

Mario Rumpf

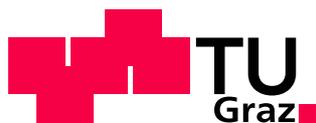
Ausbrandregelung von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

der Studienrichtung Telematik
erreicht an der

Technischen Universität Graz
Fakultät für Informatik



unter der Betreuung von
O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Nicolaos Dourdoumas,
Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Gölles
Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik
Technische Universität Graz

Graz, im Jänner 2013

Kurzfassung

Die Anzahl der installierten Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen ist in letzter Zeit deutlich gestiegen. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger eine schadstoffarme und effiziente Verbrennung zu ermöglichen. Genau diese Anforderung stellt jedoch eine große Herausforderung für deren Regelung dar. Der optimale Restsauerstoffgehalt des Rauchgases, im Sinne von niedrigen Kohlenmonoxidemissionen (CO-Emissionen) bei bestmöglichem Wirkungsgrad, ist sehr stark vom Betriebszustand, von der Anlagengeometrie und vom verwendeten Brennstoff abhängig. Diese Tatsache wird jedoch derzeit bei den Regelungen von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen nicht oder nur teilweise berücksichtigt. Um hohe CO-Emissionen aufgrund von Sauerstoffmangel in jedem Fall zu vermeiden, werden Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen üblicherweise mit vergleichsweise hohem Sauerstoff betrieben. Diese Maßnahme geht jedoch mit einer unerwünschten Reduktion des Wirkungsgrades der Feuerung einher. Diese Arbeit hat zum Ziel eine Strategie zu entwickeln, welche das Luftverhältnis sowie auch die Luftstufung während des Betriebes dahingehend anpasst, dass stets ein möglichst effizienter und dennoch schadstoffarmer Betrieb gewährleistet wird.

Die im Rahmen dieser Masterarbeit behandelten Arbeiten, wurden anhand einer handelsüblichen Biomasse-Kleinfeuerungsanlage durchgeführt. Die verwendete Anlage wird mit Hackgut betrieben und hat eine Kesselnennleistung von 30 kW. Der Brennstoff wird automatisch über eine Schnecke auf einen kippbaren Rost in die Brennkammer befördert. Um einen emissionsarmen Betrieb zu gewährleisten, verfügt die Feuerungsanlage über eine gestufte Luftzufuhr. Ein Rauchgasventilator stellt den Unterdruck in der Anlage her. Somit ist sichergestellt, dass das Rauchgas immer über den Kamin ausgestoßen wird. Die bei der Verbrennung freigesetzte Wärme wird großteils über die wassergekühlten Wände des Feuerraums und den Wärmeübertrager auf den Wasserkreis übertragen.

Für die Anwendung einer Strategie zur Reduktion der CO-Emissionen wäre es von großem Vorteil, wenn der CO-Gehalt des Rauchgases gemessen werden könnte. Derzeit gibt es jedoch nur sehr teure Rauchgasanalyseeinheiten, welche für eine dauerhafte Bestimmung des CO-Gehaltes des Rauchgases geeignet sind. Somit war bis jetzt eine Messung des CO-Gehalts nur bei großen Biomassefeuerungsanlagen wirtschaftlich. In dieser Arbeit wurde zunächst eine Marktanalyse zu preiswerten Sensoren zur Detektion unverbrannter Komponenten im Rauchgas durchgeführt. Es wurden ausschließlich Sensoren untersucht, die aufgrund ihres geringen Preises auch wirtschaftlich eingesetzt werden können. Dabei zeigte sich, dass es derzeit zwei Sensoren gibt, welche diese Anforderungen erfüllen. Diese Sensoren dienen jedoch lediglich zur Detektion von unverbrannten Komponenten im Rauchgas und sind nicht in der Lage den CO-Gehalt des Rauchgases exakt zu messen. Aus diesem Grund wurde der Zusammenhang zwischen CO-Konzentration und Sensorsignal untersucht und anschließend mathematisch beschrieben, wobei die wesentlichen Querempfindlichkeiten berücksichtigt wurden. Da die physikalischen Zusammenhänge sehr komplex

und zu einem wesentlichen Teil nicht bekannt waren, wurde das mathematische Modell mit Hilfe der experimentellen Modellbildung ermittelt, wobei die verwendeten Messdaten einen möglichst großen Bereich der verschiedenen Einflussparameter beinhalteten.

In weiterer Folge wurden umfassende Testläufe zur Untersuchung der Auswirkung der Leistung, des Luftverhältnisses im Brennstoffbett, des gesamten Luftverhältnisses und des Brennstoffwassergehaltes auf die CO-Emissionen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass es für einen möglichst effizienten und gleichzeitig schadstoffarmen Betrieb notwendig ist, das Luftverhältnis im Brennstoffbett sowie den Sekundärluftmassenstrom in Abhängigkeit der geforderten Leistung zu variieren. Darauf aufbauend wurde eine geeignete Strategie zur Umsetzung dieser Maßnahmen entwickelt und implementiert. Dabei werden die Führungsgrößen für den Restsauerstoffgehalt sowie das Luftverhältnis im Brennstoffbett laufend an die geforderte Leistung angepasst. Zusätzlich dazu wird die Führungsgröße für den Restsauerstoffgehalt durch einen Suchalgorithmus zur Minimierung der CO-Emissionen variiert. Schlussendlich wurde die entwickelte Strategie mit Hilfe eines typischen Lastzyklus experimentell verifiziert.

Abstract

There has been a recent and drastic increase in the number of installations of small-scale biomass boilers. For this reason it is very important to provide high efficient combustion systems with low pollutant emissions. These requirements are especially challenging for biomass boiler control systems. The optimal amount of residual oxygen in the flue gas, in relation to low carbon monoxide emissions (CO emissions) at maximum efficiency, strongly depends on the load range, the combustion chamber geometry and the fuel type used. The importance of these requirements have been largely overlooked in the examination of small-scale biomass boilers control systems. Currently, high levels of residual oxygen are utilized to avoid high levels of CO emissions resulting from a lack of oxygen in any case. But this method principally yields to efficiency losses. For this reason, the purpose of the research aims to develop a method to adjust the air ratio and the air staging during the operation that will result in operation with high efficiency and low CO emissions.

The research described was performed on a commercially available small-scale biomass boiler. The unit utilizes wood chips as a fuel source and has a boiler capacity of 30 kW. A screw conveyor transports the fuel onto a tiltable grate in the combustion chamber. To ensure low-emission operation, the biomass boiler has a staged air supply. A flue gas fan controls the low pressure in the combustion chamber, resulting in the flue gas passing through the chimney. Finally, most of the heat released by the combustion is transferred to the hydraulic system via the cooled secondary combustion zone and the following fire tube heat exchanger.

Measuring the CO concentration of the flue gas would be of great importance in conducting research into methods to reduce the CO emissions. Presently, flue gas analyzers are available, which are able to constantly measure the CO content of the flue gas, but are extremely costly. This flue gas CO content measurement system is, therefore, only used in large-scale biomass plants due to economic considerations. Due to the aforementioned fact, the first step of the research process was to conduct a market search concerning the availability of inexpensive sensors that have the capability of detection unburnt components in flue gases. The explored market presently offers two sensors that meet this requirement. These two sensors had a limited capacity, which was to solely detect unburnt components in the flue gas, and did not specifically measure the exact amount of CO emissions. Subsequently, the relationship between the CO concentration and the sensor signal was investigated and mathematically described using relevant cross-sensitivity considerations. As the physical correlation were complex and known only in part, the mathematical model was developed with the aid of the experimental modeling, which included the use of measurement data which contains a wide and varying range of the influencing variables.

Afterwards, extensive test runs were performed to investigate the influence of the load range, the air ratio in the fuel bed, the total air ratio and the water content of the fuel on the CO emissions. The findings of the test runs indicated that to ensure maximum possible efficiency at low CO emissions during operation, it is necessary to adjust the air ratio in the fuel bed and the secondary air mass flow to the load. Based on these results an appropriate method for the adjustment of the set points for the air ratio in the fuel bed and the residual oxygen in the flue gas to the load was developed and implemented at the investigated boiler. In addition, the set point for the residual oxygen in the flue gas was varied by an algorithm minimizing the CO emissions by varying the set point for the residual oxygen content. Finally, the developed method was experimentally verified by and through test runs simulating typical load behaviors of small-scale biomass boilers used for residential heating.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort

Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ii
Danksagung	iii
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Verbrennung von Biomasse	4
2.2 CO- λ -Charakteristik	6
3 Grundsätzliche Vorgehensweise	8
4 Versuchsanlage, Sensorik und Regelung	10
4.1 Schematischer Aufbau der Versuchsanlage	10
4.2 Verwendete Sensoren und Messgeräte	12
4.2.1 Rauchgasanalyseeinheit	14
4.2.2 Brennstoffwiegesystem	14
4.2.3 Pyrometermessung	15
4.3 Modellbasierte Regelung	16
4.3.1 Mathematisches Modell	17
4.3.2 Regelungskonzept	22
5 CO-Sensoren	25
5.1 Allgemeine Grundlagen	25
5.1.1 Grundlegende Eigenschaften des CarboSen Sensors	26
5.1.2 Grundlegende Eigenschaften des KS1D Sensors	28
5.2 Methodik	31
5.2.1 Experimentelle Modellbildung	31
5.2.2 Untersuchen des O ₂ -Messwertes des KS1D Sensors	32
5.3 Modellierung der wesentlichen Querempfindlichkeiten	33
5.3.1 Querempfindlichkeiten der beiden CO-Sensoren	33
5.3.2 Mathematisches Modell	42

5.3.3	Ergebnisse aus der Modellierung anhand einer automatisch beschickten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage	45
5.4	Experimentelle Verifikation der Modelle bei unterschiedlichen Einsatzbereichen	48
5.4.1	Verifikation der Modelle anhand von Messdaten aus einer mittelgroßen Biomassefeuerungsanlage unter Verwendung eines anderen Sensors und anderem Brennstoff	48
5.4.2	Verifikation der Modelle anhand von Messdaten der zur Modellierung verwendeten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage mit dem gleichen Brennstoff unter Verwendung desselben für sechs Monate ausgebauten Sensors	51
5.4.3	Verifikation der Modelle anhand von Messdaten der zur Modellierung verwendeten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage mit anderem Brennstoff unter Verwendung desselben für sechs Monate ausgebauten Sensors	55
5.4.4	Diskussion der Ergebnisse	58
6	Untersuchung der CO - λ - Charakteristik	60
6.1	Methodik	60
6.1.1	Normierung des CO-Gehaltes	64
6.2	Ergebnisse	65
6.2.1	Ergebnisse aus den Versuchen bei Volllast	65
6.2.2	Ergebnisse aus den Versuchen bei Teillast	69
6.3	Diskussion der Ergebnisse	71
7	Erweiterung der Regelung	73
7.1	Führungsgrößenformer (FGF)	73
7.1.1	Vorgabe des Luftverhältnisses im Brennstoffbett	75
7.1.2	Vorgabe des Sekundärluftmassenstromes	75
7.1.3	Experimentelle Verifikation	79
7.2	Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums	84
7.2.1	Methodik	84
7.2.2	Ergebnisse und Diskussion	86
8	Zusammenfassung	94
	Literaturverzeichnis	98

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in Kooperation mit dem Kompetenzzentrum BIOENERGY 2020+. Auf diesem Weg möchte ich mich bei allen Mitarbeitern für ihre tatkräftige Unterstützung bei meinen Arbeiten bedanken. Mein besonderer Dank geht an Dr. Markus Gölles für seine großartige Unterstützung und Betreuung. Darüber hinaus möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. Nicolaos Dourdoumas für die Betreuung meiner Masterarbeit bedanken.

Mario Rumpf
Graz, im Jänner 2013

Kapitel 1

Einleitung

“ Im Vorjahr wurden in ganz Österreich viermal so viele Biomassekessel wie Ölheizungen installiert. Mit rund 20.400 neuen Anlagen im Jahr 2011 konnte trotz Wirtschaftskrise der Aufwärtstrend fortgesetzt werden. ”

[Hermann Schultes, Präsident der Landwirtschaftskammer NÖ, 2012 [14]]

Die Ergebnisse der Biomasse-Heizungserhebung des Jahres 2011 zeigen eine klare Entwicklung. Es benutzt bereits jeder vierte Österreicher eine Zentralheizung mit Biomasse als Energieträger und die Tendenz bleibt steigend. Immer mehr Österreicher setzen auf Biomasse als Energieträger. Schuld daran sind zum Teil die steigenden Erdölpreise, die in nächster Zukunft immer weiter steigen werden [5, 14].

Die Biomasseverbrennung ist ein CO₂-neutraler Vorgang. Das heißt bei nachhaltiger Biomassenutzung kann das gesamte bei der Verbrennung entstehende CO₂ wieder durch Photosynthese im nachwachsenden Brennstoff gebunden werden. Somit trägt die Verbrennung von Biomasse, im Gegensatz zur Verbrennung fossiler Brennstoffe, stark zum Klimaschutz bei.

Die Verbrennung von Biomasse ist jedoch aufgrund der Inhomogenität des Brennstoffes äußerst komplex. Den Wirkungsgrad hoch und die Emissionen niedrig zu halten stellt eine große Herausforderung an die Regelung einer Biomassefeuerungsanlage dar. Damit es zu keinen gesundheits- und umweltschädigenden Emissionen kommt, muss ein vollständiger Ausbrand vorherrschen. Zur Beurteilung des vollständigen Ausbrandes ist es sinnvoll den Kohlenmonoxidgehalt (CO-Gehalt) des Rauchgases zu betrachten, da die Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid im Vergleich zu den anderen, für den Ausbrand relevanten chemischen Reaktionen, die langsamste Reaktion darstellt. Ist kein CO mehr im Rauchgas enthalten, so kann davon ausgegangen werden, dass auch keine anderen unverbrannten Komponenten ausgestoßen werden.

Wie schon zu Beginn erwähnt, steigt die Anzahl der verbauten Biomassefeuerungsanlagen stetig an. Aus diesem Grund ist es von großer Wichtigkeit die CO-Emissionen bei der Verbrennung zu verringern um die Umwelt so gut es geht zu schützen.

Die Versuche, die im Laufe dieser Arbeit behandelt werden, wurden an einer handelsüblichen Biomasse-Kleinfeuerungsanlage der Firma Fröling durchgeführt. Die Versuchsanlage wird mit Hackgut betrieben und hat eine Kesselnennleistung von 30 kW. Der Brennstoff wird automatisch über eine Schnecke auf einen kippbaren Rost in die Brennkammer befördert. Um einen emissionsarmen Betrieb zu gewährleisten, verfügt die Feuerungsanlage über eine gestufte Luftzufuhr. Ein Rauchgasventilator stellt den Unterdruck in der Anlage her. Somit ist sichergestellt, dass das Rauchgas immer über den Kamin ausgestoßen wird. Die bei der Verbrennung freigesetzte Wärme wird großteils über die wassergekühlten Wände des Feuerraums und den Wärmeübertrager auf den Wasserkreis übertragen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die bestehende modellbasierte Regelung der Biomasse-Kleinfeuerungsanlage so zu erweitern, dass jener Arbeitspunkt gefunden wird, bei dem minimale CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad vorherrschen. Derzeit wird auf einen konstanten Sauerstoffgehalt des Rauchgases geregelt. Um hohe CO-Emissionen aufgrund von Sauerstoffmangel in jedem Fall zu vermeiden, werden Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen üblicherweise mit vergleichsweise hohem Sauerstoff betrieben. Diese Maßnahme geht jedoch mit einer unerwünschten Reduktion des Wirkungsgrades der Feuerung einher. Der optimale Restsauerstoffgehalt des Rauchgases, im Sinne von niedrigen Kohlenmonoxidemissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad, ist sehr stark vom Betriebszustand, von der Anlagengeometrie und vom verwendeten Brennstoff abhängig. Daher sollen in dieser Arbeit diese Abhängigkeiten untersucht werden und, aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen, eine Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen entwickelt werden. Für die Anwendung einer Strategie zur Reduktion der CO-Emissionen, wäre es von großem Vorteil wenn der CO-Gehalt des Rauchgases gemessen werden könnte. Derzeit gibt es jedoch nur sehr teure Rauchgasanalyseeinheiten, welche für eine dauerhafte Bestimmung des CO-Gehaltes des Rauchgases geeignet sind. Somit war bis jetzt eine Messung des CO-Gehaltes nur bei großen Biomassefeuerungsanlagen wirtschaftlich. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der beschriebenen Arbeit zunächst eine Marktanalyse zu preiswerten Sensoren zur Detektion unverbrannter Komponenten im Rauchgas durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass zwei Sensoren der Firma Lamtec mit den Bezeichnungen CarboSen und KS1D diese Anforderungen erfüllen. Diese beiden Sensoren wurden in der Folge ausführlich untersucht und werden auch in der vorliegenden Arbeit ausführlich diskutiert. Die Sensoren dienen zur Detektion von brennbaren Gasen wie z.B. Kohlenmonoxid, Wasserstoff H_2 oder anderen Kohlenwasserstoffen C_xH_y , wobei der KS1D Sensor zusätzlich den Sauerstoffgehalt des Gases misst. Diese Gase werden in der Folge als CO-Äquivalent CO_e bezeichnet.

Nachdem die Zielsetzung erläutert wurde, soll noch ein kurzer Überblick über den Aufbau der Arbeit gegeben werden. Im folgenden Kapitel 2 wird auf die theoretischen Grundlagen der Biomasseverbrennung eingegangen. Hier wird zunächst der grundsätzliche Verbrennungsvorgang von fester Biomasse näher erläutert. Des Weiteren werden die Ursachen für die Entstehung von CO-Emissionen bei der Verbrennung diskutiert. Das darauffolgende Kapitel 3 gibt einen Überblick über die grundsätzliche Vorgehensweise der Arbeiten die in diesem Dokument beschrieben werden. Im Anschluss daran wird der verwendete Messaufbau näher erläutert. Hierzu zählt eine detaillierte Beschreibung des schematischen Aufbaus der Anlage (siehe Abschnitt 4.1) sowie eine ausführliche Auflistung der verwend-

ten Messsensorik (siehe Abschnitt 4.2). Zusätzlich dazu wird auch ein kurzer Überblick über die verwendeten modellbasierten Regelung gegeben (siehe Abschnitt 4.3). Darauf folgend kommt der eigentliche Hauptteil dieser Arbeit, der aus drei Teilen besteht. Den ersten Teil bildet die Untersuchung der Sensoren zur Detektion unverbrannter Gase (siehe Kapitel 5). Hier werden die beiden gewählten Sensoren bezüglich ihrer Einsetzbarkeit in Biomassefeuerungsanlagen untersucht. Es werden gewissenhaft alle Ergebnisse aufbereitet und umfangreich diskutiert. Den zweiten Teil bildet die Vermessung der Abhängigkeit der Anlagengeometrie der Biomasse-Kleinfeuerungsanlage, der Leistung und des verwendeten Brennstoffes sowie der Einfluss des Restsauerstoffgehaltes des Rauchgases und des Luftverhältnisses auf die CO-Emissionen (siehe Kapitel 6). Den Abschluss des Hauptteils bildet die Darstellung der Strategien zur Erweiterung der Regelung (siehe Kapitel 7). Hierbei wird auf zwei Strategien näher eingegangen. Die erste Strategie ist ein Führungsgrößenformer, welcher die Führungsgrößen des Regelkreises in Abhängigkeit der Leistungsanforderung vorgibt. Die zweite Strategie ist ein Algorithmus zum Suchen des Betriebspunktes mit minimalen CO-Emissionen, welcher auch in Verbindung mit dem Führungsgrößenformer eingesetzt werden kann. Dieser versucht durch Variation des Restsauerstoffgehaltes des Rauchgases den Punkt mit den geringsten CO-Emissionen zu finden. Den Abschluss dieser Arbeit bildet eine kurze Zusammenfassung aller Ergebnisse.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die Grundlagen der Biomasseverbrennung gegeben. Diese Arbeit behandelt die Verbrennung von fester Biomasse, somit wird in diesem Dokument stets feste Biomasse gemeint, wenn von Biomasse gesprochen wird. Außerdem soll ein kurzer Überblick über die Ursachen der Entstehung von CO-Emissionen bei der Biomasseverbrennung gegeben werden.

2.1 Verbrennung von Biomasse

Trockenes Holz besteht näherungsweise aus 50 % Kohlenstoff, 6 % Wasserstoff und 44 % Sauerstoff. Daraus ergibt sich eine vereinfachte chemische Summenformel von $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,7}$. Zusätzlich zu diesen drei Hauptbestandteilen enthält Holz auch geringe Mengen an Stickstoff, Schwefel, Chlor, Schwermetallen und weiteren unbrennbaren, aschebildenden Bestandteilen. Bei feuchtem Holz kommt auch noch Wasser hinzu.

Der Verbrennungsvorgang von Holz besteht aus mehreren Teilvorgängen. Bei Feuerungsanlagen mit einer kontinuierlichen Beschickung können diese Teilvorgänge nicht mehr zeitlich voneinander getrennt werden, das heißt, sie laufen gleichzeitig ab.

Der erste Teilprozess nennt sich *Trocknung*. Das Holz wird hier zuerst erwärmt und es kommt zur Verdampfung des im Holz gebundenen Wassers. Bei Temperaturen über 100 °C kann man davon ausgehen, dass das gesamte Wasser verdampft wurde. Die Energie, welche für die Trocknung benötigt wird, wird der Feuerung entzogen. Der Wassergehalt des Brennstoffes hat somit eine wesentliche Auswirkung auf die Verbrennungstemperatur und den Verbrennungsprozess.

Kommt es zu einer weiteren Erwärmung des Brennstoffes so werden seine flüchtigen Anteile in die Gasphase freigesetzt. Dies geschieht in einem Temperaturbereich von 150 °C bis 600 °C. Unter Zufuhr von Sauerstoff wird dieser Vorgang als *Vergasung* bezeichnet. Führt man keinen Sauerstoff hinzu, so nennt man diesen Prozess *Pyrolyse*.

Den letzten Schritt des Verbrennungsvorganges nennt man *Oxidation*. Hier reagiert der

zugeführte Sauerstoff mit den freigesetzten brennbaren Gasen und der Holzkohle. Dieser Prozess findet in einem Temperaturbereich zwischen 400 °C und 1.300 °C statt. In diesem Schritt wird der größte Anteil der Verbrennungswärme erzeugt [9].

Abbildung 2.1 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Verbrennungsvorganges. Die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden. Und zwar in Emissionen, die nur bei unvollständiger Verbrennung entstehen, und Emissionen, welche auch bei vollständiger Verbrennung entstehen. Während man die Emissionen bei vollständiger Verbrennung regelungstechnisch nur schwer beeinflussen kann, können die Emissionen aufgrund unvollständiger Verbrennung durch regelungstechnische Maßnahmen weitgehendst vermieden werden.

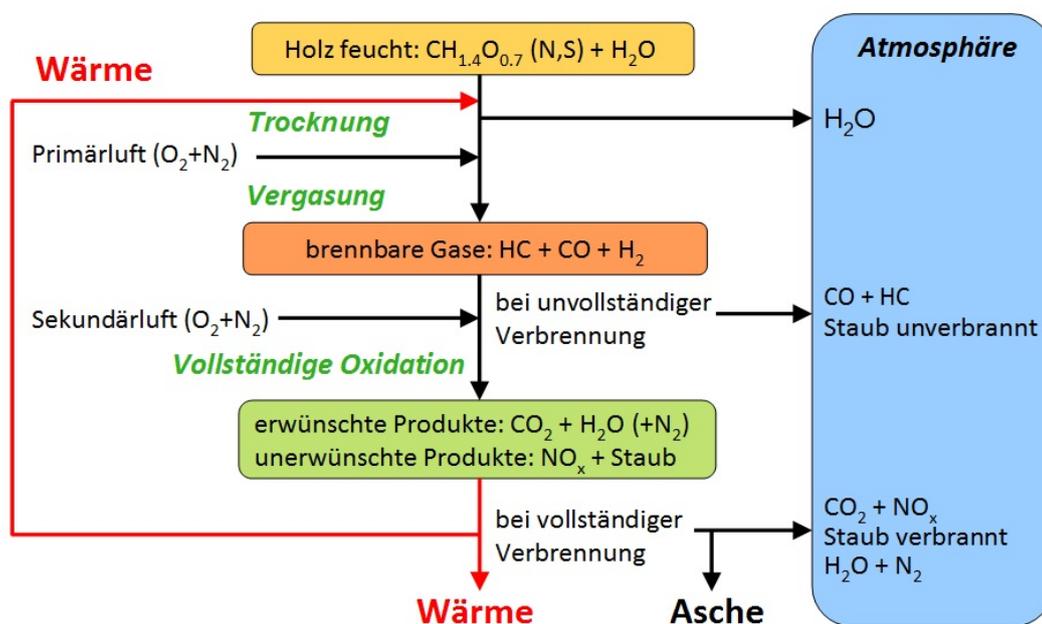


Abbildung 2.1: Vereinfachte Darstellung des Verbrennungsvorganges von Holz [9]

Diese vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Vermeidung der Emissionen aufgrund unvollständiger Verbrennung durch regelungstechnische Maßnahmen. Diese Emissionen umfassen grundsätzlich all jene Stoffe, die bei der Vergasung entstehen und bei denen es in der Oxidationsphase zu keiner vollständigen Oxidation gekommen ist. Hierzu zählen vorwiegend verschiedene Kohlenwasserstoffverbindungen C_xH_y und Kohlenmonoxid CO . Damit es zu einer vollständigen Oxidation kommen kann, müssen die brennbaren Gase, welche bei der Vergasung entstehen, für eine gewisse Zeit bei einer gewissen Temperatur verweilen. Zusätzlich muss jedes brennbare Molekül ein Sauerstoffmolekül als Reaktionspartner finden, also ist der Verbrennung genügend Luft zuzuführen. Zu guter Letzt ist es wichtig für eine gute Durchmischung der brennbaren Gase mit dem Sauerstoff zu sorgen. Zur Beurteilung des vollständigen Ausbrandes ist es sinnvoll den CO -Gehalt des Rauchgases zu betrachten, da die Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid im Vergleich zu den anderen, für den Ausbrand relevanten chemischen Reaktionen, die langsamste Reaktion darstellt. Ist

kein CO mehr im Rauchgas enthalten, so kann davon ausgegangen werden, dass auch keine anderen unverbrannten Komponenten ausgestoßen werden [6, 9].

2.2 CO- λ -Charakteristik

Die Menge an Kohlenmonoxid im Rauchgas der Verbrennung hängt sehr stark vom Verhältnis aus umgesetztem Brennstoff und zugeführtem Sauerstoff ab. Dieses Verhältnis wird üblicherweise mit Hilfe des Luftverhältnisses λ beschrieben. Genau genommen handelt es sich dabei um das Verhältnis von tatsächlich zugeführter Luftmenge und der theoretisch minimalen, für einen vollständigen Ausbrand erforderlichen, Luftmenge. Bei $\lambda = 1$ wird somit genau soviel Luft zugeführt, wie man theoretisch für einen vollständigen Ausbrand benötigt. $\lambda = 1$ wird auch als stöchiometrisches Luftverhältnis bezeichnet. Da es bei einer realen Verbrennung aber nie zu einer perfekten Durchmischung der Luft mit den brennbaren Gasen kommt, muss in der Realität immer mehr Luft als minimal notwendig zugeführt werden. Somit liegt das Luftverhältnis λ bei praktischen Anwendungen über 1, d.h. $\lambda > 1$. Bei einem Luftverhältnis unter 1, d.h. $\lambda < 1$, kann es grundsätzlich zu keinem vollständigen Ausbrand kommen [9].

Die CO- λ -Charakteristik beschreibt den Einfluss des Luftverhältnisses λ auf die CO-Emissionen und spielt für den geplanten regelungstechnischen Eingriff zur Minimierung der CO-Emissionen eine große Rolle. Sie ist unter anderem von verschiedenen Betriebsparametern wie Leistung, Brennstoff und Luftstufung abhängig und ist jeweils nur für eine bestimmte Anlage gültig. Abbildung 2.2 zeigt eine typische CO- λ -Charakteristik. Sie beschreibt den Zusammenhang von CO-Gehalt des ausgestoßenen Rauchgases (Ordinate) und dem Luftverhältnis λ (Abszisse) für eine bestimmte Anlage. Die rote Linie in der Grafik stellt das zuvor erwähnte stöchiometrische Luftverhältnis ($\lambda = 1$) dar. Je kleiner das Luftverhältnis λ ist, desto größer ist der Wirkungsgrad, da weniger warmes Rauchgas über den Kamin ausgestoßen wird. Der optimale Betriebspunkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen und hohem Wirkungsgrad befindet sich dabei im linken unteren Knick der Kurve. Würde man von diesem Punkt aus noch weiter nach links gehen um den Wirkungsgrad zu steigern, würden die CO-Emissionen aufgrund von lokalem Sauerstoffmangel stark ansteigen. Dies muss grundsätzlich vermieden werden aufgrund der gesundheits- und umweltschädigenden Wirkung. Der CO-Anstieg auf der rechten Seite der Kurve lässt sich dadurch erklären, dass mehr Luft zugeführt wird und es dadurch zu einer geringeren Temperatur und somit langsamer ablaufenden Verbrennungsreaktion kommt. Der Punkt mit den minimalen CO-Emissionen kurz vor dem Anstieg der CO-Emissionen ist gleichzeitig der Punkt mit dem bestmöglichen Wirkungsgrad und somit der gewünschte Betriebspunkt. Die CO- λ -Charakteristik ist, wie zuvor bereits angedeutet, stark von der Anlagengeometrie selbst, sowie vom verwendeten Brennstoff (Rindenanteil, Wassergehalt, usw.) und vom Betriebszustand (Lastanforderung, Luftverteilung, usw.) abhängig. Mit steigendem Wassergehalt, steigender Verunreinigung des Brennstoffes (hoher Rindenanteil, Erde, usw.) sowie bei geringerer Lastanforderung verschiebt sich die CO- λ -Charakteristik bei derselben Anlage nach rechts oben. In Abbildung 2.2 ist dies durch die schwarzen, strichliert eingezeichneten Kurven angedeutet.

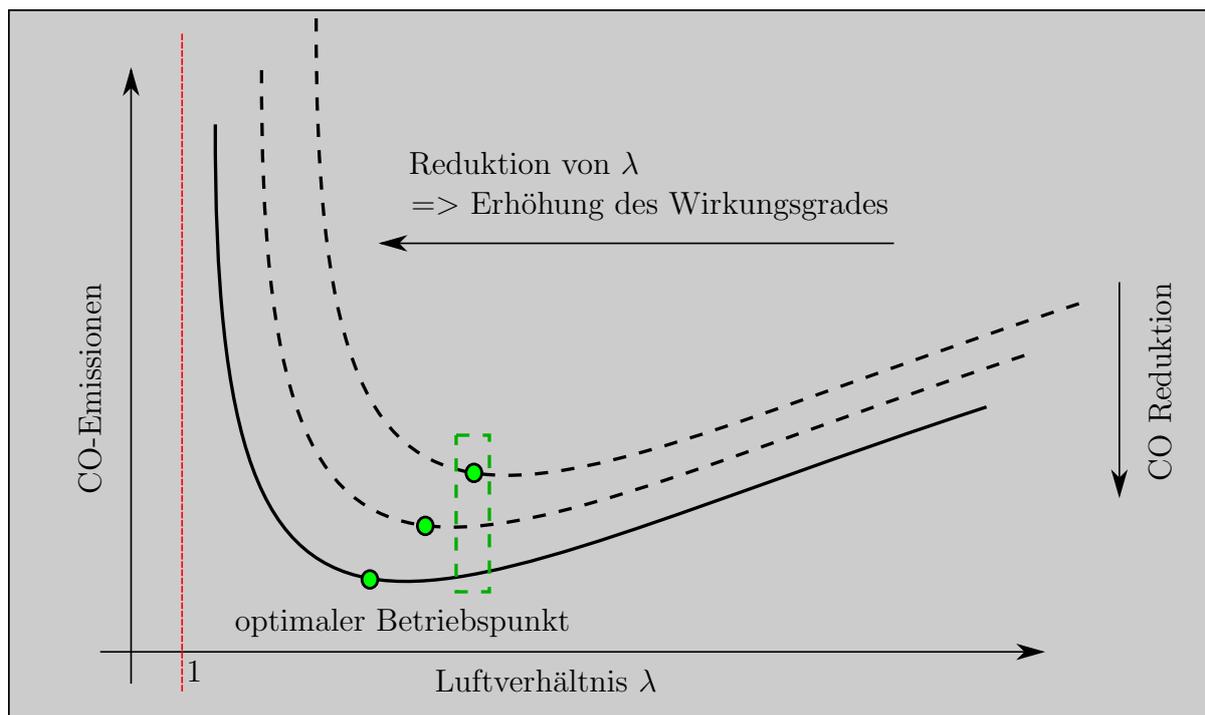


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung einer CO- λ -Charakteristik

Die grundsätzliche Aufgabe der Ausbrandregelung besteht darin, die Anlage stets im optimalen Punkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad zu betreiben. Driftet man von diesem optimalen Punkt aber nur ganz leicht nach links ab, so steigen die CO-Emissionen stark an. Da es derzeit bei Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen nicht möglich ist den CO-Gehalt des Rauchgases wirtschaftlich zu messen und die CO- λ -Charakteristik der Anlagen nicht bekannt ist, müssen die Anlagen mit höherem Sauerstoffgehalt betrieben werden um hohe CO-Emissionen durch Luftmangel in jedem Fall zu vermeiden (siehe Abbildung 2.2 grüner, strichlierter Bereich). Wird die Anlage jedoch mit einem trockenen Brennstoff ohne Verunreinigungen betrieben (siehe schwarze durchgezogene Kurve in Abbildung 2.2), so wäre eine deutliche Erhöhung des Wirkungsgrades bei gleichzeitiger Reduktion der CO-Emissionen durch Absenken des Luftverhältnisses λ möglich. Genau dieser Wirkungsgradverlust ist die Motivation für eine eigene Regelung zum Erreichen des Punktes mit niedrigen CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad, die für gewöhnlich als CO- λ -Regelung bezeichnet wird. Durch Anpassen des Luftverhältnisses versucht die CO- λ -Regelung die Anlage stets im optimalen Punkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad zu betreiben.

Kapitel 3

Grundsätzliche Vorgehensweise

Im folgenden Kapitel wird die grundsätzliche Vorgehensweise bei den durchgeführten Arbeiten erläutert. Es wird ein kurzer Überblick über die durchgeführten Tätigkeiten gegeben.

Alle in diesem Dokument erläuterten Versuche wurden anhand einer marktverfügbaren Biomasse-Kleinfeuerungsanlage der Firma Fröling durchgeführt. Die Feuerungsanlage verfügt über eine Kesselnennleistung von 30 kW und wird mit Hackgut betrieben. Um möglichst viele und vor allem genaue Messdaten zur Verfügung zu haben, wurde die Feuerungsanlage mit zusätzlicher Messensorik ausgestattet (siehe Abschnitt 4.1).

Zu Beginn wurden zwei Sensoren der Firma Lamtec zur Detektion von unverbrannten Gasen genauer untersucht (siehe Kapitel 5). Dabei wurde schlussendlich der Zusammenhang zwischen CO-Konzentration und Sensorsignal mathematisch beschrieben, wobei alle wesentlichen Querempfindlichkeiten bewertet und berücksichtigt wurden. Da die physikalischen Zusammenhänge sehr komplex und zu einem wesentlichen Teil nicht bekannt sind, wurde das mathematische Modell durch experimentelle Modellbildung ermittelt, wobei die verwendeten Messdaten einen möglichst großen Bereich der verschiedenen Einflussparameter abdecken. Die entwickelten Modelle wurden anschließend mit Messdaten von unterschiedlichen Anlagen, unterschiedlichen Sensoren unter Verwendung von verschiedenen Brennstoffen zu unterschiedlichen Zeiten experimentell verifiziert.

Der nächste Schritt beinhaltet die Untersuchung der CO- λ -Charakteristik der Biomasse-Kleinfeuerungsanlage (siehe Kapitel 6). Wie in den einleitenden Kapiteln bereits erklärt, weist die CO- λ -Charakteristik eine starke Abhängigkeit gegenüber mehreren unterschiedlichen Parametern auf. Bei der Untersuchung der CO- λ -Charakteristik der Versuchsanlage wurden die Auswirkungen des Betriebszustandes (Lastanforderung, Luftverteilung, usw.) und des Brennstoffwassergehaltes auf die CO- λ -Charakteristik untersucht. Dazu wurde sortenreines, gesiebtes Lärchenhackgut ohne Rindenanteil mit einem Wassergehalt von ca. 22 Gewichtsprozent der Feuchsubstanz (Gew.% FS) verwendet, um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Brennstoffeigenschaften zu vermeiden. Schlussendlich wurden zahlreiche Messungen bei verschiedenen Luftverhältnissen im Brennstoffbett sowie Gesamtluftverhältnissen für zwei unterschiedliche Leistungsbereiche durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass es notwendig ist, den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases und

das Luftverhältnis im Brennstoffbett, den Leistungsanforderungen anzupassen, damit die CO-Emissionen im Betrieb reduziert und die Anlage bei bestmöglichem Wirkungsgrad betrieben werden kann.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde eine Strategie zur Reduzierung der CO-Emissionen erarbeitet (siehe Kapitel 7). Es wurde die bestehende modellbasierte Regelung, welche derzeit auf konstanten Sauerstoffgehalt des Rauchgases regelt, um einen Führungsgrößenformer der in Abhängigkeit der geforderten Leistung den optimalen Sollwert für den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases und für das Luftverhältnis im Brennstoffbett hinsichtlich geringer CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad vorgibt, erweitert. Darüber hinaus wurde zusätzlich ein Algorithmus zum Suchen des Betriebspunktes mit minimalen CO-Emissionen entworfen, um etwaige Störeinflüsse ausgleichen zu können. Der Algorithmus variiert dabei den Sollwert des Restsauerstoffgehaltes des Rauchgases um den Betriebspunkt mit minimalen CO-Emissionen zu finden. Abschließend wurden die erarbeiteten Strategien implementiert und experimentell verifiziert.

Kapitel 4

Versuchsanlage, Sensorik und Regelung

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die für die Arbeiten verwendete Biomasse-Kleinfeuerungsanlage. Zuerst wird der Aufbau der Versuchsanlage kurz beschrieben. Im Anschluss daran wird die verwendete Sensorik diskutiert und abschließend wird die bereits zu Beginn der Arbeiten bestehende Regelung der Anlage erläutert.

4.1 Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen wurde am Kompetenzzentrum BIOENERGY 2020+ eine Biomasse-Kleinfeuerungsanlage aufgebaut. Bei der in Abbildung 4.1 dargestellten Anlage handelt es sich um einen marktverfügbaren Hackgutkessel der Firma Fröling (Typenbezeichnung T4) mit einer Kesselnennleistung von 30 kW, der für die durchgeführten Versuche mit einem zusätzlichen Sekundärluftgebläse bestückt wurde.

Abbildung 4.2 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage. Die Brennstoffzufuhr erfolgt automatisch über eine sogenannte Stokerschnecke, welche den Brennstoff auf den Rost befördert. Dieser Rost ist kippbar ausgeführt, damit die Asche periodisch nach unten abgeworfen werden kann. Für einen emissionsarmen Betrieb ist die Anlage mit einer gestuften Luftzufuhr ausgestattet. Das bedeutet, dass ein Teil der Luft unter dem Rost als sogenannte Primärluft zugeführt wird und die restliche, für die Verbrennung benötigte Luft, über dem Rost als sogenannte Sekundärluft zugeführt wird. Diese Sekundärluft wird mit hoher Geschwindigkeit über speziell angeordnete Düsen zugeführt, um eine möglichst gute Durchmischung der zugeführten Luft mit den brennbaren Gasen zu erzielen. Entgegen der ursprünglichen Konfiguration wurde die Sekundärluftmenge über einen drehzahlgesteuerten Ventilator vorgegeben, da sich dadurch umfassende Möglichkeiten zur Untersuchung der Luftstufung ergaben. Die Primärluftmenge wird hauptsächlich durch Variation des Feuerraumunterdruckes mit Hilfe des Rauchgasventilators beeinflusst. Dieser sorgt darüber hinaus für den ständigen Unterdruck im Feuerraum, sodass das gesamte Rauchgas sicher über den Kamin ausgestoßen wird. Aufgrund des Unterdrucks im Feuerraum kann es an undichten Stellen auch zum Ansaugen von sogenannter Falschlufte kommen. Die bei der



Abbildung 4.1: Für experimentelle Untersuchungen verwendeter Messaufbau

Verbrennung freigesetzte Wärme wird schlussendlich über die wassergekühlten Wände der Sekundärverbrennungszone sowie den Wärmeübertrager großteils auf den Heizwasserkreis übertragen.

