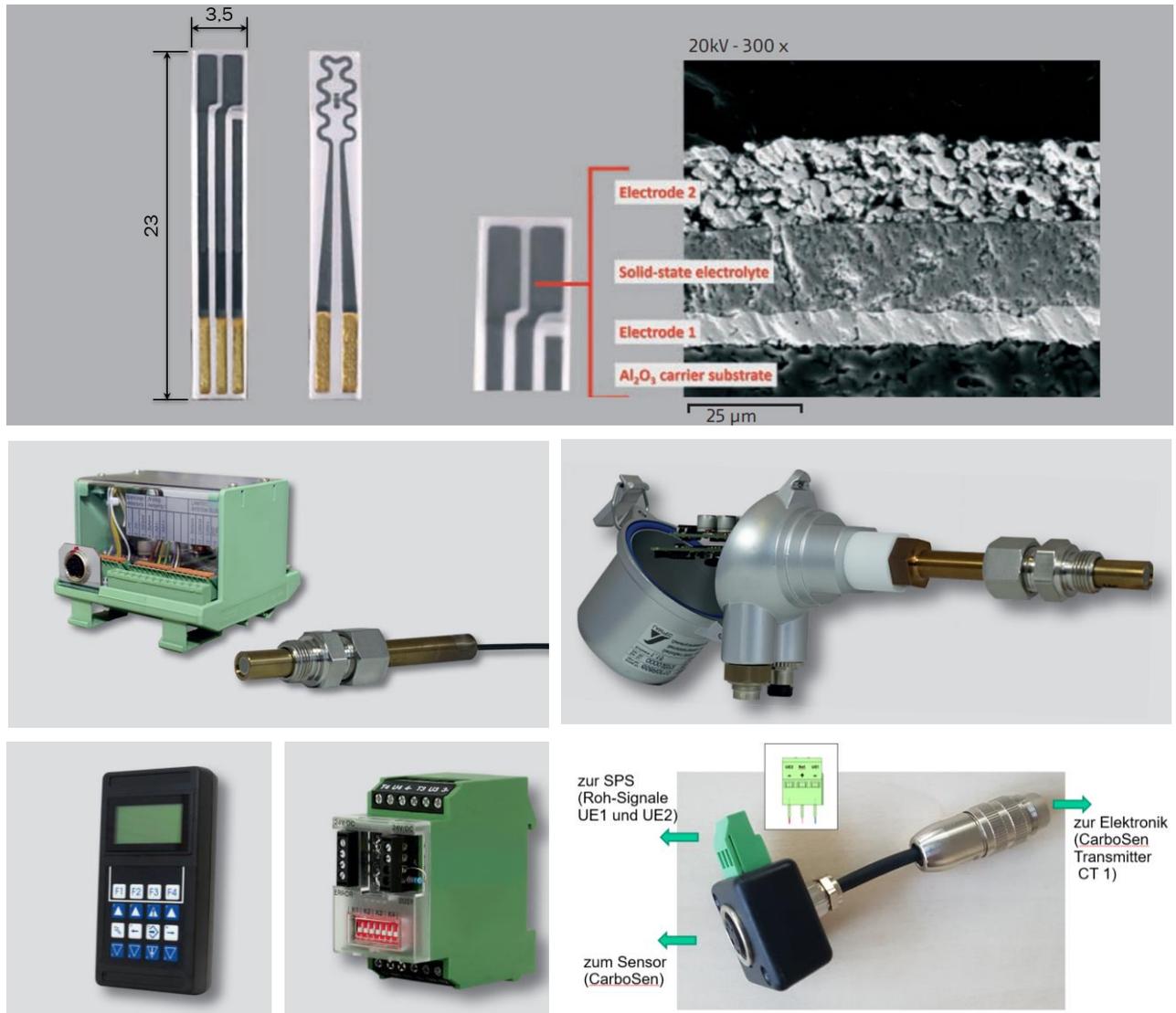


Abbildung 61: Oben v.l.n.r.: LH68 Sensorelement (Elektrodenseite - Heizerseite - Elektroden gezoomt – SEM-Bild mit Funktionsschichten). Mitte v.l.n.r.: HT-Sonde mit externer CT1-Elektronik; ST-Sensorsystem mit integrierter Elektronik. Unten v.l.n.r.: Handbedieneinheit; analoges Spannungs-Ausgangsmodul; Adapter zum Roh-Sensorsignal-Abgriff

Tabelle 8: An die Projektpartner ausgelieferten Komponenten

Menge	Artikelnummer	Bezeichnung
4	658R0010	ST-Sensorsystem - mit integrierten LH68-Sensoren
2	658R0011	ST-Sensorsystem - mit integrierten CS10K-Sensoren
6	658R1050	Kabel für ST-Sensorsystem
14	658R0002/E	HT-Sonde - mit integrierten LH68-Sensoren
8	658R0107	CT1 Sensor-Elektronik
8	-	Adapter zum Roh-Sensorsignal-Abgriff an CT1 Sensorelektronik

8	663R4025	Analoge Spannungs-Ausgangsmodul
8	658R0322	Sondeneinschraubarmatur (SEA) M18x1,5
3	663R0932V3.0	Handbedieneinheit (HBE)
3	663R0403-2M	Kabel für HBE

Gehäusekonzepte für Hochtemperaturanwendungen

Einsatzkonzepte für Anwendungen bis 500 °C Abgastemperatur erfordern die Verwendung geeigneter und teilweise teurer Materialien wie Edelmetall-Draht, Glas, Keramik, Glaskeramik und Edelstahl. Die wechselnden Temperaturbelastungen erfordern in den heißen Bereichen zudem Materialien mit angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten, was die Auswahl einschränkt. Kritisch ist dabei immer die elektrische Kontaktierungsstelle zum sicheren und zuverlässigen Sensorsignalabgriff bzw. zur Heizleistungseinkopplung in das Sensorelement. Insbesondere wenn die Kontaktierungsstelle im Prozessgas liegt, muss eine materialschlüssige Verbindungstechnologie eingesetzt werden. Die elektrische Kontaktierung muss Vibrationen und Schock beim Handling des Sensors sowie im Betrieb einer Feuerungsanlage überstehen. Die Verlegung der Kontaktierungsstelle in einen sauberen „hinteren“ Bereich ermöglicht es, auf einfachere nicht materialschlüssige Verbindungstechnologien zu setzen. Feuchtes und aggressives Feuerungsabgas erfordern dann jedoch eine hermetische Durchführung. Gleichzeitig können damit im „hinteren“ Bereich kostengünstige Materialien eingesetzt werden. Hermetische Durchführungen erfordern immer eine Spezialkomponente von externen Zulieferern, was das Konzept verteuert. Um die preisliche Zielrahmenbedingung von kleiner 100 € pro Stück bei einer Serie von 10000 Stück einhalten zu können, ist daher das oberste Ziel in diesem Falle die Reduktion der Komplexität. Bei näherer Betrachtung der nachfolgend vorgestellten Konzepte stellte sich nur Konzept D als geeignet heraus. Die technologische Eignung von Konzept D sollte im Projekt nachgewiesen werden. Insbesondere die Kosten wurden im Detail betrachtet.

Die Abbildung 62 zeigt Konzept A, bei dem die Sensorelemente zunächst mit Edelmetall-Draht kontaktiert und die Kontaktierungsstelle dann mit Glas fixiert wird (1).

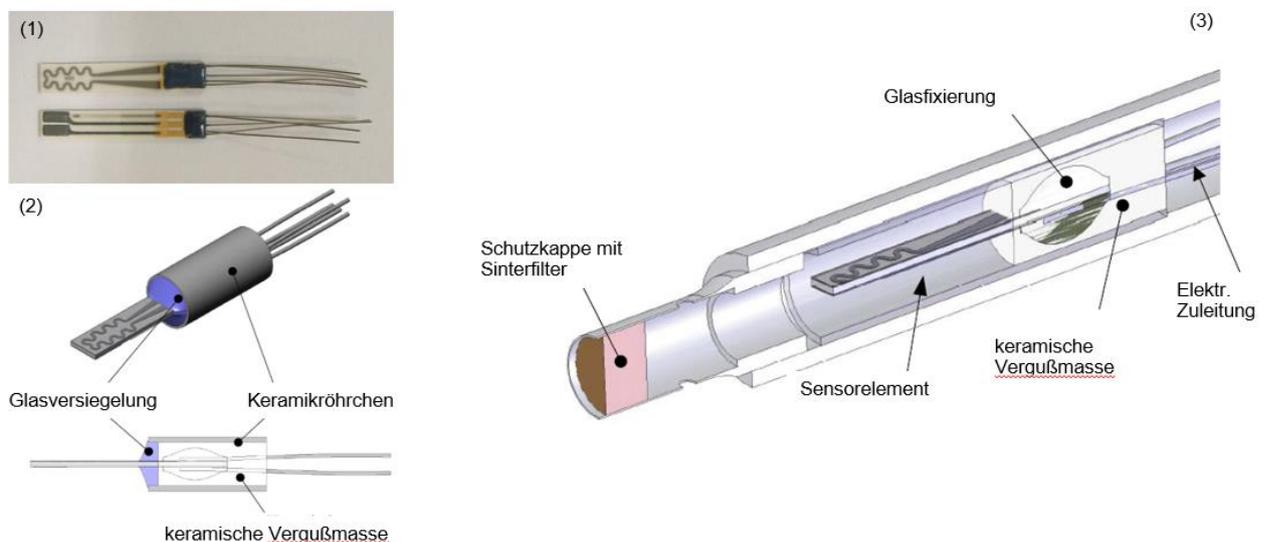


Abbildung 62: Sensor-Konzept A: (1) Bedrahtetes Sensorelement; (2) Sensorelement im Keramikröhrchen; (3) Integration im Tauchrohr

In Schritt (2) wird (1) mittels spezialkeramischer Vergußmasse in einem Keramikröhrchen verpottet. In Schritt (3) wird (2) in einem Edelstahltauchrohr integriert. Dabei werden die dünnen Sensor-Drähte materialschlüssig mit den dicken elektrischen Zuleitungen verbunden, was einen kritischen Fertigungsprozess darstellt. Durch eine schraubbare Schutzkappe „vorne“ am Tauchrohr kann im Falle einer Verstopfung des Sinterfilters dieser einfach ausgetauscht werden. Technologisch nachteilig ist die Notwendigkeit einer zusätzlichen Glasversiegelung im vorderen Bereich des Keramikröhrchens (2), denn es hat sich herausgestellt, dass die keramische Vergußmasse porös wie ein Schwamm ist, dadurch Feuchtigkeit aufnimmt und damit zu Kriechströmen und Kurzschluss führen kann. Die zusätzliche Glasversiegelung ist zudem in der Praxis nicht zuverlässig, da zu unterschiedliche, unangepasste Materialien aufeinandertreffen. Damit ist das Konzept im hinteren Bereich nicht hermetisch dicht, ist elektrisch unzuverlässig und erfordert teure korrosionsbeständige Zuleitungen im hinteren Bereich.

Die Abbildung 63 zeigt Konzept B, bei dem unbedrahtete Sensorelemente direkt mit den Pt-Drähten einer hermetischen Glas/Pt-Durchführung mit Edelstahlgehäuse kontaktiert werden. Die anwendungsspezifische Glas/Pt-Durchführung im Edelstahlgehäuse wird extern gefertigt und ist verhältnismäßig teuer. Mit dieser entfällt Schritt (1) aus Konzept A. In Schritt (2) wird (1) gasdicht mit dem Edelstahltauchrohr verschweißt. Durch die hermetische Durchführung können im hinteren Bereich des Tauchrohrs kostengünstige Litzenmaterialien eingesetzt werden, da dort weder Feuchte noch aggressives Abgas gelangen können. Nachteilig ist jedoch, dass die Kontaktierung von Pt-Draht mit dem Sensorelement nicht zugentlastet ist, so dass Vibrationen, Schock, Bewegung des Sensorelements durch das Eigengewicht möglicherweise zum Verlust der elektrischen Verbindung führen können. Ein nachträgliches Verglasen zur Steigerung der Zuverlässigkeit wäre technologisch mit einigem Aufwand zwar möglich, würde den preislichen und herstellungstechnischen Vorteil jedoch aufheben, da insbesondere das Fixierglas lokal aufgeheizt werden muss, ohne dass dabei das Glas der Glas/Pt-Durchführung erweicht und verändert werden darf. Ohne Fixierglas ist Konzept B technisch nur bedingt geeignet, mit Fixierglas ist es preislich teurer als Konzept A.

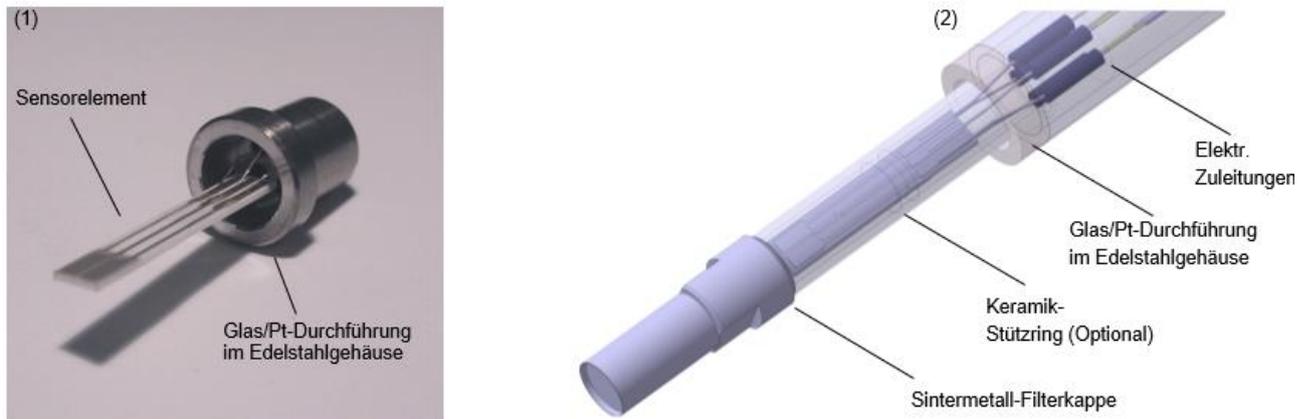


Abbildung 63: Sensor-Konzept B: (1) Sensorelement an Glas/Pt-Durchführung im Edelstahlgehäuse; (2) Integration im Tauchrohr

Die Abbildung 64 zeigt Konzept C, bei dem unbedrahtete Sensorelemente direkt mit den Pt-Drähten einer hermetischen Keramik/Pt-Durchführung mit Edelstahlgehäuse kontaktiert werden.

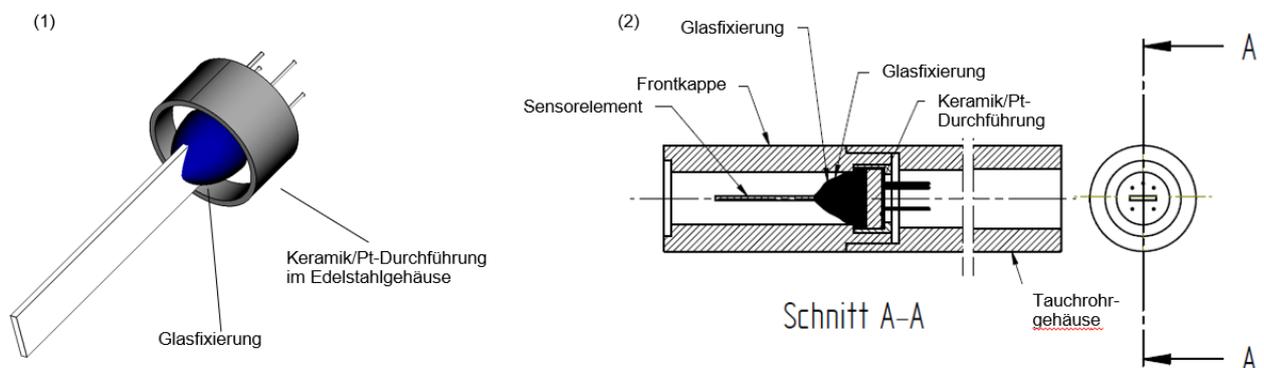


Abbildung 64: Sensor-Konzept C: (1) Sensorelement an Keramik/Pt-Durchführung im Edelstahlgehäuse; (2) Integration im Tauchrohr

Die anwendungsspezifische Keramik/Pt-Durchführung im Edelstahlgehäuse wird extern gefertigt und ist sehr teuer. Mit dieser Variante entfällt Schritt (1) aus Konzept A. In Schritt (2) wird (1) gasdicht mit dem Edelstahltauchrohr verschweißt. Durch die hermetische Durchführung können im hinteren Bereich des Tauchrohrs kostengünstige Litzenmaterialien eingesetzt werden, da dort weder Feuchte noch aggressives Prozessgas gelangen können. Nachteilig ist jedoch auch hier, dass die Kontaktierung Pt-Draht/Sensorelement nicht zugentlastet ist. D.h. Vibrationen, Schock, Bewegung des Sensorelements durch das Eigengewicht führen möglicherweise zum Verlust der elektrischen Verbindung. Jedoch ist das Verglasen zur Steigerung der Zuverlässigkeit im Gegensatz zu Konzept B ohne großen Aufwand realisierbar. Konzept C ist technisch geeignet, durch die Durchführung jedoch sehr teuer, selbst wenn die höheren Stückzahlen wie in der Holzanwendung geplant erreicht werden.

Die Abbildung 65 zeigt Konzept D, bei der das Sensorelement direkt mit der Sensordurchführung verbunden wird. Insbesondere geht das Durchführungsmaterial (2) während der Herstellung durch eine sich

ausbildende Glasphase eine direkte Verbindung mit dem Sensorelement (1) und der Gehäusewand (3) ein, die hochtemperaturbeständig und hermetisch ist. Der vordere Messkopf des Sensorelements ragt dabei vorne in das heiße Feuerungsabgas hinein. Das Sensorelement geht durch die Sensordurchführung hindurch. Diese bildet die hermetische Trennung/Dichtung zum hinteren Bereich. Das hintere Ende des Sensorelements mit den Kontaktpads ragt in den sauberen hinteren Bereich hinein und kann dort in geeigneter Weise kontaktiert werden. Das Metallgehäuse der Sensordurchführung wird nun so konstruiert, dass es möglichst viele Funktionalitäten eines Tauchrohrgehäuses für den Feuerungsabgaskanal beinhaltet, z.B. Frontkappe, Befestigungsmöglichkeit am Abgaskanal, Sensorsignaldurchgang.

