

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

31/10/2018

Projekttitlel:

**Modellbasierte Regelung und
Elektrofilterintegration zur schadstoffarmen
Verbrennung alternativer Biomassebrennstoffe**

Projektnummer: 848877

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	1. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/06/2015
Projektende	30/06/2018
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	37 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	1. KWB – Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH (KWB) 2. BIOENERGY 2020+ GmbH 3. LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH&CoKG
AnsprechpartnerIn	1. Georg Hofmeister 2. Markus Gölles 3. Frank Hammer
Postadresse	1. Industriestraße 235, A-8321 St. Margarethen a.d. Raab 2. Inffeldgasse 21b, 8010 Graz 3. Wiesenstraße 6, D-69190 Walldorf (Baden)
Telefon	1. +43 3115 6116 2. +43 316 873 9201 3. +49 6227 6052-0
Fax	1. +43 3115 6116-4 2. +43 (316) 873 9202 3. +49 6227 6052-57
E-mail	georg.hofmeister@kwb.at markus.goelles@bioenergy2020.eu hammer@lamtec.de
Website	https://www.bioenergy2020.eu/de/kompetenzbereiche/alle_projekte

MoREIntegrALBiomass

Modellbasierte Regelung und Elektrofilterintegration zur schadstoffarmen Verbrennung
alternativer Biomassebrennstoffe

AutorInnen:

Daniel Muschick (BE2020)

Christopher Zemann (BE2020)

Joachim Kelz (BE2020)

Georg Hofmeister (KWB)

Markus Göllles (BE2020)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	6
3	Inhaltliche Darstellung	7
3.1	Beschreibung der Versuchsanlage samt zusätzlich installierter Sensorik und Messtechnik.....	7
3.2	Untersuchung und mathematische Modellierung des Abbrandverhaltens alternativer Brennstoffe.....	13
3.2.1	Untersuchung und Modellierung des dynamischen Verhaltens des Brennstoffbettes	13
3.2.2	Modellierung des dynamischen Verhaltens der Biomasse-Feuerung	16
3.2.3	Messung und Bewertung der staubförmigen Emissionen	18
3.2.4	Untersuchung der CO- λ -Charakteristik.....	19
3.3	Konzeption des Versuchs-Elektrofilters	21
3.3.1	Partikelemissionen bei der Verbrennung von festen Biomassebrennstoffen.....	22
3.3.2	Besonderheiten bei der Verbrennung alternativer Biomasse-Brennstoffe.....	23
3.3.3	Verhalten von Feinstaubbildnern nach Kesselaustritt	23
3.3.4	Untersuchung grundlegender Fragestellungen zur direkten Integration von Elektrofiltern.....	24
3.3.5	Wahl des Elektrofilters.....	25
3.3.6	Positionierung und Integration des Elektrofilters.....	27
3.4	Entwicklung einer modellbasierten Regelung	29
3.4.1	Motivation und Ausgangslage	29
3.4.2	Konzept der Feuerungs-Regelung.....	31
3.4.3	CO- λ -Regelung	33
3.4.4	Zustandsschätzer zur Anpassung an wechselnde Brennstoffeigenschaften.....	33
3.4.5	Simulation der Feuerungsregelung.....	34
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	34
4.1	Modellbasierte Regelung.....	34
4.1.1	Feuerungs-Regelung.....	34
4.1.2	Zustandsschätzer zur Anpassung an wechselnde Brennstoffeigenschaften.....	39
4.2	Emissionsmessungen mit dem Versuchs-Elektrofilter	39
4.2.1	Methodik	40
4.2.2	Ergebnisse der nasschemischen Analyse	41
4.2.3	Bestimmung von spezifischen Brennstoffindizes	43
4.2.4	Ergebnisse der Testläufe.....	44
4.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	50
5	Ausblick und Empfehlungen.....	54
6	Literaturverzeichnis	55
7	Kontaktdaten.....	56

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

2 Einleitung

Biomassefeuerungen werden heute im Nennleistungsbereich von wenigen kW bis zu einigen 100 MW gebaut. Für eine breite Palette von Biomassebrennstoffen sind entsprechende Feuerungskonzepte am Markt erhältlich, wobei problematische Biomassebrennstoffe wie halmgutartige Brennstoffe (z.B. Stroh), Altholz, Energiegräser sowie Reste aus der landwirtschaftlichen Industrie (Kerne, Schalen etc.) in vielen Fällen ungenutzt bleiben oder nur vereinzelt in mittelgroßen und großen Feuerungsanlagen eingesetzt werden können.

Vergleicht man die aktuell im Leistungsbereich von 50-1000 kW eingesetzten Feuerungstechnologien automatisch beschickter Kessel, so sind feuerungstechnologisch keine markanten Unterschiede feststellbar. Moderne Biomassefeuerungen weisen generell einen sehr hohen konstruktiven Entwicklungsstand auf, trotzdem kann das volle Potential für niedrige Emissionen, gesteigerte Anlageneffizienz und der Möglichkeit, alternative Brennstoffe einzusetzen, bei weitem noch nicht ausgeschöpft werden. Dies liegt im Bereich der Primärmaßnahmen vor allem daran, dass mit den verwendeten Regelungen und der eingesetzten Sensorik aus Sicherheitsgründen sehr konservative Parametrierungen für die Regelung des Luftüberschusses, welcher sich direkt auf Emissionsverhalten und Effizienz auswirkt, eingesetzt werden. Im Bereich der Sekundärmaßnahmen gibt es noch keine weitverbreiteten und insbesondere kostengünstigen Maßnahmen, um Emissionen, insbesondere die bei der Biomasseverbrennung zu Recht kritisierten PM-Emissionen, zu reduzieren.

Deshalb wurden im Zuge dieses Projektes die Grundlagen zur Entwicklung einer brennstoffflexiblen, emissionsarmen und hocheffizienten Biomassefeuerung, die sich der zuvor genannten Problemstellungen annimmt, geschaffen. Dies erfolgte durch effiziente Kombination von Primär- und Sekundärmaßnahmen. Im Bereich der Primärmaßnahmen wird durch den Einsatz innovativer modellbasierter Regelungsstrategien, in Verbindung mit neuartiger CO- λ -Sensorik, neben einer Steigerung der Anlageneffizienz und Reduktion von Emissionen u.A. durch Optimierung der Verbrennungsbedingungen, die Möglichkeit zum Einsatz alternativer Biomassebrennstoffe geschaffen (siehe Abschnitt 3.4). Da Primärmaßnahmen alleine nicht ausreichen, um die zukünftig immer strengeren Emissionsgrenzwerte, insbesondere für PM-Emissionen, einzuhalten, wurde eine kostengünstige und effiziente Möglichkeit zur PM-Abscheidung in Form einer Integration eines elektrostatischen Abscheiders direkt in die Feuerungsanlage untersucht (siehe Abschnitt 3.3).

Die Grundlagenuntersuchungen erfolgten an einer eigens dafür mit spezieller Sensorik und einem Laborelektrofilter ausgerüsteten Versuchsanlage, welche in Abschnitt 3.1 beschrieben wird. Im ersten Schritt wurden durch Experimente verifizierte mathematische Modelle der Abbrand- und Anlagencharakteristik entworfen (Abschnitt 3.2) und darauf aufbauend verschiedene modellbasierte Regelungskonzepte erarbeitet und in Simulationen validiert. Nach der Implementierung eines vielversprechenden Regelungsansatzes an der Versuchsanlage wurden die für die Integration eines Elektrofilters relevanten Fragestellungen, wie Abscheide- und Ionisationsverhalten, experimentell untersucht (siehe Abschnitt 4.2). Danach wurde das Zusammenspiel aus Elektrofilter und modellbasierter Regelung in Langzeitversuchen analysiert und optimiert.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Beschreibung der Versuchsanlage samt zusätzlich installierter Sensorik und Messtechnik

Am Anfang des Projektes wurde zunächst eine als Versuchsanlage dienende Rostfeuerung mit Wasserkessel für den Betrieb mit alternativen Brennstoffen und die Integration eines Elektrofilters modifiziert. Ein wesentliches Ziel bei der Verbrennung der in diesem Projekt untersuchten alternativen Brennstoffe (Maisspindel, Kurzumtrieb und Stroh) ist es, die Temperatur im Brennstoffbett möglichst gering zu halten. Dadurch soll zum einen Ascheschmelze und Verschlackung weitgehend vermieden, zum anderen die Freisetzung der wesentlichen anorganischen Aerosolbildner, insbesondere Kalium, aus dem Brennstoffbett minimiert werden. Dazu ist es erforderlich, die Anlage mit einem geringen Luftverhältnis im Brennstoffbett zu betreiben und dieses in weiterer Folge auch gut regeln zu können. Dieses Ergebnis wurde erreicht, indem eine kommerziell verfügbare Anlage (Multifire 2 mit einer Nennleistung von 50 kW therm.), welche für den Betrieb sowohl mit Hackgut als auch mit Holzpellets konzipiert ist, verwendet wurde, welche bereits große Stellbereiche zur Verfügung stellt. Es war lediglich nötig, die maximal zu fordernde Leistung von 50 kW auf 45 kW zu verringern, um die gewünschten Luftstufungen bei allen alternativen Brennstoffen umsetzen zu können. Ferner ist die Brennstoffzufuhr bereits so dimensioniert, dass sie mit den unterschiedlichen möglichen Energiedichten zurechtkommt; für eine besser dosierbare und kontinuierlichere Brennstoffzufuhr wurde die Stokerschnecke mit einem Frequenzumrichter versehen.

Als Herzstück des Biomasse-Kessels kam ein speziell für die Verbrennung alternativer Brennstoffe entwickelter Raupenbrenner zum Einsatz. Dessen großer Vorteil ist die Möglichkeit, das Förderverhalten des Brennstoffes und der Asche zu kontrollieren. Diese Kontrolle ermöglicht die Beeinflussung der Höhe des Brennstoffbettes, der Ascheschicht sowie der Länge der Ausbrandzone. Diese wirken sich direkt auf die Verweilzeit der Asche am Rost aus. Dadurch ist es möglich, die Asche gezielt aus der heißen Zone zu befördern und die Bildung größerer Schlackeklumpen zu verhindern. Anstatt dieser Klumpen bildet sich eine hinreichend dünne Schlackeschicht, welche am Ende des Brenners zerbricht, vom Rost fällt und von einer Schnecke mühelos in den Aschebehälter transportiert werden kann. Dies ermöglicht bei Brennstoffen mit einem sehr niedrigen Ascheerweichungspunkt – wie z.B. Strohpellets – im Vergleich zu Treppen- oder Vorschubrosten eine um zwei Drittel höhere Flächenbelastung. Die Rostlänge ist zudem so groß, dass die durch das geringere Luftverhältnis im Brennstoffbett verlängerte Abbranddauer zu keinen Problemen führt, sofern die Ansteuerung der Rostbewegung für eine ausreichende Verteilung des Brennstoffes über die Rostlänge und somit eine gute Durchströmung mit der Primärluft und somit hinreichend raschen Abbrand sorgt.

Die Versuchsanlage wurde mit umfassender Sensorik und Messtechnik für die geplanten Untersuchungen ausgestattet, siehe Abbildung 1. Neben allen Stellgrößen werden alle relevanten Drücke (über und unter dem Rost, vor und nach jedem Ventilator), Temperaturen (Vor- und Rücklauftemperatur des Wassers, Rauchgastemperaturen entlang der Rauchgasmessstrecke sowie die Temperatur der Umgebungsluft) und Massenströme sowie die Konzentration der wesentlichen Rauchgaskomponenten (O_2 , CO , CO_2 , NO_x , H_2O , org.C) mit ausreichend hoher zeitlicher Auflösung

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

(Periodendauer: 1 s) kontinuierlich erfasst und durch gezielte Staubmessungen (Fein- und Gesamtstaub) begleitet.

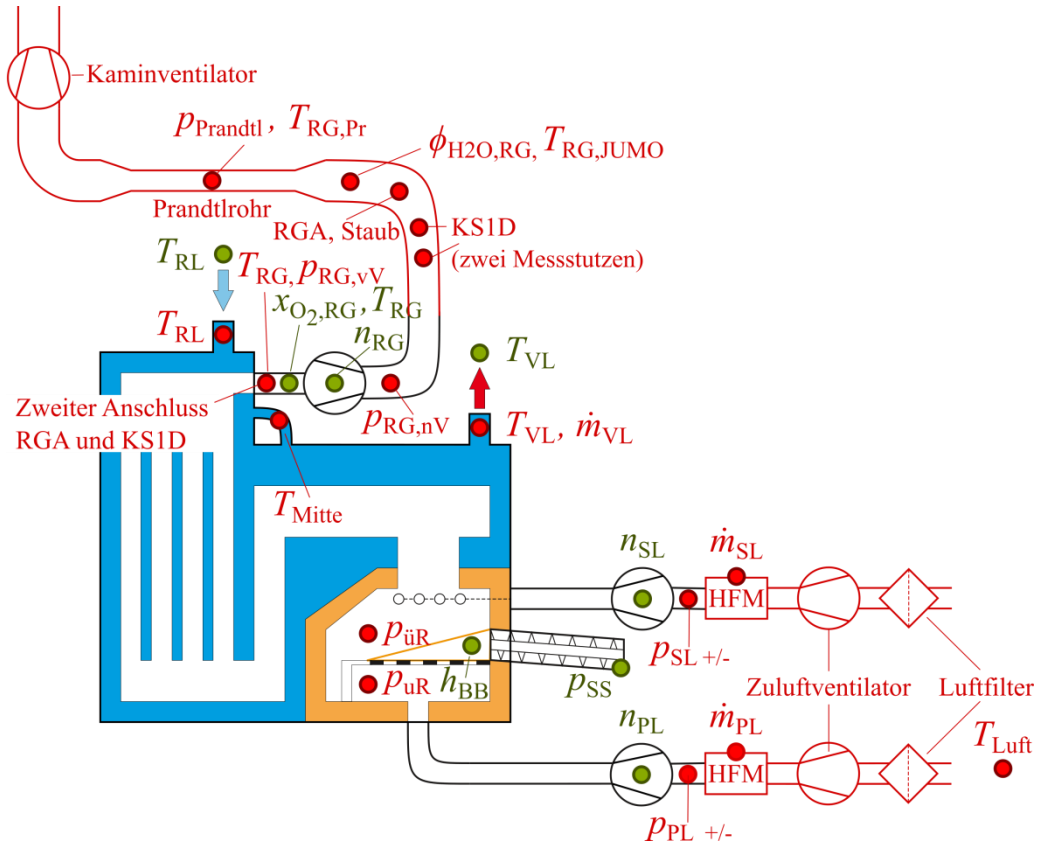


Abbildung 1: Schematische Darstellung der vorhandenen (grün) und zusätzlich verbauten (rot) Sensorik in der Versuchsanlage. Gemessen werden vorrangig Temperaturen T , Differenzdrücke p und Massenströme \dot{m} . Im Rauchgaskanal werden zudem die Sauerstoff- sowie die Kohlenmonoxid(äquivalent)-Konzentration mit Kombisonden von Lamtec (KS1D) gemessen sowie umfangreichere weitere (Staub-)Messungen durchgeführt.

Da durch die Messungen unter anderem auch das natürliche Verhalten der Anlage zur Parametrierung von z.B. Druckvolumenstrommodellen erfasst werden soll, war es notwendig, den Einfluss der Messung auf das Messergebnis so weit wie möglich zu eliminieren. Es wurden daher nichtinvasive Luftmessstrecken zur Messung der zugeführten Primär- und Sekundärluftmassenströme entwickelt, bei welchen durch eine aktive Regelung von vorgeschalteten Ventilatoren der Druckabfall über den Messaufbau kompensiert und somit das natürliche Verhalten des Kessels nicht beeinflusst wird (siehe Abbildung 2).

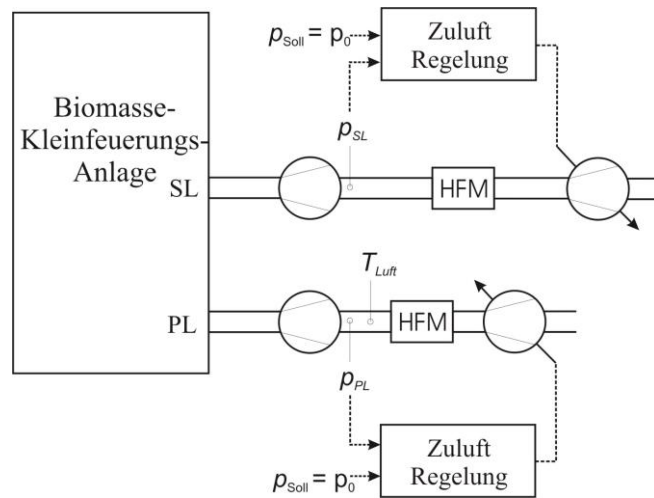


Abbildung 2: Konzept der nicht-invasiven Messstrecken für die Primär- (PL) und Sekundärluft (SL)

Die Luftmassenströme werden dabei über in der Automobilbranche übliche Heißfilmmassenmesser (HFM) der Fa. BOSCH ermittelt. Diese können jedoch nur in sauberen Luftströmen eingesetzt werden, weshalb am Einlass der Messstrecken Luftfilter verbaut wurden. Für die Messung des Rauchgasmassensstromes hingegen muss auf eine andere Methode zurückgegriffen werden. Somit wurde die Rauchgasmessstrecke, neben zahlreichen Messöffnungen für die Einbindung von Rauchgasanalytik, Staubmesstechnik und einem Hygrothermogeber, mit einem verjüngten Abschnitt mit eingebautem Prandtl-Rohr ausgestattet. Durch den kleineren Durchmesser erhöhen sich die Rauchgasgeschwindigkeit und damit die Genauigkeit der Messung, welche von dem Verhältnis des dynamischen Druckes zum Staudruck abhängt. Der derart erhöhte Widerstand der Rauchgasmessstrecke wird, analog zu den Luftmessstrecken, über eine Kamindruckregelung mittels eines Kaminventilators so kompensiert, dass die Anlage keinen Unterschied zu einem direkten Anschluss an den Kamin wahrnimmt (siehe Abbildung 3).

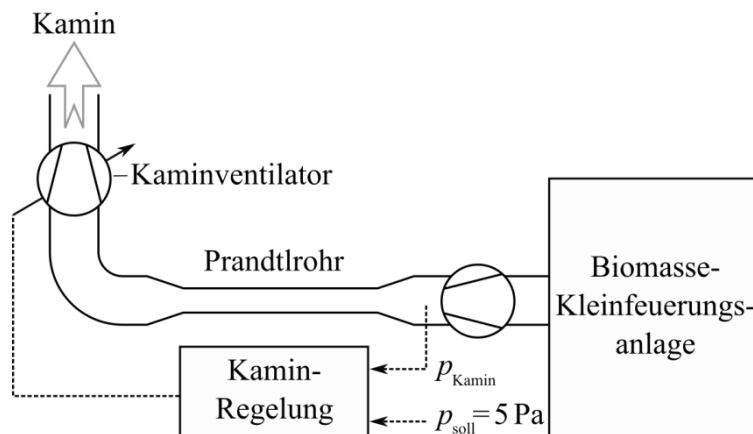


Abbildung 3: Konzept der nicht-invasiven Rauchgasmessstrecke

Für eine kontinuierliche Erfassung der Ausbrandqualität wurden zwei KS1D-Kombisonden der Fa. Lamtec installiert, welche sowohl den Sauerstoffgehalt als auch CO-Äquivalente im Rauchgas messen

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

können. Dabei wurde eine Sonde vor, die andere nach dem Saugzugventilator eingebaut, um den Falschlufteintrag durch den Ventilator abschätzen zu können.

Für die gezielte Vermessung des Brennstoffbetts wurden zudem Luftmassenstromregler entwickelt, so dass ein weitgehend von Störungen befreiter stationärer Betrieb der Anlage mit unterschiedlichen Luftstufungen ermöglicht wurde.

Bei der Brennstoffzufuhr wurde besonderes Augenmerk auf eine maximale Vergleichmäßigung des Brennstoffmassenstromes sowie eine Minimierung des Falschlufteintrags gelegt. Dazu wurde der Motor der Stokerschnecke an einen Frequenzumrichter angeschlossen, mit dem eine freie Vorgabe der Drehzahl möglich ist. Ferner wird der Brennstoff aus dem Lager mittels einer Förderschnecke über eine Zellradschleuse in einen kleinen Vorratsbehälter transportiert, aus welchem der Weitertransport über die Stokerschnecke ohne große zu erwartende Schwankungen der Fördermenge oder einen merkbaren Falschlufteintrag möglich ist (siehe Abbildung 4).

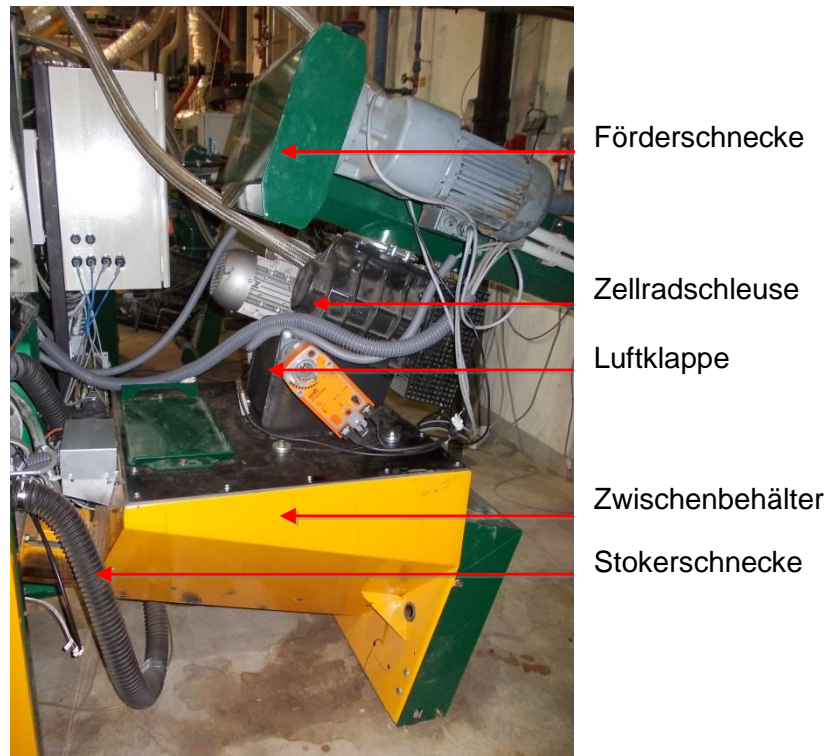


Abbildung 4: Aufbau der Brennstoffzufuhr, welche für einen gleichmäßigen Massenstrom optimiert wurde.

Durch die kontinuierliche Drehung der Stokerschnecke traten in den ersten Testläufen Probleme auf, da die nötige kontinuierliche Drehzahl sehr gering ausfällt und es zu einem Steckenbleiben der Stokerschnecke auf Grund zu niedrigen Moments sowie zu geringer Kühlung des Elektromotors kommen kann. Dieses Problem wurde durch eine Erhöhung des Übersetzungsverhältnisses vermindert, aber nicht vollständig gelöst. Alternativ wurde ein modifizierter gepulster Betrieb der Stokerschnecke implementiert, bei welchem die Schnecke langsamer, dafür länger als im Standardbetrieb ohne Frequenzumrichter dreht, und somit die Variation der Massenzufuhr niedriger ausfällt. Bei den Messungen wurde in weiterer Folge kein nennenswerter Unterschied zu einem komplett kontinuierlichen

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Betrieb mehr festgestellt. Um das Risiko eines Steckenbleibens der Stokerschnecke zu minimieren, wurden die Versuche daher mit der langsam gepulsten Methode durchgeführt.