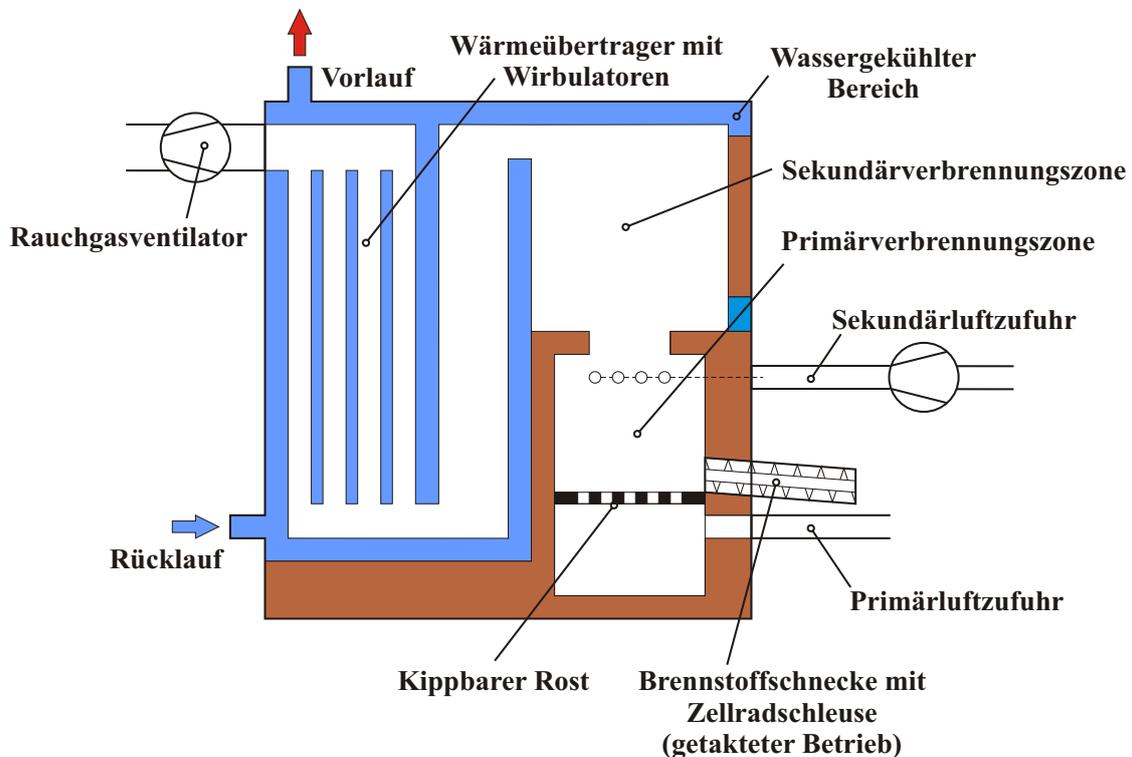


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

4.2 Verwendete Sensoren und Messgeräte

Um möglichst viele und vor allem genaue Messdaten zur Verfügung zu haben, wurde die Feuerungsanlage mit zusätzlicher Messsensorik ausgestattet. Im folgenden Abschnitt soll eine kurze Darstellung der wichtigsten Messgeräte gegeben werden.

Abbildung 4.3 stellt die gesamten verfügbaren Messgrößen schematisch dar. Die vom Hersteller gelieferte Anlage verfügt über die in grün eingezeichneten Messgrößen. Um die Versuchsanlage ausführlich untersuchen zu können, wurde sie mit umfangreicher zusätzlicher Sensorik ausgestattet. Die daraus resultierenden zusätzlichen Messgrößen sind in Abbildung 4.3 mit Rot eingezeichnet. Bei den zusätzlichen Sensoren und Messgeräten handelt es sich neben zahlreichen Temperatur- und Drucksensoren um eine sogenannte Rauchgasanalyseeinheit, zur Ermittlung der CO -, O_2 - und NO_x -Konzentration im Rauchgas, einen Heißfilmluftmassenmesser (HFM) zur exakten Bestimmung des zugeführten Sekundärluftmassenstromes und ein Brennstoffwiegesystem zur Ermittlung des Brennstoffmassenstromes.

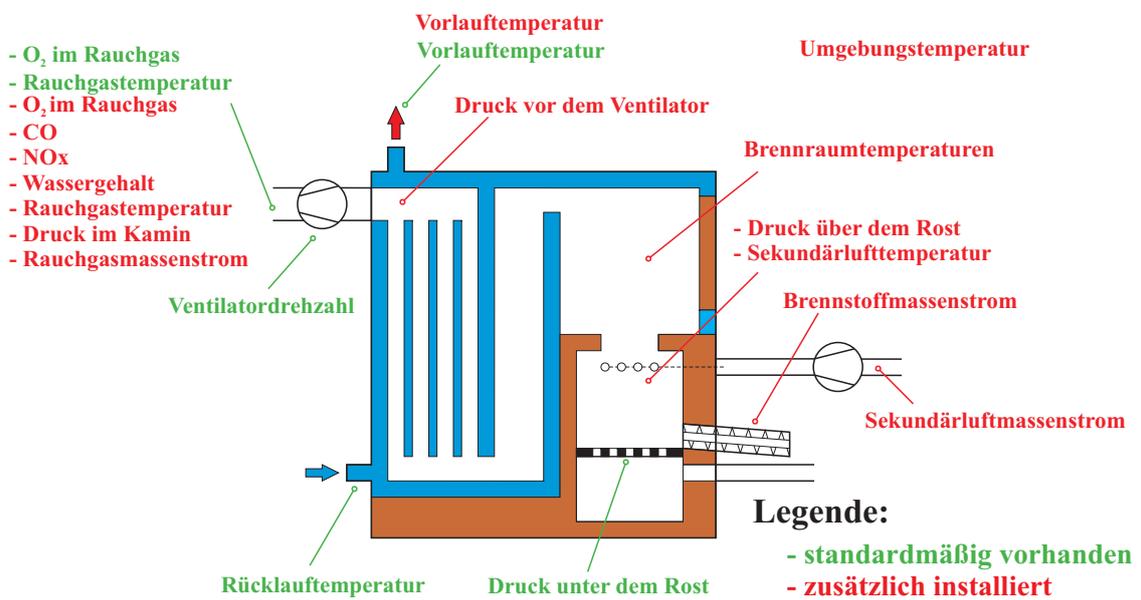


Abbildung 4.3: Darstellung der gesamten Sensorik der Versuchsanlage

4.2.1 Rauchgasanalyseeinheit

Zur exakten Analyse des Rauchgases wurde eine sogenannte Rauchgasanalyseeinheit (RGA, Rosemount NGA 2000) verwendet. Dabei wird das Rauchgas vom Rauchgaskanal über die Entnahmesonde (M&C PSP 4000-H) entnommen und der Rauchgasaufbereitung (ABB SCC-F) zugeführt. In der Rauchgasaufbereitung wird das Rauchgas getrocknet und dann der eigentlichen Rauchgasanalyseeinheit zugeführt. Die Rauchgasanalyseeinheit wurde wöchentlich sowohl mit Nullgas als auch mit Prüfgas kalibriert. Die relevanten Kenngrößen zur O₂- und CO-Messung sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Abbildung 4.4 zeigt die Rauchgasaufbereitung (unten) und die eigentliche Rauchgasanalyseeinheit (oben).

	O ₂	CO
Messverfahren	paramagnetisch	NDIR
Messbereich	0 - 25 Vol.%	0 - 10.000 ppmV

Tabelle 4.1: Spezifikationen der RGA (Rosemount NGA 2000)



Abbildung 4.4: Rauchgasanalyseeinheit (oben) und Rauchgasaufbereitung (unten)

4.2.2 Brennstoffwiegesystem

Um stets den gewünschten Brennstoffmassenstrom zuzuführen, wurde ein sogenanntes Brennstoffwiegesystem verwendet. Dabei wird das Hackgut mit Hilfe einer Vibrorinne auf eine Wägezelle befördert und bei jedem Taktzyklus wird die zuvor eingestellte

Brennstoffmenge in die Stokerschnecke abgeworfen. Abbildung 4.5 zeigt den Aufbau des Brennstoffwiegesystems an der Versuchsanlage.



Abbildung 4.5: Aufbau des Brennstoffwiegesystems an der Versuchsanlage

4.2.3 Pyrometermessung

Um die tatsächliche Rauchgastemperatur in der Sekundärverbrennungszone zu messen wurden sogenannte Absaugpyrometer installiert. Dabei wird ein kleiner Teil des Rauchgases mit sehr hoher Geschwindigkeit an einem Thermoelement, das sich in einem Keramikröhrchen

befindet, vorbei gesaugt. Dadurch wird der unerwünschte Einfluss durch Strahlung verhindert und schlussendlich die tatsächliche Rauchgastemperatur gemessen. Die Temperatur wurde an fünf Stellen der Sekundärverbrennungszone gemessen. Abbildung 4.6 zeigt den Aufbau der Absaugpyrometer an der Versuchsanlage.

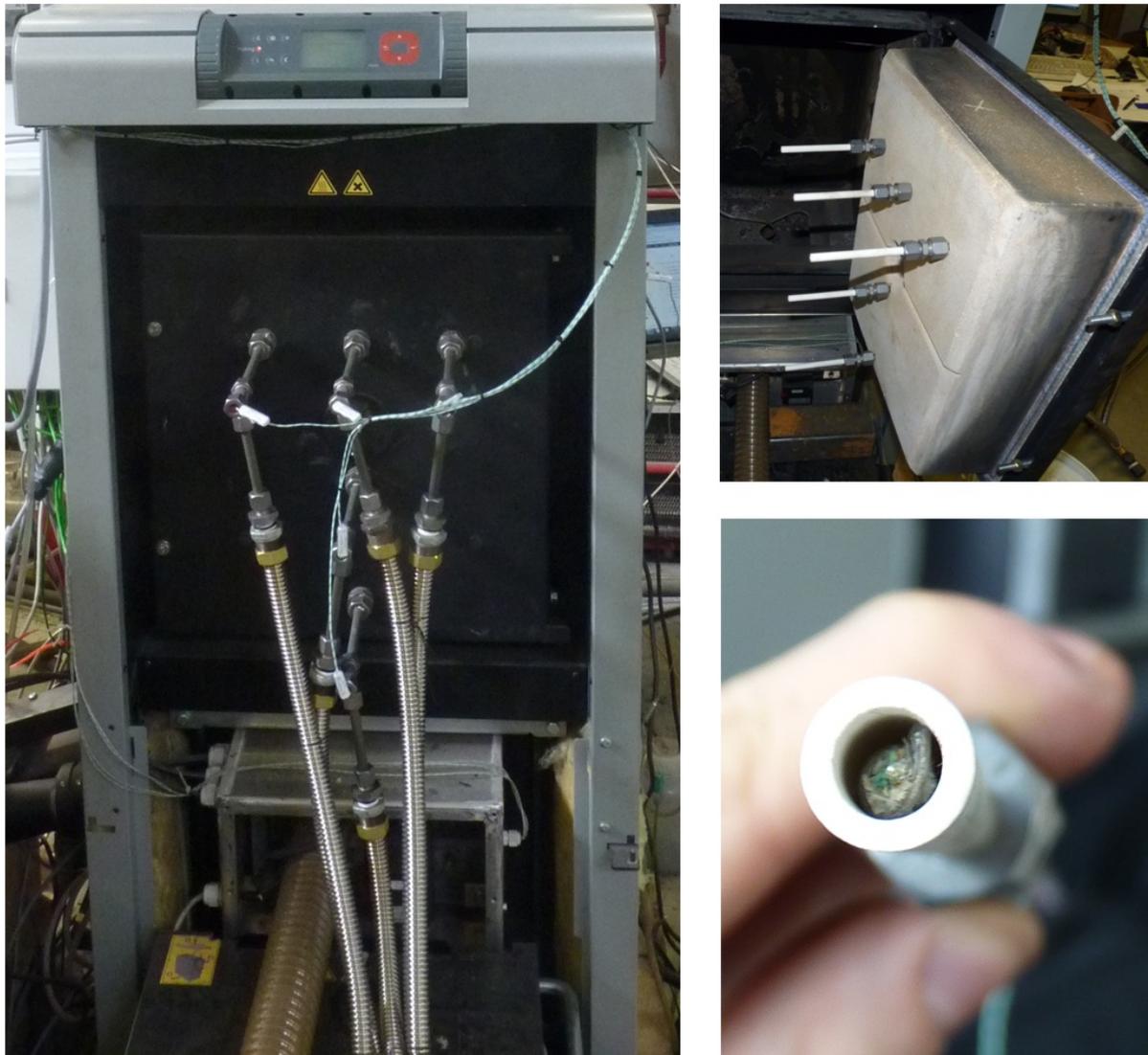


Abbildung 4.6: Aufbau der Absaugpyrometer an der Versuchsanlage

4.3 Modellbasierte Regelung

Die Grundlage der Untersuchungen bildete, wie schon in der Einleitung erwähnt, eine modellbasierte Regelung, welche vom Kompetenzzentrum BIOENERGY 2020+ in Zusammenarbeit mit dem Institut der Regelungstechnik an der TU Graz entwickelt wurde [1, 7]. Im folgenden Abschnitt werden zuerst die mathematischen Modelle zur Beschreibung der Versuchsanlage erläutert. Im Anschluss daran soll kurz das Regelkonzept beschrieben werden.

4.3.1 Mathematisches Modell

Um das Verhalten der Biomasse-Kleinfeuerungsanlage zu beschreiben wurden mathematische Modelle für alle relevanten Anlagenteile entwickelt [8, 15]. Beim resultierenden Gesamtmodell handelt sich um ein nichtlineares Modell 3. Ordnung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Modellierung für verschiedene Anlagenteile getrennt durchgeführt (siehe Abbildung 4.7), woraus schlussendlich Teilmodelle für die Bereiche

- Brennstoffbett
- Verbrennungszone
- Wärmeübertrager
- Versorgung

resultieren.

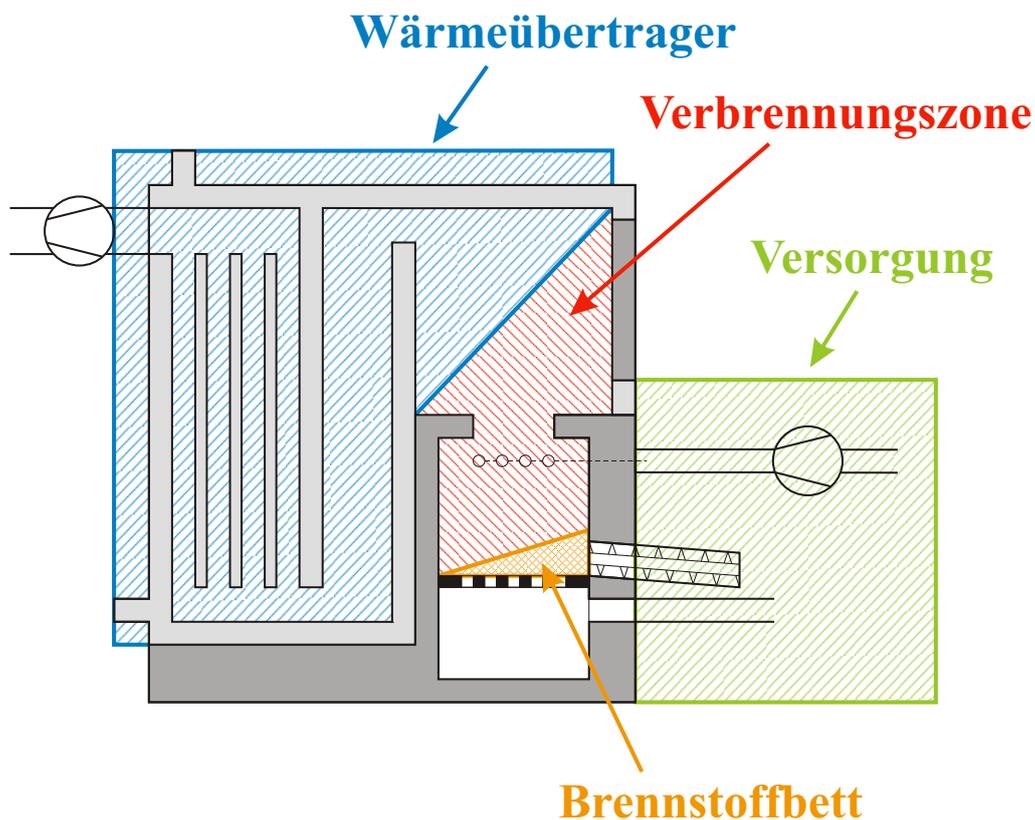


Abbildung 4.7: Aufspaltung in Teilsysteme

4.3.1.1 Brennstoffbett

Das erste Teilmodell des gesamten mathematischen Modells beschreibt das Brennstoffbett. Das verwendete Modell wurde ursprünglich für eine mittelgroße Biomassefeuerungsanlage

entwickelt [4] und in weiterer Folge auch für die betrachtete Anlage erfolgreich adaptiert [8, 15]. Zu den Eingangsgrößen zählen der Primärluftmassenstrom \dot{m}_{PL} und der Brennstoffmassenstrom $\dot{m}_{B_{rst}}$. Zur Modellierung wurde das Brennstoffbett in drei Zonen unterteilt. Die erste Zone bildet die sogenannte *Totzone*. Hier kommt es zur Erwärmung des eingebrachten feuchten Brennstoffes. In der nächsten Zone, der *Verdampfungszone*, wird das im Brennstoff gebundene Wasser verdampft. Es kommt zur Trocknung des Brennstoffes. Die letzte Zone bildet die *Abbauzone*, hier werden die flüchtigen Gase freigesetzt und es kommt zum Abbrand der verbleibenden Holzkohle. Das mathematische Modell des Brennstoffbetts beruht letztendlich auf je einer Massenbilanz für die Masse an Wasser in der Verdampfungszone $m_{W,Z}$ und die Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone $m_{B,Z}$. Mit Hilfe der nachfolgenden zwei Differentialgleichungen kann das Verhalten zufriedenstellend beschrieben werden:

$$\frac{dm_{W,Z}(t)}{dt} = - \underbrace{c_{Verd} m_{W,Z}(t)}_{\text{verdampftes Wasser}} + \underbrace{\frac{dm_{W,ein}(t - T_t(t))}{dt}}_{\text{zugeführtes Wasser}} \quad (4.1)$$

$$\frac{dm_{B,Z}(t)}{dt} = - \underbrace{c_{Abb} m_{B,Z}(t) [\dot{m}_{PL}(t) + \dot{m}_{PL0}]}_{\text{abgebauter trockener Brennstoff}} + \underbrace{\frac{dm_{B,ein}(t - T_t(t))}{dt}}_{\text{zugeführter trockener Brennstoff}} \quad (4.2)$$

Dabei stellen c_{Verd} , c_{Abb} und \dot{m}_{PL0} konstante Parameter, \dot{m}_{PL} den Primärluftmassenstrom, m_W die um die Totzeit T_t verzögerte Wassermasse und m_B den um die Totzeit verzögerten trockenen Brennstoff dar. m_W und m_B wurden zur mathematischen Vereinfachung eingeführt. Sie werden aus dem, der Anlage zugeführten, Massenstrom des im Brennstoff enthaltenen Wassers \dot{m}_W , sowie dem zugeführten Massenstrom an trockenem Brennstoff \dot{m}_B berechnet:

$$m_{W,ein}(t) = \int_0^t \dot{m}_{W,ein}(\tau) d\tau \quad (4.3)$$

$$m_{B,ein}(t) = \int_0^t \dot{m}_{B,ein}(\tau) d\tau \quad (4.4)$$

Die aus dem Brennstoffbett austretenden Massenströme an verdampftem Wasser $\dot{m}_{H_2O,Verd}$ sowie abgebautem trockenem Brennstoff $\dot{m}_{CHO,Abb}$ errechnen sich wie folgt:

$$\dot{m}_{H_2O,Verd} = c_{Verd} m_{W,Z} \quad (4.5)$$

$$\dot{m}_{CHO,Abb} = c_{Abb} m_{B,Z}(t) [\dot{m}_{PL}(t) + \dot{m}_{PL0}] \quad (4.6)$$

4.3.1.2 Verbrennung

Die Verbrennung wird grundsätzlich in die Primär- und Sekundärverbrennungszone unterteilt. Durch die Zuführung von Primär- und Sekundärluft kommt es darin zur Verbrennung des abgebauten, trockenen Brennstoffes. Die Eingangsgrößen dieses Teilsystems sind somit neben den Ausgangsgrößen des Brennstoffbettmodells (Massenstrom des verdampften

Wassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Verd}}$ und Massenstrom des abgebauten trockenen Brennstoffes $\dot{m}_{\text{CHO,Abb}}$ der Primärluftmassenstrom \dot{m}_{PL} und der Sekundärluftmassenstrom \dot{m}_{SL} . Die Modellierung der Verbrennung erfolgt mit Hilfe von gewöhnlichen Stoff- und Energiebilanzen (Verbrennungsrechnung), woraus schlussendlich die Zusammensetzung des resultierenden Rauchgases, die adiabate Verbrennungstemperatur und der Rauchgasmassenstrom resultieren [1, 6, 7].

Die in mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen erforderliche Modellierung der Speicherwirkung des Schamotts kann bei Kleinanlagen vernachlässigt werden [8, 15], da die Masse der feuerfesten Auskleidung bezogen auf die Kesselmasse um das Zehn- bis Zwanzigfache geringer ist als bei größeren Anlagen, in denen der gesamte Feuerraum schamottiert ist. Auch die Umgebungsverluste liegen bei der Kleinanlage im einstelligen Prozentbereich und sind somit für die regelungstechnische Anwendung vernachlässigbar [8, 15]. Somit kann die Temperatur des Rauchgases am Eintritt in den Wärmeübertrager gleich der adiabaten Feuerraumtemperatur gesetzt werden.

4.3.1.3 Wärmeübertrager

Das nächste Teilsystem stellt der Wärmeübertrager dar. Er hat die Aufgabe die bei der Verbrennung freigesetzte Wärme auf den Heizwasserkreislauf zu übertragen. Die Modellierung des Wärmeübertragers kann für den Rauchgas- und Wasserteil getrennt durchgeführt werden, da die Rückwirkung der Wasserseite aufgrund der geringen Temperaturspreizung (~ 20 °C) im Vergleich zur Temperaturspreizung der Rauchgasseite (~ 800 °C) vernachlässigt werden kann. Die Eingangsgrößen des Modells [3] sind die adiabate Verbrennungstemperatur T_{adiabat} , der Rauchgasmassenstrom \dot{m}_{RG} , der Wassermassenstrom \dot{m}_{W} und die Rücklauftemperatur T_{RL} . Mit Hilfe des folgenden statischen Modells, kann die Rauchgasseite beschrieben werden:

$$\dot{Q} = c_{\text{WT}} [T_{\text{RG}} - T_{\text{W}}]^{q_1} \dot{m}_{\text{RG}}^{q_2} \quad (4.7)$$

Dabei entspricht \dot{Q} dem Wärmestrom, welcher von der Rauchgasseite auf die Wasserseite übertragen wird. T_{RG} gibt die Rauchgastemperatur am Wärmeübertragereintritt an. Wie in Abschnitt 4.3.1.2 erklärt können bei Kleinanlagen die Speicherwirkung des Schamotts sowie die Umgebungsverluste vernachlässigt werden. Somit ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$T_{\text{RG}} = T_{\text{adiabat}} \quad (4.8)$$

Des Weiteren entspricht T_{W} der konstant angenommenen mittleren Wassertemperatur und \dot{m}_{RG} dem Rauchgasmassenstrom. Bei den Parametern q_1 , q_2 und c_{WT} handelt es sich um experimentell ermittelte Modellparameter.

Die folgende gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung beschreibt das wasserseitige Verhalten des Wärmeübertragers:

$$\frac{dT_{\text{VL}}}{dt} = -\frac{\dot{m}_{\text{W}}}{c_{\tau,\text{W}}} T_{\text{VL}} + \frac{\dot{m}_{\text{W}}}{c_{\tau,\text{W}}} \left[\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{\text{W}} c_{\text{W}}} + T_{\text{RL}} \left(t - \frac{c_{\text{T,W}}}{\dot{m}_{\text{W}}} \right) \right] \quad (4.9)$$

T_{VL} kennzeichnet dabei die Vorlauftemperatur und ist zugleich die Ausgangsgröße des Wärmeübertragermodells. \dot{m}_W kennzeichnet den Wassermassenstrom und T_{RL} die Rücklauf-temperatur. Die spezifische Wärmekapazität des Wassers wird mit c_W bezeichnet. $c_{\tau,W}$ und $c_{T,W}$ sind experimentell ermittelte Modellparameter.

4.3.1.4 Versorgung

Zur Versorgung gehören die Brennstoffzufuhr sowie die Primär- und Sekundärluftzufuhr. In der Folge wird zuerst auf die Luftzufuhr eingegangen im Anschluss daran wird die Brennstoffzufuhr genauer behandelt.

Luftzufuhr

Die marktverfügbare Anlage wurde dahingehend modifiziert, dass die Sekundärluft über einen externen Ventilator zugeführt wird, da sich dadurch umfassende Möglichkeiten zur Untersuchung der Luftstufung ergeben. Der Rauchgasventilator erzeugt einen Unterdruck im Feuerraum und durch eine Öffnung unter dem Rost wird dadurch Primärluft angesaugt. Zur mathematischen Beschreibung der Luftzufuhr [8, 15] wurden die für Druck- und Volumenstromverhältnisse wesentlichen Phänomene berücksichtigt. Dazu zählen der Druckabfall in einem Rohr, der Druckabfall an einer Blende sowie die Druckanhebung durch einen Ventilator [2]. Aufgrund des Unterdrucks in der Anlage ist auch der Falschlufteintrag nicht zu vernachlässigen. Zu dessen Abschätzung wurden ebenfalls geeignete Modelle verwendet [8, 15].

Brennstoffzufuhr

Der Brennstoff wird mit Hilfe einer getakteten Stokerschnecke in den Feuerraum eingebracht. Der Brennstoffmassenstrom \dot{m}_B wird durch Variation des Taktverhältnisses zwischen Einschaltzeit T_e und Ausschaltzeit T_a eingestellt und kann wie folgt beschrieben werden [8, 15]:

$$\dot{m}_B = \begin{cases} \dot{m}_{B,\max} \frac{T_e - T_{\min}}{T_e + T_a}, & \text{für } T_e \geq T_{\min} \\ 0, & \text{für } T_e < T_{\min} \end{cases} \quad (4.10)$$

$\dot{m}_{B,\max}$ kennzeichnet dabei den maximalen Brennstoffmassenstrom, der sich bei Dauerbetrieb der Förderschnecke mit Nenndrehzahl ergeben würde. Dieser Parameter ist im Wesentlichen von der Schüttdichte des Brennstoffes abhängig. Aufgrund der elastischen Aufhängung des Schneckenmotors treten beim Taktbetrieb Torsionseffekte auf, welche durch die Mindesteinschaltzeit T_{\min} berücksichtigt werden. Erst ab diesem Zeitpunkt beginnt die Stokerschnecke zu fördern.

4.3.1.5 Gesamtmodell

Durch Zusammenfügen der einzelnen Teilmodelle aus Abschnitt 4.3.1.1 bis Abschnitt 4.3.1.3 erhält man ein Gesamtmodell, welches das Verhalten einer Biomasse-Kleinfeuerungsanlage beschreibt. Dabei wurde ein für eine mittelgroße Biomassefeuerungsanlage hergeleitetes

Gesamtmodell [1, 7] so adaptiert, dass es auch für Biomasse-Kleinf Feuerungsanlagen eingesetzt werden kann. Es konnten hierbei einige Vereinfachungen getroffen werden, da die Biomasse-Kleinf Feuerungsanlage keine Rauchgasrezirkulation besitzt und die Speicherwirkung des Schamotts vernachlässigt werden kann (siehe Abschnitt 4.3.1.2). Abbildung 4.8 zeigt die Struktur des Gesamtmodells der Biomasse-Kleinf Feuerungsanlage.

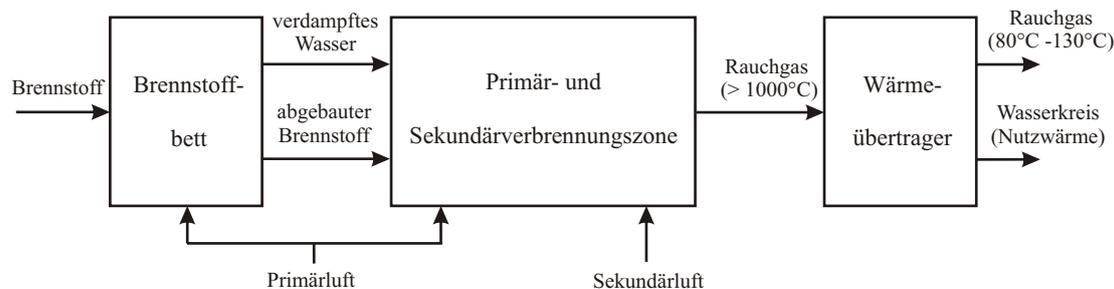


Abbildung 4.8: Modellstruktur der Biomasse-Kleinf Feuerungsanlage

Um als Grundlage für eine modellbasierte Regelung geeignet zu sein, muss das Modell möglichst einfach sein und sollte wenn möglich als System von gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung der Form

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (4.11)$$

mit dem Zustandsvektor \mathbf{x} und dem Eingangsvektor \mathbf{u} dargestellt werden können. Dazu wurden weitere Vereinfachungen der Teilmodelle durchgeführt und die Zustandsvariablen sowie die Eingangsvariablen wurden so gewählt, dass letztendlich ein einfaches Gesamtmodell als Grundlage für den Reglerentwurf zur Verfügung stand.

Als Zustandsvariablen wurden die Masse an Wasser in der Verdampfungszone $x_1 = m_{W,Z}$, die Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone $x_2 = m_{B,Z}$ und die Vorlauf-temperatur $x_3 = T_{VL}$ gewählt. Die gewählten Eingangsgrößen sind der Massenstrom an trockenem Brennstoff $u_1(t) = \dot{m}_{B,\text{ein}}(t - T_t)$, verzögert um die Totzeit T_t , die Summe aus dem Massenstrom an zugeführter Primärluft \dot{m}_{PL} und dem Modellparameter \dot{m}_{PL0} $u_2(t) = \dot{m}_{PL}(t) + \dot{m}_{PL0}$ sowie der Massenstrom an gesamter zugeführter Luft $u_3(t) = \dot{m}_{PL}(t) + \dot{m}_{SL}(t)$. Die erste Störgröße d_1 entspricht dem Wassergehalt des Brennstoffes $w_{H_2O,Brst}$, verzögert um die Totzeit T_t , und berechnet sich wie folgt $d_1(t) = \frac{w_{H_2O,Brst}(t - T_t)}{1 - w_{H_2O,Brst}(t - T_t)}$. Die restlichen Störgrößen sind die spezifische Enthalpie der zugeführten Luft $d_2 = h_{Luft}$, der Wassermassenstrom durch den Wärmeübertrager $d_3 = \dot{m}_w$ und die verzögerte Rücklauf-temperatur $d_4 = T_{RL} \left(t - \frac{c_{T_t,WT}}{\dot{m}_w} \right)$.

Somit besteht das gesamte Modell aus drei gewöhnlichen Differentialgleichungen erster

Ordnung

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{c_{11}}{1 + c_{12}d_1}x_1 + \frac{d_1}{1 + c_{12}d_1}u_1 \quad (4.12)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{c_{21}}{1 + c_{12}d_1}x_1 - c_{22}x_2u_2 + \frac{1}{1 + c_{12}d_1}u_1 \quad (4.13)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = c_{31}x_1 + c_{32}x_2u_2 + c_{33}u_3 + c_{34}d_3d_4 - c_{34}d_3x_3 \quad (4.14)$$

mit den Zustandsvariablen $(x_1 \dots x_3)$, den Eingangsgrößen $(u_1 \dots u_3)$, den Störgrößen $(d_1 \dots d_4)$ und den Parametern $(c_{11} \dots c_{34})$.

4.3.2 Regelungskonzept

Die Regelung der Biomasse-Kleinfeuerungsanlage basiert grundsätzlich auf einer für mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen entwickelten Regelung [1, 7]. Da die Biomasse-Kleinfeuerungsanlage keine Rezirkulation des Rauchgases und keine Messung der Feuerraumtemperatur besitzt, ergeben sich im Vergleich zu mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen jedoch einige Änderungen. Abbildung 4.9 zeigt die grundlegende Struktur der Regelung. Die wichtigsten Bestandteile sind der Regler und der erweiterte Kalmanfilter. Der Regler verwendet grundsätzlich die Eingangs- Ausgangslinearisierung zur Entkopplung und Linearisierung des nichtlinearen Systems. Der erweiterte Kalmanfilter dient zur Rekonstruktion der nicht messbaren Zustandsgrößen. Der mit *Umrechnung* gekennzeichnete Block setzt die vom Regler geforderten Massenströme in eine entsprechende Ansteuerung der Stellgeräte um. Dazu wurden die in Abschnitt 4.3.1.4 erläuterten Modelle der Luft- und Brennstoffzufuhr verwendet.

Der Sauerstoffgehalt des Rauchgases $x_{O_2, RG}$ und die Vorlauftemperatur T_{VL} sind wesentliche Betriebsparameter einer Biomasse-Kleinfeuerungsanlage. Aus diesem Grund wurden diese beiden Größen als die ersten (geregelten) Ausgangsgrößen

$$y_1 = x_{O_2, RG} = \frac{c_{51}x_2u_2 + c_{52}u_3}{c_{53}x_1 + c_{54}x_2u_2 + c_{55}u_3} \quad (4.15)$$

$$y_2 = T_{VL} = x_3 \quad (4.16)$$

mit den konstanten Parametern $(c_{51} \dots c_{55})$ gewählt.

Zu deren Regelung wurde die Methode der Eingangs- Ausgangslinearisierung verwendet [1, 7]. Zur Bestimmung des relativen Grades, werden die Ausgangsvariablen so oft differenziert bis alle Ausgangsvariablen eine Abhängigkeit gegenüber zumindest einer Eingangsvariablen zeigen. In diesem Fall muss lediglich die Ausgangsgröße y_2 einmal abgeleitet werden, damit zumindest eine Eingangsgröße vorkommt:

$$y_1 = g_1(x_1, x_2, u_2, u_3) \quad \frac{dy_2}{dt} = g_{21}(x_1, x_2, x_3, u_2, u_3) \quad (4.17)$$

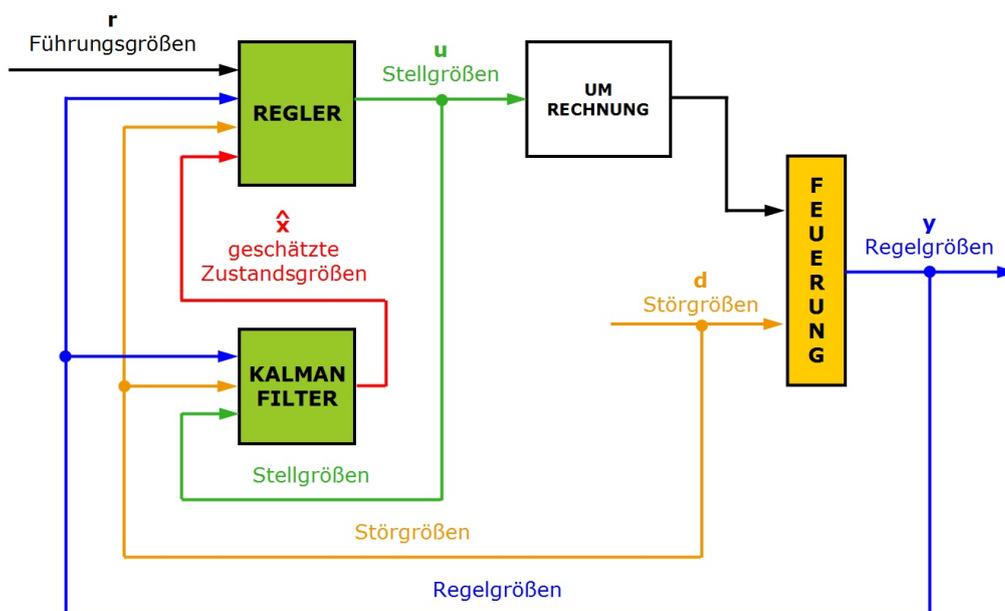


Abbildung 4.9: Grundlegende Struktur der Regelung

Somit hat das System einen relativen Grad von $\rho = 1$ was zu einem nicht beobachtbaren Teilsystem zweiter Ordnung führt, da das gesamte System eine Ordnung von $n = 3$ besitzt. Darüber hinaus berücksichtigt das resultierende Regelgesetz die Eingangsgröße u_1 derzeit noch nicht. Um dieses Problem zu lösen, wurde die Masse des trockenen Brennstoffes in der Verbrennungszone als dritte geregelte Ausgangsgröße $y_3 = x_2 = m_{B,Z}$ gewählt. Dadurch steigt der relative Grad ρ auf $\rho = 2$ an. Das daraus resultierende nicht beobachtbare Teilsystem erster Ordnung ist stabil und alle drei Eingangsgrößen können explizit vorgegeben werden.

Eine geeignete Führungsgröße für die dritte Regelgröße y_3 ergibt sich aus der näheren Betrachtung des Gleichgewichtszustandes des Systems und dem dabei geforderten Luftverhältnis im Brennstoffbett $r_{\lambda_{BB}}$. Nullsetzen der zeitlichen Ableitungen der Zustandsvariablen in den Zustandsgleichungen, welche für den Reglerentwurf verwendet wurden (4.12 und 4.14) führt zusammen mit den Ausgangsgleichungen (4.15 und 4.16) zu den Eingangsgrößen in der Ruhelage ($u_{1,RL}$, $u_{3,RL}$), welche benötigt werden um die konstanten Führungsgrößen ($r_{1,RL}$, $r_{2,RL}$) im Gleichgewichtszustand zu bestimmen. Die für das geforderte Luftverhältnis im Brennstoffbett $r_{\lambda_{BB}}$ im Gleichgewichtszustand benötigte Eingangsgröße $u_{2,RL}$, welche die Primärluft widerspiegelt, berechnet sich daraus gemäß

$$u_{2,RL} = -\frac{c_{51}}{c_{22}c_{52}}r_{\lambda_{BB}}u_{1,RL} + \dot{m}_{PL,0} \quad (4.18)$$

mit den Konstanten (c_{51} , c_{22} , c_{52} und $\dot{m}_{PL,0}$). In weiterer Folge ergibt sich daraus die Führungsgröße r_3 der Ausgangsgröße y_3

$$r_3 = \frac{c_{52}[u_{2,RL} - \dot{m}_{PL,0}]}{-c_{51}r_{\lambda_{BB}}u_{2,RL}} \quad (4.19)$$

die zum gewünschten Luftverhältnis im Brennstoffbett führt.

Mit Hilfe der Eingangs- Ausgangslinearisierung lässt sich ein geeignetes Regelgesetz für die ersten beiden Regelgrößen (4.15) und (4.16) angeben, wobei ein zusätzlicher integrierender Regler zur Verbesserung der stationären Genauigkeit verwendet wurde [1]. Das resultierende Führungsübertragungsverhalten zwischen den Führungsgrößen (r_1, r_2) und den entsprechenden Ausgangsvariablen (y_1, y_2) ist linear und entkoppelt.

Diese Methode kann für die Regelgröße $y_3 = x_2 = m_{B,Z}$ jedoch, aufgrund des akau-salen Zusammenhanges zwischen der Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone und der entsprechenden Eingangsgröße $u_1(t) = \dot{m}_{B,\text{ein}}(t - T_t)$ nicht angewendet werden. Der Brennstoffmassenstrom wird aber nur dazu verwendet um die langfristige Leistungsanfor-derung zu beeinflussen. Aus diesem Grund wird der Brennstoffmassenstrom, als konstant gewählt und gleich dem Wert $u_{1,RL}$ gesetzt. Zusätzlich wird noch ein Proportionalregler ein-gesetzt, welcher dann eingreift wenn es zu einer Regelabweichung der Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone $y_3 = x_2 = m_{B,Z}$ von der zugehörigen Führungsgröße r_3 kommt [1].

Da nicht alle Zustandsvariablen gemessen werden können, wird ein erweiterter Kalman-filter zur optimalen Schätzung der Zustandsvariablen im Sinne der minimalen Varianz des Schätzfehlers verwendet. Dabei wurde das mathematischen Modell des Systems (Glei-chung (4.12) bis (4.14)) um zwei nicht messbare Parameter erweitert. Zur Korrektur der prädizierten Ausgangsgrößen wurde das Messsignal des Restsauerstoffgehaltes sowie der Vorlauftemperatur verwendet [7].

Kapitel 5

CO-Sensoren

Bei der Verbrennung von Biomasse kommt es bei einer unvollständigen Verbrennung zu erhöhten Emissionen, die zum Teil stark umwelt- und gesundheitsschädigend sind. Zu diesen Emissionen zählen vor allem Kohlenmonoxid CO und verschiedene Kohlenwasserstoffe C_xH_y . Kohlenmonoxid ist ein geschmackloses, farbloses, geruchloses und giftiges Gas. Es wird häufig als Indikator für eine vollständige Verbrennung herangezogen, da die Oxidation von Kohlenmonoxid CO zu Kohlendioxid CO_2 im Vergleich zu den anderen, für einen vollständigen Ausbrand, benötigten Reaktionen die langsamste Reaktion darstellt [9]. Kurz zusammengefasst, wenn kein CO im Rauchgas enthalten ist, kann von einer vollständigen Verbrennung ausgegangen werden. Aus diesem Grund versucht man die CO-Emissionen bei der Verbrennung von Biomasse zu minimieren.

Um die CO-Emissionen mit Hilfe von steuerungs- oder regelungstechnischen Maßnahmen reduzieren zu können, ist es von Vorteil den aktuellen CO-Gehalt des Rauchgases zu kennen. Derzeit gibt es jedoch nur sehr teure Rauchgasanalyseeinheiten, die die CO-Emissionen im ausgestoßenen Rauchgas ermitteln können. Eine dauerhafte Messung der CO-Emissionen ist daher derzeit nur bei großen Anlagen wirtschaftlich.

In diesem Kapitel werden die am Markt verfügbaren CO-Sensoren untersucht, ob sie für den Einsatz bei der Biomasseverbrennung zum Messen der CO-Emissionen im Rauchgas geeignet sind. Hier werden vor allem jene Sensoren untersucht, die aufgrund ihres niedrigen Preises auch bei Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen wirtschaftlich eingesetzt werden können. Aufgrund dieser Anforderung wurden zwei Sensoren der Firma Lamtec mit den Bezeichnungen CarboSen und KS1D ausgewählt die in dieser Arbeit näher betrachtet werden.

