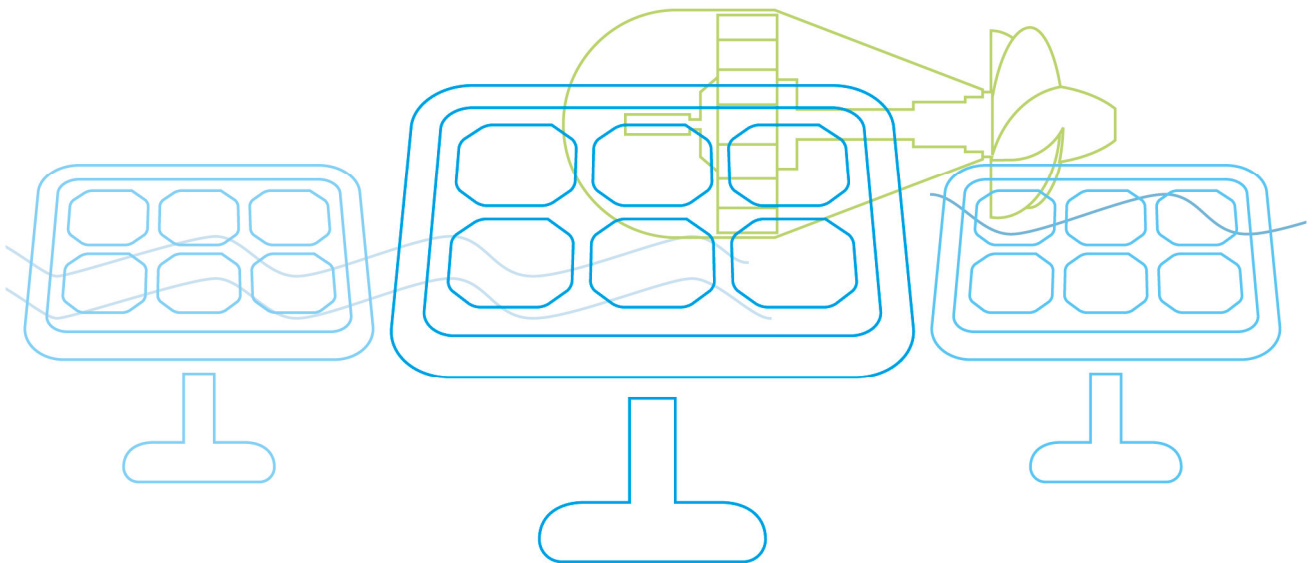




Entwicklung einer modellbasierten Regelung für Biomasse- Kleinfeuerungsanlagen



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Entwicklung einer modellbasierten Regelung für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen

Markus Göllles

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung	5
2 Inhaltliche Darstellung	5
2.1 Anlagenbeschreibung	6
2.2 Modellbildung	7
2.2.1 Brennstoffbett	7
2.2.2 Primär- und Sekundärverbrennungszone	8
2.2.3 Wärmeübertrager	9
2.2.4 Luft- und Brennstoffzufuhr	9
2.3 Regelung	10
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	13
4 Ausblick und Empfehlungen	16
5 Literaturverzeichnis	17
6 Kontaktdaten	18

1 Einleitung

Das volle Potential für einen emissionsarmen Feuerungsbetrieb bei hohen Wirkungsgraden, das in modernen Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen aufgrund optimierter Feuerraumgeometrien, Verbrennungsluftführungs- und Luftstufungsstrategien prinzipiell zur Verfügung steht, kann derzeit auf Grund des nach wie vor bestehenden Optimierungsbedarfs bei der Anlagenregelung nicht vollständig ausgeschöpft werden. Die eingesetzten Regelungsstrategien sind in der Regel nicht in der Lage, entsprechend schnell und richtig auf wechselnde Betriebsbedingungen zu reagieren. Das führt insbesondere bei Lastwechseln und im Teillastbetrieb zu einem Abfall des Wirkungsgrades und einem Ansteigen der Emissionen. Den sinnvollsten Ansatz zur Verbesserung des Regelungsverhaltens stellen sogenannte modellbasierte Regelungsstrategien dar. Dabei werden einfache mathematische Modelle zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Anlage zum Entwurf der Regelung verwendet, die eine gezielte Berücksichtigung aller nichtlinearen und verkoppelten Zusammenhänge der einzelnen Prozessgrößen erlaubt.

In vorangegangenen Arbeiten wurde bereits eine modellbasierte Regelung für mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen entwickelt und an einer Flachscharbrostfeuerung mit einem Warmwasserkessel (Kesselnennleistung: 180 kW) implementiert und experimentell verifiziert. Dabei zeigte sich eine deutliche Verbesserung des Betriebsverhaltens im Vergleich zur bisherigen Regelung [6].

Ziel des durchgeführten Projektes war die Entwicklung einer modellbasierten Regelungsstrategie für automatisch beschickte Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen aufbauend auf den für mittelgroße Anlagen verfügbaren Vorarbeiten sowie deren umfassende Bewertung anhand durchgeführter Testläufe, wobei der Fokus insbesondere auf Anlagen, die in sehr hohen Stückzahlen gefertigt werden (Leistungsbereich bis 50 kW), liegt.

Im vorliegenden Bericht erfolgt zunächst eine inhaltliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten (Abschnitt 2). Anschließend werden ausgewählte Ergebnisse der experimentellen Verifikation der entwickelten modellbasierten Regelung dargestellt (Abschnitt 3). Abschließend wird ein Ausblick auf die empfohlenen weiteren Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten gegeben, die für eine serienmäßige Umsetzung einer modellbasierten Regelung in Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen erforderlich sind (Abschnitt 0).

2 Inhaltliche Darstellung

Die Entwicklung der modellbasierten Regelung für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen wurde grundsätzlich anhand einer marktverfügbaren Hackgutfeuerungsanlage mit einer Kesselnennleistung von 30 kW durchgeführt, weshalb diese zunächst in Abschnitt 2.1 näher erläutert wird.

Im Anschluss daran werden die mathematischen Modelle zur Beschreibung aller regelungstechnisch relevanten Anlagenteile dargestellt (Abschnitt 2.2). Diese Modelle bilden die Grundlage für die modellbasierte Regelung, die in Abschnitt 2.3 näher erläutert wird.