Vor den eigentlichen Versuchen an der Anlage wurden Förderversuche auf eine Waage durchgeführt, um den Massenstrom von Brennstoff auf das Brennstoffbett abhängig von der Pulsweite abschätzen zu können.

Für die dynamische Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften des Versuchstandes wurde ein Hydraulikteststand (siehe Abbildung 5) entworfen und in Auftrag gegeben, welcher es erlaubt, rasche Änderungen der Rücklauftemperatur, welche bei einem Lastwechsel auftreten können, zu simulieren. Ferner können mit so einem Teststand thermische Lastprofile abgefahren werden, um typische reale Belastungen eines Biomassekessels nachzubilden und die dynamischen Eigenschaften der Regelung des Biomassekessels zu untersuchen. Eine Detailskizze ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 5: Mobiler Hydraulikteststand zur Simulation von typischen Lastzyklen und raschen Rücklauftemperaturänderungen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

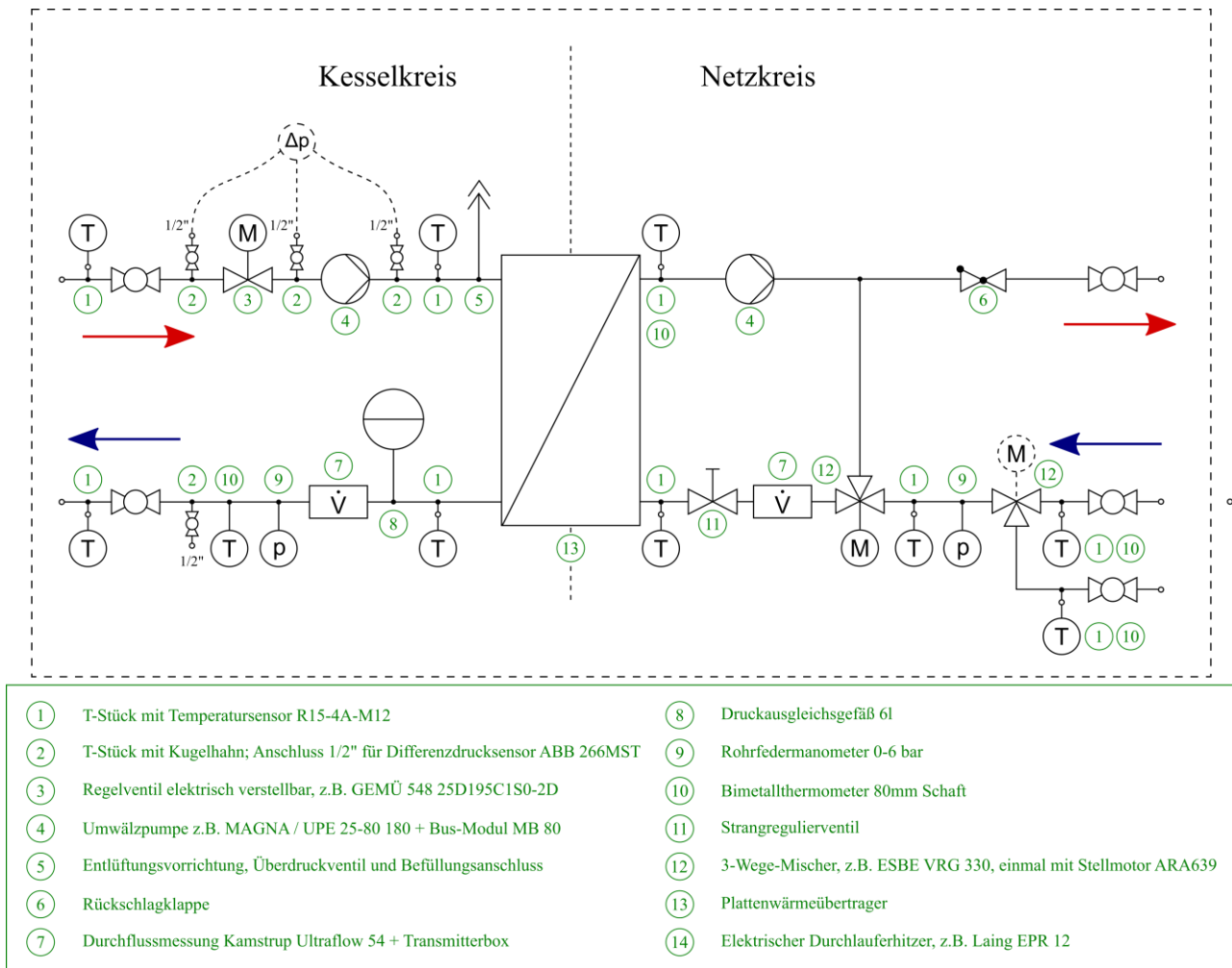


Abbildung 6: Schema des Hydraulikteststandes. An der linken Seite wird der Biomasse-Kessel angeschlossen, an der rechten das Hydrauliknetz des Technikums, welches über zwei Temperaturniveaus verfügt.

Die Automatisierung der Anlage, also das Einlesen und Verarbeiten der Messdaten sowie die Ansteuerung der Komponenten in den nichtinvasiven Messstrecken sowie des Hydraulikteststandes erfolgte mit einer Lösung der Firma Bernecker & Rainer. Ein Schema des Datenflusses ist in Abbildung 7 dargestellt.

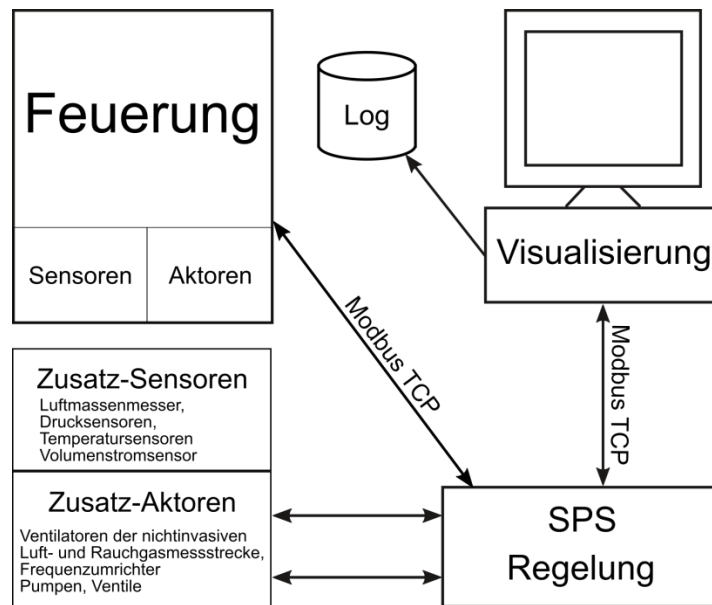


Abbildung 7: Kommunikationskonzept zwischen der SPS von Bernecker & Rainer (X20), der Biomasse-Kleinf Feuerung (Multifire 2 mit der InterCom-Schnittstelle über ModbusTCP) und dem für die Visualisierung und Datenaufzeichnung verantwortlichen Programm am Versuchsstandrechner.

3.2 Untersuchung und mathematische Modellierung des Abbrandverhaltens alternativer Brennstoffe

Die an der Versuchsanlage zusätzlich installierte Sensorik dient dazu, das Abbrandverhalten von verschiedenen, alternativen Brennstoffen gezielt experimentell untersuchen zu können. Dabei fiel die Wahl auf Maisspindel-Grits, Strohpellets und sowie Kurzumtriebshölzer. Dabei stellen insbesondere Strohpellets auf Grund ihres niedrigen Ascheschmelzpunktes, hohen Aschegehaltes, hohen Stickstoffgehaltes, hohen Gehaltes an anorganischen Aerosolbildner und auch des deutlich erhöhten Korrosionspotentials eine besondere Herausforderung dar. Zu Vergleichszwecken wurde das Versuchsprogramm auch mit Holzpellets durchgeführt, um Referenzwerte zu erhalten.

Das Versuchsprogramm wurde so definiert, dass für jeden Brennstoff sowohl das dynamische Verhalten des Brennstoffbettes als auch die CO- λ -Charakteristik bei verschiedenen Leistungen und Luftverhältnissen im Brennstoffbett untersucht werden kann. Zudem wurden Staubmessungen bei stationären Betriebspunkten durchgeführt, um die Auswirkungen der E-Filterintegration und der regelungstechnischen Maßnahmen quantifizieren zu können.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen näher erläutert werden.

3.2.1 Untersuchung und Modellierung des dynamischen Verhaltens des Brennstoffbettes

Die Entwicklung einer modellbasierten Regelung basiert auf der Kenntnis eines mathematischen Modells, welches die dynamischen Vorgänge eines Prozesses hinreichend genau abbildet, aber nicht zu komplex ist. Typischerweise wird das dynamische Verhalten dafür mit gewöhnlichen Differentialgleichungen angenähert. Zur Untersuchung dieses dynamischen Verhaltens des Brennstoffbettes

wurden ausgehend von mehreren eingeschwungenen Zuständen, also unterschiedlichen Leistungen und Luftverhältnissen im Brennstoffbett, jeweils sprungförmige Änderungen des zugeführten Brennstoffmassenstromes und des Primärluftmassenstromes vorgenommen. Dazu wurden drei Leistungen und drei Luftverhältnisse im Brennstoffbett als Ausgangspunkte gewählt. Die daraus resultierenden, untersuchten Betriebszustände sind in Abbildung 8 dargestellt.

Versuchsdurchführung			
Leistung in kW			
Luftverhältnis im Brennstoffbett	19 kW	33 kW	45 kW
0,5	x	o	o
0,7	o	o	o
0,85	o	o	o

o ... untersucht x ... nicht untersucht

Abbildung 8: Überblick über die untersuchten Betriebszustände

Die Nennleistung der Biomasse-Feuerung wurde mit 45 kW anstelle der ursprünglichen 50 kW definiert. Dies ist darin begründet, dass die Biomasse-Feuerung für den Betrieb mit einem relativ hohen Luftverhältnis im Brennstoffbett (typisch: $\lambda_{BB} = 0,85$) konzipiert ist. Die Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Brennstoffbetts macht es jedoch notwendig, deutlich niedrigere Luftverhältnisse im Brennstoffbett einstellen zu können (Ziel: $\lambda_{BB} = 0,5$). Dies führt zu einer Verschiebung der Luftmassenstromverhältnisse, also einem geringeren Primärluft- und einem erhöhten Sekundärluftmassenstrom. Durch die Absenkung der Nennleistung wurde gewährleistet, dass in diesem Betriebspunkt keines der Stellgeräte in seiner oberen Begrenzung betrieben wird.

Die minimale untersuchte Leistung wurde mit 19 kW so gewählt, dass keines der Stellgeräte in seiner unteren Beschränkung betrieben wird. Zusätzlich wurde ein Arbeitspunkt zwischen der Minimalleistung und Nennleistung mit 33 kW gewählt.

Die drei untersuchten Luftverhältnisse im Brennstoffbett ($\lambda_{BB} = 0,5$, $\lambda_{BB} = 0,7$ und $\lambda_{BB} = 0,85$) wurden mit einem deutlichen Abstand zueinander gewählt, sodass die Unterschiede im dynamischen Verhalten des Brennstoffbetts aufgrund der unterschiedlichen Luftverhältnisse trotz der erwarteten Abbauschwankungen im Brennstoffbett bewertet werden konnten.

Ausgehend von diesen Betriebspunkten wurden Primärluft- und Brennstoffmassenstrom sprungförmig geändert, während der Sekundärluftmassenstrom durch einen Sauerstoffregler so eingestellt wurde, dass ein gewünschter Sauerstoffgehalt im Rauchgas eingehalten werden konnte. Ein Beispiel für eine solche Untersuchung ist in der Abbildung 9 dargestellt.

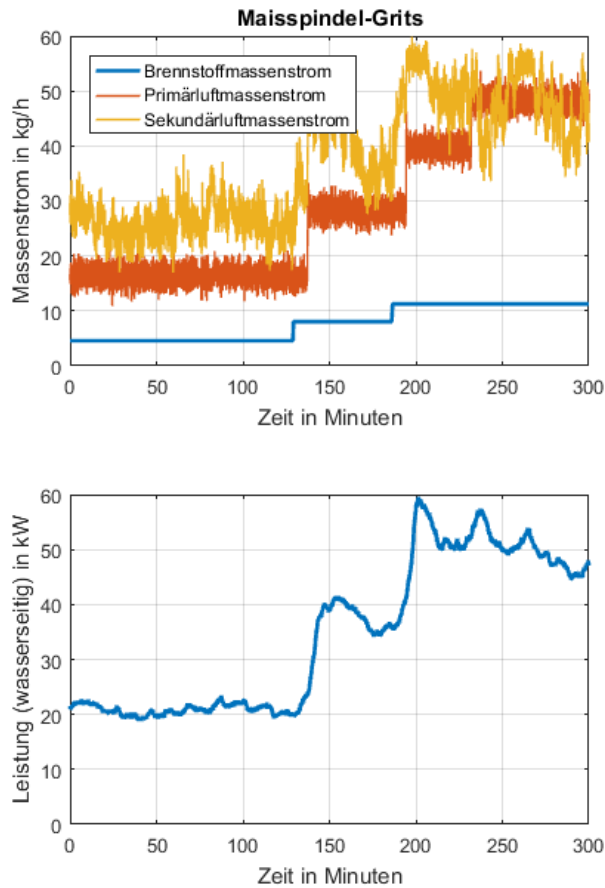


Abbildung 9: Versuche mit Maisspindel-Grits: Variation der Leistung und des Luftverhältnisses im Brennstoffbett ausgehend von 19 kW und $\lambda_{BB}=0,6$ durch zeitversetzte, sprunghafte Änderung des Brennstoff- und Primärluftmassenstroms.

Basierend auf diesen gezielten sprunghaften Änderungen der Massenströme wurde das dynamische Abbrandverhalten des Brennstoffbetts für alternative Biomassebrennstoffe modelliert. Dabei stellte sich heraus, dass das Abbrandverhalten aller untersuchten Biomassebrennstoffe durch ein nichtlineares Modell zweiter Ordnung wie folgt hinreichend genau beschrieben werden kann:

$$\frac{dm_W(t)}{dt} = -c_W m_W(t) + \frac{w_{H_2O, Brst}}{1 - w_{H_2O, Brst}} \dot{m}_{CHO, zu}(t - T_t)$$

$$\frac{dm_{CHO}(t)}{dt} = -c_{CHO, 1} m_{CHO}(t) \cdot (\dot{m}_{PL}(t) + c_{CHO, 2}) + \dot{m}_{CHO, zu}(t - T_t)$$

$$\dot{m}_{RG, BB}(t) = c_W m_W(t) + c_{CHO, 1} m_{CHO}(t) \cdot (\dot{m}_{PL}(t) + c_{CHO, 2})$$

m_W ... Masse an Wasser auf dem Brennstoffbett

m_{CHO} ... Masse an trockenem Brennstoff auf dem Brennstoffbett

$w_{H_2O, Brst}$... Wassergehalt des Brennstoffs

\dot{m}_{PL} ... Primärluftmassenstrom

$\dot{m}_{CHO, zu}$... Massenstrom an trockenem Brennstoff, der in das Brennstoffbett eingebracht wird

$\dot{m}_{RG, BB...}$ aus dem Brennstoffbett austretender Massenstrom

$T_t...$ Totzeit des Brennstoffmassenstroms

$c_w, c_{CHO,1}, c_{CHO,2}...$ Modellparameter

Das Brennstoffbettmodell beschreibt die Verdampfung des im Brennstoff gespeicherten Wassers und den thermischen Abbau des verbleibenden trockenen Brennstoffs in Abhängigkeit der Stellgrößen, welche direkt auf das Brennstoffbett wirken. Dabei handelt es sich um den Primärluftmassenstrom und den Brennstoffmassenstrom. Die Modellparameter des Brennstoffbettmodells wurden basierend auf den Messdaten aller untersuchten Brennstoffe durch numerische Optimierung bestimmt.

Die verwendete Struktur des Brennstoffbettmodells wurde bereits in vorhergehenden Arbeiten von BE2020+ für Hackgut erarbeitet und veröffentlicht. Überraschend ist dabei, dass:

- dieselbe Struktur auch für alle untersuchten alternativen Biomassebrennstoffe gültig ist
- die Modellparameter unabhängig vom verwendeten Brennstoff sind.

Lediglich die Berechnung des Brennstoffmassenstroms, welcher in das Brennstoffbett eingebracht wird, ist aufgrund der Änderung der Schüttdichte abhängig von den Brennstoffeigenschaften.

3.2.2 Modellierung des dynamischen Verhaltens der Biomasse-Feuerung

Das dynamische Verhalten der restlichen Biomasse-Feuerung wurde durch algebraische Gleichungen und gewöhnliche Differentialgleichungen modelliert. Dabei wurden die vollständige Verbrennung der Biomasse und die daraus entstehende Verbrennungswärme durch eine einfache Verbrennungsrechnung (algebraische Gleichungen) beschrieben. Der Übergang von Wärme aus dem Rauchgas in den Wärmeübertrager wurde durch eine algebraische Gleichung beschrieben, während die Erwärmung des im Wärmeübertrager gespeicherten Wassers durch zwei gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung modelliert wurde. Zur Parametrierung des Modells für den Wärmeübertrager wurden Messwerte aus den Versuchen zur Untersuchung des Abbrandverhaltens alternativer Biomassebrennstoffe verwendet.

Alle Teilmodelle (Brennstoffbett, Verbrennung und Wärmeübertrager) wurden zu einem Gesamtmodell zusammengefügt, welches zur Simulation und Entwicklung einer modellbasierten Regelung verwendet wurde. In Abbildung 10 wird dieses Gesamtmodell schematisch dargestellt.

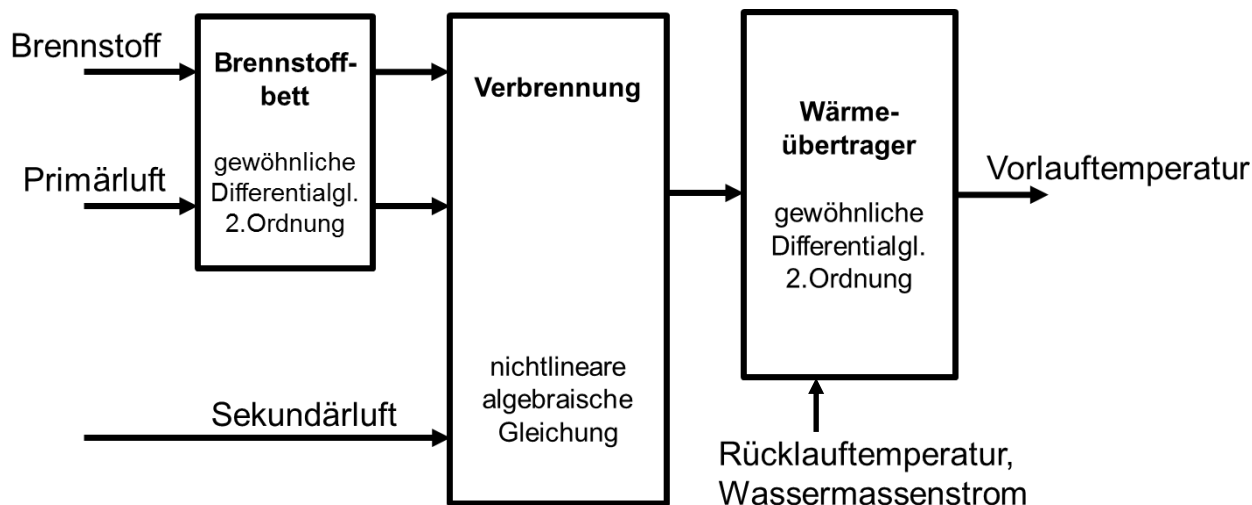


Abbildung 10: Struktur des Gesamtmodells zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Biomasse-Feuerung

Die Ausgangsgröße des Brennstoffbettmodells dient als Eingangsgröße für das nachfolgende Modell der Verbrennung. Der aus der Verbrennungsrechnung resultierende Wärmestrom stellt dann die Eingangsgröße des Wärmeübertragermodells dar.

Abbildung 11 stellt einige Ergebnisse aus der Simulation dieses Gesamtmodells, beispielhaft für die Verbrennung von Maisspindel-Grits, dar. Als Eingangsgrößen des Gesamtmodells wurden die in Abbildung 9 dargestellten Massenströme verwendet. Der in Abbildung 11 gezeigte Massenstrom ist dabei der aus dem Brennstoffbett austretende Massenstrom, welche durch das Brennstoffbettmodell berechnet wird. Die rauchgasseitige Leistung ist jene Leistung, welche vom Rauchgas auf den Wärmeübertrager transferiert wird (aus Verbrennungsrechnung und Wärmeübertragermodell). Die Wassertemperaturen sind die Vorlauf-temperatur des Wärmeübertragers, welche durch das Wärmeübertragermodell berechnet werden, sowie die Rücklauf-temperatur, welche als Eingangsgröße bzw. Störung wirkt.

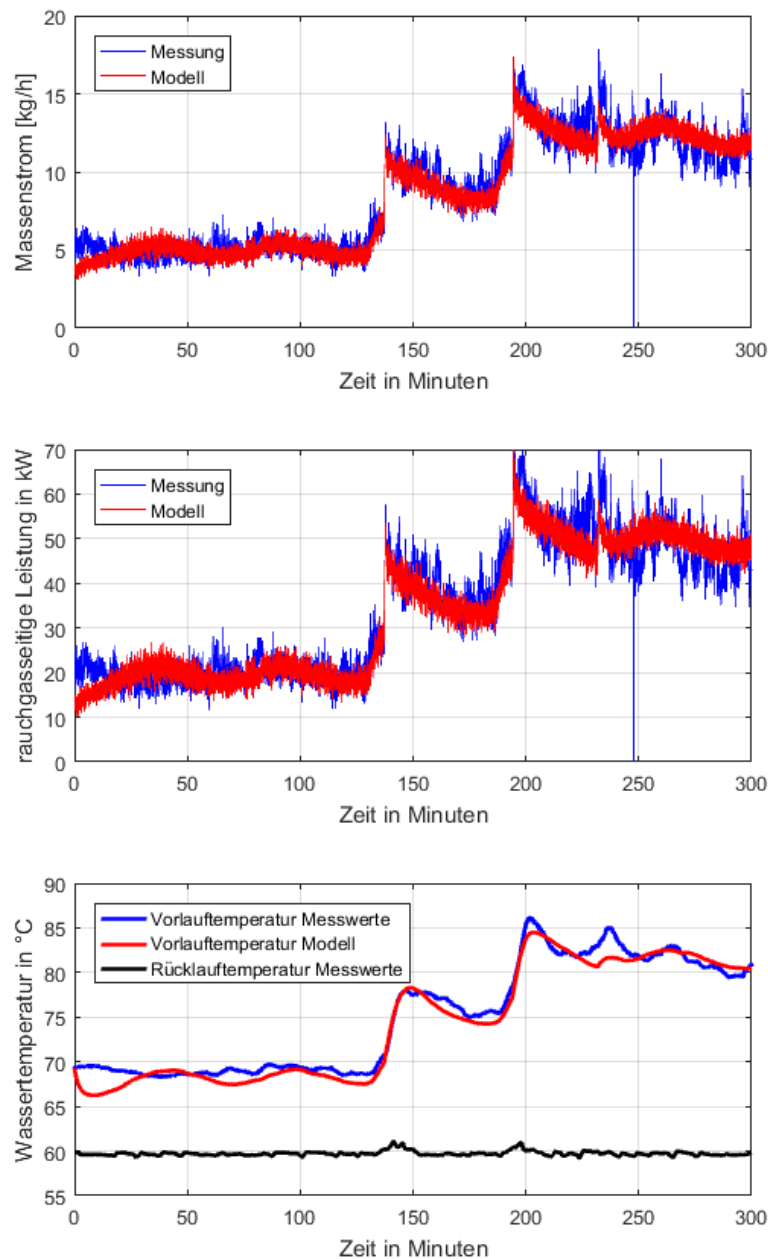


Abbildung 11: Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Verläufen. Massenstrom: aus dem Brennstoffbett austretender Massenstrom ($\dot{m}_{RG, BB}$). Rauchgasseitige Leistung: Leistung, welche vom Rauchgas auf den Wärmeübertrager übertragen wird. Wassertemperatur: Vor- und Rücklauftemperatur des Wärmeübertragers.