5.1 Allgemeine Grundlagen

Die beiden Sensoren CarboSen und KS1D sind in der Lage brennbare Gase zu detektieren. Sie liefern proportional zum Kohlenmonoxidgehalt des Rauchgases ein Spannungssignal, welches jedoch Querempfindlichkeiten zu anderen Stoffen aufweist. Der KS1D Sensor misst zusätzlich die Sauerstoffkonzentration.

In diesem Abschnitt soll näher auf die beiden gewählten Sensoren CarboSen und KS1D eingegangen werden. Es sollen die grundlegenden Eigenschaften der Sensoren aufgeführt werden. Den Abschluss dieses Abschnitts bildet die Beschreibung des Messaufbaus, welcher zur experimentellen Untersuchung verwendet wurde.

5.1.1 Grundlegende Eigenschaften des CarboSen Sensors

Der CarboSen Sensor dient zur Detektion von brennbaren Gasen wie z.B. CO, H₂ oder C_xH_y. Diese Gase werden auch als CO-Äquivalent CO_e bezeichnet.

Das Messsystem besteht aus dem Sensor und der Sensorelektronik. Die Einheit aus Sensorelement, Sensorgehäuse und Sensorsignalkabel bildet den Sensor, der zur Erfassung der Messgrößen dient (siehe Abbildung 5.1). Die Sensorelektronik ermöglicht einen temperaturkompensierten Betrieb des Sensors, sowie die Erfassung und Ausgabe aller Sensorgrößen (siehe Abbildung 5.2).



Abbildung 5.1: CarboSen Sensor

Der CarboSen Sensor arbeitet auf dem Prinzip der Festkörperelektrolyse. Die dabei eingesetzte Technologie ist durch die Lambda Sonde allgemein bekannt und weit verbreitet. Im Gegensatz zur Lambda Sonde, die den Sauerstoff nach dem Nernstschen Prinzip misst, arbeitet der CarboSen Sensor nach dem Nicht-Nernstschen Prinzip. Durch Variation von Geometrie, Material und elektrischer Verschaltung können Sensoren nach dem Nicht-Nernstschen Prinzip auch andere Gase wie z.B. CO, H₂ oder HC detektieren [12].

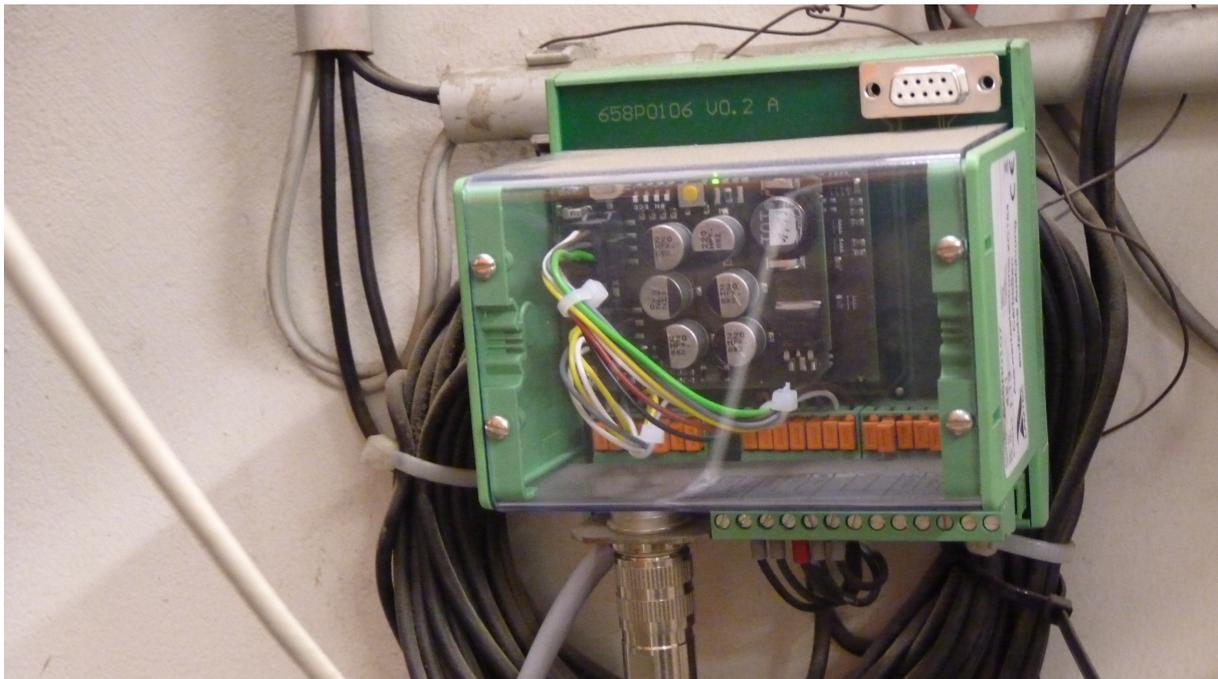


Abbildung 5.2: CarboSen Sensorelektronik

Zum Betrieb des Sensors ist es nötig, diesen auf seine Arbeitstemperatur aufzuheizen. Dies erfolgt über eine Heizstruktur, die auf dem Sensorelement rückseitig aufgebracht ist. Die Temperatur liegt bei 630 °C. Diese Temperatur wird von der Elektronik automatisch eingestellt und während des Betriebs konstant gehalten.

Der Messbereich des Sensors liegt zwischen 0 und 3.000 ppmV. Der Sensor liefert proportional zum CO_e-Gehalt ein Spannungssignal, welches laut Hersteller Querempfindlichkeiten gegenüber der Sauerstoffkonzentration, der Temperatur und dem Volumenstrom aufweist. Keine Querempfindlichkeiten hat das Signal gegenüber Wasserdampf, CO₂ und inerte Gase.

Die Lebensdauer des Sensors hängt stark vom verwendeten Brennstoff ab und wird vom Hersteller für Erdgas mit drei Jahren, und für Hackschnitzel mit einem Jahr angegeben. In den ersten Betriebsstunden kann es laut Hersteller zu Einlaufeffekten kommen, die zur Folge haben, dass die Empfindlichkeit des Sensors ansteigt.

Um das Funktionieren des Sensors zu gewährleisten muss im Messgas immer ein Anteil Restsauerstoff vorhanden sein (minimal 0,5 Vol.% bis 1 Vol.%). Weiters darf der Sensor keinen Stößen oder Erschütterungen ausgesetzt werden und es ist darauf zu achten, dass dem Sensor keine Silikondämpfe oder Feuchtigkeit zugeführt werden, da die Funktion ansonsten beeinträchtigt werden könnte. Somit kommt eine Reinigung mit ungereinigter Druckluft nicht in Frage, da diese meist Feuchtigkeit oder Silikone enthält. Weitere für den Sensor schädliche Stoffe sind Schwefeldioxid, Fluor- und Chlorverbindungen. Diese sind ebenfalls zu vermeiden, da es sonst zu einer Fehlfunktion kommen kann.

Bei Betriebsunterbrechungen die länger als drei Monate dauern, ist es empfohlen den Sensor auszuschalten. Sollte die Unterbrechung kürzer als drei Monate sein, ist es für die Lebensdauer des Sensors besser, wenn dieser in Betrieb bleibt, d.h. er wird durchgehend beheizt.

Weiters ist auf die richtige Einbaulage des Sensors zu achten. Am Besten wäre eine senkrechte Einbauposition mit dem Anschlusskabel nach oben. Ist dies nicht möglich, kann der Sensor auch bis zu 10° über der Waagrechten eingebaut werden. Ein Einbau unterhalb der Waagrechten kann zur Beschädigung des Sensors führen.

Wird ein neuer Sensor mit der Sensorelektronik betrieben, muss stets der Heizwiderstand neu bestimmt werden (siehe Kurzanleitung für Benutzer der CarboSen 1.000 [12], Seite 13). Es ist dabei besonders darauf zu achten, dass der Sensor auf Zimmertemperatur (ca. 20°C) abgekühlt und keiner Zugluft ausgesetzt ist. Im späteren Betrieb sollte die Elektronik nur mit angestecktem Sensor in Betrieb genommen werden, da sonst der Heizwiderstand wieder neu bestimmt werden muss [12].

5.1.2 Grundlegende Eigenschaften des KS1D Sensors

Der KS1D Sensor ermöglicht die simultane Messung der O_2 -Konzentration und der Konzentration an brennbareren Gasen (CO/H_2), angezeigt als CO -Äquivalent CO_e , im überstöchiometrischen Bereich ($\lambda > 1$) (siehe Abbildung 5.3).



Abbildung 5.3: KS1D Sensor

Die Basis des KS1D Sensors ist eine beheizte elektrochemische Messzelle aus Zirkoniumdioxid-Keramik.

Der Sensor verfügt über 3 Elektroden:

- O₂-sensitive Platinelektrode
- CO/H₂-sensitive Elektrode aus einer Platin/Edelmetalllegierung
- Platin Referenzelektrode

Brennbare Bestandteile wie auch Sauerstoffmoleküle werden an der Elektrode adsorbiert und diffundieren zur sogenannten „Drei-Phasen-Grenze“, gebildet durch Messgas, Elektrode und Zirkoniumdioxid. Neben der vom Sauerstoffgehalt bestimmten Nernstspannung U_{O_2} erzeugen die im Messgas vorhandenen brennbaren Bestandteile eine zusätzliche Gleichspannung U_{CO/H_2} über dem Sensor. Die Sensorspannung U_{CO_e} ist die Summe der beiden Spannungen $U_{CO_e} = U_{O_2} + U_{CO/H_2}$. Bereits bei geringen Konzentrationen oxidierbarer Gase, wie H₂ oder CO, ist das Mischpotential deutlich höher als das O₂-Signal. Die Sauerstoffkonzentration beeinflusst die Sensorspannung U_{CO_e} . Mit höherem O₂-Gehalt fällt die Sensorspannung im hohen CO-Bereich etwas ab [11].

Im Betrieb ist darauf zu achten, dass die Auswerteelektronik nie ausgeschaltet wird, solange der KS1D Sensor noch eingebaut ist. Auch wenn sich die Feuerungsanlage im Stillstand befindet, muss der Sensor beheizt werden, da es sonst zu Korrosionen kommen kann. Bei Unterbrechungen die länger als drei Monate dauern kann die Auswerteelektronik ausgeschaltet werden. Der KS1D Sensor muss dann allerdings ausgebaut und trocken gelagert werden. Bei Unterbrechungen welche kürzer als drei Monate sind, ist es für die Lebensdauer des Sensors besser wenn die Auswerteelektronik nicht ausgeschaltet wird. Die Abbildung 5.4 zeigt die zuvor erwähnte Auswerteelektronik.

Im ausgebauten Zustand ist der Sensor unbegrenzt lagerfähig. Das Zirkondioxid-Messelement verbraucht sich nur im Betrieb (Messzelle auf Betriebstemperatur). Dies trifft auch zu, wenn ein Sensor bereits einmal in Betrieb war. Im Betrieb nimmt die Empfindlichkeit der CO/H₂-Elektrode zu. Der Hersteller gibt Querempfindlichkeiten zu SO₂, NH₃, Propan und anderen aromatischen Kohlenwasserstoffen an. Die Lebensdauer hängt sehr stark vom verwendeten Brennstoff ab und wird vom Hersteller nur für Erdgas mit mehr als drei Jahren explizit spezifiziert [11].

Des Weiteren soll der KS1D Sensor nicht in Kontakt mit Ölen, Fetten und Kesselreinigungsmittel gebracht werden. Vergiftete oder verunreinigte Sensoren können daran erkannt werden, dass sie an Luft ein Signal von -20 mV bis -30 mV liefern.

Die Messstelle ist so zu wählen, dass repräsentatives Abgas (vollständige Durchmischung) vorliegt. Die Einbaulage ist dabei beliebig, von horizontal bis vertikal möglich. Es ist darauf zu achten, dass der Sensor im Bereich des Anschlusskabels nicht verdeckt wird, da er die Umgebungsluft als Referenz benötigt.

Der Messbereich des KS1D Sensors liegt für Sauerstoff zwischen 0 und 21 Vol.% und für CO_e zwischen 0 und 10.000 ppmV.



Abbildung 5.4: KS1D Auswerteelektronik

Bei einem Sensortausch ist ein Offsetabgleich an Umgebungsluft notwendig und zusätzlich muss danach im Parameter P109 „SONDENTAUSCH“ ausgelöst werden [11].

5.2 Methodik

Um die Sensoren hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeit bei Biomassefeuerungsanlagen zu untersuchen sind einige Schritte notwendig. Aufgrund der mangelnden Kenntnis über den physikalischen Aufbau und die chemischen Abläufe der beiden Sensoren wird von einer physikalischen Modellbildung Abstand genommen. Stattdessen wird mit Hilfe der experimentellen Modellbildung versucht eine mathematische Beschreibung für den Zusammenhang des Sensorsignals und der CO-Konzentration zu finden.

5.2.1 Experimentelle Modellbildung

Der Vorteil der experimentellen Modellbildung liegt darin, dass die physikalischen Gesetzmäßigkeiten nicht geklärt werden müssen und somit das System als sogenannte „Black-Box“ angesehen werden kann. Es sind also keine weiteren Kenntnisse über die physikalischen oder chemischen Eigenschaften notwendig. Die Voraussetzung um eine experimentelle Modellbildung durchführen zu können ist, dass das reale System oder ein Labormuster zur Verfügung stehen muss [13].

Die experimentelle Modellbildung setzt umfassende Messdaten, die sehr viele verschiedene Betriebspunkte abdecken, voraus. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, müssen alle zu untersuchenden Parameter variiert werden. Dazu zählen unter anderem der Rauchgasmassenstrom bzw. der Rauchgasvolumenstrom, die Rauchgastemperatur, die Rauchgaszusammensetzung und die Zusammensetzung der unverbrannten Komponenten des Rauchgases. All diese Parameter können durch unterschiedliche Luftstufungen, Sauerstoffgehalte des Rauchgases und Leistungen verändert bzw. beeinflusst werden.

In weiterer Folge muss ein mathematischer Modellansatz gefunden werden, welcher das Verhalten der Sensoren mathematisch beschreibt. Für die richtige Wahl des mathematischen Modellansatzes müssen alle Größen untersucht und gegebenenfalls im Modell berücksichtigt werden, die Einfluss auf das Sensorsignal haben. Nach dem Festlegen einer geeigneten Modellstruktur können die unbekannt Parameter mit Hilfe von numerischen Optimierungsverfahren aus den gesammelten Messdaten ermittelt werden.

Für die Parameterbestimmung werden nur Werte im Bereich 0 bis 3.000 ppmV verwendet, da für den Einsatz in Biomassefeuerungen besonders die Modellgenauigkeit bei kleinen CO-Emissionen wichtig ist. Diese Beschränkung hat den Vorteil, dass das Ergebnis im definierten Bereich genauer ist.

Schlussendlich wurde das Modell mit Messdaten von unterschiedlichen Sensoren, Anlagen und Zeiträumen verifiziert. Im Detail wurden Messdaten vom selben Sensor an derselben Anlage nach einem halben Jahr, sowie Messdaten von einer anderen Anlage und einem anderen Sensor verwendet. Darüber hinaus wurde auch der Einfluss der Brennstoffeigenschaften untersucht. Zur Verifikation wurde immer der Bereich zwischen 0 und 3.000 ppmV betrachtet, da dieser Bereich für den Einsatz in Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen relevant ist.

5.2.2 Untersuchen des O₂-Messwertes des KS1D Sensors

Da der Sauerstoffgehalt des gemessenen Gases einen wesentlichen Einfluss auf das vom KS1D Sensor gemessene CO-Äquivalent hat, wurde die im KS1D Sensor integrierte Sauerstoffmessung ebenfalls untersucht. Dabei zeigte sich über den gesamten Zeitraum eine sehr gute Übereinstimmung des mit dem KS1D Sensor gemessenen Sauerstoffgehaltes und der als Referenz herangezogenen Rauchgasanalyseeinheit, die beispielhaft in Abbildung 5.5 dargestellt ist. Der Sauerstoffmesswert des KS1D Sensors verfügt somit über ausreichende Genauigkeit und Dynamik für den Einsatz in Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen und wurde nicht weiter untersucht.

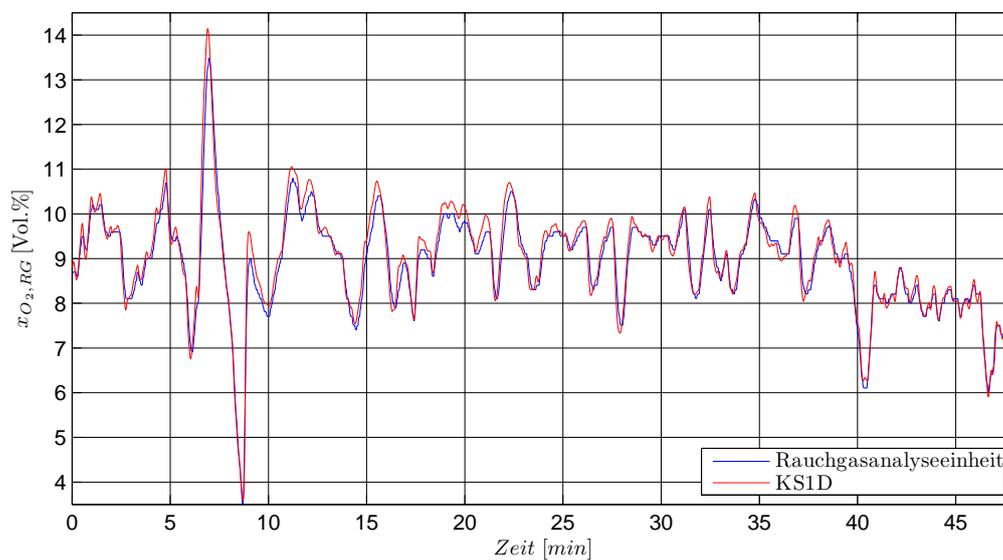


Abbildung 5.5: Verifikation der Sauerstoffmessung mittels KS1D

5.3 Modellierung der wesentlichen Querempfindlichkeiten

Im folgenden Abschnitt werden die nötigen Schritte zur Ermittlung einer mathematischen Beschreibung des Zusammenhanges der Sensorsignale und des CO-Gehaltes des Rauchgases erläutert. Zuerst werden die Querempfindlichkeiten der beiden Sensoren untersucht. Danach werden unterschiedliche Modellansätze gegenübergestellt. Abschließend wird die Ermittlung der Modellparameter aus Messdaten mit Hilfe numerischer Optimierungsverfahren erläutert. Den Abschluss dieses Abschnitts bildet die Aufführung der Ergebnisse der Modellierung anhand einer automatisch beschickten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage.

5.3.1 Querempfindlichkeiten der beiden CO-Sensoren

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Sensorsignal haben die schon zuvor erwähnten Querempfindlichkeiten gegenüber anderen Größen. Für die Wahl des richtigen Modellansatzes ist es wichtig genau diese Querempfindlichkeiten näher zu untersuchen. Laut Hersteller weisen die Sensoren eine Querempfindlichkeit gegenüber der Sauerstoffkonzentration im Rauchgas $x_{O_2, RG}$ auf. Weiters wird in diesem Abschnitt auch der Einfluss der Rauchgastemperatur T_{RG} und der Rauchgasfeuchte $x_{H_2O, RG}$ auf das Sensorsignal untersucht.

5.3.1.1 Querempfindlichkeit gegenüber Sauerstoff

Der Hersteller der Sensoren gibt an, dass die Sensoren eine Querempfindlichkeit gegenüber dem Sauerstoffgehalt des Rauchgases aufweisen [11, 12]. Dieses Verhalten konnte auch bei den durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden. Die Abbildungen 5.6 bis 5.8 zeigen den Zusammenhang von Sensorsignal des CarboSen Sensors und CO-Konzentration im Rauchgas für je drei verschiedene O_2 -Konzentrationen (5, 8 und 11 Vol.%). Dabei zeigt sich eine unterschiedliche Empfindlichkeit des Sensors je nach Sauerstoffgehalt. Die roten Kurven stellen Polynome zweiten Grades dar, welche mit Hilfe numerischer Optimierungsverfahren in die Messpunkt Wolke eingepasst wurden. Die eingepassten roten Kurven sind in Abbildung 5.9 für die verschiedenen O_2 -Konzentrationen dargestellt. Die Abbildungen 5.10 bis 5.12 zeigen den Zusammenhang von Sensorsignal des KS1D Sensors und CO-Konzentration im Rauchgas ebenfalls, wie zuvor beim CarboSen Sensor, für je drei verschiedene O_2 -Konzentrationen (5, 8 und 11 Vol.%). Auch hier zeigt sich eine unterschiedliche Empfindlichkeit des Sensors je nach Sauerstoffgehalt. Die roten Kurven stellen wiederum Polynome zweiten Grades dar, welche ebenfalls mit Hilfe numerischer Optimierungsverfahren in die Messpunkt Wolke eingepasst wurden. In Abbildung 5.13 sind die eingepassten Polynome zweiten Grades für die verschiedenen O_2 -Konzentrationen dargestellt. Man kann erkennen, dass die Abhängigkeit gegenüber der Sauerstoffkonzentration beim KS1D Sensor im Vergleich zum CarboSen Sensor (siehe Abbildung 5.9) geringer ist. Laut Hersteller wird die Querempfindlichkeit gegenüber der Sauerstoffkonzentration mit Hilfe der integrierten O_2 -Messung beim KS1D Sensor bereits berücksichtigt. Bei beiden Abbildungen (5.9 und 5.13) sticht jedoch sofort der exponentielle Verlauf der Polynome

zweiten Grades ins Auge. Diese Erkenntnis wird später bei der Wahl des Modellansatzes noch eine große Rolle spielen.

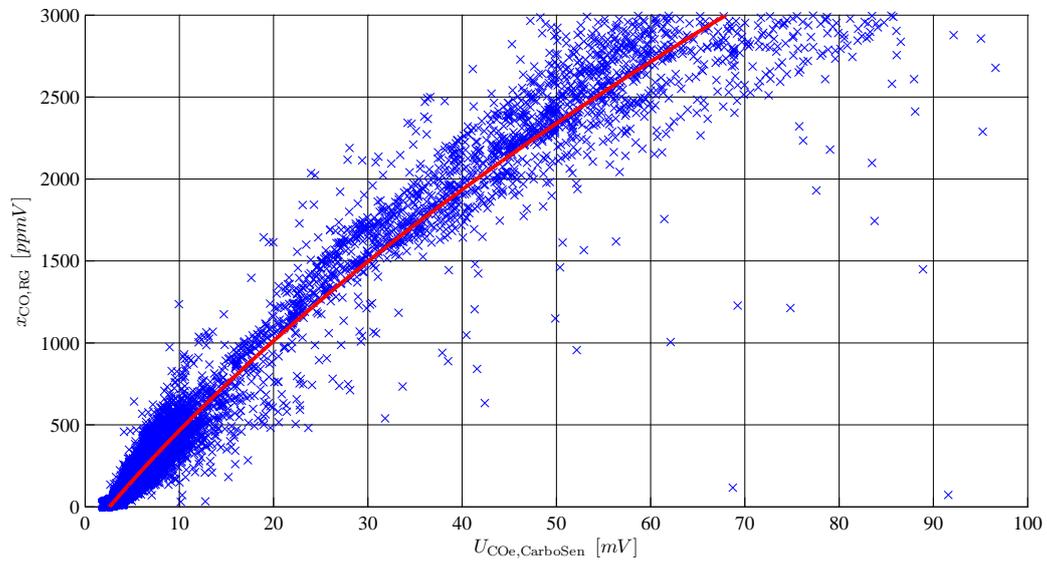


Abbildung 5.6: CarboSen: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 5 Vol.%

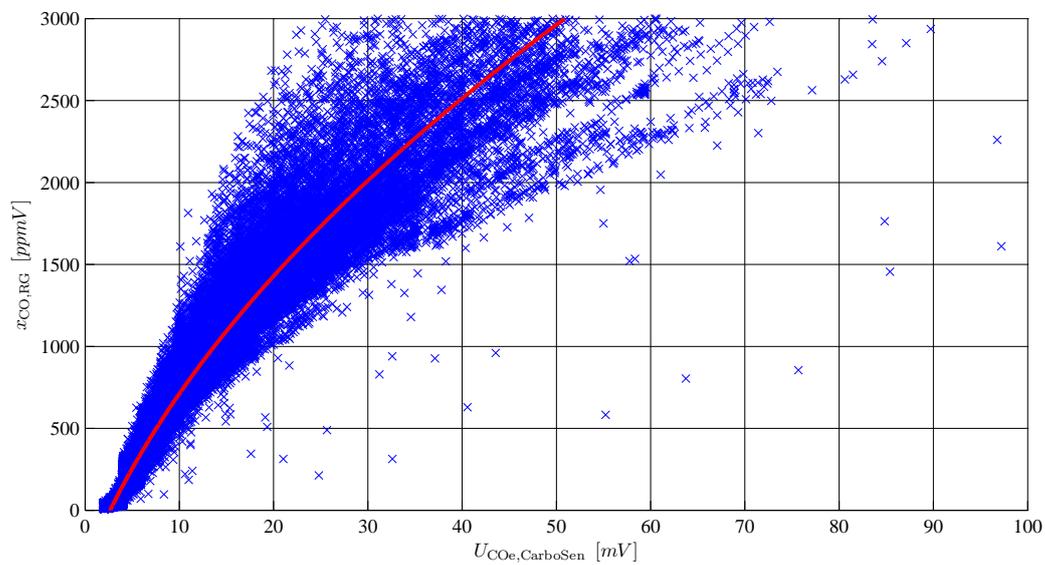


Abbildung 5.7: CarboSen: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 8 Vol.%

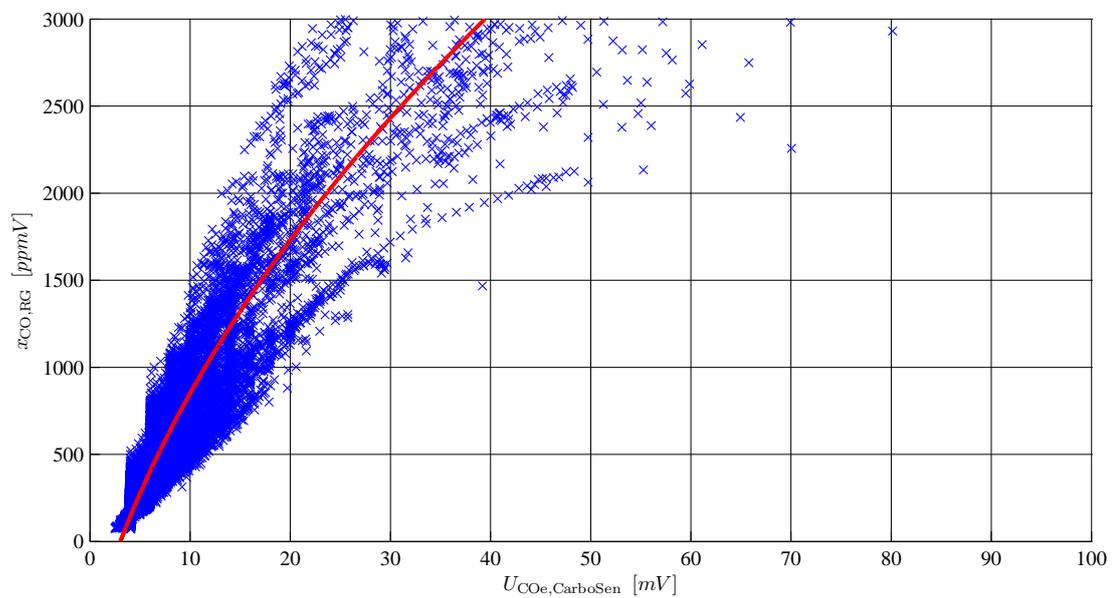


Abbildung 5.8: CarboSen: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 11 Vol.%

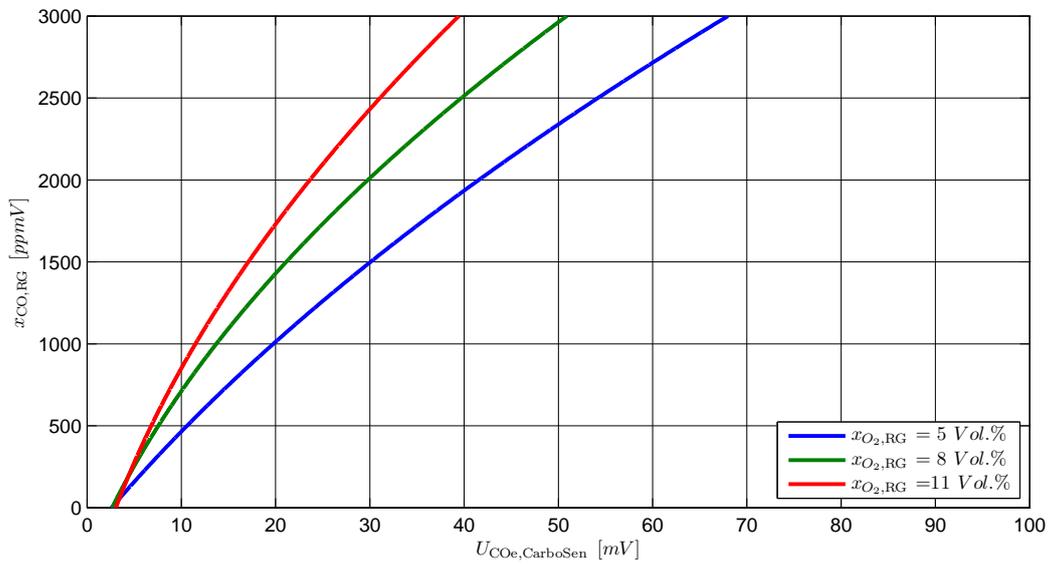


Abbildung 5.9: CarboSen: Querempfindlichkeit gegenüber Sauerstoff

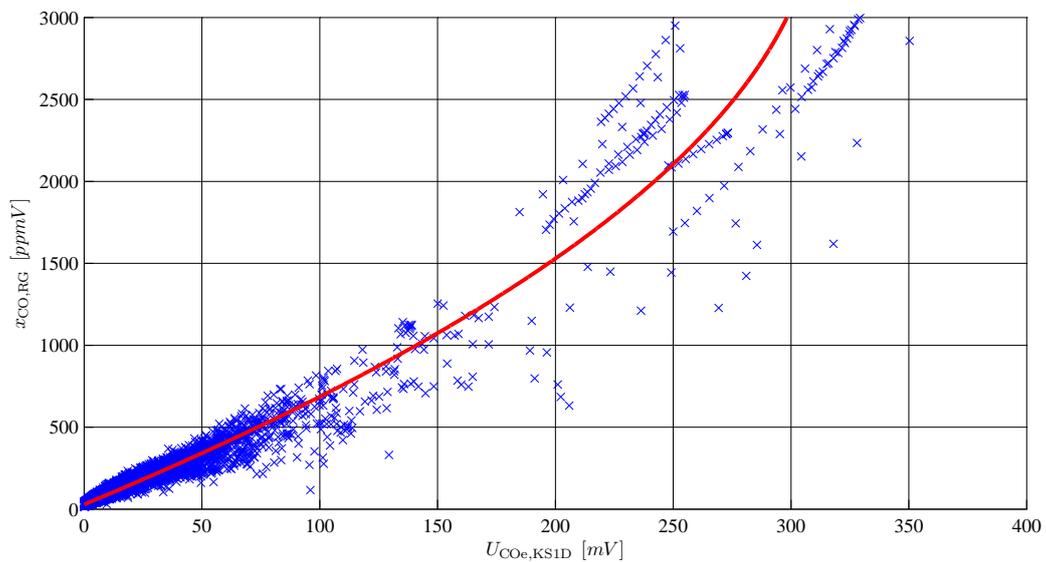


Abbildung 5.10: KS1D: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 5 Vol.%

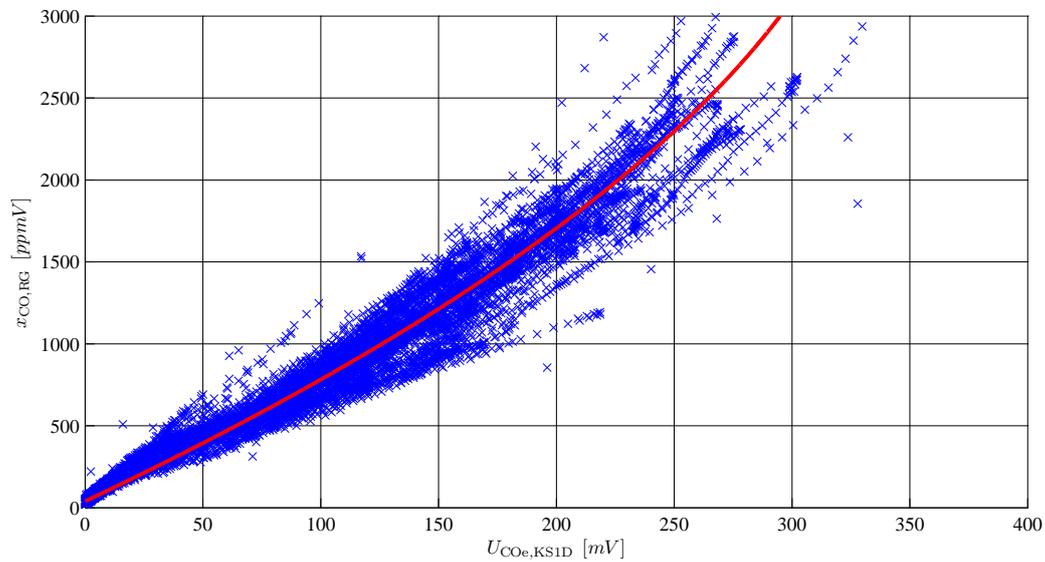


Abbildung 5.11: KS1D: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 8 Vol.%

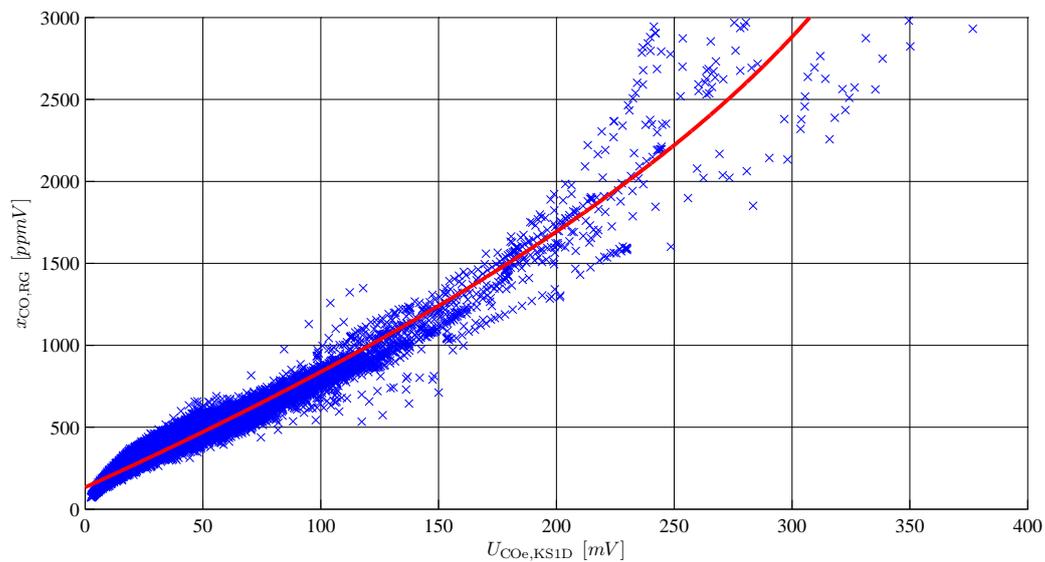


Abbildung 5.12: KS1D: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 11 Vol.%

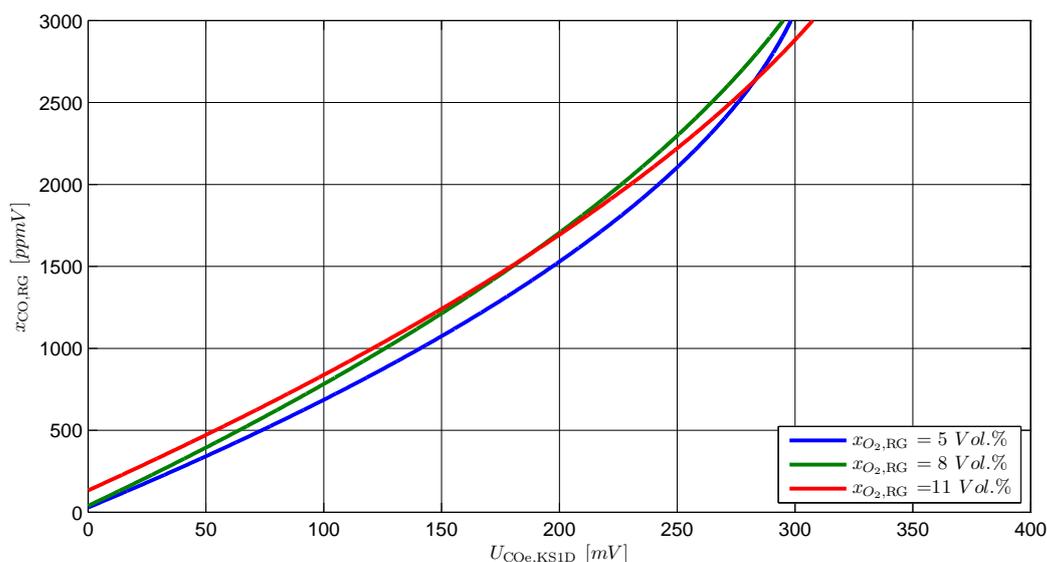


Abbildung 5.13: KS1D: Querempfindlichkeit gegenüber Sauerstoff

5.3.1.2 Querempfindlichkeit gegenüber der Rauchgastemperatur

Bei näherer Betrachtung von Abbildungen 5.6 bis 5.13, fällt sehr schnell auf, dass die Querempfindlichkeit gegenüber der Sauerstoffkonzentration nicht die einzige Abhängigkeit sein kann, da die Messpunkte breit um die eingepassten Polynome zweiten Grades streuen. Aus diesem Grund wird die Querempfindlichkeit gegenüber der Rauchgastemperatur im folgenden Abschnitt betrachtet. Hierzu wurden die Messdaten in zwei Gruppen aufgeteilt und zwar in Messpunkte bei denen die Rauchgastemperatur unter $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt und Messpunkte bei denen die Rauchgastemperatur über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Die Abbildungen 5.14 und 5.15 zeigen beispielhaft die beiden Gruppen für $\text{O}_2 = 11\text{ Vol.}\%$ jeweils für CarboSen und KS1D. Während beim CarboSen Sensor bereits im unteren CO-Bereich eine Spreizung der beiden Messpunktgruppen auftritt und dann bei steigendem CO-Gehalt größer wird, kann beim KS1D Sensor erst im oberen CO-Bereich eine Spreizung der Messpunkte aufgrund unterschiedlicher Rauchgastemperaturen ausgemacht werden. Diese Erkenntnisse legen zunächst jedoch die Vermutung nahe, dass die Heizungsregelung der Sensoren nicht richtig funktioniert und somit die Arbeitstemperatur der Sensoren vom idealen Wert abweicht. Normalerweise sollte die Heizungsregelung den Innenwiderstand mit Hilfe der Sensorheizung auf einen konstanten Wert von $20\ \Omega$ regeln, sodass der Sensor ständig mit seiner Arbeitstemperatur betrieben wird und es somit zu keiner Abhängigkeit gegenüber der Rauchgastemperatur kommen sollte. Die Elektronik des KS1D Sensors verfügt über die Möglichkeit den Innenwiderstand aufzuzeichnen und Abbildung 5.16 zeigt, den Innenwiderstand des KS1D Sensors beispielhaft für einen 60 minütigen Ausschnitt aus den Messdaten. Wie daraus zu sehen ist, hat die Heizungsregelung gut funktioniert und kann somit nicht die Ursache für die Querempfindlichkeit gegenüber der Rauchgastemperatur sein. Eventuell korrelieren die unterschiedlichen Rauchgastemperaturen mit verschiedenen brennbaren Komponenten die ebenfalls einen Einfluss auf die Sensorspannung haben. Eine

zuverlässige Interpretation dieser Phänomene war aber auch nach Rücksprache mit dem Hersteller nicht möglich.