Im Gegensatz zu den anderen Konzepten, die eine Vielzahl an Fertigungsschritten benötigen, entsteht durch das neue Konzept eine Einzelkomponente, die den Montageprozess von Sensordichtungssystemen für Anwendungen bis über 1000 °C vereinfacht und preiswert gestaltet, da weniger Komponenten, Prozessschritte und Montageaufwand benötigt wird. Das Konzept wurde für den hochvolumigen und niedrigpreisigen Automobilmarkt entwickelt und sollte in angepasster Weise technisch und preislich geeignet sein, die Anforderungen für die Anwendung an Holzfeuerungen zu erfüllen.

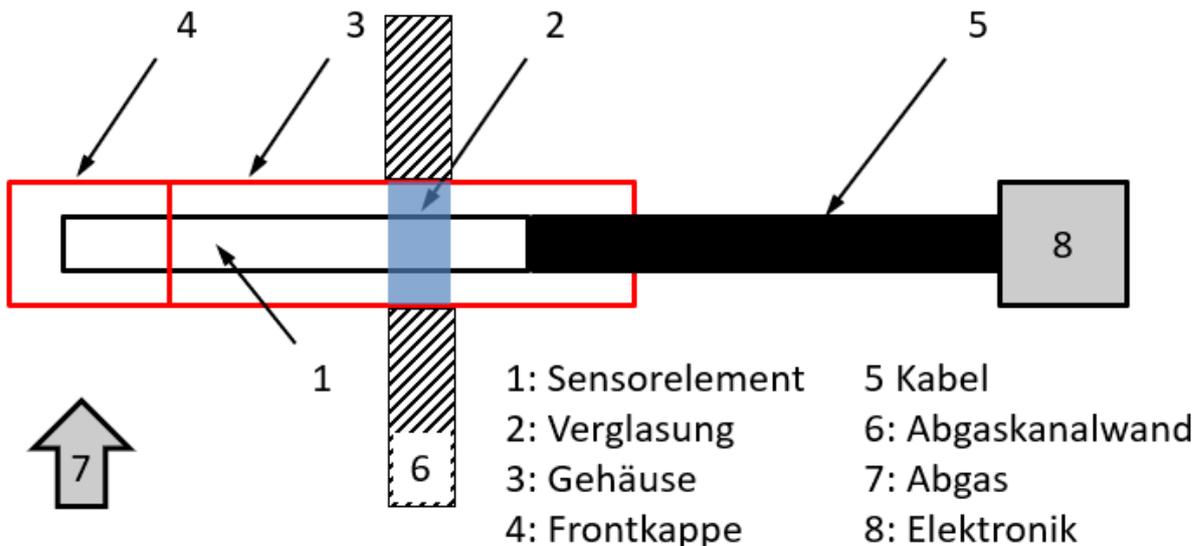


Abbildung 65: Sensor-Konzept D: Neue hermetische Sensordurchführung mit ins Gehäuse (3) eingebetteten (2) Sensorelement (1)

Konzeptauswahl und Beurteilung der Konzepte bzgl. LowCost

Eine Kostenabschätzung sowie die technologische Beurteilung der Konzepte aus APL2 führt schließlich zu der Übersicht in Tabelle 9.

Tabelle 9: Bewertung unterschiedlicher Konzepte bezüglich technologischer und preislicher Eignung – speziell für die Anwendung bei hohen Stückzahlen in aggressiven Holzfeuerungsabgas

Konzept	zusätzl. Glasver- guß/-fixierung	Komplexität	Eignung im Abgas	Preis	Eignung für Holz / Stückzahlen
A	ohne	mittel	nein	niedrig	bedingt
	mit	hoch	bedingt	mittel	nein
B	ohne	niedrig	nein	mittel	bedingt
	mit	mittel	bedingt	hoch	nein
C	mit	hoch	ja	hoch	nein
D	ohne	niedrig	ja	mittel	ja

Das Ergebnis daraus ist, dass lediglich die Konzepte C und D technologisch für die Anwendung im Abgas geeignet sind (Spalte 4). Daher wurden für diese beiden Konzepte die stückzahlabhängigen Preise detaillierter kalkuliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 66 dargestellt.

Der Preis für Konzept D liegt mit 10000 Stück/Jahr bei kalkulierten 140 € und ist damit 40 % teurer als anvisiert. Der Grenzpreis ist jedoch noch nicht erreicht und mit steigender Stückzahl kann dieser perspektivisch auf etwa 130 € sinken.

Bei der hier angewendeten Kalkulation ist noch keine automatisierte Integration berücksichtigt, da sich eine Investition in derartige Anlagen erst ab Stückzahlen deutlich über 10000 Stück/Jahr rechnet. Durch die

Automatisierung wäre ein Preissprung nach unten zu erreichen, so dass der Zielpreis von 100 € pro Stück für Konzept D nach erfolgreicher Marktdurchdringung erreichbar zu sein scheint.

Es wird aber auch deutlich, dass die Markteinführung und -durchdringung ohne anfängliche Subventionierung oder Vorschrift zur Verwendung der nun verfügbaren Technologien zur kontinuierlichen sensorischen Verbrennungsüberwachung und -regelung aufgrund der höheren Investitionskosten aktuell für private Hausbesitzende nicht erreicht werden kann.

Resultierend aus der technischen Beurteilung der Konzepte sowie der zugehörigen detaillierten Kostenkalkulation wurde Konzept D weiter umgesetzt.

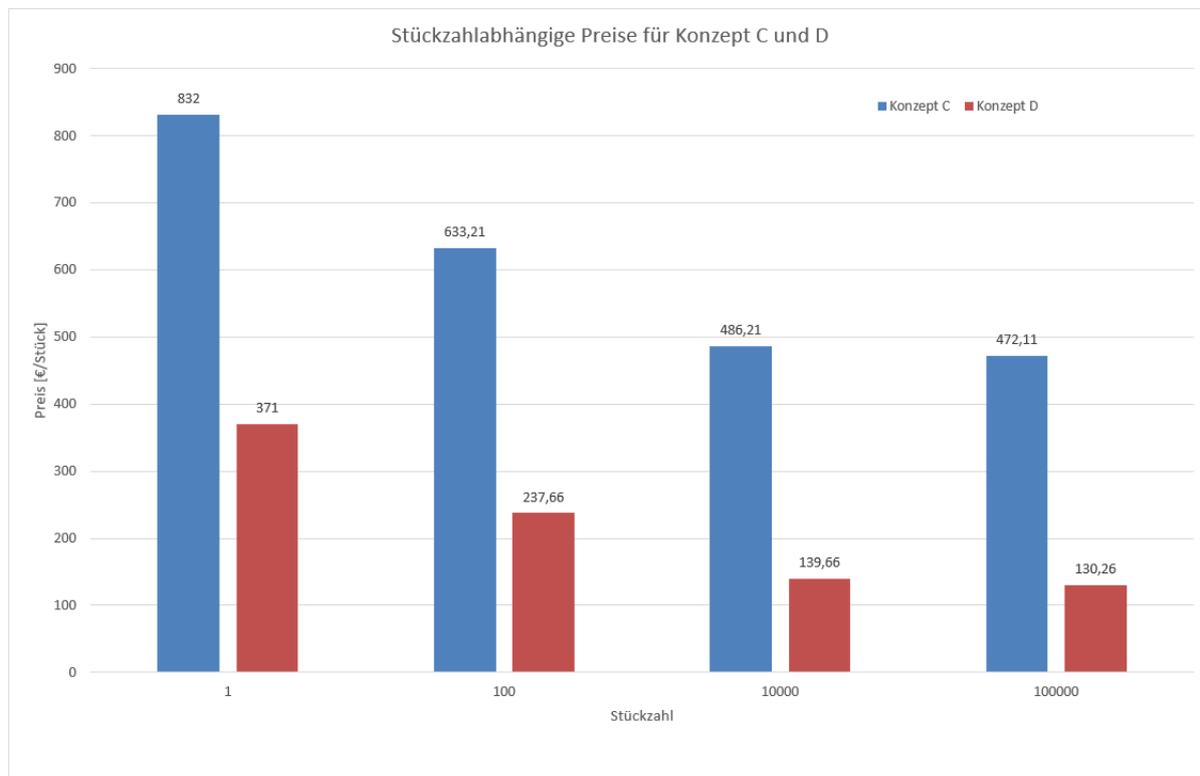


Abbildung 66: Stückzahlabhängige Preise für Konzept C und D

Umsetzung Gehäusekonzept und Aufbau Prototypen

Eine auf Hochtemperaturdurchführungen spezialisierte Entwicklerfirma wurde mit der Entwicklung der Sensor-Durchführung sowie der anschließenden Herstellung und Lieferung von Mustersensoren zur Qualifizierung und Testung beauftragt.

Die Entwicklung folgte den Vorgaben im „Lastenheft_CarboSen-Gehäuse“. Darin erfolgte die Zielbestimmung für das zu entwickelnde Bauteil sowie die Beschreibung des Produkteinsatzes mit den entsprechenden Spezifikationen der Umgebungsbedingungen im Holzverbrennungsabgas. Eine Produktübersicht mit zwei möglichen Sensorintegrationskonzepten I (Kabel und Sensor nicht trennbar) und II (Kabel und Sensor trennbar, z.B. im Falle eines Sensortausches) wurde ebenfalls im Lastenheft beschrieben. Unter Einbeziehung der Projektpartner wurde Konzept I aus Kosten- und Robustheitsgründen favorisiert und schließlich die Produktfunktionen festgelegt. Zusammen mit weiteren Qualitätsanforderungen (insbesondere Dichtheit) wurden diese ins Pflichtenheft übernommen, welches mit der technischen Abteilung der externen Entwicklerfirma in engmaschigen Videokonferenzen besprochen, fixiert und schließlich umgesetzt wurde.

Einige aus dem Prozess zur Herstellung der Sensordurchführung resultierenden Anforderungen an das Sensorelement (SE) waren z.B.

- eine enge geometrische Toleranz (insbesondere Breite und Dicke des SE)
- eine saubere Kontur (insbesondere Schnittkante der SE)
- eine hohe Temperaturbeständigkeit (insbesondere aller funktionalen Schichten des SE)

Diese Voraussetzungen mussten durch eine Nachproduktion von Sensorelementen mit modifizierten Materialien und angepasster Vereinzelungstechnologie zunächst geschaffen werden, ohne dabei die bis dahin erreichten Fortschritte im Projekt bezüglich Drift und Empfindlichkeit negativ zu beeinflussen.

Beispielhaft wird nachfolgend die Problematik einer sauberen Kontur der Sensorelemente nach dem Vereinzeln aus dem Trägersubstrat betrachtet. Üblicherweise werden die keramischen Trägersubstrate (4 x 4 Zoll) mit den darauf gedruckten Sensorstrukturen angeritzt oder laserperforiert (s. Abbildung 67, oben links) und dann entlang der Perforation gebrochen. Eine derart fehlerhafte, rissige und undefinierte Bruchkante wird auch nach dem Verglasungsprozess der Sensordurchführung keine befriedigende Dichtheit gewährleisten können. Vorhandene Risse schreiten fort und führen teilweise bereits während des Herstellprozesses der Sensordurchführung zu Sensorbruch (s. Abbildung 67, oben rechts). Zudem ist die aktuelle Kontaktpadstruktur für die beim Herstellprozess der Sensordurchführung angewendeten hohen Temperaturen (s. Abbildung 67, unten) thermisch nicht stabil genug.

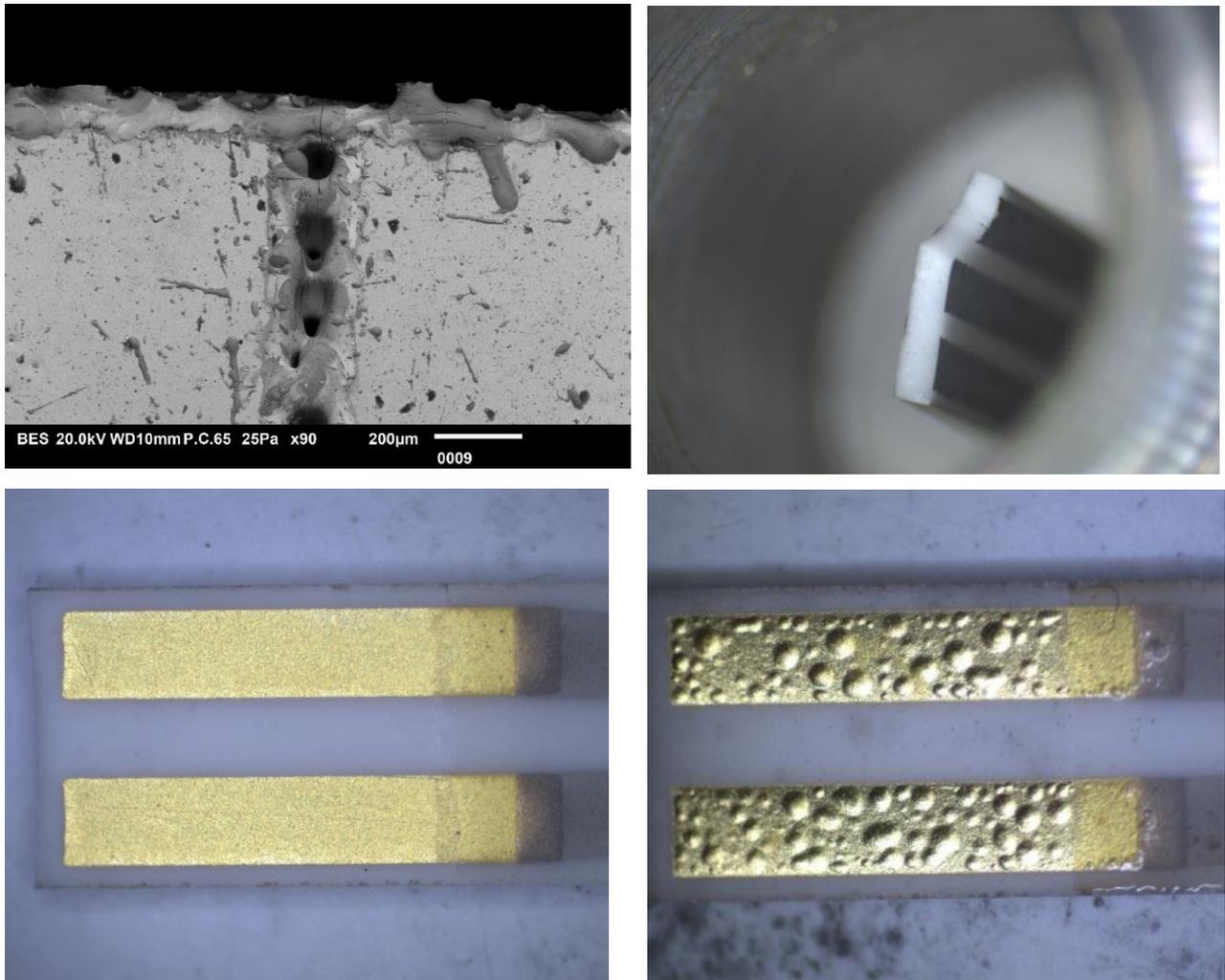


Abbildung 67: REM-Aufnahme Laserperforationskante (oben links); Bruch des CarboSen Sensorelements beim Herstellprozess der Sensordurchführung (oben rechts); Fehlerfreie Kontaktpads (unten links) vor und Blasenbildung auf der Kontaktpadfläche nach der Einglasung (unten rechts)

Auch mit den Ertüchtigungen in der Nachfertigung konnten noch nicht alle Herausforderungen zufriedenstellend gelöst werden. Insbesondere wurde die Dichtheit an fünf Mustern (siehe Abbildung 68) mittels Helium-Leckmethode zu 10^{-5} mbar l/s festgestellt. Damit ist die Leckrate der Sensordurchführung zwar vergleichbar zur Leckrate der aktuell eingesetzten Durchführung in der HT-Sonde, hat aber im Gegensatz dazu das Potenzial, 10^{-7} mbar l/s oder besser zu erreichen.



Abbildung 68: Erstmuster von Sensor-Durchführungen

Zur Demonstration der Sensorsystemintegration ins Gehäusekonzept (siehe Abbildung 69) wurde die entwickelte Sensor-Durchführung (Pos. 1) mit dem Gehäuserohr (Pos. 4) verbunden. Die darin befindliche Steckverbindung mit Anschlusskabel (Pos. 2) sorgt für einen Signalabgriff an den Kontaktpads der Sensorelemente. Das Sensorkabel wird durch die Kabelverschraubung (Pos. 3) nach außen geführt, durch verschrauben fixiert und damit die Integration komplettiert.

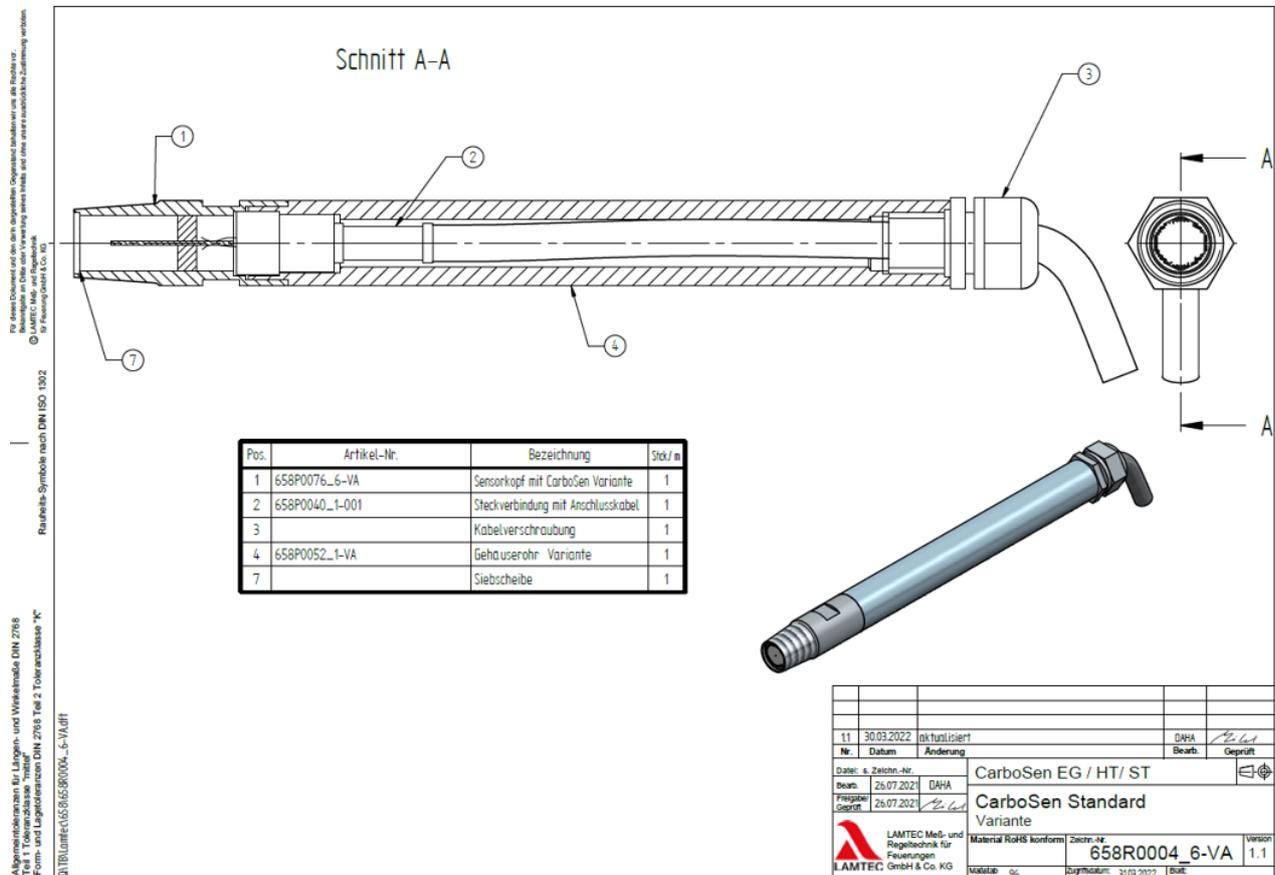


Abbildung 69: Gehäusekonzept der CarboSen-Sensorintegration mit neuer Sensor-Durchführung (hier lange Gehäuseversion)

Die elektrische Kalt-Überprüfung auf Durchgang/Widerstand der Heizerwendel sowie die Überprüfung auf Kurzschluss/Isolationswiderstand zwischen den Elektroden war erfolgreich. Somit konnte abschließend die 100 %-Funktionsüberprüfung für das Gehäusekonzept aufgebaut und durchgeführt werden.