3.2.3 Messung und Bewertung der staubförmigen Emissionen

Aus den in Abbildung 8 dargestellten acht Betriebspunkten wurden fünf Betriebspunkte gezielt ausgewählt, in welchen die Staubemissionen gemessen wurden. Die Staubemissionen wurden dabei bei der definierten Nennleistung von 45 kW für alle der Luftverhältnisse im Brennstoffbett ($\lambda_{BB} = 0,5$, $\lambda_{BB} = 0,7$ und $\lambda_{BB} = 0,85$) und bei einem konstanten Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,7$ für alle Leistungen (19 kW, 33 kW und 45 kW) gemessen. Die für die Staubmessungen herangezogenen Betriebszustände sind in Abbildung 12 dargestellt.

Versuchsdurchführung			
Leistung in kW			
Luftverhältnis im Brennstoffbett	19 kW	33 kW	45 kW
0,5	x	o	o
0,7	o	o	o
0,85	o	o	o

o ... untersucht x ... nicht untersucht

Abbildung 12: Überblick über die Betriebszustände, bei welchen Staubmessungen durchgeführt wurden (hellblau hinterlegt)

Es wurden die Gesamtstaub- und Feinstaubemissionen in den verschiedenen Betriebszuständen gemessen und gezielt chemischen Analysen des Staubes durchgeführt, um die Konzeption des Versuchs-Elektrofilters zu unterstützen und Referenzwerte für einen Vergleich des Betriebs der Anlage mit und ohne Elektrofilter zu erhalten.

3.2.4 Untersuchung der CO-λ-Charakteristik

Zur Untersuchung der CO-λ-Charakteristik wurde bei verschiedenen Leistungen (20 kW bis 25 kW, 30 kW bis 35 kW und 40 kW bis 45 kW) und Luftverhältnissen im Brennstoffbett ($\lambda_{BB} = 0,5$, $\lambda_{BB} = 0,7$ und $\lambda_{BB} = 0,85$) der jeweils zugeführte Sekundärluftmassenstrom – und dadurch das Gesamtluftverhältnis λ_{ges} (bzw. der Sauerstoffgehalt des Rauchgases) – gezielt variiert. Dies ist beispielhaft in Abbildung 13 dargestellt.

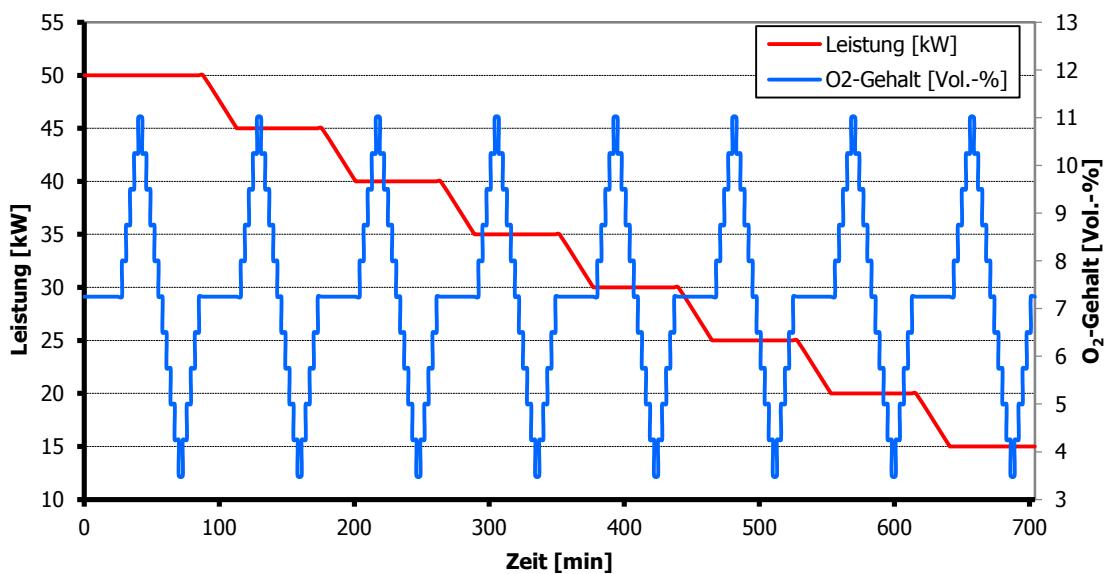


Abbildung 13: Versuche zur Untersuchung der CO-λ-Charakteristik.

Die CO-λ-Charakteristik wurde anschließend durch einen statischen Zusammenhang mit vom untersuchten Brennstoff sowie dem Betriebszustand abhängenden Parametern beschrieben. Die Modellfunktion lautet wie folgt:

$$x_{CO}(\lambda) = a_1 \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-b_2}{c_2}\right)^2}$$

$x_{CO}(\lambda)$...CO-Konzentration bezogen auf 13 Vol.-% tr. Rauchgas in Abhängigkeit von λ

λ... Gesamtluftverhältnis

a_i ... Modellparameter

b_i ... Modellparameter

c_i ... Modellparameter

Basierend auf den Messdaten wurde untersucht, wie sich die CO-λ-Charakteristik mit der Leistung und dem Luftverhältnis im Brennstoffbett sowie dem verwendeten Brennstoff verändert. Dabei zeigte sich, dass die linke Flanke der CO-λ-Charakteristik mit sinkendem Luftverhältnis im Brennstoffbett und mit steigender Leistung hin zu sinkenden Gesamtluftverhältnissen wandert. Dies ist beispielhaft für Maisspindel-Grits in Abbildung 14 dargestellt.

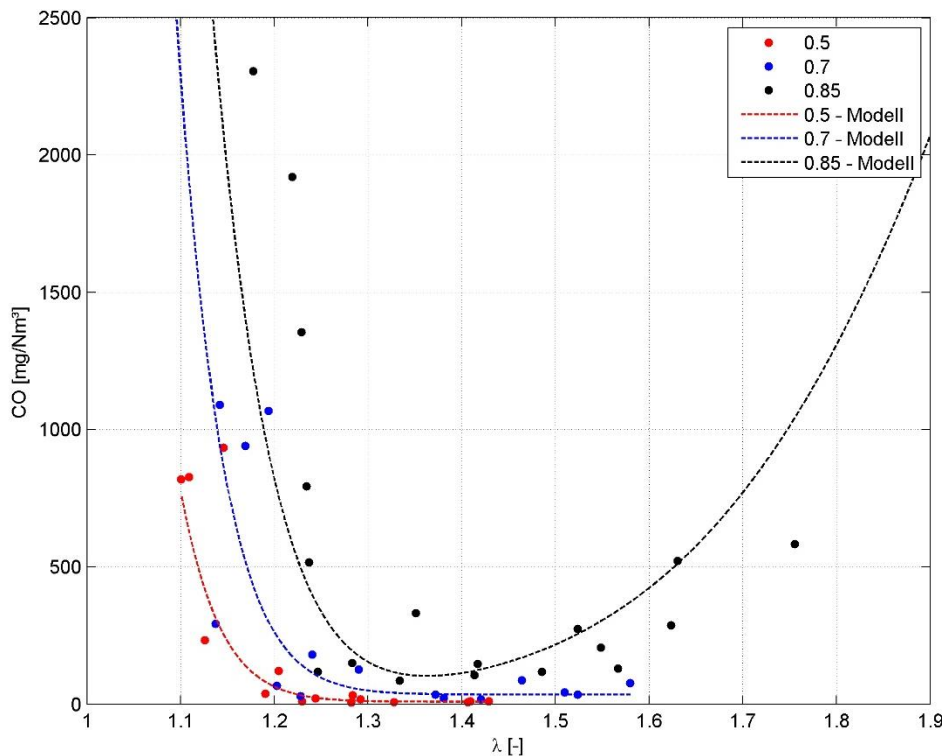


Abbildung 14: Maisspindel-Grits - CO-λ-Charakteristik für den Leistungsbereich von 40 kW bis 45 kW bei den Luftverhältnissen im Brennstoffbett von 0,5, 0,7 und 0,85. Die CO-Emissionen sind auf tr. RG und 13 Vol.-% O₂ bezogen.

Es wurden auch die CO-λ-Charakteristika der einzelnen Brennstoffe verglichen. Hierbei zeigte sich, dass die Struktur der Brennstoffe (Pellets, Grits, Hackgut) einen großen Einfluss auf die CO- λ-Charakteristik

hat. Dies wird beispielhaft in Abbildung 15 dargestellt, in der die Verbrennung von Strohpellets und Holzpellets zu sehr geringen CO-Emissionen über den gesamten untersuchten Bereich führt, wohingegen Maisspindel-Gritts stets hohe CO-Emissionen aufweisen.

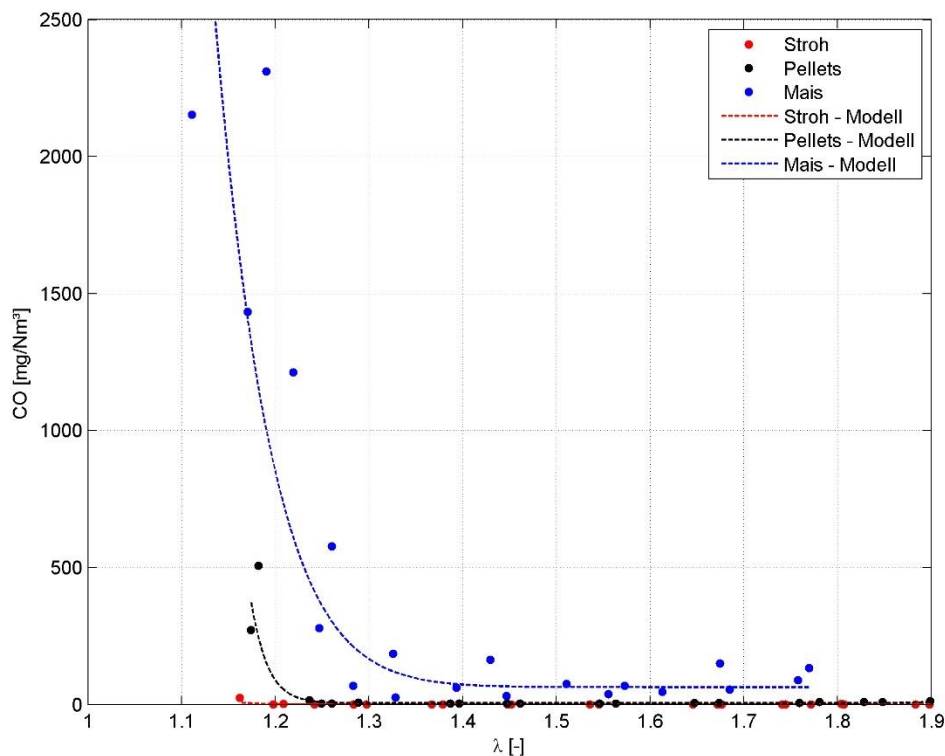


Abbildung 15: Vergleich von Strohpellets („Stroh“), Holzpellets („Pellets“) und Maisspindel-Gritts („Mais“) für einen Leistungsbereich von 30 kW bis 35 kW und einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von 0,7. Die CO-Emissionen sind auf tr. RG und 13 Vol.-% O₂ bezogen.

Bei der Modellierung der CO- λ -Charakteristik zeigte sich, dass die Modellparameter stets stark mit den nicht messbaren Brennstoffeigenschaften (Schüttdichte, Wassergehalt) variieren. Da das Ziel der Modellierung der CO- λ -Charakteristik die Nutzung des Modells durch eine CO- λ -Regelung war, wurde auf eine genaue Festlegung der Modellparameter verzichtet. Stattdessen wurde bei der entwickelten CO- λ -Regelung (siehe Abschnitt 3.4.3) eine Methode entwickelt, welche die Parameter der CO- λ -Charakteristik zur Laufzeit bestimmt.

3.3 Konzeption des Versuchs-Elektrofilters

Im folgenden Abschnitt wird die grundlegende Problematik der Partikelemissionen bei der Verbrennung von Biomasse erläutert und darauf aufbauend die zu untersuchenden Fragestellungen aufgelistet, welche es im Rahmen zu beantworten galt. Ferner wird die Wahl des schließlich eingesetzten Elektrofilters motiviert und dessen Integrationskonzept in den Biomassekessel vorgestellt.

3.3.1 Partikelemissionen bei der Verbrennung von festen Biomassebrennstoffen

Die bei der Verbrennung von festen Biomassebrennstoffen entstehenden Partikelemissionen lassen sich prinzipiell in zwei Kategorien, nämlich grobe Flugaschen (Partikel >1 µm) und Aerosole (Partikel <1 µm) unterteilen. Grobe Flugaschen entstehen durch die Aufwirbelung von Brennstoff- oder Aschepartikeln vom Brennstoffbett, die dann in weiterer Folge mit dem Rauchgas aus dem Feuerraum ausgetragen werden. Ein Teil dieser Flugaschen wird im Feuerraum und im Kessel wieder abgeschieden (sogenannte Feuerraum- und Kesselaschen). Der im Rauchgas verbleibende Anteil verlässt die Feuerung als so genannte Flugascheemission. Bei der Feinstaub- bzw. Aerosolbildung wird zwischen anorganischen und organischen Aerosolen sowie Rußpartikeln differenziert.

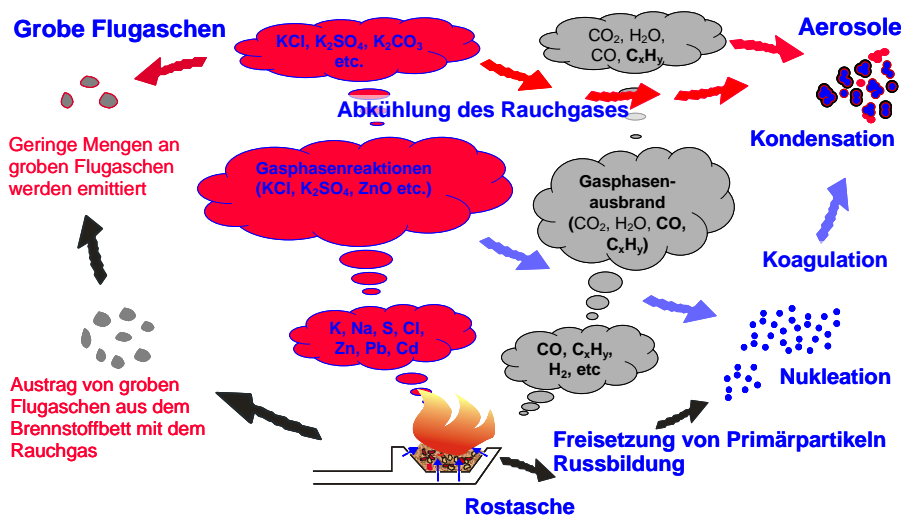


Abbildung 16: Bildung von groben Flugaschen und Aerosolen in Biomasse-Kleinf Feuerungen

Anorganische Aerosole repräsentieren eine Fraktion, die in erster Linie von der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffes beeinflusst wird. Bei der Verbrennung von Biomasse wird ein Teil der leichtflüchtigen Aschenbildner in die Gasphase freigesetzt, wobei je nach Verbindung bzw. Element die Freisetzungsraten stark variieren können. Für Biomasse-Kleinf Feuerungen, die mit chemisch unbehandelter holzartiger Biomasse betrieben werden, sind hier vor allem K, S, Cl und Zn von Relevanz. In der Gasphase kommt es zu chemischen Reaktionen, die zur Bildung von Alkalimetallsulfaten, Alkalimetallchloriden und Alkalimetallkarbonaten sowie zur Bildung von Schwermetalloxiden führen. Überschreitet eine dieser Verbindungen ihren Sättigungsdampfdruck, so kommt es zu einem Phasenübergang in die flüssige bzw. feste Phase. Dieser Phasenübergang kann in Form von Nukleation (Bildung von neuen Partikeln mit Korngrößen von wenigen Nanometern) oder in Form von Kondensation auf Oberflächen (bestehende Partikel, aber auch Wärmetauscherflächen) ablaufen. In weiterer Folge wachsen die so gebildeten Partikel durch Agglomerationseffekte an und erreichen am Kesselaustritt die für Biomasse-Kleinf Feuerungen üblichen mittleren Korngrößen von ca. 0,1 bis 0,2 µm. Durch den Zusammenhang zwischen der Bildung anorganischer Aerosole und dem eingesetzten Brennstoff liegt der Schluss nahe, dass bei annähernd vollständigem Gasphasenausbrand mit steigenden Konzentrationen an leicht flüchtigen Aerosolbildnern im Brennstoff die Feinstaubemissionen der Feuerung ansteigen.

Organische Aerosole und Rußemissionen resultieren aus der Kondensation von unverbrannten Kohlenwasserstoffen in Folge eines unzureichenden Gasphasenausbrands (organische Aerosole) sowie aus der unvollständigen Oxidation von Rußpartikeln. Bei optimiertem Gasphasenausbrand sowie bei entsprechend hohen Feuerraumtemperaturen lassen sich Emissionen an organischen Aerosolen und Rußemissionen annähernd vollständig vermeiden. In Biomasse-Kleinfeuerungen können jedoch häufig nicht während aller Betriebsphasen optimale Ausbrandbedingungen sichergestellt werden, weshalb den organischen Aerosolen und Rußemissionen ebenfalls Bedeutung zukommt.

3.3.2 Besonderheiten bei der Verbrennung alternativer Biomasse-Brennstoffe

Die untersuchten alternativen Brennstoffe (Kurzumtrieb, Maisspindel, Stroh) führen aufgrund des deutlich erhöhten Ascheanteiles und insbesondere des höheren Anteils an anorganischen Aerosolbildnern zu geänderten Anforderungen, wobei insbesondere die chemische Zusammensetzung der Aerosole (anorganische Salze, Schwermetalloxide, organische Aerosole bzw. elementarer Kohlenstoff = Ruß) Einfluss auf die Konzeptionierung des zu integrierenden Elektrofilters hat, da unterschiedliche chemische Komponenten in unterschiedlicher Qualität abgeschieden werden können. Durch die beiden im Projekt eingesetzten Primärmaßnahmen (brennstoffflexible Feuerungstechnologie und zielgerichteter Betrieb durch eine modellbasierte Regelung) ist davon auszugehen, dass die chemische Zusammensetzung des Feinstaubes größtenteils aus anorganischen Komponenten bestehen wird.

3.3.3 Verhalten von Feinstaubbildnern nach Kesselaustritt

In Abbildung 17 ist das Verhalten von Feinstaubbildnern nach Kesselaustritt schematisch dargestellt. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist dabei die Rauchgastemperatur. Feinstaubemissionen aus anorganischen Salzen, Schwermetalloxide (KCl, K_2SO_4 , K_2CO_3 , ZnO etc.) sowie Ruß werden von der Abkühlung des Rauchgases in den Rauchgasleitungen nicht beeinflusst. Kohlenwasserstoffverbindungen im Rauchgas am Kesselaustritt hingegen lassen sich in drei Gruppen mit unterschiedlichem Verhalten bei Abkühlung kategorisieren. Nicht kondensierbare Kohlenwasserstoffverbindungen wie Methan tragen nicht zur Feinstaubbildung bei. Kondensierbare Kohlenwasserstoffverbindungen (KOK) hingegen werden mit sinkender Rauchgastemperatur verstärkt von der Gasphase in die Partikelphase übergeführt und bilden dabei sogenannte primäre organische Aerosole (POA). Sinkt nun die Temperatur im Rauchgaskanal zwischen dem Kessel-Austritt und dem Filter-Eintritt (was bei einem nachgeschalteten Filtersystem der Fall ist), so kondensieren KOKs und bilden POAs. Dasselbe kann auch im Filter selbst passieren, was dann zur Folge hat, dass Partikel, die erst im Bereich nach der Sprühelektrode gebildet und somit nicht aufgeladen werden, prinzipiell nicht abgeschieden werden können. Des Weiteren können im Rauchgas Kohlenwasserstoffverbindungen enthalten sein, die unter Langzeiteinwirkung von UV-Licht und/oder durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre gespalten und oxidiert werden. Durch diese Oxidationsvorgänge senken sich ihre Sättigungsdampfdrücke und es können sogenannte sekundäre organische Aerosole (SOA) gebildet werden. Diese sind für das vorliegende Projekt allerdings nicht von Relevanz.

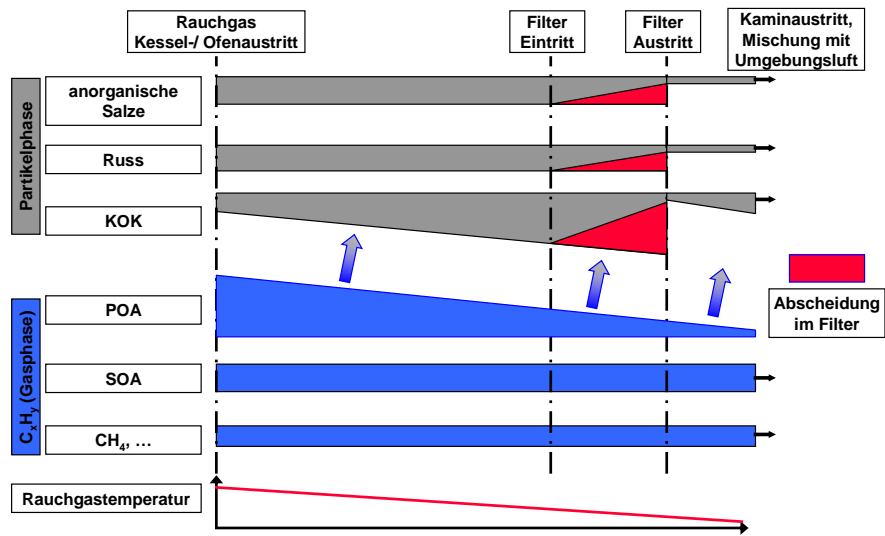


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Verhaltens von Feinstaubbildnern und anderen Rauchgaskomponenten im Rauchgaskanal nach Kesselaustritt

Durch die angestrebte direkte Integration des Elektrofilters in die heiße Zone der Feuerung ist die Thematik der, bei Abkühlung des Rauchgases in den Rauchgaskanälen und Filtern einsetzenden Kondensation gasförmiger organischer Spezies, nur von sehr geringer Relevanz.