2.1 Anlagenbeschreibung

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um den 2010 neu in den Markt eingeführten Hackgutkessel T4 der Fa. Fröling Heizkessel- und Behälterbau Ges.m.b.H (siehe Abbildung 1), die als Finanzierungspartner am durchgeführten Projekt beteiligt war. Die Anlage verfügt über eine Stokerschnecke mit Zelleradschleuse zur Zufuhr des Brennstoffs, einen Kipprost, eine Luftklappe zur Zufuhr der Primär- und Sekundärluft, eine schamottierte Primärverbrennungszone und eine gekühlte Sekundärverbrennungszone sowie einen Rauchrohr-Wärmeübertrager. Sie hat eine Kesselnennleistung von 30 kW. Die standardmäßig verfügbare Sensorik beinhaltet eine Druckmessung im Gasraum unter dem Rost, eine Breitband- λ -Sonde zur Messung der Sauerstoffkonzentration im austretenden Rauchgas, Sensoren zur Messung der Vorlauf- und Rücklauftemperatur, eine Positionsrückmeldung der Luftklappe, eine Drehzahlrückmeldung des Rauchgasventilators sowie ein Thermoelement zur Messung der Rauchgasaustrittstemperatur.

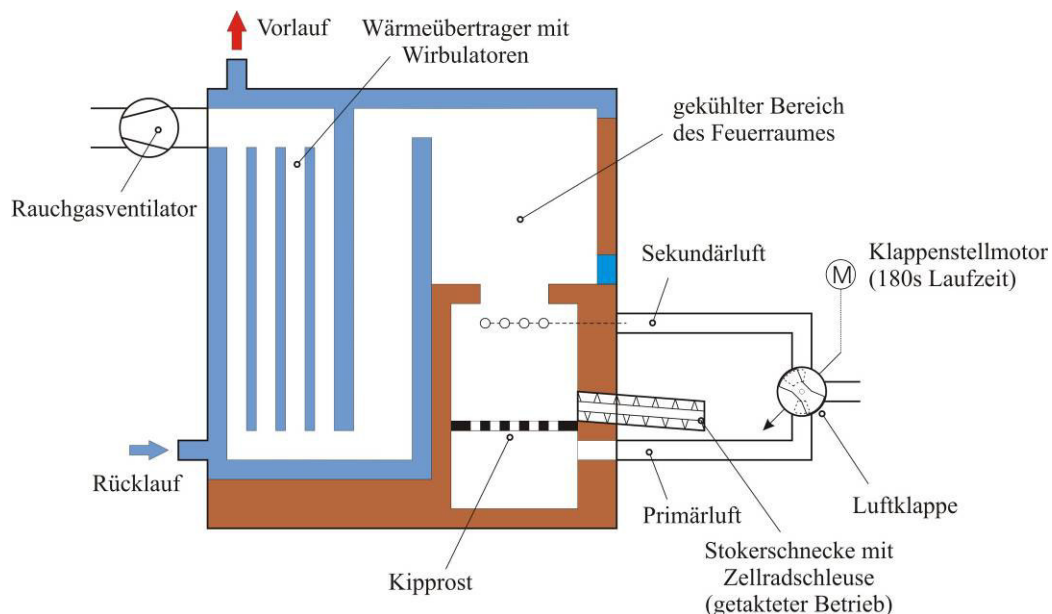


Abbildung 1: Aufbau der Versuchsanlage (Hackgutfeuerung T4 der Fa. FRÖLING mit einer Kesselnennleistung von 30 kW)

Für die durchgeführten Untersuchungen wurde die Anlage mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet, die die folgenden Sensoren bzw. Messsysteme beinhaltet:

- eine Luftmessstrecke (inkl. Druckmessung vor der Luftklappe und Temperaturmessung an mehreren Positionen in der Luftzufuhr) zur Bestimmung des Massenstromes der gesamten zugeführten Verbrennungsluft,
- eine Rauchgasmessstrecke zur Messung des Rauchgasmassenstromes mittels Differenzdruckmessung an einem Prandtl-Rohr (inkl. zugehöriger Temperaturmessung),
- einen Sensor zur Verifikation des standardmäßig eingesetzten Sensors für die Rauchgasaustrittstemperatur aus dem Kessel,
- diverse Messstellen im Rauchgasrohr zum Einsatz von Rauchgasanalysatoren zur genauen Messung relevanter Emissionen (vor allem CO) sowie zur Verifikation der standardmäßig eingesetzten Breitband- λ -Sonde zur Messung der O₂-Konzentrationen im Rauchgas,

- mehrere zusätzliche Drucksensoren für verschiedene Bereiche der Feuerung,
- einen Wärmemengenzähler,
- Sensoren mit einer höheren Genauigkeit zur Verifikation der standardmäßig eingesetzten Sensoren für die Vorlauf- und Rücklauftemperatur und
- eine Wägezelle zur Regelung des zugeführten Brennstoffmassenstromes.

2.2 Modellbildung

Zur übersichtlichen Modellbildung erfolgte eine Unterteilung in drei relevante Anlagenbereiche: Brennstoffbett, Primär- bzw. Sekundärverbrennungszone und Wärmeübertrager. Letzterer beinhaltet sowohl die gekühlten Wände der Sekundärverbrennungszone als auch den eigentlichen Rauchrohr-Wärmeübertrager (siehe Abbildung 2). Zusätzlich war die Entwicklung geeigneter Modelle zur Beschreibung der Luftzufuhr, des Falschlufteintrages, der Brennstoffzufuhr sowie des vom Rauchgasventilator erzeugten Unterdrucks im Feuerraum zur gezielten Zufuhr der vom Regler geforderten Stoffströme erforderlich. Eine besondere Herausforderung stellte die Modellierung der zugeführten Primär- und Sekundärluft dar, da durch die gemeinsame Luftklappe eine starke Verkopplung besteht. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine Erläuterung der einzelnen Modelle, wobei für eine detailliertere Darstellung auf die entsprechenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen verwiesen wird [1-8].