Die Abbildung 70 zeigt den Aufbau zur Funktionstestung des Sensors im neuen Gehäusekonzept. Der Sensor im neuen Gehäuse (Mitte) wird mittels Adapterkabel an die CT1-Platine der Sensorelektronik (rechts) angeschlossen. Am Display der ebenfalls an die CT1 angeschlossenen Handbedieneinheit (oben) können alle Betriebsgrößen und Sensorsignale für den nachfolgenden Funktionsnachweis in allen Betriebsphasen des Sensors abgelesen sowie die Default-Betriebsparameter bei Bedarf angepasst werden.

Zum Nachweis der CO_e-Sensitivität wurde das Testgas C (300 ppm CO_e in 3 Vol.-% O₂, Rest N₂ mit 0,5 l/min) aus der Prüf- und Abgleichgasflasche (links) mit aufgeschraubtem Durchflussregler über den Testgasschlauch gezielt durch die Siebscheibe (Pos. 7 in Abbildung 69) an das Sensorelement herangeführt. Das Ergebnis lässt sich stichpunktartig zusammenfassen:

- Initialisierungsphase erfolgreich abgeschlossen
- Aufheizphase erfolgreich abgeschlossen
 - d.h. Zieltemperatur des Sensorelements erfolgreich eingestellt (tf = 2,6) und konstant geregelt
- Betriebsphase erfolgreich erreicht
 - und zwar ohne Warn- oder Störmeldung
- Offset-Signale der beiden redundanten Elektroden an Luft UE1 = 0 mV und UE2 = 1 mV
 - Offset-Anzeige: 0 ppm,
 - d.h. innerhalb der Spezifikation im Datenblatt: < 5 ppm

- COe-Signale der beiden redundanten Elektroden UE1 = 270 mV, UE2 = 283 mV

COe-Anzeige: 248 ppm,

d.h. innerhalb der Spezifikation im Datenblatt $\pm 25\%$ vom Messwert



Abbildung 70: Aufbau zum Funktionsnachweis des Sensorelements mit neuer Sensordurchführung nach Integration ins Gehäuse (Hier verlängertes Gehäusekonzept)

Sämtliche Betriebsparameter lagen in allen Betriebsphasen innerhalb der intern überwachten Parametergrenzen, d. h., eine Anpassung der Default-Betriebsparameter oder Erweiterung der Überwachungsgrenzen war nicht notwendig. Sensorsignale an Luft und an CO_e-Testgas lagen innerhalb der Spezifikationen. Dies bedeutet, dass

- der Herstellprozess für die Sensordurchführung keine offensichtliche Veränderung der funktionalen Sensoreigenschaften verursacht hat
- die Gehäuseintegration der Erstmuster erfolgreich demonstriert werden konnte

Aufgrund der o.g. Verzögerungen konnten der Funktionsnachweis in der LAMTEC-Gasfeuerungsanlage sowie der erste Stress-/Lebensdauertest mit maximaler Temperatur nicht mehr innerhalb des Projektzeitraumes durchgeführt werden.

Im Nachgang (zum Projekt) ist Folgendes zu tun (nicht vollständig):

- (Weiter-)Entwicklung einer sauberen Schneidekante zur Vereinzelung der Sensorelemente
- Umstieg auf temperaturbeständige Kontaktpadmaterialien (ohne Blasenbildung)
- (Weiter-)Entwicklung einer materialschlüssigen Verbindung zwischen Sensorelement und Signalkabel anstelle der federnden Kontaktierung

Integration der neuen Sonden in den Prozess und Dauertest

Die oben beschriebenen Probleme sowie der daraus notwendig gewordenen Ertüchtigung der Sensorelemente im Rahmen einer zweiten Nachfertigung mit der daraus resultierenden Zeitverzögerung führten dazu, dass die Integration der neuen Sensorprototypen in Feldanlagen nicht begonnen werden konnte.

Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation

Mess- und Testergebnisse wurden dokumentiert. Zwischen- und Endberichte wurden erstellt.

Aufzählung der Arbeitspakete LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG

- APL1 Bewertung Langzeitstabilität CarboSen
In APL1 wird eine Beurteilung der getesteten Sensoren durchgeführt. Erfüllen die Sensoren von LAMTEC oder ein Teil davon die Langzeitanforderungen, wird die LAMTEC nach Abschluss der Beurteilung als aktiver Projektpartner Leistungen erbringen. Fällt die Bilanz für die LAMTEC-Sensoren negativ aus, wird die LAMTEC nicht aktiv am Projekt teilnehmen.
- APL2 Gehäusekonzepte für Hochtemperaturanwendungen
In diesem Arbeitspaket sollen verschiedene Konzepte für die Integration des CarboSen in ein Hochtemperaturgehäuse (bis 500 °C Abgastemperatur) erarbeitet werden, unter der Prämisse, dass dieses bei Losgrößen von mehr als 10000 pro Jahr für einen Preis von weniger als 100 € verkauft werden kann. Hierzu wird der Stand der Technik erörtert und Patente recherchiert. Außerdem sollen mögliche Dienstleister recherchiert werden, welche ähnliche Lösungen zur Integration ggf. schon umsetzten. Ggf. werden Modelle gebaut, um die Beurteilung bezüglich Fertigung zu vereinfachen. Für die verschiedenen Konzepte sind die Konstruktionszeichnungen sowie eine mengenabhängige Kostenkalkulation zu erstellen.
- APL3 Konzeptauswahl und Beurteilung der Konzepte bzgl. LowCost
Nach der Erstellung der Konzepte und den zugehörigen Kostenkalkulationen muss beurteilt werden, ob die Zielkriterien für den Preis eingehalten werden können. Ist dies der Fall, wird das erfolversprechendste Konzept, welches die Kriterien erfüllt, in den folgenden Arbeitspaketen umgesetzt. Erfüllt keines der gefundenen Konzepte die Kostenkriterien, behält sich LAMTEC vor, an dieser Stelle das Projekt einzustellen und die Steckerentwicklung nicht durchzuführen.
- APL4 Umsetzung Gehäusekonzept und Aufbau Prototypen
In diesem Arbeitspaket wird das ausgewählte Gehäusekonzept in die Praxis umgesetzt. Es werden Prototypen gebaut und diese auf Dichtigkeit und Robustheit getestet. Weiterhin wird der Fertigungsprozess definiert, welcher später in der Serie umgesetzt werden soll sowie Qualitätskriterien festgelegt. Vor dem Einsatz im Feld werden die Prototypen mit Testgas sowie im Abgas eines Brenners im Hause LAMTEC getestet. Weiterhin wird angestrebt, das Gehäuse unter Beaufschlagung der maximalen Temperatur auf lange Zeit zu testen, um ggf. das Versagen von Bauteilen rechtzeitig zu erkennen.
- APL5 Integration der neuen Sonden in den Prozess und Dauertest

Nach den abgeschlossenen und bestandenen Tests bei LAMTEC sollen die neuen Sensorprototypen in Feldanlagen sowie in bestehende Projekteinzelanlagen integriert werden. Damit werden sowohl die Lebensdauer als auch die Zuverlässigkeit im Regelkonzept getestet und bewertet. LAMTEC wird die Tests aktiv begleiten und notwendige Maßnahmen zur Optimierung umsetzen.

APL6 Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation
Dokumentation der Mess- und Testergebnisse, Schreiben von Zwischen- und Endberichten.

1.5 Arbeiten und Ergebnisse zum Teilvorhaben 5: Einsatz von Sensorelementen und experimentelle Untersuchungen, Validierung, Universität Bayreuth

Die Universität Bayreuth war mit einer halben Stelle (wiss. MA) am Projekt beteiligt. Die Aufgaben bezogen sich auf die Erforschung eines HC-Sensors für den Einsatz im Abgas. Der Sensor arbeitet nach dem thermoelektrischen Messprinzip und soll im Folgenden nochmals vorgestellt werden (siehe schematischer Aufbau in Abbildung 71).

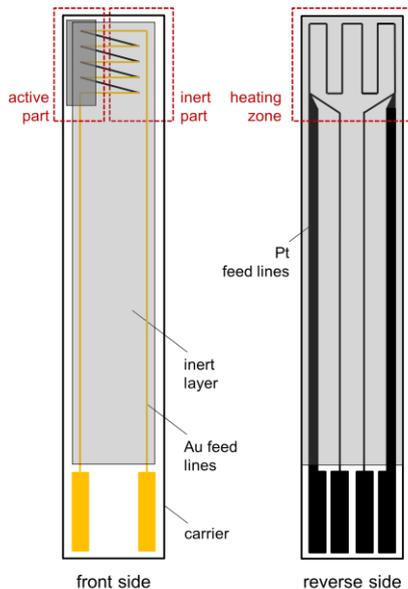


Abbildung 71: Schematischer Aufbau des thermoelektrischen Sensors der Universität Bayreuth /Hag17/

Grundsätzlich wird der Sensor in einfacher Planartechnik mittels Siebdruckverfahren auf einem Aluminiumoxid-Substrat dargestellt und ist damit kostengünstig herstellbar. Auf der Sensorvorderseite befindet sich eine Messanordnung aus hintereinandergeschalteten Thermopaaren (/Kit15/, hier: Pt/Au, und Zuleitungen zum Abgriff des Sensorsignals. Die Thermopaare „vergleichen“ dabei zwei Bereiche an der Sensorspitze, einen „inert“ abgedeckten Bereich und einen mit Katalysator „aktivierten“ Teil /Wie15/, /Hag17/. Am Katalysator reagieren reduzierende (oxidierbare) Gase in der umgebenden Atmosphäre exotherm mit Sauerstoff. Damit geht Temperaturerhöhung einher, die (als Temperaturgradient in Bezug zum inerten Sensorbereich) als Sensorsignal gemessen werden kann. Rückseitig ist auf dem Sensor eine Heizerstruktur aufgebracht, die der Einstellung der Sensorbetriebstemperatur (600 °C) dient. Dies ist notwendig, um die Aktivierungsenergie (light-off) für den Umsatz diverser Gasspezies am Katalysator bereitzustellen, aber auch um Ablagerungen von Ruß bzw. weiteren Partikeln (Stäube) zu vermeiden. Die Heizerstruktur ist in Vierleiter-Technik ausgeführt, um über den Heizerwiderstand im Bereich der Sensorspitze eine Nachregelung auf eine konstante Betriebstemperatur erreichen zu können.

Das Sensorprinzip ist physikalisch und chemisch vollständig verstanden und kann entsprechend simuliert werden /Rit17/. Die Sensorantwort verhält sich linear mit der Konzentration der einzelnen Analyten. Je nach Heizwert, Reaktionsfreude oder Diffusionseigenschaften variiert die Empfindlichkeit des Sensors (Steigung dieser linearen Kennlinie) auf verschiedene Gasspezies.

Aus der obigen Erläuterung des Sensorprinzips ergeben sich auch folgende Störanfälligkeiten:

- Jeder Sensor weist einen individuellen „Offset“ auf, d. h., ein Sensorsignal, das einem Temperaturunterschied zwischen beiden Bereichen entspricht, auch ohne dass Exothermie-Wärme am Katalysator entsteht. Dies kann durch Streuungen im Siebdruckprozess hervorgerufen werden (z.B. bei der Herstellung der Heizerstruktur) und liegt damit in einer nicht ideal homogenen Temperaturverteilung in der Sensorspitze begründet.
- Dieser Offset wird beeinflusst durch äußere Einflüsse auf das Sensorelement, z. B. die Einbaulage des Sensorsubstrats, die Anströmung im Abgas oder die Gehäusetemperatur.

- Der Sauerstoffgehalt im Abgas nimmt Einfluss auf die Reaktion der reduzierenden Gase.
- In einzelnen Messungen wurde deutlich, dass auch größere Änderungen in der Abgasfeuchte (ohne HC) zu Änderungen im Sensorsignal führen können. Dieser Zusammenhang ist aber noch nicht ausreichend aufgeklärt.

Im Projekt sollte nun die Tauglichkeit dieses Sensorprinzips für die Anwendung im Abgas von Biomassefeuerungen nachgewiesen werden. Dabei galt es vor allem, den Einfluss der Störgrößen zu minimieren. Außerdem wurde Wert auf die Weiterentwicklung des Sensorelements zur Erhöhung der Empfindlichkeit sowie auf die Entwicklung einer geeigneten Elektronik gelegt.

Entwicklung Sensorelement

Die Vorversuche zu diesem Projekt wurden mit Sensorelementen der Sensorgeneration 1 (Gen 1) durchgeführt, die auf hohe Robustheit bzgl. der Betriebstemperatur ausgelegt waren (Pt/PtRh-Thermopaare). Für den Abgaseinsatz fiel die Entscheidung auf die Verwendung von Pt/Au-Thermopaaren als Funktionselement, da diese eine höhere Empfindlichkeit (Seebeck-Koeffizient) aufweisen, den Umgebungsbedingungen (Abgastemperatur an der Einsatzstelle) aber durchaus auch gerecht werden. Des Weiteren wurde eine schlecht wärmeleitfähige Zwischenlage unter den Thermopaaren eingefügt (zwischen Funktionsstruktur und Aluminiumoxid-Substrat, Details in /Kit17/), um den Wärmefluss von aktiver zu inerte Seite zu verringern und damit ebenfalls die Empfindlichkeit zu erhöhen (Sensorgeneration 2, Gen 2). Weitere Verbesserungen im Projekt ergaben sich durch Anpassungen im Layout der Funktionsschichten. So wurden in der Sensorgeneration 3 (Gen 3) durchgängig 15 Thermopaare verwendet. Außerdem erfolgte eine modellbasierte Anpassung der Heizerstruktur zur Einstellung einer homogenen Temperaturverteilung im Bereich der Funktionsstruktur, welche angepasst auf die ebenfalls im Projektverlauf erarbeitete ideale waagerechte Einbaulage des Sensorelements war. Hinsichtlich der Katalysatorschicht führte die Beladung mit 1 % Pt und 1 % Pd ebenfalls zu einer weiteren Empfindlichkeitssteigerung. Insgesamt war es mit diesen Maßnahmen möglich, eine deutliche Verbesserung der Sensorperformance zu erreichen (vgl. Abbildung 72). Es ist beispielhaft an der Empfindlichkeit für CO erkennbar, dass eine Steigerung von 1,47 μV je 1000 ppm auf 46,13 μV pro 1000 ppm erreicht werden konnte.

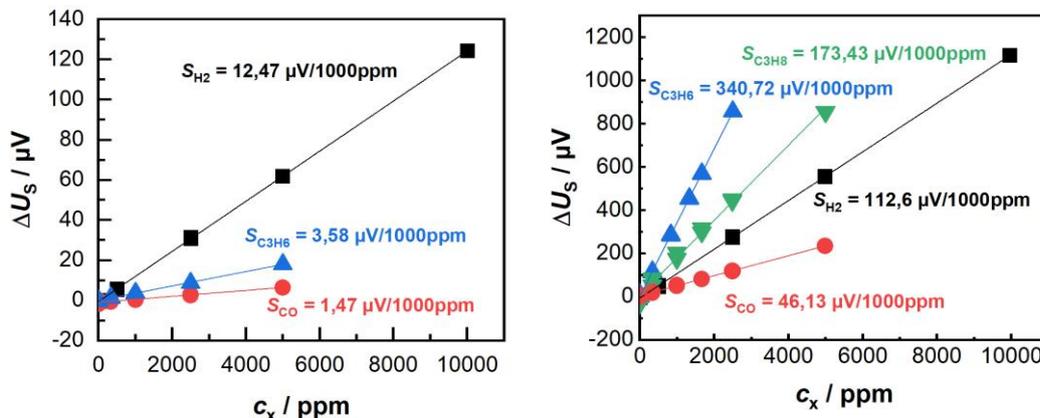


Abbildung 72: Ansprechverhalten der Sensorelemente in der Laboranlage (Bayreuth) unter Variation verschiedener Gasspezies, links: Sensorgeneration 1, rechts: Sensorgeneration 3

Einflüsse auf das Sensorsignal

Ausführliche Versuchsreihen zeigten, dass die Kopplung zwischen Sensorelement und Gehäuse einen wesentlichen Einfluss auf das Sensorsignal hat. Die Wärmeabfuhr aus der beheizten Sensorspitze über das Substrat hin zu den kälteren Kontakten und in das Sensorsubstrat aufnehmende Gehäuse hängt von der Umgebungstemperatur bzw. der Temperatur des Gehäuses an der Einschraubstelle ab. Liegt eine starke Kopplung zwischen Substrat und Gehäuse vor (z. B. bei Sensorgeneration 1, da hier das Substrat mit keramischer Vergussmasse direkt in ein Edelstahlrohr eingebracht wurde), so ändert sich diese Wärmeabfuhr stark beim „Kaltstart“ der Anwendung (d.h. kalter Kamin und kaltes Gehäuse). Die Heizleistung, die für die Bereitstellung der Sensorbetriebstemperatur notwendig ist, kann ein Maß dafür sein. Bei kalter Umgebung und damit verbundener starker Wärmeabfuhr ist eine höhere Heizleistung notwendig. Heizt sich der Kamin und damit das Sensorgehäuse auf, so nimmt die Heizleistung dementsprechend ab. Die Information über die Gehäusetemperatur kann ebenso durch ein Sekundärsignal, z.B. durch Messung mittels separaten Thermoelements (Typ K / Typ N), ermittelt werden. Ändert sich der Heizstrom bzw. die Heizleistung des Sensors, so können wiederum Einflüsse auf das Sensorsignal entstehen, da sich die Offset-Spannung der Thermoelement-Struktur ändern kann.