3.3.4 Untersuchung grundlegender Fragestellungen zur direkten Integration von Elektrofiltern

Im Projekt wurden grundlegende Fragestellungen zur direkten Integration eines Elektrofilters in brennstoffflexible Biomasse-Kleinf Feuerungen untersucht und ein geeigneter Versuchsaufbau entwickelt, um die Integration zu bewerten. Dabei wurde zunächst festgelegt, welche Fragestellungen gezielt untersucht werden. Es muss insbesondere berücksichtigt werden, dass die aktuell verfügbaren Elektrofilter sowie deren Teilkomponenten für moderne Biomasse-Kleinf Feuerungen und speziell für chemisch unbehandelte holzartige Biomasse (größtenteils Hackgut und Scheitholz) entwickelt wurden. Zu Beginn des Projektes wurden vorhandene Daten der Projektpartner sowie aufgebautes Know-how zu Testläufen an Biomasse-Kleinf Feuerungen in Kombination mit E-Filtern gesammelt und diskutiert. Parallel dazu wurde zur Abklärung filterspezifischer Randbedingungen Kontakt mit Herstellern von Filtern sowie deren Teilkomponenten aufgenommen. Zur Bewertung des finalen, integrierten Elektrofilters wurde eine Vorgangsweise bezüglich der Testlaufdurchführung, Testlaufaus- und -bewertung erarbeitet.

Es wurde eine Liste von relevanten Betriebsparametern und Messwerten, die für die Bewertung und Evaluierung des Versuchselektrofilters benötigt werden, erstellt. Diese Betriebsparameter wurden in die entsprechenden Datenaufzeichnungsroutinen programmiert und erlauben durch Einsatz von standardisierten Datenauswertungsroutinen eine effiziente Aus- und Bewertungsmethode. Die folgende Bewertungsstrategie wurde definiert:

- Es sollen folgende Staubemissionsmessungen im Rauchgas bei aktivem (gereinigter Rauchgasstrom) und inaktivem Versuchselektrofilter (ungereinigter Rauchgasstrom) durchgeführt werden:
 - Diskontinuierliche Gesamtstaubmessungen nach geltenden Vorschriften (VDI 2066)
 - Diskontinuierliche Bestimmungen der Feinstaubgehalte und Korngrößenverteilung mit einem Kaskadenimpaktor (BLPI oder DGI-System)

- Kontinuierliche Bestimmung der Feinstaubgehalte mittels elektrischen Kaskadenimpaktoren (ELPI)
- Bei den Testläufen wird die Temperatur am Filtereintritt sowie am Filteraustritt kontinuierlich bestimmt, um etwaige Kondensationsmechanismen untersuchen zu können.
- Sollten erhebliche gasförmige org.C-Emissionen auftreten und die Filteraustrittstemperatur hoch genug sein ($> 100\text{ °C}$), so kann zusätzlich die Messung der PM1-Emissionen bei Verdünnung (mittels Porous Tube Diluter und/oder Ejector Diluter) des Rauchgases auf 40 °C vorgesehen werden, um das Potential an noch nicht kondensierten Kohlenwasserstoffen entsprechend berücksichtigen zu können.

3.3.5 Wahl des Elektrofilters

In Abstimmung mit diversen Filterherstellern wurden diverse herkömmliche (der Biomasse-Feuerung nachgeschaltete) Filtersysteme bzw. Subkomponenten (z.B. Draht- und Plattenelektroden, Nass- und Trockenabreinigung) bei unterschiedlichen Feuerungssystemen von KWB, bei unterschiedlichen Lastzuständen sowie bei Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe getestet. Diese Testläufe dienten dazu, relevante Daten zur Konzeption des integrierten Versuchselektrofilters zu erhalten. Sie wurden teilweise auch im Beisein der Filterhersteller durchgeführt, um diverse Optimierungspotentiale zu erkennen und zu diskutieren.

Im Rahmen des Projektes wurden zudem alle aus theoretischer Sicht möglichen Staubabscheidevarianten aufgezeigt und hinsichtlich Einsetzbarkeit bei Biomassefeuerungen in einem Leistungsbereich $< 500\text{kW}_{\text{th}}$ bewertet. Im zweiten Schritt wurde eine Marktstudie von den am Markt befindlichen relevanten Elektrofilterherstellern erstellt, in der sämtliche verfügbaren Daten gesammelt und daraus Kennzahlen abgeleitet wurden: Abscheidefläche pro Volumenstrom [$\text{m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$], Aufstellfläche [m^2], mittlere Abgasgeschwindigkeit im Bereich Abscheidefläche – bzw. Rohr [m/s].

Basierend auf den gesammelten Daten und den abgeleiteten Kennzahlen sowie den Vor-Ort-Untersuchungen wurde eine Evaluierung durchgeführt, aus welcher der Elektrofilterhersteller „Oekosolve“ (vor allem hinsichtlich der Abscheideeffizienz) als der vielversprechendste Elektrofilterhersteller hervorging:

Table 5.9 – Final evaluation results

	CCA	OekoSolve	APF
Charging and Collection	2,9	3,1	3,9
Insulator performance	3,0	1,0	5,0
Position	Good (5)	Bad (1)	Good (5)
Self-cleaning	No (1)	No (1)	Yes (5)
Particle re-entrainment	2,5	4,0	4,0
Flue gas velocity (m/s)	0,86 (4)	1,15 (3)	1,10 (3)
Collecting electrode geometry	High (1)	Low (5)	Low (5)
Area-to-flow ratio ($\text{m}^2/\text{m}^3/\text{s}$)	15,2 (3)	22,3 (5)	15,8 (3)

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

	CCA	OekoSolve	APF
Discharge electrode	3,0	2,3	3,7
Electric field strength (kV/cm)	6,7 (5)	4,5 (3)	1,4 (1)
Corona uniformity	Medium (3)	Low (1)	High (5)
Sparking potential	High (1)	Medium (3)	Low (5)
Cleaning	3,0	4,0	4,8
Collecting electrode	Moderate (3)	Very good (5)	Good (4)
Discharge electrode	Moderate (3)	Poor (2)	Very good (5)
Bypass	No (3)	Optional (4)	Integrated (5)
Time	Moderate (3)	Short (5)	Short (5)
Attachability	4,7	3,7	3,0
Footprint (m ²)	0,54 (5)	0,73 (3)	0,82 (2)
Maximum pressure loss (Pa)	50 (4)	25 (5)	50 (4)
Connections	Back/front (5)	Top (3)	Sides (3)

Zur weiteren Bewertung des Elektrofilters der Fa. Oekosolve wurden Versuchsläufe mit einem neuen Elektrofilter-Modell durchgeführt. Zusätzlich wurde aus den experimentell ermittelten Daten eine Sensitivitätsanalyse zur Identifizierung der relevantesten Input-Parameter hinsichtlich Abscheideeffizienz analysiert.

Folgende Zusammenhänge wurden untersucht:

- Abscheideeffizienz als Funktion der Länge des Abscheiderohres
- Abscheideeffizienz als Funktion des Durchmessers des Abscheiderohres
- Abscheideeffizienz als Funktion der Anzahl der parallel geführten Abscheiderohre
- Abscheideeffizienz als Funktion der Spannung der Sprühelektrode

Aus der Analyse der Input-Parameter konnte ein Vorschlag für die Auslegung eines Elektrofilters abgeleitet werden:

Table 6.4 – Suggested ESP design

	at 50 kW	at 80 kW
n [-]	2	2
m [-]	1	1
d [m]	0,2	0,2
h [m]	1,2	1,2
A [m ²]	0,754	0,754
Q [m ³ /s]	0,013	0,022
U [V]	30.000	30.000
E [V/m]	300.000	300.000
w [m/s]	0,030	0,030
η	83 %	64 %

Nach der Auswahl des Elektrofilterherstellers und der Abschätzung der Auslegungsparameter wurde mit der Fa. Oekosolve die Konzeptionierung des integrierten Elektrofilters begonnen.

3.3.6 Positionierung und Integration des Elektrofilters

Es zeigte sich, dass die sinnvollste Position für die Integration eines elektrostatischen Abscheiders nach dem Wärmeübertrager ist, da die Rauchgastemperaturen zwischen gekühlter Sekundärverbrennungszone und den Rauchrohrbündeln mit rund 750 °C noch sehr hoch sind und eine Positionierung zwischen zwei Rauchrohrbündeln mit erhöhtem Aufwand und somit erhöhten Kosten verbunden wäre. Dies begünstigt darüber hinaus auch eine modulare Bauweise der Anlage je nach Bedarf mit oder ohne Elektrofilter (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18: Eine Positionierung des integrierten Elektrofilters nach dem Wärmetauscher unterstützt eine modulare Bauweise.

Ein Hauptaugenmerk bei der Konzeptionierung war die Einhaltung der Abscheideeffizienz im Dauerbetrieb. Es ist bekannt, dass die Abscheideeffizienz durch das Anhaften bzw. Ablagern von

Staubpartikel an der Sprüh- und Abscheideelektrode verringert wird. Deshalb wurde der Elektrofilter mit einem automatischen mechanischen Abreinigungsmechanismus versehen, welcher in einstellbaren zeitlichen Intervallen die Elektroden reinigt.

Ein weiterer Vorteil des integrierten Elektrofilters ist die Möglichkeit, einen Bypass vorzusehen. Dadurch wird gewährleistet, dass während der automatischen mechanischen Abreinigung der Rauchgasvolumenstrom über den Bypass und nicht durch das Abscheiderohr strömt und somit auch kein Wiedereintrag von bereits abgeschiedenen Staubpartikeln möglich ist.

Hinsichtlich der Optimierung des Kundenkomforts wird der Elektrofilter optional mit einer automatischen Ascheaustragung konzipiert, welche mittels einer Transportschnecke die abgeschiedene Asche in einen externen Behälter befördert. Bei der Konzeptionierung der Ascheaustragung wurde darauf geachtet, dass die Transportschnecke im unteren Teil des Aschebehälters angeordnet ist, damit die Asche im Behältnis aufgeschoben und vor allem verdichtet wird. Durch das Verdichten der abgeschiedenen Flugasche kann das Entleerungsintervall um bis das 5-fache verlängert werden (ähnliches Entleerungsintervall wie beim Rostasche-Behälter), wodurch sich die Anzahl der Wartungsarbeiten bzw. die notwendigen Manipulationen bei der Anlage stark reduzieren.

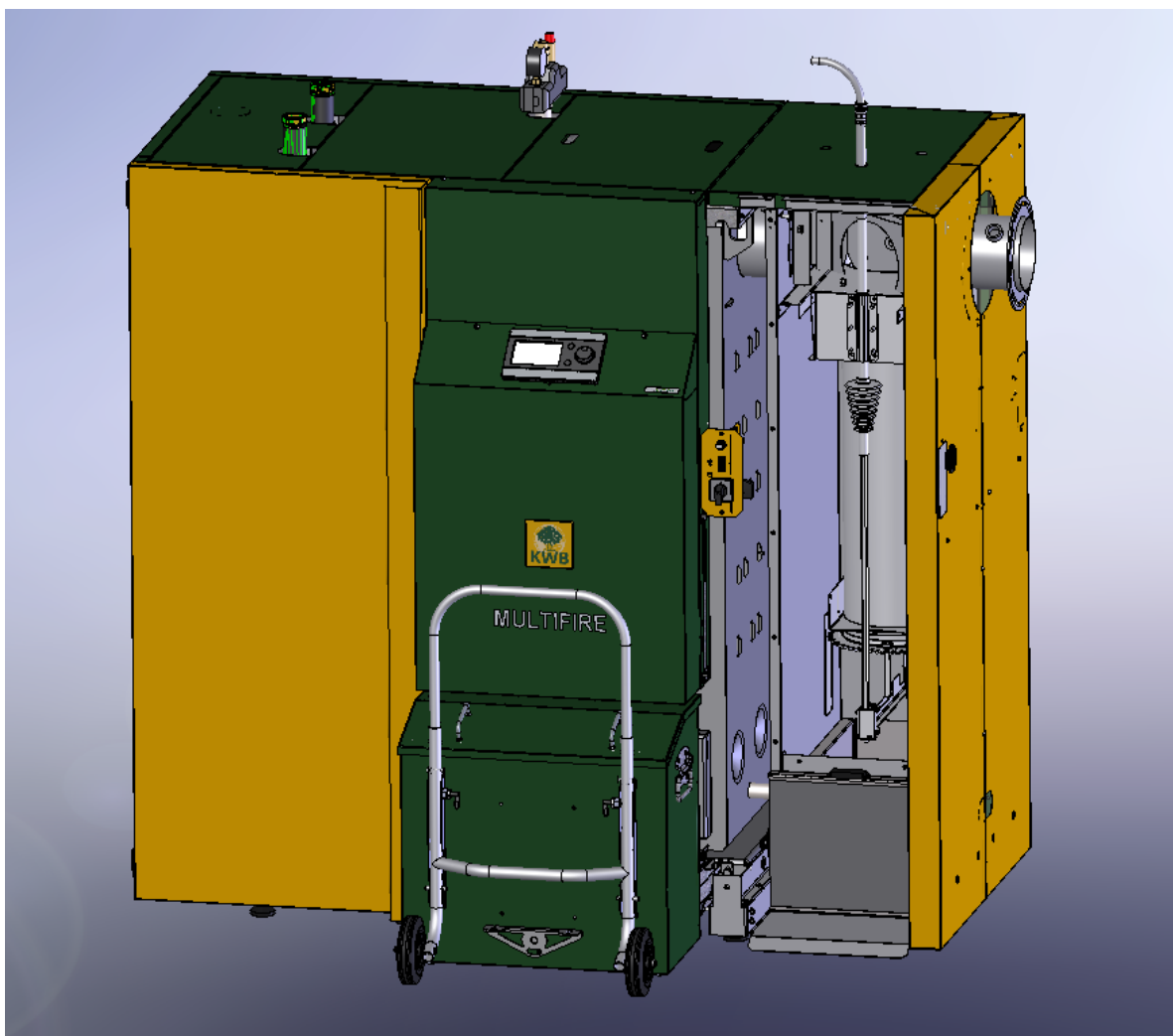


Abbildung 19: Detailzeichnung des integrierten Elektrofilters.

3.4 Entwicklung einer modellbasierten Regelung

3.4.1 Motivation und Ausgangslage

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Regelung bei der Verbrennung alternativer Brennstoffe in Kleinfeuerungen sind denen der Regelung von Hackgut-Feuerungen sehr ähnlich, weshalb diese in der Folge näher erläutert werden soll.

Standardmäßig zur Regelung von Hackgut-Feuerungen verwendete Regelungen basieren auf der idealisierten Annahme, dass die Regelkreise einander nicht beeinflussen und verwenden meist lineare Regler (PID), die die verkoppelten und nichtlinearen Zusammenhänge des Systems nur teilweise oder gar nicht berücksichtigen. Dadurch sind sie prinzipiell nicht in der Lage, das volle Potential zur Schadstoffminimierung und Effizienzmaximierung moderner Anlagen auszuschöpfen. Bei alternativen Brennstoffen wird dieser Umstand noch dahingehend verschlechtert, dass diese meist noch größeren Schwankungen der Brennstoffeigenschaften unterliegen und insbesondere in Anbetracht der zuvor erläuterten Feinstaubproblematik, die schlechte Regelgenauigkeit ein noch größeres Problem darstellt.

Die sinnvollste Alternative stellen modellbasierte Regelungen dar, die auf mathematischen Modellen für das dynamische Verhalten aller für das Betriebsverhalten relevanten Anlagenteile basieren. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass immer alle Vorgänge und Interaktionen im zu regelnden System gemeinsam betrachtet werden. Aus diesem Grund wurden im Laufe der letzten Jahre von BE2020 mehrere kooperative Forschungsprojekte zur Entwicklung modellbasierter Regelungsstrategien für Hackgut-Feuerungen verschiedener Leistungsbereiche (30 kW bis 15 MW) und Bauformen durchgeführt [1-3]. Dabei wurde zunächst die Feuerung durch entsprechende Teilmodelle für die regelungstechnisch relevanten Anlagenteile mathematisch beschrieben. Dabei sind die erarbeiteten Modelle für den Rauchrohr-Wärmeübertrager [4], die Speicherwirkung des Schamotts [2,5], die Verbrennung des umgesetzten Brennstoffs mit der zugeführten Luft [6] und die Druck-Volumenstrom-Verhältnisse in der Luftzufuhr [7], mit entsprechender experimenteller Anpassung der Parameter auch für die Verbrennung der zu untersuchenden alternativen Brennstoffe geeignet.

Bei den bisherigen Verifikationen der modellbasierten Regelung in Hackgutfeuerungen in verschiedenen Leistungsbereichen (30 kW bis 15 MW) hat sie ihr Potential zur Verbesserung des Betriebsverhaltens deutlich unter Beweis gestellt [1, 2, 5]. Die modellbasierte Regelung kann alle Betriebsparameter deutlich stabiler auf den geforderten Werten halten und viel schneller und zielgerichteter auf Änderungen der Lastanforderung sowie des Brennstoffwassergehaltes reagieren. Letztendlich führt dies sowohl zu einer deutlichen Reduktion der Schadstoffemissionen, als auch einer deutlichen Wirkungsgradsteigerung, insbesondere im Teillastbetrieb. Insbesondere die Möglichkeit, das Luftverhältnis im Brennstoffbett und somit die mittlere Temperatur im Brennstoffbett explizit regeln zu können, was mit konventionellen Regelungen nicht einmal ansatzweise möglich ist, spielt für die Verbrennung alternativer Brennstoffe und den damit verbundenen Problemen (Agglomerationen im Brennstoffbett) eine besondere Bedeutung.

Beispielhaft für das große Potential zur Schadstoffreduktion zeigt Tabelle 1 die bei der Implementierung der modellbasierten Regelung an einer marktverfügbaren Hackgut-Kleinfeuerungen (Nennleistung 30 kW), welche bereits mit mehreren Gütesiegeln ausgezeichnet wurde (z.B. Österreich: Umweltzeichen, Deutschland: Blauer Engel), erzielte Reduktion der Gesamtstaub- und Feinstaubemissionen.

Tabelle 1: Staubemissionen einer Hackgut-Feuerung mit konventioneller und modellbasierter Regelung

(* Gesamtstaubmessung: VDI 2066-1, PM1-Messung mit Berner-Niederdruck-Kaskadenimpaktor)

Leistung	Emissionen [mg/Nm ³ 13% O ₂ tr.RG]	Konventionelle Regelung	Modellbasierte Regelung
Volllast 30 kW	Gesamtstaub ⁺	33,88	26,97
	PM1 [*]	25,20	19,92
Teillast 9 kW	Gesamtstaub ⁺	108,80	39,07
	PM1 [*]	94,74	22,94

Zu Beginn des Projektes wurde davon ausgegangen, dass die modellbasierte Regelung für alternative Brennstoffe zum Teil neu entwickelt werden müsste. Das Abbrandverhalten der zu untersuchenden alternativen Brennstoffe weicht teilweise stark von jenem von Hackgut ab, und insbesondere die dynamischen Eigenschaften der entsprechenden Brennstoffbette waren noch gänzlich unbekannt, für die Entwicklung einer modellbasierten Regelung und der damit erzielbaren gezielten Regelung des Luftverhältnisses im Brennstoffbett λ_{BB} , sowie der mittleren Temperatur im Brennstoffbett aber zwingend erforderlich. Da die verwendete Methode zum Reglerentwurf in erster Linie von der mathematischen Struktur des Modells abhängt, welches das System beschreibt, war davon auszugehen, dass auch der Reglerentwurf neu durchgeführt werden muss, da sich das geänderte Abbrandverhalten in einem anderen Modell mit geänderter Struktur niederschlagen sollte. Dieser Umstand konnte aber in den Untersuchungen nicht nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 3.2.1).

Stattdessen lag der weitere Fokus des Projektes darin, die bestehende monolithische Reglerstruktur, welche das Gesamtsystem aus Brennstoffbett, Gasphasenausbrand und Wärmeübertragung betrachtete und mit Hilfe moderner regelungstechnischer Verfahren (z.B. flachheitsbasierte Vorsteuerung, exakte Ein-/Ausganglinearisierung, Internal Model Control) regelte, in einfacher durchschaubare Teilregler zu unterteilen. Dadurch sollten einerseits die Einsicht und das Verständnis für die einzelnen resultierenden Stellgrößen erhöht werden und somit die Akzeptanz für moderne, modellbasierte Regelverfahren bei den Industriepartnern erhöht werden. Andererseits sollten die existierende Probleme, insbesondere variierende Luftverhältnisse im Brennstoffbett bei schnellen Lastwechseln und schwer in den Griff zu bekommende Effekte beim Erreichen von Stellgrößenbeschränkungen, vermieden werden. Die wesentliche Eigenschaft modellbasierter Regelungen, die gegenseitigen Verkopplungen der einzelnen Regelkreise berücksichtigen zu können, sollte dabei aber nicht aufgegeben werden. Das entwickelte Konzept ist im folgenden Abschnitt 3.4.2 beschrieben.

Die Sicherstellung des vollständigen Gasphasenausbrandes erfolgt bei der modellbasierten Regelung, wie auch bei konventionellen Regelungen, über die Regelung des Restsauerstoffgehaltes. Der optimale Sollwert für den Sauerstoffgehalt im Sinne minimaler Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad ist aber nicht konstant, sondern variiert mit der vom Betriebszustand sowie vom eingesetzten Brennstoff abhängenden CO- λ -Charakteristik. Zusätzlich dazu verfügen die in der Praxis meist eingesetzten Lambdasonden zur Messung des Sauerstoffgehaltes über vergleichsweise große Messfehler. Dadurch ist es prinzipiell nicht möglich, die Anlage immer im optimalen Punkt der CO- λ -Charakteristik zu

betreiben, was mit einem deutlichen Anstieg der Schadstoffemissionen einhergeht. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde von BE2020 ein neuer Ansatz zur CO- λ -Regelung unter Verwendung eines Sensors zur kombinierten Sauerstoffmessung und Detektion unverbrannter Komponenten (KS1D des Projektpartners LAMTEC) verfolgt. Dieser Sensor ist zwar kein CO-Sensor im eigentlichen Sinn, kann aber alle Tendenzen in der Ausbrandqualität richtig detektieren. Der Ansatz basiert auf einer kontinuierlichen Schätzung der CO- λ -Charakteristik mit einem Kalman-Filter und einer darauf basierenden, kontinuierlichen Anpassung des Sollwertes für den Sauerstoffgehalt. Bei den bislang durchgeführten Testläufen zur experimentellen Verifikation des neuen Ansatzes zur CO- λ -Regelung konnte die grundsätzliche Sinnhaftigkeit dieses Ansatzes eindeutig unter Beweis gestellt werden. Es ist gelungen, auf plötzlichen Falschlufteintrag (unvollständiges Schließen der Aschebox) und Drift der Sauerstoffmessung sehr zielgerichtet zu reagieren und dadurch den drastischen Anstieg der Schadstoffemissionen, die sich ohne die CO- λ -Regelung ergeben hätte, wirkungsvoll zu vermeiden. Auch einen Wechsel des Brennstoffwassergehaltes oder schnelle Laständerungen und die damit verbundenen Änderungen der CO- λ -Charakteristik konnten grundsätzlich gut kompensiert werden, es zeigte sich dabei aber auch, dass insbesondere während der Änderungen das volle Potential der Methode noch nicht ausgeschöpft werden konnte. Aufgrund der bedeutenden Verbesserung für den realen Einsatz von Biomassefeuerungen, die diese CO- λ -Regelung zu bringen vermag, wurden diese Aktivitäten weiter geführt und auch für die Verbrennung nicht holzartiger Brennstoffe angepasst. Die bereits durchgeführten Arbeiten für Hackgut-Feuerungen stellen dabei eine wesentliche Basis dar. Die üblicherweise deutlich größeren Schwankungen der Brennstoffeigenschaften bei alternativen Brennstoffen sind mit einer größeren Variation der CO- λ -Charakteristik verbunden, weshalb wesentliche Modifikationen der bei Hackgut in ihren Grundzügen erprobten Methode erforderlich wurden.