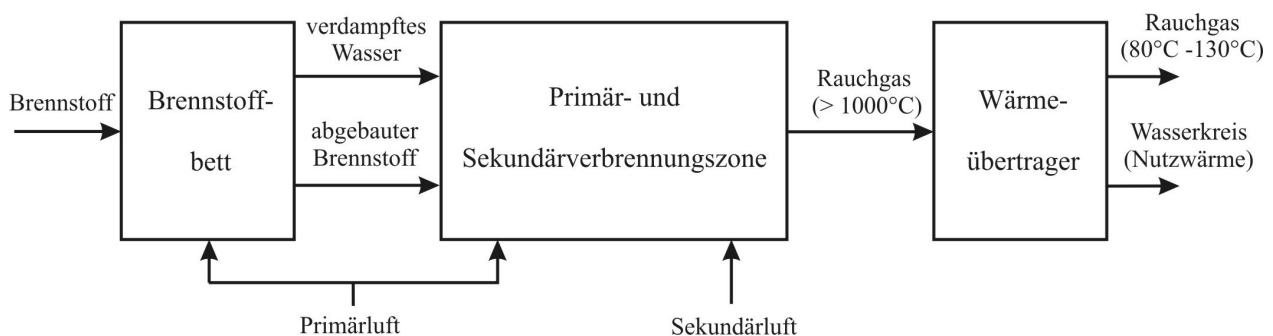


Abbildung 2: Modellstruktur einer Biomasse-Kleinf Feuerungsanlage

2.2.1 Brennstoffbett

Die Modellierung des Brennstoffbettes basiert auf dem in [4] für die Verbrennung von Hackgut auf dem Flachscharrost einer mittelgroßen Biomassefeuerungsanlage vorgeschlagenen Modell. Dabei wird das Brennstoffbett in drei Zonen unterteilt. Der über die Brennstoffschnecke zugeführte, feuchte Brennstoffmassenstrom durchläuft zunächst eine sogenannte Totzone, in der er lediglich erwärmt wird. Danach erfolgt die Verdampfung des im Brennstoff gebundenen Wassers in der Verdampfungszone, und der, die Freisetzung der flüchtigen Komponenten sowie die Verbrennung der auf dem Rost verbleibenden Holzkohle beinhaltende, Abbau des trockenen Brennstoffs in der Abbauzone. Die mathematische Beschreibung der Verdampfung des Wassers sowie des Abbaus des trockenen Brennstoffes erfolgt dabei mit Hilfe je einer Massenbilanz für das Wasser in der Verdampfungszone m_w und den trockenen Brennstoff in der Abbauzone m_{CHO} .

$$\frac{dm_W(t)}{dt} = - \underbrace{c_{\text{Verd}} m_W(t)}_{\text{verdampftes Wasser}} + \underbrace{\frac{dm_{W,\text{ein}}(t - T_t(t))}{dt}}_{\text{zugeführtes Wasser}} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{\text{CHO}}(t)}{dt} = - \underbrace{c_{\text{Abb}} [\dot{m}_{\text{PL}}(t) + \dot{m}_{\text{PL}0}] m_{\text{CHO}}(t)}_{\text{abgebauter trockener Brennstoff}} + \underbrace{\frac{dm_{\text{CHO},\text{ein}}(t - T_t(t))}{dt}}_{\text{zugeführter trockener Brennstoff}} \quad (2)$$

Hierbei sind c_{Verd} , c_{Abb} und $\dot{m}_{\text{PL}0}$ konstante Parameter, $\dot{m}_{\text{PL}}$ der Primärluftmassenstrom, $m_{W,\text{ein}}$ die um eine Totzeit T_t verzögerte kumulierte Wassermasse und $m_{\text{CHO},\text{ein}}$ der um eine Totzeit verzögerte kumulierte trockene Brennstoff. Die kumulierte Wassermasse $m_{W,\text{ein}}$ und der kumulierte trockene Brennstoff $m_{\text{CHO},\text{ein}}$ 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 $\dot{m}_{\text{CHO}}$ berechnet:

$$m_{W,\text{ein}}(t) = \int_0^t \dot{m}_W(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$m_{\text{CHO},\text{ein}}(t) = \int_0^t \dot{m}_{\text{CHO}}(\tau) d\tau \quad (4)$$

Die Totzeit T_t hängt im Wesentlichen vom Wassergehalt des Brennstoffes und somit von der Wassermasse in der Verdampfungszone m_W sowie dem Massenstrom an trockenem Brennstoff $\dot{m}_{\text{CHO}}$ ab und wird durch die Gleichung

$$T_t(t) = c_{T,\text{BB}} \frac{m_W(t)}{\dot{m}_{\text{CHO}}(t)} \quad (5)$$

mit dem konstanten Parameter $c_{T,\text{BB}}$ hinreichend genau beschrieben [7,8].

2.2.2 Primär- und Sekundärverbrennungszone

In der gemeinsam betrachteten Primär- und Sekundärverbrennungszone erfolgt die Verbrennung des abgebauten, trockenen Brennstoffes (in Form von brennbarem Rauchgas) mit der zugeführten Primär- und Sekundärluft. Zusammensetzung und Menge des aus der Verbrennung resultierenden Rauchgases sowie dessen Temperatur bei vollständiger Verbrennung ohne Wärmeübertragung an die Umgebung (adiabate Verbrennungstemperatur) werden mit Hilfe einer gewöhnlichen Verbrennungsrechnung [1,5] berechnet.

Bei den Voruntersuchungen zu mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen hat sich gezeigt, dass es bei Laständerungen und insbesondere beim Hochfahren der Anlage zu einer deutlichen Abweichung zwischen adiabater Verbrennungstemperatur und Rauchgastemperatur am Wärmeübertragereintritt kommen kann, die auf die Speicherwirkung des Schamotts zurück zu führen ist [1,5].

Im Zuge des Projektes hat sich aber herausgestellt dass die Speicherwirkung der feuerfesten Auskleidung wie auch die Umgebungsverluste für die betrachtete Biomasse-Kleinfeuerungsanlage vernachlässigt werden kann [7,8]. Somit kann für die nachfolgende Modellierung des Wärmeübertragers

davon ausgegangen werden, dass nach der Verbrennung Rauchgas annähernd mit der adiabaten Verbrennungstemperatur zur Verfügung steht.

2.2.3 Wärmeübertrager

Die Modellierung des Wärmeübertragers basiert auf dem in [3] für einen Rauchrohr-Wärmeübertrager mit einer Nennleistung von 180 kW vorgeschlagenen Modell, in dem die Modellierung für den Rauchgas- und den Wasserteil getrennt voneinander durchgeführt wird.

Dabei wird der Rauchgasteil durch ein statisches Modell der Form

$$\dot{Q} = c_{WT} [T_{RG} - T_w]^{q_1} \dot{m}_{RG}^{q_2} \quad (6)$$

beschrieben. Hierbei entsprechen $\dot{Q}$ dem auf das Wasser übertragenen Wärmestrom, T_{RG} der Rauchgastemperatur beim Eintritt in den Wärmeübertrager, T_w der konstant angenommenen mittleren Wassertemperatur, $\dot{m}_{RG}$ dem Rauchgasmassenstrom und c_{WT} , q_1 und q_2 den experimentell zu ermittelnden Modellparametern. Wie in Abschnitt 2.2.2 erwähnt, können die Speicherwirkung der feuerfesten Auskleidung der Primärzone und auch die Umgebungsverluste vernachlässigt werden. Somit wird die Rauchgaseintrittstemperatur gleich der adiabaten Verbrennungstemperatur

$$T_{RG} = T_{\text{adiabat}} \quad (7)$$

gesetzt. Die Wasserseite wird durch die gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung

$$\frac{dT_{VL}}{dt} = -\frac{\dot{m}_w}{c_{\tau,WT}} T_{VL} + \left[\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_w c_w} + T_{RL} \left(t - \frac{c_{T,WT}}{\dot{m}_w} \right) \right] \quad (8)$$

beschrieben. Hierbei entsprechen T_{VL} der Vorlauftemperatur, $\dot{m}_w$ dem Wassermassenstrom, c_w der spezifischen Wärmekapazität von Wasser, T_{RL} der Rücklauftemperatur, $c_{\tau,WT}$ bzw. $c_{T,WT}$ den experimentell zu ermittelnden Modellparametern [7,8].