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist die Anströmung des Sensors. Bei gleichmäßiger Strömung kühlen beide Bereiche (aktiv und inert) gleichmäßig ab, sodass kein zusätzliches Sensorsignal entsteht (/Hag18/). Für den Einsatz im Abgas bietet sich dementsprechend eine waagerechte Einbaulage im Bereich einer gleichmäßigen Strömung an, wobei es bezüglich des Ansprechverhaltens ausreichend ist, wenn der Sensor am Rand sitzt und das Gas per Diffusion zum Sensor gelangt. Der Sensor muss also nicht direkt im Hauptstrom des Abgases sitzen. Im Projekt wurden dafür verschiedene Sensorschutzkappen untersucht.

Im Laufe des Projekts wurden verschiedene Strategien entwickelt, die genannten Störeinflüsse zu verringern.

- 1) Entwicklung einer geeigneten Klemm-Kontaktierung zur sicheren (elektrischen) Kontaktierung des Sensorelements bei gleichzeitiger thermischer Entkopplung vom Gehäuse
- 2) Sicherstellen einer waagerechten Einbauposition durch Bereitstellung entsprechender Einschweiß-Stutzen und Adapter für die Sensormontage
- 3) Auswertung der Versuchsreihen hinsichtlich Ermittlung einer Funktion zur Korrektur des Sensorsignals über die Heizleistung
- 4) Laborversuche mit beheizbarer Sensorkammer, um das Aufheizverhalten einer Feuerung definiert zu untersuchen
- 5) Ausführliche Simulationen, um die Zusammenhänge zu verstehen bzw. Korrekturfunktionen wissenschaftlich zu untermauern

Das entwickelte Gehäusekonzept ist in Abbildung 73 dargestellt. Das Sensorelement wird dabei mit zwei Halbschalen aus hochtemperaturstabilem Kunststoff (PEEK) gefasst. In diese Halbschalen sind Löcher und Nuten eingebracht, um entsprechende Drähte an den Positionen der Kontaktpads der Funktionsstrukturen am Sensorelement zu fixieren. Ein Spannring hält die Halbschalen zusammen. Das Sensorsubstrat hat an der Stelle der Kontaktpads den einzigen Kontakt zum Gehäuse. Über das Sensorelement wird ein Adapter inkl. der Schutzkappe gestülpt. Die Form der zusammengesetzten Halbschalen findet hier passgenau das Gegenstück, um das Sensorsubstrat in definierter Lage zur Kappe zu positionieren. Die Kappe wiederum weist eine Nut auf, damit auch hier die Einbaulage im Einschweißstutzen mit einem entsprechenden Stift sichergestellt werden kann.



Abbildung 73: Modulares Gehäusekonzept mit Einschweiß-Stutzen für einen Schornstein (links), wechselbarer Schutzkappe (Mitte) und Klemmkontaktierung für das Sensorelement (rechts)

Das modulare Gehäuseprinzip erlaubt unter anderem das schnelle Wechseln des Sensorsubstrats und die Verwendung verschiedener Schutzkappen – vor allem aber das verdrehsichere Einbauen des Sensorelements. Die Wichtigkeit, eine definierte Einbaulage sicherzustellen, wird sowohl in Simulationen (Abbildung 74) als auch in Laborexperimenten (Abbildung 75) deutlich.

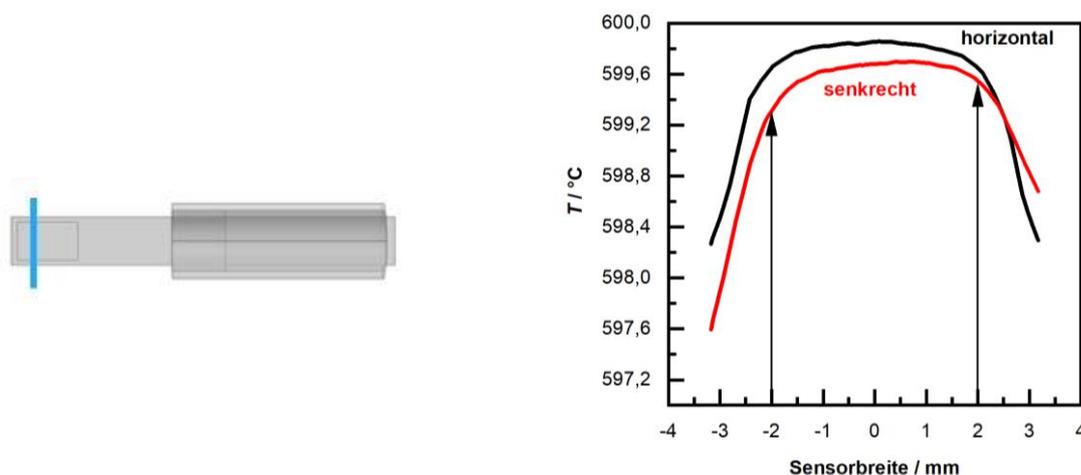


Abbildung 74: Simulation des Temperaturverlaufs entlang der Sensorbreite (schematische Darstellung der Auswertelinie links) für eine „horizontale“ (waagerechte) und um 90° gedrehte („senkrechte“) Einbaulage

Der Einfluss der Anströmung wurde experimentell ermittelt. Dieser Einfluss wird besonders deutlich, wenn der Sensor nicht senkrecht angeströmt wird, sondern leicht verdreht zur Strömungsrichtung eingebaut ist. Abbildung 75 zeigt schematisch den Versuchsaufbau mit Sicht auf den Sensor von der Kontaktierungsseite aus und die gemessene Temperaturdifferenz an den Thermopaaren über unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten. Der hohe Strömungseinfluss auf das Sensorelement übersteigt den Sensoreffekt deutlich. Hier helfen Schutzkappen, diesen Einfluss deutlich zu reduzieren.

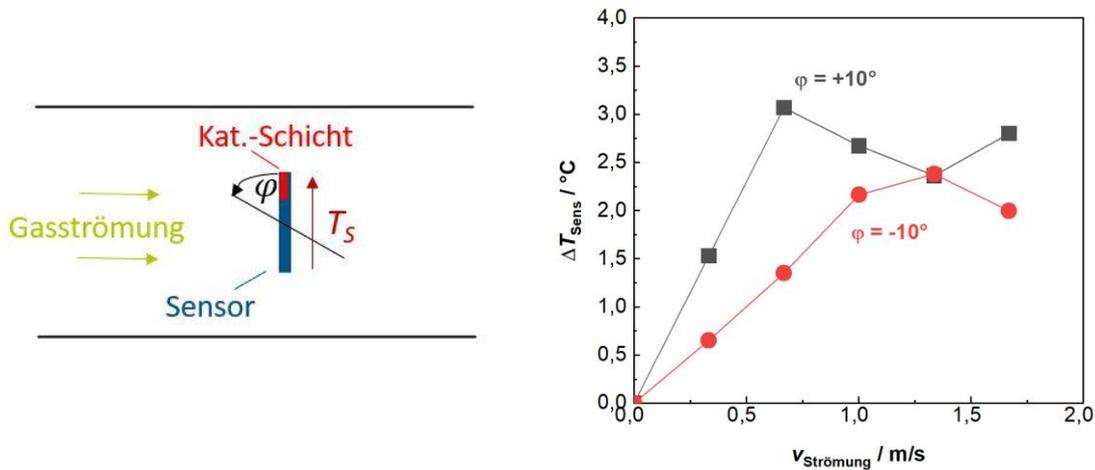


Abbildung 75: Darstellung des Strömungseinflusses durch leichte Verdrehung des Sensors; links: schematischer Versuchsaufbau, rechts: gemessener Temperaturunterschied infolge einer Sensorverdrehung

Sensorelektronik

Im Laufe des Projekts wurde deutlich, dass der Sensorelektronik ein hohes Maß an Aufwand gewidmet werden musste. Der Einsatz des Sensors, nicht nur bei Einzelraumfeuerungen, sondern auch an den kontinuierlichen Anlagen, machte eine unabhängige Messdatenaufnahme notwendig. Außerdem wurde klar, dass die bisher benutzten analogen Elektroniken zur Regelung auf konstante Sensorbetriebstemperatur besonders in der ersten Phase, d. h. zu Beginn der Feuerung, an ihre Grenzen stießen. Ziel der Entwicklung war daher eine digitale Heizerregelung, mit der gleichzeitig auch das Sensorsignal aufgenommen und verstärkt werden konnte (siehe Abbildung 76).



Abbildung 76: Digitale Elektronik zur Regelung auf konstante Sensorbetriebstemperatur sowie zur Aufnahme und Weiterverarbeitung des Sensorsignals und entsprechender Sekundärsignale (z.B. Typ K Thermoelement)

Erste Prototypen konnten erfolgreich im Projekt getestet werden. Die Sensorbetriebstemperatur wurde dabei konstant gehalten. Die gemessenen und kalibrierten Daten wurden auf einer SD-Karte gespeichert. Die Elektronik bietet nun auch weitere Möglichkeiten, interne Daten (wie z.B. Heizleistung) oder Sekundärdaten (z.B. Eingang für Gehäusetemperatur über Typ K Thermoelement) in Korrekturfunktionen zu verarbeiten und damit das Sensorsignal zu bereinigen. Die Bereitstellung des Sensorsignals als analoger Ausgabewert im Bereich 0 bis 10 V konnte (auch aufgrund von Lieferschwierigkeiten) von Elektronik-Bauteilen leider erst gegen Ende des Projekts realisiert werden und kam daher in den Feldmessungen noch nicht zum Einsatz.

Versuche in der realen Anwendung: Einzelraumfeuerung am ISIS, Karlsruhe

Für Versuche im realen Anwendungsfall an der Einzelraumfeuerung wurde ein Sensor in der Scheitholzanlage am ISIS in Karlsruhe eingebaut. Hierfür wurden die vorher beschriebenen verdrehsicheren Einbaustutzen und Klemm-Kontaktierungen verwendet. Auch der Sauerstoffgehalt im Abgas wurde mittels einer Lambda-Sonde protokolliert.

Für die Evaluierung der Funktionalität des Sensors wurden Analytik-Daten während der Abbrand-Versuche herangezogen. Das Sensorsignal entsteht durch die Summe an reduzierenden Gasen (CO, Kohlenwasserstoffe), die am Sensor exotherm reagieren. Für den direkten Vergleich mit der Gasanalytik wurde dementsprechend aus der Messung der Einzelgase mittels FTIR ein Summensignal gebildet. Diese Summenbildung berücksichtigt sensorspezifische Gewichtungsfaktoren, die aus den Steigungen der Kennlinien einzelner Gasspezies aus Labormessungen ermittelt wurden. Reagiert der Sensor im Labor also 7-mal so stark auf Propen als auf CO (siehe z.B. Abbildung 72), dann muss der Messwert für Propen bei der Summenbildung der Vergleichsdaten auch mit dem Faktor 7 berücksichtigt werden. Da CO die Hauptkomponente im Abgas darstellt, werden die Daten auf CO normiert (Gewichtungsfaktor von CO ist 1) und das Summen-Vergleichs-Signal als „CO-äquivalent“ (CO_e) bezeichnet. Da die am Sensor stattfindenden Reaktionen Oxidationsreaktionen sind, beeinflusst auch der Sauerstoffgehalt im Abgas die Empfindlichkeit des Sensorsignals. Hierzu konnten auch entsprechende Messungen im Labor gemacht werden, die zeigen, dass die Sensorempfindlichkeit bei geringerem ROC sinkt. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zu den Gewichtungsfaktoren z_i der Einzelgase auch eine Gewichtungsfaktor $wt(O_2)$ für Sauerstoff verwendet. Somit kann aus den gemessenen Konzentrationen der Emissionen c_i der FTIR-Gasanalytik und dem Sauerstoffgehalt ein Summensignal als CO-äquivalent $SUM(CO_e)$ berechnet werden (Gl. 3).

$$SUM(CO_e) = \sum_i wt(O_2) z_i c_i \quad \text{Gl. 3}$$

Ein beispielhaftes Summensignal über einen Abbrand an einer Einzelraumfeuerstätte ist in Abbildung 77 gezeigt. Es ist leicht der Haupteinfluss von CO und die leicht veränderte Summenkurve aufgrund der übrigen Komponenten wie CH_4 und anderer Kohlenwasserstoffe zu erkennen. Auch eine einfache Korrektur mittels des Sekundärsignals aus der Lambda-Sonde ist enthalten.

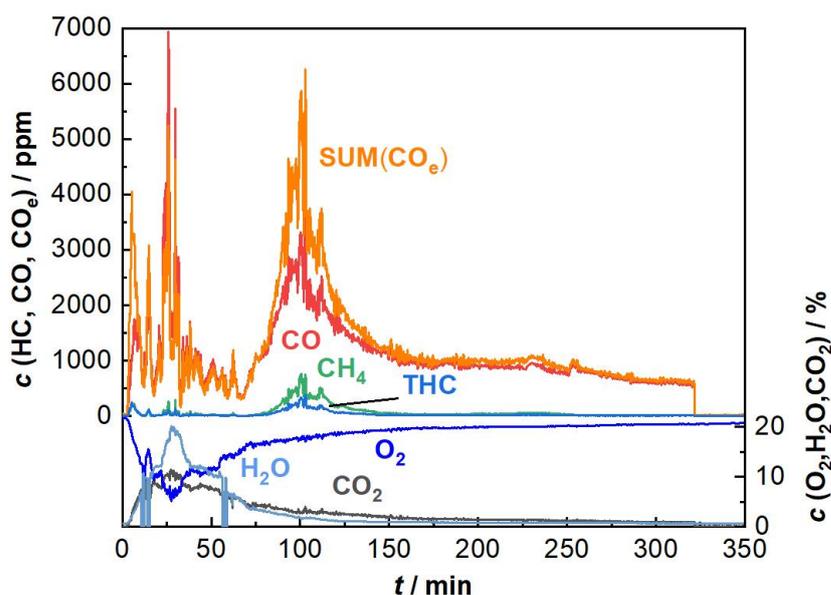


Abbildung 77: Gasdaten eines Feuerungsversuches in der Scheitholzanlage am ISIS und das daraus berechnete Summensignal $SUM(CO_e)$

In Abbildung 78 sind nun die zu Abbildung 77 gehörenden Messergebnisse des Sensors gezeigt. Das Sensorsignal weicht vor allem in den ersten 60 min deutlich vom Summensignal der Gasanalytik ab. Eine Begründung hierfür liefert die Betrachtung der Betriebstemperatur und der Heizleistung in diesem Zeitintervall. Die zunächst verwendete analoge Regelung hatte Schwierigkeiten, die Betriebstemperatur einzustellen. Außerdem änderte sich die Heizleistung während dieser Zeit stark, da die äußeren Bedingungen beim ersten Anfeuern des Ofens nicht konstant sind (Aufheizung der Feuerstätte). Der Sensor der Sensorgeneration 1 wies zusätzlich auch eine starke Kopplung von Sensorelement und Gehäuse auf.

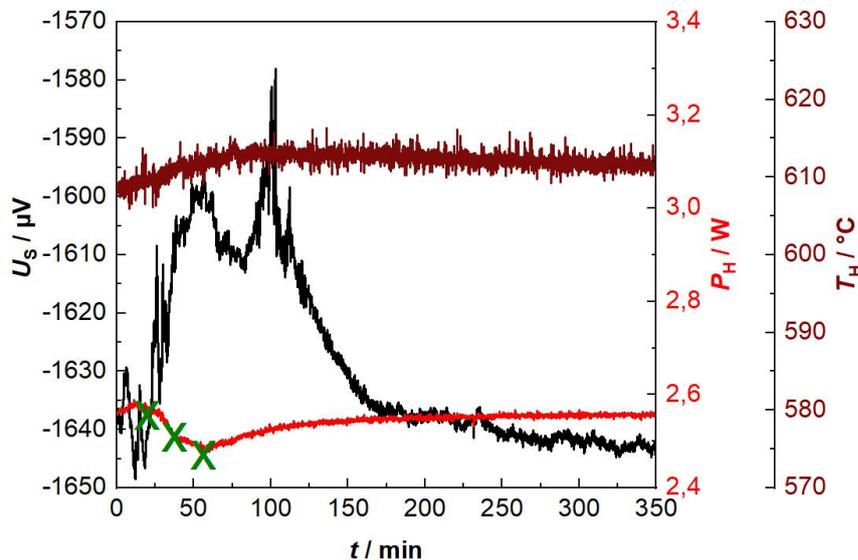


Abbildung 78: Rohsignal des thermoelektrischen Sensors (Generation 1) während eines Feuerungsversuches in der Scheitholzanlage am ISIS

Die Daten sind aber gut geeignet, eine erste (einfache) Korrektur des Sensorsignals über die aufgezeichnete Heizleistung zu verdeutlichen. Werden die drei Punkte unterschiedlicher Heizleistung (siehe Markierungen in Abbildung 78, Auswahl der Punkte so, dass möglichst ähnliche Gaskonzentrationen im Abgas vorherrschen) betrachtet und werden diese Werte mit dem Sensorsignal korreliert, so ergibt sich ein linearer Zusammenhang (Funktion der „Heizleistungskorrektur“). Wird nun diese Funktion auf das Messergebnis angewendet, so kann das Sensorsignal um den Störeinfluss der Heizleistung bzw. der umgebenden Temperatur bereinigt werden. Das Ergebnis dieser Anpassung ist in Abbildung 79 im direkten Vergleich mit dem Summensignal dargestellt und zeigte so schon eine gute Übereinstimmung.