3.4.2 Konzept der Feuerungs-Regelung

Bei der Analyse der bestehenden Regelung stellte sich heraus, dass das bestehende monolithische Konzept der Brennstoffbettregelung nicht für Brennstoffe mit problematischem Ascheschmelzverhalten (wie z.B. Stroh) geeignet ist. Der Grund dafür liegt in der schnellen Ansteuerung des Primärluftmassenstroms bei schnellen Leistungsänderungen, welcher in einer starken Änderung des Luftverhältnisses im Brennstoffbett resultiert. Dadurch kommt es auch zu einer temporären Erhöhung der Temperaturen im Brennstoffbett, welche bereits für das Schmelzen der Asche auf dem Rost ausreichen kann. Aus diesem Grund wurde das Konzept der Regelung hinsichtlich der Einhaltung des gewünschten Luftverhältnisses im Brennstoffbett überarbeitet.

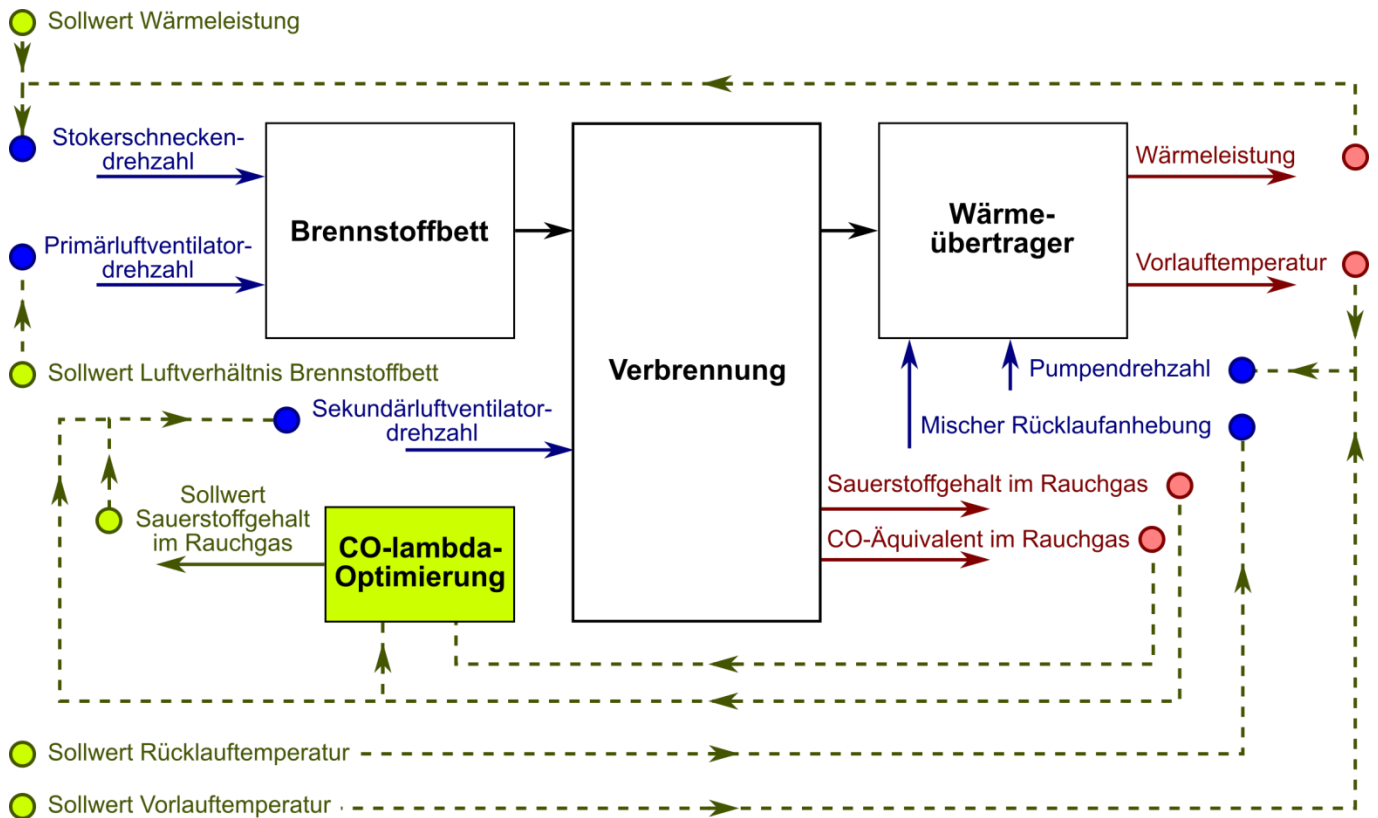


Abbildung 20: Struktur der Regelungsstrategie. In grün Sollgrößen, in rot Messgrößen, in blau Stellgrößen

Die **Regelung des Brennstoffbetts** geschieht nun durch die Methode der Modellprädiktiven Regelung. Durch diese wird der Brennstoffmassenstrom über die Variation der Taktung der Stokerschnecke so vorgegeben, dass die gewünschte Leistung an das Wasser im Wärmeübertrager gelangt. Der Massenstrom der Primärluft wird basierend auf Modellwissen so eingestellt, dass das Luftverhältnis im Brennstoffbett so wenig wie möglich vom gewünschten Wert abweicht. Dazu kommen die Modelle des Brennstoffbetts, der Verbrennung und des Wärmeübertragers zum Einsatz, da die relevanten Größen nicht direkt gemessen werden können. Dadurch wird sichergestellt, dass die Temperatur im Brennstoffbett so konstant wie möglich bleibt und Ascheschmelze vermieden werden kann.

Die **Regelung der Gasphasenverbrennung** (Sauerstoffgehalt des Rauchgases und resultierende Emissionen) geschieht über die gezielte Vorgabe des Sekundärluftmassenstroms. Dieser wird mit Hilfe der mathematischen Modelle des Brennstoffbetts und der Verbrennung bereits so vorgesteuert, dass vorhersehbare Änderungen des Anlagenbetriebs (z.B. Leistungsänderung) vollständig kompensiert werden, bevor sie den gemessenen Sauerstoffgehalt beeinflussen. Die Vorgabe des gewünschten gesamten Luftüberschusses bzw. des Sauerstoffgehaltes im Rauchgas erfolgt dabei über ein Optimierungsverfahren, welches im kommenden Abschnitt 3.4.3 beschrieben wird.

Da die Primärluft nun nicht mehr für die Leistungsregelung herangezogen wird, kann eine Leistungsänderung nicht mehr so schnell erfolgen, wie es durch die bisherige modellbasierte Regelung möglich war. Um dennoch eine möglichst konstante **Vorlauftemperatur** des Wärmeübertragers gewährleisten zu können, wird der Wassermassenstrom als neue Stellgröße verwendet. Dabei wird die Wasserpumpe modellbasiert (Wärmeübertragermodell) so angesteuert, dass die Vorlauftemperatur stets dem Sollwert entspricht. Mit dieser Regelung können auch Änderungswünsche an die Vorlauftemperatur

schneller umgesetzt werden, als dies durch eine reine Veränderung des Brennstoffmassenstroms möglich wäre. Die Vorlaufemperatur kann mit dieser Regelung auf $\pm 0,5$ °C genau gehalten werden. Dies stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber der Standardregelung dar.

3.4.3 CO- λ -Regelung

Die CO- λ -Regelung (Ausbrandregelung) dient als übergeordneter Regelkreis, welcher der untergeordneten Feuerungsregelung einen Sauerstoffsollwert übergibt. Dieser Sauerstoffsollwert wird dabei optimal im Sinne der CO- λ -Charakteristik gewählt. Damit wird zum einen gewährleistet, dass die CO-Emissionen gering ausfallen (ausreichende Zufuhr von Sauerstoff), zum anderen wird sichergestellt, dass die Anlage möglichst effizient betrieben wird.

Um diesen optimalen Sollwert bestimmen zu können, verwendet der CO- λ -Regelungsalgorithmus Messwerte des Sauerstoffgehalts und der CO-Emissionen (eine Lamtec KS1D Kombinationssonde liefert beide Werte), um die Modellparameter des in Abschnitt 3.2.4 entwickelten Modells der CO- λ -Charakteristik zur Laufzeit zu bestimmen. Dadurch werden Änderungen der CO- λ -Charakteristik unabhängig vom verwendeten Brennstoff und dem Betriebszustand der Feuerung detektiert und stets der optimale Sollwert für den Sauerstoffgehalt vorgegeben.

3.4.4 Zustandsschätzer zur Anpassung an wechselnde Brennstoffeigenschaften

Die Änderung der Brennstoffeigenschaften bei Brennstoffwechseln muss durch die Regelung erkannt und ausgeglichen werden. Dabei ändern sich die Schüttdichte des Brennstoffs und dadurch die je Schneckenumdrehung eingeschobene Masse, der Brennstoffwassergehalt und die chemische Zusammensetzung des Brennstoffs. Um auf diese Änderungen reagieren zu können, wurden Zustandsschätzer entwickelt, welche vorhandene Messdaten und die entwickelten mathematischen Modelle verwenden, um die Schüttdichte, den Wassergehalt des Brennstoffs und den Energieinhalt des Brennstoffs abzuschätzen. Dazu werden alle vorhandenen Messgrößen in einen Kalman-Filter mit mehreren mathematischen Modellen statistisch optimal fusioniert und jeweils der bestmögliche Schätzwert für die relevanten Brennstoffeigenschaften ermittelt. Diese Schätzwerte werden dann der modellbasierten Feuerungsregelung übergeben.

Es wurden zwei Ansätze für den Zustandsbeobachter in verschiedenen Varianten entwickelt und in Simulationsstudien sowie Feldversuchen analysiert und bewertet:

(1) Kalman-Filter 2.Ordnung im Verbindung mit einem LMS-Algorithmus

- Es kommt ein Extended Kalman-Filter zur Bestimmung des Anlagenzustands basierend auf einem linearisierten dynamischen Modell des Brennstoffbetts zum Einsatz.
- Es wird der LMS-Algorithmus zur Schätzung der Brennstoffeigenschaften basierend auf einem stationären Modell der Auswirkung der Brennstoffeigenschaften auf den Anlagenbetrieb verwendet.
- Vorteil: Die Methode ist einfach zu implementieren und zu parametrieren.
- Nachteil: Es wird lediglich ein stationäres Modell der Auswirkung der Brennstoffeigenschaften auf den Anlagenbetrieb verwendet. Dadurch kann es während einer Änderung der Brennstoffeigenschaften zu großen Fehlern bei der Schätzung des Anlagenzustands kommen.

(2) Kalman-Filter 4. Ordnung

- Es kommt ein Extended Kalman-Filter basierend auf einem linearisierten dynamischen Modell des Brennstoffbetts und einem linearisierten dynamischen Modell der Auswirkung der Brennstoffeigenschaften auf den Anlagenbetrieb zum Einsatz.
- Vorteil: Die Methode ist einfach zu implementieren und weist gutes dynamisches Verhalten bei der Schätzung der Brennstoffeigenschaften auf.
- Nachteil: Im Vergleich zum Kalman-Filter 2. Ordnung + LMS ist die Parametrierung des Schätzers schwieriger.

3.4.5 Simulation der Feuerungsregelung

Die Feuerungsregelung samt der Erweiterung um Zustandsschätzer sowie die CO- λ -Regelung wurden in ausgedehnten Simulationsstudien untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Regelung die Regelgrößen stationär genau regeln kann, also dafür sorgt, dass im eingeschwungenen Zustand alle Messwerte den Sollwerten entsprechen. Darüber hinaus zeigte sich auch, dass der Einsatz der modellbasierten Regelung zu einer Dämpfung der durch die Rostbewegung induzierten Abbauschwankungen und dadurch zu einer Vergleichmäßigung der bereitgestellten Wärme führt. Dies wirkt sich besonders positiv auf die Qualität des Abbrands aus, da der Sauerstoffgehalt des Rauchgases (und dadurch das Gesamtluftverhältnis) in einem sehr schmalen Band um den Sollwert gehalten werden kann. Somit kann das volle Potential der CO- λ -Regelung ausgeschöpft und die Emissionen minimiert sowie der Wirkungsgrad der Anlage maximiert werden.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Modellbasierte Regelung

4.1.1 Feuerungs-Regelung

Für die modellprädiktive Brennstoffbettregelung wurde ein iteratives, numerisches Verfahren zur Lösung von nichtlinearen Optimierungsproblemen adaptiert und auf die Steuerung portiert [9]. Damit kann das nichtlineare Brennstoffbettmodell direkt übernommen und die Basis für zukünftige Erweiterungen gelegt werden. Die Leistungsregelung ist als Vorsteuerung mit einem überlagerten Störgrößenbeobachter implementiert, welcher die Menge an geschätztem abgebautem Brennstoff mit der an das Wasser abgegebenen Wärme vergleicht und basierend darauf die Forderung nach Brennstoff am Brennstoffbett so adaptiert, dass die gewünschte Wärmeleistung geliefert wird.

Neben der Einstellung der gewünschten Wärmeleistung über den Brennstoffmassenstrom regelt die modellbasierte Feuerungsregelung drei physikalische Anlagengrößen:

- Vorlauftemperatur des Kessels
- Sauerstoffgehalt des Rauchgases
- Luftverhältnis im Brennstoffbett

Das Betriebsverhalten der an der Versuchsanlage implementierten modellbasierten Regelung wurde auf Basis mehrerer Testläufe mit unterschiedlichen Brennstoffen evaluiert. Beispielfähig wird an dieser Stelle ein Versuch des Anlagenbetriebs mit Maisspindel-Grits bei einer konstanten Wärmeleistung von 30 kW_{th} gezeigt. Es werden die Ergebnisse aus dem Betrieb mit der modellbasierten Regelung mit denen aus dem Betrieb mit der bestehenden Regelung von KWB („Standardregelung“) verglichen. Tabelle 2 beinhaltet die eingestellten Sollwerte für die bestehende Standardregelung von KWB und die neue, modellbasierte Regelung von BE2020+.

Tabelle 2: Eingestellte Sollwerte für die Versuche zum Vergleich zwischen der bestehenden Regelung von KWB und der neu entwickelten, modellbasierten Regelung von BE2020+. Der verwendete Brennstoff war jeweils Maisspindel-Grits. Es wurde eine Wärmeleistung von 30kW_{th} vorgegeben.

Eingestellte Sollwerte	ALTE Standardregelung	NEUE Modellbasierte Regelung
Luftverhältnis im Brennstoffbett (λ_{BB})	wird nicht geregelt	0,9
Sauerstoffgehalt des Rauchgases in Vol.-%	10 Vol.-%	8 Vol.-%
Vorlauftemperatur in °C	83°C	85°C

Luftverhältnis im Brennstoffbett

Die modellbasierte Regelung von BE2020+ ermöglicht die gezielte Vorgabe des Luftverhältnisses im Brennstoffbett (λ_{BB}). Dies ist mit der bestehenden Regelung von KWB nicht möglich, wodurch sich ein Luftverhältnis im Brennstoffbett abhängig von anderen Prozessparametern (z.B. Leistung und verwendeter Brennstoff) einstellt.

Sauerstoffgehalt des Rauchgases

Speziell in Teillast ergeben sich im Betrieb mit der Regelung von KWB relativ hohe Luftverhältnisse im Brennstoffbett (typischerweise $\lambda_{BB}>1$), wodurch es in weiterer Folge nicht möglich ist, den Sauerstoffgehalt des Rauchgases auf dem standardmäßig eingestellten Wert von 8 Vol.-% zu halten. Aus diesem Grund wurde der Sollwert für den Sauerstoffgehalt des Rauchgases im Falle der bestehenden Regelung von KWB mit 10 Vol.-% definiert.

Vorlauftemperatur

Der Sollwert für die Vorlauftemperatur wurde für die bestehende Regelung von KWB mit 83°C und für die modellbasierte Regelung von BE2020+ mit 85°C definiert. Die Rücklauftemperatur des in den Kessel eintretenden Wassers betrug in beiden Fällen 65°C. Die modellbasierte Regelung von BE2020+ verwendet den Wassermassenstrom als Stellgröße, um die Vorlauftemperatur bei einer gegebenen rauchgasseitigen Wärmeleistung einzustellen. Dadurch können durch die modellbasierte Regelung von BE2020+ unterschiedliche Werte für die Vorlauftemperatur (und auch unterschiedliche Spreizungen) beinahe unabhängig von der abgegebenen Wärmeleistung eingestellt werden.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In Abbildung 21 und Abbildung 22 werden Verläufe der **Vorlauftemperaturen** über einen Zeitraum von einer Stunde einmal mit der bestehenden Regelung von KWB und einmal mit der modellbasierten Regelung von BE2020+ geregelt dargestellt. Die neu entwickelte, modellbasierte Regelung kann die Vorlauftemperatur unabhängig von der erzeugten rauchgasseitigen Leistung deutlich genauer am Sollwert halten. Dadurch schafft die modellbasierte Regelung eine Entkopplung zwischen den Vorgängen in der Verbrennung und der Temperatur des an den Verbraucher abgegebenen Wassers.

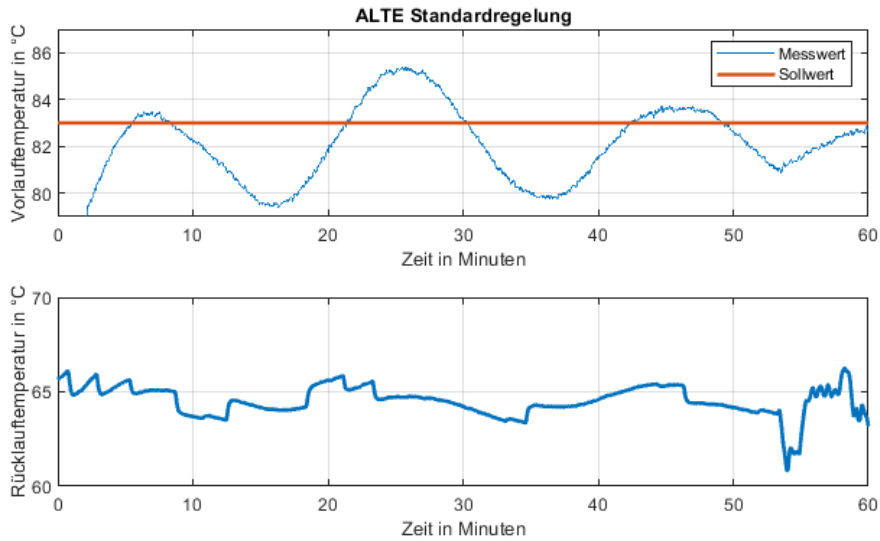


Abbildung 21: Verlauf der durch die bestehende Regelung von KWB ("Standardregelung") geregelten Vorlauftemperatur bei einer Leistung von 30kW_{th} und einem Betrieb mit Maisspindel-Grits. Mittelwert des Regelfehlers: 0,994°C bei einer Standardabweichung von 1,74°C.

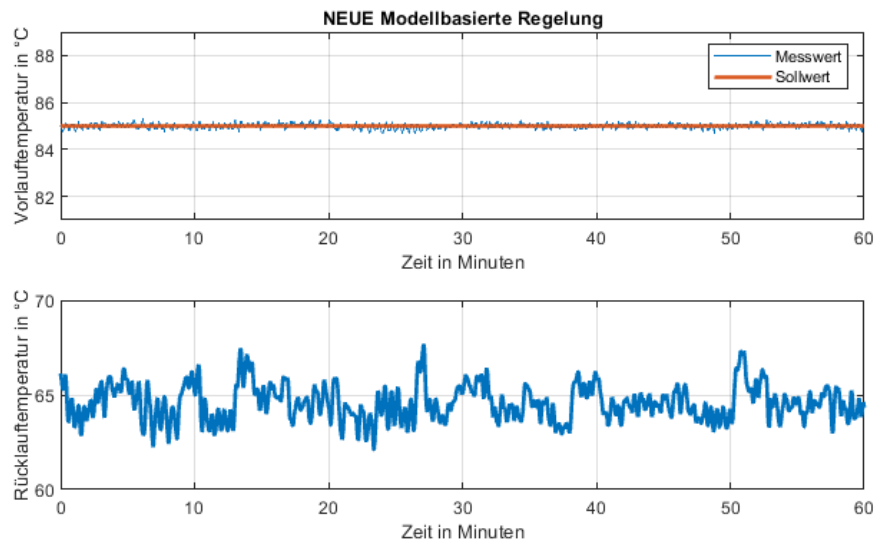


Abbildung 22: Verlauf der durch die neue modellbasierte Regelung von BE2020+ geregelten Vorlauftemperatur bei einer Leistung von 30kW_{th} und einem Betrieb mit Maisspindel-Grits. Mittelwert des Regelfehlers: 0,001°C bei einer Standardabweichung von 0,1°C.

Abbildung 23 und Abbildung 24 stellen die zeitlichen Verläufe des durch beide Regelungen eingestellten **Sauerstoffgehalts des Rauchgases** über einen Zeitbereich von einer Stunde dar. Dabei ist zu erkennen, dass die modellbasierte Regelung den Sauerstoffgehalt des Rauchgases deutlich genauer, mit geringeren Abweichungen am Sollwert halten kann. Dadurch sorgt die modellbasierte Regelung für eine gleichbleibende Verbrennungsqualität selbst für alternative Biomassebrennstoffe wie Maisspindel-Gritts.

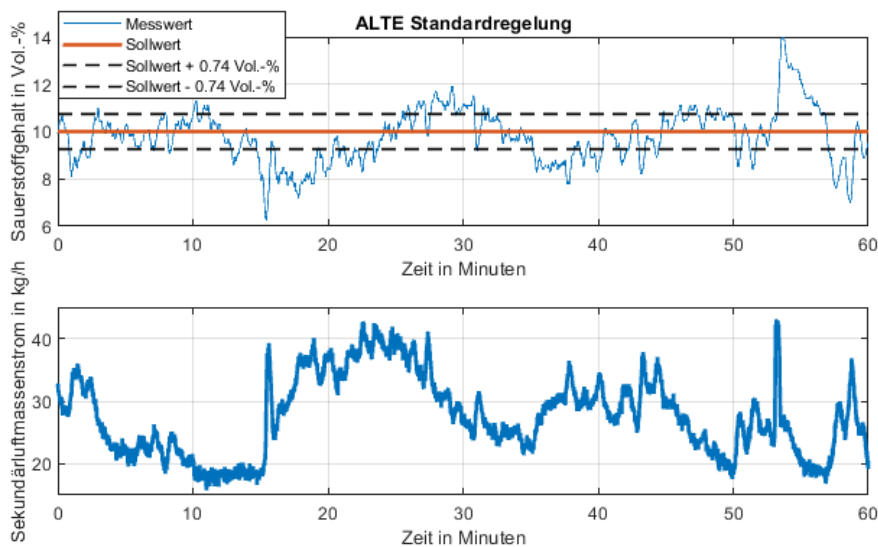


Abbildung 23: Verlauf des durch die bestehende Regelung von KWB ("Standardregelung") geregelten Sauerstoffgehalts des Rauchgases bei einer Leistung von 30kW_{th} und einem Betrieb mit Maisspindel-Gritts. Mittelwert des Regelfehlers: $-0,2$ Vol.-% bei einer Standardabweichung von $1,12$ Vol.-%.