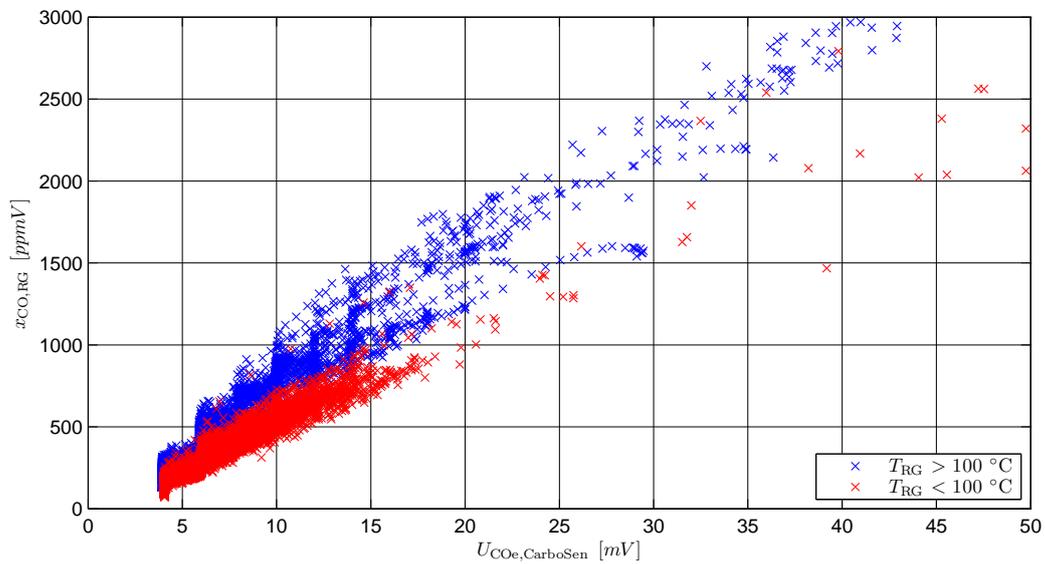


Abbildung 5.14: CarboSen: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 11 Vol.% für unterschiedliche Rauchgastemperaturen

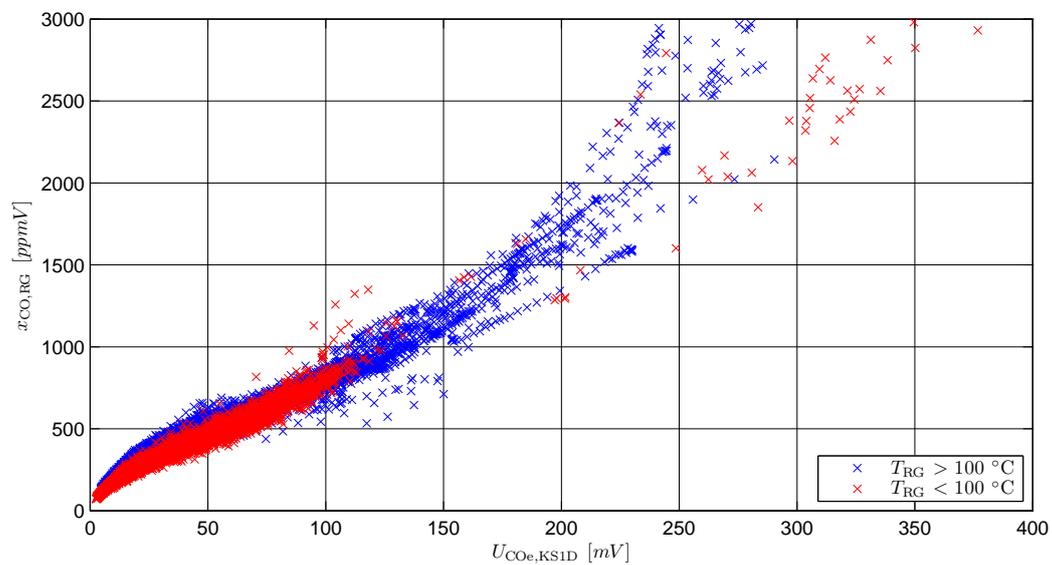


Abbildung 5.15: KS1D: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 11 Vol.% für unterschiedliche Rauchgastemperaturen

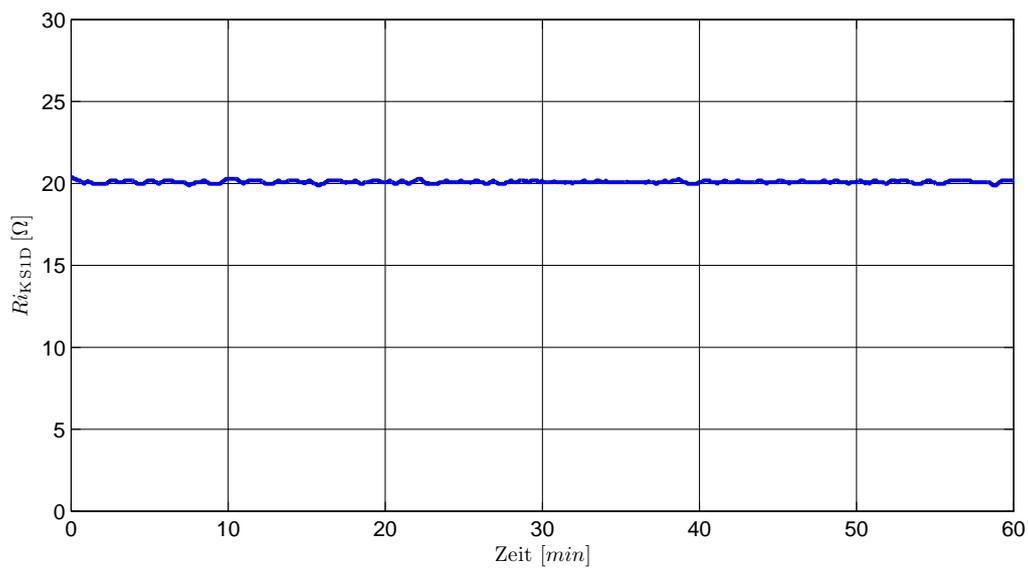


Abbildung 5.16: KS1D: geregelter Innenwiderstand

5.3.1.3 Querempfindlichkeit gegenüber der Rauchgasfeuchte

Der Hersteller gibt zwar an, dass die Sensoren keine Abhängigkeit gegenüber der Rauchgasfeuchte zeigen, jedoch soll diese Aussage in diesem Abschnitt überprüft werden. Dazu wurden die Messpunkte in zwei Gruppen unterteilt und zwar in Messpunkte bei denen die Rauchgasfeuchte unter 9,24 Vol.% liegt und in Messpunkte bei denen die Rauchgasfeuchte über 9,24 Vol.% liegt. Die Abbildungen 5.17 und 5.18 zeigen beispielhaft die beiden Gruppen für $O_2 = 11$ Vol.% jeweils für CarboSen und KS1D. Man kann sehr schön erkennen, dass sich die Messpunkte der verschiedenen Gruppen, sowohl beim CarboSen als auch beim KS1D Sensor, decken. Die Aussage des Herstellers, dass die Sensoren keine Abhängigkeit gegenüber der Rauchgasfeuchte aufweisen, konnte hiermit bestätigt werden.

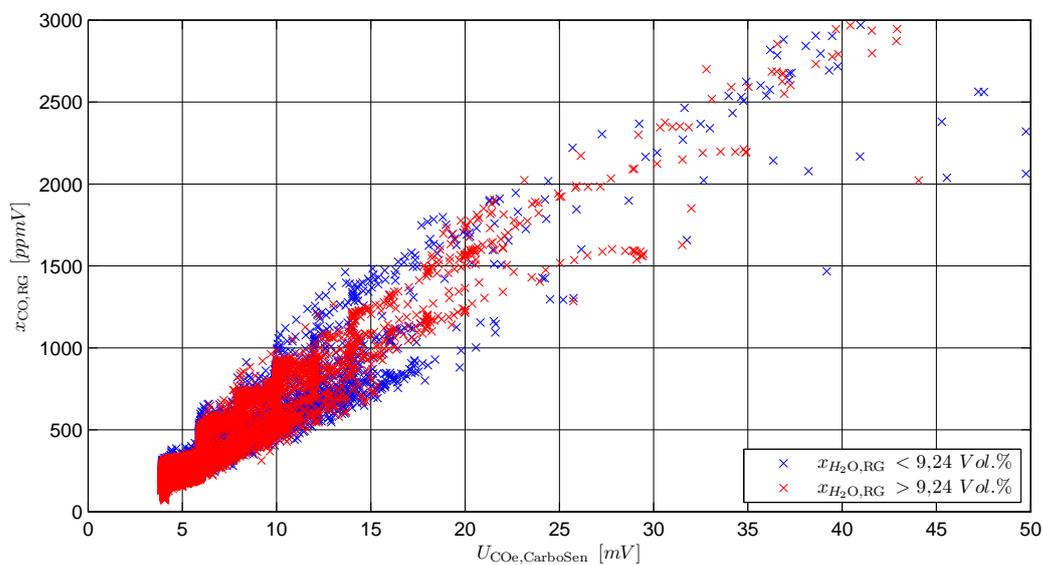


Abbildung 5.17: CarboSen: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 11 Vol. % für unterschiedliche Rauchgasfeuchten

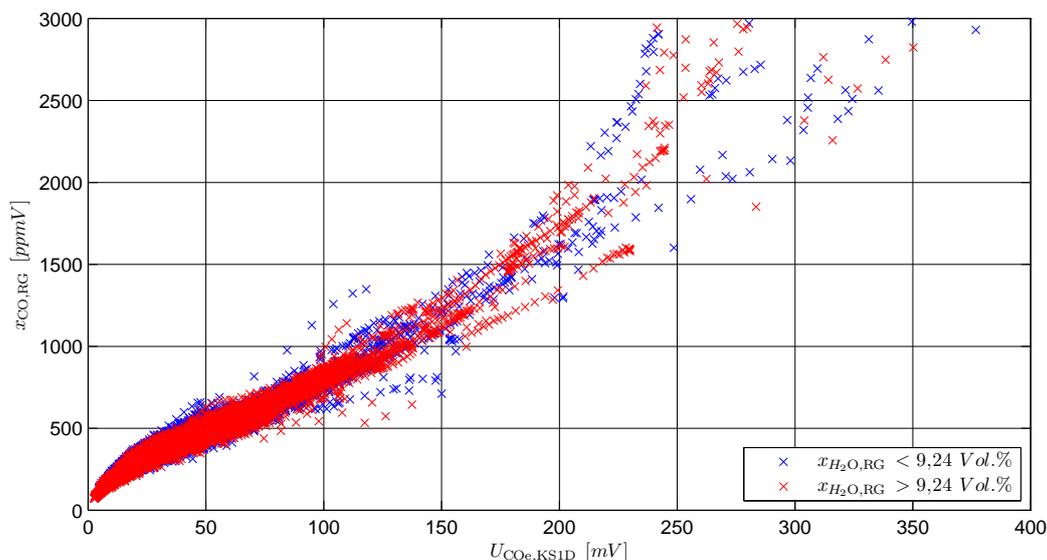


Abbildung 5.18: KS1D: Zusammenhang von CO-Gehalt und Sensorspannung bei einer Sauerstoffkonzentration von 11 Vol. % für unterschiedliche Rauchgasfeuchten

5.3.2 Mathematisches Modell

Da das Verhalten der beiden CO-Sensoren nicht anhand physikalischer Überlegungen beschrieben werden kann, wird zur mathematischen Beschreibung der Sensoren die experimentelle Modellbildung verwendet. Hierbei wird das mathematische Modell aus experimentell ermittelten Messdaten bestimmt. Dazu wird zuerst die mathematische Struktur des Modells definiert. Im betrachteten Fall enthält dieses das Rohsignal des Sensors, einen oder mehrere Parameter und eventuell andere Größen von denen angenommen wird, dass sie eine Auswirkung auf das Ergebnis haben. In den beiden folgenden Abschnitten wird zunächst näher auf die Wahl der Modellstruktur und anschließend auf die Bestimmung der unbekanntenen Modellparameter eingegangen.

5.3.2.1 Wahl einer geeigneten Modellstruktur

Grundsätzlich wurden zahlreiche Modellansätze untersucht. In der Folge werden jedoch nur die vielversprechendsten Modelle vorgestellt. Da sowohl der Hersteller eine Abhängigkeit des Sensorsignals gegenüber der Sauerstoffkonzentration erwähnt und sich diese auch bei der Untersuchung der Querempfindlichkeit (siehe Abschnitt 5.3.1.1) gezeigt hat, ist es in jedem Fall sinnvoll die Sauerstoffkonzentration zu berücksichtigen. Da der KS1D Sensor, wie in Abschnitt 5.2.2 gezeigt, die Sauerstoffkonzentration zuverlässig misst, kann in diesem Fall auf eine zusätzliche O₂-Messung verzichtet werden. Der CarboSen Sensor hingegen besitzt keine integrierte O₂-Messung und somit ist hier eine zusätzliche O₂-Messung erforderlich. Bei den durchgeführten Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass

für beide Sensoren die gleichen Modellansätze ein gutes Ergebnis liefern. Jedoch müssen die unbekanntenen Modellparameter jeweils getrennt ermittelt werden.

Berücksichtigung von Sauerstoffkonzentration und Rauchgastemperatur

Die Ergebnisse der Untersuchung der Querempfindlichkeiten (siehe Abschnitt 5.3.1) legen nahe, einen Modellansatz unter Berücksichtigung der Sauerstoffkonzentration und der Rauchgastemperatur anzusetzen. Folgender Ansatz lieferte schlussendlich bei beiden Sensoren das beste Ergebnis:

$$x_{CO_e,Modell,1} = [(c_1 x_{O_2,RG} + c_3) + (c_2 T_{RG} + c_4)] (U_{CO_e} - U_{offset})^q \quad (5.1)$$

Dabei kennzeichnen $x_{O_2,RG}$ den Sauerstoffgehalt des Rauchgases, T_{RG} die Rauchgastemperatur und U_{CO_e} die Sensorspannung. c_1 , c_2 , c_3 , c_4 und q stellen dabei konstante Modellparameter dar, die mit Hilfe von numerischen Optimierungsverfahren aus Messdaten bestimmt werden müssen (siehe Abschnitt 5.3.2.2).

Die Größe U_{offset} bezeichnet jene Spannung die der Sensor ausgibt, wenn der CO-Gehalt gleich Null ist. Bei den durchgeführten Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich die U_{offset} eines Sensors auch über einen Zeitraum von sechs Monaten nicht geändert hat, hingegen die U_{offset} verschiedener Sensoren sehr wohl variiert. Die U_{offset} kann somit beim selben Sensor als konstant angesetzt werden. Das Bestimmen der U_{offset} stellt keinen großen Aufwand dar und kann bei jedem Sensor sehr schnell, gegebenenfalls automatisiert, durchgeführt werden. Hierzu muss einfach die Spannung, die der Sensor an Luft ausgibt, gemessen werden. Die Erkenntnisse bezüglich der U_{offset} treffen für den CarboSen Sensor als auch für den KS1D Sensor zu.

Berücksichtigung von Sauerstoffkonzentration

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass bei jeder Biomassefeuerungsanlage die Rauchgastemperatur gemessen wird, soll in der Folge auch ein Modellansatz, der nur die Sauerstoffkonzentration berücksichtigt, betrachtet werden.

$$x_{CO_e,Modell,2} = (d_1 x_{O_2,RG})^{s_1} (U_{CO_e} - U_{offset})^{s_2} \quad (5.2)$$

Dabei kennzeichnet $x_{O_2,RG}$ den Sauerstoffgehalt des Rauchgases und U_{offset} die im vorigen Absatz bereits beschriebene Spannung die der Sensor ausgibt, wenn der CO-Gehalt gleich Null ist. d_1 , s_1 und s_2 stellen dabei konstante Modellparameter dar, die mit Hilfe von numerischen Optimierungsverfahren aus Messdaten bestimmt werden müssen (siehe Abschnitt 5.3.2.2).

5.3.2.2 Bestimmung der Modellparameter

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Modellparameter erläutert. Dazu wird zunächst der Modellfehler e

$$e = x_{\text{CO,RG}} - x_{\text{CO}_e, \text{Modell}} \quad (5.3)$$

eingeführt. Dabei bezeichnet $x_{\text{CO,RG}}$ den von der RGA gemessenen CO-Gehalt des Rauchgases und $x_{\text{CO}_e, \text{Modell}}$ den, mit Hilfe des mathematischen Modells (5.1) bzw. (5.2), geschätzten Wert für den CO-Gehalt des Rauchgases.

Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 erwähnt, ist es bei Biomassefeuerungsanlagen besonders wichtig, dass das Modell bei kleineren CO-Emissionen genau ist. Aus diesem Grund muss der relative Fehler betrachtet werden, da ansonsten höhere Emissionen das Ergebnis der Optimierung stärker beeinflussen als geringe. Dazu wird der normierte Modellfehler e_{Norm}

$$e_{\text{Norm}} = \frac{x_{\text{CO,RG}} - x_{\text{CO}_e, \text{Modell}}}{x_{\text{CO,RG}}} \quad (5.4)$$

eingeführt. Der normierte Modellfehler e_{Norm} errechnet sich aus dem Modellfehler e bezogen auf den tatsächlichen CO-Gehalt des Rauchgases.

Zur Ermittlung der Modellparameter wurden Messdaten der in Abschnitt 4.1 näher erläuterten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage verwendet (siehe Abschnitt 5.2.1). Dabei wurden nur Werte kleiner 3.000 ppmV verwendet, da die Modellgenauigkeit bei hohen Emissionen von geringer Bedeutung ist. Diese Beschränkung hat den Vorteil, dass das Ergebnis im definierten Bereich genauer ist.

In weiterer Folge werden die normierten Modellfehler zu einem normierten Modellfehlervektor \mathbf{e}_{Norm} zusammengefasst

$$\mathbf{e}_{\text{Norm}} = \begin{bmatrix} e_{\text{Norm},1} \\ e_{\text{Norm},2} \\ \vdots \\ e_{\text{Norm},r} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

wobei r die Anzahl der verwendeten Messwerte kennzeichnet.

Die Modellparameter sind nun so zu wählen, dass die Abweichung zwischen Modell und tatsächlichem CO-Messwert möglichst gering ist. Um dieses Problem mit Hilfe von numerischen Optimierungsverfahren lösen zu können, muss man diese Anforderung in Form einer Kostenfunktion J definieren. Dazu wurde die Summe der Quadrate der normierten Fehler verwendet:

$$J = e_{\text{Norm},1}^2 + e_{\text{Norm},2}^2 + \cdots + e_{\text{Norm},r}^2 = \mathbf{e}_{\text{Norm}}^T \mathbf{e}_{\text{Norm}} \quad (5.6)$$

Mit Hilfe von numerischen Optimierungsverfahren kann nun diese Kostenfunktion minimiert werden. Das daraus resultierende Ergebnis ist schlussendlich optimal im Sinne der kleinsten normierten Fehlerquadrate.

$$J = \mathbf{e}_{Norm}^T \mathbf{e}_{Norm} \longrightarrow \min \quad (5.7)$$

Die so ermittelten Modellparameter werden in weiterer Folge zur Schätzung des CO-Gehaltes des Rauchgases mit Hilfe der mathematischen Modelle (5.1) bzw. (5.2) verwendet.

5.3.3 Ergebnisse aus der Modellierung anhand einer automatisch beschickten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, welche sich bei der Modellierung der Sensoren ergeben haben, diskutiert. Es werden die Ergebnisse der Kostenfunktion analysiert und einige zeitliche Verläufe miteinander verglichen.

5.3.3.1 Verwendete Sensoren

Bei den verwendeten Sensoren handelte es sich um fabrikneue Sensoren. Die Sensoren wurden, wie in der Anleitung für die Montage und Inbetriebnahme der KS1D Sensor [11] bzw. wie in der Kurzanleitung für Benutzer der CarboSen 1.000 [12] beschrieben, eingebaut. Der CarboSen Sensor wurde mit einem Winkel von 10° über der Waagrechten, und der KS1D Sensor wurde in waagrechter Position direkt in das Rauchgasrohr eingebaut. Der CarboSen Sensor ragte ca. 3 cm in das Rauchgasrohr hinein. Aufgrund der kürzeren Bauform ragte der KS1D Sensor lediglich ca. 1 cm in das Rauchgasrohr hinein.

Der Einbau und die Inbetriebnahme der zur Modellermittlung verwendeten Sensoren erfolgte ca. eine Woche vor Beginn der Messungen. Dieselben Sensoren wurden in weiterer Folge auch für die Bestimmung der Modellparameter verwendet. Direkt nach der Inbetriebnahme wurde der CarboSen Sensor kalibriert und beim KS1D Sensor ein Offsetabgleich an Umgebungsluft durchgeführt. Ab diesem Zeitpunkt wurden beide Sensoren nicht mehr ausgeschaltet und auch nicht mehr kalibriert. Die Messungen, zur Sammlung von Messdaten für die Untersuchung der Querempfindlichkeiten und für die experimentelle Modellbildung, dauerten vier Wochen. Nach Beendigung der Messungen wurden beide Sensoren abgeschaltet, ausgebaut und trocken gelagert.

5.3.3.2 Verwendeter Brennstoff

Bei diesen Versuchen wurde ein besonders homogener Brennstoff verwendet. Es handelte sich um sortenreines Lärchenhackgut ohne Rindenanteil. Der Brennstoff wurde gesiebt und hatte somit keinen Feinanteil. Der Wassergehalt des feuchten Brennstoffes betrug 22 Gew.% FS.

5.3.3.3 Kostenfunktion und statistische Kenngrößen des Modellfehlers

Die Tabellen 5.1 und 5.2 stellen die Kostenfunktion, den Mittelwert des normierten Fehlers und dessen Standardabweichung, sowohl für den CarboSen als auch für den KS1D Sensor für die beiden mathematischen Modelle (5.1) und (5.2), dar. Die Kostenfunktion lautet $\mathbf{e}_{Norm}^T \mathbf{e}_{Norm}$ wobei \mathbf{e}_{Norm} den normierten Fehlervektor (5.4) darstellt, zu deren Berechnung nur die Messwerte herangezogen wurden, bei denen der CO-Gehalt zwischen 0 und 3.000 ppmV betragen hat, da dieser Bereich für die Anwendung bei Biomassefeuerungsanlagen von besonderer Relevanz ist.

	Kostenfunktion	Mittelwert des normierten Fehlers	Standardabweichung des normierten Fehlers
$x_{CO_e, \text{Modell},1}$	$1,5417 \cdot 10^5$	0,2236	0,4231
$x_{CO_e, \text{Modell},2}$	$1,8548 \cdot 10^5$	0,2728	0,4484

Tabelle 5.1: Vergleich der Modellfehler bei der Modellierung für CarboSen

	Kostenfunktion	Mittelwert des normierten Fehlers	Standardabweichung des normierten Fehlers
$x_{CO_e, \text{Modell},1}$	$4,5045 \cdot 10^5$	0,6718	0,4667
$x_{CO_e, \text{Modell},2}$	$4,5870 \cdot 10^5$	0,6300	0,5333

Tabelle 5.2: Vergleich der Modellfehler bei der Modellierung für KS1D

Wie Tabelle 5.1 zeigt, ergibt sich für das Modell 1 des CarboSen Sensors, welches auch die Rauchgastemperatur berücksichtigt, eine bessere Übereinstimmung von Messwerten und berechneten Werten als für das Modell 2 des CarboSen Sensors. Tabelle 5.2 zeigt, dass auch beim KS1D Sensor das Modell 1 ein geringeres Ergebnis der Kostenfunktion liefert und somit eine bessere Übereinstimmung von Messwerten und berechneten Werten gegenüber dem Modell 2 des KS1D Sensors erzielt werden konnte. Es bestätigt sich somit, dass die Sensorsignale eine Querempfindlichkeit gegenüber der Rauchgastemperatur aufweisen. Auffällig ist außerdem, dass Kostenfunktion, Mittelwert des normierten Fehlers und dessen Standardabweichung für die Modelle des CarboSen Sensors kleiner sind als jene der Modelle des KS1D Sensors. Daraus lässt sich schließen, dass die Modelle des CarboSen Sensors das gemessene Signal besser nachbilden als die Modelle des KS1D Sensors.

5.3.3.4 Zeitliche Verläufe des mit den Sensoren abgeschätzten CO-Gehaltes

Die Abbildung 5.19 und 5.20 zeigen den CO-Messwert verglichen mit den von den Modellen des CarboSen Sensors bzw. KS1D Sensors geschätzten CO-Gehalt. Bei näherer Betrachtung der Abbildungen kann man feststellen, dass beide Modelle beider Sensoren das gemessene Signal relativ gut nachbilden. Es ist jedoch zu Vermerken, dass keines der Modelle für eine exakte Messung des CO-Gehaltes verwendet werden kann, dennoch kann der CO-Gehalt mit Hilfe der Modelle gut abgeschätzt werden. Zusätzlich kann noch die gute Dynamik beider Sensoren als positive Eigenschaft vermerkt werden.

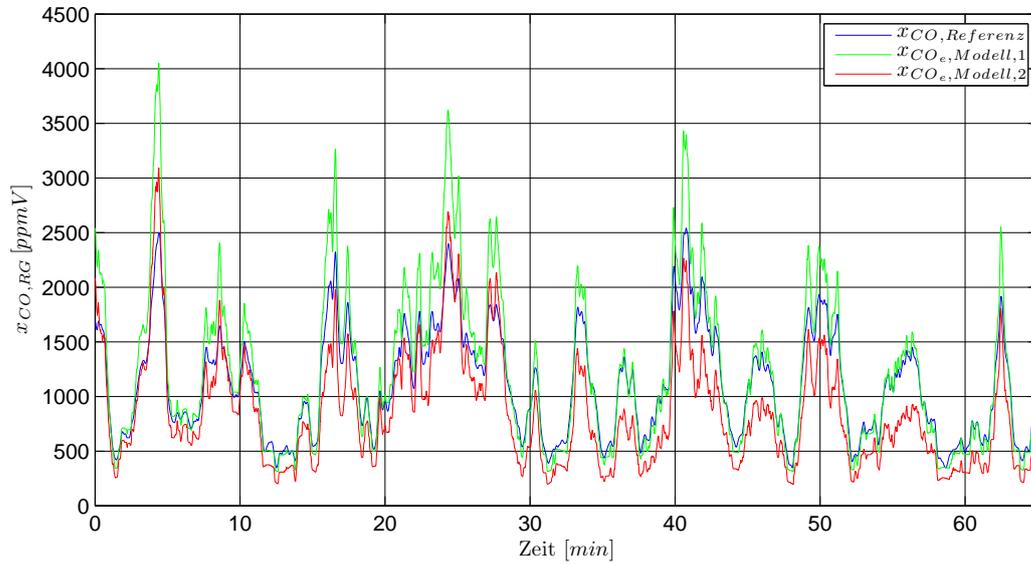


Abbildung 5.19: CarboSen: Schätzung der zur Modellierung verwendeten CO-Verläufe

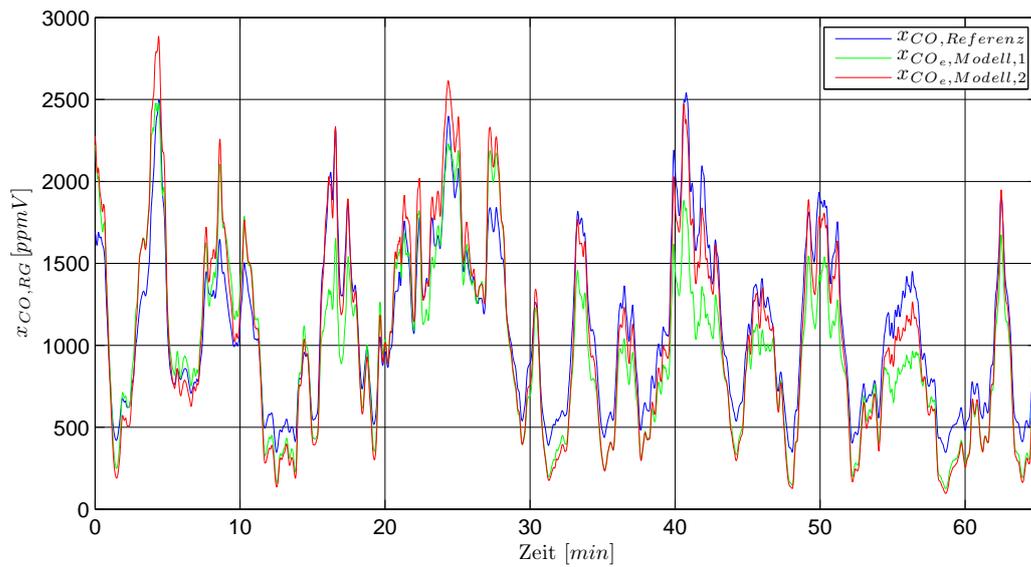


Abbildung 5.20: KS1D: Schätzung der zur Modellierung verwendeten CO-Verläufe

5.4 Experimentelle Verifikation der Modelle bei unterschiedlichen Einsatzbereichen

In diesem Abschnitt werden die mathematischen Modelle anhand verschiedener Messdaten verifiziert. Es werden Messdaten von unterschiedlichen Sensoren, Anlagen und Zeiträumen untersucht. Zusätzlich dazu wurde auch der Brennstoff variiert. Somit ist es möglich die Sensoren, zusätzlich zu den in Abschnitt 5.3 untersuchten Empfindlichkeiten, auch bezüglich ihrer Langzeiteigenschaften, Empfindlichkeit gegen Änderung des Brennstoffes sowie auch die Streuung zwischen einzelnen Sensoren zu untersuchen.

5.4.1 Verifikation der Modelle anhand von Messdaten aus einer mittelgroßen Biomassefeuerungsanlage unter Verwendung eines anderen Sensors und anderem Brennstoff

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, welche sich bei den Verifikationsversuchen bei einer mittelgroßen Biomassefeuerungsanlage mit einer Kesselnennleistung von 180 kW, ergeben haben, diskutiert. Im Detail handelt es sich um eine Hackgutfeuerung der Firma Mawera des Typs Pyroflex FSB 220.

5.4.1.1 Verwendete Sensoren

Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um fabrikneue Sensoren. Die Sensoren wurden, wie in der Anleitung für die Montage und Inbetriebnahme der Kombi-Sonde KS1D [11] bzw. wie in der Kurzanleitung für Benutzer der CarboSen 1.000 [12] beschrieben, eingebaut. Der CarboSen Sensor wurde mit einem Winkel von 10° über der Waagrechten, und der KS1D Sensor wurde in waagrechter Position direkt in das Rauchgasrohr eingebaut. Der CarboSen Sensor ragte ca. 3 cm in das Rauchgasrohr hinein. Aufgrund der kürzeren Bauform ragte der KS1D Sensor lediglich ca. 1 cm in das Rauchgasrohr hinein.

Der Einbau und die Inbetriebnahme der zur Verifikation verwendeten Sensoren erfolgte ca. einen Monat vor Beginn der Messungen. Es handelt sich dabei nicht um dieselben Sensoren die zur Modellierung der Querempfindlichkeiten in Abschnitt 5.3 verwendet wurden. Direkt nach der Inbetriebnahme wurde der CarboSen Sensor kalibriert und beim KS1D Sensor ein Offsetabgleich an Umgebungsluft durchgeführt. Ab diesem Zeitpunkt wurden beide Sensoren nicht mehr ausgeschaltet und auch nicht mehr kalibriert. Die zur Verifikation der Modelle herangezogenen Messungen dauerten eine Woche.

5.4.1.2 Verwendeter Brennstoff

Bei diesen Versuchen kam gewöhnliches Waldhackgut zum Einsatz. Das Waldhackgut war verunreinigt und beinhaltete unter anderem Rinde, Nadeln und Tannenzapfen. Der Wassergehalt des feuchten Brennstoffes betrug 25 Gew.% FS. Die enthaltenen Holzsorten konnten nicht genau identifiziert werden.

5.4.1.3 Kostenfunktion und statistische Kenngrößen des Modellfehlers

Die Tabellen 5.3 und 5.4 stellen die Kostenfunktion, den Mittelwert des normierten Fehlers und dessen Standardabweichung, sowohl für den CarboSen als auch für den KS1D Sensor für die beiden mathematischen Modelle (5.1) und (5.2), dar. Die Kostenfunktion lautet $\mathbf{e}_{Norm}^T \mathbf{e}_{Norm}$ wobei \mathbf{e}_{Norm} den normierten Fehlervektor (5.4) darstellt, zu deren Berechnung nur die Messwerte herangezogen wurden, bei denen der CO-Gehalt zwischen 0 und 3.000 ppmV betragen hat, da dieser Bereich für die Anwendung bei Biomassefeuerungsanlagen von besonderer Relevanz ist.

	Kostenfunktion	Mittelwert des normierten Fehlers	Standardabweichung des normierten Fehlers
$x_{CO_e, \text{Modell},1}$	$5,5781 \cdot 10^5$	-0,8578	3,8350
$x_{CO_e, \text{Modell},2}$	$3,2393 \cdot 10^4$	0,6950	0,6433

Tabelle 5.3: Vergleich der Modellfehler bei der Verifikation für CarboSen

	Kostenfunktion	Mittelwert des normierten Fehlers	Standardabweichung des normierten Fehlers
$x_{CO_e, \text{Modell},1}$	$1,9289 \cdot 10^4$	0,6527	0,3286
$x_{CO_e, \text{Modell},2}$	$4,6474 \cdot 10^4$	-0,0837	1,1312

Tabelle 5.4: Vergleich der Modellfehler bei der Verifikation für KS1D

Bei näherer Betrachtung von Tabelle 5.3 stellt man fest, dass das Modell 1 des CarboSen Sensors, welches die Rauchgastemperatur berücksichtigt, ein deutlich höheres Ergebnis der Kostenfunktion liefert als das Modell 2 des CarboSen Sensors. Dieses Verhalten zeigt, dass eventuell ein indirekter Zusammenhang zwischen Rauchgastemperatur und Sensorsignal besteht, der vom Modell nicht berücksichtigt wurde. Womöglich kommt es bei dieser anderen Anlage zu unterschiedlichen Strömungsverhältnissen, welche auf das Signal des Sensors eine unterschiedliche Auswirkung haben. Es könnte also sein, dass durch Berücksichtigung der Rauchgastemperatur anlagenspezifische Eigenschaften der Kleinanlage modelliert wurden. Der Hersteller sieht die wahrscheinlichste Ursache für dieses Verhalten an der schlechteren Temperaturregelung des CarboSen Sensors im Vergleich zum KS1D Sensor. Bei Betrachtung der Tabelle 5.4 stellt man fest, dass das Modell 1 des KS1D Sensors eine kleinere Kostenfunktion als das Modell 2 des KS1D Sensors liefert.

5.4.1.4 Zeitliche Verläufe des mit den Sensoren abgeschätzten CO-Gehaltes

In Abbildung 5.21 kann man sehen, dass das Modell 1 des CarboSen Sensors, welches die Rauchgastemperatur berücksichtigt, betragsmäßig ständig größer, und das Modell 2 des CarboSen Sensors betragsmäßig immer kleiner als der RGA Referenzmesswert ist. Die Tatsache, dass das Modell 1 eine sehr viel größere Kostenfunktion als das Modell 2 hat, kann man auf den ersten Blick nicht erkennen. Das lässt sich dadurch erklären, dass für die Kostenfunktion nur jene Daten herangezogen werden, bei denen der CO-Messwert zwischen

0 und 3.000 ppmV liegt. Betrachtet man nun den Bereich zwischen 0 und 3.000 ppmV und hier vor allem den Zeitraum zwischen 7 und 11 Minuten, dann kann man erkennen, dass das Modell 2 den Referenzmesswert der RGA gut abbildet. Generell kann man sagen, dass das Modell 2 im Bereich zwischen 0 und 1.000 ppmV über den gesamten Zeitbereich gut mit dem Referenzmesssignal übereinstimmt. Das Modell 1, welches die Rauchgastemperatur berücksichtigt, hingegen zeigt über den gesamten Zeitbereich eine starke betragsmäßige Abweichung zum Referenzsignal. Außerdem darf dabei nicht vergessen werden, dass Abbildung 5.21 nur einen kurzen Zeitausschnitt der gesamten Messdaten zeigt, wobei die Kostenfunktion über alle Messdaten, die im Bereich zwischen 0 und 3.000 ppmV liegen, berechnet wurde.

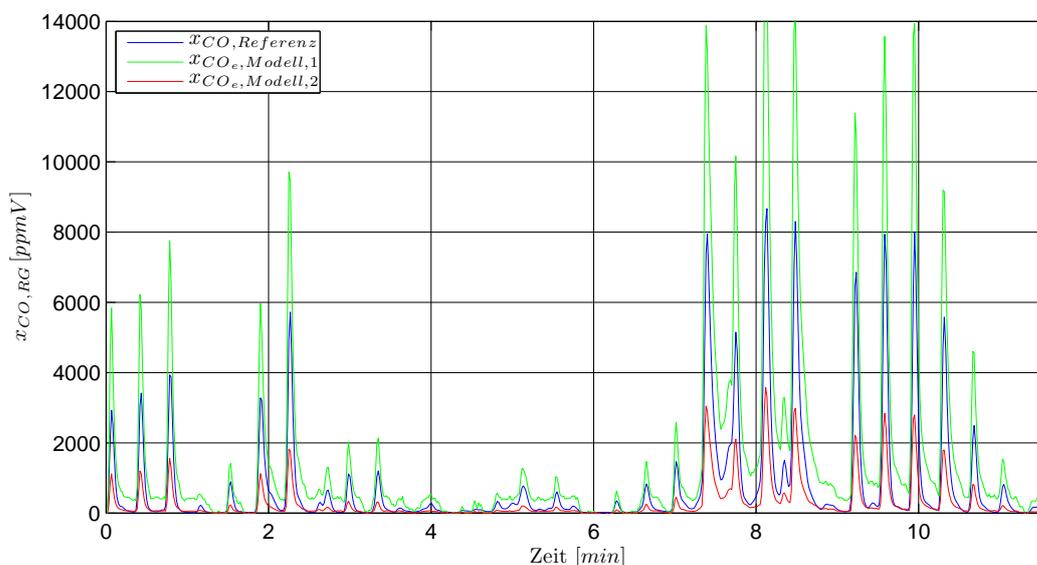


Abbildung 5.21: CarboSen: Schätzung der zur Verifikation verwendeten CO-Verläufe

Bei der Abbildung 5.22 zeigt sich, dass die Werte der Kostenfunktion sehr gut nachvollzogen werden können. Wie man sieht, stimmt das Modell 1 im Bereich zwischen 0 und 3.000 ppmV gut mit dem Referenzmesswert der RGA überein. Das Modell 2, welches die Rauchgastemperatur nicht berücksichtigt, zeigt eine kleine betragsmäßig Abweichung, welche sich auch im Ergebnis der Kostenfunktion zeigt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass auch bei diesen Verifikationsversuchen beide Sensoren eine sehr gute Dynamik gezeigt haben. Die Tendenzen waren sehr gut erkennbar, jedoch konnte in Erfahrung gebracht werden, dass sich die beiden Sensoren nicht zur exakten Messung des CO-Gehaltes eignen, sondern lediglich zur Abschätzung des CO-Gehaltes des Rauchgases dienen. Grundsätzlich konnte mit diesen Verifikationsversuchen gezeigt werden, dass die Anlage nur einen geringen Einfluss hat. Lediglich beim Modell 1 des CarboSen Sensors, welches die Rauchgastemperatur berücksichtigt, konnte eine Anlagenabhängigkeit verzeichnet werden, welche sich jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund der schlechteren Temperaturregelung der Auswerteelektronik des CarboSen

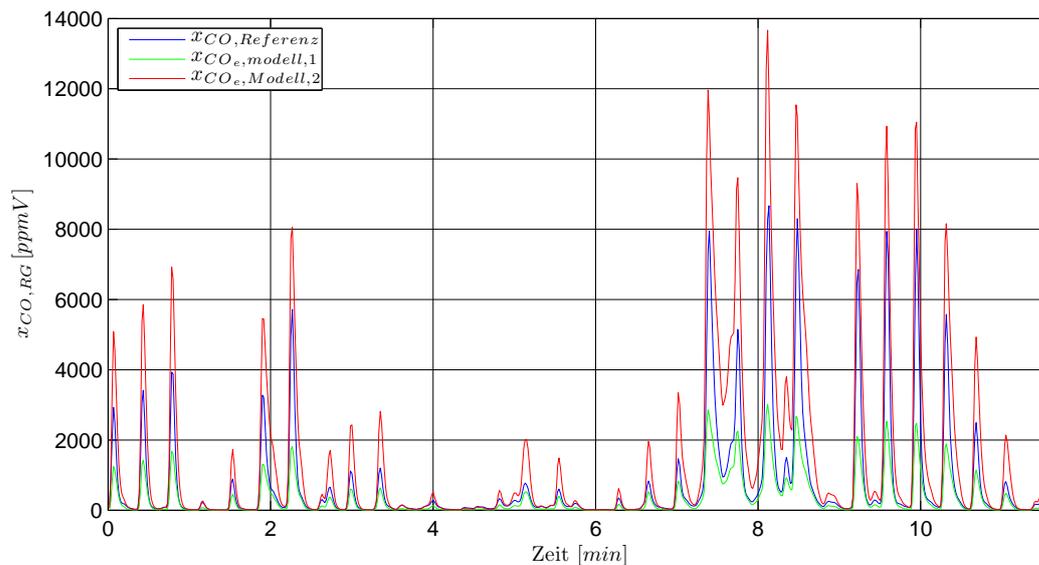


Abbildung 5.22: KS1D: Schätzung der zur Verifikation verwendeten CO-Verläufe

Sensors ergeben hat. Ebenfalls konnte mit diesen Verifikationsversuchen gezeigt werden, dass die in Abschnitt 5.3 ermittelten Modelle auch bei anderen Sensoren bedenkenlos angewandt werden können und somit die Sensoren eine geringe Schwankung aufweisen. Auch der unterschiedliche Brennstoff der bei diesen Versuchen verwendet wurde, hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Modelle der Sensoren gezeigt.

5.4.2 Verifikation der Modelle anhand von Messdaten der zur Modellierung verwendeten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage mit dem gleichen Brennstoff unter Verwendung desselben für sechs Monate ausgebauten Sensors

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, welche sich bei Verifikationsversuchen ein halbes Jahr nach der Modellierung bei der zur Modellierung verwendeten Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen unter Verwendung desselben für sechs Monate ausgebauten Sensors ergeben haben, diskutiert. Es wurde der gleiche Brennstoff wie bei den Modellierungsversuchen verwendet.

5.4.2.1 Verwendete Sensoren

Bei den Sensoren handelt es sich um dieselben zur Modellierung herangezogenen Sensoren. Nachdem die Messungen für die Modellierungsversuche abgeschlossen waren, wurden die Sensoren ausgeschaltet, ausgebaut und für ein halbes Jahr trocken gelagert. Einen Monat vor dem Start der Messungen, wurden die beiden Sensoren eingebaut und in Betrieb genommen. Direkt nach der Inbetriebnahme wurde der CarboSen Sensor kalibriert und beim KS1D Sensor ein Offsetabgleich an Umgebungsluft durchgeführt. Ab diesem Zeitpunkt wurden beide Sensoren nicht mehr ausgeschaltet und auch nicht mehr kalibriert. Die zur Verifikation der Modelle herangezogenen Messungen dauerten eine Woche.