2.2.4 Luft- und Brennstoffzufuhr

Um die vom Regler geforderten Stoffströme gezielt zuführen zu können, wurden weitere Modelle zur Beschreibung der Luft- und Brennstoffzufuhr entwickelt. Dazu gehören der Zusammenhang zwischen der Ansteuerung der Brennstoffzufuhr und dem daraus resultierenden Brennstoffmassenstrom, die Beschreibung der eigentlichen Luftzufuhr, die Abhängigkeit des Falschlufteintrages vom Feuerraumunterdruck sowie die Beschreibung der Druckerhöhung des Rauchgasventilators, welche zur Vorgabe eines definierten Feuerraumunterdruckes nötig ist.

Die Variation des zugeführten Brennstoffmassenstromes bei der betrachteten Anlage erfolgt durch eine getaktete Ansteuerung der Brennstoffschnecke, wobei durch geeignete Wahl der Taktzeit die Gleichmäßigkeit der Verbrennung nicht beeinträchtigt wird. Dabei wurde die Abhängigkeit des zugeführten Brennstoffmassenstromes von der Einschaltzeit der Brennstoffzufuhr durch einen einfachen affinen Zusammenhang beschrieben [7,8].

Die Modellierungen der Luftzufuhr, des Falschlufteintrages und der Druckerhöhung durch den Rauchgasventilator basieren auf der Berücksichtigung der für die Druck- und Volumenstromverhältnisse wesentlichen Phänomene: dem Druckabfall in einem Rohr, dem Druckabfall an einer Blende sowie der

Druckanhebung durch einen Ventilator [2]. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Druckabfall Δp und Volumenstrom $\dot{V}$ in einem Rohr durch Gleichung (9) und an einer Blende durch Gleichung (10) beschrieben:

$$\Delta p = R_1 \dot{V}^{1.75} \text{ mit } R_1 = \frac{0.242 \eta^{0.25} \rho^{0.75} l}{d^{4.75}} \quad (9)$$

$$\Delta p = R_2 \dot{V}^2 \text{ mit } R_2 = \frac{\rho}{2\alpha^2 A_d^2} \quad (10)$$

Hierbei entsprechen l der Länge und d dem Durchmesser des Rohres, η der dynamischen Viskosität, ρ der Dichte des Fluids, α der als konstant angenommenen Durchflusszahl und A_d der Querschnittsfläche der Blende. Die Druckanhebung eines Ventilators wird durch

$$\Delta p = c_v f_v^2 \quad (11)$$

beschrieben, wobei c_v der Ventilatorkonstanten und f_v der Ventilatorfrequenz entsprechen.

Basierend auf dieser Vorgehensweise wurden entsprechende Modelle zur Beschreibung der Primär- und Sekundärluftzufuhr in Abhängigkeit der Stellung der gemeinsamen Luftklappe, der temperatur- und drehzahlabhängigen Druckanhebung durch den Rauchgasventilator und der Abhängigkeit der verschiedenen Falschluftröme vom Feuerraumunterdruck ermittelt. Die entwickelten Modelle ermöglichen eine Abschätzung der nicht getrennt messbaren zugeführten Primär- bzw. Sekundärluft und darüber hinaus eine entkoppelte, und in Folge dessen zielgerichtete Luftzufuhr. Darüber hinaus ermöglichen es die entwickelten Modelle für die Falschluftröme nicht nur den gesamten Falschlufteintrag abzuschätzen, sondern ihn auch den unterschiedlichen Anlagenbereichen gemäß seiner Wirkung zuzuordnen. Dabei werden die über den Aschebehälter sowie die Rostascheschnecke angesaugten Falschluftröme der Primärluft und die über die Brennstoffzufuhr sowie das Zündgebläse angesaugten Falschluftröme der Sekundärluft zugeordnet. Dies führt letztendlich zu einer deutlichen Steigerung der erzielbaren Genauigkeit bei der Zufuhr der vom Regler geforderten Primär- und Sekundärluftströme [7,8].

2.3 Regelung

Für den Reglerentwurf war es erforderlich die entwickelten Teilmodelle zunächst zu einem Gesamtmodell zusammenzufassen und in Anlehnung an die Vorgehensweise für mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen [1,6] in eine einheitliche, in der Regelungstechnik übliche, Notation zu bringen. Dies führte letztendlich zu einem mathematischen Modell bestehend aus drei gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung

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

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{c_{21}}{1+c_{12}d_1}x_1 - c_{22}x_2u_2 + \frac{1}{1+c_{12}d_1}u_1 \quad (13)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = c_{31}x_1 - c_{32}x_2u_2 + c_{33a}(c_{33b} + c_{33c}d_2)u_3 + c_{34}d_3d_4 - c_{34}d_3x_3 \quad (14)$$

mit den Zustandsgrößen ($x_1 = m_w$... Masse an Wasser in der Verdampfungszone, $x_2 = m_{CHO}$... Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone, $x_3 = T_{VL}$... Vorlauftemperatur), den Stellgrößen ($u_1 = \dot{m}_{CHO}(t - T_i)$... um die Totzeit verzögerter, zugeführter trockener Brennstoffmassenstrom, $u_2 = \dot{m}_{PL} + \dot{m}_{PL0}$... Summe aus Primärluftmassenstrom und konstantem Modellparameter $\dot{m}_{PL0}$, $u_3 = \dot{m}_{PL} + \dot{m}_{SL}$ Summe aus Primär- und Sekundärluftmassenstrom), den Störgrößen ($d_1 \dots d_4$) und den Modellkonstanten ($c_{11} \dots c_{34}$).

Im ersten Schritt des eigentlichen Reglerentwurfes wurden die zu regelnden Größen festgelegt. Bei den ersten beiden gewählten Regelgrößen, $y_1 = x_{O_2, RG}$ der Sauerstoffgehalt des Rauchgases und $y_2 = T_{VL}$ die Vorlauftemperatur, handelt es sich um wesentliche Betriebsparameter die üblicherweise auch von konventionellen Regelungen geregelt werden. Um die drei beeinflussbaren Größen (Brennstoffmassenstrom, Primärluftmassenstrom, Sekundärluftmassenstrom) eindeutig vorgeben zu können, ist es aber erforderlich eine dritte Regelgröße zu definieren. Einen weiteren wesentlichen Betriebsparameter stellt die Aufteilung der zugeführten Luft in Primär- und Sekundärluft (Luftstufung) dar, die üblicherweise durch das Luftverhältnis im Brennstoffbett λ_{BB} charakterisiert wird. Da die Luftstufung entscheidenden Einfluss auf das Emissionsverhalten der Anlage hat, wurde diese für die Wahl der dritten Regelgröße herangezogen. Dabei wurde die Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone als dritte Regelgröße gewählt $y_3 = m_{CHO, Zone}$, wobei die vorgegebene Führungsgröße r_3 derart an den Betriebszustand angepasst wird, dass sich letztendlich das gewünschte Luftverhältnis im Brennstoffbett λ_{BB} einstellt.