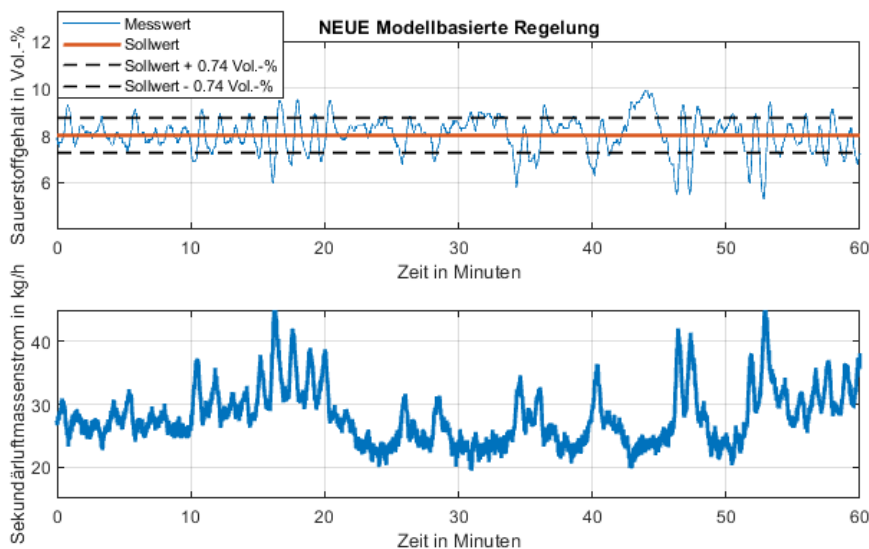


Abbildung 24: Verlauf des durch die neue modellbasierte Regelung von BE2020+ geregelten Sauerstoffgehalts des Rauchgases bei einer Leistung von 30kW_{th} und einem Betrieb mit Maisspindel-Gritts. Mittelwert des Regelfehlers: $-0,04$ Vol.-% bei einer Standardabweichung von $0,74$ Vol.-%.

In Abbildung 25 und Abbildung 26 werden die **Luftverhältnisse im Brennstoffbett**, einmal resultierend aus dem Betrieb mit der bestehenden Regelung von KWB und einmal geregelt durch die neu entwickelte, modellbasierte Regelung dargestellt. Die bestehende Regelung von KWB stellt das Luftverhältnis im Brennstoffbett nicht direkt ein, wodurch dieses von den Betriebsparametern wie zum Beispiel der Leistung oder dem verwendeten Brennstoff abhängt. Dadurch ergab sich für diesen Versuch ein Wert $\lambda_{BB}>1$. Die modellbasierte Regelung bietet die Möglichkeit, das Luftverhältnis im Brennstoffbett direkt einzustellen. Der gewünschte Sollwert von $\lambda_{BB}=0,9$ wurde durch die modellbasierte Regelung mit geringen Abweichungen eingehalten.

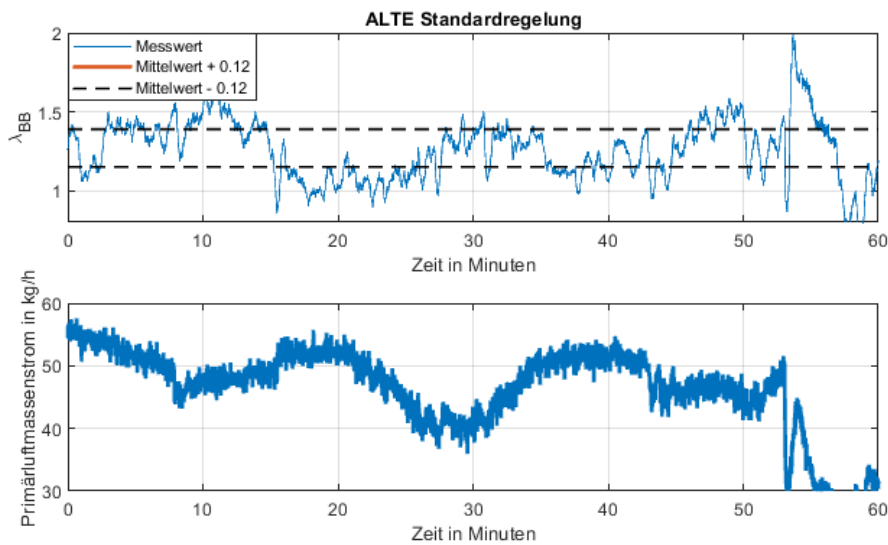


Abbildung 25: Verlauf des Luftverhältnisses im Brennstoffbett bei einem Betrieb mit der bestehenden Regelung von KWB ("Standardregelung") bei 30kWth mit Maisspindel-Grits. Dieser wird nicht direkt geregelt.

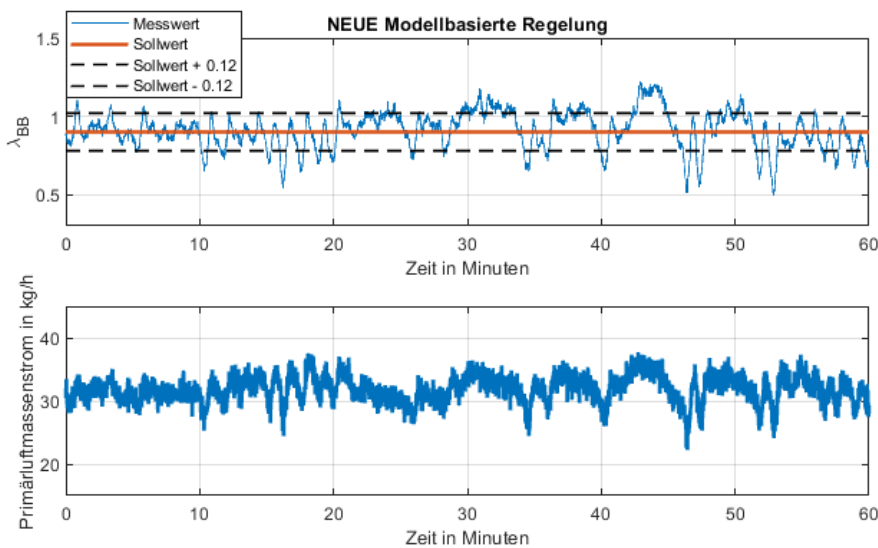


Abbildung 26: Verlauf des Luftverhältnisses im Brennstoffbett bei einem Betrieb mit der neuen modellbasierten Regelung von BE2020+ bei 30kWth mit Maisspindel-Grits. Mittelwert des Regelfehlers: -0,012 bei einer Standardabweichung von 0,12.

Tabelle 3 stellt einen Vergleich zwischen den mit beiden Regelungen geregelten Werten dar. Die Tabelle zeigt die arithmetischen Mittelwerte und die Standardabweichungen der jeweiligen Regelfehler für die in diesem Abschnitt dargestellten Verläufe. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die modellbasierte Regelung alle Größen genauer auf ihren Sollwerten halten kann. Diese beispielhaften Ergebnisse wurden auch in Versuchen mit anderen Brennstoffen bestätigt.

Tabelle 3: Beispielhafte Bewertung der Abweichung zwischen geregelten Größen und deren Sollwerten bei einem Betrieb mit beiden Regelungen bei einer Leistung von 30kW_{th} mit Maisspindel-Grits

Abweichung der geregelten Größen von den Sollwerten (Sollwert – Istwert)		ALTE Standardregelung	NEUE Modellbasierte Regelung
Vorlauftemperatur in °C	Mittelwert	0,994°C	0,001°C
	Standardabweichung	1,74°C	0,1°C
Sauerstoffgehalt des Rauchgases in Vol.-%	Mittelwert	0,2 Vol.-%	-0,04 Vol.-%
	Standardabweichung	1,12 Vol.-%	0,74 Vol.-%
Luftverhältnis im Brennstoffbett	Mittelwert	wird nicht geregelt	-0,012
	Standardabweichung		0,12

4.1.2 Zustandsschätzer zur Anpassung an wechselnde Brennstoffeigenschaften

Der Zustandsbeobachter zur Bestimmung der Brennstoffeigenschaften (Wassergehalt und Schüttdichte) sowie zur Schätzung des Zustandes des Brennstoffbetts (Masse an trockenem Brennstoff bzw. Wasser am Brennstoffbett) wurden in mehreren Varianten implementiert, um individuelle Vor- und Nachteile der Methoden zu evaluieren. Es stellte sich das erweiterte Kalman-Filter vierter Ordnung, welches sämtliche Brennstoffeigenschaften und Anlagenzustände zugleich schätzt, als die beste Variante heraus. Alternativ kann ein erweitertes Kalman-Filter 2. Ordnung als Zustandsschätzer gemeinsam mit einem LMS-Algorithmus zur Bestimmung der Brennstoffeigenschaften verwendet werden. Mit beiden Varianten ist es möglich, auf sich ändernde Brennstoffeigenschaften zu reagieren. Als Schwierigkeit stellen sich jedoch wieder die Abbauschwankungen dar, welche eine Parametrierung der Schätzverfahren erschweren: Bei zu aggressiv gewählten Parametern schwingen die Schätzgrößen mit den Abbauschwankungen mit und können diese über die Rückwirkung der Regelung sogar noch verstärken; dafür kann die Regelung schnell auf wechselnde Brennstoffeigenschaften reagieren. Umgekehrt können zu konservativ gewählte Parameter dazu führen, dass z.B. der Wechsel von Hackgut auf Pellets erst sehr spät erkannt wird und damit eine temporäre Überhitzung der Anlage auftritt.

4.2 Emissionsmessungen mit dem Versuchs-Elektrofilter

Um die Funktionsweise und Wirkung bzw. die Abscheiderate des integrierten Elektrofilters zu verifizieren bzw. in weiterer Folge zu validieren wurden umfangreiche Testkampagnen mit verschiedenen Brennstoffen (Weichholzpелlets als Referenz; Pappel-Hackgut und Maisspindel-Grits) und variierenden Anlagenbetriebsparametern durchgeführt.

4.2.1 Methodik

Nachfolgend angeführte Methodik diente als Grundlage bei der Versuchsdurchführung:

- Zu Beginn und während jedes Messtages wurde der eingesetzte Brennstoff beprobt. Aus den Tagesproben wurden für die verwendeten Brennstoffe Mischproben gebildet. Die Charakterisierung dieser Mischproben erfolgte anschließend nasschemisch im Labor.
- Es wurden Emissionsmessungen im Rauchgas bei aktivem (gereinigter Rauchgasstrom) und inaktivem Versuchselektrofilter (ungereinigter Rauchgasstrom) durchgeführt. Im Rahmen der Testläufe wurden neben konventionellen Rauchgasanalysatoren zur Bestimmung der gasförmigen Emissionen verschiedene Messgeräte zur Bestimmung der partikelförmigen Emissionen, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten, eingesetzt. Aus diesem Grund stehen auch Ergebnisse mit unterschiedlichen Informationstiefen zur Verfügung. Für die angeführten kontinuierlichen und diskontinuierlichen Bestimmungen der partikelförmigen Emissionen wurden die folgende Verfahren bzw. Geräte verwendet:
 - Diskontinuierliche Gesamtstaubmessung: Die Gesamtstaubmessung wurde nach VDI 2066-1, welche auf der EN 13284-1 basiert, durchgeführt und repräsentiert die im Zuge von Prüfstandmessungen derzeit standardmäßig eingesetzte Methode. Bei dieser Methode wird ein Teilstrom des Rauchgases isokinetisch dem Rauchgaskanal entnommen und über einen Filter (Stopfhülse oder Planfilter) gesaugt. Für die Testläufe dieses Projektes wurden Planfilter eingesetzt, die den Staub im Filter zurückhalten. Die Staubbiladung des Rauchgases wird aus der Gewichtsdiiferenz des Filters vor und nach der Messung sowie dem abgesaugten Rauchgasvolumen, welches mittels Gasmengenzähler bestimmt wird, berechnet. Die Gesamtstaubmessungen wurden im unverdünnten Rauchgasteilstrom durchgeführt.
 - Diskontinuierliche Bestimmungen der Feinstaubgehalte und Korngrößenverteilung mittels gravimetrischem Kaskadenimpaktor (DGI-System): Bei den DGI-Messungen wurde ebenfalls ein Teilstrom des Abgases dem Rauchgaskanal entnommen und über den Impaktor (DGI) geleitet. Zur Vorabscheidung grober Staubpartikel war vor dem Impaktor ein Zyklon geschaltet. Der DGI besteht aus 4 Stufen mit Trennkörnern von 0,2 / 0,5 / 1 / 2,5 μm , in denen das Abgas jeweils einer Strömungsrichtungsänderung unterworfen wird. Partikel, die zu groß (schwer) sind, dieser Richtungsänderung zu folgen, werden auf einer Al-Folie in der jeweiligen Stufe abgeschieden. Die Stufen sind so konfiguriert, dass von Stufe zu Stufe die Umlenkungen des Rauchgases schärfer werden, und somit kleinere Partikel abgeschieden werden. Des Weiteren verfügt der Impaktor über einen Endfilter, in dem nach der letzten Stufe im Abgas verbliebene Partikel zurückgehalten werden. Insgesamt standen zwei baugleiche DGI für die Messungen zur Verfügung. Die Partikelbeladung pro Stufe wird durch Verwiegung der eingesetzten Al-Folien sowie des Endfilters vor und nach der Messung bestimmt. Aus der Gesamtbeladung und dem abgesaugten Rauchgasvolumen kann die Partikelkonzentration ermittelt werden. Das abgesaugte Rauchgasvolumen wurde über ein Massendurchflussmessgerät bestimmt. Um die Absaugzeit bzw. Beurteilungszeit zu erhöhen und um das Potential an noch nicht kondensierten

Kohlenwasserstoffen entsprechend berücksichtigen zu können, wurde bei spezifischen Testläufen zusätzlich eine Verdünnungseinheit (Porous Tube Diluter-PRD) eingesetzt. Diese war nach dem Zyklon bzw. vor dem Impaktor positioniert. Der PRD besteht aus einem Rohr aus poröser Keramik über dessen Poren die Verdünnungsluft über die gesamte Innenfläche des Rohres einströmt. Somit ist sichergestellt, dass das Rauchgas homogen vermischt wird.

- Kontinuierliche Bestimmung der Feinstaubgehalte mittels elektrischen Niederdruck-Kaskadenimpaktoren (ELPI): Auch bei den Messungen mit dem ELPI wurde ein Teilstrom dem Rauchgaskanal entnommen und mit Hilfe zweier in Serie geschalteter turbulenter Mischer (Ejector Diluter) verdünnt. Das Funktionsprinzip des turbulenten Mischers basiert auf der Ejektionsverdünnung. Die gereinigte Verdünnungsluft (Druckluft) erzeugt um eine Ejektordüse einen Druckabfall und das Rauchgas wird mit der Verdünnungsluft verdünnt. In der Mischkammer wird eine homogene Vermischung sichergestellt. Beim Einsatz für die ELPI-Messung wurde der erste turbulente Mischer auf das Niveau des abgesaugten Rauchgases erhitzt und der zweite bei Raumtemperatur betrieben. Es kann somit sichergestellt werden, dass Partikel vor der Verdünnung auskondensieren. Die Verdünnung vermindert zudem die Agglomeration der Partikel. Der ELPI arbeitet nach demselben Trennprinzip wie der DGI. Beim eingesetzten Modell liegen die Trennkörner der einzelnen Impaktorstufen bei 9,97/ 6,54/ 4,09/ 2,52/ 1,65/ 1,02/ 0,66/ 0,41/ 0,26/ 0,17/ 0,107/ 0,065 und 0,034 μm . Allerdings werden beim ELPI die Partikel vor Eintritt in den Impaktor elektrisch aufgeladen. Sie geben dann ihre Ladung auf der Stufe, auf der sie abgeschieden werden, wieder ab. Der so entstehende Strom wird gemessen. Aus den so erlangten Daten wird eine Anzahlverteilung der abgeschiedenen Partikel berechnet, wobei Abtastraten von 1 Sekunde möglich sind. Der ELPI ermöglicht somit die kontinuierliche Bestimmung der anzahlbezogenen Korngrößenverteilung der Aerosolemissionen. Um massenbezogene Daten zu erhalten wurde ein Korrekturfaktor für die Dichte und Partikelform der Partikel berücksichtigt. Aufgrund der Heterogenität der Partikel ist es nicht möglich durch theoretische Überlegungen verlässliche Korrekturfaktoren zu bestimmen. Deshalb wurden parallel zu den ELPI-Messungen, Messungen mit dem DGI durchgeführt um aus diesen massenbezogenen Ergebnissen einen mittleren Korrekturfaktor zu generieren.
- Bei den Testläufen wurde die Temperatur am Eintritt sowie am Austritt des E-Filters kontinuierlich bestimmt, um etwaige Kondensationsmechanismen untersuchen zu können.

4.2.2 Ergebnisse der nasschemischen Analyse

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der nasschemischen Analysen der während der Testläufe eingesetzten Brennstoffe zusammengefasst. Für die Testläufe wurden Weichholzpellets gemäß ENplus A1 (als Referenz), Pappel-Hackgut und Maisspindel-Grits eingesetzt. Da die Verifikation und Validierung des Elektrofilters über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurde, wurden mehrere Chargen an den verschiedenen Brennstoffen eingesetzt. Diese wiesen keine nennenswerten Unterschiede auf, wobei die Schwankungsbreite bei Kurzumtrieb (Pappel) sowie landwirtschaftlichen Produkten wie Mais gegenüber

standardisierten Weichholzpellets aufgrund regionaler Phänomene und Einflussparameter (z.B. Klima, Bodenzusammensetzung, Düngung, Erntetechnik und Lagerung, usw.) größer ist. Zusätzlich sind die Ergebnisse der nasschemischen Analysen der Weizenstrohpellets, welche während der Testläufe in AP3 eingesetzt wurden, dargestellt. Prinzipiell kann auf Basis der Analysenergebnisse gesagt werden, dass die eingesetzten Brennstoffe, wie ein Vergleich mit Datenbankwerten zeigte, repräsentativ sind und die Grenzwerte der Norm (ENplusA1) eingehalten wurden.

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe

Erläuterung: FS ... Frischsubstanz; TS ... Trockensubstanz; n.b. ... nicht bestimmt;

Parameter	Einheit	Maisspindel Grits			Pappel Hackgut		Weichholzpellets	Weizenstrohpellets
		Charge 1	Charge 2	Charge 3	Charge 1	Charge 2		
Wassergehalt	Gew. % FS	12,0	9,4	11,1	31,4	31,8	7,0	10,5
Aschegehalt	Gew. % TS	2,1	1,7	1,7	3,3	2,5	0,4	6,8
CO2-freier Aschegehalt	Gew. % TS	1,9	1,5	1,7	2,6	1,9	0,3	6,6
Oxidsumme	Gew. % TS	1,8	1,4	n.b.	2,3	2,0	0,3	6,3
C	Gew. % TS	47,7	47,5	47,6	48,7	48,7	50,2	45,4
C aschefrei	Gew. % TS	48,8	48,3	48,5	50,4	50,0	50,4	48,7
H	Gew. % TS	5,9	5,8	6,0	5,9	5,9	6,2	5,7
H aschefrei	Gew. % TS	6,0	5,9	6,1	6,1	6,0	6,2	6,1
N	Gew. % TS	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	0,6
S	mg/kg TS	297,0	265,0	n.b.	353,5	283,0	59,2	1.013,0
Cl	mg/kg TS	2.020,0	1.760,0	n.b.	62,4	64,1	61,7	1.841,3
Ca	mg/kg TS	210,5	156,0	n.b.	6.345,0	6.230,0	988,0	3.620,0
Si	mg/kg TS	970,5	473,0	n.b.	2.310,0	1.580,0	105,0	18.450,0
Mg	mg/kg TS	342,5	379,0	n.b.	747,0	688,0	137,0	946,5
K	mg/kg TS	9.890,0	7.800,0	n.b.	2.785,0	2.660,0	444,0	8.125,0
Na	mg/kg TS	19,7	6,4	n.b.	61,7	43,9	18,6	120,0
Pb	mg/kg TS	3,1	2,0	n.b.	4,1	2,5	2,4	6,0
Zn	mg/kg TS	13,9	14,0	n.b.	37,1	32,4	9,2	7,8
Cd	mg/kg TS	0,2	0,2	n.b.	0,8	0	0,1	0,3
Ba	mg/kg TS	1,2	0,5	n.b.	17,1	15,2	14,4	34,5
Cr	mg/kg TS	10,7	9,2	n.b.	4,3	2,8	0,4	7,5
Cu	mg/kg TS	3,0	3,1	n.b.	3,8	3,1	0,8	4,2
Ni	mg/kg TS	6,7	5,3	n.b.	7,2	1,7	0,4	4,2
Ti	mg/kg TS	26,3	26,0	n.b.	61,0	48,0	3,5	124,0
P	mg/kg TS	411,5	346,0	n.b.	629,5	547,0	32,9	607,5
Fe	mg/kg TS	125,9	53,2	n.b.	408,5	209,0	29,3	151,5
Al	mg/kg TS	51,7	8,4	n.b.	712,5	339,0	28,7	183,5
Mn	mg/kg TS	6,5	5,0	n.b.	28,2	36,7	98,0	30,7
Heizwert	MJ/kg TS	19,0	18,7	18,9	19,5	19,5	20,4	18,1
Heizwert aschefrei	MJ/kg TS	19,4	19,0	19,2	20,2	20,0	20,4	19,4
Brennwert	MJ/kg FS	15,3	15,6	15,4	11,3	11,6	17,5	14,8

Alle drei alternativen Biomassebrennstoffe sind im Vergleich zu holzartiger Biomasse (z.B. Weichholzpellets) durch höhere Konzentrationen von N, S, Cl sowie höhere Aschegehalte bzw. aschebildende Elemente (Ca, Si, Mg, K, Na) gekennzeichnet. K ist bei allen eingesetzten Brennstoffen das am stärksten konzentrierte aerosolbildende Element. Für die alternativen Brennstoffe wurden K-Konzentrationen, die um den Faktor 18-22 (Maisspindel Grits und Weizenstrohpellets) sowie Faktor 6 (Pappel) höher liegen als bei Weichholzpellets (444 mg/kg TS) analysiert. Die anderen aerosolbildenden Elemente (Na, Zn und Pb) weisen für alle untersuchten Brennstoffe gegenüber K wesentlich geringe Konzentrationen auf und liegen für die unterschiedlich eingesetzten Brennstoffchargen auf einem ähnlichen Niveau.