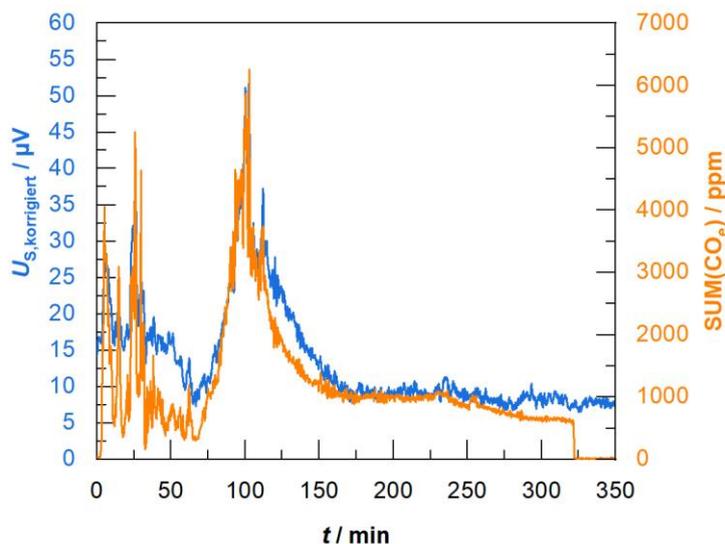


Abbildung 79: Übereinstimmung des korrigierten Messsignals (blau) mit Summensignal der FTIR-Gasanalytik (orange) eines Abbrandes in der Scheitholzanlage am ISIS (Sensorgeneration 1)

Die erhaltene Heizleistungskorrektur ist charakteristisch für dieses Sensorelement mit der an dieser Feuerungsanlage verwendeten Schutzkappe in dieser Einbaulage. Werden nun weitere Feuerungsversuche mit demselben Sensor und derselben Schutzkappe durchgeführt, stimmt der Verlauf des korrigierten Sensorsignals jeweils mit dem Summensignal überein. Die Heizleistungskorrektur ist somit unabhängig vom Abbrand-Verlauf und könnte zukünftig in der Elektronik für die automatische Korrektur hinterlegt werden. Laborversuche und Simulationen helfen, allgemeingültige Zusammenhänge zu entwickeln. Die Abbildung 80 zeigt weitere Messsignale von verschiedenen Abbränden, die mit derselben Korrekturfunktion bereinigt wurden. Es ergab sich jeweils eine sehr gute Übereinstimmung von Messsignal und Summensignal.

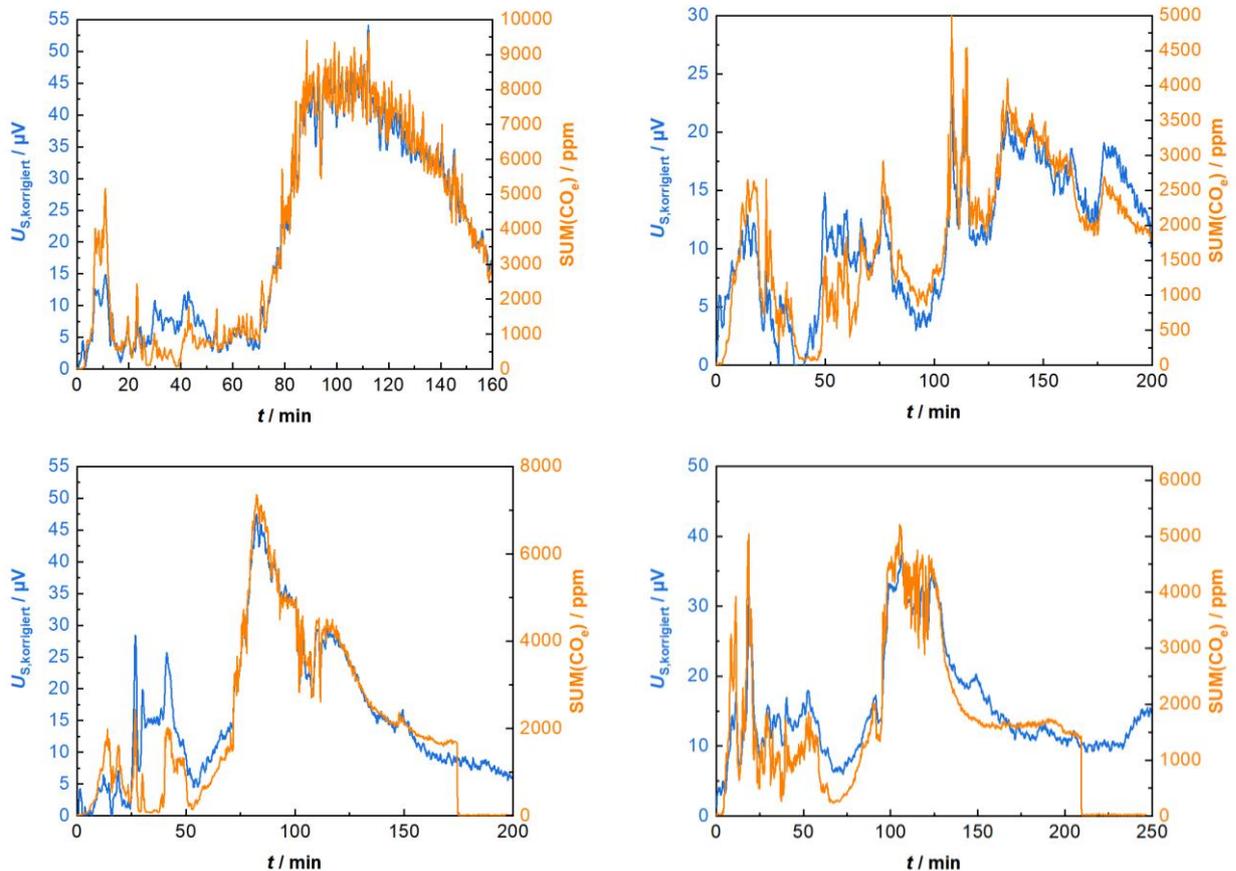


Abbildung 80: Übereinstimmung des korrigierten Messsignals (blau) mit Summensignal der FTIR-Gasanalytik (orange) für 4 weitere Abbrände in der Scheitholzanlage am ISIS (Sensorgeneration 1)

Auch mit der weiterentwickelten Sensorvariante (Gen 2) und unter Verwendung einer anderen Schutzkappe konnten diese Ergebnisse reproduziert werden (bei gleichzeitiger Erhöhung der Empfindlichkeit). Nach Berechnung des Summensignals aus den Gasanalytik-Daten und einer geeigneten Heizleistungskorrektur konnte auch hier wieder eine gute Übereinstimmung zwischen Sensorsignal und Summensignal für mehrere Abbrände erreicht werden. Einige dieser Abbrände sind in Abbildung 81 dargestellt.

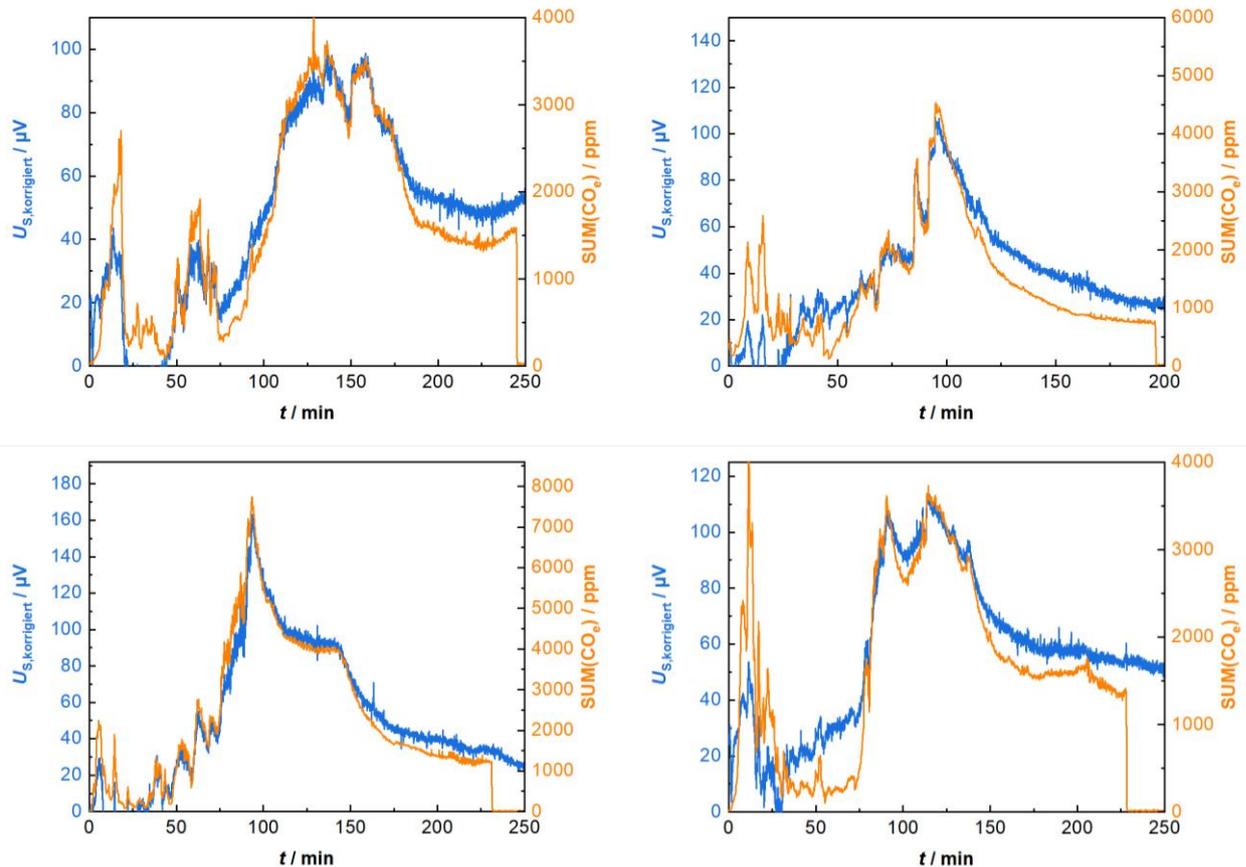


Abbildung 81: Übereinstimmung des korrigierten Messsignals (blau) mit Summsignal der FTIR-Gasanalytik (orange) für 4 Abbrände in der Scheitholzanlage am ISIS (Sensorgeneration 2)

Versuche in der realen Anwendung: Einzelraumfeuerung bei Brunner, Eggenfelden

Mit der Inbetriebnahme der für die Feldtests ausgerüsteten Scheitholz-Anlage in Eggenfelden wurden auch dort Sensoren aus Bayreuth installiert. Bei diesen Versuchen kamen Sensoren der Sensorgeneration 3 und Prototypen der beschriebenen digitalen Sensorelektronik zum Einsatz. Eine weitere Besonderheit lag bei der Korrektur der Sensorsignale. Der für die Bereinigung verwendete Zusammenhang zwischen Sensorsignal-Offset und Heizleistung wurde hier vor dem Einsatz der Sensoren im Labor ermittelt (vgl. Abbildung 82).

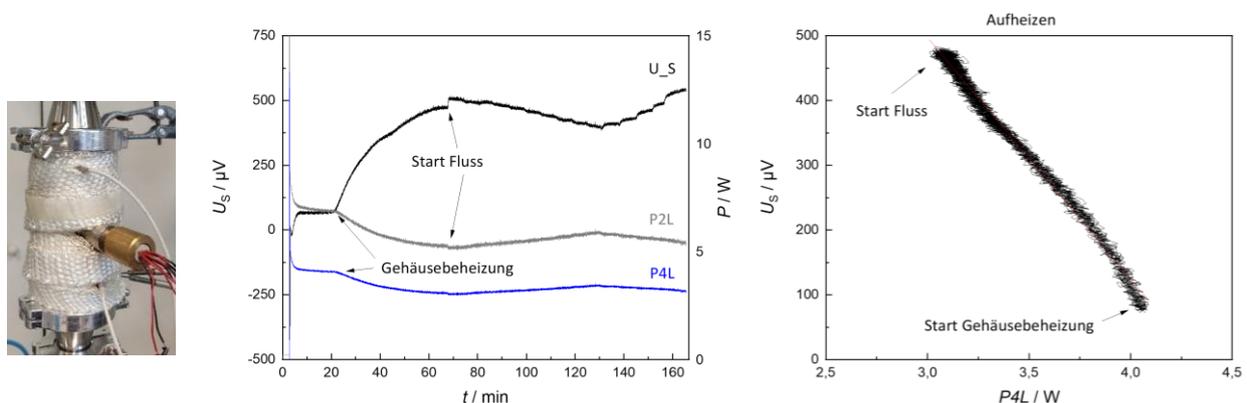


Abbildung 82: Versuchsablauf und Durchführung zur Ermittlung der Heizleistungskorrekturfunktion im Labor, beheizbare Messkammer mit Sensor (links), Sensorsignal als Funktion der äußeren Bedingungen und Heizleistung (mittig), Daten zur Ermittlung eines linearen Zusammenhangs (rechts)

Dafür wurde eine beheizbare Sensorkammer verwendet und das Sensorsignal (ohne Analyt-Dosierung) sowie die Heizleistung aufgezeichnet, während die Kammer definiert aufgeheizt wurde. Ebenso wurde der Einfluss einer Gasströmung (Druckluft) auf das Sensorsignal untersucht. Die Daten dienen der Berechnung einer Korrekturfunktion („Heizleistungskorrektur“) für den jeweiligen Sensor in der auch später verwendeten Schutzkappe und mit entsprechender Einbaulage.

Ein beispielhaftes Ergebnis eines Abbrandversuchs unter den beschriebenen Rahmenbedingungen zeigt Abbildung 83. Die Daten einer simultan laufenden FTIR-Messung wurden wie bereits erläutert in ein CO_e-Summensignal zum Vergleich umgerechnet.

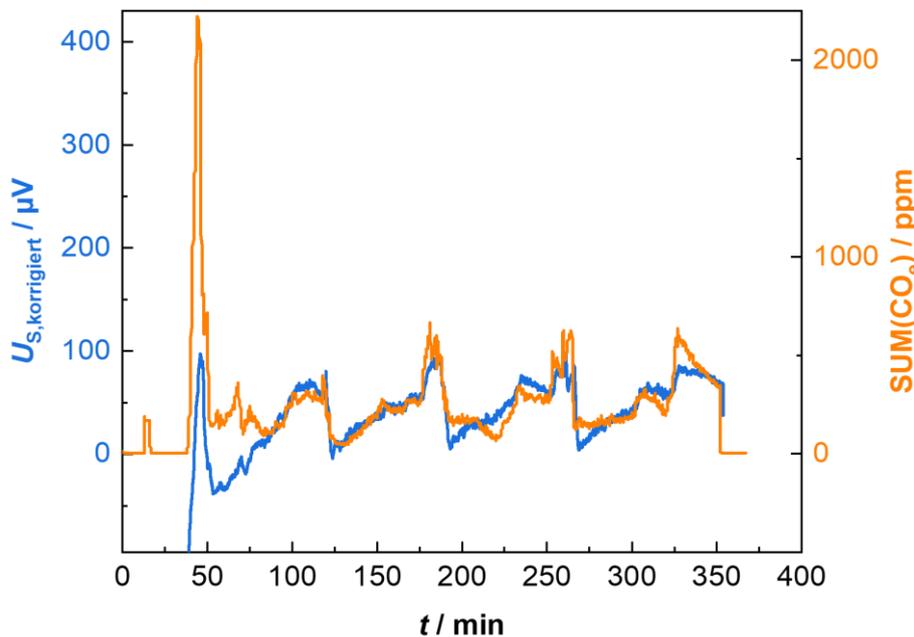


Abbildung 83: Übereinstimmung des korrigierten Messsignals (blau) mit Summensignal der FTIR-Gasanalytik (orange) für einen Abbrand in Eggenfelden (Sensorgeneration 3, entwickelte Sensorelektronik und allgemeine Korrekturfunktion aus Laboruntersuchungen)

Es ist auch hier die sehr gute Übereinstimmung der Sensor- und Gasdaten zu erkennen. Vor allem die beim Nachlegen von Holz entstehenden Spitzen in den Emissionen wurden von Sensor gut und schnell erkannt und auch in der richtigen Relation wiedergegeben. Der Sensor ist also geeignet, in einer für das Projekt bestimmungsgemäßen Weise eingesetzt zu werden.

Einzig beim Anfeuern ergeben sich Abweichungen. Diese treten wiederum während der starken Temperaturänderungen beim Aufheizen des Sensors und in der Abgasanlage auf. Unter Umständen spielen hier weitere individuelle Einflüsse bzgl. der Einbausituation in Eggenfelden eine Rolle, die im Labor so nicht abzubilden waren.

Versuche in der realen Anwendung: Hackschnitzelanlage

Zusätzlich zu den in den Arbeitspaketen geplanten Messungen in Einzelraumfeuerungen wurden die Sensoren in automatisch beschickten Heizkesseln bei A.P. Bioenergietechnik GmbH in Hirschau und am DBFZ in Leipzig eingesetzt. Auch hier wurde die vorher beschriebene Einbaulage mit verdrehsicherem Einbaustutzen und Klemm-Kontaktierung verwendet.

Allerdings zeigte sich in der Anlage in Hirschau, dass die Strömungsabhängigkeit des Sensors nicht vollständig vermieden werden konnte. Die fehlenden Analytik-Daten ließen keinen Datenabgleich und damit keine eindeutige Zuordnung der Sensorsignale zu Emissionen zu. Im Rahmen einer Feldmessung wurde zwar versucht, den Sensor in einem Bypass zu betreiben, indem Abgas aus dem Hauptabgasstrom in eine beheizte Messkammer abgezweigt und nach Vorbeiströmen am Sensor wieder zurückgeführt wurde. Leider führten auch diese Versuche nicht zum erhofften Erfolg. Eventuell sind hierfür die besonderen Bedingungen der Abgasführung und der nachgeschalteten Elektroabscheider verantwortlich. Für die Anwendung in kontinuierlich betriebenen Biomasse-Anlagen scheint weiterer Aufwand nötig zu sein, um unter Feldbedingungen eine geeignete und evtl. individuell auf die Anlage zugeschnittene Einbauposition für das Sensorelement zu finden. Als positive Erkenntnis konnte aber der problemlose Dauerbetrieb des Sensors in Hirschau über mehrere Monate erreicht werden.

Ein weiterer Sensor wurde in die Abgasanlage eines Heizkessels beim DBFZ in Leipzig installiert. Da hier gleichzeitig zu den Abbränden eine Gasanalytik verwendet werden konnte, war es hier möglich, ein Summensignal als Vergleichsmessung zu berechnen. Wie bei allen bisherigen Feuerungsmessungen wurde

auch hier eine Heizleistungskorrektur für den verwendeten Sensor der Generation 2 bestimmt und im Signal verrechnet. Die Abbildung 84 zeigt die Ergebnisse von vier Messabläufen. Auch hier wurde wieder für alle Abbrände in diesem Messaufbau mit demselben Sensor und derselben Schutzkappe eine einzige gültige Korrekturfunktion angewandt.