5.4.2.2 Verwendeter Brennstoff

Bei diesen Versuchen wurde jener Brennstoff verwendet, der auch bei den Versuchen zur Modellierung verwendet wurde (siehe Abschnitt 5.3.3.2). Es handelte sich um sehr homogenes, sortenreines Lärchenhackgut ohne Rindenanteil. Der Brennstoff wurde gesiebt und hatte somit keinen Feinanteil. Der Wassergehalt des feuchten Brennstoffes betrug 22 Gew.% FS.

5.4.2.3 Kostenfunktion und statistische Kenngrößen des Modellfehlers

Die Tabellen 5.5 und 5.6 stellen die Kostenfunktion, den Mittelwert des normierten Fehlers und dessen Standardabweichung, sowohl für den CarboSen als auch für den KS1D Sensor für die beiden mathematischen Modelle (5.1) und (5.2), dar. Die Kostenfunktion lautet $\mathbf{e}_{Norm}^T \mathbf{e}_{Norm}$ wobei \mathbf{e}_{Norm} den normierten Fehlervektor (5.4) darstellt, zu deren Berechnung nur die Messwerte herangezogen wurden, bei denen der CO-Gehalt zwischen 0 und 3.000 ppmV betragen hat, da dieser Bereich für die Anwendung bei Biomassefeuerungsanlagen von besonderer Relevanz ist.

	Kostenfunktion	Mittelwert des normierten Fehlers	Standardabweichung des normierten Fehlers
$x_{CO_e, \text{Modell},1}$	$2,8902 \cdot 10^6$	-6,7504	2,7097
$x_{CO_e, \text{Modell},2}$	$2,5193 \cdot 10^6$	-6,1497	2,8812

Tabelle 5.5: Vergleich der Modellfehler bei der Verifikation für CarboSen

	Kostenfunktion	Mittelwert des normierten Fehlers	Standardabweichung des normierten Fehlers
$x_{CO_e, \text{Modell},1}$	$4,7558 \cdot 10^4$	0,9139	0,1880
$x_{CO_e, \text{Modell},2}$	$4,8636 \cdot 10^4$	0,9278	0,1718

Tabelle 5.6: Vergleich der Modellfehler bei der Verifikation für KS1D

Grundsätzlich kann anhand der Tabelle 5.5 gesagt werden, dass sich das Verhalten des CarboSen Sensors nach sechs Monaten stark verändert hat. Wie man später in Abschnitt 5.4.2.4 sehen wird, hat die Empfindlichkeit des CarboSen Sensors in diesem halben Jahr stark zugenommen. Wenn man sich anschließend die Tabelle 5.6 näher betrachtet, dann stellt man fest, dass sich das Verhalten des KS1D Sensors auch mit der Zeit verändert hat. Zwar nicht so stark wie beim CarboSen Sensor, aber dennoch stärker als erwünscht.

5.4.2.4 Zeitliche Verläufe des mit den Sensoren abgeschätzten CO-Gehaltes

Abbildung 5.23 zeigt deutlich die große Abweichung des aus dem Sensorsignal des CarboSen Sensors berechneten CO-Gehaltes vom Referenzsignal. Der von den CarboSen Modellen geschätzte CO-Gehalt stimmt auf den ersten Blick nicht mehr mit dem Referenzmesswert der RGA überein. Es hat den Anschein als hätte die Empfindlichkeit des CarboSen Sensors

mit der Zeit stark zugenommen. Der Hersteller gibt lediglich an, dass es innerhalb der ersten Betriebsstunden zu Einlaufeffekten kommen kann, welche die Empfindlichkeit des Sensor steigen lassen. Allerdings ist nicht genau definiert wie lange nach Inbetriebnahme des Sensors solche Einlaufeffekte eintreten können [12].

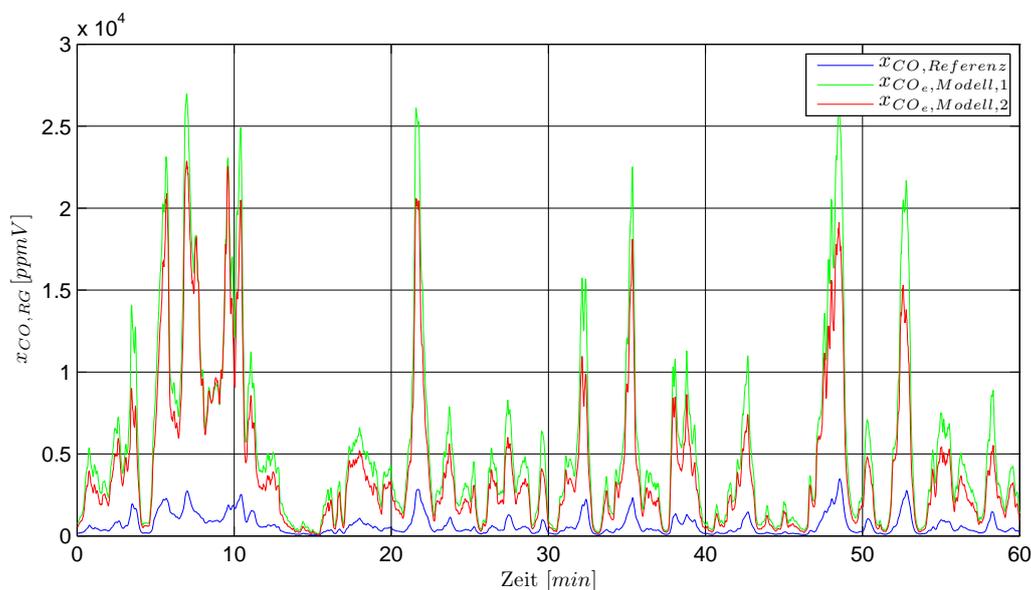


Abbildung 5.23: CarboSen: Schätzung der zur Verifikation verwendeten CO-Verläufe

Um nun überprüfen zu können, ob das Modell trotzdem bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen eingesetzt werden kann, wurde mittels numerischer Optimierungsverfahren ein Faktor zwischen Modell und Referenzsignal berechnet. Dies erfolgte, wie auch schon in Abschnitt 5.3.2.2 beschrieben, durch Minimierung der Summe der normierten Fehlerquadrate. Es zeigte sich, dass der Sensor innerhalb diesen halben Jahres um den Faktor 6 empfindlicher wurde. Abbildung 5.24 zeigt den Vergleich zwischen den beiden CarboSen Modellen, welche um den Faktor 6 abgeschwächt wurden, und dem RGA Messsignal. Man kann deutlich sehen, dass der Sensor seine gute Dynamik behalten hat. Aus diesem Grund ist ein Einsatz bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen durchaus möglich, wenn der Sensor dabei nur zum Erkennen der Tendenzen verwendet wird.

In Abbildung 5.25 zeigt sich, dass es zu einer Abweichung bei den KS1D Modelle gegenüber den Modellierungsversuchen gekommen ist. Jedoch ist das dynamische Verhalten der Modelle auch nach einem halben Jahr noch immer sehr gut. Es hat den Anschein, als würde die Empfindlichkeit des KS1D Sensors minimal mit der Zeit geringer werden. Diese Erkenntnis deckt sich aber nicht mit den Aussagen des Herstellers. Dieser gibt nämlich an, dass die Empfindlichkeit mit der Zeit zunehmen müsste [11]. Überraschend ist hier unter anderem, dass Modell 1 und Modell 2 sehr nahe beieinander liegen und nicht wie bei den Modellierungsversuchen (siehe Abbildung 5.20) merklich voneinander abweichen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei diesen Verifikationsversuchen bei beiden

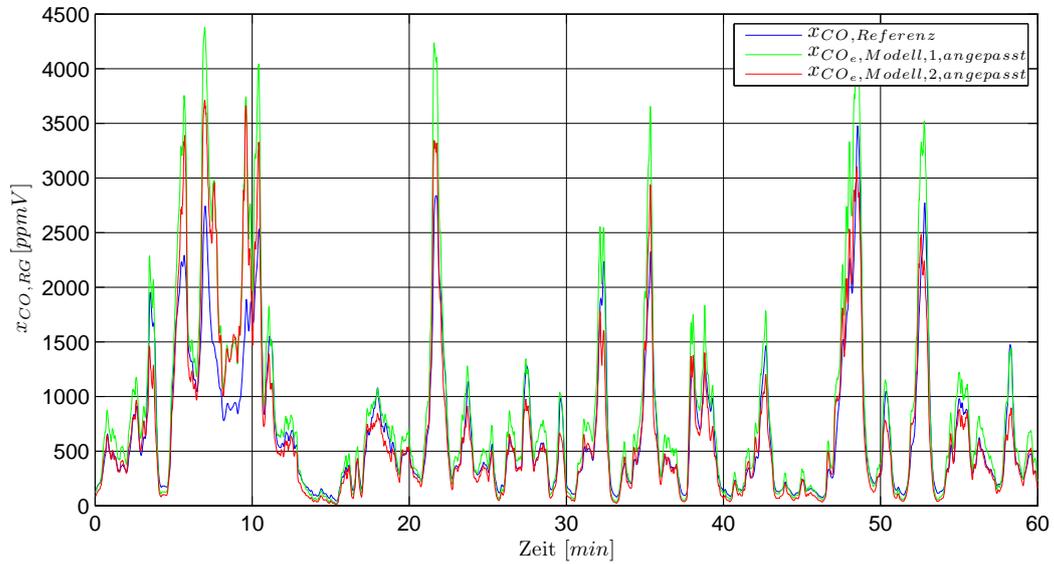


Abbildung 5.24: CarboSen: Angepasste Schätzung der zur Verifikation verwendeten CO-Verläufe

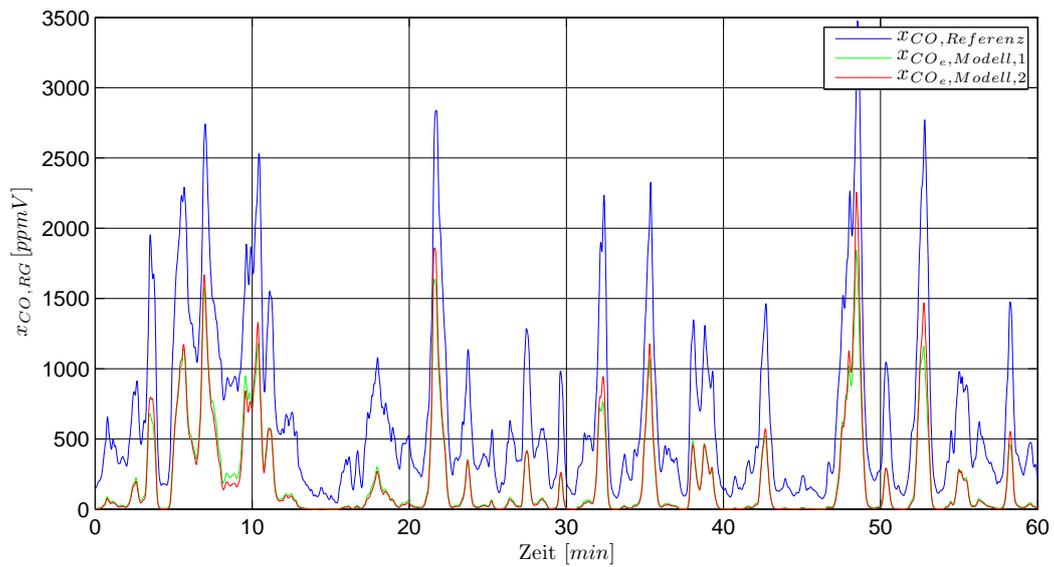


Abbildung 5.25: KS1D: Schätzung der zur Verifikation verwendeten CO-Verläufe

Sensoren sehr gut die Tendenzen erkennbar waren, jedoch konnte in Erfahrung gebracht werden, dass sich die beiden Sensoren nicht zur exakten Messung des CO-Gehaltes eignen, sondern lediglich zur Abschätzung des CO-Gehalts des Rauchgases dienen. Weiters zeigte sich, dass sich das Verhalten der Sensoren mit der Zeit veränderte. Beim CarboSen Sensor nahm die Empfindlichkeit nach sechs Monaten um den Faktor 6 zu. Der KS1D Sensor wies nach diesem Zeitraum eine geringe Abweichung und eine leichte Abnahme der Empfindlichkeit auf.

5.4.3 Verifikation der Modelle anhand von Messdaten der zur Modellierung verwendeten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage mit anderem Brennstoff unter Verwendung desselben für sechs Monate ausgebauten Sensors

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, welche sich bei Verifikationsversuchen, ein halbes Jahr nach der Modellierung, bei der zur Modellierung verwendeten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage unter Verwendung desselben für sechs Monate ausgebauten Sensors ergeben haben, diskutiert. Dabei wurde ein anderer Brennstoff als bei den Modellierungsversuchen (siehe Abschnitt 5.3.3) verwendet.

5.4.3.1 Verwendete Sensoren

Bei den Sensoren handelt es sich um dieselben zur Modellierung herangezogenen Sensoren. Die Verifikationsmessungen, welche in diesem Abschnitt diskutiert werden, wurden direkt im Anschluss an die Verifikationsmessungen mit dem zur Modellierung verwendeten Brennstoff (siehe Abschnitt 5.4.2) durchgeführt. Die Sensoren blieben durchgehend eingebaut und wurden nicht erneut kalibriert. Die zur Verifikation der Modelle herangezogenen Messungen dauerten eine Woche.

5.4.3.2 Verwendeter Brennstoff

Bei diesen Versuchen kam gewöhnliches Waldhackgut zum Einsatz. Das Waldhackgut war verunreinigt und beinhaltete unter anderem Rinde, Nadeln und Tannenzapfen. Der Wassergehalt des feuchten Brennstoffes betrug 23 Gew.% FS. Die enthaltenen Holzsorten konnten nicht genau identifiziert werden.

5.4.3.3 Kostenfunktion und statistische Kenngrößen des Modellfehlers

Die Tabellen 5.7 und 5.8 stellen die Kostenfunktion, den Mittelwert des normierten Fehlers und dessen Standardabweichung, sowohl für den CarboSen als auch für den KS1D Sensor für die beiden mathematischen Modelle (5.1) und (5.2), dar. Die Kostenfunktion lautet $\mathbf{e}_{Norm}^T \mathbf{e}_{Norm}$ wobei \mathbf{e}_{Norm} den normierten Fehlervektor (5.4) darstellt, zu deren Berechnung nur die Messwerte herangezogen wurden, bei denen der CO-Gehalt zwischen 0 und 3.000 ppmV betragen hat, da dieser Bereich für die Anwendung bei Biomassefeuerungsanlagen von besonderer Relevanz ist.

	Kostenfunktion	Mittelwert des normierten Fehlers	Standardabweichung des normierten Fehlers
$x_{CO_e, \text{Modell},1}$	$1,8463 \cdot 10^6$	-5,5786	2,2643
$x_{CO_e, \text{Modell},2}$	$3,7854 \cdot 10^6$	-7,9609	3,3075

Tabelle 5.7: Vergleich der Modellfehler bei der Verifikation für CarboSen

	Kostenfunktion	Mittelwert des normierten Fehlers	Standardabweichung des normierten Fehlers
$x_{CO_e, \text{Modell},1}$	$3,5514 \cdot 10^4$	0,8159	0,1776
$x_{CO_e, \text{Modell},2}$	$3,9464 \cdot 10^4$	0,8663	0,1559

Tabelle 5.8: Vergleich der Modellfehler bei der Verifikation für KS1D

Auch bei diesem Brennstoff zeigt sich, wie bereits im Abschnitt davor, dass sich das Verhalten des CarboSen Sensors nach sechs Monaten stark verändert hat (siehe Tabelle 5.7). Anhand der Tabelle 5.8 sieht man, dass sich auch das Verhalten des KS1D Sensors mit der Zeit verändert hat.

5.4.3.4 Zeitliche Verläufe des mit den Sensoren abgeschätzten CO-Gehaltes

Bei den Mittelwerten und Standardabweichungen des normierten Fehlers zeigte sich, dass die Modelle des CarboSen Sensors nicht mit dem RGA Messwert übereinstimmen. Abbildung 5.26 bestätigt diese Vermutung. Es wurde hier ebenso wie bereits in Abschnitt

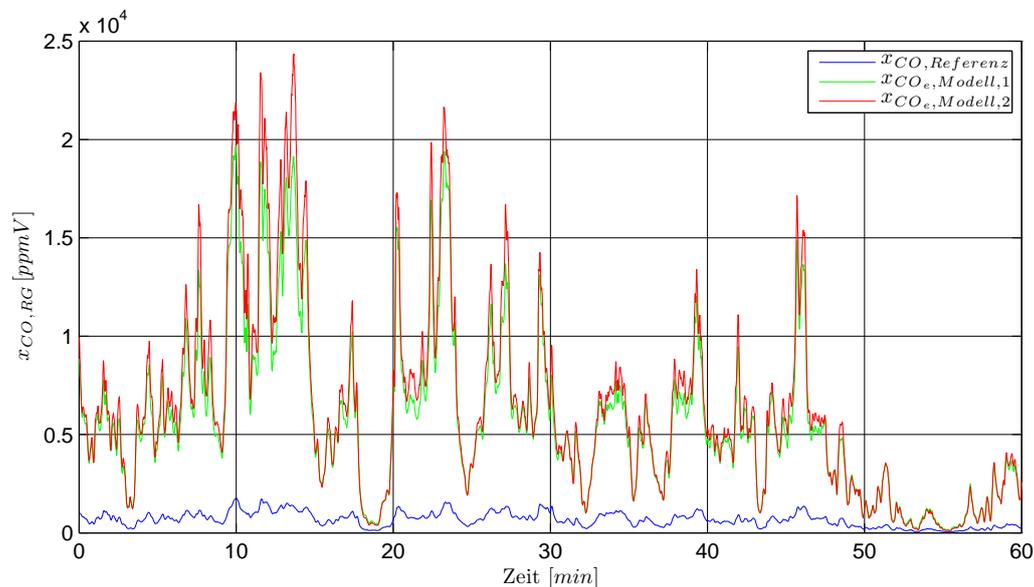


Abbildung 5.26: CarboSen: Schätzung der zur Verifikation verwendeten CO-Verläufe

5.4.2.4 beschrieben ein Faktor zwischen Modell und Referenzsignal berechnet. Dieser nahm wie auch schon im Abschnitt 5.4.2.4 den Wert 6 an. Die Ergebnisse mit dem angepassten

Modellen findet man in Abbildung 5.27. Wenn man nun diese Abbildung mit der Abbildung 5.24 aus dem Abschnitt 5.4.2.4 vergleicht, dann fällt schnell auf, dass hier der andere Brennstoff sehr wohl einen kleinen Einfluss hatte.

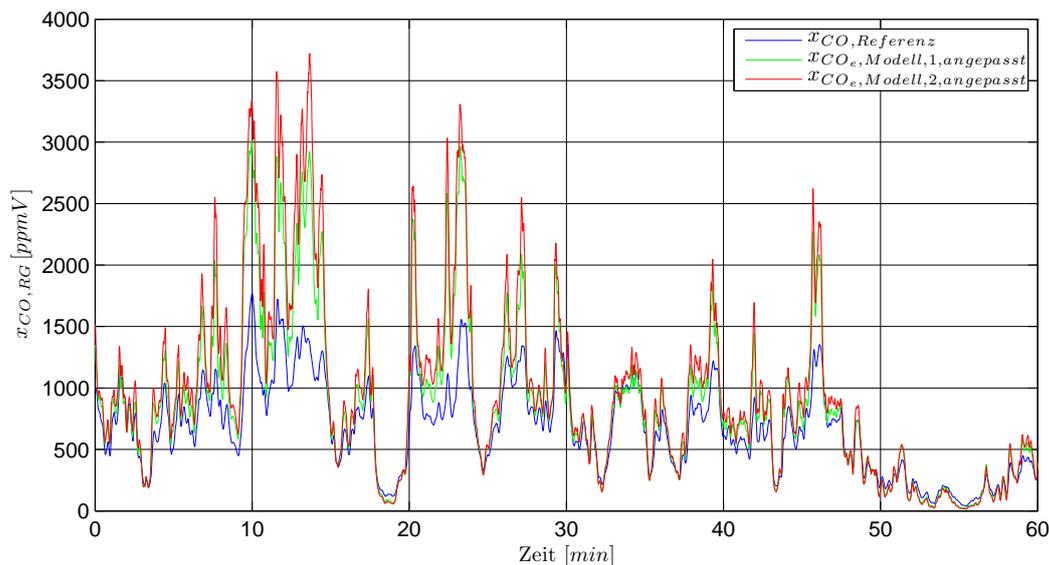


Abbildung 5.27: CarboSen: Angepasste Schätzung der zur Verifikation verwendeten CO-Verläufe

Betrachtet man Abbildung 5.28 näher kann man schön erkennen, dass sich hier zeigt, dass die Empfindlichkeit des KS1D Sensors leicht abgenommen haben muss. Zusätzlich zur geringeren Empfindlichkeit hat sich auch hier gezeigt, dass der KS1D Sensor eine kleine Abweichung zum Referenzsignal besitzt. Diese ist jedoch noch nicht so stark, dass man die Modelle als unbrauchbar abstempeln muss.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass auch bei diesen Verifikationsversuchen beide Sensoren eine sehr gute Dynamik gezeigt haben. Die Tendenzen waren sehr gut erkennbar, jedoch konnte in Erfahrung gebracht werden, dass sich die beiden Sensoren nicht zur exakten Messung des CO-Gehaltes eignen, sondern lediglich zur Abschätzung des CO-Gehaltes des Rauchgases dienen. Weiters zeigte sich, dass sich das Verhalten der Sensoren mit der Zeit verändert. Beim CarboSen Sensor nahm die Empfindlichkeit nach sechs Monaten um den Faktor 6 zu. Der KS1D Sensor wies nach diesem Zeitraum eine geringe Abweichung zum Referenzsignal und eine leichte Abnahme der Empfindlichkeit auf. Zusätzlich muss vermerkt werden, dass der unterschiedliche Brennstoff ebenso einen kleinen Einfluss auf die Ergebnisse der Modelle zeigte. Trotzdem sind die Sensoren für den Einsatz bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen geeignet. Unterschiedliche Brennstoffe sind somit auch keine Einschränkung für die Verwendung der Sensoren bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen.

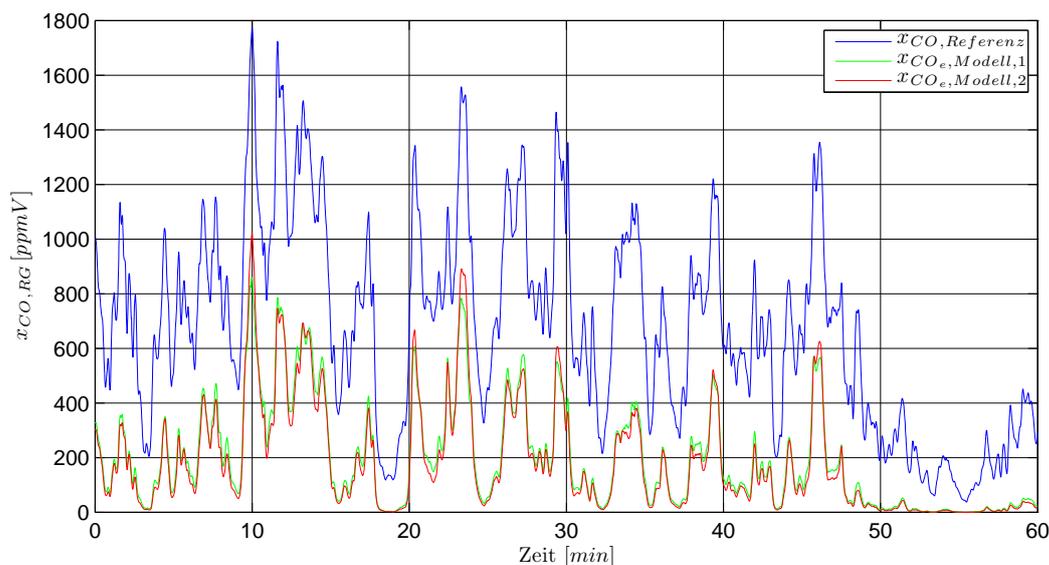


Abbildung 5.28: KS1D: Schätzung der zur Verifikation verwendeten CO-Verläufe

5.4.4 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden alle Ergebnisse bezüglich des Einsatzes der Modelle bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen diskutiert. Am Besten wäre es natürlich wenn man eine exakte Übereinstimmung des modellierten Signals mit dem Referenzsignal hätte, aber für den Einsatz der Modelle bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen spielt die betragsmäßige Übereinstimmung eine nebensächliche Rolle. Von größerer Wichtigkeit ist es, dass die Tendenzen gut wiedergegeben werden und die Sensoren über gute dynamische Eigenschaften verfügen.

Grundsätzlich haben die Modellierungsversuche in Abschnitt 5.3.3 gezeigt, dass die Sensoren den tatsächlichen Referenzmesswert gut nachbilden können und sehr gutes dynamisches Verhalten aufweisen. Die Tendenzen beider Sensoren werden stets sehr gut wiedergegeben. Dieses Verhalten konnte über alle Versuche hinweg beobachtet werden und anhand dieser Tatsache kann man festmachen, dass die Sensoren grundsätzlich für den Einsatz bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen geeignet sind.

Negativ zu vermerken ist, dass die Sensoren für eine exakte Messung des CO-Gehaltes des Rauchgases nicht geeignet sind. Nichts desto trotz haben die Versuche gezeigt, dass sich die Sensoren sehr gut zur Abschätzung des CO-Gehaltes des Rauchgases eignen.

Die Untersuchung der Anlagenabhängigkeit hat gezeigt, dass die Sensoren grundsätzlich keine Abhängigkeit gegenüber verschiedenen Anlagen zeigen, lediglich beim Modell 1 des CarboSen Sensors, welches die Rauchgastemperatur berücksichtigt, konnte eine Anlagenabhängigkeit verzeichnet werden, welche sich jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund der schlechteren Temperaturregelung der Auswertelektronik des CarboSen Sensors ergeben hat.

Anhand der Versuche mit unterschiedlichem Brennstoff konnte festgestellt werden, dass die Sensoren eine geringe Brennstoffabhängigkeit aufweisen. Diese Abhängigkeit ist jedoch so gering, dass die Sensoren bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen ohne Bedenken eingesetzt werden können.

Das einzige Problem, das sich bei den Sensoren ergeben hat, waren deren Langzeiteigenschaften. Bereits nach sechs Monaten zeigte sich beim CarboSen Sensor eine deutliche Veränderung dessen Verhaltens. Die Empfindlichkeit des Sensors hat in diesen sechs Monaten um den Faktor 6 zugenommen. Aber nicht nur der CarboSen Sensor zeigte nach dieser Zeit eine Veränderung des Verhaltens, sondern auch der KS1D Sensor hatte eine Veränderung der Empfindlichkeit nach sechs Monaten an den Tag gelegt. Es stellte sich zudem heraus, dass der KS1D Sensor eine zusätzliche Abweichung zum Referenzsignal besitzt. Das ist jedoch nicht problematisch, da bei der Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen das Erkennen der Tendenzen im Vordergrund steht und diese Anforderung von beiden Sensoren auch nach sechs Monaten erfüllt wird.

Die Anwendung der Modelle anhand unterschiedlicher Sensoren hat dargelegt, dass die Sensoren eine geringe Schwankung aufweisen. Das bedeutet, dass die mathematischen Modelle bedenkenlos auch bei verschiedenen Sensoren angewendet werden können.

Zusammengefasst kann man sagen, dass beide Sensoren für die Anwendung bei einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen eingesetzt werden können. In Verbindung mit den mathematischen Modellen können nichtlineare Zusammenhänge kompensiert und vorhandene Querempfindlichkeiten berücksichtigt werden. Somit kann durch die Anwendung der Sensoren in Verbindung mit den mathematischen Modellen die Effizienz der Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen gesteigert werden.

Kapitel 6

Untersuchung der CO - λ - Charakteristik

Wie schon in den einleitenden Seiten beschrieben, spielt die CO- λ -Charakteristik für den regelungstechnischen Eingriff zur Minimierung der CO-Emissionen und Steigerung des Wirkungsgrades eine große Rolle. Da die CO- λ -Charakteristik jedoch von sehr vielen Faktoren abhängt, darunter auch die Anlagengeometrie, ist es notwendig, die CO- λ -Charakteristik der Versuchsanlage zu untersuchen.

In diesem Kapitel wird zunächst die Vorgehensweise zur Untersuchung der CO- λ -Charakteristik erläutert. Anschließend werden die erzielten Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

6.1 Methodik

In diesem Abschnitt soll die grundsätzliche Vorgehensweise zur Untersuchung der CO- λ -Charakteristik der Anlage beschrieben werden. Um explizit die Auswirkungen der Anlagengeometrie sowie der variierten Parameter auf die CO- λ -Charakteristik untersuchen zu können, wird ein möglichst homogener Brennstoff benötigt.

Nach langer Recherche, konnte ein passender Brennstoff gefunden werden. Es handelt sich dabei um reines Lärchenholz ohne Rinden- und Feinanteil. Der Brennstoff wies keine Verunreinigungen, wie Staub, Erde, Tannenzapfen oder Tannennadeln, auf. Ein weiterer Unterschied zwischen dem verwendeten Hackgut und einem standard Hackgut ergibt sich aus der Herstellung und zwar wurde das verwendete Hackgut gefräst und nicht wie üblicherweise gehackt. Somit erhält man eine genauere und homogenere Korngrößenverteilung. Da auch der Wassergehalt des Brennstoffes einen Einfluss auf die CO- λ -Charakteristik besitzen kann, wurde der geforderte Wassergehalt des Brennstoffes auf 25 Gew.% FS festgesetzt. Schlussendlich betrug der Wassergehalt des verwendeten Brennstoffes 22,04 Gew.% FS mit einer Standardabweichung von 1,13 Gew.% FS. Abbildung 6.1 zeigt eine Brennstoffprobe des verwendeten Hackgutes.

Im nächsten Schritt wurden die zu vermessenden Betriebspunkte festgelegt. Grundsätzlich



Abbildung 6.1: Brennstoffprobe des verwendeten Hackgutes

sollen möglichst viele Messpunkte aufgenommen werden, jedoch war die Zeit, die für die Vermessung zur Verfügung stand, nicht unbegrenzt. Grundsätzlich wird die Anlage im Bereich von 100 % der Gesamtleistung (Volllast) und 30 % der Gesamtleistung (Teillast) betrieben. Zur Untersuchung der Lastabhängigkeit wurden die beiden Grenzen des Betriebsbereiches (Voll- bzw. Teillast) näher betrachtet. Dabei fand grundsätzlich eine Variation folgender Größen statt:

- Luftverhältnis im Brennstoffbett λ_{BB}
- Sauerstoffgehalt des resultierenden Rauchgases $x_{O_2, RG}$
- Wassergehalt des Brennstoffes $w_{H_2O, Brst}$

Abbildung 6.2 zeigt alle vermessenen Betriebspunkte grafisch in einem Diagramm. Hier wurde auf der Abszisse das Luftverhältnis im Brennstoffbett λ_{BB} und auf der Ordinate der Sauerstoffgehalt des Rauchgases $x_{O_2, RG}$ aufgetragen. Die Messpunkte die bei Volllastbetrieb vermessen wurden, sind mit einem roten Stern gekennzeichnet und die Teillastmesspunkte sind mit einem blauen Kreis vermerkt. Die Messpunkte wurden so gewählt, dass der aus Voruntersuchungen abgeschätzte optimale Punkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen in der Mitte des vermessenen Bereichs liegt.

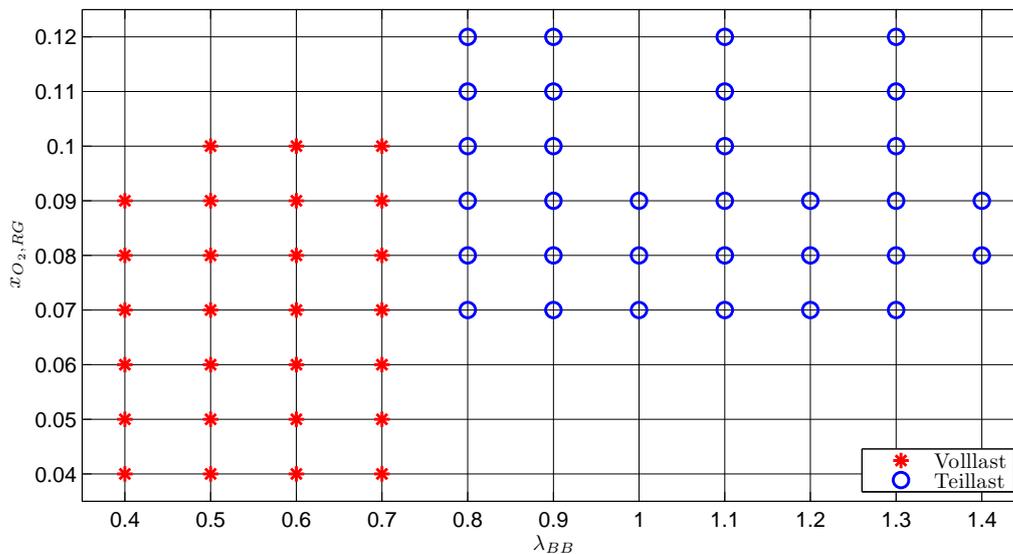


Abbildung 6.2: Vermessene Betriebspunkte

Als nächstes wurde ein Ablaufplan entworfen, welcher während der gesamten Messungen penibelst genau eingehalten werden musste, damit die Messergebnisse repräsentativ sind und miteinander verglichen werden können. Voruntersuchungen zeigten, dass die Anlage zwei Stunden benötigt um eine konstante Betriebstemperatur zu erreichen. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass nach jedem Betriebszustandswechsel mindestens eine Stunde zum Einschwingen benötigt wird. Da die Messgrößen teilweise stark schwanken, wurde eine Stunde als Messzeitraum festgelegt. Die Messwerte wurden dann über diesen Zeitraum gemittelt bevor sie zu weiteren Untersuchungen herangezogen wurden. Abbildung 6.3 zeigt den Verlauf beginnend mit dem Aufheizen der Anlage und mit anschließender Vermessung des ersten Messpunktes. Nach dem Aufheizen sowie nach jeder Messstunde wird die Asche vom Rost abgekippt und der nächste Messpunkt eingestellt. Es wird erneut eine Stunde gewartet, sodass sich der Betriebszustand einschwingen kann. Darauf folgend wird eine Stunde lang gemessen. Abschließend wird wiederum die Asche vom Rost abgekippt. Auf diese Weise konnten bis zu fünf Messpunkte pro Messtag aufgezeichnet werden.

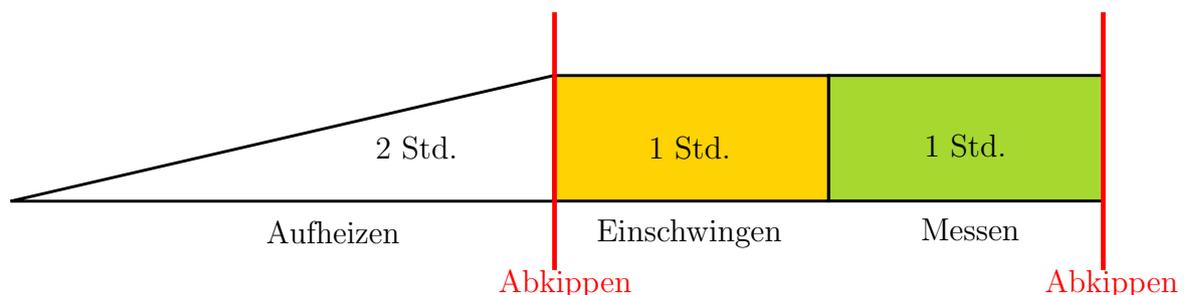


Abbildung 6.3: Darstellung des Versuchsablaufes

Weiters wurde der Wassergehalt des Brennstoffes bei den Messungen variiert, um die Auswirkung des Wassergehaltes des Brennstoffes auf die CO- λ -Charakteristik zu untersu-

chen. Da der Brennstoff einen konstanten Wassergehalt von rund 22 Gew.% FS aufwies, musste dieser kontrolliert befeuchtet werden. Abbildung 6.4 zeigt den dafür verwendeten Aufbau. Dabei wurde das Hackgut zuerst in eine handelsübliche Betonmischmaschine gefüllt. Die Mischmaschine wurde jedoch zuvor auf einer Waage platziert um das Gewicht des eingefüllten Hackgutes ermitteln zu können. Unter Kenntnis des Wassergehaltes des Hackgutes kann somit die Menge an Wasser, welche man dem Brennstoff beimengen muss, um einen gewünschten Wassergehalt des Brennstoffes zu erreichen, berechnet werden. Der Wassergehalt des Brennstoffes berechnet sich grundsätzlich mittels Gleichung (6.1) aus dem Quotienten der Masse an gebundenem Wasser im Brennstoff $m_{\text{H}_2\text{O,Brst}}$ und der gesamten Brennstoffmasse m_{Brst} , die sich aus der Summe der Masse an gebundenem Wasser im Brennstoff $m_{\text{H}_2\text{O,Brst}}$ und der Masse an trockenem Brennstoff $m_{\text{Brst,tr}}$ ergibt.

$$w_{\text{H}_2\text{O,Brst}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O,Brst}}}{m_{\text{H}_2\text{O,Brst}} + m_{\text{Brst,tr}}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O,Brst}}}{m_{\text{Brst}}} \quad (6.1)$$

Durch Umformen lässt sich daraus die für einen gewünschten Wassergehalt benötigte Wassermasse anschreiben:

$$m_{\text{H}_2\text{O,Brst}} = w_{\text{H}_2\text{O,Brst}} m_{\text{Brst}} \quad (6.2)$$

Der neue geforderte Wassergehalt $w_{\text{H}_2\text{O,Brst}}^*$ lässt sich somit durch Addition der Masse des



Abbildung 6.4: Aufbau zum Befeuchten des Brennstoffes

zusätzlich erforderlichen Wassers $m_{\text{H}_2\text{O,Zusatz}}$ zum bereits gebundenen Wasser $m_{\text{H}_2\text{O,Brst}}$ berechnen:

$$w_{\text{H}_2\text{O,Brst}}^* = \frac{m_{\text{H}_2\text{O,Brst}} + m_{\text{H}_2\text{O,Zusatz}}}{m_{\text{Brst}} + m_{\text{H}_2\text{O,Zusatz}}} = \frac{w_{\text{H}_2\text{O,Brst}} m_{\text{Brst}} + m_{\text{H}_2\text{O,Zusatz}}}{m_{\text{Brst}} + m_{\text{H}_2\text{O,Zusatz}}} \quad (6.3)$$

Die Masse an Wasser $m_{\text{H}_2\text{O,Zusatz}}$, welche dem Brennstoff zugeführt werden muss um den neuen gewünschten Wassergehalt des Brennstoffes $w_{\text{H}_2\text{O,Brst}}^*$ zu erzielen, lässt sich somit explizit berechnen:

$$m_{\text{H}_2\text{O,Zusatz}} = \frac{(w_{\text{H}_2\text{O,Brst}}^* - w_{\text{H}_2\text{O,Brst}}) m_{\text{Brst}}}{1 - w_{\text{H}_2\text{O,Brst}}^*} \quad (6.4)$$

Nachdem die gemäß Gleichung (6.4) berechnete Masse an zusätzlichem Wasser $m_{\text{H}_2\text{O,Zusatz}}$ dem Hackgut beigemischt wurde, wurde dieses für 15 Minuten in der Mischmaschine gleichmäßig verteilt. Anschließend wurde das feuchte Hackgut in Fässer gefüllt und für 24 Stunden gelagert, damit sich das Wasser noch gleichmäßiger verteilen konnte. Es wurden zwei Chargen Brennstoff mit zwei unterschiedlichen Wassergehalten (33 Gew.% FS und 37 Gew.% FS) angefeuchtet.

Abbildung 6.5 zeigt die Stufen der Befeuchtung des Brennstoffes. Ganz rechts im Bild kann man ein Holzstück mit ca. 22 Gew.% FS sehen. In diesem Zustand wurde der Brennstoff geliefert. In der Mitte sieht man ein Holzstück, welches der Mischmaschine nach dem Anfeuchten entnommen und in zwei Teile durchtrennt wurde. Es zeigt sich hier, dass das Wasser noch nicht bis zum Kern durchgedrungen ist. Das Holzstück ganz links im Bild wurde nach dem Befeuchten noch für 24 Stunden in einem Fass, welches luftdicht verschlossen wurde, gelagert. Man kann hier erkennen, dass das Wasser nun gleichmäßig über das ganze Holzstück verteilt ist.