4.2.3 Bestimmung von spezifischen Brennstoffindizes

Basierend auf der chemischen Zusammensetzung der Brennstoffe sind spezifische Brennstoffindizes erhältlich bzw. können daraus berechnet werden. Diese Indizes charakterisieren die Umwandlungseigenschaften des Brennstoffes und liefern primär Vorabinformationen zu den zu erwartenden Verbrennungsverhalten, Ascheschmelztendenzen sowie den gasförmigen und partikelförmigen Emissionen (insbesondere Aerosolen). Durch Berechnung nachfolgender spezifischer Brennstoffindizes (siehe Tabelle 5), im Vorfeld der Testläufe, konnten somit bereits wertvolle Informationen zum Anlagenbetrieb und zu erwartenden Partikelemissionsniveau generiert und in die Testlaufplanung integriert werden:

- Die Summe der typischen Aerosolbildner (K, Na, Zn und Pb) als Indikator für Aerosol-emissionen und Depositionsbildungen
- Das molare 2S/Cl Verhältnis als Indikator dafür, ob anorganische Aerosole eher aus Chloriden oder Sulfaten bestehen sowie als Abschätzung des Hochtemperaturkorrosionsrisikos
- Das molare Cl/Si Verhältnis für eine Abschätzung der K-Freisetzung vom Brennstoff in die Gasphase
- Das molare $(Si+P+K)/(Ca+Mg+Al)$ sowie das molare $Si/(Ca+Mg)$ Verhältnis für Vorhersagen betreffend dem Ascheschmelzverhalten

Tabelle 5: Spezifische Brennstoffindizes der eingesetzten Brennstoffe

Parameter	Einheit	Maisspindel Grits			Pappel Hackgut		Weichholz-pellets	Weizenstroh-pellets
		Charge 1	Charge 2	Charge 3	Charge 1	Charge 2		
K+Na+Zn+Pb	mg/kg TS	9.926,6	7.822,4	n.b.	2.887,9	2.738,8	474,2	8.258,8
2 S/ Cl	mol/mol	0,33	0,33	n.b.	12,53	9,76	2,12	1,22
Cl/Si	mol/mol	1,65	2,95	n.b.	0,02	0,03	0,47	0,08
$(Si+P+K)/(Ca+Mg+Al)$	mol/mol	14,15	11,49	n.b.	0,81	0,72	0,52	6,50
$Si/(Ca+Mg)$	mol/mol	1,79	0,86	n.b.	0,44	0,31	0,12	5,08

Die Summe von K, Na, Zn und Pb weist auf einen mittleren bis hohen Aerosolemissionsbereich für alle drei neuen Biomassebrennstoffsportimente hin und zeigt auch ein höheres Potential für die Depositionsbildung auf Wärmetauscherrohren. Das molare 2S/Cl Verhältnis deutet auf eine verstärkte Sulfatbildung der Aerosole bei Pappel-Hackgut (Verhältnis deutlich über 1) sowie auf eine verstärkte Chloridbildung der Aerosole bei Maisspindel-Grits und Weizenstroh-pellets (Verhältnis rund um 1 und darunter) hin. Weiter ist eine verstärkte Chloridbildung auch hinsichtlich Hochtemperaturkorrosion zu berücksichtigen. Die erhöhten Werte des K-Freisetzungsexindex (molares Cl / Si-Verhältnis) von Maisspindel-Grits (hauptsächlich aufgrund des hohen Cl-Gehalts) können zu einer erhöhten K-Freisetzung aus dem Brennstoff in die Gasphase führen und hohe PM₁-Emissionen und folglich Ablagerungen an den Wärmetauscherrohren sind zu erwarten. Das molare $(Si + P + K) / (Ca + Mg + Al)$ -Verhältnis sowie das molare $Si / (Ca + Mg)$ -Verhältnis von Maisspindel-Grits und Weizenstroh deuten auf niedrige Ascheschmelztemperaturen hin und müssen bei der Einstellung der Anlagenparameter berücksichtigt werden, während für Pappel keine Probleme auftreten sollten. Weizenstroh zeichnet sich zusätzlich durch hohe Si-Gehalte aus. Dies ist von großer Bedeutung, da hohe K-Gehalte in Kombination mit hohen Si-Gehalten typischerweise zu sehr niedrigen Ascheschmelztemperaturen führen und Verschlackungs-probleme während der Verbrennung verursachen können

4.2.4 Ergebnisse der Testläufe

Nach erfolgter mechanischer Installation und regelungstechnischer Einbindung des E-Filters wurden die Testläufe zur Verifikation und Validierung gestartet. Um erste Erfahrungen mit dem Umgang und der Betriebsweise des E-Filters zu erhalten wurde die Feuerung zuerst mit Weichholzpellets betrieben, da für diesen Brennstoff die größte Erfahrung hinsichtlich Anlagenbetrieb vorhanden war und die Brennstoffeigenschaften auf keine nennenswerten Probleme hinweisen. Danach wurden umfangreiche Testlaufkampagnen mit Pappel-Hackgut sowie Maisspindel Grits durchgeführt. Durch den Einsatz der modellbasierten Regelung sowie des nicht-invasiven Luftmassen-Messsystems und entsprechender Mass-Flow-Controller konnten sehr stabile Luftverhältnisse erreicht werden. Diese führten generell zu konstanten Betriebsbedingungen mit geringen Schwankungen innerhalb der Testläufe.

In Abbildung 27 bis Abbildung 29 sind exemplarisch detektierte Anlagenbetriebs- bzw. Prozessdaten sowie Emissionsverläufe von Testläufen mit Weichholzpellets, Pappelhackgut sowie Maisspindel-Grits dargestellt. In allen Abbildungen zeigen die oberen Diagramme die Trends der Kesselleistung sowie der Netz- und Rauchgastemperaturen. Die zweiten Diagramme zeigen die gemessenen Konzentrationen der gasförmigen Emissionen (O_2 , CO_2 , CO und NO_x). Die Luftverhältnisse (Primärluft und Gesamtluftverhältnis) sind in den dritten Diagrammen dargestellt. In Bezug auf die partikelförmigen Emissionen (untere Diagramme) sind die kontinuierlich aufgezeichneten Daten dargestellt, die vom ELPI gewonnen wurden. Darüber hinaus werden die Gesamtstaub-Emissionswerte (Gesamtstaubmessung) sowie die PM_{10} -Emissionswerte (DGI-Messung) über die jeweilige Probenahmezeit angezeigt (der Beginn und das Ende der horizontalen Linien geben den Beginn und den Endpunkt der Probenahme an). Es muss darauf hingewiesen werden, dass die ELPI-Messung partikelanzahlbezogene Daten liefert. Daher müssen die massenbezogenen Daten berechnet werden, indem ein Korrekturfaktor unter Berücksichtigung der Dichte und der Partikelgröße der verschiedenen Partikelfraktionen angewendet wird. Aufgrund der Heterogenität des Partikelkollektivs ist es nicht möglich, einen zuverlässigen Korrekturfaktor basierend auf theoretischen Überlegungen zu berechnen. Daher wurden die ELPI-Ergebnisse mit den parallel durchgeführten gravimetrischen DGI-Messungen korreliert, um einen durchschnittlichen Korrekturfaktor über die Abtastperiode zu erhalten. Diese korrigierten massenbezogenen ELPI-Daten sind in den Diagrammen dargestellt. Alle Emissionskonzentrationen, die in diesem Abschnitt diskutiert werden, sind Mittelwerte über einen jeweiligen Betriebszyklus und die Daten beziehen sich auf Standardbedingungen, trockenes Rauchgas und 13% Restsauerstoffgehalt im Abgas.

Zu Beginn der Testkampagnen wurden umfangreiche Testläufe mit **Weichholzpellets** durchgeführt. Bei diesen Testläufen standen das Kennenlernen und die Funktionsweise des Versuchselektrofilters im Vordergrund. Es wurden die Bedienung des Versuchselektrofilters sowie die notwendigen Einstellungen für Reinigungszyklen und Filterspannung getestet. Als ein Beispiel für Testläufe mit Weichholzpellets sind die während eines Testlaufs aufgezeichneten Prozessdaten und Emissionstrends in Abbildung 27 dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

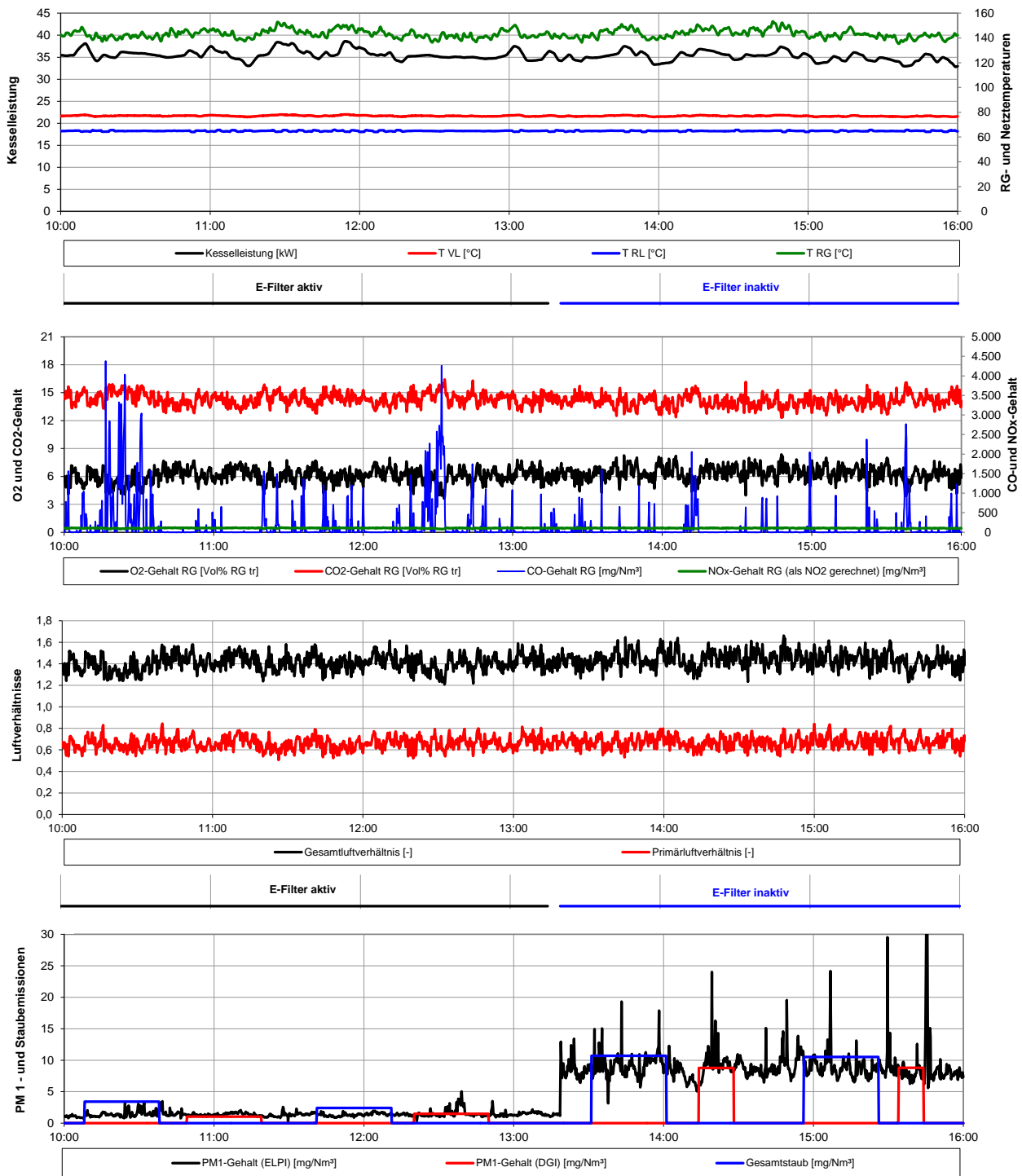


Abbildung 27: Betriebsparameter sowie gas- und partikelförmige Emissionen bei einem Weichholzpellets-Testlauf

Während dieses Testlaufs wurde die Feuerung bei einer Kesselleistung von 35 kW_{th} mit einem Primärluftverhältnis von 0,65 und einem Gesamtluftverhältnis von rund 1,42 (entspricht einen Restsauerstoffgehalt von rund 6,2 Vol.%) betrieben. Die Ergebnisse für den Testlauf sind durch eine akzeptable Gasphasenausbrandqualität gekennzeichnet, wobei periodische CO Spitzen detektiert wurden. Die NO_x-Emissionen blieben konstant bei etwa 105 mg/Nm³ und lagen im erwartenden Bereich für Weichholzpellets (N-Gehalt im Brennstoff von < 0,1 Gew.%). Die durchschnittlichen PM₁-Emissionen

betragen $1,5 \text{ mg/Nm}^3$ (bei aktivem Elektrofilter) bzw. $8,9 \text{ mg/Nm}^3$ (bei inaktivem Elektrofilter). Der Mittelwert der Gesamtstaubmessungen beträgt $2,9$ (bei aktivem Elektrofilter) bzw. $10,6 \text{ mg/Nm}^3$ (bei inaktivem Elektrofilter). Die ohnehin geringen partikelförmigen Emissionen konnten somit bei aktivem Elektrofilter deutlich reduziert werden.

In Abbildung 28 sind die Betriebsparameter sowie die gas- und partikelförmigen Emissionen bei einem Testlauf mit **Pappel-Hackgut** dargestellt. Nach der Startphase (nicht dargestellt) wurde der Kessel bei der für die Versuche definierten maximalen Last ($45 \text{ kW}_{\text{th}}$), einem Primärluftverhältnis von rund $0,9$ und einem Gesamtluftverhältnis von $1,64$ (entspricht einen Restsauerstoffgehalt von rund $8,16 \text{ Vol.}\%$) betrieben.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

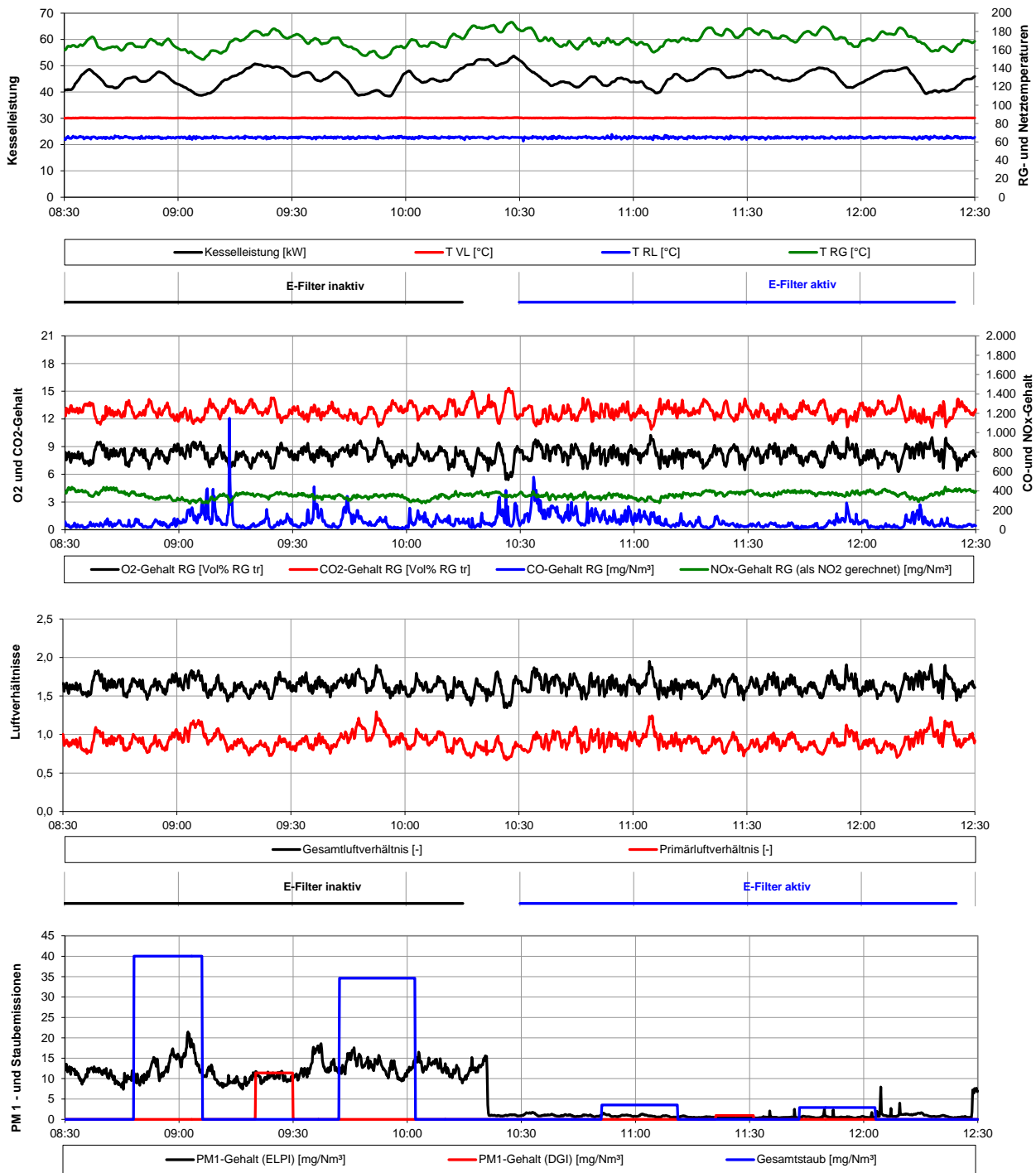


Abbildung 28: Betriebsparameter sowie gas- und partikelförmige Emissionen bei einem Pappelhackgut-Testlauf

Während der Betriebsphase mit maximaler Last beträgt der CO-Gehalt etwa 85 mg/Nm³ und weist auf einen nahezu vollständigen Gasphasenausbrand hin. Die NO_x-Emissionen zeigen ein erhöhtes Niveau (rund 355 mg/Nm³) im Vergleich zu Weichholzpellets, welches auf den erhöhten N-Gehalt im Brennstoff (rund 0,25 Gew.%) zurückzuführen ist.

Die PM-Emissionen erreichen ebenfalls erhöhte Werte (wiederum verglichen mit Weichholzpellets) mit Konzentrationen von 12 mg/Nm³ für PM1 und 37 mg / m³ für Gesamtstaub. Durch den Einsatz des

Elektrofilters unter Beibehaltung konstanter Betriebsbedingungen (Luftverhältnisse und Kesselleistung) verringerten sich die PM-Emissionen auf rund 1 mg/Nm³ für PM1 und 3 mg/Nm³ für Gesamtstaub und zeigen das große Potential der Partikelreduktion durch einen Elektrofilter.

Beispielhafte Ergebnisse mit **Maisspindel-Grits** sind in Abbildung 29 dargestellt. Während der Kessel bei einem annähernd stabilen Lastbetrieb (37 kW_{th}) betrieben wurde, wurde sowohl das Primärluftverhältnis als auch das Gesamtluftverhältnis im Laufe des Testlaufes reduziert um konstantere Betriebsbedingungen mit verbesserter Gasphasenausbrandqualität zu erreichen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

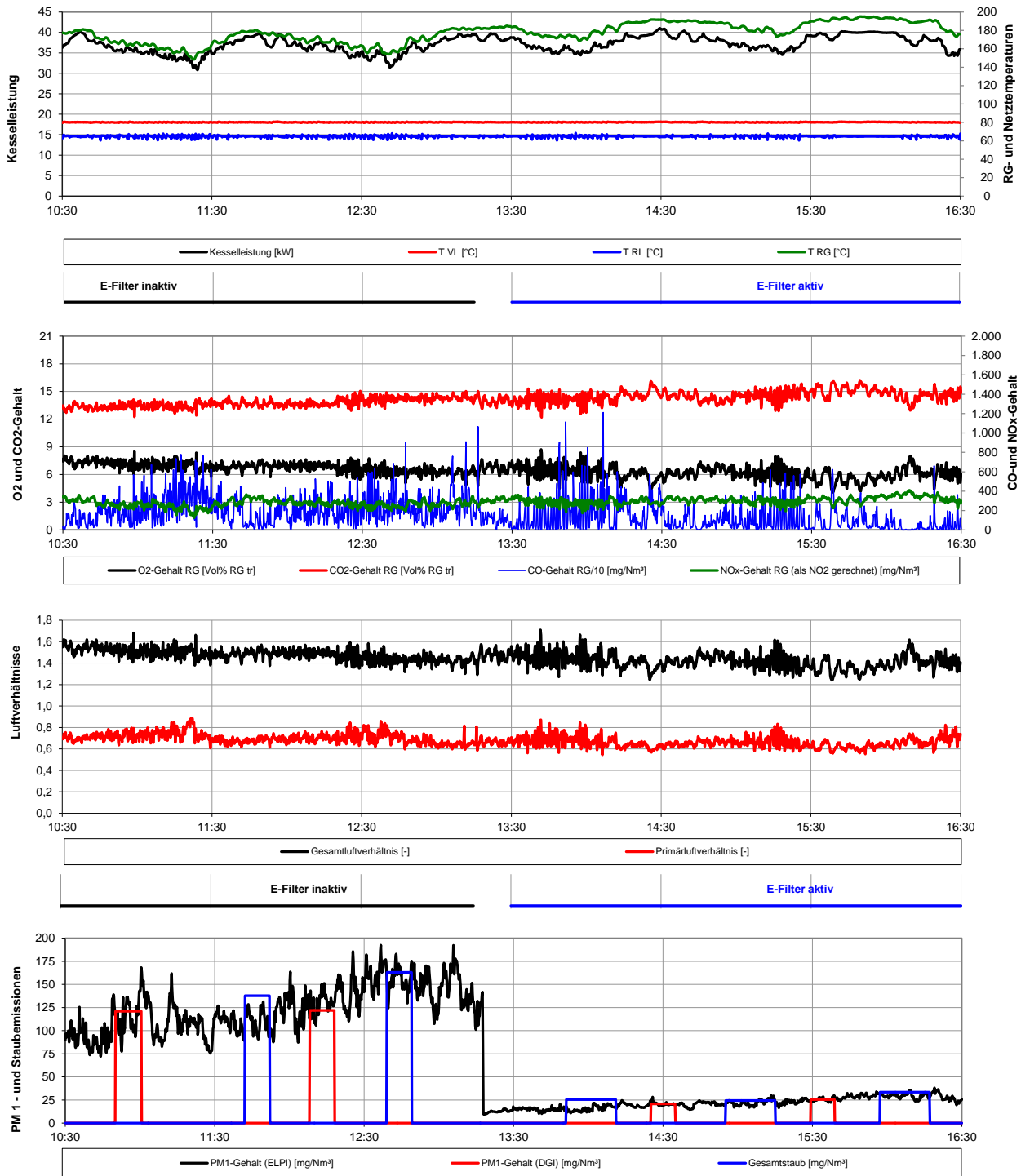


Abbildung 29: Betriebsparameter sowie gas- und partikelförmige Emissionen bei einem Maisspindel-Grits-Testlauf

Während der Betriebsphase mit inaktivem Elektrofilter (Primärluftverhältnis: 0,7, Gesamtluftverhältnis: 1,48) beträgt der CO-Gehalt etwa 2.100 mg/Nm³ und weist ein stark erhöhtes Niveau auf. Durch die Reduktion der Luftverhältnisse während der Betriebsphase mit aktivem Elektrofilter (Primärluftverhältnis: 0,66, Gesamtluftverhältnis: 1,4) wurde der CO-Gehalt um rund 45 % reduziert (CO: 1.190 mg/Nm³), weist jedoch trotzdem ein erhöhtes Niveau auf und ist auf das in Kapitel 1 beschriebene Problem

(Problem – Massive Abbauschwankungen) zurückzuführen und konnte auch mit den gesetzten regelungstechnischen Maßnahmen an der Versuchsanlage nicht vollständig unterdrückt werden.