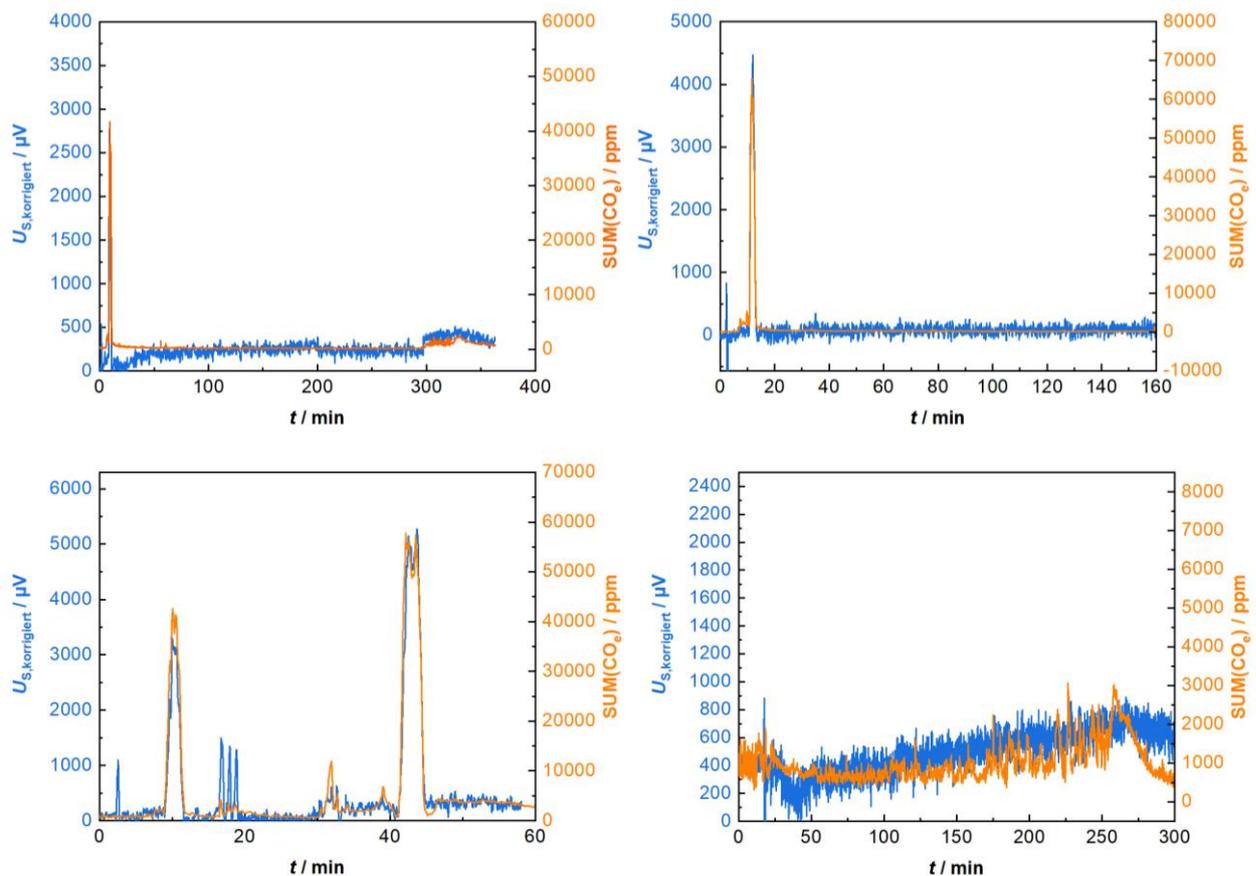


Abbildung 84: Übereinstimmung des korrigierten Messsignals (blau) mit Summensignal der Gasanalytik (orange) für 4 Abbrände im Heizkessel am DBFZ (Sensorgeneration 2)

Wie bei den Abbränden in den Einzelraumfeuerungen ist auch hier zu sehen, dass das Sensorsignal des Bayreuther Sensors den Emissionsverlauf gut nachbilden kann.

Datenanalyse

Die gewonnenen Gasdaten bei den Einzelraumfeuerungen sollten nicht nur als Vergleich für das jeweilige Sensorsignal dienen, sondern auch hinsichtlich der entstehenden Einzelbestandteile des Abgases in Abhängigkeit der verschiedenen Phasen der Verbrennung und unter Berücksichtigung von Korrelationen mit weiteren Betriebsbedingungen (Temperaturen, Volumenströme, Abgasfeuchte und Restsauerstoff) ausgewertet werden. Hintergedanke bei diesem Arbeitspaket war es, wiederkehrende Muster zu finden, die als Basis für die Entwicklung einer Betriebsstrategie des Sensors dienen könnten. Würde sich beispielsweise die Zusammensetzung des Abgases je nach Verbrennungsphase bzw. Temperatur o.Ä. ändern und diese Erkenntnisse wiederkehrend bei allen Abbränden auftreten, so könnte die Interpretation des Sensor-Summensignals je nach Verbrennungsphase zur Optimierung des Sensorsystems anders gestalten werden.

Für die Analyse wurden die Daten der FTIR-Gasanalytik im Scheitholzofen am ISIS verwendet, zunächst ohne eingebauten Katalysator. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass keine Gasspezies nur in bestimmten Abbrandphasen vorgefunden werden kann. Wie erwartet, entsteht viel CO und Kohlenwasserstoffe, wenn die Abgastemperatur ca. 600 °C unterschreitet. Hierbei verhalten sich die brennbaren Gase linear zueinander. Somit entstehen viele Emissionen besonders in der Zündungs- und der Ausbrandphase. Dabei fällt auf, dass die Emissionen in der Ausbrandphase am höchsten sind. Stickoxide und Ammoniak dagegen entstehen bei sehr hohen Temperaturen. Bei Verwendung eines Katalysators wurde das Bild unübersichtlicher. Zusammenhänge zwischen den entstehenden Abgasbestandteilen und der Abgastemperatur oder unter den Gasspezies waren nicht mehr erkennbar.

Aufzählung der Arbeitspakete der Universität Bayreuth

- APB1 Aufbau von Sensorelementen nach Vorversuchen
Herstellung von Sensorelementen (d.h. keramisches Al₂O₃-Substrat mit Funktionsstruktur nach thermoelektrischem Prinzip, Paarung Pt-Pt-Rh) zur Reproduktion der Vorversuche. Wiederherstellen des Standes aus den Vorversuchen, Bereitstellen von Sensormustern für Abbrandversuche, d.h. Kontaktierung der keramischen Sensorelemente und Integration in ein Gehäuse.
- APB2 Simulation Sensormuster
Betrachtung der Kopplung zwischen Sensorelement und Gehäuse nach Erfahrungen aus Vorversuchen (Wärmeleitung im Betrieb und Einfluss auf das Sensorsignal), Weiterentwicklung der vorhandenen Simulation (bezüglich des reinen Sensorelements) auf diesen Anwendungsfall. Ableitung von Maßnahmen (konstruktiv zur thermischen Entkopplung der Sensorspitze vom Gehäuse, Sensorlayout, Re-Interpretation des Signals aufgrund von Sekundärdaten wie z.B. Heizleistung)
- APB3 Variationen im Sensoraufbau zur Steigerung der Empfindlichkeit
Aus bisherigen Erfahrungen zielführend: Aufbau des Sensorsubstrats (Integration einer schlecht wärmeleitfähigen LTCC-Lage zwischen Substrat und Messstruktur, die den Wärmefluss zwischen dem inerten und dem katalytisch beschichteten Bereich verhindert), Variation des Thermopaar-Materials (Thermoelement-Paarung Pt-Au mit höherem Seebeck-Effekt; u.U. mit Nachteil bzgl. der Temperatur- und Langzeitstabilität, was aber im vorliegenden Anwendungsfall bei konstanten Betriebsbedingungen unkritisch sein könnte).
Ziele der APB1 bis APB3: Mechanische und alterungsstabile Sensorkonfiguration mit Auflösung < 100 ppm zum Einsatz in realen Abbränden (APB4). Charakterisierung der Sensorfunktionalität / Güte mit Aufnahme einer Laborkennlinie bzgl. Beispielgas (z.B. CO oder CO/HC-Mischung, bisher C₃H₆)
- APB4 Messungen im realen Anwendungsfall (am ISIS, siehe API5)
Messungen mit verschiedenen Sensorkonfigurationen (aus APB2) und unter Variation der Sensorbetriebstemperatur, Rückvermessung der Kennlinie im Labor. Evtl. auch Variation der Einbauposition. Daten (FTIR, T, ROC, Sensorantwort, Sensorbetriebsdaten) relevant für: Zusammenhang zw. Sensorsignal und Realgas, Zusammenhang mit versch. Abbrandphasen, Langzeitstabilität, Empfindlichkeit, Querempfindlichkeit versch. Sensorkonfigurationen
- APB5 Anpassungen Sensorelement / Sensoraufbau / Sensormuster
Je nach Erfahrungen bei realen Messungen können Anpassungen notwendig werden, was die Gehäuseintegration / Schutzkappe, Kamintemperatur, Einbauposition, etc. betrifft. (z.B. Vorrichtung für "Verdreh-sicheres Einbauen")
Ziele der APB4 bis APB5: Verständnis der Einflüsse auf das Sensorsignal durch periphere Einflüsse und Ableitung von Maßnahmen bzw. Definition von Forderungen für spätere reproduzierbare (Serien) Produktion. Festlegung einer für diesen Anwendungsfall idealen Sensorkonfiguration zur weiteren Untersuchung (hinsichtlich Langzeitstabilität und Entwicklung einer Betriebsstrategie im Gesamtsystem).
- APB6 Detaillierte Datenanalyse der Abbrandversuche
Identifikation der "Hauptkomponenten" bei der Verbrennung, Auffinden wiederkehrender Muster und Zusammenhänge, Identifikation von Wechselwirkungen verschiedener Gase auf das Sensorsignal, Identifikation von Zusammenhängen zwischen Sensorsignal und Sekundärdaten (T, ROC), Identifikation des Ansprechverhaltens auf bestimmte Gasspezies und Gasmischungen unter Berücksichtigung der sekundären Daten. Untersuchung der Charakteristika bzgl. drei separater Abbrand-Phasen.
- APB7 Labormessungen
Messungen in Synthesegas, Sensorsignal für einzelne Gasspezies (auch „Sondergase“, die signifikanten Einfluss in realen Messungen gezeigt haben) und Gasmischungen, definierte Sensor-Alterung (nach Erfahrungen aus APB4 und APB6), Variation der Sensorbetriebstemperatur und evtl. der Katalysator-Schicht (im Hinblick auf mögliche Identifizierbarkeit versch. Gasspezies (Selektivität)). Bei den Labormessungen sollen auch kalorimetrische Sensoren des ISIS gleichzeitig mitvermessen werden (Synergie).
- APB8 Simulation des Sensorverhaltens
Erweiterung des bestehenden Modells (hinsichtlich der chemischen Vorgänge an der Sensorschicht) des thermoelektrischen Sensors auf Sondergase / Gasmischungen, wie sie in diesem Anwendungsfall auftreten können. Verifizierung mit Daten aus Labormessungen (APB7), Anwendung der Ergebnisse auf Daten aus realen Messungen (APB4 und APB6). Variation der Sensorbetriebstemperatur und Evaluierung einer (evtl. je Abbrandphase spezifischen) idealen Sensorbetriebstemperatur.
Ziele der APB6 bis APB8: Vertieftes Verständnis des Sensorverhaltens zur Einbindung des Signals in den Regelalgorithmus bzw. für die Entwicklung einer Betriebsstrategie. Aufzeigen eines

- zusätzlichen (über das Projektziel hinausgehenden) Potenzials zur sensorischen Unterscheidung von Gasspezies (Selektivität).
- APB9 Entwicklung Betriebsstrategie für den thermoelektrischen Sensor (inkl. Messungen innerhalb I12 / I14)
Messungen im realen Anwendungsfall (am ISIS – API12 / bei Brunner – API14), Datenauswertung, evtl. Anpassungen in der Simulation, evtl. Anpassungen bei der Elektronik (Hardware), z.B. Wechsel der Betriebstemperatur je nach Abbrandphase, Korrelation des Sensorsignals mit Sekundärsignal Temperatur oder Lambda, enge Abstimmung mit ISIS
- APB10 Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation

2. Verwertung

Der hinsichtlich der Einzelraumfeuerung erreichte finale Projektstand erbrachte drei Ergebnisse:

- (1) Die Weiterentwicklung eines kalorimetrischen Gassensor-Chips basierend auf der Messung einer Brückenspannung konnte auf einen fortgeschrittenen Stand gebracht werden, der Tests im Abgas einer Holzfeuerung ermöglichte. Das Monitoring der CO/HC-Emissionen über einen Scheitholz-Abbrand erbrachte vielversprechende Ergebnisse, jedoch mangelt es noch an der notwendigen Langzeitstabilität. Der dafür notwendige Aufwand zur weiteren Qualifizierung war im Rahmen des UVV-Projektes nicht abdeckbar. Die Weiterentwicklung dieses sehr aussichtsreichen CO/HC-Sensorprinzips in einem Folgeprojekt wird angestrebt.
- (2) Nach Verwertung von Erkenntnissen aus mehreren Vorprojekten der letzten 20 Jahre und einer vorangegangenen Dissertation /Zhg18/ konnte in UVV erstmals gezeigt werden, dass Mischpotenzialsensoren des Typs Au,Pt/YSZ/Pt, sogenannte CarboSen- bzw. LH-Sensoren (beide LAMTEC), bei geeigneter Betriebsweise keinen signifikanten Signaldrift über eine Einsatzzeit von 472 Stunden im Abgas von Holzfeuerungen zeigen. Geringfügige Sensitivitätsänderungen bzw. Verluste im Ansprechverhalten bei Änderung der Gaszusammensetzung können bei Anwendung eines am ISIS entwickelten elektrochemischen Verfahrens zur Sensitivitätsbestimmung und -regenerierung vollständig kompensiert werden. Dies bedeutet, dass mit dem Abschluss von UVV erstmals ein langzeitstabiler, hochtemperaturstabiler Sensor zur kontinuierlichen in-situ Analyse der gasförmigen Abgasemissionen zur Verfügung steht. Damit sind erstmals die sensorischen Voraussetzungen für den Aufbau einer langzeitstabilen, sensorbasierten Verbrennungsluftregelung erfüllt.
- (3) In dem Labor des ISIS wurde an einer HKD7-Feuerstätte (Brunner GmbH) unter Einsatz eines Temperatursensors (Thermoelement) zur Bestimmung der Verbrennungstemperatur, eines Sensors zur Messung der Restsauerstoffkonzentration (LSU 4.9, Bosch GmbH) und des unter (2) benannten Sensors zur Bestimmung des CO/HC-Gehaltes im Abgas (LH-Sensor, LAMTEC) eine neuartige Verbrennungsluftregelung entwickelt, die zu jedem Zeitpunkt eines Chargenabbrandes die Verbrennungsluftströme (Luftmassenströmungssensor HFM7, Bosch GmbH; Blendensystem Brunner GmbH) automatisch einstellt. Dabei ist das Ziel erreicht worden, die Verbrennungsqualität zu optimieren, d.h. die Emissionen zu minimieren. Dieses neuartige Verbrennungsluft-Regelungssystem wurde im Feldtest über mehrere Monate an einer Naturzug-Scheitholzfeuerung getestet. Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass durch Kombination von verbrennungsluftgeregelter Feuerstätte und Katalysator eine Absenkung der gasförmigen Emissionen um mehr als 85 % im Vergleich zum manuellen Betrieb ohne Katalysator realisierbar ist. Die Emissionssenkung wird vermutlich im Vergleich zu Feuerungen in der Praxis (ungeschulter Betreiber*innen ohne Abgasmessungen) noch deutlich höher liegen.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass im UVV-Projekt zur Einzelraumfeuerung erstmals die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für einen Technologiesprung zur Minimierung der Emissionen von mit Scheitholz befeuerten Kleinf Feuerungsanlagen geschaffen wurden. Eine Minderung der Emissionen (gasförmige Schadstoffe und Gesamtstaub) im Alltagsbetrieb um ca. 90 % ist realistisch, wenn die sensorbasierte Verbrennungsluftregelung mit einem brennraumintegrierten Katalysator und einem Elektroabscheider ausgerüstet wird.

Der Gesetzgeber muss daran anknüpfen und die notwendigen Randbedingungen schaffen, damit sich dieses neue emissionsarme Scheitholz-Verbrennungssystem trotz der damit verbundenen zusätzlichen Kosten mit der notwendigen Durchdringung zum Schutz von Mensch und Umwelt (Klima) auf dem Markt durchsetzen und etablieren kann. Das damit verbundene wirtschaftliche Potenzial wird bei Substitution von 10 000 Verbrennungsanlagen/a auf 60 Mio. €/a geschätzt, wenn ein Verkaufspreis von 6000 Euro vorausgesetzt wird.

Durch das Projekt konnten wesentliche Erfahrungen auf dem Gebiet der energetischen Nutzung von Biomasse gesammelt werden. Die Hintergrundinformationen und Kontakte konnten bereits für die Beantragung weiterer Forschungsprojekte und Kooperationen genutzt werden.

Die Arbeiten am Sensorelement führten zu einem wesentlichen Erkenntnisgewinn. Das Sensorprinzip konnte erfolgreich reproduziert und in wesentlichen Eigenschaften weiterentwickelt werden. Das entwickelte Gehäusekonzept hat sich als technologisch sehr tauglich erwiesen. Mit der entwickelten Regenerations-Elektronik ist ebenfalls ein großer Erkenntnis- und Entwicklungsfortschritt verbunden, der auf weitere Themen übertragen werden kann.

Bezüglich eines Einsatzes des Sensors werden die Aussichten als sehr positiv bewertet. Denn Biomasse ist nach wie vor eine sehr wichtige erneuerbare Energiequelle. Wird Biomasse effizient und sauber umgewandelt, leistet dies einen wesentlichen Beitrag, den Klimawandel aufzuhalten. Sowohl das Sensorelement als auch die Elektronik konnten als tauglich klassifiziert werden. Beides kann in einem überschaubaren Kostenrahmen in eine Anwendung überführt werden.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten hängen jedoch nach aktueller Einschätzung stark von den politischen Rahmenbedingungen ab, denn ohne gesellschaftspolitische Unterstützung der Biomasseverbrennung und insbesondere ohne eine verpflichtende Vorschrift zur sensorischen Überwachung und Optimierung von Biomassefeuerungen kleiner Leistung werden sich CO/HC-Sensoren nicht am Haushalts-Markt etablieren. Auch wird der Sensor-Preis ohne diese Etablierung bzw. Durchdringung am Markt, d.h. bei Stückzahlen kleiner 10 000 Stück/a, weiterhin zu hoch sein für eine wirtschaftlich getriebene sinnvolle Verwertung.