6.1.1 Normierung des CO-Gehaltes

Zur Bewertung der tatsächlichen Menge der CO-Emissionen muss die gemessene CO-Konzentration, die üblicherweise in *parts per million by volume (ppmV)* angegeben wird, normiert und auf die Rauchgasmenge bezogen werden. Der Begriff Konzentration gibt nämlich den Anteil eines Stoffes an einem Gesamtgemisch an. Somit ist die Angabe in ppmV vom Sauerstoffgehalt des Rauchgases abhängig, da bei höheren Sauerstoffkonzentrationen im Rauchgas auch mehr Rauchgasvolumen vorhanden ist. Um die Messwerte des CO-Gehaltes dennoch miteinander vergleichen zu können, müssen die in ppmV angegebenen CO-Konzentrationen in *mg/Norm m³ trockenes Rauchgas bei 13 Vol.% O₂ im trockenen Rauchgas (mg/Nm³ tr. RG. bei 13 Vol.% O₂ i. tr. RG)* gemäß folgender Berechnungsvorschrift umgerechnet werden:

$$x_{\text{CO,RGtr,norm}} = x_{\text{CO,RGtr,ppmV}} \cdot \frac{0,21 - x_{\text{O}_2,\text{RGtr,ref}}}{0,21 - x_{\text{O}_2,\text{RGtr}}} \cdot \frac{M_{\text{CO}}}{V_{\text{m,N}}} \quad (6.5)$$

Dabei bezeichnet $x_{\text{CO,RGtr,ppmV}}$ die mit der RGA erfasste CO-Konzentration im trockenen Rauchgas in ppmV. $x_{\text{O}_2,\text{RGtr,ref}}$ bezeichnet den Sauerstoffgehalt des trockenen Rauchgases, auf welchen die Normierung referenziert. In der vorliegenden Arbeit wurde $x_{\text{O}_2,\text{RGtr,ref}} = 0,13$ verwendet. 0,21 entspricht dem Sauerstoffgehalt der trockenen Umgebungsluft. Der tatsächliche vorherrschende Sauerstoffgehalt des Rauchgases wird mit $x_{\text{O}_2,\text{RGtr}}$ bezeichnet. Für die molare Masse von CO gilt $M_{\text{CO}} = 28,01 \cdot 10^{-3}$ kg/mol und für das molare Volumen bei Normzustand (d.h. 0 °C und 101325 Pa) gilt $V_{\text{m,N}} = 22,41$ m³/mol.



Abbildung 6.5: Stufen der Befeuchtung des Brennstoffes

6.2 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Messungen, welche wie in Abschnitt 6.1 beschrieben wurden, dargestellt und durchdiskutiert. Es wurde der arithmetische Mittelwert sämtlicher Messgrößen über die Messstunde gebildet. Somit konnten die arithmetischen Mittelwerte der Messgrößen der einzelnen Messstunden miteinander verglichen und beurteilt werden. Wie zu Beginn erwähnt ist das Ziel dieser Arbeit eine Strategie zur Verringerung der CO-Emissionen zu entwickeln. Dazu wurden grundsätzlich eine Vielzahl von Auswertungen durchgeführt. Die Erkenntnisse, welche für eine Verringerung der CO-Emissionen herangezogen werden können, werden in der Folge näher behandelt. Dabei werden zuerst die Ergebnisse im Volllastbetrieb durchdiskutiert. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse des Teillastbetriebes erläutert.

6.2.1 Ergebnisse aus den Versuchen bei Volllast

Abbildung 6.6 zeigt die CO- λ -Charakteristik bei Volllast und unterschiedlichen Luftverhältnissen im Brennstoffbett λ_{BB} . Man kann hier deutlich erkennen, dass sich die minimalen CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad bei einem Luftverhältnis im Brenn-

stoffbett von $\lambda_{BB} = 0,4$ ergeben. Mit steigendem λ_{BB} wandert die CO- λ -Charakteristik nach rechts oben. Grundsätzlich würde man aus dieser Erkenntnis ableiten, dass bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett kleiner als 0,4 die CO-Emissionen weiter verringert werden können. Allerdings zeigte sich bei Voruntersuchungen, dass bei Luftverhältnissen im Brennstoffbett kleiner 0,4 starke CO-Emissionen auftreten. Dies lässt sich auf die Anlagengeometrie zurück führen.

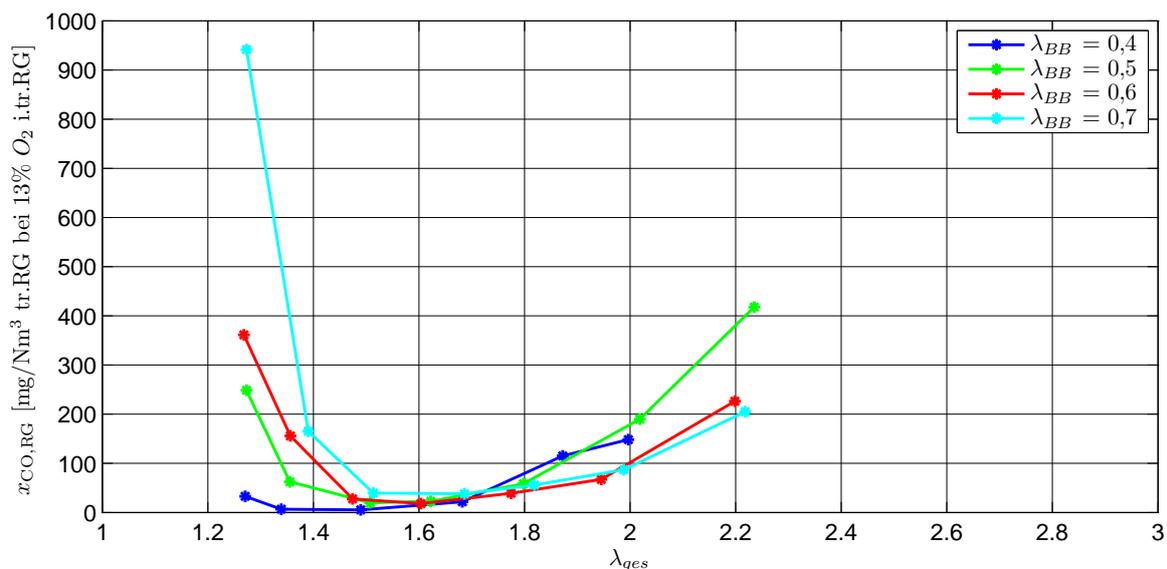


Abbildung 6.6: CO- λ -Charakteristik bei Vollast und unterschiedlichen λ_{BB}

Eine weitere Erkenntnis entspringt der näheren Betrachtung von Abbildung 6.7. Hier werden die CO-Emissionen in Abhängigkeit des Sekundärluftmassenstromes inklusive der in der Sekundärverbrennungszone zugeführten Falschluf aufgetragen. Man kann erkennen, dass sich das CO-Minimum bei den unterschiedlichen Luftverhältnissen im Brennstoffbett bei einem Sekundärluftmassenstrom von ungefähr 40 kg/h ergibt. Lediglich die türkise Kurve, welche die Messpunkte für $\lambda_{BB} = 0,7$ darstellt, weicht leicht davon ab. Da jedoch Abbildung 6.6 zeigte, dass bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von 0,7 generell höhere CO-Emissionen bei gleichzeitig schlechterem Wirkungsgrad auftreten, ist diese Kurve irrelevant für das letztendliche Ziel einer Strategie zur Minimierung der CO-Emissionen bei gleichzeitiger Steigerung des Wirkungsgrades.

Als nächstes werden die Ergebnisse aus den Messungen mit feuchtem Brennstoff diskutiert. Abbildung 6.8 vergleicht die CO- λ -Charakteristiken bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,4$ für unterschiedliche Wassergehalte des Brennstoffes. Man kann sehen, dass die CO- λ -Charakteristiken mit steigendem Wassergehalt des Brennstoffes lediglich nach oben wandern und sich nicht nach rechts verschieben. Der optimale Punkt hinsichtlich geringer CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad für alle Wassergehalte liegt bei einem Luftverhältnis von ungefähr 1,4. Das würde bedeuten, dass es hier besser wäre den Sauerstoffgehalt des Rauchgases konstant zu halten.

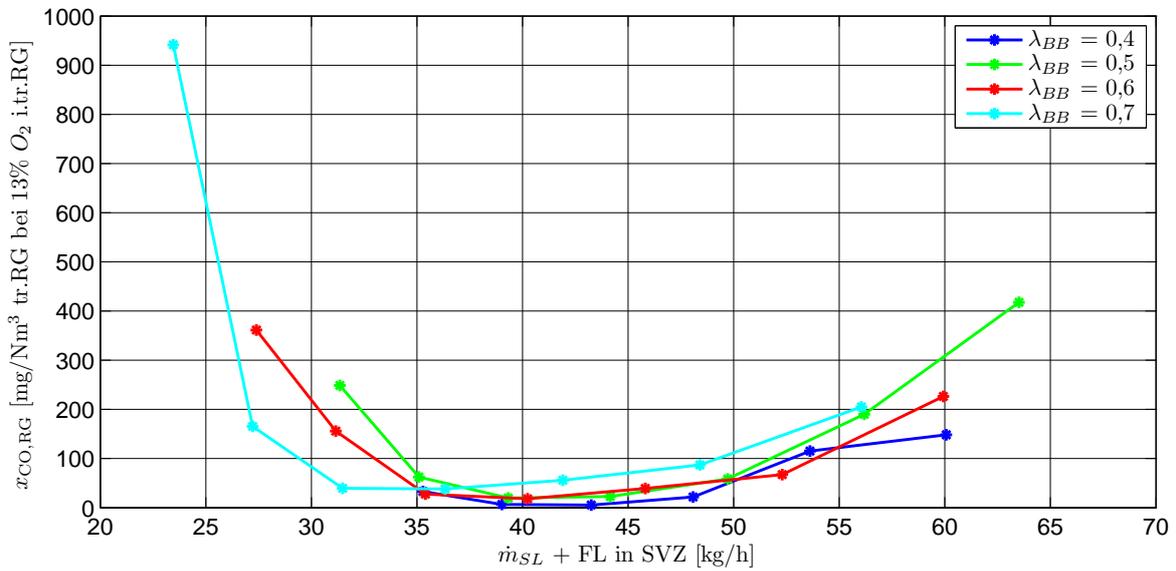


Abbildung 6.7: CO-Emissionen bei Volllast und unterschiedlichen λ_{BB} in Abhängigkeit des Sekundärluftmassenstromes

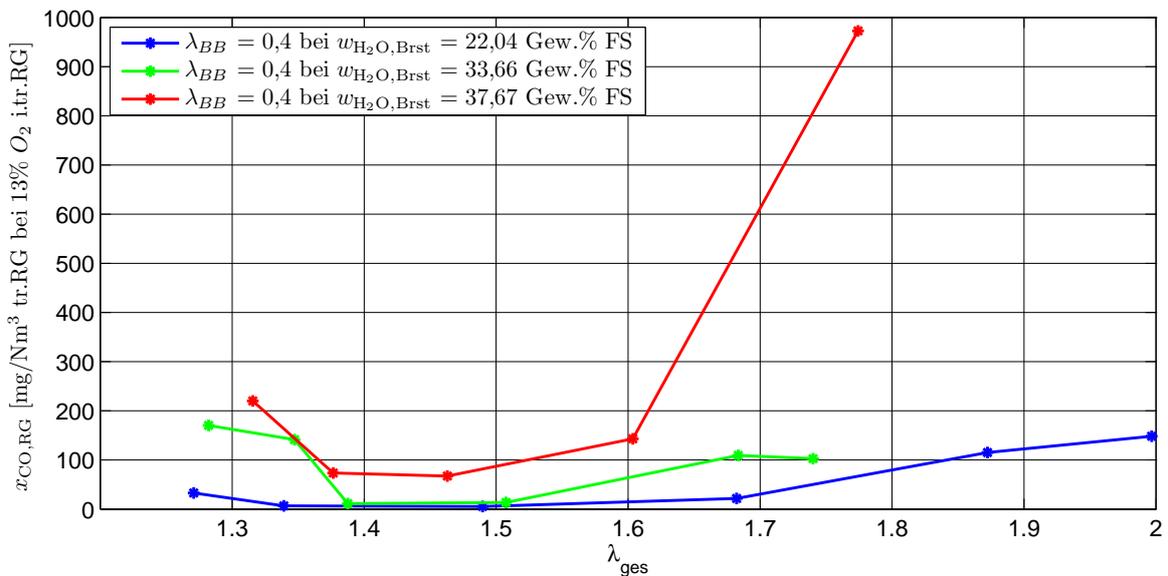


Abbildung 6.8: CO- λ -Charakteristiken bei $\lambda_{BB} = 0,4$ und unterschiedlichen Wassergehalten des Brennstoffes

Abbildung 6.9 zeigt die CO- λ -Charakteristiken bei unterschiedlichem Wassergehalt des Brennstoffes für ein Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,6$. Dabei zeigt sich allerdings eine Verschiebung des optimalen Punktes bezüglich geringer CO-Emissionen im Gegensatz zu $\lambda_{BB} = 0,4$ (siehe Abbildung 6.8).

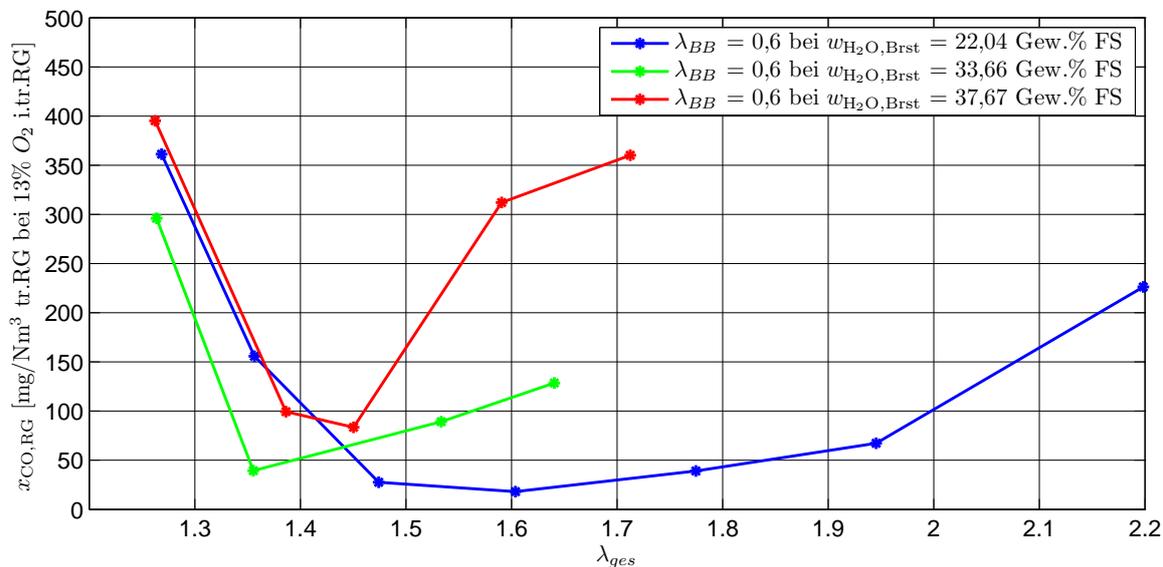


Abbildung 6.9: CO- λ -Charakteristiken bei $\lambda_{BB} = 0,6$ und unterschiedlichen Wassergehalten des Brennstoffes

Im nächsten Schritt sollen die CO-Emissionen in Abhängigkeit des Sekundärluftmassenstromes für unterschiedliche Wassergehalte des Brennstoffes betrachtet werden. Bei Betrachtung von Abbildung 6.10, welche die Ergebnisse für $\lambda_{BB} = 0,4$ beinhaltet, zeigt sich, dass der für minimale CO-Emissionen erforderliche Sekundärluftmassenstrom geringfügig vom Wassergehalt des Brennstoffes abhängt.

Bei den in Abbildung 6.11 dargestellten Ergebnissen für unterschiedliche Wassergehalte bei $\lambda_{BB} = 0,6$, zeigt sich, dass der optimale Wert des Sekundärluftmassenstromes hinsichtlich geringer CO-Emissionen im Bereich zwischen 38 und 40 kg/h liegt und somit einer geringeren Variation in Abhängigkeit des Wassergehaltes des Brennstoffes als bei $\lambda_{BB} = 0,4$ unterliegt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei Vollast die minimalen CO-Emissionen bei konstantem Sekundärluftmassenstrom, und nicht bei konstantem Gesamtluftverhältnis, erreicht wurden. Zudem stellte sich heraus, dass die CO-Emissionen bei kleiner werdendem λ_{BB} ebenfalls kleiner wurden, bis die minimalen CO-Emissionen bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,4$ erreicht wurden. Bei Erhöhung des Brennstoffwassergehaltes zeigte sich, dass das Grundlevel der CO-Emissionen angehoben und der Anstieg der Kurven auf beiden Seiten steiler wurde. Zusätzlich ergab sich eine leichte Verschiebung des optimalen Punktes im Sinne niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad. Daraus resultiert, dass der Zusammenhang zwischen minimalen CO-Emissionen und

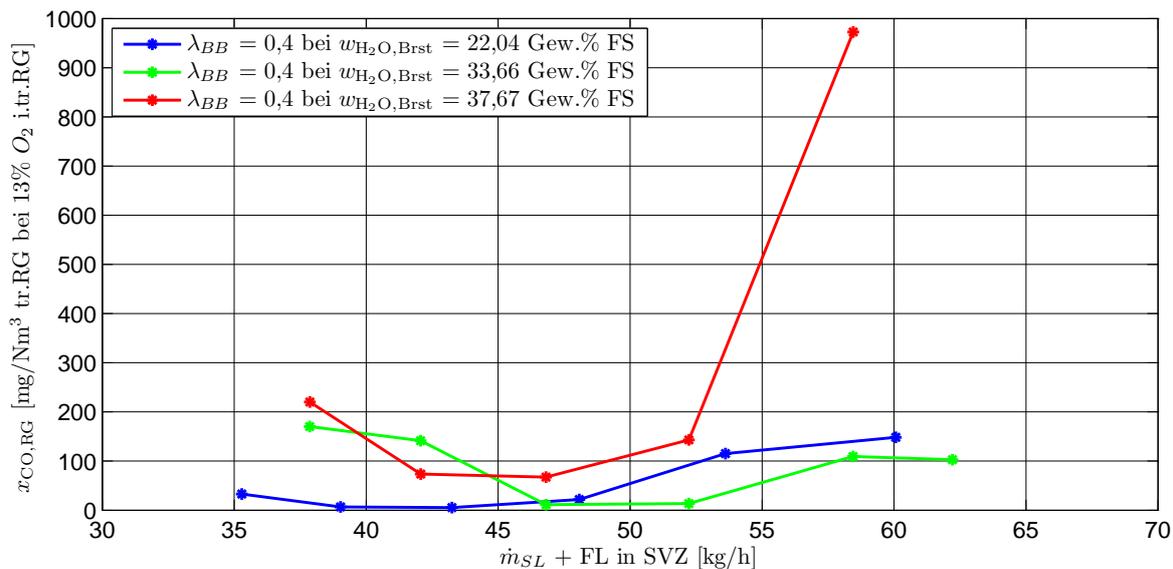


Abbildung 6.10: CO-Emissionen für $\lambda_{BB} = 0,4$ bei Volllast in Abhängigkeit des Sekundärluftmassenstromes und unterschiedlichen Wassergehalten des Brennstoffes

konstantem Sekundärluftmassenstrom bei Brennstoffen mit höheren Wassergehalten nicht mehr so eindeutig ausgeprägt ist.

6.2.2 Ergebnisse aus den Versuchen bei Teillast

Im folgenden Abschnitt werden die aus den Messungen bei Teillast resultierenden Ergebnisse dargestellt. Abbildung 6.12 zeigt die CO- λ -Charakteristiken für unterschiedliche Luftverhältnisse im Brennstoffbett. Wie aufgrund der Voruntersuchungen vermutet, liegen die Punkte bei denen die CO-Emissionen ein Minimum aufweisen, bei höheren Luftverhältnissen. Der optimale Punkt im Sinne von niedrigen CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad liegt im Bereich eines Luftverhältnisses im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,9$ und eines Gesamtluftverhältnisses von $\lambda \approx 1,8$. Die Tatsache, dass bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,8$ die CO-Emissionen höher sind als bei $\lambda_{BB} = 0,9$ zeigt, dass eine weitere Verringerung des Luftverhältnisses im Brennstoffbett keine Verbesserung bezüglich niedriger CO-Emissionen bringt. Grundsätzlich sind in Teillast die CO-Emissionen höher als bei Volllast. Das liegt an der Geometrie des Feuerraumes der Biomasse-Kleinfeuerungsanlage.

In weiterer Folge sollen die CO-Emissionen für unterschiedliche Luftverhältnisse im Brennstoffbett, aufgetragen in Abhängigkeit des Sekundärluftmassenstromes, betrachtet werden (siehe Abbildung 6.13). Dabei zeigt sich, dass die CO-Emissionen je nach λ_{BB} bei geringeren Sekundärluftmassenströmen stark ansteigen, über einen Sekundärluftmassenstrom von ca. 15 kg/h aber alle gering bleiben.

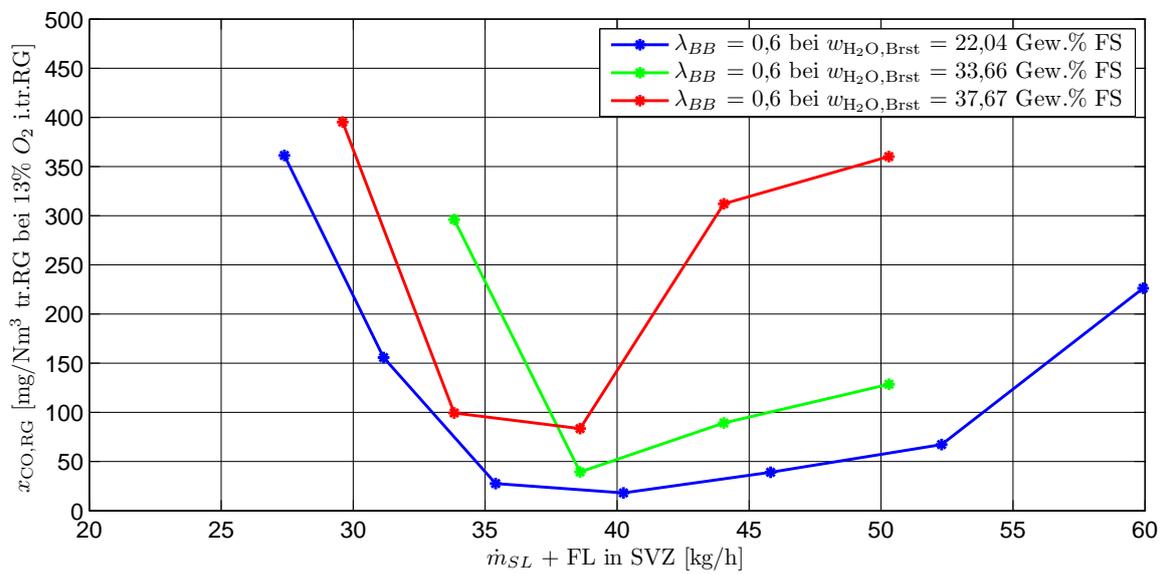


Abbildung 6.11: CO-Emissionen für $\lambda_{BB} = 0,6$ bei Volllast in Abhängigkeit des Sekundärluftmassenstromes und unterschiedlichen Wassergehalten des Brennstoffes

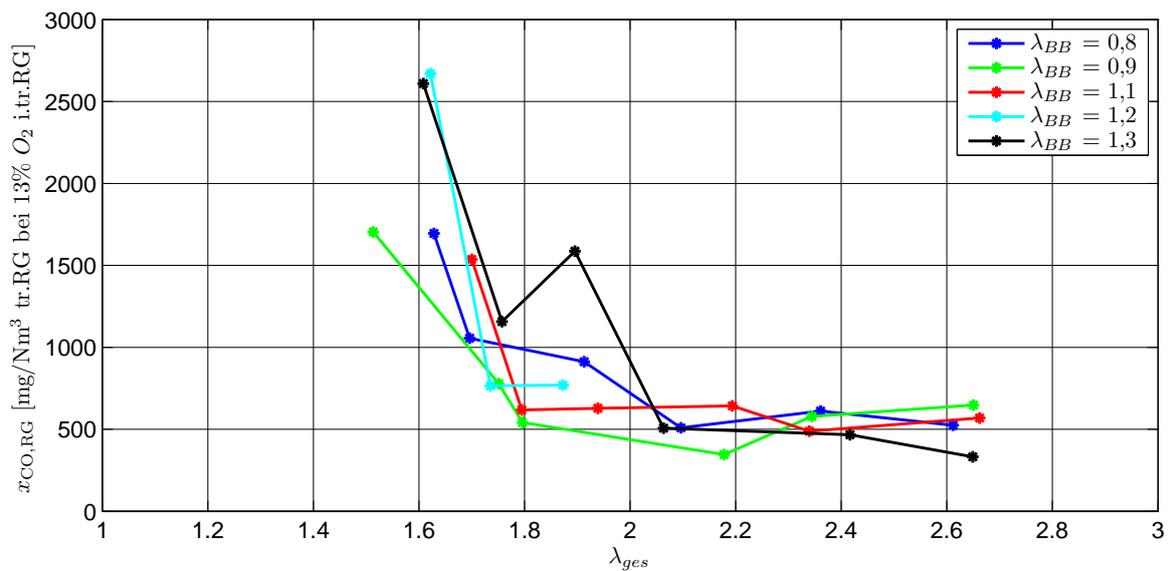


Abbildung 6.12: CO- λ -Charakteristiken bei Teillast und unterschiedlichen λ_{BB}

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei Teillast bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,9$ minimale CO-Emission bei bestmöglichem Wirkungsgrad erzielt wurden. Es stellte sich heraus, dass der Sekundärluftmassenstrom mindestens 15 kg/h betragen muss, damit die CO-Emissionen bei allen λ_{BB} niedrig sind.

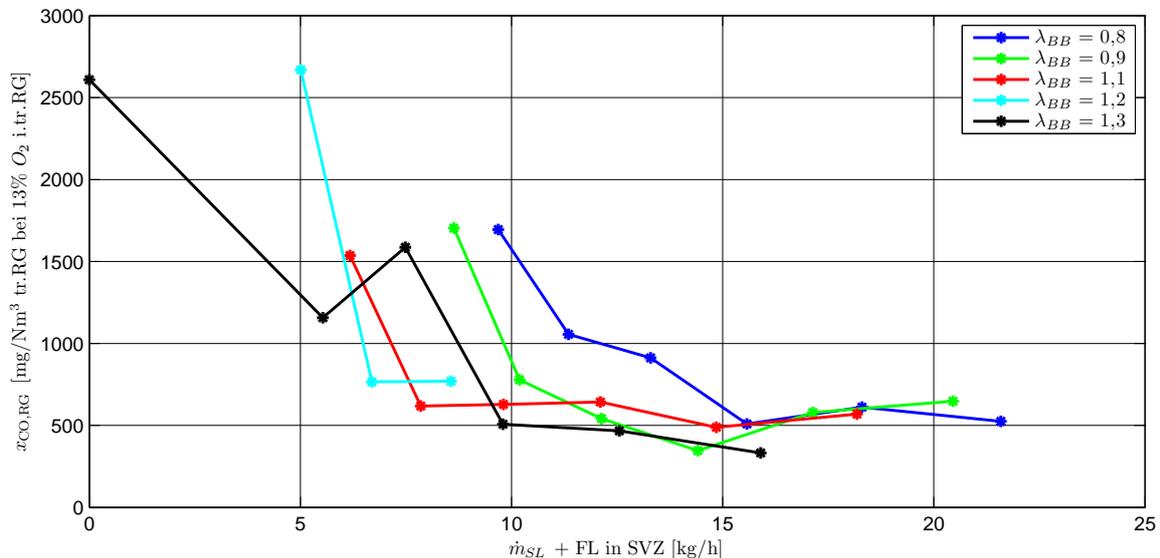


Abbildung 6.13: CO-Emissionen bei Teillast und unterschiedlichen λ_{BB} in Abhängigkeit des Sekundärluftmassenstromes

6.3 Diskussion der Ergebnisse

Ziel der durchgeführten Untersuchung war es, die Abhängigkeit der CO-Emissionen vom Luftverhältnis, Luftverhältnis im Brennstoffbett, der Leistung und vom Wassergehalt des Brennstoffes zu untersuchen. Mit einem besonders homogenen Brennstoff wurden zwei Leistungsbereiche näher betrachtet. Bei Volllast stellte sich heraus, dass bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,4$ die CO-Emissionen ein Minimum aufweisen. Bei Teillast liegt das CO-Minimum bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,9$. Abbildung 6.14 zeigt die CO-Minima der einzelnen CO- λ -Charakteristiken in Abhängigkeit des Luftverhältnisses im Brennstoffbett λ_{BB} für unterschiedliche Wassergehalte des Brennstoffes sowie Leistungsbereiche. Man kann erkennen, dass die CO-Minima bei Volllast unabhängig vom Wassergehalt des Brennstoffes im Bereich von $\lambda_{BB} = 0,4$ liegen. Bei Teillast liegt das CO-Minimum im Bereich $\lambda_{BB} = 1,3$. Da die CO-Emissionen bei $\lambda_{BB} = 1,3$ aber nur unwesentlich kleiner sind als die CO-Emissionen bei $\lambda_{BB} = 0,9$ und der Wirkungsgrad bei $\lambda_{BB} = 1,3$ sehr viel schlechter ist, da der Sekundärluftmassenstrom zumindest 15 kg/h betragen soll (siehe Abbildung 6.13), wird für den Teillastbereich ein Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,9$ als optimal im Sinne niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad gewählt.

Ein niedriges λ_{BB} bedeutet weniger Primärluft, dafür mehr Sekundärluft bei gleichem λ_{ges} .

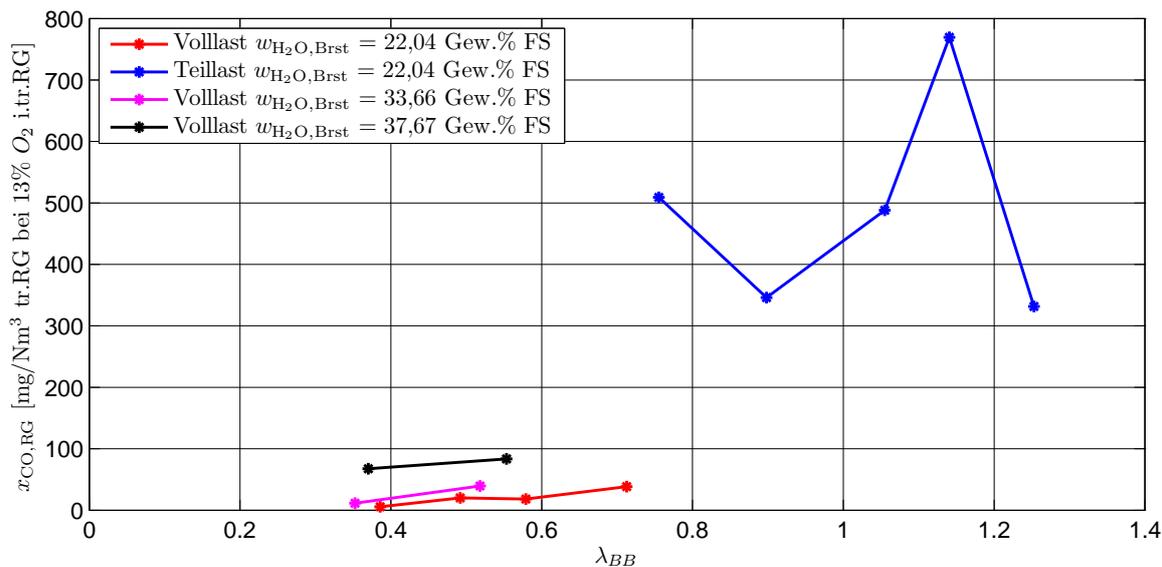


Abbildung 6.14: CO-Minima in Abhängigkeit des Luftverhältnisses im Brennstoffbett λ_{BB} für unterschiedliche Wassergehalte des Brennstoffes

Das heißt die Durchmischung der brennbaren Gase mit der Sekundärluft in der Sekundärverbrennungszone hat, wie zu erwarten war, einen großen Einfluss auf die Emissionen. Wenn jedoch zu viel Sekundärluft eingeblasen wird, wird die Feuerraumtemperatur zu stark abgekühlt und die Temperatur, welche für einen vollständigen Ausbrand von Nöten ist, kann nicht mehr erreicht werden.

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass bei Volllast ein Sekundärluftmassenstrom von ca. 40 kg/h zu den niedrigsten CO-Emissionen führte. Selbst bei unterschiedlichen Wassergehalten des Brennstoffes lagen die minimalen CO-Emissionen stets im Bereich dieses Sekundärluftmassenstromes. Eine ähnliche Beobachtung konnte bei den Messungen im Teillastbetrieb verzeichnet werden. Hier zeigte sich, dass bei einem Sekundärluftmassenstrom über 15 kg/h niedrige CO-Emissionen erzielt wurden.

Zusammengefasst ist es somit sinnvoll, das Luftverhältnis im Brennstoffbett sowie den Sekundärluftmassenstrom und damit den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases in Abhängigkeit der Leistung anzupassen. Leichte Abweichungen der CO-Minima z.B. aufgrund von höheren Wassergehalten des Brennstoffes müssten durch die Regelung z.B. in Form eines Suchalgorithmus des Punktes mit minimalen CO-Emissionen kompensiert werden. Die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung einer Strategie zur Verringerung der CO-Emissionen im laufenden Betrieb die im folgenden Kapitel 7 erläutert werden.

Kapitel 7

Erweiterung der Regelung

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus Kapitel 6 zur Erweiterung der bestehenden modellbasierten Regelung im Sinne einer Verringerung der CO-Emissionen verwendet. Im ersten Schritt wird ein Führungsgrößenformer entwickelt, der die optimalen Betriebspunkte im Sinne von niedrigen CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Leistung vorgibt. Anschließend wird ein Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums durch Variation des Restsauerstoffgehaltes diskutiert.

7.1 Führungsgrößenformer (FGF)

In diesem Abschnitt wird die Umsetzung der Erkenntnisse aus Kapitel 6 in einen Führungsgrößenformer beschrieben. Dabei wird zuerst der Führungsgrößenformer erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse aus dessen experimenteller Verifikation diskutiert.

Es handelt sich beim Führungsgrößenformer um eine Erweiterung der bestehenden Regelung. Abbildung 7.1 zeigt, dass der Führungsgrößenformer direkt vor die bestehende Regelung platziert wurde. Er erhält als Information die vom Benutzer geforderte Vorlauftemperatur $T_{VL,soll}$, sowie die geforderte Kesselleistung. Die geforderte Kesselleistung wird aus der Differenz zwischen geforderter Vorlauf- und gemessener Rücklauf-temperatur sowie dem gemessenen Wassermassenstrom berechnet. Die geforderte Vorlauftemperatur wird vom Führungsgrößenformer ohne Modifikation an den Regler weiter gegeben. Da die Messwerte jedoch immer eine geringe Schwankung aufweisen und sich diese direkt auf die Führungsgröße auswirken würden, wurde die Kesselleistung zusätzlich gefiltert. Würde man die Kesselleistung nicht filtern, so würde dies zu einer nicht sinnvollen Beruhigung des Anlagenbetriebs durch die ständige Variation der Führungsgrößen führen. Zur Filterung wurde ein einfaches IIR-Filter¹ verwendet (siehe Abbildung 7.2):

$$x_{k+1} = \alpha \cdot x_k + (1 - \alpha) \cdot u_k \quad (7.1)$$

¹ IIR-Filter steht für *infinite impulse response filter* und heißt auf Deutsch *Filter mit unendlicher Impulsantwort*.

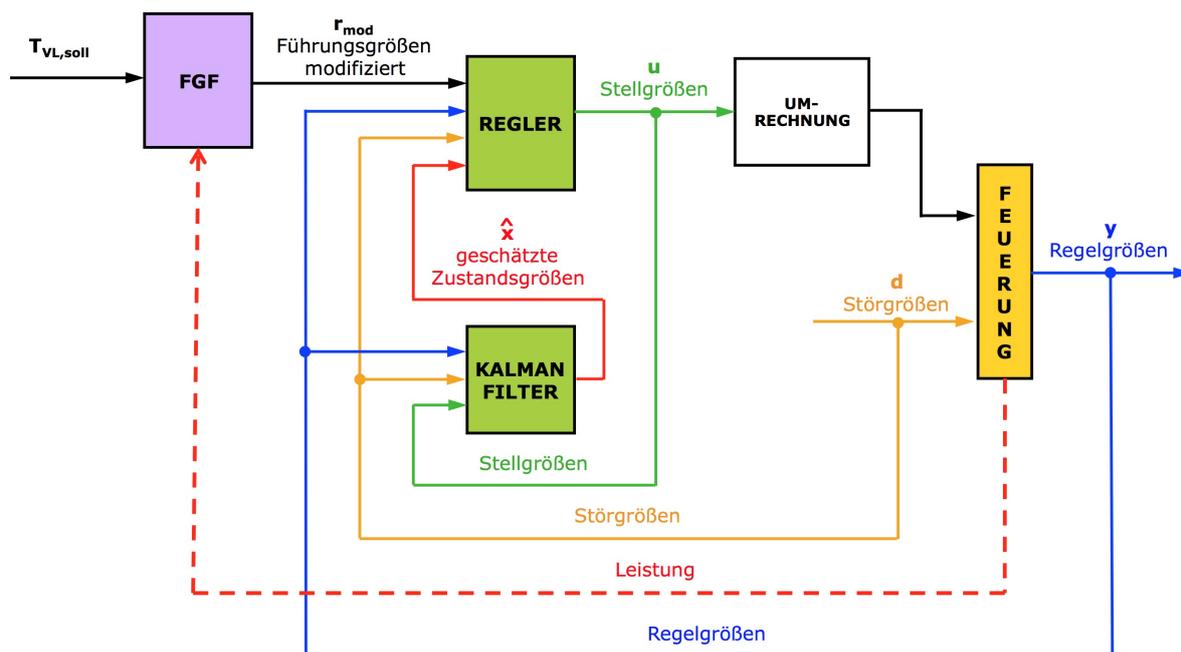


Abbildung 7.1: Darstellung der Reglerstruktur inklusive Führungsgroßenformer

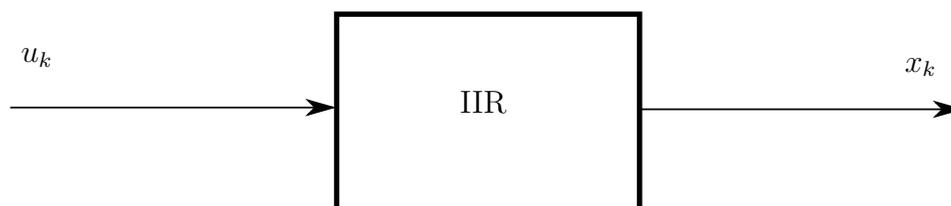


Abbildung 7.2: Darstellung des IIR-Filters

u_k stellt dabei die Eingangsfolge und x_k die Ausgangsfolge dar. Der Filterparameter α wurde anhand visueller Beurteilung des Ergebnisses gleich 0,9 gesetzt, was bei einer Abtastzeit von $T_d = 1$ s in etwa einem zeitlichen Verzögerungsglied 1. Ordnung mit einer Zeitkonstante $\tau = 10$ s entspricht.

Grundsätzlich müssen der modellbasierten Regelung drei Führungsgroßen vorgegeben werden (siehe Abschnitt 4.3.2):

$$r_1 = x_{O_2,RG} \tag{7.2}$$

$$r_2 = T_{VL} \tag{7.3}$$

$$r_{\lambda_{BB}} = \lambda_{BB} \tag{7.4}$$

Ohne den Führungsgrößenformer liegt die Verantwortung beim Benutzer geeignete Führungsgrößen für einen emissionsarmen Betrieb der Anlage zu wählen. Mit Hilfe des Führungsgrößenformers werden die Führungsgrößen für den Sauerstoffgehalt des Rauchgases r_1 , sowie das Luftverhältnis im Brennstoffbett $r_{\lambda_{\text{BB}}}$ leistungsabhängig so angepasst, dass ein möglichst emissionsarmer Betrieb bei bestmöglichem Wirkungsgrad erzielt wird. Der Benutzer wird dadurch deutlich entlastet und hat nur mehr die Aufgabe sich über die Führungsgröße der Vorlauftemperatur r_2 Gedanken zu machen.

Wie die Ermittlung der beiden Führungsgrößen r_1 und $r_{\lambda_{\text{BB}}}$ im Detail funktioniert wird in den nächsten beiden Abschnitten näher erläutert.

7.1.1 Vorgabe des Luftverhältnisses im Brennstoffbett

In Kapitel 6 wurde gezeigt, dass bei Volllastbetrieb mit einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{\text{BB}} = 0,4$ unabhängig vom Wassergehalt des Brennstoffes, minimale CO-Emissionen erreicht werden. Im Teillastbetrieb lieferte ein Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{\text{BB}} = 0,9$ die besten Ergebnisse hinsichtlich niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad. Da keine Information über die optimalen Werte für Leistungen dazwischen zur Verfügung stehen, wurde der Zusammenhang zwischen diesen beiden Punkten linear interpoliert. Abbildung 7.3 zeigt die leistungsabhängige Führungsvorgabe für das Luftverhältnis im Brennstoffbett in Abhängigkeit der Kesselleistung. Die Führungsgröße wird jedoch außerhalb des untersuchten Bereichs beschränkt um zu verhindern, dass die Anlage in einen kritischen Zustand kommt, falls die Messwerte zur Berechnung der Kesselleistung falsche Ergebnisse liefern.