Zum Entwurf des Reglers wurde das Verfahren der exakten Eingangs-Ausgangslinearisierung verwendet. Die grundlegende Idee dieses Verfahrens ist es, die Verkopplungen und Nichtlinearitäten eines Mehrgrößensystems, wie es auch eine Biomassefeuerungsanlage ist, durch eine geeignete Zustandsrückkopplung zu kompensieren (Abbildung 3) [9].

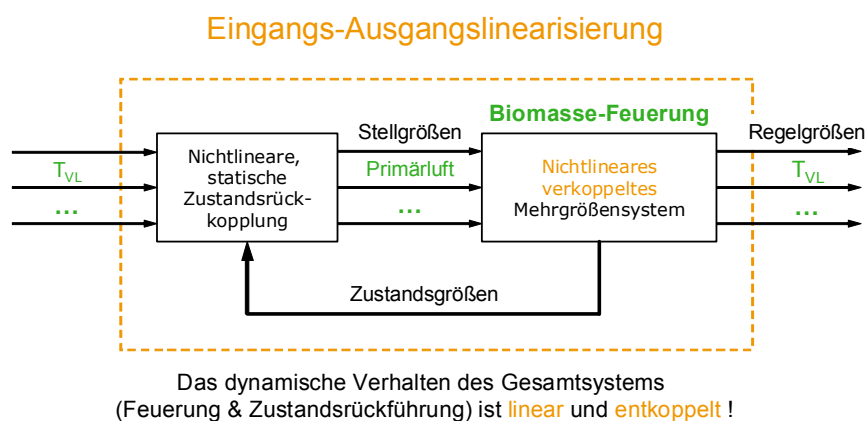


Abbildung 3: Grundprinzip der exakten Eingangs-Ausgangslinearisierung

Dadurch ergibt sich ein Gesamtsystem, bestehend aus Zustandsrückkopplung und Biomassefeuerungsanlage, mit einem linearen und entkoppelten Eingangs-Ausgangsverhalten. Somit bewirkt beispielsweise eine sprungförmige Änderung der Führungsgröße für die Vorlauftemperatur lediglich eine Änderung der Vorlauftemperatur T_{VL} selbst. Die anderen Regelgrößen, wie z.B. der Sauerstoffgehalt des resultierenden Rauchgases, bleiben jedoch unverändert auf dem geforderten Wert.

Diese Vorgehensweise führte schlussendlich zu einem Regelgesetz für die Regelung des Sauerstoffgehaltes des Rauchgases $y_1 = x_{O_2, RG}$ sowie der Vorlauftemperatur $y_2 = T_{VL}$ durch geeignete Vorgabe des zugeführten Primärluft- sowie Sekundärluftmassenstromes.

Aufgrund der Totzone im Brennstoffbett ist diese Vorgehensweise aber nicht zur Regelung der dritten Regelgröße, der Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone $y_3 = m_{CHO, Zone}$, geeignet, da der zu einem bestimmten Zeitpunkt benötigte Brennstoffmassenstrom bereits in der Vergangenheit hätte zugeführt werden müssen. Da die Brennstoffzufuhr aber ohnedies nur der langfristigen Leistungsvorgabe dient, wird grundsätzlich ein konstanter, für den stationären Betrieb bei der aktuell geforderten Leistung erforderlicher, (trockener) Brennstoffmassenstrom $u_{1, RL}$ vorgegeben, der zusätzlich durch die Verwendung eines sehr langsam eingestellten PI-Reglers korrigiert wird, falls die geschätzte Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone $y_3 = m_{CHO, Zone}$ nicht dem geforderten Wert entspricht.

Sowohl die Regelung des Sauerstoffgehaltes und der Vorlauftemperatur als auch der Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone benötigen die Kenntnis der Zustandsgrößen des Systems ($x_1 = m_W$... Masse an Wasser in der Verdampfungszone, $x_2 = m_{CHO}$... Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone, $x_3 = T_{VL}$... Vorlauftemperatur). Da diese, abgesehen von der Vorlauftemperatur, nicht gemessen werden können, wurde ein erweiterter Kalmanfilter zu deren Schätzung verwendet. Der Kalmanfilter basiert grundsätzlich auf dem Reglerentwurfsmodell, wobei der mit dem Modell prädizierte Schätzwert mit Hilfe von Messwerten korrigiert wird. Als Messgrößen zur Korrektur der Schätzwerte wurden der Sauerstoffgehalt des Rauchgases und die Vorlauftemperatur verwendet. Um die Zustandsgrößen auch bei unbekannten Störungen (z.B. geänderte Falschlufte) noch richtig zu schätzen, wurde das Modell um zwei zusätzliche Zustandsgrößen (Falschlufteffluenstrom, Brennstoffzufuhrfaktor) erweitert.

Da es sich bei den vom Regler berechneten Stellgrößen um Massenströme handelt, musste zusätzlich eine geeignete Strategie zur Ansteuerung der Stellgeräte entwickelt werden.