LAMTEC führt Gespräche mit Firmen aus dem Projekt fort. Darüber hinaus erfolgen Beratungen mit zwei namenhaften österreichischen Biomassefeuerungsherstellern. Nach erfolgreicher Adaption und Modifikation der Sensortechnologie sind LAMTEC-Sensoren derzeit in zumindest einem neuen Produkt vorgesehen, und das in allmählich steigenden Stückzahlen von etwa 1000 in 2026 auf etwa 10 000 in 2030. Ob es sich dabei um den hier im Projekt weiter entwickelten CO_e-Sensor im neuen Gehäuse oder doch eher um eine kombinierte CO_e/O₂-Sonde (wie z.B. die bewährte KS1D) handelt, steht zu diesem Zeitpunkt noch nicht fest. Das Ziel der im Projekt gewonnenen Ergebnisse ist die Markteinführung des Systems sowie die Veröffentlichung und Vorstellung des Systems in Vorträgen auf Fachkongressen und Messeauftritten.

Mit der sensorbasierten Verbrennungsregelung kann die ÖKOTHERM®-Heizanlage und der Abscheider in nahezu allen Betriebszuständen effizienter und ressourcensparender betrieben werden, was zu einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit für den Betreiber führt und dadurch zu einem Marktanreiz für Biomasseheizanlagen.

Mit der Regelung können die Systeme Kessel und Abscheider kundenspezifisch aufeinander angepasst werden, wodurch eine optimale Verbrennung und Emissionsminderung erreicht werden. Ein Marktbedarf ergibt sich sowohl für Neuanlagen als auch für den gesamten Bereich der Bestandsanlagen.

Die Firma A.P. Bioenergietechnik GmbH erlangt aus den Projektergebnissen einen weiteren Innovationsvorsprung über eine zukunftsfähige Technologie im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe und deren Einsatz als Brennstoff.

Der im Vorhaben entwickelte Staubabscheider und die neue Steuerung werden in einem neu errichteten Heizraum mit Kessel-Prüfstand am Firmenstandort installiert. Dort können verschiedene biogene Brennstoffe in Verbindung mit dem Abscheider getestet werden. Der Prüfstand steht für zukünftige Forschungsvorhaben zur Verfügung und dient auch dazu, interessierten Personen oder Institutionen Verbrennungsversuche als Dienstleistung zu ermöglichen.

Das Ziel ist die Erweiterung und Auslegung des Abscheiders für alle Arten von nicht-holzartigen biogenen Brennstoffen. Mit der Steuerung ist es zusätzlich möglich, neue am Markt verfügbare Sensoren zu testen und bei Bedarf in die Steuerung und Regelung des Heizkessels einzubinden.

Im Rahmen von steigenden Energiepreisen und abnehmender Versorgungssicherheit bei fossilen Energieträgern ergeben sich neue und bisher weitestgehend ungenutzte Marktpotenziale für regenerative biogene Wärmeenergieträger, wie z.B. Stroh oder Laub. Von Seiten der Politik könnten durch Vereinfachung der genehmigungsrechtlichen Vorgaben und den Abbau von Restriktionen bei der Nutzung von biogenen Reststoffen als Brennstoff diese Potenziale freigesetzt werden.

Damit hebt sich die A.P. Bioenergietechnik GmbH nicht nur bei den einzusetzenden Brennstoffen von Mitbewerbern ab, sondern kann gleichzeitig auch die passende und dauerverfügbare Abscheidetechnik anbieten.

3. Erkenntnisse von Dritten

Es sind keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

4. Veröffentlichungen

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

- Hartmann, I.; Lenz, V.: „Die Zukunft der Biomassefeuerungen - Handlungsbedarf für eine emissionsfreie Technik unter Praxisbedingungen“, Vortrag auf der Fachgruppentagung EFA e.V., 15. Mai 2019, Leipzig
- Hartmann, I.; Müller, M.; Lenz, V.: „Keynote Holzfeuerungsagenda 2030-2050“, Vortrag auf dem Zweiten Zukunftsworkshop EFA, 15. Januar 2020, Leipzig
- Hartmann, I.: „Emissionsmessung an häuslichen Biomassefeuerungen“, Vortrag auf dem Online-Workshop: „Einfluss von Kondensaten auf die Partikelkonzentration - FKZ 3718 51 2410“, 07. Dezember 2020
- Hartmann, I.: „Messung und Minderung von Partikelemissionen“, Vortrag auf dem Online-Workshop: „HKI Technikveranstaltung, Bereich Heiz- und Kochgeräte“, 10. Dezember 2020
- Hartmann, I.: „Wegweisende Handlungsmöglichkeiten zur Feinstaubreduzierung an häuslichen Kleinfeuerungen“, Vortrag auf dem Online-Workshop: „co2online: Stilllegung oder Optimierung? Die Kontroversen und Chancen in der Debatte um die Feinstaubbelastung durch Kaminfeuerung“, 28. April 2021
- Hartmann, I.: „Gedanken zur Zukunft der häuslichen Holzfeuerungen“, Vortrag auf dem Hybrid-Workshop: „Future Lab Holzheizung X Zukunftsworkshop X EFA: INNOVATION WANTED!“, Leipzig, 29. Juni 2021
- Hartmann, I.: „Wood Combustion Agenda 2030 – Development Pathways for a Low Emission Future“, Keynote-Vortrag auf Wood Heater Design Challenge - Workshop 1: Advances in wood heater design and technology, Brookhaven National Laboratory, 11. Januar 2022 (online)

ISIS der Hochschule Karlsruhe

Xin Zhang, Christoph Schwab, Binayak Ojha, Heinz Kohler; Mixed Potential Gas Sensor with Au,Pt-YSZ Electrode for Optimization of Wood Combustion Processes: Validation of a Signal Stabilization Concept by Repeated Electrochemical Treatments, Konferenzband. 18th International Meeting on Chemical Sensors, Virtual Meeting, USA, May 30th – June 3rd 2021

Xin Zhang, Christoph Schwab, Binayak Ojha, Heinz Kohler; High Temperature Electrochemical CO/HC Sensor for Wood Firing Process: Signal Stabilization by Dynamic Electrochemical Methods, Konferenzband 21. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, 10.-11. Mai 2022, Nürnberg

Xin Zhang, Binayak Ojha, Hermann Bichlmaier, Heinz Kohler; Substantial emission reduction of small scale wood-log fueled fireplaces by sensor based combustion air stream control and catalytical post-combustion under real-life operating conditions, Int. Veröffentlichung in Bearbeitung

Universität Bayreuth

Die Erkenntnisse aus dem Projekt sollen in zwei Veröffentlichungen in Peer-Reviewed-Journals dargestellt werden (in Arbeit).

Des Weiteren konnten bereits Teilergebnisse auf Konferenzen vorgestellt werden:

- T. Wöhr, J. Herrmann, G. Hagen, J. Kita, R. Moos:
Temperaturverteilung beheizter keramischer Sensorelemente innerhalb eines Gehäuses – Experimentelle Untersuchungen
15. Dresdner Sensor-Symposium, 6.-8. Dezember 2021, Dresden (virtuell), p. 321-322, doi: 10.5162/15dss2021/P10.1
- J. Herrmann, T. Wöhr, R. Werner, G. Hagen, J. Kita, R. Moos:
Experimental Verification of the Temperature Homogeneity of Heated Gas Sensor Transducers Inside a Protection Cap
The 18th International Meeting on Chemical Sensors, IMCS2021, online conference, May 30 - June 6, 2021, oral presentation, IMCS 05-1580
See also: ECS Meeting Abstracts, MA2021-01, 1580 (2021), doi: 10.1149/MA2021-01581580mtgabs
- J. Herrmann, T. Kern, G. Hagen, R. Moos:
Influence of the Gas Velocity on the Temperature Homogeneity of Transducers for Gas Sensors SMSI Sensor and Measurement Science International, Virtual Conference, 03-06 May 2021, Nuremberg, Germany, doi: 10.5162/SMSI2021/B7.2

Im Rahmen der Arbeiten zum Projekt sind auch studentische Arbeiten entstanden (Masterarbeit und Teamprojektarbeit).

Einige Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Projekt sollen in die Dissertation der Mitarbeiterin im Projekt (Julia Herrmann) einfließen.

A.P. Bioenergietechnik GmbH

Vorstellung der Zwischenergebnisse beim 12. Fachgespräch "Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen" am 04.02.2021.

LAMTEC Meß und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG

Auf folgenden Veranstaltungen wurde der Sensor für Biomassefeuerungen vorgestellt:

- LAMTEC Sales Meeting 24. und 25.10.2019
- LAMTEC Online Sales Meeting 15.06.2021
- Zhang, Xin et al. (2022): High Temperature Electrochemical CO/HC Sensor for Wood Combustion Process: Signal Stabilization by Dynamic Electrochemical Methods, Folienvortrag, 21. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 10 - 11. May, 2022, Nürnberg

Literatur

/But09/ Butschbach, P.; Hammer, F.; Kohler, H.; Potreck, A.; Trautmann, T.: Extensive reduction of toxic gas emissions of firewoodfueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of the exhaust gas, *Sensors and Actuators B-Chem.*, 137, 32–41, 2009.

/Bin12/ Bindig, R.; Butt, S.; Hartmann, I.; Dvoracek, D.; Einicke, W.-D.; Enke, D.; Specht, B.; Werner, F. (2016). Entwicklung, Untersuchung und Einsatz neuartiger katalytisch wirksamer Baugruppen zur Darstellung eines besonders emissionsarmen Kaminofens: nach dem Abschlussbericht (DBU-AZ 28412). (DBFZ-Report, 27). Leipzig: DBFZ. VII, 83 S. ISBN: 978-3-946629-05-4.

/Hag17-01/ Hagen, G.; Kohler, H.: Thermoelektrische Sensoren zur Detektion reduzierender Gase: Potenzial der Anwendung in Kleinf Feuerungsanlagen. Veranstaltung: Workshop Sensorik trifft Feuerungstechnik 2017: Neue Sensorik- und Regelungskonzepte für Holzfeuerungsanlagen – Aktuelle Ergebnisse und weiterer Forschungsbedarf, 20.10.2017, Karlsruhe, Deutschland. (Veranstaltungsbeitrag: Workshop , Vortrag).

/Hag17-02/ Hagen, G.; Ojha, B.; Wohlrab, J.; Kohler, H.; Moos, R.: Anwendung eines thermoelektrischen Gassensors zur Erfassung reduzierender Komponenten in Verbrennungsabgasen von Kleinf Feuerungsanlagen (2017) Veranstaltung: 13. Dresdner Sensor-Symposium 2017, 04.-06.12.2017, Dresden, Deutschland, DOI: 10.5162/13dss2017/3.5.

/Ojh17-01/ Ojha, B.; Illyaskutty, N.; Knoblauch, J.; Balachandran, M. R.; Kohler, H.: High-temperature CO/HC gas sensors to optimize firewood combustion in low-power fireplaces, *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 237–246, 2017.

/Ojh17-02/ Ojha, B.; Hagen, G.; Kohler, H.; Moos, R.: Exhaust Gas Analysis of Firewood Combustion Processes: Application of a Robust Thermoelectric Gas Sensor. *Proceedings 1 (2017) Heft 4 . - S. 457*, DOI: 10.3390/proceedings1040457.

/Hag17-03/ Hagen, G.; Kohler, H.: Application of a robust thermoelectric gas sensor in firewood combustion exhausts, Full article in preparation.

/Rit17/ Ritter, T.; Wiegärtner, S.; Hagen, G.; Moos, R.: Simulation of a thermoelectric gas sensor that determines hydrocarbon concentrations in exhausts and the light-off temperature of catalyst materials. *Journal of Sensors and Sensor Systems* 6 (2017) S. 395-405, DOI: 10.5194/jsss-6395-2017.

/Kit17/ Kita, J.; Hagen, G.; Schmitt, C.; Moos, R.: Sensitivity Improvement of Thermoelectric Hydrocarbon Sensors: Combination of Glass-Ceramic Tapes and Alumina Substrates. *Proceedings 1 (2017) Heft 4 . - S. 403*, DOI: 10.3390/proceedings1040403.

/Hag17/ Hagen, G.; Leupold, N.; Wiegärtner, S.; Moos, R.: Sensor Tool for Fast Catalyst Material Characterization. *Topics in Catalysis* 60 (2017) Heft 3 . - S. 312-317, DOI: 10.1007/s11244-0160617-8.

/Koh16/ Kohler, H.; Knoblauch, J.; Brunner, S.: Verbrennungsluftregelung unter Einsatz eines Sensorarrays für un- bzw. Teilverbrannte Gaskomponenten unter Berücksichtigung der typischen

- Abgaszusammensetzung in den spezifischen Abbrandphasen, EU-Patentanmeldung 17157320.7 (Feb. 2017).
- /Koh17/ Kohler, H.; Zhang, X.; Ojha, B.; Guth, U.: Verfahren zum Betrieb eines Mischpotentialsensors und Verfahren zur Steuerung einer Verbrennungsanlage mit diesem, DE 10 2017 218 612.7.
- /III18/ Illyaskutty, N.; Kansizoglu, O.; Akdag, O.; Ojha, B.; Knoblauch, J.; Kohler, H.: Miniaturized single chip arrangement of Wheatstone bridge based calorimetric gas sensor, *Chemosensors*, 6 (2018) 22; doi:10.3390/chemosensors6020022.
- /Koh13/ Kohler, H.; Potreck, A.; Trautmann, T.: Verfahren und Vorrichtung zur Verbrennung von Brennstoffen Europäische Patentschrift EU 2 066 972 B1.
- /Koh18/ Kohler, H.; Ojha, B.; Illyaskutty, N.; Hartmann, I.; Thiel, C.; Eisinger, K.; Dambacher, M.: In situ high-temperature gas sensors: continuous monitoring of the combustion quality of different wood combustion systems and optimization of combustion process, *J. Sens. Sens. Syst.*, 7 (2018) 161– 167.
- /Nus89/ Nussbaumer, T.: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Forschungsbericht Nr. 6 des Laboratoriums für Energiesysteme der ETH Zürich (1989).
- /Sen17/ Verbundvorhaben Sensorgestützte Verbrennungsluftregelung zur Minimierung der Emissionen von Biomasseheizkesseln (SenSTEF), Mai 2015 – Juli 2017, Projektträger Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, Abschlussbericht 2017.
- /Har18/ Hartmann, I.: „Minderung der Emissionen aus Scheitholzöfen durch ein zweistufiges integriertes Katalysatormodul“, Vortrag auf dem 9. Fachgespräch: „Partikelabscheider in Biomassefeuerungen“, 21. März 2018, Leipzig.
- /Döh12/ Döhling, F.; Hartmann, I.; Lenz, V.; Schröder, T.; von Sonntag, J.; Ulbricht, T.: Wärme aus Holz - Feinstaubemissionen, Endbericht, 2012.
- /Ulb11/ Seyfert, U.; Bunzel, K.; Thrän, D.; Mauky, E.; Fritsche, B.; Schreiber, A.; Liebetrau, J.; Schmidt, T.; Ulbricht, T.; Lenz, V.: DBFZ Report Nr. 8 - Kompakt -, ISSN: 2190-7943, 2011.
- /Har14/ Hartmann, I.; Lenz, V.: „Emissionsminderung bei Biomasse-Kleinfeuerungen“; Tagungsband der DBFZ-Jahrestagung 01./02. Oktober 2014; Leipzig; S. 136-143; ISSN: 2199-9384.
- /Hart12/ Döhling, F.; Hartmann, I.; Lenz, V.; Schröder, T.; von Sonntag, J.; Ulbricht, T.: Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen: Brennstoffeinfluss, Nutzer, Feuerungs-Wettbewerb, Sekundärmaßnahmen, Charakterisierung und Toxizität. <http://www.waermeausholz.de/>, Zugriff: 10.04.2012.
- /Bin11-01/ Bindig R., Einicke, W.-D., Hartmann, I., Lenz, V., Kraus, M., Matthes, M., Roland, U., Schenker, M., Thiel, C.: Katalytisch unterstützte Minderung von Emissionen aus BiomasseKleinfeuerungsanlagen. DBFZ-Report Nr. 6, 2011.
- /DBF12/ DBFZ: Katalytisch unterschützte Minderung von Emissionen aus BiomasseKleinfeuerungsanlagen, <http://www.energetische-biomassennutzung.de/de/vorhaben/liste-allervorhaben/details/projects/25.html>, Zugriff: 10.04.2012.
- /Har10/ Hartmann, I., Schenker, M., Thiel, C.: Emissionsmessungen und Schadstoffminderungsmaßnahmen an Biomassekleinfeuerungen. *Kachelofen & Kamin* 27 (2010) S. 15-22.
- /Bin11-02/ Bindig R., Einicke, W.-D., Hartmann, I., Lenz, V., Roland, U., Schenker, M., Thiel, C.: Katalysatoruntersuchungen an einer Technikumsanlage für Biomasse-Kleinfeuerungen, *Chemie Ingenieur Technik* 83 (2011) S. 371-376
- /Bin11-03/ Bindig R., Einicke, W.-D., Hartmann, I., Koch, C., Kraus, M., Matthes, M., Roland, U., Schenker, M., Thiel, C.: Abgasreinigung an Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen und experimentelle Untersuchungen zur Kombination von katalytischen und elektrostatischen Abgasreinigungsverfahren. *Chemie Ingenieur Technik* 83 (2011) S. 2105-2120.
- /Bin11-04/ Bindig, R., Butt, S., Hartmann, I., Matthes, M., Thiel, C.: Application of Heterogeneous Catalysis in Small-Scale Biomass Combustion Systems, *Catalysts* 2 (2012) S. 223-243.
- /Jer02/ A. Jerger, H. Kohler, F. Becker, H.-B. Keller, R. Seifert; New Applications of Tin Oxide Gas Sensors – II. Intelligent sensor system for reliable monitoring of ammonia leakages, *Sensors & Actuators B*, 81 (2002) 301-307
- /Keu20/ Keubiyou Arlex; Multivariate Analyse zur Korrelierung des Signals eines Mischpotential-Gassensors mit der Abgaszusammensetzung, Bachelor-Thesis Studiengang Elektrotechnik-Sensorik, Hochschule Karlsruhe, 2020.
- /Koh13/ Kohler, H.; Potreck, A.; Trautmann, T.: Verfahren und Vorrichtung zur Verbrennung von Brennstoffen Europäische Patentschrift EU 2 066 972 B1 (2013).