7.1.2 Vorgabe des Sekundärluftmassenstromes

Nachdem die Vorgabe des Luftverhältnisses im Brennstoffbett beschrieben wurde, wird in diesem Abschnitt die Vorgabe des Sekundärluftmassenstromes anhand der Erkenntnisse aus Kapitel 6 erläutert. Es hat sich gezeigt, dass je nach Leistung bei einem bestimmten Sekundärluftmassenstrom niedrige CO-Emissionen vorherrschen. Vermutlich kommt es bei kleineren Sekundärluftmassenströmen zu keiner ausreichenden Durchmischung der brennbaren Gase mit dem Sauerstoff und bei größeren Sekundärluftmassenströmen wird durch die zugeführte Luft die Feuerraumtemperatur zu stark abgekühlt um einen vollständigen Ausbrand zu erreichen. Somit ist es besonders wichtig den Sekundärluftmassenstrom so vorzugeben, dass die CO-Emissionen gering bleiben. Bei Volllast hat sich gezeigt, dass ein Sekundärluftmassenstrom von ungefähr 40 kg/h niedrige CO-Emissionen liefert. Im Teillastbetrieb liegt der optimale Wert des Sekundärluftmassenstromes hinsichtlich niedriger CO-Emissionen bei ungefähr 15 kg/h. Da keine Informationen über die optimalen Werte für Leistungen dazwischen zur Verfügung stehen, wurde der Zusammenhang linear interpoliert. Abbildung 7.4 zeigt die leistungsabhängige Vorgabe des Sekundärluftmassenstromes. Der Sekundärluftmassenstrom wird jedoch außerhalb des untersuchten Bereichs beschränkt um zu verhindern, dass die Anlage in einen kritischen Zustand kommt, falls die Messwerte zur Berechnung der Kesselleistung falsche Ergebnisse liefern. Die Begrenzung des Sekundärluftmassenstromes nach oben hin resultiert aus der Tatsache, dass die Führungsgröße

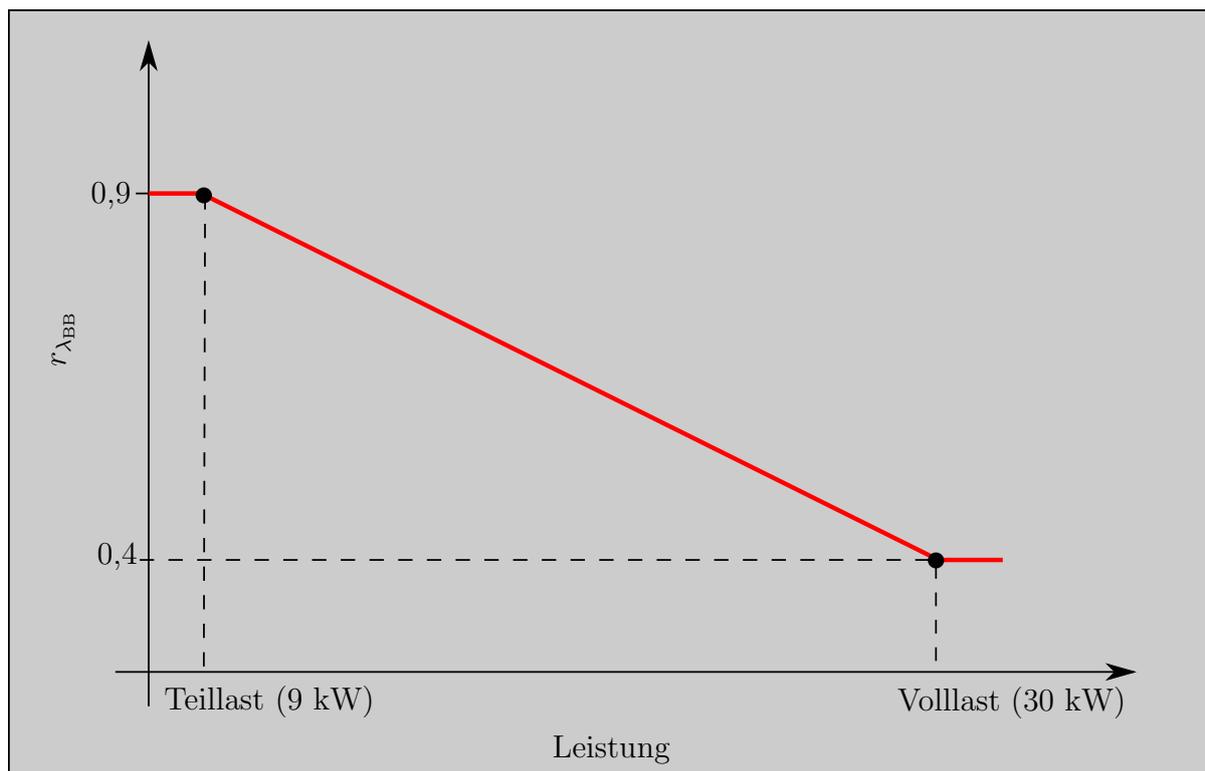
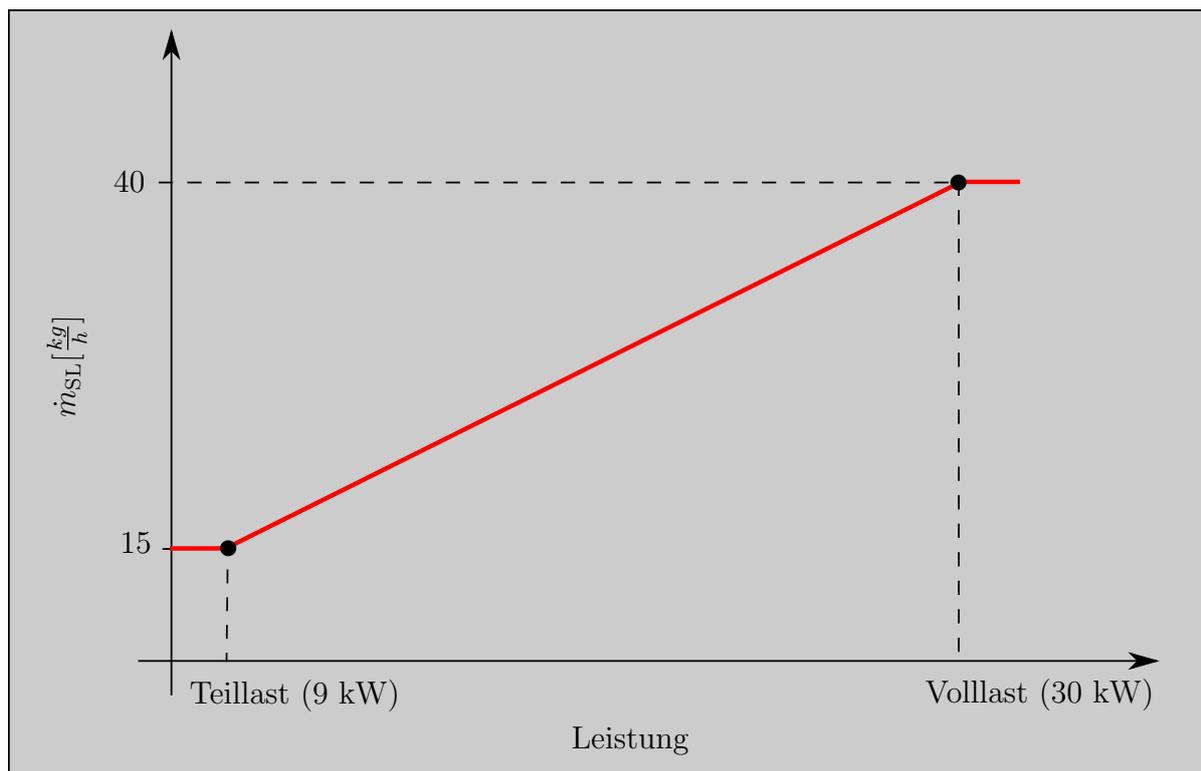


Abbildung 7.3: Leistungsabhängige Führungsgrößenvorgabe für $r_{\lambda_{BB}}$

für die Vorlauftemperatur im Regler auf die maximale Nennleistung des Kessels (30 kW) beschränkt wird. Das heißt wenn die geforderte Vorlauftemperatur zusammen mit der gemessenen Rücklauftemperatur und dem gemessenen Wassermassenstrom eine Leistung größer 30 kW ergeben würde, so wird die geforderte Vorlauftemperatur im Regler soweit abgesenkt, dass eine maximale geforderte Kesselleistung von 30 kW nicht überschritten wird. Da jedoch der hier erläuterte Führungsgrößenformer bereits vor dieser Beschränkung aktiv wird, muss der Sekundärluftmassenstrom ebenfalls nach oben hin begrenzt werden, da sonst der Führungsgrößenformer bei geforderten Leistungen über 30 kW einen zu hohen Sekundärluftmassenstrom vorgeben würde.

Es ergibt sich hier jedoch ein Problem, dass bei der Vorgabe des Luftverhältnisses im Brennstoffbett als Führungsgröße der Regelung nicht aufgetreten ist. Der Sekundärluftmassenstrom kann nicht direkt als Führungsgröße vorgegeben werden. Aus diesem Grund wird mit Hilfe des mathematischen Modells jener Sauerstoffgehalt aus den Führungsgrößen für die Vorlauftemperatur r_2 und das Luftverhältnis im Brennstoffbett $r_{\lambda_{BB}}$ sowie der gemessenen Störgrößen berechnet, für den im stationären Zustand der gewünschte Sekundärluftmassenstrom benötigt wird.

Abbildung 7.4: Leistungsabhängige Vorgabe von \dot{m}_{SL}

7.1.2.1 Berechnung der Führungsgröße für den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases die im stationären Zustand den gewünschten Sekundärluftmassenstrom benötigt

In diesem Abschnitt soll mit Hilfe des mathematischen Modells aus Abschnitt 4.3.1.5 sowie mit den Ausgangsgleichungen (4.15), (4.16) und (4.19) beschrieben werden, wie man den Sauerstoffgehalt aus den Führungsgrößen für die Vorlauftemperatur r_2 und dem Luftverhältnis im Brennstoffbett $r_{\lambda_{BB}}$ sowie der gemessenen Störgrößen berechnet, damit im stationären Zustand der gewünschte Sekundärluftmassenstrom vorhanden ist. Betrachtet man $u_{2,RL}$, so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$u_{2,RL} = \dot{m}_{PL,RL} + \dot{m}_{PL,0} \quad (7.5)$$

Formt man die Gleichung (7.5) nach $\dot{m}_{PL,RL}$ um, dann ergibt sich

$$\dot{m}_{PL,RL} = u_{2,RL} - \dot{m}_{PL,0} \quad (7.6)$$

Im eingeschwungenen Zustand gilt gemäß Gleichung (4.19):

$$x_{2,RL} = y_3 = r_3 = \frac{c_{52} [u_{2,RL} - \dot{m}_{PL,0}]}{-c_{51} r_{\lambda_{BB}} u_{2,RL}} \quad (7.7)$$

Durch Umformen dieser Gleichung nach $r_{\lambda_{\text{BB}}}$ und Einsetzen der Ruhelage von $x_{2,\text{RL}} = \frac{1}{c_{22}} \frac{u_{1,\text{RL}}}{u_{2,\text{RL}}}$ lässt sich die Führungsgröße für das Luftverhältnis im Brennstoffbett explizit ausdrücken:

$$r_{\lambda_{\text{BB}}} = \frac{c_{52}(u_{2,\text{RL}} - \dot{m}_{\text{PL}0})}{-c_{51} \frac{u_{1,\text{RL}}}{c_{22}}} \quad (7.8)$$

Formt man Gleichung (7.8) nach $u_{2,\text{RL}} - \dot{m}_{\text{PL}0}$ um und setzt sie in Gleichung (7.6) ein, so ergibt sich der Primärluftmassenstrom in der Ruhelage in Abhängigkeit vom Luftverhältnis im Brennstoffbett $r_{\lambda_{\text{BB}}}$ und des Massenstromes an trockenem Brennstoff in der Ruhelage $u_{1,\text{RL}}$:

$$\dot{m}_{\text{PL,RL}} = r_{\lambda_{\text{BB}}} (-1) \frac{c_{51} u_{1,\text{RL}}}{c_{52} c_{22}} \quad (7.9)$$

Die gesamte zugeführte Luft in der Ruhelage $u_{3,\text{RL}}$ setzt sich aus eben diesem Primärluftmassenstrom in der Ruhelage $\dot{m}_{\text{PL,RL}}$ sowie dem vom Führungsgrößenformer geforderten Sekundärluftmassenstrom $\dot{m}_{\text{SL,soll}}$ zusammen:

$$u_{3,\text{RL}} = \dot{m}_{\text{PL,RL}} + \dot{m}_{\text{SL,soll}} \quad (7.10)$$

Setzt man Gleichung (7.9) in Gleichung (7.10) ein, so ergibt sich folgende Vorschrift für die Ruhelage der Eingangsgröße u_3 , welche die gesamte zugeführte Luft widerspiegelt:

$$u_{3,\text{RL}} = r_{\lambda_{\text{BB}}} (-1) \frac{c_{51} u_{1,\text{RL}}}{c_{52} c_{22}} + \dot{m}_{\text{SL,soll}} \quad (7.11)$$

Der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases in der Ruhelage $y_{1,\text{RL}}$ berechnet sich durch Einsetzen von $x_{1,\text{RL}} = \frac{d_{1,\text{RL}}}{c_{11}} u_{1,\text{RL}}$ und $x_{2,\text{RL}} = \frac{1}{c_{22}} \frac{u_{1,\text{RL}}}{u_{2,\text{RL}}}$ in die entsprechende Ausgangsgleichung (4.15) wie folgt:

$$y_{1,\text{RL}} = \frac{\frac{c_{51}}{c_{22}} u_{1,\text{RL}} + c_{52} u_{3,\text{RL}}}{\left(\frac{c_{53}}{c_{11}} d_{1,\text{RL}} + \frac{c_{54}}{c_{22}} \right) u_{1,\text{RL}} + c_{55} u_{3,\text{RL}}} \quad (7.12)$$

Setzt man die Gleichung (7.11) in die Gleichung (7.12) ein, ergibt sich folgender Zusammenhang von $y_{1,\text{RL}}$ und $u_{1,\text{RL}}$:

$$y_{1,\text{RL}} = \frac{\frac{c_{51}}{c_{22}} u_{1,\text{RL}} + c_{52} \left(r_{\lambda_{\text{BB}}} (-1) \frac{c_{51} u_{1,\text{RL}}}{c_{52} c_{22}} + \dot{m}_{\text{SL,soll}} \right)}{\left(\frac{c_{53}}{c_{11}} d_{1,\text{RL}} + \frac{c_{54}}{c_{22}} \right) u_{1,\text{RL}} + c_{55} \left(r_{\lambda_{\text{BB}}} (-1) \frac{c_{51} u_{1,\text{RL}}}{c_{52} c_{22}} + \dot{m}_{\text{SL,soll}} \right)} \quad (7.13)$$

Die Störgrößen d und die Konstanten c sind bekannt. $\dot{m}_{\text{SL,soll}}$ und $r_{\lambda_{\text{BB}}}$ werden leistungsabhängig vom Führungsgrößenformer vorgegeben. Es ergeben sich hier somit zwei Unbekannte, der Massenstrom an trockenem Brennstoff in der Ruhelage $u_{1,\text{RL}}$ sowie der

Restsauerstoffgehalt des Rauchgases in der Ruhelage $y_{1,RL}$. $u_{1,RL}$ lässt sich durch Umformen der Ausgangsgleichung der Vorlauftemperatur (4.16)

$$y_{2,RL} = x_{3,RL} = \frac{\left(\frac{c_{31}}{c_{11}}d_{1,RL} + \frac{c_{32}}{c_{22}}\right)u_{1,RL} + c_{33}u_{3,RL}}{c_{34}d_{3,RL}} + d_{4,RL} \quad (7.14)$$

wie folgt berechnen:

$$u_{1,RL} = \frac{(y_{2,RL} - d_{4,RL})c_{34}d_{3,RL} - c_{33}\dot{m}_{SL,soll}}{\left(\frac{c_{31}}{c_{11}}d_{1,RL} + \frac{c_{32}}{c_{22}}\right) - (r_{\lambda_{BB}} \frac{c_{51}c_{33}}{c_{52}c_{22}})} \quad (7.15)$$

Somit kann mit Hilfe von Gleichung (7.13) der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases in der Ruhelage berechnet werden, der schlussendlich als Führungsgröße für den Sauerstoffgehalt verwendet wird:

$$r_1 = \frac{\frac{c_{51}}{c_{22}}u_{1,RL} + c_{52}(r_{\lambda_{BB}}(-1)\frac{c_{51}u_{1,RL}}{c_{52}c_{22}} + \dot{m}_{SL,soll})}{\left(\frac{c_{53}}{c_{11}}d_{1,RL} + \frac{c_{54}}{c_{22}}\right)u_{1,RL} + c_{55}(r_{\lambda_{BB}}(-1)\frac{c_{51}u_{1,RL}}{c_{52}c_{22}} + \dot{m}_{SL,soll})} \quad (7.16)$$

7.1.3 Experimentelle Verifikation

Nachdem der Entwurf des Führungsgrößenformers abgeschlossen war, wurde dieser experimentell verifiziert. Um den Führungsgrößenformer beurteilen zu können, werden die Ergebnisse der bestehenden modellbasierten Regelung gegenübergestellt. In der Folge wird zunächst der zur Verifikation verwendete Brennstoff, sowie das für die Verifikationsversuche herangezogene Lastprofil erläutert. Anschließend daran werden die erzielten Ergebnisse diskutiert.

7.1.3.1 Verwendeter Brennstoff

Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, besitzt die CO- λ -Charakteristik eine Brennstoffabhängigkeit. Im Rahmen der Verifikation wurde der Führungsgrößenformer mit zwei unterschiedlichen Brennstoffen getestet. Zuerst wurde jenes Lärchenhackgut verwendet, welches bereits zur Vermessung der CO- λ -Charakteristik verwendet wurde (siehe Abschnitt 6.1). Um nun die Wirkung des Führungsgrößenformers bei einem anderen Brennstoff zu untersuchen, wurde zusätzlich noch ein Waldhackgut verwendet, welches eine große Menge an Rinde, Staub, Erde, Tannennadeln und Tannenzapfen enthielt. Darüber hinaus konnte auch die genaue Zusammensetzung der Holzsorten nicht entziffert werden. Der Wassergehalt des Hackgutes betrug 23 Gew.% FS.

7.1.3.2 Gewähltes Lastprofil für die Verifikationsversuche

Als Grundlage für die Verifikationsversuche wurde ein Lastprofil zur Bestimmung eines Jahresnutzungsgrades einer Biomasse-Kleinfeuerungsanlage [10] herangezogen. Um den Führungsgrößenformer auch in stationären Zuständen beurteilen zu können, wurde das

in [10] definierte Lastprofil leicht abgeändert. Schlussendlich wurde das in Abbildung 7.5 dargestellte Lastprofil zur Verifikation des Führungsgrößenformers verwendet. Dabei wird

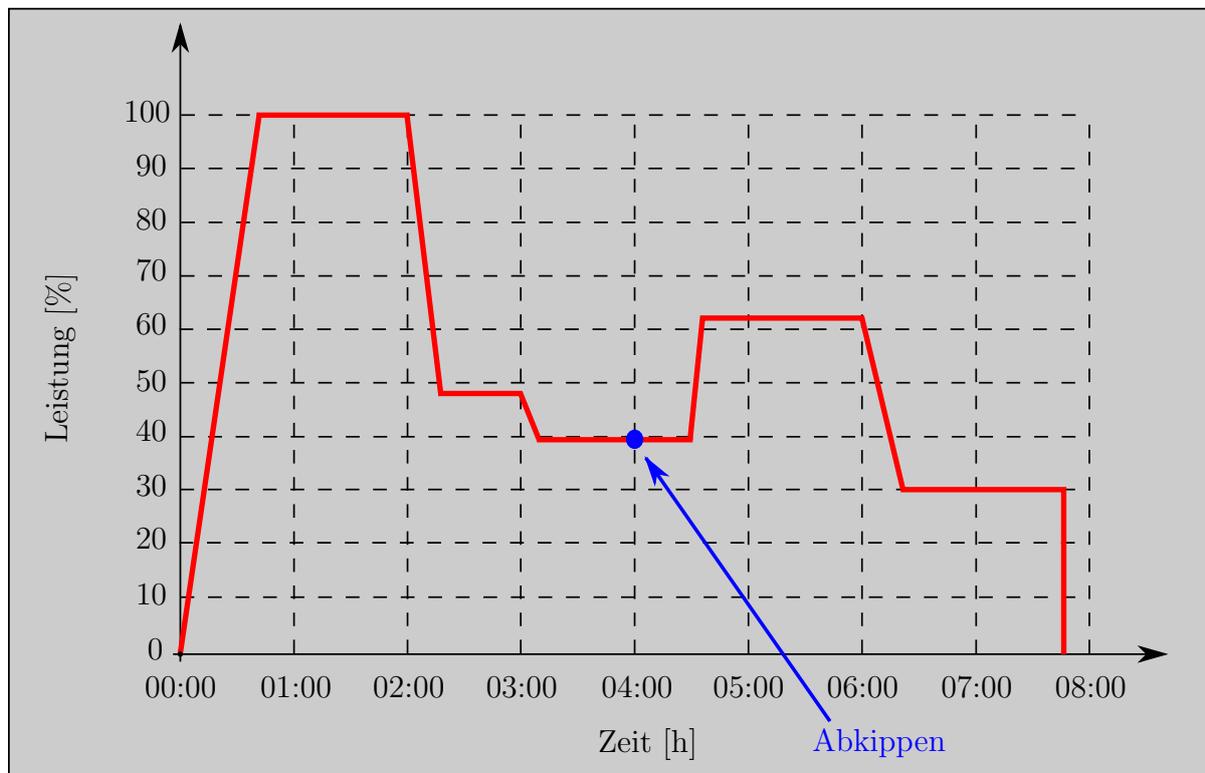


Abbildung 7.5: Lastprofil für die experimentelle Verifikation des FGF

die Anlage zu Beginn für eine Stunde mit Vollast (100 % der Gesamtleistung) aufgeheizt. Danach wird eine Stunde lang stationär bei Vollast gemessen. Im Anschluss wird die Leistung stufenweise reduziert. Zuerst auf 48 % der Gesamtleistung und kurz darauf auf 39 % der Gesamtleistung. Nach vier Stunden wird die Asche vom Rost abgekippt, wozu die Brennstoffzufuhr kurz angehalten wird. Nach kurzer Einschwingzeit bei 39 % der Gesamtleistung wird die Leistung auf 63 % der Gesamtleistung erhöht. Zu Beginn der fünften Stunde wird eine Stunde lang stationär bei mittlerer Last gemessen. Im Anschluss daran wird die Leistung noch einmal auf 30 % der Gesamtleistung reduziert. Denn Abschluss des Lastprofils bildet die stationäre Messung bei Teillast (30 % der Gesamtleistung) zwischen Stunde 06:45 bis 07:45. Der gesamte Messzyklus dauert nicht ganz acht Stunden und kann somit an einem Arbeitstag durchlaufen werden.

7.1.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Zur Beurteilung des Führungsgrößenformers werden die Ergebnisse, welche *MIT* Hilfe des Führungsgrößenformers erzielt werden konnten, mit den Ergebnissen, welche mit Hilfe der modellbasierten Regelung *OHNE* Führungsgrößenformer erzielt wurden, verglichen. Die

modellbasierte Regelung wurde bei diesen Versuchen *OHNE* Führungsgrößenformer mit folgenden Führungsgrößen betrieben:

$$\begin{aligned} r_1 &= x_{\text{O}_2,\text{RG}} = 0,08 \\ r_2 &= T_{\text{VL}} = 66 \text{ }^\circ\text{C} \\ r_{\lambda_{\text{BB}}} &= \lambda_{\text{BB}} = 0,5 \end{aligned}$$

Die Führungsgröße $r_2 = T_{\text{VL}}$ wurde auch bei den Versuchen *MIT* Führungsgrößenformer mit $66 \text{ }^\circ\text{C}$ gewählt. Die Leistung wurde durch Variation der Rücklauftemperatur verändert. Die Erkenntnisse aus den Verifikationsversuchen werden in weiterer Folge in diesem Abschnitt aufgeführt und diskutiert. Um den Wirkungsgrad η bestimmen zu können, wurden anhand der Messergebnisse aus Kapitel 6 zuerst die anlagenspezifischen Umgebungsverluste bestimmt. Diese ergeben sich aus der Differenz der mit dem Brennstoff zugeführten und der mit dem Rauchgas ausgestoßenen sowie der auf den Wasserkreis übertragenen Energie. In die Berechnung der zugeführten Energie fließt der gemessene Brennstoffmassenstrom sowie die Umgebungstemperatur ein. Für die Ermittlung der anlagenspezifischen Umgebungsverluste wurden die Messdaten im Teillastbereich herangezogen, da in diesem Leistungsbereich die Umgebungsverluste dominant und somit genauer zu bestimmen sind. Aufgrund der ähnlichen Oberflächentemperatur der Anlage im Teil- bzw. Volllastbetrieb können die ermittelten Umgebungsverluste in allen Leistungsbereichen als konstant angenommen werden. Somit wurden die Wirkungsgrade für alle Messpunkte anhand der Rauchgasaustrittstemperatur, dem Sauerstoffgehalt des Rauchgases und den approximierten Umgebungsverlusten ermittelt. Da die erhaltenen Wirkungsgrade leichten Schwankungen aufgrund der leicht schwankenden Brennstoffeigenschaften unterliegen, die eine Bewertung des Führungsgrößenformers bezüglich des Wirkungsgrades erschweren würden, wurde für die Berechnung der jeweiligen Wirkungsgrade das folgende einfache Modell verwendet:

$$\eta_{\text{Modell}} = \left(K_k \cdot \dot{Q} + d_k \right) \cdot x_{\text{O}_2,\text{RG}} + \left(K_d \cdot \dot{Q} + d_d \right) \quad (7.17)$$

Dabei geben K_k , d_k , K_d und d_d konstante Modellparameter an, welche mit Hilfe numerischer Optimierungsverfahren anhand eines quadratischen Gütekriteriums bestimmt wurden.

Es werden im Anschluss die Ergebnisse, welche sich aus den Versuchen bei Teillast und Volllast ergeben haben, näher erläutert. Als Erstes werden die Ergebnisse der Versuche bei Teillast erläutert. Tabelle 7.1 und 7.2 zeigen die über eine Stunde gemittelten Messwerte bei stationärem Teillastbetrieb für den übertragenen Wärmestrom \dot{Q} , das Luftverhältnis im Brennstoffbett λ_{BB} , den tatsächlichen Restsauerstoffgehalt des Rauchgases $x_{\text{O}_2,\text{RG,tat}}$, den vom integrierten Sauerstoffsensor der Biomassefeuerungsanlage gemessenen Restsauerstoffgehalt des Rauchgases $x_{\text{O}_2,\text{RG,ref}}$ (dieser Wert wird als Referenzwert für die Regelung herangezogen), den Sekundärluftmassenstrom \dot{m}_{SL} , den Kohlenmonoxidgehalt des Rauchgases $x_{\text{CO,RG}}$, sowie den Wirkungsgrad, jeweils für die beiden unterschiedlichen Brennstoffe, einmal *MIT* angewendetem Führungsgrößenformer (Tabelle 7.1) und einmal mit der modellbasierten Regelung *OHNE* Führungsgrößenformer (Tabelle 7.2).

Dabei zeigte sich, dass die CO-Emissionen unter der Verwendung des Führungsgrößen-

	\dot{Q} [kW]	λ_{BB} [.]	$x_{O_2, RG, tat}$ [.]	$x_{O_2, RG, ref}$ [.]	\dot{m}_{SL} [$\frac{kg}{h}$]	$x_{CO, RG}$ [$\frac{mg}{Nm^3}$]	η [.]
Waldhackgut	9,61	0,72	0,0934	0,1016	15,08	444,66	0,8386
Lärchenhackgut	9,52	0,75	0,0930	0,1004	14,78	457,27	0,8388

Tabelle 7.1: Messwerte *MIT* Führungsgrößenformer bei stationärem Teillastbetrieb

	\dot{Q} [kW]	λ_{BB} [.]	$x_{O_2, RG, tat}$ [.]	$x_{O_2, RG, ref}$ [.]	\dot{m}_{SL} [$\frac{kg}{h}$]	$x_{CO, RG}$ [$\frac{mg}{Nm^3}$]	η [.]
Waldhackgut	9,93	0,51	0,0695	0,0800	13,72	644,61	0,8526
Lärchenhackgut	10,15	0,54	0,0724	0,0809	14,58	576,08	0,8512

Tabelle 7.2: Messwerte *OHNE* Führungsgrößenformer bei stationärem Teillastbetrieb

formers bei Teillast mit beiden Brennstoffen geringer sind, als mit der modellbasierten Regelung ohne Führungsgrößenformer. Dennoch hat sich hier ein Problem aufgetan. In Kapitel 6 wurde gezeigt, dass bei Teillast ein Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,9$ optimal im Sinne niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad ist. Wenn man sich nun die Messwerte für das Luftverhältnis im Brennstoffbett in der Tabelle 7.1 ansieht, so stellt man fest, dass der tatsächliche Wert stark vom geforderten Wert abweicht. Die Ursache hierfür ist, dass die Regelung es nicht schafft bei diesem Luftverhältnis im Brennstoffbett den Betriebspunkt stabil zu halten. Es wäre hier eine Anpassung der Regelungsparameter notwendig (siehe Abschnitt 4.3.2). Da dieser Eingriff in die Regelung nicht in die eigentliche Aufgabenstellung dieser Arbeit fällt, wird auf dieses Thema nicht näher eingegangen. Es soll jedoch vermerkt werden, dass das volle Potential des Führungsgrößenformers erst durch eine geeignete Anpassung der Regelung ausgeschöpft werden kann. Es ist nämlich zu erwarten, dass die CO-Emissionen bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{BB} = 0,9$ noch niedriger wären.

Des Weiteren ist zu erwähnen, dass zwar die CO-Emissionen mit dem Führungsgrößenformer verringert werden konnten, jedoch dafür ein schlechterer Wirkungsgrad in Kauf genommen werden musste. Das ist leider nicht anders möglich wie man anhand der typischen CO- λ -Charakteristik aus Abschnitt 2.2 weiß. Das Ziel dieser Arbeit ist es jedoch minimale CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad zu erzielen und das konnte hier bei Teillast erzielt werden.

Man kann außerdem anhand der Messwerte erkennen, dass im Teillastbereich der unterschiedliche Brennstoff keine große Auswirkung auf die CO-Emissionen hat.

Bei Mittellast wurden *MIT* Führungsgrößenformer und *OHNE* Führungsgrößenformer ähnliche Ergebnisse erzielt. Aus diesem Grund wird hier nicht näher auf die Ergebnisse bei Mittellast eingegangen.

Leider zeigte sich beim stationären Vollastbetrieb, dass der Führungsgrößenformer nicht das gewünschte Ergebnis liefern konnte. Tabelle 7.3 und 7.4 zeigen die über eine Stunde

gemittelten Messwerte bei stationärem Vollastbetrieb für den übertragenen Wärmestrom \dot{Q} , das Luftverhältnis im Brennstoffbett λ_{BB} , den tatsächlichen Restsauerstoffgehalt des Rauchgases $x_{\text{O}_2, \text{RG}, \text{tat}}$, den vom integrierten Sauerstoffsensoren der Biomassefeuerungsanlage gemessenen Restsauerstoffgehalt des Rauchgases $x_{\text{O}_2, \text{RG}, \text{ref}}$ (dieser Wert wird als Referenzwert für die Regelung herangezogen), den Sekundärluftmassenstrom \dot{m}_{SL} , den Kohlenmonoxidgehalt des Rauchgases $x_{\text{CO}, \text{RG}}$, sowie den Wirkungsgrad, jeweils für die beiden unterschiedlichen Brennstoffe, einmal *MIT* angewendetem Führungsgrößenformer (Tabelle 7.3) und einmal mit der modellbasierten Regelung *OHNE* Führungsgrößenformer (Tabelle 7.4). Man kann anhand der Tabellen 7.3 und 7.4 erkennen, dass der Führungs-

	\dot{Q} [kW]	λ_{BB} [.]	$x_{\text{O}_2, \text{RG}, \text{tat}}$ [.]	$x_{\text{O}_2, \text{RG}, \text{ref}}$ [.]	\dot{m}_{SL} [$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$]	$x_{\text{CO}, \text{RG}}$ [$\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$]	η [.]
Waldhackgut	27,81	0,43	0,0497	0,0650	32,97	769,85	0,8859
Lärchenhackgut	27,90	0,42	0,0529	0,0649	35,26	69,07	0,8834

Tabelle 7.3: Messwerte *MIT* Führungsgrößenformer bei stationärem Vollastbetrieb

	\dot{Q} [kW]	λ_{BB} [.]	$x_{\text{O}_2, \text{RG}, \text{tat}}$ [.]	$x_{\text{O}_2, \text{RG}, \text{ref}}$ [.]	\dot{m}_{SL} [$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$]	$x_{\text{CO}, \text{RG}}$ [$\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$]	η [.]
Waldhackgut	28,00	0,45	0,0672	0,0801	40,42	189,50	0,8719
Lärchenhackgut	27,62	0,44	0,0694	0,0800	42,07	24,90	0,8698

Tabelle 7.4: Messwerte *OHNE* Führungsgrößenformer bei stationärem Vollastbetrieb

größenformer in Hinsicht auf niedrige CO-Emissionen bei Vollast keine Verbesserung gebracht hat. Um die Ursache für dieses Problem zu finden, muss man sich die Erkenntnisse aus Kapitel 6 zurück ins Gedächtnis rufen. Hier wurde festgestellt, dass bei Vollast ein Sekundärluftmassenstrom von 40 kg/h optimal im Sinne niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad ist. Wenn man sich die Messwerte aus den beiden Tabellen näher ansieht, stellt man fest, dass der Sekundärluftmassenstrom bei den Messungen mit Führungsgrößenformer nicht dem zuvor ermittelten optimalen Wert entspricht. Dieses Verhalten kann man auf den in der Praxis unbekanntem und folglich nicht berücksichtigten Offsetfehler des integrierten Sauerstoffsensors zurück führen, der als Referenzmesswert für die Regelung herangezogen wird. Da dieser integrierte Sauerstoffsensoren, wie bei den Messwerten zu sehen ist, zu hohe Werte misst, befindet sich der Arbeitspunkt auf der CO- λ -Charakteristik tatsächlich zu weit links und es ergeben sich somit höhere CO-Emissionen. Auch bei den Messungen im Teillastbereich wurde dieser Offsetfehler des Sauerstoffsensors bemerkt, jedoch ergab sich dadurch keine große Abweichung des geforderten Sekundärluftmassenstromes, weshalb bei Teillast nicht näher auf diese Problem eingegangen wurde.

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Regelung es nicht schafft den Sauerstoffgehalt genauer als ± 1 Vol.% zu regeln. Die daraus resultierenden Ausreißer nach unten führen ebenfalls zu erhöhten CO-Emissionen. Um diese Probleme gesichert zu vermeiden, müsste der Führungsgrößenformer einen Sicherheitsfaktor berücksichtigen, welcher den maximal

möglichen Offsetfehler des Sauerstoffsensors, sowie die Schwankung des geregelten Sauerstoffgehaltes ausgleicht. Die damit verbundene Erhöhung des Sauerstoffgehaltes würde aber unmittelbar mit Wirkungsgradverlusten einhergehen.

Im Gegensatz zu den Messergebnissen der Versuche bei Teillast hat sich bei Volllast gezeigt, dass sich die CO-Emissionen bei unterschiedlichen Brennstoffen stark unterscheiden. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass sich die CO- λ -Charakteristik bei der Verwendung von Waldhackgut, welches Rinde, Erde und weitere Verunreinigungen enthält, im Gegensatz zum sortenreinen Lärchenhackgut ähnlich wie bei den Versuchen mit steigendem Wassergehalt des Brennstoffes verändert. Hier ergab sich, dass die CO-Emissionen links und rechts vom optimalen Betriebspunkt stärker angestiegen sind. Daraus resultieren bereits deutlich höhere CO-Emissionen bei kleinen Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt. Somit könnte eine leichte Verschiebung der Kennlinie nach rechts, die sich noch in Abschnitt 7.2.2 bestätigen wird, bereits zu der starken Erhöhung der CO-Emissionen führen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass für eine deutliche Reduktion der CO-Emissionen zumindest deren qualitative Ermittlung unumgänglich ist. Dieser Messwert kann anschließend in einem Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums zum Einsatz kommen.

7.2 Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums

Wie bereits in Abschnitt 7.1 diskutiert, ist es aufgrund der Brennstoffabhängigkeit der CO- λ -Charakteristik, sowie des in der Praxis nicht bekannten Offsetfehlers des Sauerstoffsensors erforderlich das CO-Minimum zu suchen. Dies soll durch eine Variation der Führungsgröße in Abhängigkeit der Veränderung der detektieren CO-Emissionen im laufenden Betrieb erfolgen. Im folgenden Abschnitt wurde ein Vorschlag zur Umsetzung dieser Strategie sowie die erzielten Ergebnisse bei dessen experimenteller Verifikation diskutiert.

7.2.1 Methodik

Grundlage für einen Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums ist eine Möglichkeit zur Messung des Kohlenmonoxidgehaltes des Rauchgases. In Kapitel 5 wurde auf diese Thematik näher eingegangen und daraus resultierte, dass es derzeit grundsätzlich möglich ist, eine geeignete CO-Messung bei Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen wirtschaftlich durchzuführen.

Da diese erste Grundvoraussetzung erfüllt ist, können die Überlegungen weiter geführt werden. Aus Voruntersuchungen hatte sich gezeigt, dass der CO-Messwert stark schwankt und man aus diesem Grund vergleichsweise lange Zeiträume zur Bewertung der CO-Emissionen heranziehen muss. Der Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums verwendet somit den gleitenden Mittelwert der CO-Emissionen, wobei zur weiteren Vereinfachung auch ein einfaches IIR-Filter (siehe Abschnitt 7.1) verwendet werden könnte.

Der Algorithmus ist so aufgebaut, dass die Führungsgröße $r_1 = x_{O_2, RG}$, für den Restsauer-

stoffgehalt des Rauchgases alle 600 Sekunden variiert wird. Eine kürzere Zykluszeit wäre aufgrund der starken Schwankungen des CO-Messwertes nicht sinnvoll, da der gemittelte Messwert nicht repräsentativ wäre. Eine längere Zykluszeit ist nicht sinnvoll, da sich die Betriebsbedingungen ändern können und der Algorithmus schnell darauf reagieren sollte um hohe CO-Emissionen zu verhindern und außerdem soll der Algorithmus auch im stationären Betrieb den Arbeitspunkt mit den geringsten CO-Emissionen möglichst schnell finden. Die gewählte Zykluszeit ist somit ein Kompromiss aus repräsentativem CO-Mittelwert und Schnelligkeit. Der gleitende Mittelwert des CO-Messsignals wird über die letzten 570 Sekunden gebildet, um ausschließlich die Auswirkungen der Veränderung der Führungsgröße auf den CO-Messwert zu ermitteln. Somit hat die Regelung 30 Sekunden Zeit um auf die Veränderung der Führungsgröße geeignet zu reagieren.

Im Detail wird mit einer Periodendauer von 600 Sekunden der, mit dem gleitenden Mittelwertfilter geglättete, CO-Messwert ermittelt und mit dem abgespeicherten gemittelten CO-Messwert des vorangegangenen Iterationsschrittes verglichen. In Abhängigkeit des Ergebnisses dieses Vergleiches wird entschieden, ob die Führungsgröße r_1 im nächsten Schritt vergrößert oder verringert wird. Dabei müssen die folgenden vier verschiedenen Fälle unterschieden werden:

- **Fall 1:** Haben die CO-Emissionen in der letzten Periode zugenommen und wurde die Führungsgröße r_1 im letzten Schritt vergrößert, so wird die Führungsgröße im nächsten Schritt verringert.
- **Fall 2:** Haben die CO-Emissionen in der letzten Periode abgenommen oder sind diese gleich geblieben und wurde die Führungsgröße r_1 im letzten Schritt vergrößert, so wird die Führungsgröße im nächsten Schritt nochmals vergrößert.
- **Fall 3:** Haben die CO-Emissionen in der letzten Periode zugenommen und wurde die Führungsgröße r_1 im letzten Schritt verringert, so wird die Führungsgröße im nächsten Schritt vergrößert.
- **Fall 4:** Haben die CO-Emissionen in der letzten Periode abgenommen oder sind diese gleich geblieben und wurde die Führungsgröße r_1 im letzten Schritt verringert, so wird die Führungsgröße im nächsten Schritt nochmals verringert.

Nach zahlreichen Versuchen, hat sich herausgestellt, dass es sinnvoll ist, die Führungsgröße pro Periode um 5 % der vom Führungsgrößenformers vorgegebenen Führungsgröße r_1 zu verändern. Das bedeutet, dass im Teillastbetrieb größere Schrittweiten vorhanden sind als im Volllastbetrieb, da die Führungsgröße r_1 bei Teillast größer ist. Die kleineren Schrittweiten bei Volllast sind sinnvoll, da es bei Volllast sehr schnell zu einem akuten Sauerstoffmangel kommen kann, da man die Feuerungsanlage bei Volllast generell bei einem niedrigeren Restsauerstoffgehalt des Rauchgases betreibt. Weiters hat sich herausgestellt, dass die Anzahl der Schritte mit der die Führungsgröße beeinflusst werden kann, zu begrenzen ist, damit sich der Suchalgorithmus nicht zu weit vom zuvor mit Hilfe des Führungsgrößenformers eingestellten Betriebspunkt entfernt. Somit ist sichergestellt, dass die Anlage in keinen kritischen Zustand kommen kann. Unter anderem ist es sinnvoll die Führungsgröße bei Volllast nach unten hin stärker zu beschränken als nach oben hin, da

es, wie zuvor beschrieben, bei Volllast nach unten sehr schnell zu einem Sauerstoffmangel kommen kann. Bei Teillast hat sich eine symmetrische Beschränkung als beste Lösung erwiesen. Aufgrund der kleineren Schrittweiten bei Volllast muss die obere Schranke größer gewählt werden als im Vergleich zur Teillast, damit der Algorithmus genügend Spielraum nach oben hin besitzt. Bei den Verifikationsversuchen wurden die Schranken, wie in Tabelle 7.5 aufgeführt, festgelegt. Für die spätere Anwendung des Algorithmus bei Leistungen zwischen Volllast und Teillast könnte im ersten Schritt eine lineare Interpolation der Schranken inklusive Rundung verwendet werden.