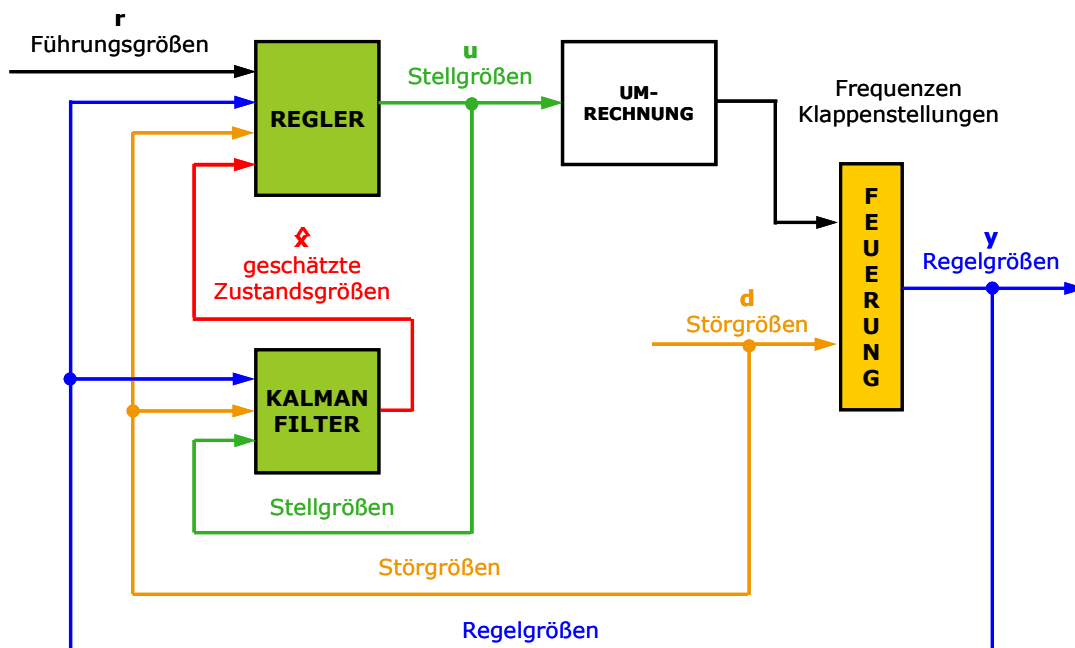


Abbildung 4: Grundlegende Struktur der gesamten Regelung

Dabei werden die erforderliche Klappenstellung, Ventilatorfrequenz sowie auch die Ansteuerung der Brennstoffzufuhr mit mathematischen Modellen für die Luft- und Brennstoffzufuhr (Abschnitt 2.2.4) berechnet.

Letztendlich besteht die gesamte entwickelte Regelung aus dem eigentlichen Regler, der die erforderlichen Stellgrößen berechnet, einem erweiterten Kalmanfilter zur Schätzung der benötigten Zustandsgrößen und der Umrechnung der vom Regler berechneten Stellgrößen in eine geeignete Ansteuerung der Stellgeräte (Abbildung 4).

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die entwickelte modellbasierte Regelung wurde schlussendlich an der Versuchsanlage implementiert und durch gezielte Testläufe experimentell verifiziert.

Beispielhaft für alle durchgeführten Testläufe wird in der Folge auf die Reduktion der Lastanforderung von 27 kW (90% der Nennlast) auf 9 kW (30% der Nennlast) näher eingegangen. Dabei erfolgte die Änderung der Lastanforderung durch schrittweise Erhöhung der Rücklaufftemperatur von 51 auf 61°C innerhalb von 9 Minuten. Die Führungsgrößen für den Sauerstoffgehalt $r_1 = 8 \text{ Vol.}\% \text{ f.RG}$, die Vorlaufftemperatur $r_2 = 66^\circ\text{C}$ und das Luftverhältnis im Brennstoffbett $\lambda_{\text{BB}} = 0,5$ (nur bei der modellbasierten Regelung vorgebar) waren während des gesamten Testlaufes konstant. Als Brennstoff wurde typisches Waldhackgut mit einem Wassergehalt von ca. 25 Gew.% FS verwendet.

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen den zeitlichen Verlauf des an das Wassernetz abgegebenen Wärmestromes für den Betrieb mit der konventionellen Regelung (Abbildung 5) und der modellbasierten Regelung (Abbildung 6). Dabei zeigt sich, dass die modellbasierte Regelung deutlich schneller auf die Laständerung reagieren kann. Die konventionelle Regelung lieferte für ca. 15 Minuten einen zu hohen Wärmestrom, was automatisch zu einer deutlichen Überhöhung der Vorlaufftemperatur um ca. 5°C führte und im Realbetrieb zu einer Abschaltung der Anlage führen würde, da die fehlende Wärmeabnahme zu einem weiteren Ansteigen der Rücklaufftemperatur und in weiterer Folge auch der Vorlaufftemperatur führt.

Gleichzeitig zur besseren Bereitstellung der geforderten Wärmemenge war die modellbasierte Regelung auch in der Lage den Sauerstoffgehalt besser auf dem geforderten Wert zu halten sowie die Anlage bei einer deutlich besseren Luftstufung, d.h. deutlich geringerem Primärluftanteil, zu betreiben. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die entsprechenden Verläufe des Sauerstoffgehaltes für den Betrieb mit der konventionellen Regelung (Abbildung 7) und der modellbasierten Regelung (Abbildung 8). Bei Betrieb mit der modellbasierten Regelung kommt es bei der Lastreduktion lediglich kurzzeitig zu einer größeren Anhebung des Sauerstoffgehaltes sowie des Luftverhältnisses im Brennstoffbett, die jedoch nach ca. einer halben Stunde wieder nahezu auf die Werte des Volllastbetriebes abgesenkt werden können, wodurch sich ein deutlich besserer Wirkungsgrad ergibt und ein großes Potential zur Senkung der NO_x -Emissionen besteht.

Zusammengefasst hat die experimentelle Verifikation der modellbasierten Regelung gezeigt, dass diese deutlich besser auf Änderungen der Betriebsbedingungen (sowohl Last- als auch Brennstoffänderungen) reagieren kann und zusätzlich die Regelgrößen besser auf den geforderten Werten hält. Letztendlich zeigte sich sowohl eine Reduktion der Schadstoffemissionen als auch das Potential zur Erhöhung des Wirkungs- und insbesondere des Jahresnutzungsgrades durch das bessere Teillastverhalten.

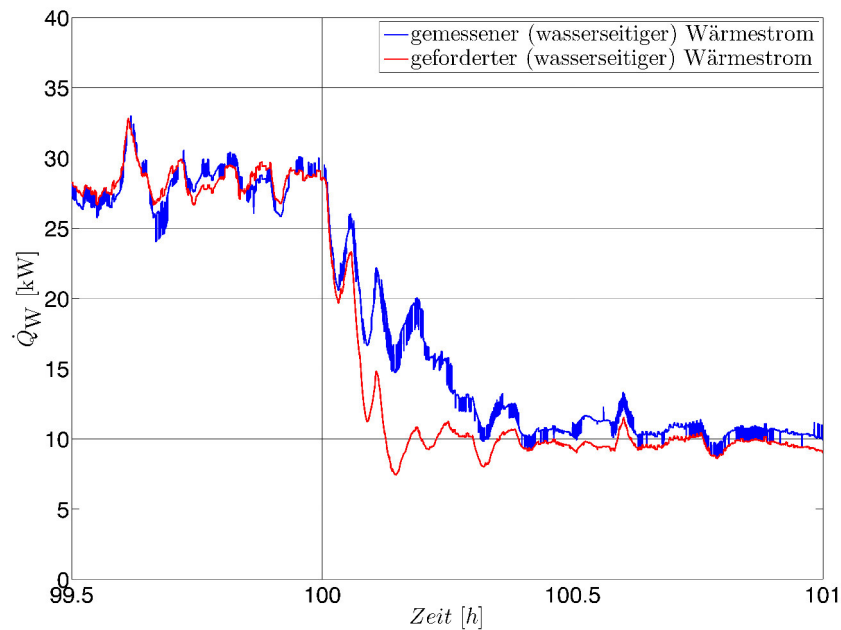


Abbildung 5: Übertragene Wärmeleistung bei Reduktion der Lastanforderung von 27 auf 9 KW - Betrieb mit KONVENTIONELLER Regelung