- /Koh19/ Heinz Kohler, Xin Zhang, Binayak Ojha, Ulrich Guth; Offenlegungsschrift DE 2017 218 612 A1 (2019).
- /Kro19/ Sebastian Kromer; Modellgestützte Analyse und Optimierung eines kalorimetrischen Gasesensors auf LTCC-Basis, Bachelor Thesis Studiengang Elektrotechnik-Sensorik, Hochschule Karlsruhe, 2019.
- /Kun21/ Stephan Künstle; Analyse des Signals eines Mischpotential-Sensors (LH 68_2) zur Korrelierung mit CO/HC-Emissionen, Bachelor-Thesis, Studiengang Elektrotechnik-Sensorik, Hochschule Karlsruhe, 2021.
- /Miu14/ N. Miura, T. Sato, S. Anggraini, H. Ikeda, S. Zhuiykov, A review of mixed-potential type zirconia-based gas sensors, *Ionics*. 20 (2014) 901-925.
- /Ran20/ Luigi Randazzo; Charakterisierung von CarboSen Mischpotential-Gassensoren nach Betrieb im Abgas von Holzfeuerungen, Bachelor-Thesis Studiengang Elektrotechnik-Sensorik, Hochschule Karlsruhe, 2020.
- /Zhg18/ Xin Zhang, Dissertation TU Dresden, 2018.
- /Zhg21/ Xin Zhang, Heinz Kohler, Matthias Schwotzer, Ulrich Guth; Stability improvement of layered Au,Pt/YSZ mixed potential gas sensing electrodes by cathodic polarization: studies by steady state and dynamic electrochemical methods, *Sensors&Actuators B. Chemical* 342 (2021) 130065.
- /Zhg22/ Xin Zhang, Christoph Schwab, Binayak Ojha, Heinz Kohler; High Temperature Electrochemical CO/HC Sensor for Wood Firing Process: Signal Stabilization by Dynamic Electrochemical Methods, Tagungsband zur 21. ITG/GMA Fachtagung Sensoren und Messsysteme, 10./11. Mai 2022, Nürnberg.
- /Wie15 / S. Wiegärtner, G. Hagen, J. Kita, W. Reitmeier, M. Hien, P. Grass, R. Moos: Thermoelectric hydrocarbon sensor in thick-film technology for on-board-diagnostics of a diesel oxidation catalyst, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 214, 234–240 (2015), doi: 10.1016/j.snb.2015.02.083.
- /Rit17/ T. Ritter, S. Wiegärtner, G. Hagen, R. Moos: Simulation of a thermoelectric gas sensor that determines hydrocarbon concentrations in exhausts and the light-off temperature of catalyst materials, *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 395-405 (2017), doi: 10.5194/jsss-6-395-2017.
- /Hag18/ G. Hagen, A. Harsch, R. Moos: A pathway to eliminate the gas flow dependency of a hydrocarbon sensor for automotive exhaust applications, *J. Sens. Sens. Syst.*, 7, 79-84 (2018), doi: 10.5194/jsss-7-79-2018.

ANHANG

Teilvorhaben 1: DBFZ, 22038418 Theoretische und Experimentelle Untersuchungen, Koordination

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben 1 hatte die Projektleitung, Gesamtanlagenentwicklung, Regelungsentwicklung Kessel, Durchführung und Auswertung von Prüfstands- und Feldmessungen zum Gegenstand und das Ziel, anhand von experimentellen Untersuchungen am Prüfstand und im Feld die Emissionsminderungswirkung an Einzelraumfeuerung und Kessel in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern nachzuweisen.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

APD1 Katalysatorkonzept Einzelraumfeuerung

APD2 Katalysatoradaption und -integration an der Einzelraumfeuerung

APD3 Anlagenkonzept Kessel und Abscheider

APD4 Aufbau, Installation und Inbetriebnahme der Komponenten der HHS-Anlage im DBFZ-Technikum

APD5 Entwicklung und Adaptierung der Emissionsminderungsmaßnahmen am HHS-Kessel

APD6 Regelungsentwicklung auf Basis einer SPS

APD7 Integration der CO/HC-Sensorik in die SPS-Regelung

APD8 Prüfstandsuntersuchungen HHS-Feuerungen mit SPS-Regelung sowie Staubabscheider

APD9 Messungen ohne Emissionsminderungsmaßnahmen

APD10 Messungen mit Emissionsminderungsmaßnahmen

APD11 Optimierung der Emissionsminderungsmaßnahmen und der SPS-Regelung

APD12 Feldmessungen am HHS-Kessel mit optimierter SPS-Regelung

APD13 Datenauswertung und Evaluierung der Feldmessungen

APD14 Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Durch die theoretischen und experimentellen Untersuchungen an Kesseln und Einzelraumfeuerungen am Prüfstand und im Feld konnten niedrige Emissionen unter Praxisbedingungen nachgewiesen werden. An beiden Anlagen wurden durch Regelung sowie Staubabscheider- und Katalysatorintegration entsprechende technische Maßnahmen demonstriert.

Teilvorhaben 2: Institut für Sensor- und Informationssysteme (ISIS), Hochschule Karlsruhe, FKZ 22038718, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Gassensorik an Biomassefeuerungen

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben 2 hatte die Herstellung eines Kalorimetrischen Gassensor-Chips, die Auswahl des für Einsätze im Abgas am besten geeigneten Sensortyps zur Analyse der un- und teilverbrannten Abgaskomponenten und die Weiterentwicklung eines neuartigen Verbrennungsluft-Regelungsverfahrens von Scheitholz-Verbrennungsanlagen kleiner Leistung zum Gegenstand mit dem Ziel, ein langzeitstabiles automatisiertes Verbrennungsluft-Regelungskonzept zur Minimierung der Emissionen von Scheitholz-Feuerstätten zu evaluieren und die technologische Machbarkeit aufzuzeigen, um anschließend eine möglichst zeitnahe Markteinführung zu erreichen.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

- Herstellung und Untersuchung der Eigenschaften eines Kalorimetrischen Sensorchips zur Analyse von CO/HC-Emissionen im Abgas von Scheitholz-Verbrennungsanlagen.
- Charakterisierung des Sensitivitätsverhaltens von Mischpotenzial-Gassensoren (LAMTEC) im Abgas von Scheitholz-Verbrennungsanlagen unter besonderer Betrachtung der Aussagekraft des Signals hinsichtlich der Verbrennungsqualität und der Signal-Langzeitstabilität.
- Erstellung eines theoretischen Modells zur Darstellung der Abgasqualität aus dem Signal des Mischpotenzialsensors.
- Experimentelle Weiterentwicklung der Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen aus dem Vorprojekt SenSTEF für Anwendungen mit Oxidationskatalysator.
- Experimentelle Evaluation der Verbrennungsluft-Regelung in Feldtests über 4 Monate.
- Analyse der Daten hinsichtlich der erzielten Emissionen unter verschiedenen Betriebsbedingungen (mit/ohne Katalysator, automatische/manuelle Verbrennungsluftregelung, etc.).
- Erstellung des Schlussberichtes.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

In diesem Teilvorhaben ist es erstmals gelungen, Mischpotenzial-Gassensoren für die in-situ-CO/HC-Analyse im Abgas von Scheitholzverbrennungsanlagen zu ertüchtigen und deren Signal-Langzeitstabilität experimentell nachzuweisen. Dies war die Voraussetzung für eine langzeitstabile, äußerst innovative, sensorbasierte automatisierte Verbrennungsluftregelung, die bei Kombination mit einem Oxidationskatalysator und mit einem Elektroabscheider sowohl die gasförmigen als auch die Gesamtstaubemissionen von scheitholzbefeuerten Einzelraumfeuerstätten kleiner Leistung um mehr als 85 % im Alltagsbetrieb senken kann. Dies wurde anhand von Feldtests über 4 Monate untersucht und experimentell bewiesen. Eine vergleichbare Innovation ist nach dem Kenntnisstand der Verfasser weltweit nicht sichtbar. Die Publikation der Ergebnisse in international beachteten open access Fachjournals ist in Bearbeitung.

Das Interesse der Verbundpartner LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH und Co. KG, Brunner GmbH und ETE EmTechEngineering GmbH, diesen sich abzeichnenden Technologiesprung zum Schutz von Mensch und Klima auf dem Markt der Einzelraumfeuerstätten einzuführen, ist außerordentlich hoch. Allerdings wird unter den momentan herrschenden Marktbedingungen von einer Produktentwicklung abgesehen, weil eine „Feuerstätte neuer Generation“ angesichts der nach der 1. BImSchV geltenden Emissionsobergrenzen und den damit verbundenen Mehrkosten (grob geschätzt 1500 bis 2000 €) auf dem Markt der Einzelraumfeuerstätten nicht konkurrenzfähig sein würde.

Dies bedeutet, dass sich dieser Technologiesprung zur erstmals bedeutenden Absenkung der Emissionen von scheitholzbefeuerten Einzelraumfeuerstätten nur dann auf dem Markt durchsetzen wird, wenn

- die Emissionsobergrenzen nochmals abgesenkt werden (damit müssten die unregulierten Feuerstätten verschwinden) und/oder
- die Einführung dieser Innovation zum Schutz von Umwelt und Klima mit Fördermitteln unterstützt wird.

In diesem Zusammenhang erübrigt es sich beinahe zu erwähnen, dass diese Art der Wärmeversorgung privater Haushalte angesichts von ca. 10 Mio. Feuerstätten alleine in Deutschland einen wesentlichen Beitrag zur Unabhängigkeit der Versorgung mit einer nachhaltigen Energiequelle darstellt und der berechtigten Kritik an solchen Feuerstätten wegen deren Emissionen mit der hier vorgestellten Innovation den Boden entzogen würde.

Teilvorhaben 3: A. P. Bioenergietechnik GmbH, 22038818, Konzeptentwicklung von Kessel und Abscheider, experimentelle Untersuchungen

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziele des Teilvorhabens waren die Konzepterstellung, Auslegung, Konstruktion und Fertigung eines Elektro-Staubabscheiders mit anschließender Installation an einer Feldanlage, sowie die Konzeptionierung, Entwicklung, Programmierung und Bau einer neuen Regelung zur Überwachung und Ansteuerung von Heizkessel und Abscheider. Regelung und Abscheider wurden im Heizraum der Feldanlage installiert und die Steuerung mit Abscheider und Heizanlage elektrisch verbunden. Ein identisches System wurde für den Projektpartner DBFZ in Leipzig für das dortige Technikum gefertigt und installiert.

Beide Systeme (Feldanlage und Technikumsanlage) wurden in Betrieb genommen und standen für die Entwicklungen und Versuche zur Verfügung. An der Feldanlage wurden verschiedene Testreihen mit unterschiedlichen Modifikationen des Abscheiders durchgeführt. Dadurch konnten sukzessive Optimierungen stattfinden, durch die eine hohe Dauerverfügbarkeit und hohe Abscheideleistung erreicht werden konnten.

Ein weiteres Ziel war ebenfalls die Auslegung des Staubabscheiders für nicht-holzartige Brennstoffe. Es wurde ein Gemisch aus Holz und Miscanthus verwendet, mit dem Abscheidegrade von etwa 90 % erreicht wurden und somit gültige Staubgrenzwerte eingehalten bzw. deutlich unterschritten werden können.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

APÖ1 Konzeptentwicklung von Kessel und Abscheider

APÖ2 Konzeptentwicklung der Regelung

APÖ3 Auslegung und Konstruktion Abscheider

APÖ4 Installation des Abscheiders an Feldanlage

APÖ5 Integration der Regelung an Feldanlage

APÖ6 Inbetriebnahme der Feldanlage und des Abscheiders

APÖ7 Betreuung und Überwachung der Feldanlage

APÖ8 Optimierung der Regelung und Konstruktionsverbesserung des Abscheiders

APÖ9 Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Teilvorhaben konnte für die ÖKOTHERM®-Heizanlagen eine neue Steuerungsgeneration in Form einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) entwickelt werden, mit der das bestehende Heizsystem und der entwickelte Elektro-Staubabscheider gesteuert/geregelt und überwacht werden können.

Mit der Entwicklung und Verbesserung des Staubabscheiders konnten die gültigen Staubgrenzwerte unterschritten werden. Mit der Untersuchung von verschiedenen Ausrüstungs-Varianten hat sich gezeigt, dass für einen betriebssicheren und effizienten Abscheiderbetrieb gewisse Mindestmaße des Abscheiders und dadurch erreichte Abgasverweilzeiten zwingend eingehalten werden müssen. Die Abscheideergebnisse lagen auch nach längeren Betriebszeiten im Bereich von 90 %.

Teilvorhaben 4: LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG, FKZ 22038618, Entwicklung von Gassensoren, Aufbau Prototypen, Tests und Langzeitstabilität

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens 4 des Verbundpartners LAMTEC war die Entwicklung von in-situ Gassensoren für die innovative Verbrennungsluftregelung, speziell hinsichtlich eines marktverfügbaren preisgünstigen CO/HC-Sensors. Prototypen wurden aufgebaut, getestet sowie deren Eignung und Langzeitstabilität nachgewiesen. Eine marktnahe und bezahlbare Sensortechnologie ist nun nach Projektabschluss - bei Bedarf - verfügbar.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

APL1 Bewertung Langzeitstabilität CarboSen

APL2 Gehäusekonzepte für Hochtemperaturanwendungen

APL3 Konzeptauswahl und Beurteilung der Konzepte bzgl. LowCost

APL4 Umsetzung Gehäusekonzept und Aufbau Prototypen

(APL5 Integration der neuen Sonden in den Prozess und Dauertest)

- war zeitlich nicht mehr möglich

APL6 Ergebnisverwertung sowie Zwischen- / Endbericht und Dokumentation

APL7 Dokumentation der Mess- und Testergebnisse, Schreiben von Zwischen- und Endberichten

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Gegenüber dem Referenzsensor aus dem Vorläuferprojekt SenSTEF wurde

- die Drift des CO_e-Sensors von < 1,5 %/h auf < 0,05 %/h verringert. Es kann nunmehr von einer Streuung und nicht mehr von einer gerichteten Drift gesprochen werden.
- die Empfindlichkeit des CO_e-Sensors auf die Führungsgröße CO_e von > 0,2 mV/ppm_{CO_e} auf 0,5 mV/ppm_{CO_e} erhöht.

Damit ist der CO_e-Sensor stabil und empfindlich genug für die im UVV Projekt entwickelte Regelung.

Insgesamt wurden vier Gehäusekonzepte zur Integration der CO_e-Sensoren betrachtet, wovon zwei als potentiell geeignet identifiziert wurden:

Gehäusekonzept C und D sind beide dicht genug mit einer He-Leckrate < 10⁻⁵ mbar l/s (Ziel: < 10⁻⁵ mbar l/s)

Gehäusekonzept C bzw. D sind hochtemperaturstabil bis 450 °C bzw. 1000 °C. (Ziel: bis 500 °C)

Gehäusekonzept C bzw. D haben Verkaufspreise von 490 € bzw. 140 € bei 10 000 Stk (Ziel: 100 € bei 10 000 Stk)

Nach technischer und wirtschaftlicher Bewertung wurde Konzept D realisiert. Nach Erstellung des Lastenheftes wurde dieses gemeinsam mit einem externen Spezialisten umgesetzt. Der Nachweis der Funktionalität, Robustheit und Dichtheit wurde im Technikum an fünf Prototypen erbracht. Weiteres Verbesserungspotenzial wurde erkannt.

- Bei Marktdurchdringung > 100 000 Stück und nach Automatisierung der Fertigung kann der Zielpreis von 100 € für Konzept D sogar unterschritten werden.
- Nach Modifikation der Prozessschritte Sensorvereinzelnung kann mit dem Konzept D eine Leckrate < 10⁻⁷ mbar l/s erreicht werden. Damit können auch (neue) Prozesse mit größeren Druckdifferenzen zur Umgebung erreicht werden.

Der Fertigungsprozess für die Sensorelemente sowie zur Integration in ein Gehäuse sind größtenteils definiert. Damit steht nach UVV-Projektabschluss eine marktverfügbare und preisgünstige CO_e-Sensortechnologie für die Regelung von Biomassefeuerungen zur Verfügung.

Teilvorhaben 5: Lehrstuhl für Funktionsmaterialien an der Universität Bayreuth, FKZ 22038518, Einsatz von Sensorelementen und experimentelle Untersuchungen, Validierung

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Die Universität Bayreuth war mit einer halben Stelle (wiss. MA) am Projekt beteiligt. Ziel war die Sensorikentwicklung, Sensorintegration und Datenanalyse bezüglich eines neuartigen vielversprechenden Ansatzes eines thermoelektrischen CO/HC-Sensors.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Aus Vorversuchen bekannte Sensorelemente sollten reproduziert und verbessert werden (Steigerung der Empfindlichkeit, APB1, APB3, APB5). Weiterhin war die gleichzeitige Weiterentwicklung bestehender Modelle (APB2, APB8) ein Aufgabenschwerpunkt. Die Sensoren kamen sowohl in Einzelraumfeuerungen am ISIS (APB4) als auch in den Feldmessungen in Eggenfelden zum Einsatz (API12 und API14). Aus den Erfahrungen in Real- und Labormessungen (APB7) konnten komplette Sensormuster erfolgreich aufgebaut und appliziert werden (inkl. eines neuen modularen Gehäusekonzepts, APB5). Eine detaillierte Datenanalyse der Abbrandversuche (APB6) wurde zwar durchgeführt, brachte aber nicht den erhofften Erkenntnisgewinn. Mehr Aufwand als geplant wurde auf die Entwicklung einer geeigneten digitalen Sensorelektronik gelegt (im APB9).

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Besondere Herausforderung des Teilvorhabens war die Integration des thermoelektrischen Sensorkonzepts in den Anwendungsfall „Abgas bei der energetischen Biomassenutzung“. Insbesondere die Minimierung von Störgrößen (sich ändernde umgebende Atmosphäre, v.a. bzgl. Temperatur) erforderte hohe Aufmerksamkeit.

Am Ende des Projekts kann die Tauglichkeit dieses Sensorkonzepts als nachgewiesen betrachtet werden. Der Sensor ist robust und einfach aufgebaut, zeigt über viele Abbrandversuche gleichbleibende Empfindlichkeit mit einem linearen Zusammenhang zwischen Sensorsignal und der Summe an reduzierenden Abgaskomponenten. Die Kostengünstigkeit des Konzepts macht den Sensorkandidaten zu einer vielversprechenden Alternative – wenngleich es im Rahmen des Projekts nicht möglich war, „Serienteile“ zu entwickeln.

Als besonders erfolgreich kann die Entwicklung des modularen Sensorgehäuses sowie der digitalen Sensorelektronik angesehen werden, deren erste Prototypen erfolgreich bei den Feldversuchen eingesetzt werden konnten. Beide Entwicklungen sind Basis für weitere Entwicklungen und eröffnen vielfältige Möglichkeiten, die Anwendbarkeit des Sensors zu verbessern (im Fall der Elektronik beispielsweise interne Korrektur- oder Anpassungsfunktionen).

Details zu den erreichten Ergebnissen sind dem gemeinsamen Teil des Schlussberichts zu entnehmen.