	Schranke oben	Schranke unten
Volllast	5 Stufen	-3 Stufen
Teillast	3 Stufen	-3 Stufen

Tabelle 7.5: Schranken für die Variation der Führungsgrößen durch den Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums

Nach der Implementation des Algorithmus wurde dieser experimentell verifiziert. Dazu wurden zwei Leistungsbereiche untersucht und zwar Volllast und Teillast. Die Biomassefeuerungsanlage wurde jeweils stationär betrieben und der Algorithmus wurde einmal von der oberen und einmal von der unteren Schranke aus gestartet. Als Brennstoff wurde ein Waldhackgut, welches Staub, Erde und Tannennadeln enthielt, verwendet. Der Wassergehalt des Brennstoffes betrug 23 Gew.% FS.

7.2.2 Ergebnisse und Diskussion

In der Folge wird zunächst das Verhalten des Algorithmus bei Volllast betrachtet. Da der integrierte Sauerstoffsensoren der Biomassefeuerungsanlage einen Offsetfehler aufweist (siehe Abschnitt 7.1.3.3), wird die Führungsgröße r_1 für den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases um den Offsetfehler korrigiert. In diesem Fall dient diese Maßnahme zur Untersuchung, ob sich die CO- λ -Charakteristik bei diesem Brennstoff im Gegensatz zum Lärchenhackgut aus Kapitel 6 verschoben hat. Im ersten betrachteten Versuch wird der Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums bei der oberen Schranke gestartet. Gemäß Tabelle 7.5 liegt der Startpunkt für das Suchen somit fünf Stufen (d.h. 2,5 %) über der vom Führungsgrößenformer vorgegebenen Führungsgröße r_1 . Abbildung 7.6 zeigt die Ergebnisse, welche mit Hilfe des Algorithmus erzielt werden konnten. Betrachten wir das erste Diagramm der Abbildung 7.6 näher. Es zeigt in Blau den Kohlenmonoxidgehalt des Rauchgases und in Grün den gleitenden Mittelwert des Kohlenmonoxidgehaltes. Dieser wurde über eine Periode von 570 Sekunden berechnet und als konstanter Wert für diese Periode eingezeichnet. Die roten Punkte geben an, zu welchem Zeitpunkt die gemittelten CO-Messwerte mit den Wert des vorherigen Iterationsschrittes verglichen wurden.

Das zweite Diagramm der Abbildung 7.6 zeigt in Blau den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases und in Grün dessen Führungsgröße r_1 . Die roten Punkte kennzeichnen hier den Zeitpunkt, an dem es zu einer Anpassung der Führungsgröße gekommen ist. Da die Führungsgröße vom Führungsgrößenformer und somit von der Leistung abhängt, wird

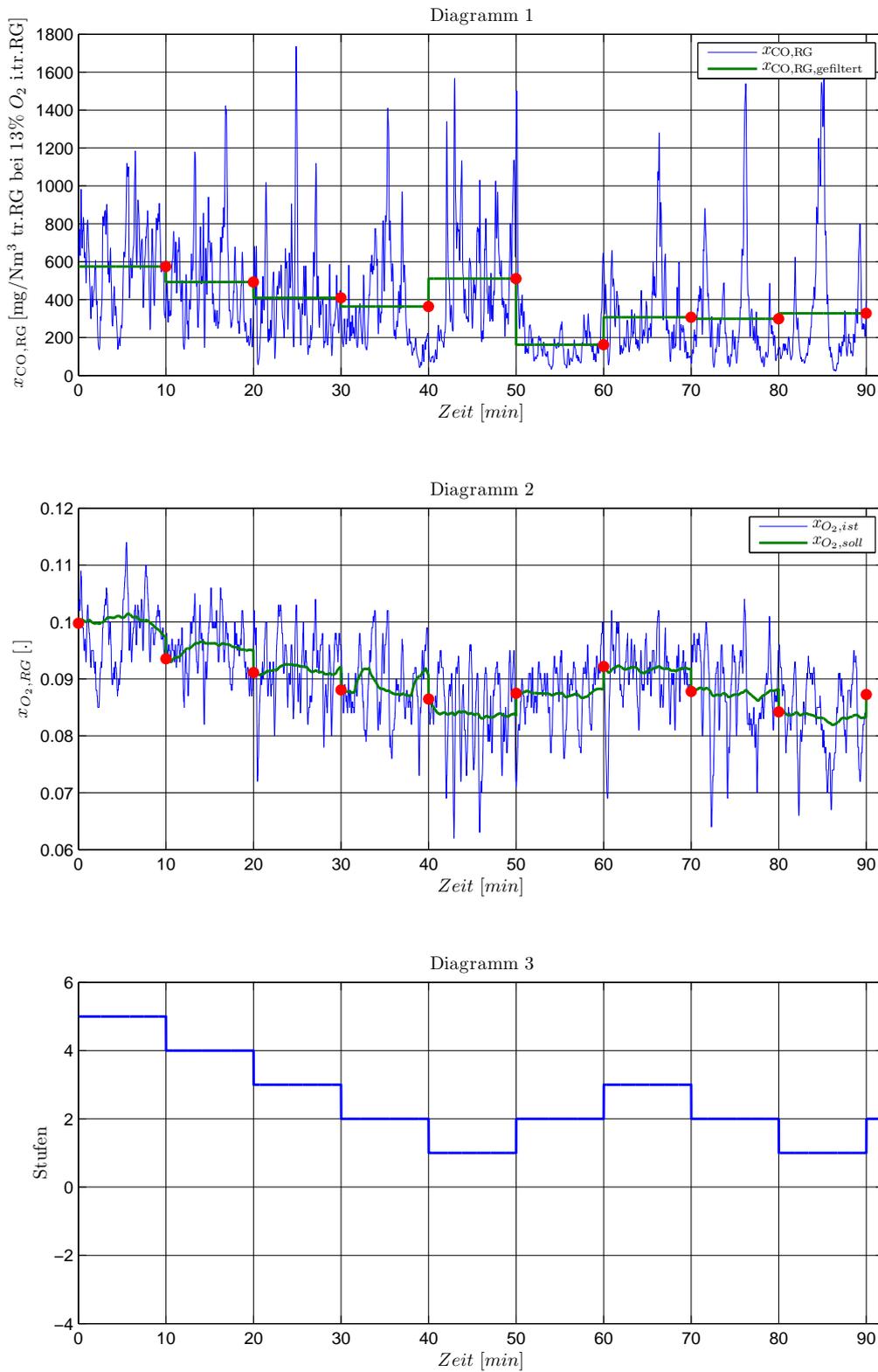


Abbildung 7.6: Ergebnis des Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums beim Start von der oberen Schranke bei stationärem Vollastbetrieb

diese ständig angepasst.

Das dritte und letzte Diagramm der Abbildung 7.6 zeigt die Ausgabe des Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums. Die Kurve gibt an, um wie viel Stufen die Führungsgröße r_1 vergrößert bzw. verringert wird. Eine Stufe verändert die Führungsgröße r_1 , wie zuvor bereits erwähnt, um 5 % der vom Führungsgrößenformers vorgegebenen Führungsgröße r_1 .

Zum besseren Verständnis wird in der Folge die Funktionsweise des Algorithmus kurz anhand der Ergebnisse aus Abbildung 7.6 beschrieben. Gestartet wird mit einer Abweichung von fünf Stufen in positiver Richtung, wie aus Diagramm 3 von Abbildung 7.6 hervorgeht. Der erste rote Punkt in Diagramm 2 von Abbildung 7.6 kennzeichnet den Startpunkt der Führungsgröße r_1 . Dabei handelt es sich um die vom Führungsgrößenformer vorgegebene Führungsgröße r_1 erhöht um fünf Stufen, wobei eine Stufe 5 % der vom Führungsgrößenformers vorgegebenen Führungsgröße ausmacht. Der erste rote Punkt in Diagramm 1 von Abbildung 7.6 zeigt den gemittelten CO-Messwert über diese Periode. Dieser Wert wird für den späteren Vergleich abgespeichert. Da am Anfang noch kein weiterer gemittelter CO-Messwert für den Vergleich vorliegt wird die Führungsgröße um eine Stufe verringert². In Diagramm 3 verringert sich die Stufenanzahl entsprechend von Fünf auf Vier, woraus folglich eine Reduktion der Führungsgröße für den Sauerstoffgehalt resultiert (siehe zweiter roter Punkt in Diagramm 2 von Abbildung 7.6). Nach 10 Minuten steht der nächste gemittelte CO-Messwert als Vergleichswert zu Verfügung. Es wird nun der erste rote Punkt aus Diagramm 1 mit dem zweiten roten Punkt verglichen. Da der zweite gemittelte CO-Messwert kleiner ist als der erste und die Führungsgröße im vorigen Schritt verringert wurde, wird die Führungsgröße weiter verringert. Es tritt hier der Fall 4 aus der in Abschnitt 7.2.1 erläuterten Strategie ein. Dies führt zu einer weiteren Reduktion der Stufenanzahl von Vier auf Drei (siehe Diagramm 3 der Abbildung 7.6). In diese Richtung geht es nun solange bis nach 40 Minuten der vierte gemittelte CO-Messwert geringer ist als der fünfte. Da zuvor die Führungsgröße verringert wurde, wird sie nun um eine Stufe erhöht. Es tritt hier der Fall 3 aus der in Abschnitt 7.2.1 erläuterten Strategie ein. Dies bewirkt eine Erhöhung der Stufenanzahl von Eins auf Zwei (siehe Diagramm 3 der Abbildung 7.6).

In diesem Fall liegt das CO-Minimum bei der Stufe Zwei. Da der Algorithmus ständig arbeitet kann er jedoch nicht bei der Stufe Zwei stehen bleiben, sondern pendelt im Idealfall mit \pm einer Stufe um diesen gefundenen optimalen Arbeitspunkt.

Anhand dieses Ergebnisses ergibt sich noch eine andere Erkenntnis. Da die Führungsgröße um den Offsetfehler des Sauerstoffsensors korrigiert wurde, hätte das CO-Minimum bei der Stufe Null gefunden werden müssen, vorausgesetzt die CO- λ -Charakteristik hat sich, aufgrund des unterschiedlichen Brennstoffes gegenüber der Vermessung der CO- λ -Charakteristik aus Kapitel 6, nicht verschoben. Jedoch wurde hier das CO-Minimum bei der Stufe Zwei gefunden, was somit zeigt, dass sich die CO- λ -Charakteristik bei diesem Brennstoff nach rechts verschoben hat. Aufgrund dieser Tatsache kann man sagen, dass für einen Betrieb einer Biomassefeuerungsanlage mit niedrigen CO-Emissionen bei

²Grundsätzlich könnte die Führungsgröße auch vergrößert werden. Es handelt sich dabei um reine Definitionssache.

bestmöglichem Wirkungsgrad der Führungsgrößenformer allein nicht ausreicht, sondern immer in Verbindung mit dem Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums angewendet werden sollte.

Im nächsten betrachteten Versuch wurde der Algorithmus von der unteren Schranke aus bei Volllast gestartet. Wie in Tabelle 7.5 beschrieben gilt für Volllast eine maximale untere Schranke von -3 Stufen. Abbildung 7.7 zeigt die Ergebnisse dieses Versuches. Da nach dem Start des Algorithmus noch kein gemittelter CO-Messwert zum Vergleich zur Verfügung steht, würde der Algorithmus mit einer Verringerung der Führungsgröße r_1 starten. Dies ist hier jedoch nicht möglich, da sich der Algorithmus bereits an der unteren Schranke befindet. Er bleibt also bis zur nächsten Periode bei dieser Schranke stehen. Daraus ergibt sich die Tatsache, dass der Algorithmus beim Start zweimal hintereinander auf der Stufe -3 stehen bleibt. Der Algorithmus arbeitet wieder mit demselben Prinzip wie zuvor beschrieben. Es konnte auch hier die Stufe Zwei als Betriebspunkt mit minimalen CO-Emissionen gefunden werden. Somit hat der Algorithmus von der oberen und unteren Schranke auf kürzestem Weg denselben Betriebspunkt als Arbeitspunkt mit minimalen CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad finden können.

Im Anschluss daran wurde das Verhalten des Algorithmus zum Auffinden des CO-Minimums bei Teillast untersucht. Abbildung 7.8 zeigt die Ergebnisse beim Start des Algorithmus von der oberen Schranke. Die Führungsgröße r_1 startet, wie anhand der Tabelle 7.5 vorgegeben, bei Stufe Drei. Auffallend hierbei ist, gegenüber dem Verlauf der Führungsgröße r_1 bei den Versuchen bei Volllast (siehe Abbildungen 7.6 und 7.7), dass hier bei Teillast keine Schwankungen der Führungsgröße r_1 vorhanden sind. Dieses Verhalten ergibt sich, da bei Teillast die Lastanforderung so gering ist, dass die untere Beschränkung des Führungsgrößenformers erreicht wurde. Wenn man die Ergebnisse betrachtet stellt man fest, dass auch bei Teillast der optimale Betriebspunkt hinsichtlich minimaler CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad bei der Stufe Zwei gefunden werden konnte. Zu guter Letzt wird auch bei Teillast der Algorithmus von der unteren Schranke aus gestartet. Abbildung 7.9 zeigt die Ergebnisse für diesen Versuch. Man erkennt, dass sich auch hier der Algorithmus auf kürzestem Wege dem Betriebspunkt mit den niedrigsten CO-Emissionen nähert und dieser befindet sich in diesem Fall auf Stufe Zwei oder Drei. Bei näherer Betrachtung von Diagramm 1 der Abbildung 7.9 stellt man fest, dass zwischen Minute 50 und 70 die Stufen Zwei und Drei beinahe die gleichen CO-Emissionen haben. Erst zwischen Minute 70 und 80 zeigt sich, dass die CO-Emissionen bei Stufe Drei steigen. Die Ursache hierfür ist, dass die Regelung es nicht schafft bei diesem Luftverhältnis im Brennstoffbett den Betriebspunkt stabil zu halten (siehe Abschnitt 7.1.3.3). Man kann also sagen, dass auch hier der optimale Betriebspunkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen bei der Stufe Zwei gefunden wurde.

Es hat sich also gezeigt, dass der Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums bei Volllast- und Teillastbetrieb von der oberen und unteren Schranke aus jeweils zum gleichen optimalen Betriebspunkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen gefunden hat. Das beweist, dass ein Einsatz dieses Algorithmus bei Biomassefeuerungsanlagen durchaus sinnvoll ist und eventuell vorhandene Offsetfehler des Sauerstoffsensors, sowie etwaige andere Störeinflüsse korrigiert werden können. Dieser Algorithmus ermöglicht es die Biomassefeuerungsanlage

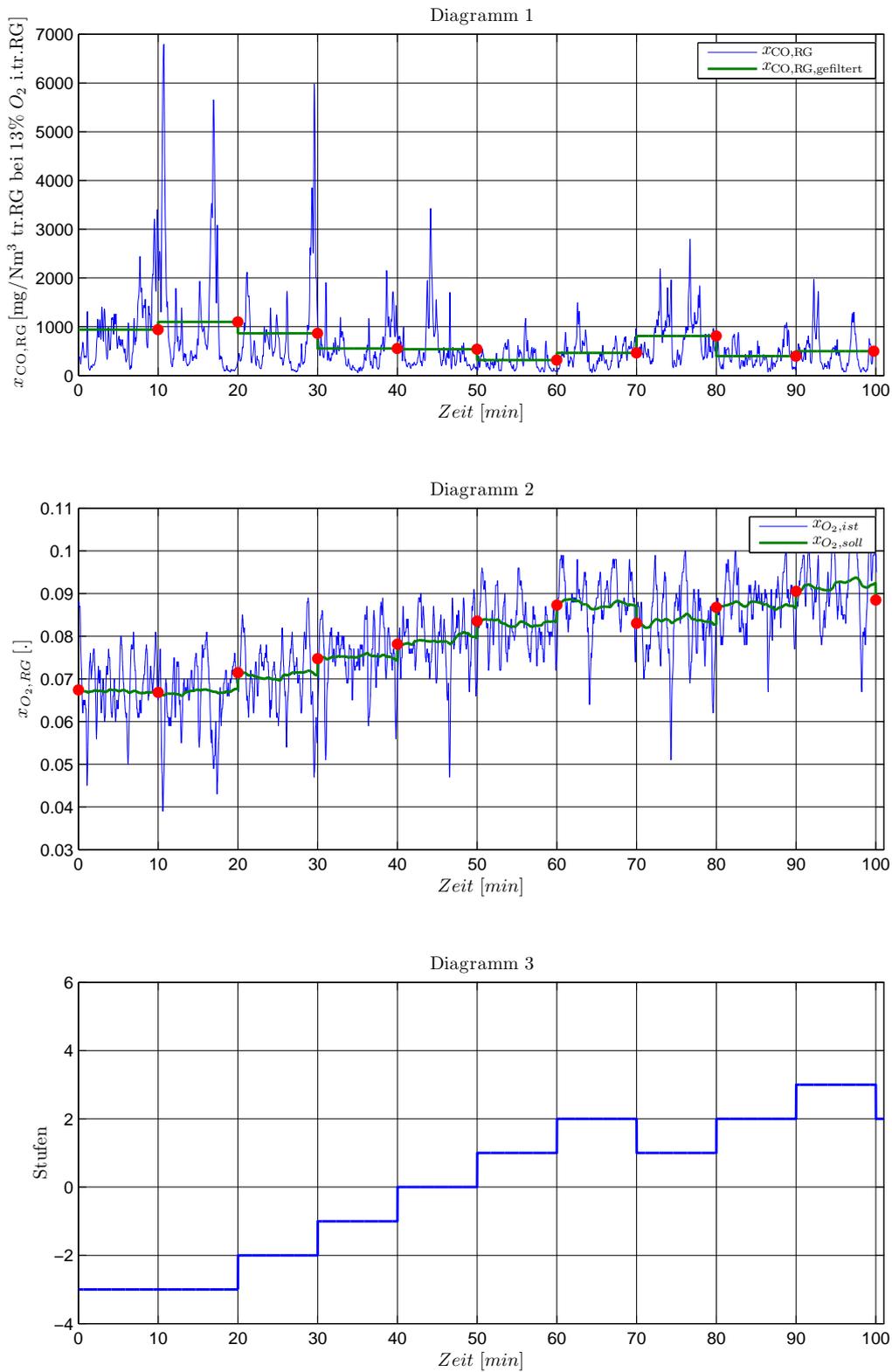


Abbildung 7.7: Ergebnis des Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums beim Start von der unteren Schranke bei stationärem Vollastbetrieb

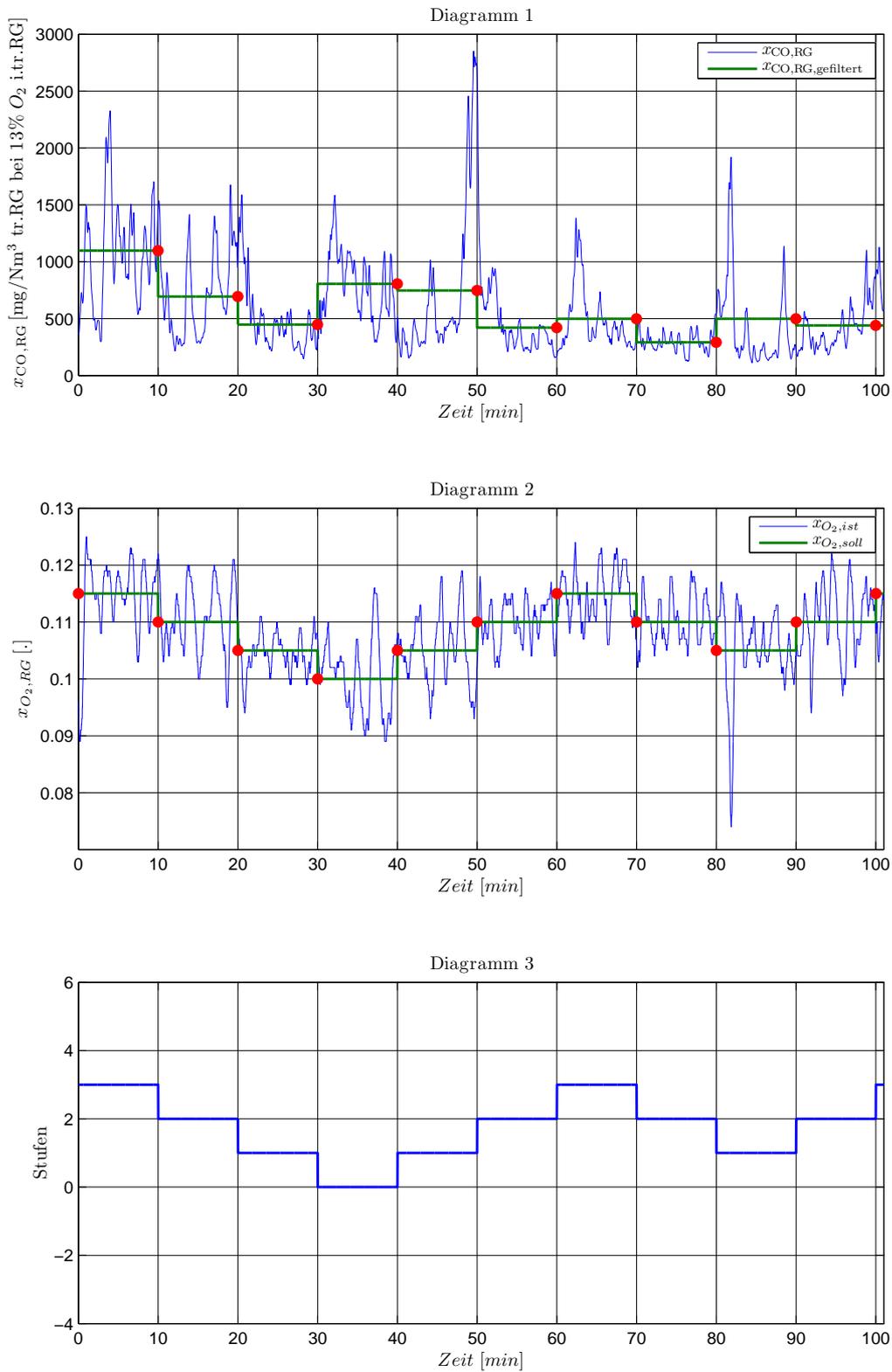


Abbildung 7.8: Ergebnis des Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums beim Start von der oberen Schranke bei stationärem Teillastbetrieb

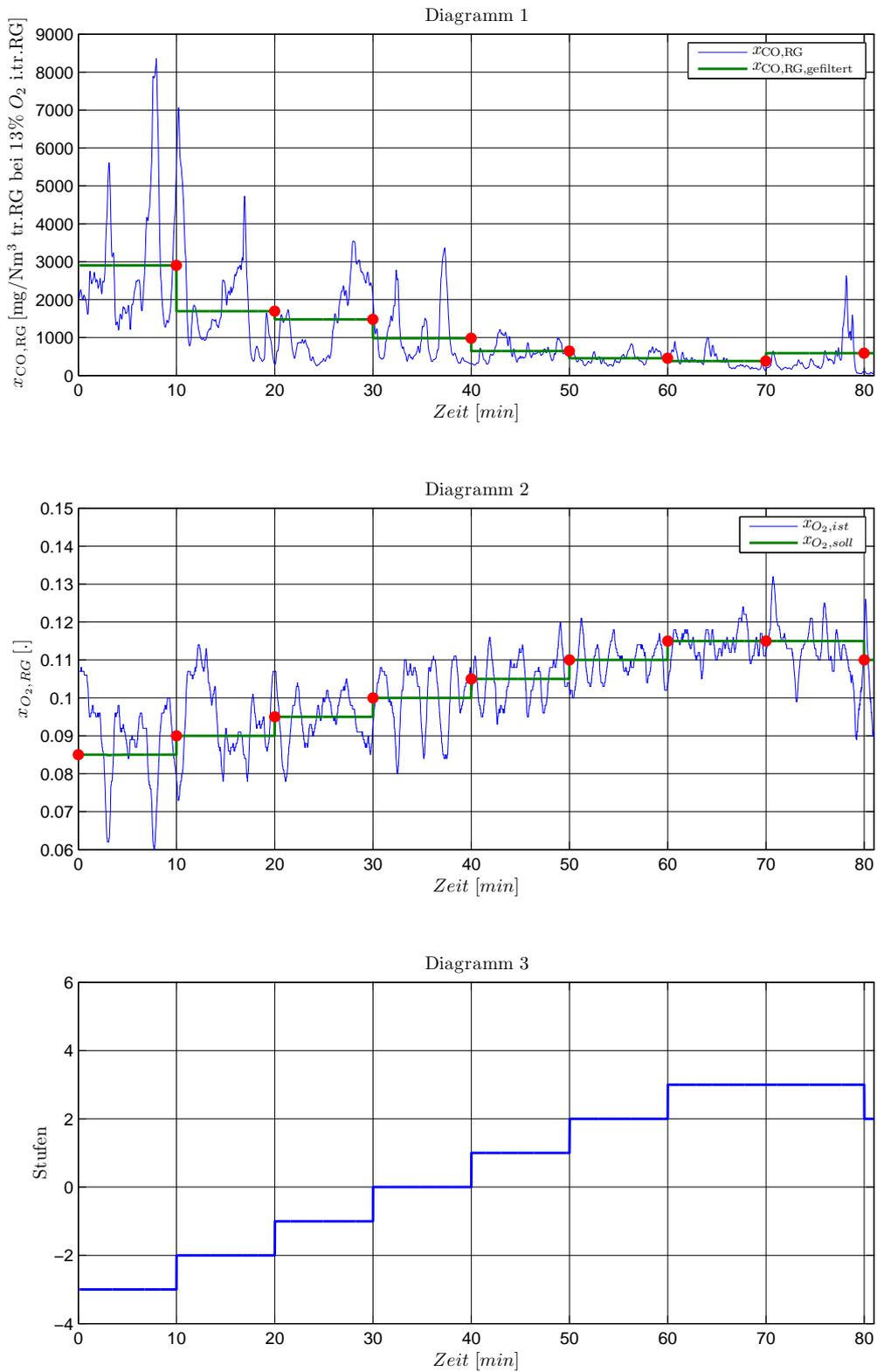


Abbildung 7.9: Ergebnis des Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums beim Start von der unteren Schranke bei stationärem Teillastbetrieb

unabhängig vom verwendeten Brennstoff immer im emissionsärmsten Punkt zu betreiben. Zusammen mit dem in Abschnitt 7.1 vorgestellten Führungsgrößenformer bildet der Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums eine durchaus gewinnbringende Erweiterung zur Regelung von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen. In Verbindung mit den in Kapitel 5 beschriebenen Sensoren wäre ein serienmäßiger Einsatz praktisch realisierbar und könnte zur Reduktion der CO-Emissionen bei Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen wesentlich beitragen.

Um den Algorithmus in Zukunft schneller zu machen, wäre es sinnvoll ihn um eine Schrittweitensteuerung zu erweitern. Diese Schrittweitensteuerung könnte z.B. so aussehen, dass der Algorithmus die Schrittweite vergrößert, sofern er zweimal in dieselbe Richtung gewandert ist, also z.B. zweimal die Führungsgröße verringert oder vergrößert hat. Somit könnte der Algorithmus den gesuchten Arbeitspunkt sehr viel schneller finden. Wenn der optimalen Punkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen gefunden wurde und der Algorithmus um diesen pendelt, könnte man die Schrittweite ständig verkleinern, damit die Abweichung zum optimalen Punkt immer geringer wird. Eine weitere sinnvolle Maßnahme zur Verbesserung des Algorithmus ist es, die CO-Emissionen, welche in jedem Iterationsschritt für den Vergleich verwendet werden, mit der für die jeweilige Leistung erwarteten Wert zu gewichten, sodass die aus einer Leistungsänderung resultierende Änderung der CO-Emissionen nicht fälschlicherweise den Maßnahmen des Algorithmus zugeordnet werden.

Kapitel 8

Zusammenfassung

Nach einer Einleitung wurden zu Beginn dieser Arbeit die theoretischen Grundlagen der Biomasseverbrennung erläutert. Unter anderem wurde der Biomasseverbrennungsvorgang erklärt und die CO- λ -Charakteristik beschrieben. Anschließend wurde ein kurzer Überblick über die Vorgehensweise der Arbeiten gegeben. In Kapitel 4 wurde die Versuchsanlage, anhand der diese Arbeit durchgeführt wurde, beschrieben. Ebenfalls in diesem Kapitel wurde die an der Versuchsanlage installierte zusätzliche Sensorik, sowie die bestehende modellbasierte Regelung kurz erläutert.

Der Hauptteil dieser Arbeit umfasst als Erstes die Untersuchung geeigneter CO-Sensoren für den Einsatz bei Biomassefeuerungsanlagen. Diese Untersuchungen konzentrierten sich auf die beiden Sensoren CarboSen und KS1D der Firma Lamtec, welche zur Detektion unverbrannter Komponenten im Rauchgas dienen. Es wurden die Querempfindlichkeiten, die Alterungserscheinungen, die Brennstoffabhängigkeit, die Anlagenabhängigkeit sowie die Lebensdauer der Sensoren untersucht. Anhand dieser Gesichtspunkte wurde deren Einsatzbarkeit in Biomassefeuerungsanlagen diskutiert. Bei den Untersuchungen zu den Querempfindlichkeiten hat sich herausgestellt, dass beide Sensoren eine starke Querempfindlichkeit gegenüber den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases aufweisen. Darüber hinaus konnte bei beiden Sensoren eine geringe Querempfindlichkeit gegenüber der Rauchgastemperatur festgestellt werden. Keine Abhängigkeiten wiesen die Sensorsignale gegenüber der Rauchgasfeuchte auf. Anhand dieser Erkenntnisse konnten die Sensorsignale der beiden Sensoren mathematisch modelliert werden. Da die physikalischen Zusammenhänge sehr komplex und zu einem wesentlichen Teil nicht bekannt waren, wurde das mathematische Modell durch experimentelle Modellbildung ermittelt, wobei die verwendeten Messdaten einen möglichst großen Bereich der verschiedenen Einflussparameter beinhalteten. Die daraus entstandenen zwei mathematischen Modelle waren für beide Sensoren in der Grundstruktur ident. Lediglich die experimentell ermittelten Parameter wurden für die beiden unterschiedlichen Sensoren getrennt ermittelt. Das erste mathematische Modell berücksichtigt den Sauerstoffgehalt des Rauchgases und die Rauchgastemperatur. Das zweite mathematische Modell berücksichtigt aufgrund der geringeren Komplexität lediglich den Sauerstoffgehalt des Rauchgases. Anhand dieser mathematischen Modelle konnten die restlichen Gesichtspunkte untersucht und beurteilt werden. Es stellte sich heraus, dass beide Sensoren den CO-Gehalt des Rauchgases nicht exakt messen können, jedoch eine gute

Abschätzung des CO-Gehaltes liefern und somit für die Anwendung bei einem Suchalgorithmus eingesetzt werden können. Darüber hinaus konnte man feststellen, dass beide Sensoren Alterungserscheinungen zeigen. Beim CarboSen Sensor stieg die Empfindlichkeit nach einem halben Jahr bereits um den Faktor 6 an, wobei beim KS1D Sensor die Empfindlichkeit abnahm und eine geringe Abweichung gegenüber dem Referenzsignal zu erkennen war. Positiv zu vermerken ist, dass beide Sensoren so gut wie keine Brennstoffabhängigkeit zeigten und nur der CarboSen Sensor beim mathematischen Modell 1, das die Rauchgastemperatur berücksichtigt, eine Anlagenabhängigkeit vorweist. Grundsätzlich sind die Sensoren anhand der Ergebnisse der Untersuchungen für einen Einsatz bei Biomassefeuerungsanlagen geeignet jedoch konnte die Lebensdauer der Sensoren noch nicht überzeugen. Es zeigte sich, dass die Sensorheizung mehrmals frühzeitig ausgefallen ist und die Sensoren in den meisten Fällen die vom Hersteller angegebene Lebensdauer nicht erreichten. Für einen serienmäßigen Einsatz müssen somit noch Arbeiten zur detaillierten Beurteilung und Verbesserung der Lebensdauer durchgeführt werden.

Im zweiten Abschnitt des Hauptteils dieser Arbeit wurde die Untersuchung der CO- λ -Charakteristik der betrachteten Anlage beschrieben. Dazu wurden zahlreiche Messungen bei zwei unterschiedlichen Lastbereichen durchgeführt. Als Brennstoff wurde ein äußerst homogenes Lärchenhackgut eingesetzt um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Brennstoff-Eigenschaften zu vermeiden. Darüber hinaus wurde das Hackgut für einige Messungen angefeuchtet um die Wirkung des unterschiedlichen Wassergehaltes des Brennstoffes auf die CO- λ -Charakteristik zu untersuchen. Es hat sich gezeigt, dass es bei der betrachteten Anlage bei Volllast (30 kW) bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{\text{BB}} = 0,4$ und einem Sekundärluftmassenstrom von $\dot{m}_{\text{SL}} = 40$ kg/h und bei Teillast bei einem Luftverhältnis im Brennstoffbett von $\lambda_{\text{BB}} = 0,9$ und einem Sekundärluftmassenstrom von $\dot{m}_{\text{SL}} = 15$ kg/h unabhängig vom Wassergehalt des Brennstoffes zu minimalen CO-Emissionen kommt.

Im dritten und letzten Abschnitt des Hauptteils dieser Arbeit wurden die Erkenntnisse aus der Untersuchung der CO- λ -Charakteristik mit Hilfe eines Führungsgrößenformers, welcher vor die Regelung geschaltet wurde, umgesetzt. Dieser Führungsgrößenformer erhält vom Benutzer lediglich die geforderte Vorlauftemperatur, welche er unverändert an die Regelung weiter reicht. Basierend auf den Erkenntnissen der Untersuchung der CO- λ -Charakteristik gibt der Führungsgrößenformer die Führungsgröße für das Luftverhältnis im Brennstoffbett und den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases so vor, dass ein optimaler Betriebspunkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad erreicht werden kann. Dieses Ziel konnte bei Teillast auch experimentell bestätigt werden. Mit Hilfe des Führungsgrößenformers konnten die CO-Emissionen verringert werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass der integrierte Sauerstoffsensor der Biomassefeuerungsanlage, welcher als Referenz für die Regelung dient, einen Offsetfehler aufweist. Darüber hinaus war die modellbasierte Regelung nicht in der Lage den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases genauer als ± 1 Vol.% am geforderten Wert zu halten. Somit konnte es zu Ausreißern nach unten kommen, welche durch den dabei auftretenden Sauerstoffmangel zu hohen CO-Emissionen führten. Aus diesen zwei Gründen konnte mit dem Führungsgrößenformer bei Volllast nicht das gewünschte Ergebnis erzielt werden. Es traten wesentlich höhere CO-Emissionen auf als ohne Führungsgrößenformer. Um diese Probleme gesichert zu vermeiden, müsste

der Führungsgrößenformer einen Sicherheitsfaktor berücksichtigen, welcher den maximal möglichen Offsetfehler des Sauerstoffsensors, sowie die Schwankung des geregelten Sauerstoffgehaltes ausgleicht. Die damit verbundene Erhöhung des Sauerstoffgehaltes würde aber unmittelbar mit Wirkungsgradverlusten einhergehen. Aus diesem Grund wurde ein Algorithmus zum Suchen des CO-Minimums entwickelt. Dieser Algorithmus variiert die Führungsgröße r_1 , welche den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases widerspiegelt, ständig im laufenden Betrieb um unabhängig von etwaigen Störeinflüssen wie Offsetfehler des Sauerstoffsensors, Regelungsgenauigkeit und verwendetem Brennstoff immer den optimalen Betriebspunkt, hinsichtlich niedriger CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad, zu finden. Die Ergebnisse der experimentellen Verifikation haben gezeigt, dass der Algorithmus bei Vollast sowie bei Teillast in der Lage war von einer oberen und unteren Schranke aus den optimalen Betriebspunkt, hinsichtlich geringer CO-Emissionen, zu finden. Um den Algorithmus in Zukunft schneller zu machen, wäre es sinnvoll ihn um eine Schrittweitensteuerung zu erweitern. Diese Schrittweitensteuerung könnte z.B. so aussehen, dass der Algorithmus die Schrittweite vergrößert, sofern er zweimal in dieselbe Richtung gewandert ist, also z.B. zweimal die Führungsgröße verringert oder vergrößert hat. Somit könnte der Algorithmus den gesuchten Arbeitspunkt sehr viel schneller finden. Wenn der optimalen Punkt hinsichtlich niedriger CO-Emissionen gefunden wurde und der Algorithmus um diesen pendelt, könnte man die Schrittweite ständig verkleinern, damit die Abweichung zum optimalen Punkt immer geringer wird. Eine weitere sinnvolle Maßnahme zur Verbesserung des Algorithmus ist es, die CO-Emissionen, welche in jedem Iterationsschritt für den Vergleich verwendet werden, mit der für die jeweilige Leistung erwarteten Wert zu gewichten, sodass die aus einer Leistungsänderung resultierende Änderung der CO-Emissionen nicht fälschlicherweise den Maßnahmen des Algorithmus zugeordnet werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die untersuchten Sensoren vielversprechende Ergebnisse geliefert haben. Es stellte sich heraus, dass zwar beide Sensoren für eine exakte Messung des CO-Gehaltes des Rauchgases nicht geeignet sind, jedoch können sie den CO-Gehalt des Rauchgases gut abschätzen und sind somit für einen Einsatz bei einem Suchalgorithmus zum Finden des CO-Minimums geeignet. Weiters konnte festgestellt werden, dass ein Führungsgrößenformer durchaus sinnvoll ist um schon vorab stets in die Nähe des optimalen Betriebspunktes zu gelangen. Es zeigte sich, dass zusätzlich auch ein Suchalgorithmus zum Einsatz kommen muss um die Anlage stets im optimalen Betriebspunkt betreiben zu können. Die vorgestellte Arbeit stellt somit einen wesentlichen Schritt in Richtung einer zukünftigen serienmäßigen Implementierung einer wirkungsvollen Ausbrandregelung in Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen und der damit verbundenen Emissionsreduktion sowie Wirkungsgradsteigerung dar.

Literaturverzeichnis

- [1] BAUER R.: *Modellbildung und modellbasierte Regelungsstrategien am Beispiel einer Biomasse-Feuerungsanlage*. Habilitationsschrift, Technische Universität Graz, 2009.
- [2] BAUER R., GÖLLES M., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I.: *Modellierung der Druck- und Volumenstromverhältnisse in einer Biomasse-Feuerung*. In - *Automatisierungstechnik*, 55:404–410, August 2007.
- [3] BAUER R., GÖLLES M., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I.: *Modellierung des dynamischen Verhaltens der Wärmeübertragung in einem Rauchrohr-Wärmeübertrager*. In - *Automatisierungstechnik*, 56:513–520, October 2008.
- [4] BAUER R., GÖLLES M., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I.: *Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes*. *Biomass and Bioenergy*, 34(4):417–427, 2010.
- [5] FURTNER K., HANEDER H.: *Biomasse - Heizungserhebung 2011*. Landwirtschaftskammer Niderösterreich, Abteilung Betriebswirtschaft und Technik, 2012. <http://www.lk-noe.at/mmedia/download/2012.06.11/1339404035977882.pdf> (04.12.2012).
- [6] GÖLLES M.: *Entwicklung mathematischer Modelle einer Biomasserostfeuerungsanlage als Grundlage für modellbasierte Regelungskonzepte*. Dissertationsschrift, Technische Universität Graz, 2008.
- [7] GÖLLES M., BAUER R., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I.: *Model based control of a biomass grate furnace*. In: *European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, April 2011. ISBN 978-972-99309-6-6.
- [8] GÖLLES M., REITER S., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I.: *Modeling of a small-scale biomass boiler as a basis for model based control strategies*. In: *European Biomass Conference and Exhibition*, Juni 2012. ISBN 978-88-89407-54-7.
- [9] GOOD J.: *Verbrennungsregelung bei automatisch beschickten Holzschnitzelfeuerungen*. Juris Druck + Verlag Direktion, 1992.
- [10] HECKMANN M., FRIEDL G., SCHWARZ M., ROSSMANN P., HARTMANN H., BAUMGARTNER H., LASSELSBERGER L., THEMESSEL A.: *Bestimmung von Jahresnutzungsgrad und Emissionsfaktoren von Biomasse-Kleinfeuerungen am Prüfstand*. Bioenergy 2020+ GmbH, September 2010. http://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/815650_Jahresnutzungsgrad_Endbericht.pdf (19.12.2012).

- [11] LAMTEC: *Anleitung für die Montage und Inbetriebnahme der Kombi-Sonde KS1D*, 2010.
- [12] LAMTEC: *Kurzanleitung für Benutzer CarboSen 1.000*, 2010.
- [13] MANN H., SCHIFFELGEN H., FRORIEP R.: *Einführung in die Regelungstechnik: Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regel-Realisierung, Software*. Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, 11. Auflage, 2009.
- [14] ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND: *Biomasse-Heizungen auf dem Vormarsch*, 2012. <http://www.biomasseverband.at/oekoenergie-die-auflagenstaerkste-energiepolitische-zeitung-europas/top-news-oekoenergie/biomasse-heizungen-auf-dem-vormarsch> (30.11.2012).
- [15] REITER S., GÖLLES M., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., OBERNBERGER I.: *Modellierung einer Biomasse-Kleinfeuerungsanlage als Grundlage für modellbasierte Regelungsstrategien*. SSRP 2011 - 17. Steirisches Seminar über Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, Seiten 174 – 187, September 2011.