Die NO_x-Emissionen (N-Gehalt der Maisspindel-Grits rund 0,25 Gew. %) zeigen erneut ein erhöhtes Niveau (269 mg/Nm³ während der Betriebsphase mit inaktivem Elektrofilter bzw. 305 mg/Nm³ bei aktivem Elektrofilter) mit einer geringen Zunahme während der Betriebsphase mit aktivem Elektrofilter aufgrund des reduzierten Primärluftverhältnisses. Generell sind die NO_x-Emissionen bei dem dargestellten Testlauf mit Maisspindel-Grits auf einem geringeren Niveau verglichen mit dem dargestellten Testlauf mit Pappel-Hackgut (beide Brennstoffe haben einen N-Gehalt von rund 0,25 Gew.%) und ist dieses auf die längere Verweilzeit der Rauchgase beim Testlauf mit Maisspindel-Grits aufgrund geringerer Kesselleistung zurückzuführen.

Wie aus den Brennstoffindizes (Summe von K, Na, Zn und Pb sowie molares Cl / Si-Verhältnis) hervorgeht, sind die PM-Emissionen auf einem ziemlich hohen Niveau. Die PM-Emissionen erreichten bei inaktivem Elektrofilter Konzentrationen von 124 mg/Nm³ für PM1 und 150 mg/Nm³ für Gesamtstaub. Durch die Reduzierung der Luftverhältnisse sowie Einsatz des Elektrofilters verringerten sich die partikelförmigen Emissionen auf ca. 22 mg/Nm³ für PM1 und 28 mg/Nm³ für Gesamtstaub und repräsentieren ein sehr geringes Niveau für den Einsatz dieses alternativen Biomassebrennstoffes. Ascheschmelzphänomene (obwohl die Brennstoffindizes niedrige Ascheschmelztemperaturen vorhersagen) traten während des Betriebs mit Maisspindel-Grits nicht auf bzw. konnten durch ein ausreichend geringes Primärluftverhältnis unterdrückt werden.

4.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im nächsten Abschnitt sind die Ergebnisse aller Testläufe mit dem Versuchselektrofilter für die verwendeten Brennstoffe (Weichholzpellets, Pappel-Hackgut sowie Maisspindel-Grits) dargestellt bzw. wird auf die Erkenntnisse aus den umfangreichen Testkampagnen eingegangen. Dabei ist es wichtig zu erwähnen, dass in den nachfolgenden Abbildungen auch die vorherrschenden Luftverhältnisse dargestellt sind, um auch die Betriebsweise der Feuerung abzubilden und sicherzustellen, dass gleichbleibende bzw. annähernd ähnliche Betriebsbedingungen bei Betrieb mit aktivem bzw. inaktivem Elektrofilter geherrscht haben.

Bei den Testläufen mit Weichholzpellets wurden wie erwartet sowohl im Nenn- wie auch im Teillastbetrieb geringe Konzentrationen partikelförmiger Emissionen gefunden, welche bei Einsatz des Versuchselektrofilters weiter reduziert werden konnten (siehe Abbildung 30).

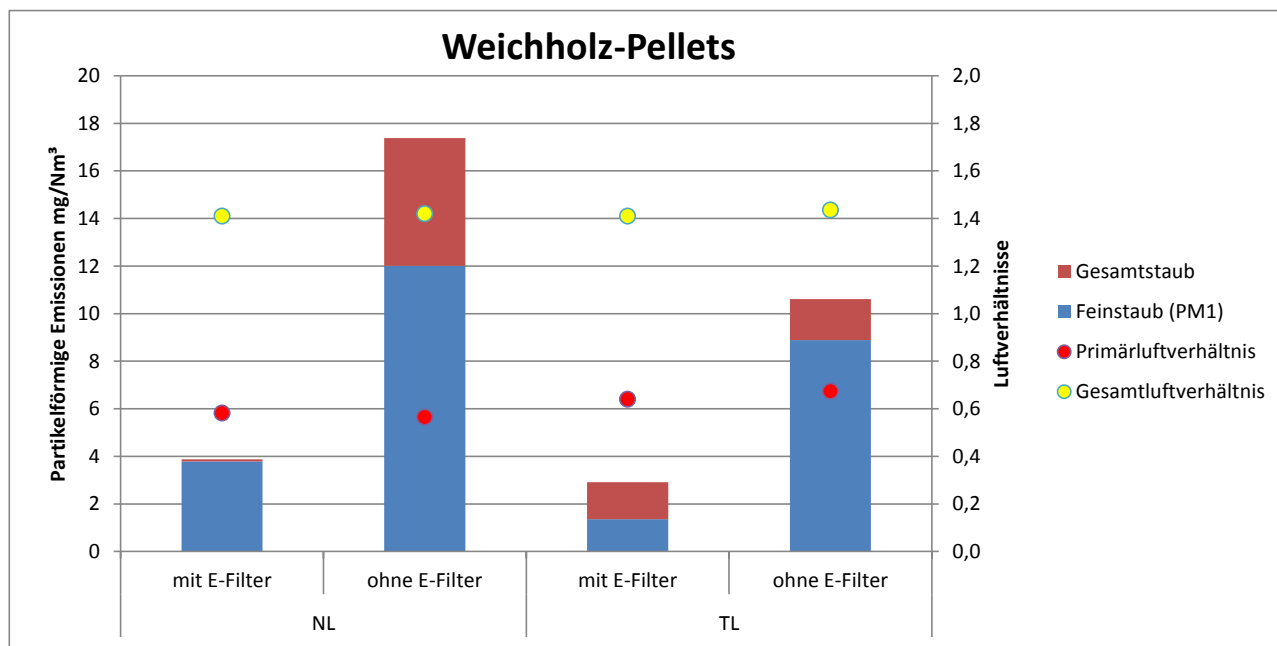


Abbildung 30: Partikelförmige Emissionen während der Testläufe mit Weichholzpellets

Die mittleren Gesamtstaubgehalte bei Betrieb ohne Elektrofilter wurden mit rund 17 mg/Nm³ (Nennlast NL) sowie rund 10,5 mg/Nm³ (Teillast TL) detektiert, wobei die mittleren Feinstaubgehalte bei rund 12 mg/Nm³ (Nennlast NL) bzw. 9 mg/Nm³ (Teillast TL) lagen. Durch Einsatz des Elektrofilters wurden im Nennlastbetrieb die mittleren Konzentrationen von Gesamt- sowie Feinstaub auf rund 4 mg/Nm³ reduziert. Im Teillastbetrieb erfolgte eine Reduktion auf rund 3 mg/Nm³ (Gesamtstaub) respektive rund 1,5 mg/Nm³ (Feinstaub).

Abbildung 31 zeigt die zusammenfassenden mittleren Konzentrationen der ermittelten partikelförmigen Emissionen während der Testläufe mit Pappel-Hackgut. Bei Nennlast betragen die mittleren Konzentrationen 39 mg/Nm³ (Gesamtstaub) bzw. 14 mg/Nm³ (Feinstaub) und bei Teillast mit 66 mg/Nm³ (Gesamtstaub) bzw. 41 mg/Nm³ (Feinstaub) auf einem etwas höheren Niveau.

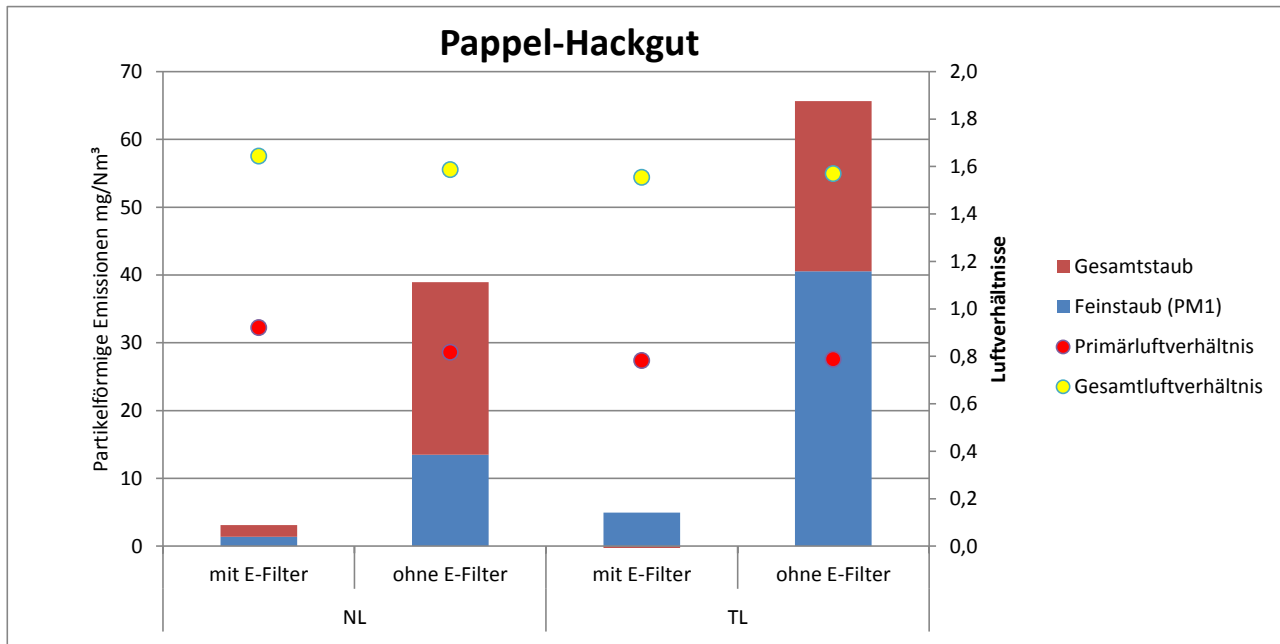


Abbildung 31: Partikelförmige Emissionen während der Testläufe mit Pappel-Hackgut

Durch den Einsatz des Elektrofilters konnten sowohl bei Nennlast wie auch bei Teillast die Gesamtstaubkonzentrationen auf unter 5 mg/Nm³ (Nennlast: rund 3 mg/Nm³, Teillast rund 4,5 mg/Nm³) reduziert werden. Während im Teillastbetrieb bei aktivem Elektrofilter die Feinstaubemissionen annähernd den Gesamtstaubemissionen entsprachen (rund 4,5 mg/Nm³) wurden diese im Nennlastbetrieb auf unter 1,5 mg/Nm³ reduziert.

Die Testläufe mit Maisspindel-Grits waren verglichen mit den anderen untersuchten Brennstoffen (Weichholzpellets und Pappel-Hackgut) die Aufwendigsten hinsichtlich des Erreichens stabiler Verbrennungsbedingungen. Dies hatte mehrere Gründe bzw. lässt sich zur besseren Interpretation der Ergebnisse nachfolgend erklären:

- Der Brennstoff selbst weist erhöhte Konzentrationen von aschebildenden Elementen auf und es ist davon auszugehen, dass auch die Brennstoffzusammensetzung inhomogener verteilt ist als bei Weichholzpellets und Pappel-Hackgut, auch wenn der Rohstoff (Maisspindel) von derselben landwirtschaftlichen Fläche kommt.
- Maisspindel-Grits haben aufgrund der Agglomerationsform (Grits) im Vergleich zu Pellets und Hackgut eine erhöhte Inhomogenität und im Speziellen einen erhöhten Feinanteil. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Rostflächenbelastung und in weiterer Folge zu unterschiedlichen Abbauraten des Brennstoffes am Rost.

Somit wurde die Feuerung für die unterschiedlich untersuchten Laststufen auch mit unterschiedlicheren Luftverhältnissen betrieben (im Gegensatz zu den anderen untersuchten Brennstoffen, wo die Luftverhältnisse für den jeweiligen Brennstoff annähernd konstant gehalten wurden). Die mittleren Ergebnisse der gemessenen partikelförmigen Emissionen sind in Abbildung 32 zusammenfassend dargestellt. Zusätzlich zum Nenn- und Teillastbetrieb wurde die Feuerung beim Betrieb mit Maisspindel-Grits auch bei einer Last von rund 24 kW_{th} (als Schwachlast SL bezeichnet) betrieben.

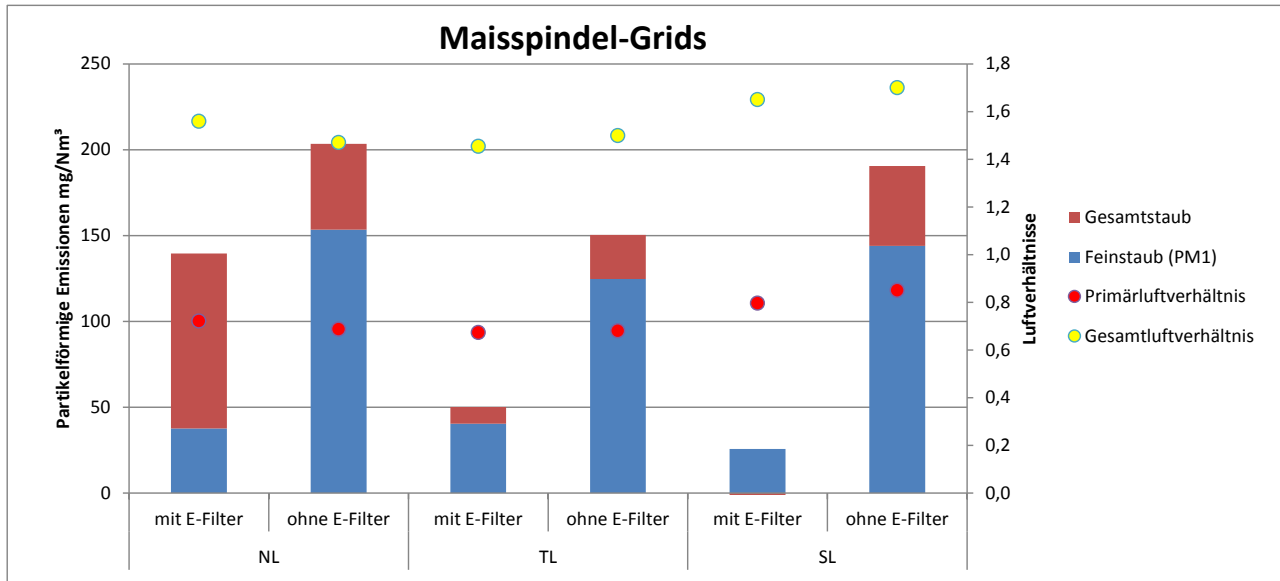


Abbildung 32: Partikelförmige Emissionen während der Testläufe mit Maisspindel-Grits

Die mittleren Gesamtstaubkonzentrationen lagen bei rund 150 mg/Nm³ für die Teillast, bei rund 190 mg/Nm³ im Schwachlastbetrieb und bei rund 203 mg/Nm³ bei Nennlast. Die korrespondierenden Feinstaubemissionen wurden bei rund 125 mg/Nm³ (Teillast), 144 mg/Nm³ (Schwachlast) und 153 mg/Nm³ (Nennlast) detektiert. Anders als bei Weichholzpellets und Pappel-Hackgut streuten die Emissionswerte bei aktivem Elektrofilter stark und zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Kesselleistung. Während bei Betrieb mit aktivem Elektrofilter im Nennlastbereich die mittleren Konzentrationen der partikelförmigen Gesamtstaubemissionen nur auf rund 140 mg/Nm³ gesenkt wurden (was einer Abscheiderate von rund 30 % entspricht), konnten im Teillast- (Gesamtstaub: 50 mg/Nm³) sowie Schwachlastbetrieb (Gesamtstaub: 25 mg/Nm³) wesentlich deutlichere Reduktionen erzielt werden. Besonders hervorzuheben hierbei ist der Umstand, dass bei Nennlastbetrieb und aktivem Elektrofilter ein hoher Anteil des Grobstaubes (Partikel > 1 µm) nicht abgeschieden werden konnte.

Zusammenfassend konnten für die Testläufe mit dem Versuchselektrofilter für die untersuchten Brennstoffe jeweils annähernd stabile und gleichbleibende Verbrennungsbedingungen ermittelt bzw. eingestellt werden und es stehen umfassende Daten zu den auftretenden Emissionen sowie zum Verbrennungsverhalten für verschiedene Betriebsbedingungen zur Verfügung. Die Testläufe zeigten deutlich, dass ein Einsatz eines Elektrofilters eine wichtige Rolle bei der Gewährleistung reduzierter partikelförmiger Emissionen spielt, insbesondere bei Einsatz von alternativen Brennstoffen aus Kurzumtrieb (Pappel-Hackgut) oder landwirtschaftlichen Produkten bzw. Rückständen (Maisspindel-Grits).

Aus den Emissionsdaten kann abgeleitet werden, dass die zu erwartenden Partikelemissionen von holzartiger Biomasse (Weichholzpellets) über Kurzumtriebspflanzen (Pappel) bis hin zu landwirtschaftlichen Biomasserückständen (Maisspindel-Grits) zunehmen, bei Einsatz eines Elektrofilters jedoch deutlich reduziert werden können. Darüber hinaus muss darauf hingewiesen werden, dass die Brennstoffindizes wichtige Informationen geliefert haben und eine gute Übereinstimmung mit den aus

den Testläufen abgeleiteten Daten zeigen. Folglich kann die Brennstoffcharakterisierung als ein einfaches, zeit- und kostensparendes Werkzeug auf dem Gebiet der Technologieentwicklung für neue Biomassebrennstoffe angesehen werden.

Die gewonnenen Daten bilden eine gute Grundlage für die Weiterentwicklung eines integrierten Elektrofilters, um die aktuellen und zukünftigen Emissionsgrenzwerte einzuhalten und eine effiziente und saubere Verbrennung in allen Betriebsphasen zu gewährleisten. Darüber hinaus müssen aber auch andere Fragestellungen, z.B. aschebedingte Probleme wie Verschlackung, Verschmutzung, Ablagerungen und Korrosion bei Einsatz alternativer Biomassebrennstoffe berücksichtigt werden, um einen dauerhaften Betrieb der Verbrennungssysteme und etwaiger integrierter Elektrofilter zu gewährleisten.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die entwickelten Methoden und erzielten Untersuchungsergebnisse unterstreichen die Sinnhaftigkeit der Herangehensweise, die Herausforderungen der Verbrennung alternativer Biomassebrennstoffe sowohl durch Primärmaßnahmen als auch durch Sekundärmaßnahmen zu bewältigen.

Die entwickelten mathematischen Modelle der einzelnen Komponenten von Biomassekesseln erlauben eine verhältnismäßig einfache Anpassung an andere Konfigurationen und Kesseltypen, solange die zugrunde liegenden Prinzipien die gleichen sind. Für andere Prinzipien wie z.B. Festbettvergaser, wo es a priori nicht zu einem vollständigen Gasphasenausbrand kommt, werden derzeit in Forschungsprojekten Modelle und Herangehensweisen entwickelt.

Das auf den Modellen aufbauende modulare Regelungskonzept erlaubt sowohl eine genaue Beibehaltung sowie eine schnelle Änderung der Vorlauftemperatur, ohne dadurch negative Auswirkungen auf die Prozesse im Brennstoffbett zu haben. Damit ist es ideal geeignet, um die zukünftigen Anforderungen an Biomassekessel, welche zunehmend im Verbund mit anderen Technologien eingesetzt werden und im besten Fall dynamisch auf geänderte Bedingungen reagieren sollen, zu erfüllen. Mittels der Zustandsschätzmethoden kann sowohl auf Änderungen in den Brennstoffeigenschaften reagiert als auch das Luftverhältnis im Brennstoffbett abgeschätzt und damit über die Primärluft geregelt werden. Dadurch werden gerade bei alternativen Biomassebrennstoffen typische Probleme, die sich durch zu hohe Temperaturen im Brennstoffbett (Verschlackung) oder hohe Abbauschwankungen ergeben (erhöhte CO-Emissionen), wirkungsvoll bekämpft. Die CO- λ -Regelung ermöglicht es, die Anlage mit geringen gasförmigen Emissionen (CO) und bei hohem Wirkungsgrad zu betreiben und das typische Problem des zu konservativ (=hoch) eingestellten Restsauerstoffes im Rauchgas zu vermeiden.

Die Integration eines Elektrofilters schließlich macht den Einsatz alternativer Brennstoffe bereit für zukünftige strenge Grenzwerte bei den partikelförmigen Emissionen, welche alleine durch Primärmaßnahmen nicht erreicht werden können. Insbesondere die stark inhomogenen Maisspindel-Grits, bei welchen selbst in gesiebter Form korngroße Grits von staubartigem Feinmaterial umgeben sind, erwiesen sich als kritisch und konnten nur mit Sekundärmaßnahmen mit vertretbaren Partikelemissionen verbrannt werden. Daher empfiehlt es sich, gerade bei innerstädtischen oder

stadtnahen Biomassekesseln den Einsatz eines Elektrofilters zu erwägen, um die idealerweise CO₂-neutrale und erneuerbare Energiequelle Biomasse auch in Zukunft mit einem guten und grünen Gewissen einsetzen zu können.

6 Literaturverzeichnis

- [1] GÖLLES M., et al.: 2014: *Model based control of a small-scale biomass boiler*. In: Control engineering practice 22 (2014) 1, S. 94 - 102
- [2] GÖLLES M., et al.: 2011: *Model Based Control of a Biomass Grate Furnace*. In: Proceedings of the 9th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, April 2011, Estoril, Portugal, ISBN 978-972-99309-6-6.
- [3] ZEMANN, C., et al.: *Application of a Model Based Control Strategy at a Fixed Bed Biomass District Heating Plant*. - in: 22nd European Biomass Conference and Exhibition Proceedings. (2014), S. 1698 - 1705
- [4] BAUER R., GÖLLES M., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I., 2008: Modellierung des dynamischen Verhaltens der Wärmeübertragung in einem Rauchrohr-Wärmeüberträger. In: Automatisierungstechnik, 56:pp. 513-520, Oktober 2008.
- [5] BAUER R., 2009: Habilitationsschrift „Modellbildung und modellbasierte Regelungsstrategien am Beispiel einer Biomasse-Feuerungsanlage“, Technische Universität Graz, 2009.
- [6] GÖLLES M., 2008: Dissertation “Entwicklung mathematischer Modelle einer Biomasserostfeuerungsanlage als Grundlage für modellbasierte Regelungskonzepte“, Technische Universität Graz, Österreich. ISBN 978-3-8381-0896-4.
- [7] BAUER R., GÖLLES M., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I., 2007: Modellierung der Druck- und Volumenstromverhältnisse in einer Biomasse-Feuerung. In: Automatisierungstechnik, 55: pp. 404-410, August 2007.
- [8] BAUER R., GÖLLES M., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I., 2010: Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes. In: Biomass and Bioenergy, (2010), Vol 34, Issue 4, pp.417-427
- [9] KÄPERNICK B., GRAICHEN K.: *The Gradient Based Nonlinear Model Predictive Control Software GRAMPC*. European Control Conference 2014.

7 Kontaktdaten

Projektkoordinator:

KWB - Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH

Dipl.-Ing. Georg Hofmeister

Industriestraße 235, A-8321 St. Margarethen a.d. Raab

Tel.: +43 3115 6116

Fax: +43 3115 6116-4

office@kwb.at

<https://www.kwb.net>

Kooperationspartner:

Dr. Markus Gölles

BIOENERGY2020+ GmbH

Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz

Tel.: +43 316 873 9201

office@bioenergy2020.eu

<https://www.bioenergy2020.eu>

Dr. Frank Hammer

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

Wiesenstraße 6, D-69190 Walldorf (Baden)

Tel.: +49 6227 6052-0

Fax: +49 6227 6052-57

info@lamtec.de

<https://www.lamtec.de>