Erläuterungen: $\dot{Q}_W$... an Wassernetz abgegebene Wärmeleistung [kW]; verwendeter Brennstoff: Waldhackgut mit einem Wassergehalt von 25 Gew.% FS; Führungsgröße für den Sauerstoffgehalt: $r_1 = 8$ Vol.% f.RG

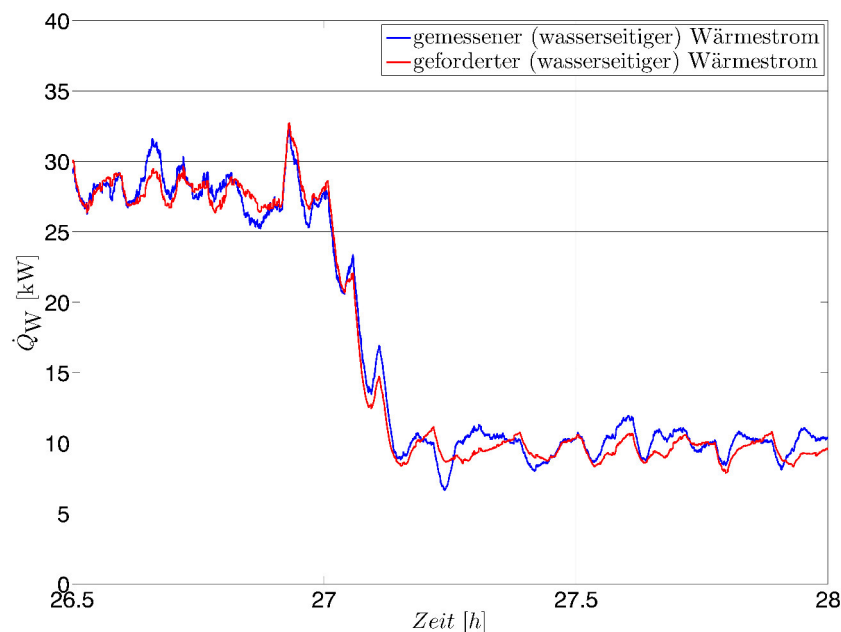


Abbildung 6: Übertragene Wärmeleistung bei Reduktion der Lastanforderung von 27 auf 9 KW - Betrieb mit MODELLBASIERTER Regelung

Erläuterungen: $\dot{Q}_W$... an Wassernetz abgegebene Wärmeleistung [kW]; verwendeter Brennstoff: Waldhackgut mit einem Wassergehalt von 25 Gew.% FS; Führungsgröße für den Sauerstoffgehalt: $r_1 = 8$ Vol.% f.RG; Führungsgröße für das Luftverhältnis im Brennstoffbett $\lambda_{BB} = 0,5$

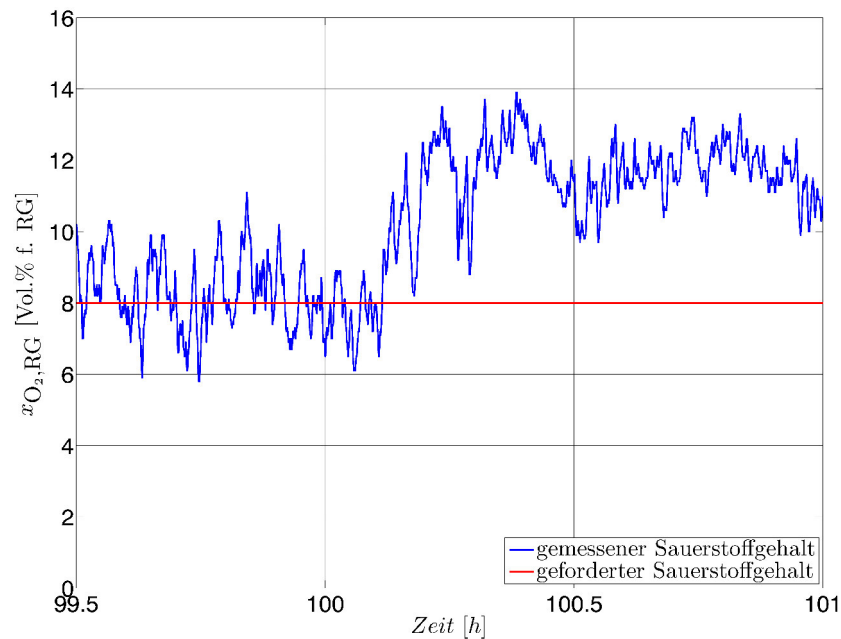


Abbildung 7: Sauerstoffgehalt bei Reduktion der Lastanforderung von 27 auf 9 KW – Betrieb mit KONVENTIONELLER Regelung

Erläuterungen: $\dot{Q}_W$... an Wassernetz abgegebene Wärmeleistung [kW]; verwendeter Brennstoff: Waldhackgut mit einem Wassergehalt von 25 Gew.% FS; Führungsgröße für den Sauerstoffgehalt: $r_1 = 8$ Vol.% f.RG

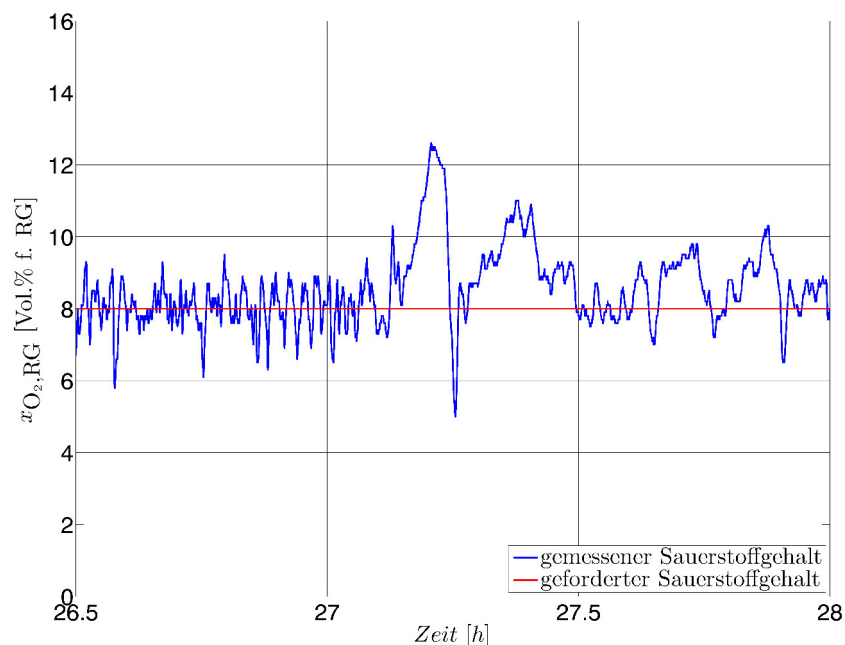


Abbildung 8: Sauerstoffgehalt bei Reduktion der Lastanforderung von 27 auf 9 KW - Betrieb mit MODELLBASIERTER Regelung

Erläuterungen: $\dot{Q}_W$... an Wassernetz abgegebene Wärmeleistung [kW]; verwendeter Brennstoff: Waldhackgut mit einem Wassergehalt von 25 Gew.% FS; Führungsgröße für den Sauerstoffgehalt: $r_1 = 8$ Vol.% f.RG; Führungsgröße für das Luftverhältnis im Brennstoffbett $\lambda_{BB} = 0,5$

Das bessere Teillastverhalten führt zu einer Minimierung der Anlagenabschaltung, da die modellbasierte Regelung in der Lage ist, die umgesetzte Leistung sehr schnell an die geforderte Nutzwärmeleistung anzupassen, wodurch letztendlich auch bei geringer Lastanforderung ein kontinuierlicher Betrieb ermöglicht wird.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die modellbasierte Regelung stellt einen technologischen Meilenstein für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen. Deshalb sollen sich die weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in erster Linie darauf konzentrieren, die Vorteile durch die modellbasierte Regelung für einen möglichst großen Bereich von Kleinanlagen nutzbar zu machen bzw. noch besser quantifizieren zu können.

Zum Erreichen des langfristigen Zieles der Markteinführung der modellbasierten Regelung für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen wurden bereits mehrere Arbeiten gemeinsam mit Industriepartnern in Angriff genommen.

Für eine quantitative Bewertung der Vorteile durch die modellbasierte Regelung im Realbetrieb bezüglich der erzielbaren Emissionsreduktion sowie Steigerung des Jahresnutzungsgrades sollen umfassende Testläufe, insbesondere auch im Lastzyklusbetrieb, durchgeführt werden, da die Regelung letztendlich vor allem anhand des mit ihr erzielbaren Verhaltens im Realbetrieb beurteilt werden sollte.

Nachdem das mathematische Modell für das Brennstoffbett und in weiterer Folge die modellbasierte Regelung bislang nur für Rostfeuerungen entwickelt wurde, Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen aber sehr häufig auch als Unterschubfeuerungen ausgeführt sind, sollte die modellbasierte Regelung auch für Unterschubfeuerungen weiterentwickelt werden. Dazu ist es erforderlich ein entsprechendes mathematisches Modell für das Brennstoffbett zu entwickeln und die modellbasierte Regelung darauf basierend anzupassen.

Um die Vorteile durch die modellbasierte Regelung letztendlich bestmöglich nutzen zu können ist es erforderlich die Eigenschaften der modellbasiert geregelten Biomasse-Kleinfeuerungsanlage auch im Lastmanagement geeignet zu berücksichtigen, da der erzielbare Jahresnutzungsgrad des Gesamtsystems (Erzeuger- und Verbraucherseite samt aller zwischengeschalteten Komponenten wie Pufferspeicher, Wärmeübertrager, Mischventile usw.) maßgeblich von der Lastanforderung an die Biomasse-Kleinfeuerungsanlage abhängt. Letzten Endes soll die modellbasierte Regelung der Biomasse-Kleinfeuerungsanlage auf das Gesamtsystem ausgeweitet werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] R. Bauer, Modellbildung und modellbasierte Regelungsstrategien am Beispiel einer Biomasse-Feuerungsanlage, Habilitationsschrift, Technische Universität Graz, 2009.
- [2] R. Bauer, M. Göllles, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger, Modellierung der Druck- und Volumenstromverhältnisse in einer Biomasse-Feuerung, at – Automatisierungstechnik, 55:404–410, August 2007.
- [3] R. Bauer, M. Göllles, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger, Modellierung des dynamischen Verhaltens der Wärmeübertragung in einem Rauchrohr-Wärmeübertrager, at – Automatisierungstechnik, 56:513–520, Oktober 2008.
- [4] R. Bauer, M. Göllles, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger, Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes, Biomass and Bioenergy, 34(4):417–427, 2010.
- [5] M. Göllles , Entwicklung mathematischer Modelle einer Biomasserostfeuerungsanlage als Grundlage für modellbasierte Regelungskonzepte, Dissertationsschrift, Technische Universität Graz, 2008.
- [6] M. Göllles, R. Bauer, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger, Model based control of a biomass grate furnace. In 9th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, April 2011, ISBN 978-972-99309-6-6.
- [7] M. Göllles, S. Reiter, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger, Modelling of a small-scale biomass boiler as a basis for model based control strategies, To be published in the proceedings of the 20th European Biomass Conference & Exhibition, June 2012, Milano, Italy, ETA-Renewable Energies (Ed.), Italy.
- [8] S. Reiter, M. Göllles, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger, Modellierung einer Biomasse-Kleinfeuerungsanlage als Grundlage für modellbasierte Regelungsstrategien, Tagungsband des SSRP 2011 - 17. Steirisches Seminar über Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, 17:174-187, 2011, ISBN 978-3-901439-09-4.
- [9] J. Slotine, W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, 1991.

6 Kontaktdaten

Projektleiter:

Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger

Institut/Unternehmen und Kontaktadresse:

Bioenergy 2020+ GmbH

Inffeldgasse 21b

8010 Graz

E-Mail: office@bioenergy2020.eu

Tel.: ++43 (0) 316 873 9201

Fax.: ++43 (0) 316 873 9202

www.bioenergy2020.eu

Finanzierungspartner:

BIOS Bioenergiesysteme GmbH

Inffeldgasse 21b

8010 Graz

E-Mail: office@bios-bioenergy.at

Tel.: ++43 (0) 316 481 300

Fax.: ++43 (0) 316 481 300 4

www.bios-bioenergy.at

Fröling Heizkessel- und Behälterbau Ges.m.b.H

Industriestraße 12

4710 Grieskirchen

E-Mail: info@froeling.com

Tel.: ++43 (0) 7248 606 - 0

Fax.: ++43 (0) 7248 606 - 600

www.froeling.com

IMPRESSUM

Verfasser

Bioenergy 2020+ GmbH
Dipl.-Ing. Dr. Markus Göllles
8010 Graz; Inffeldgasse 21b
Tel: ++43 316 873 9208
Fax: ++43 316 873 9202
E-Mail: markus.goelles@bioenergy2020.eu
Web: www.bioenergy2020.eu

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH