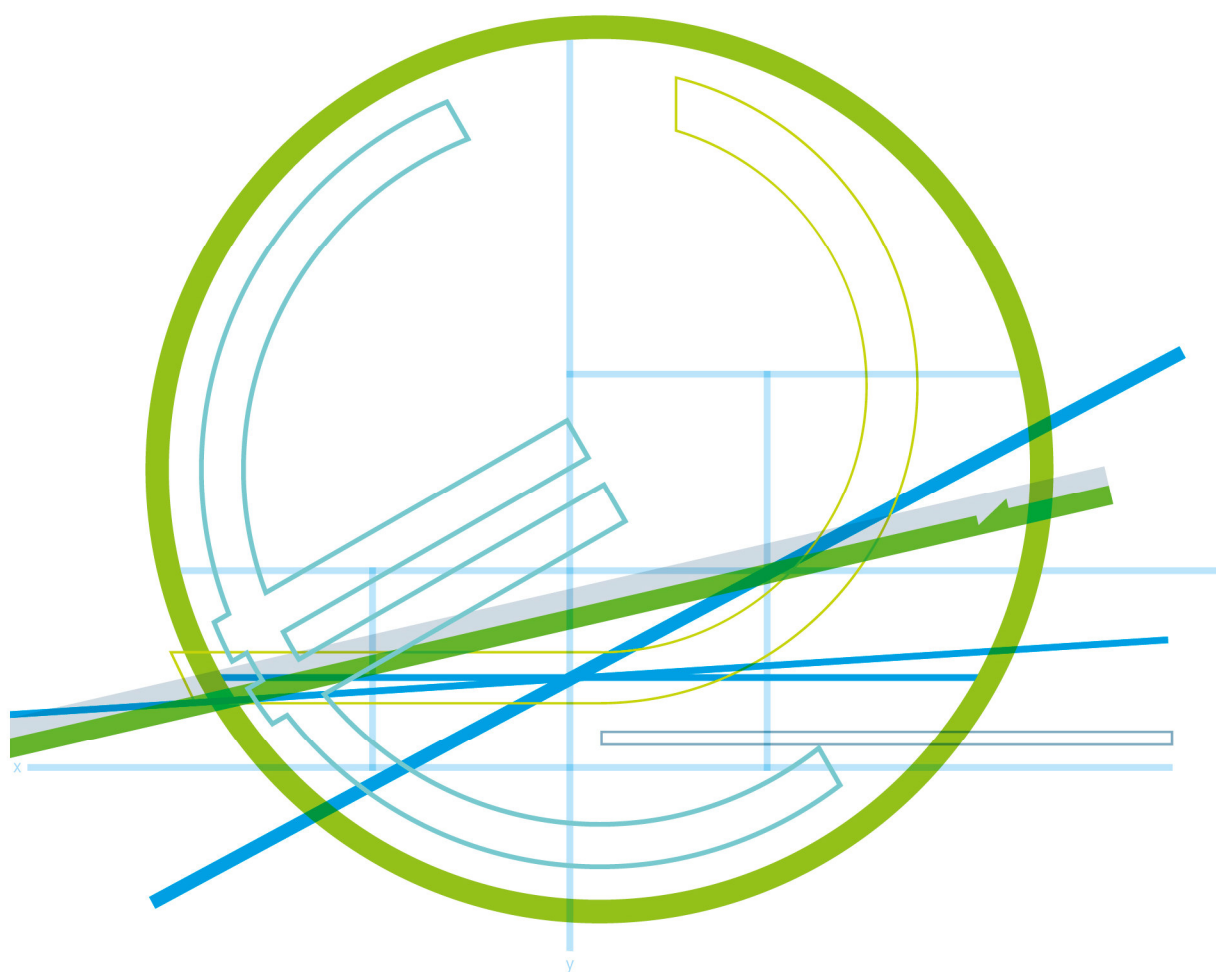


Low-Emission Hackgutfeuerung auf Basis einer modellbasierten Regelung



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

Low-Emission Hackgutfeuerung auf Basis einer modellbasierten Regelung

Autoren: **Markus Göllles (BIOENERGY 2020+ GmbH)**
 Ingwald Obernberger (BIOS Bioenergiesysteme GmbH)
 Erwin Reisenhofer (BIOS Bioenergiesysteme GmbH)
 Viktor Unterberger (BIOENERGY 2020+ GmbH)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
3.1	Anlagenbeschreibung	6
3.2	Modellbildung	7
3.2.1	Brennstoffbett	7
3.2.2	Primär- und Sekundärverbrennungszone	8
3.2.3	Wärmeübertrager	9
3.2.4	Luft- und Brennstoffzufuhr	9
3.3	Modellbasierte Regelung	10
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	16
4.1	Lastsprünge und stationärer Betrieb bei 28, 20, 12 und 9 kW	16
4.2	Jahresreferenzlastzyklus	18
4.3	Typtag Wintertag heiter	20
4.4	Sprungförmige Änderungen des Brennstoffwassergehaltes	21
4.5	Undichtes Verschließen der Aschebox	23
4.6	Zusammenfassung der Auswirkungen der modellbasierten Regelung auf die wesentlichen Betriebsparameter und der daraus resultierenden Vorteile	24
4.7	Wirtschaftliche Bewertung	25
5	Ausblick und Empfehlungen	27
6	Literaturverzeichnis	28
7	Kontaktdaten	29

2 Einleitung

Moderne Hackgut-Kleinfeuerungen zeigen unter stationären Prüfstandbedingungen sehr niedrige Emissionen und hohe Wirkungsgrade, die aber im Feldbetrieb in der Regel nicht reproduziert werden können. Grund dafür ist in erster Linie die eingesetzte Regelungsstrategie, die systembedingt nicht dazu in der Lage ist, optimierte Luftstufungseinstellungen in allen Lastzuständen zu gewährleisten, speziell auf Laständerungen nicht rasch und präzise genug reagieren kann und im Teillastbetrieb oft in einen Stop&Go-Modus schaltet. 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 Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen entwickelt und an einer kommerziell verfügbaren Kipprostfeuerung zur Verbrennung von Hackgut mit einer Kesselnennleistung von 30 kW) implementiert und experimentell verifiziert. Dabei zeigte sich eine deutliche Verbesserung des Betriebsverhaltens im Vergleich zur bisherigen Regelung [7].

Dieses Projekt zielte darauf ab, die Regelung speziell bzgl. Emissionsreduktion und Wirkungsgradsteigerung weiter zu entwickeln. Dazu sollte zunächst eine, bezüglich Feuerraumgeometrie und Luftstufung den Stand der Technik repräsentierende, Hackgut-Kleinfeuerung als Versuchsanlage im Technikum des BE2020 installiert und mit umfassender Messtechnik und Sensorik sowie einer Software-Schnittstelle zur Kommunikation mit der standardmäßig verwendeten Regelungssoftware ausgestattet werden. In weiterer Folge sollten die bereits verfügbaren mathematischen Modelle zur Beschreibung von Biomasse-Kleinfeuerungen mit Hilfe entsprechender Versuche an die Versuchsanlage angepasst sowie entsprechend weiterentwickelt werden. Die resultierenden Modelle sollten zu einem Gesamtmodell zusammengefasst werden, das die Grundlage für die Entwicklung eines modellbasierten Reglers bildet. Die entwickelte modellbasierte Regelung sollte schließlich an der Versuchsanlage implementiert, optimiert und umfassend getestet werden. Dazu waren zunächst Testläufe bei stationären Betriebsbedingungen als auch Tests mit extremen Sprüngen von Führungs- wie auch Störgrößen (z.B.: sprunghafte Änderung der Lastanforderung oder des Brennstoffwassergehaltes, etc.) vorgesehen. Im nächsten Schritt sollte ein ausführlicher Langzeittest im modulierenden Lastbetrieb durchgeführt werden. Dazu sollte ein, von BE2020 in Kooperation mit der *AEE Kärnten Salzburg*, der *FJ-BLT Biomass-Logistics-Technology Francisco Josephinum* und dem *Technologie- und Förderzentrum TFZ* in Straubing (DE) im Rahmen des Projektes *Leitfaden zur Bestimmung von Jahresnormnutzungsgrad und Jahresnormemissionsfaktoren am Prüfstand* entwickeltes Tageslastprogramm gefahren werden. Dieses 8-Stunden-Programm umfasst mehrere Lastwechselschritte und simuliert die Anforderungen an eine Biomasse-Kleinfeuerung im Feldbetrieb.

Im vorliegenden Bericht erfolgt zunächst eine inhaltliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten (Abschnitt 3). Anschließend werden ausgewählte Ergebnisse der experimentellen Verifikation der entwickelten modellbasierten Regelung dargestellt (Abschnitt 4). Abschließend wird ein Ausblick auf die empfohlenen weiteren Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zur modellbasierten Regelung von

Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen sowie deren Ausweitung auf andere Feuerungstechnologien sowie die gesamte Wärmeversorgung gegeben (Abschnitt 5).

3 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 3.1 näher erläutert wird.

Im Anschluss daran werden die mathematischen Modelle zur Beschreibung aller regelungstechnisch relevanten Anlagenteile dargestellt (Abschnitt 3.2). Diese Modelle bilden die Grundlage für die modellbasierte Regelung, die in Abschnitt 3.3 näher erläutert wird.

3.1 Anlagenbeschreibung

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um eine Wanderrostfeuerung mit einer Kesselnennleistung von 30 kW. Die Anlage verfügt über eine gestufte Luftzufuhr über getrennte Ventilatoren für Primär- und Sekundärluft, eine schamottierte Primärverbrennungszone, eine wassergekühlte Sekundärverbrennungszone, einen Rauchrohr-Wärmeübertrager mit automatischer Abreinigung und einen Rauchgasventilator. Der Brennstoff wird über zwei, durch eine Zelleradschleuse getrennte, Brennstoffschnecken zugeführt (siehe Abbildung 1).

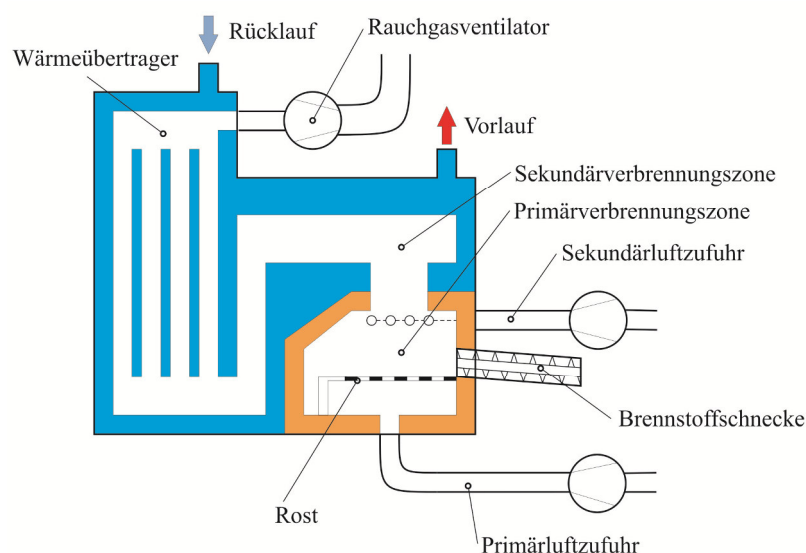


Abbildung 1: Aufbau der Versuchsanlage

Für die durchgeführten Untersuchungen wurde die Anlage mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet, die eine Erfassung der folgenden Größen ermöglicht:

- Druck an ausgewählten Positionen
 - unter und über dem Rost
 - vor und nach dem Rauchgasventilator
- Temperatur der zugeführten Luft
- Temperatur des Rauchgases an ausgewählten Positionen

- am Ende der Primärverbrennungszone
- nach dem Rauchgasventilator
- Massenströme der zugeführten Stoffströme
 - Primärluft
 - Sekundärluft
 - Brennstoff
- Massenstrom des ausgestoßenen Rauchgases
- Konzentration wesentlicher Komponenten im Rauchgas
 - Sauerstoff
 - Kohlenmonoxid
 - Stickoxide
- Temperatur des in den Wärmeübertrager ein- und austretenden Wasserstromes
 - Vorlauftemperatur
 - Rücklauftemperatur
- Massenstrom des den Wärmeübertrager durchströmenden Wasserstromes

3.2 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 des Wärmeübertragers dar, da dieser zur Vereinfachung der Montage aus einer Hintereinanderschaltung von zwei kleineren Rauchrohr-Wärmeübertragern besteht. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine Erläuterung der einzelnen Modelle.

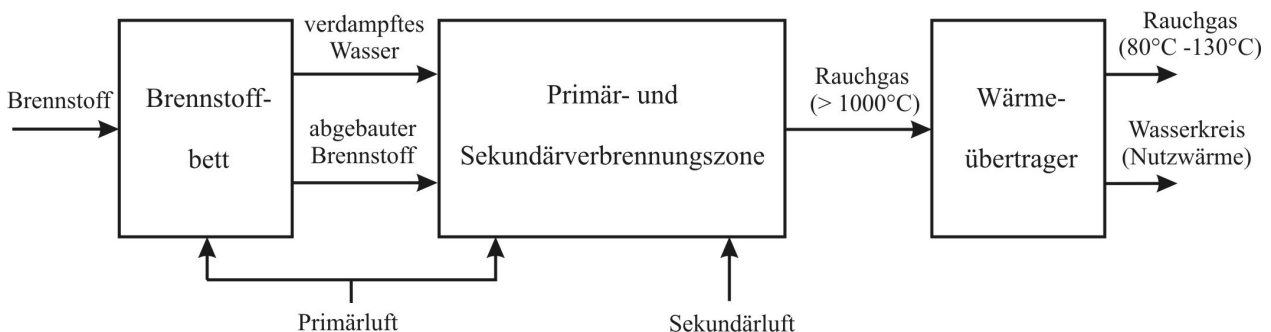


Abbildung 2: Struktur des mathematischen Modells

3.2.1 Brennstoffbett

Die Modellierung des Brennstoffbettes basiert auf dem in [4] für die Verbrennung von Hackgut auf dem Flachscharrost einer mittelgroßen Biomassefeuerungsvorrichtung vorgeschlagenen Modell, das auch das Abbrandverhalten auf dem untersuchten Wanderrost der Kleinfeuerungsvorrichtung hinreichend genau

beschreibt. 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}

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

$$\frac{dm_{CHO}(t)}{dt} = - \underbrace{c_{Abb} [\dot{m}_{PL}(t) + \dot{m}_{PL0}]}_{\text{abgebauter trockener Brennstoff}} m_{CHO}(t) + \underbrace{\frac{dm_{CHO,ein}(t - T_t(t))}{dt}}_{\text{zugeführter trockener Brennstoff}} \quad (2)$$

Hierbei sind c_{Verd} , c_{Abb} und $\dot{m}_{PL0}$ konstante Parameter, $\dot{m}_{PL}$ der Primärluftmassenstrom, $m_{W,ein}$ die um eine Totzeit T_t verzögerte kumulierte Wassermasse und $m_{CHO,ein}$ der um eine Totzeit verzögerte kumulierte trockene Brennstoff. Die kumulierte Wassermasse $m_{W,ein}$ und der kumulierte trockene Brennstoff $m_{CHO,ein}$ 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 $\dot{m}_{CHO}$ berechnet:

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

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

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 $\dot{m}_{CHO}$ ab und wird durch die Gleichung

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

mit dem konstanten Parameter $c_{T,BB}$ hinreichend genau beschrieben.

3.2.2 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 berechnet, z.B. [1,5].

Wie auch schon bei den Untersuchungen in Vorarbeiten zur modellbasierten Regelung von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen [6,9] hat sich auch im Zuge dieses Projektes herausgestellt, dass die Speicherwirkung der feuerfesten Auskleidung wie auch die Umgebungsverluste für regelungstechnische Fragestellungen vernachlässigt werden können. Somit kann für die nachfolgende Modellierung des Wärmeübertragers davon näherungsweise ausgegangen werden, dass nach der Verbrennung Rauchgas mit der adiabaten Verbrennungstemperatur zur Verfügung steht.

3.2.3 Wärmeübertrager

Aufgrund des geänderten Aufbaus des Wärmeübertragers, waren Modifikationen des mathematischen Modells gegenüber den bisherigen Arbeiten zur modellbasierten Regelung von Biomassefeuerungsanlagen mit Rauchrohr-Wärmeübertragern (Warm- und Heißwasserkessel in Leistungsbereichen von 30 kW bis 15 MW) erforderlich. Zur Vereinfachung der Montage besteht der Wärmeübertrager der im Rahmen dieses Projektes untersuchten, Biomasse-Kleinfeuerung aus zwei Teilen, die über ein Rohr miteinander verbunden sind. Die beiden einzelnen Wärmeübertrager können für sich gleich wie die bisherigen Rauchrohr-Wärmeübertrager durch je eine algebraische Gleichung für den Rauchgasteil

$$\dot{Q} = c_{WT} [T_{RG} - T_w]^{q_1} \dot{m}_{RG}^{q_2} \quad (1)$$

und eine Differentialgleichung erster Ordnung für den Wasserteil

$$\frac{dT_{VL}}{dt} = -\frac{\dot{m}_w}{c_{T,WT}} T_{VL} + \left[\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_w c_w} + T_{RL} \left(t - \frac{c_{T,WT}}{\dot{m}_w} \right) \right] \quad (2)$$

modelliert werden [3], wobei die Modellparameter (c_{WT} , q_1 , q_2 , $c_{T,WT}$, $c_{T,WT}$) getrennt für den jeweiligen Teil ermittelt wurden. 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, T_{VL} der Vorlauftemperatur, $\dot{m}_w$ dem Wassermassenstrom, c_w der spezifischen Wärmekapazität von Wasser und T_{RL} der Rücklauftemperatur.

Die beiden Wärmeübertrager sind so verschaltet, dass der Rücklauf zunächst in den als zweiten vom Rauchgas durchströmten Wärmeübertrager eintritt, und das darin erwärmte Wasser tritt in weiterer Folge in den als ersten vom Rauchgas durchströmten Wärmeübertrager ein. Die Temperatur des Wassers beim Übertritt vom ersten in den zweiten Wärmeübertrager ($T_{VL1} = T_{RL2}$) soll in weiterer Folge mit T_{Mitte} bezeichnet werden.

Wie in Abschnitt 3.2.2 erwähnt, können die Speicherwirkung der feuerfesten Auskleidung der Primärzone und auch die Umgebungsverluste vernachlässigt werden. Somit wird die Rauchgaseintrittstemperatur gleich der adiabaten Verbrennungstemperatur

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

gesetzt.

3.2.4 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 Druckanhebung 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. Zu dessen mathematischer Beschreibung wurde die Abhängigkeit des zugeführten Brennstoffmassenstromes von der Einschaltzeit der Brennstoffzufuhr wie in den durchgeführten Vorarbeiten zur modellbasierten Regelung von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen durch einen einfachen affinen Zusammenhang beschrieben [6,9].

Die Modellierungen der Luftzufuhr, des Falschlufteintrages und der Druckanhebung 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 Drehzahl des jeweiligen Ventilators, 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.

3.3 Modellbasierte Regelung

Für den Reglerentwurf war es erforderlich die entwickelten Teilmodelle zunächst zu einem Gesamtmodell zusammenzufassen. Im Gesamtmodell werden die einzelnen Teilmodelle so miteinander kombiniert, dass jeweils die Ausgangsgrößen eines Teilmodells als Eingangsgrößen des nachfolgenden Modells verwendet werden (siehe Abbildung 2).

Um das resultierende Gesamtmodell für den Entwurf einer modellbasierten Regelung verwenden zu können, ist es hilfreich die verschiedenen Größen zu charakterisieren und eine systematische Notation einzuführen. Hierbei ist es üblich für jede Kategorie von Größen die gleichen Symbole zu verwenden. So

werden die Zustandsgrößen üblicherweise mit x , die beeinflussbaren Eingangsgrößen (Stellgrößen) mit u , die nicht beeinflussbaren Eingangsgrößen (Störgrößen) mit d und die Modellkonstanten mit c gekennzeichnet. Für die betrachtete Anlage ergibt sich damit ein Modell bestehend aus vier gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung (siehe Abbildung 3).

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= -\frac{c_{11}}{1 + c_{12}d_1}x_1 + \frac{d_1}{1 + c_{12}d_1}u_1 \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{c_{21}}{1 + c_{12}d_1}x_1 - c_{22}x_2u_2 + \frac{1}{1 + c_{12}d_1}u_1 \\ \frac{dx_3}{dt} &= c_{31}d_3 [d_4 - x_3] + c_{32} [c_{61}x_1 + c_{62}x_2u_2 + [c_{63} + c_{64}d_2] u_3] + c_{33} \\ \frac{dx_4}{dt} &= c_{41}d_3 \left[x_3 \left(t - \frac{c_{Tt,WT2}}{d_3} \right) - x_4 \right] + c_{42} [c_{61}x_1 + c_{62}x_2u_2 + [c_{63} + c_{64}d_2] u_3] + c_{43}\end{aligned}$$

Abbildung 3: Reglerentwurfsmodell

Erläuterungen: x ...Zustandsvariablen, u ...Eingangsgrößen, d ...Störgrößen, c ...Konstanten

Die vier Zustandsvariablen entsprechen dabei der Masse an Wasser in der Verdampfungszone $x_1 = m_{H_2O,Zone}$, der Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone $x_2 = m_{CHO,Zone}$, der Temperatur des Wassers beim Übertritt vom ersten in den zweiten Wärmeübertrager T_{Mitte} und der Vorlauftemperatur T_{VL} . Die Beeinflussung des Systems erfolgt über die zugeführten Stoffströme an Brennstoff, Primär- und Sekundärluft, wobei u_1 den trockenen Brennstoffmassenstrom, u_2 den Primärluftmassenstrom und u_3 den gesamten zugeführten Luftmassenstrom repräsentiert.

Der erste Schritt zur Regelung ist die Wahl der zu regelnden Größen. Bei den ersten beiden gewählten Regelgrößen, dem Sauerstoffgehalt des Rauchgases $y_1 = x_{O_2,RG}$ und der Vorlauftemperatur $y_2 = T_{VL}$, handelt es sich um wesentliche Betriebsparameter die üblicherweise auch von konventionellen Regelungen geregelt werden. Um die drei Stellgrößen eindeutig vorgeben zu können, ist aber eine dritte Regelgröße erforderlich, wofür die Menge an trockenem Brennstoff in der Abbauzone $y_3 = m_{CHO,Zone}$ gewählt wurde. Dabei wird die Führungsgröße für den Brennstoff am Rost stets so an die Leistung angepasst, dass sich dafür im eingeschwungenen Zustand ein gewünschtes Luftverhältnis im Brennstoffbett λ_{BB} einstellt.

Das grundsätzliche Ziel der Regelung ist die Kompensation der nichtlinearen und verkoppelten Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen, wozu das Verfahren der exakten Eingangs-Ausgangslinearisierung verwendet wurde. Die grundlegende Idee dieses Verfahrens ist es, die Verkopplungen und Nichtlinearitäten eines Mehrgrößensystems, wie es auch eine Biomassefeueungsanlage ist, durch eine geeignete Zustandsrückkopplung zu kompensieren (Abbildung 4).

Dadurch ergibt sich ein Gesamtsystem, bestehend aus Zustandsrückkopplung und Biomassefeueungsanlage, 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.

Aufgrund der Hintereinanderschaltung der beiden getrennten Wärmeübertrager, ist dieses Verfahren aber nicht unmittelbar zur Regelung der Vorlauftemperatur anwendbar. Die bereits von den Stellgrößen beeinflusste Wassertemperatur beim Übertritt vom ersten in den zweiten Wärmeübertrager T_{Mitte} , durchläuft anschließend eine weitere Totzeit im zweiten Wärmeübertrager, bevor sie noch einmal von

den Stellgrößen beeinflusst wird. Dieses Problem konnte aber elegant umgangen werden, indem die exakte Linearisierung nicht die Vorlauftemperatur sondern den rauchgasseitig abgegebenen Wärmestrom regelt. Die Führungsgröße dafür wird von einer überlagerten Leistungsregelung vorgegeben.

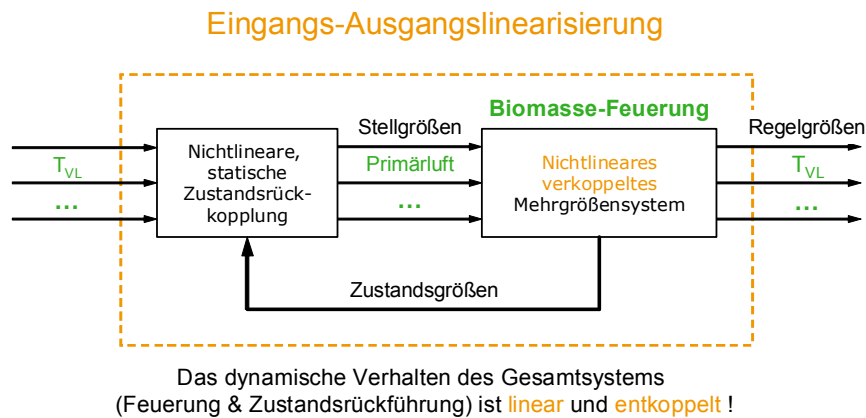


Abbildung 4: Grundprinzip der exakten Eingangs-Ausgangslinearisierung

Die Leistungsregelung berechnet zunächst den im eingeschwungenen Zustand erforderlichen Wärmestrom zur Erreichung der geforderten Vorlauftemperatur bei aktueller Rücklauftemperatur und aktuellem Wassermassenstrom sowie die im eingeschwungenen Zustand in den beiden Wärmeübertragern gespeicherte Wärmemenge. Zusätzlich dazu wird mit Hilfe des mathematischen Modells des Wärmeübertragers die aktuell im Wärmeübertrager gespeicherte Wärmemenge ermittelt. Von der unterlagerten exakten Linearisierung wird grundsätzlich der für den eingeschwungenen Zustand erforderliche Wärmestrom gefordert, der zusätzlich durch die Verwendung eines sehr langsam eingestellten PI-Reglers korrigiert wird, wenn die aktuell im Wärmeübertrager gespeicherte Wärmemenge von der im eingeschwungenen Zustand abweicht (siehe Abbildung 5).

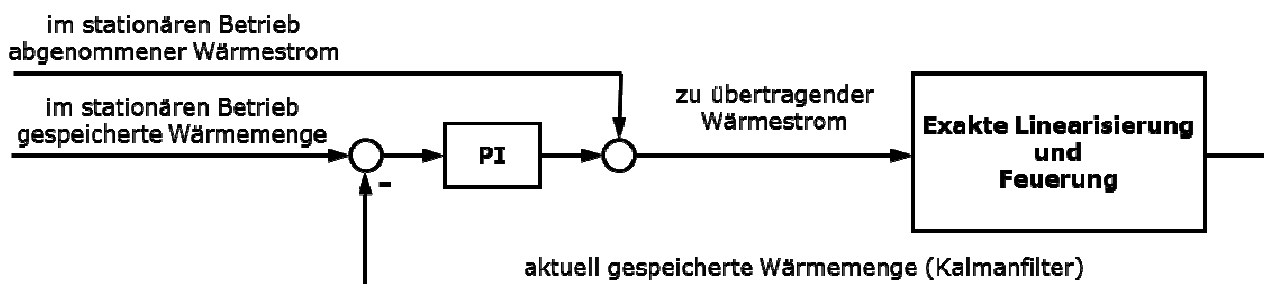


Abbildung 5: Struktur der übergeordneten Leistungsregelung

Für die Regelung der Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone ist die Methode der exakten Eingangs-Ausgangslinearisierung aufgrund der Totzone im Brennstoffbett ebenfalls nicht geeignet, da der zu einem bestimmten Zeitpunkt benötigte Brennstoffmassenstrom bereits in der Vergangenheit hätte zugeführt werden müssen. Nachdem die Brennstoffzufuhr aber prinzipbedingt nicht zur Realisierung kurzfristiger Leistungsänderungen verwendet werden kann (diese müssen durch Variation der Primärluft bewerkstelligt werden) sondern nur der langfristigen Leistungsvorgabe dient, wurde die in Abbildung 6 dargestellte Strategie zur Vorgabe der Brennstoffzufuhr und somit zur Regelung der Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone y_3 verwendet.

Dabei 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 mit dem Kalmanfilter geschätzte Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone y_3 nicht der Führungsgröße r_3 entspricht.

Sowohl die Regelung des Sauerstoffgehaltes und der Vorlauftemperatur (Exakte Eingangs-Ausgangslinearisierung mit übergeordneter Leistungsregelung) als auch der Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone (Abbildung 6) benötigen die Kenntnis der Zustandsgrößen des Systems (Masse an Wasser in der Verdampfungszone x_1 , Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone x_2 , Wassertemperatur beim Übergang vom ersten in den zweiten Wärmeübertrager x_3 , Vorlauftemperatur x_4). Da diese abgesehen von der Vorlauftemperatur nicht gemessen werden können, wird 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 sowie die Vorlauftemperatur verwendet. Um die Zustandsgrößen auch bei unbekannten Störungen (z.B. Falschluff) noch richtig zu schätzen, wurde das Modell um drei zusätzliche Zustandsgrößen (Falschluffmassenstrom, Abbaufaktor, Brennstoffzufuhrfaktor) erweitert.

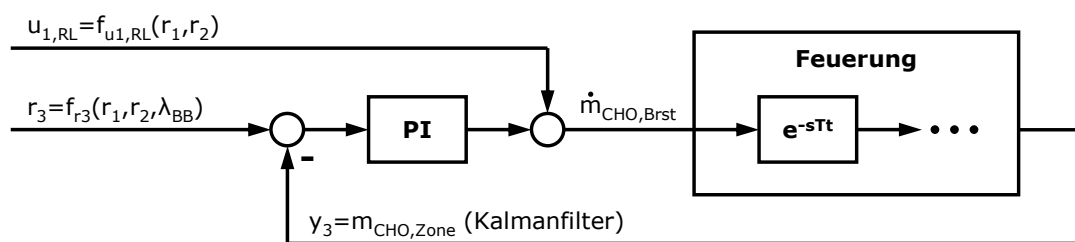


Abbildung 6: Reglerstruktur – Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone

Erläuterungen: r_1 ... Führungsgröße für den Sauerstoffgehalt des Rauchgases, r_2 ... Führungsgröße für die Vorlauftemperatur, r_3 ... Führungsgröße für die Masse an trockenem Brennstoff auf dem Rost, $u_{1,RL}$... für den stationären Betrieb bei der aktuell geforderten Leistung erforderlicher (trockener) Brennstoffmassenstrom, λ_{BB} ... gewünschtes Luftverhältnis im Brennstoffbett, $y_3 = m_{CHO,Zone}$... geschätzte Masse an trockenem Brennstoff in der Abbauzone (wird mit einem erweiterten Kalmanfilter geschätzt, siehe folgende Erläuterungen), $\dot{m}_{CHO,Brst}$... zugeführter (trockener) Brennstoffmassenstrom

Bei den vom Regler berechneten Stellgrößen handelt es sich um die zuzuführenden Massenströme an Brennstoff, Primär- und Sekundärluft. Um diese umzusetzen mussten noch entsprechende Ansteuerstrategien für die Brennstoffschnecke sowie den Primär- und Sekundärluftventilator entwickelt werden, die im Wesentlichen auf den dafür entwickelten Modellen (Versorgung) basieren.

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 7).

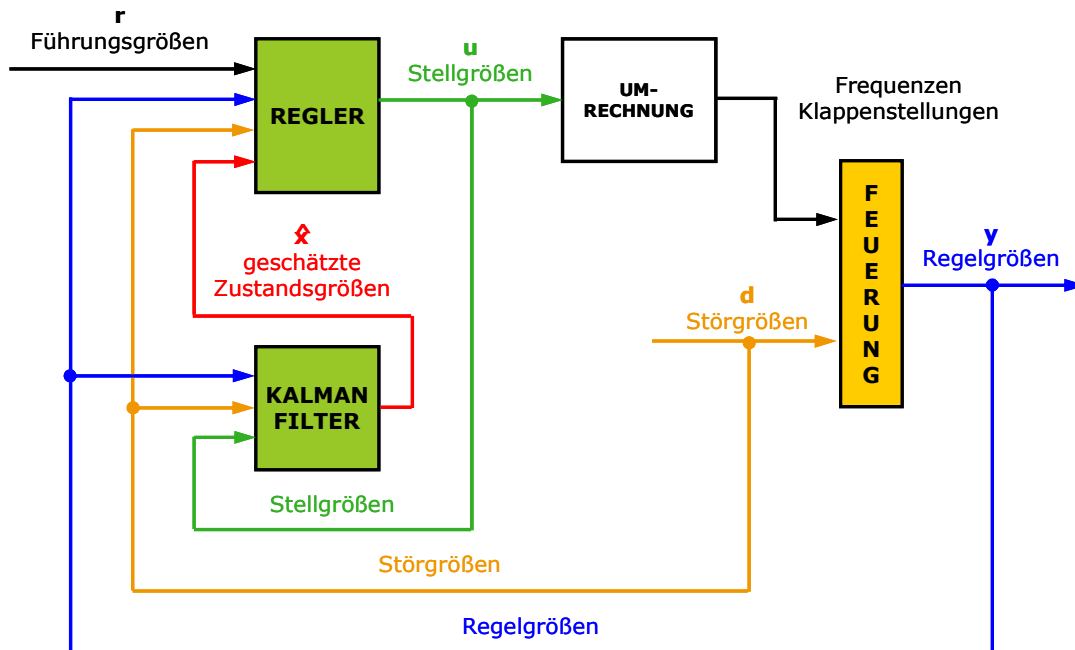


Abbildung 7: Grundlegende Struktur der gesamten Regelung

Zur Verbesserung der Ausbrandregelung wurde die Regelung zusätzlich noch um eine ihr vorgeschaltete Ausbrandregelung erweitert, die in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen die Führungsgröße für den Restsauerstoffgehalt r_1 variiert. Dazu wurde die Regelung anstatt des üblichen Ansatzes eines Suchalgorithmus für den optimalen Betriebspunkt im Sinne der CO- λ -Charakteristik um eine kontinuierliche Schätzung der CO- λ -Charakteristik, unter Verwendung eines Sensors zur kombinierten Messung von Sauerstoff und unverbrannten Komponenten, erweitert. Abbildung 8 zeigt die Grundstruktur der entwickelten Ausbrandregelung (CO- λ -Regelung). Dabei werden die Messwerte für den Sauerstoffgehalt $x_{O_2, RG}$ sowie die CO-Konzentration $x_{CO, RG}$ des Rauchgases zu einer laufenden Schätzung der aktuellen CO- λ -Charakteristik mit Hilfe eines Kalmanfilters verwendet. Anschließend wird das Minimum der geschätzten CO- λ -Charakteristik ermittelt und zur Bestimmung des von der Regelung zu fordernden Sauerstoffgehaltes (etwas unter dem Minimum der CO- λ -Charakteristik) verwendet. Um zu schnelle Variationen zu vermeiden wird das erhaltene Signal noch mit einem Tiefpass 1. Ordnung gedämpft und schlussendlich als Führungsgröße für den Restsauerstoffgehalt $x_{O_2, RG, Soll}$ (im Falle der modellbasierten Regelung r_1) verwendet. Diese Vorgehensweise ist somit nicht nur auf die modellbasierte Regelung beschränkt, sondern könnte auch in Kombination mit konventionellen Regelungen eingesetzt werden.

Dieser Ansatz hat im Unterschied zu den bisher üblichen Suchalgorithmen vor allem den Vorteil, dass die Führungsgröße für den Restsauerstoffgehalt nicht laufend variiert werden muss, sondern stets auf den optimalen Punkt der geschätzten Kurve gesetzt wird. Dadurch wird der optimale Punkt im Sinne der CO- λ -Charakteristik einerseits schneller erreicht und im eingeschwungenen Zustand wird die Anlage auch wirklich am optimalen Punkt betrieben, wohingegen bei den bisher üblichen Suchalgorithmen es auch im eingeschwungenen Zustand zu einem ständigen Alternieren um den eigentlich gewünschten Punkt kommt.

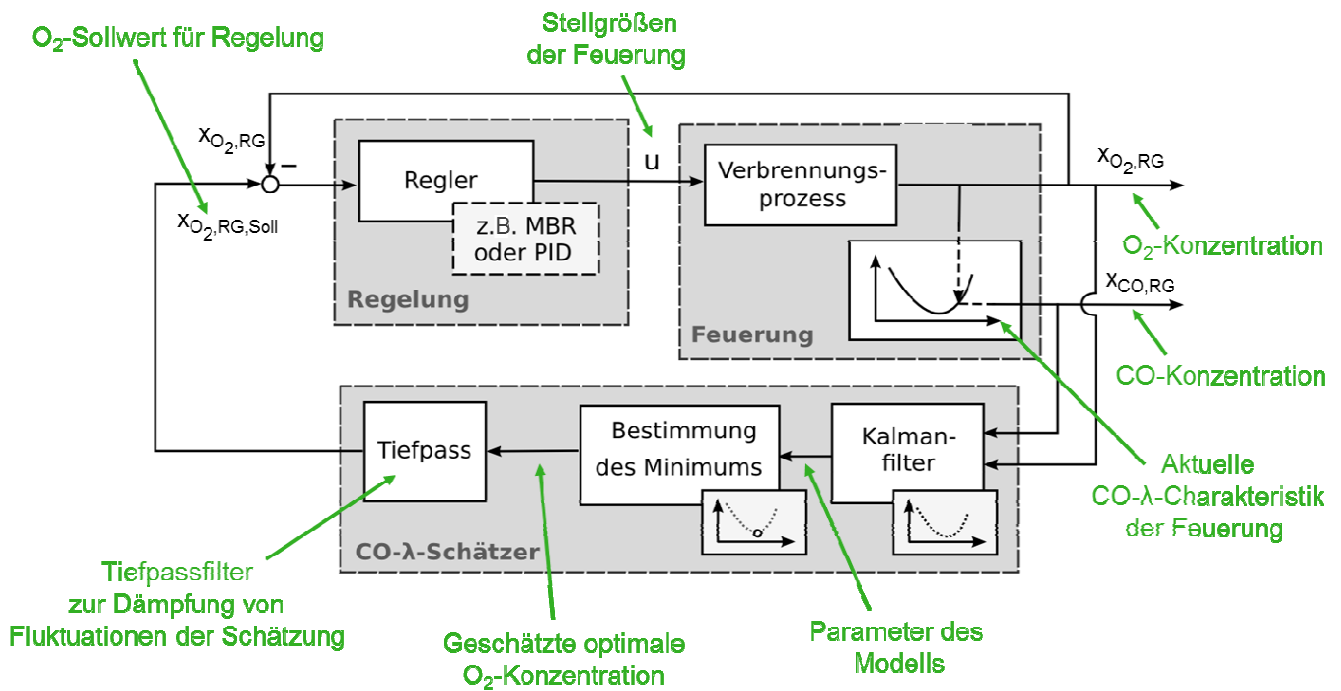


Abbildung 8: Funktionsprinzip der Ausbrandregelung (CO- λ -Regelung)

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die entwickelte modellbasierte Regelung wurde schlussendlich an der Versuchsanlage implementiert, optimiert und durch umfassende Testläufe experimentell validiert. Die Grundlage für die Bewertung bildeten der Vergleich von Betriebsdaten mit der modellbasierten und der konventionellen Regelung für verschiedene Testläufe. Dabei wurden die wesentlichen Betriebsparameter (Vorlauftemperatur, auf Wasserkreis übertragene Wärme, Restsauerstoffgehalt – entspricht dem Gesamtluftverhältnis im Rauchgas, Luftverhältnis im Brennstoffbett – entspricht der Luftstufung) sowie die wesentlichen Schadstoffemissionen (CO, NO_x, Gesamtstaub- und Feinstaub) gegenüber gestellt.

Die zur Bewertung herangezogenen Testläufe beinhalten stationären Betrieb bei verschiedenen Leistungen zwischen 30 und 100% der Nennleistung, sprungförmige Änderungen verschiedener Betriebsparameter (Rücklauftemperatur, Wassermassenstrom, Führungsgrößen für die geregelten Werte – Vorlauftemperatur, Restsauerstoffgehalt und Luftverhältnis im Brennstoffbett), sprungförmige Brennstoffänderungen (insbesondere des Wassergehaltes), verschiedene Lastzyklen (beliebig selbst definierte Zyklen, Jahresreferenzlastzyklus, Typtage) sowie Testläufe zur Simulation typischer Benutzerfehler bzw. für die Beurteilung der Robustheit der modellbasierten Regelung relevanten Untersuchungen (unvollständiges Schließen der Aschebox, Aushungern und Befüllen des Brennstoffvorratsbehälters, Drift des Sauerstoffsensors). Zusätzlich zur Bewertung des unmittelbaren Regelungsverhaltens und dessen Auswirkung auf die wesentlichen Prozessgrößen und Schadstoffemissionen wurde auch das Potential zur Nutzungsgraderhöhung und der dadurch möglichen CO₂-Einsparungen sowie Einsparungen an Brennstoffkosten bewertet. Abschließend wurde auch eine wirtschaftliche Bewertung basierend auf einer Vollkostenrechnung durchgeführt.

In der Folge werden beispielhafte Ergebnisse für

- Lastsprünge und stationären Betrieb bei 28, 20, 12 und 9 kW,
- den Jahresreferenzlastzyklus,
- den Typtag *Wintertag heiter*,
- sprungförmige Änderungen des Brennstoffwassergehaltes und
- undichtes Verschließen der Aschebox

dargestellt.

Im Anschluss daran werden die Auswirkungen der modellbasierten Regelung auf die wesentlichen Betriebsparameter zusammengefasst und abschließend wird eine wirtschaftliche Bewertung am Beispiel einer Kleinfeuerungsanlage mit einer Nennleistung von 15 kW dargestellt.

4.1 Lastsprünge und stationärer Betrieb bei 28, 20, 12 und 9 kW

Nach dem Hochfahren der Anlage aus dem kalten Zustand wurde sie jeweils für 3 h bei einer konstanten Lastabnahme von 28, 20, 12 und 9 kW betrieben. Wie Abbildung 9 zeigt, ist die modellbasierte Regelung in allen Lastzuständen in der Lage den geforderten Wärmestrom bereitzustellen und kann auch den Laständerungen problemlos nachkommen, wohingegen es bei der Standardregelung, insbesondere bei Lastabnahme, zu Abschaltungen kommt (siehe Abbildung 10). Abbildung 10 zeigt den zugehörigen Restsauerstoffgehalt des Rauchgases, der durch die modellbasierte Regelung im Mittel um ca. 1 Vol.%

abgesenkt werden konnte. Zusätzlich dazu betrieb die modellbasierte Regelung die Feuerung im Mittel auch bei einem leicht niedrigeren Luftverhältnis im Brennstoffbett (0,76 statt 0,81). Wie bei allen weiteren Bewertungen, wurden die Abschaltphasen dabei nicht mitbewertet.

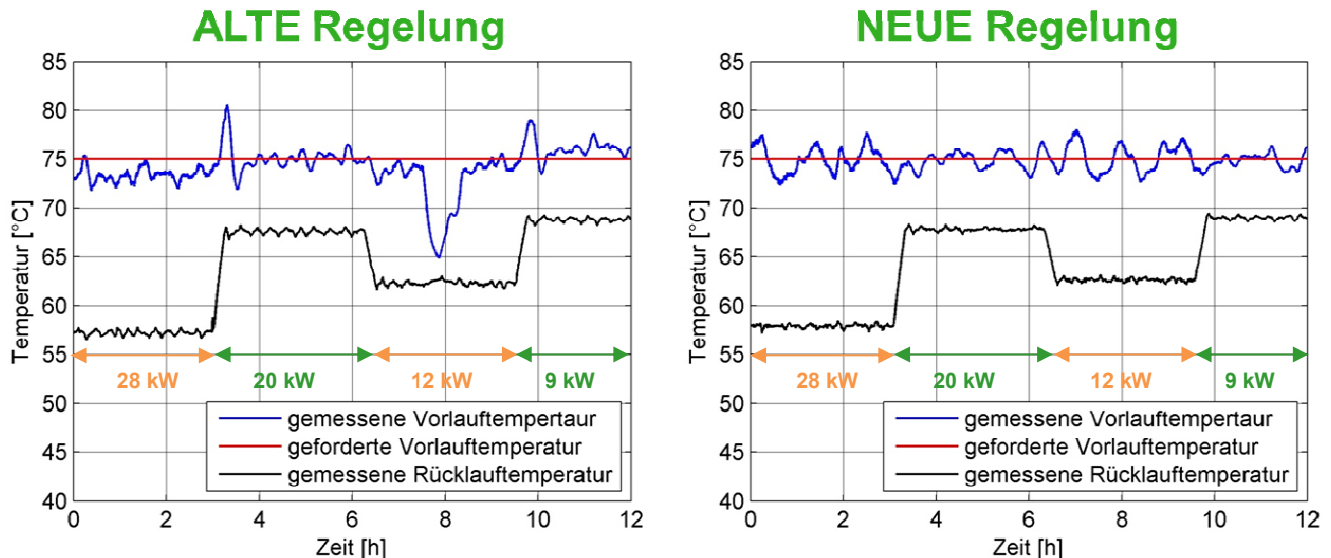


Abbildung 9: Vor- und Rücklauf Temperatur bei stationärem Betrieb und Lastsprüngen

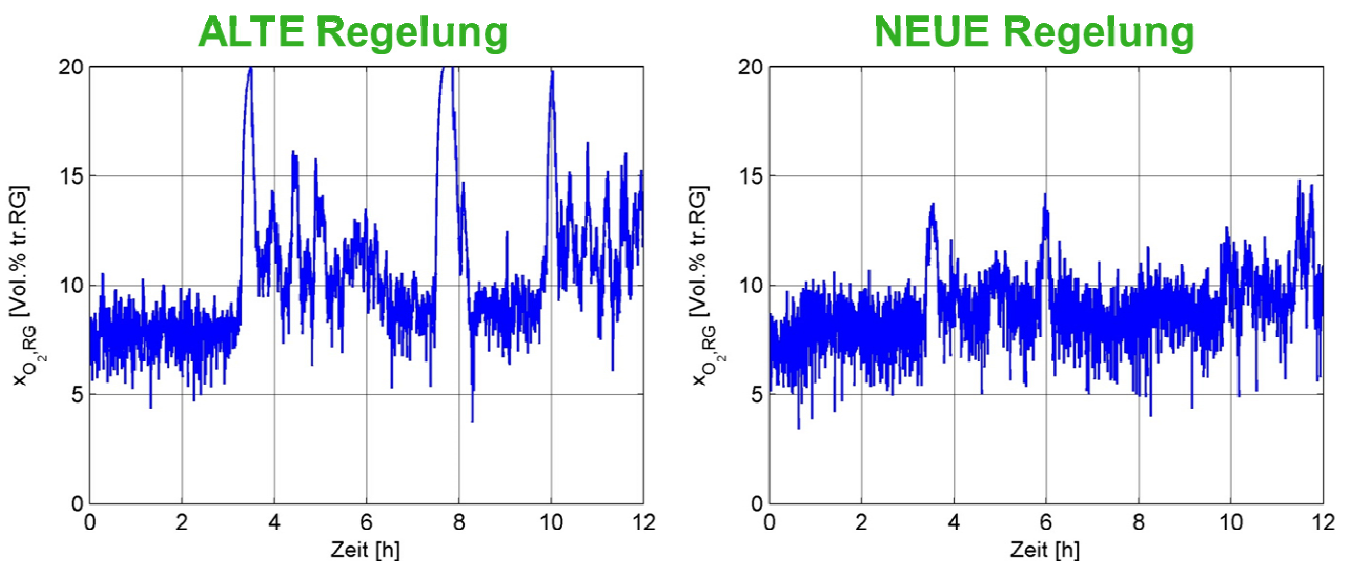


Abbildung 10: Sauerstoffgehalt bei stationärem Betrieb und Lastsprüngen

Schlussendlich ergab sich daraus eine Absenkung der mittleren CO-Emissionen um ca. 40% von 260 auf 154 mg / MJ $H_{u, Brst}$ (siehe Abbildung 11). Zusätzlich dazu wurde eine Bewertung der Gesamtstaub- und Feinstaubemissionen vorgenommen, wobei jeweils 3 Wiederholungsmessungen im stationären Betrieb bei 28, 20 und 12 kW zur Verfügung standen. Schlussendlich ergab sich eine Reduktion der Gesamtstaubemissionen um 15 bis 30% und eine Reduktion der Feinstaubemissionen um 15 bis 45% (siehe Tabelle 1).

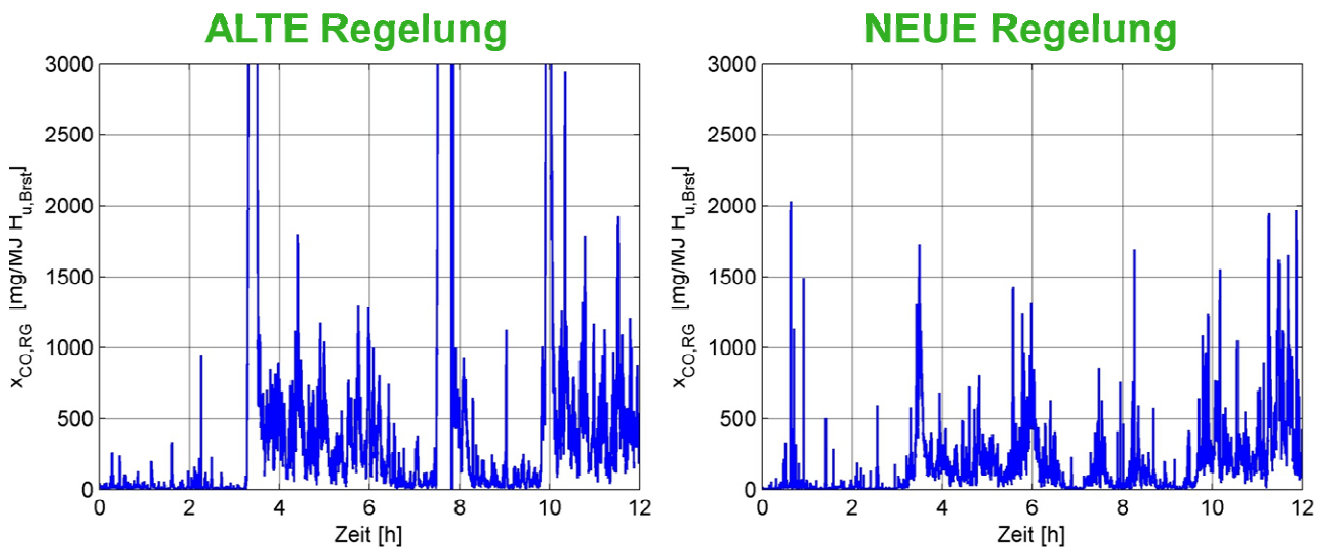


Abbildung 11: CO-Emissionen bei stationären Betrieb und Lastsprüngen

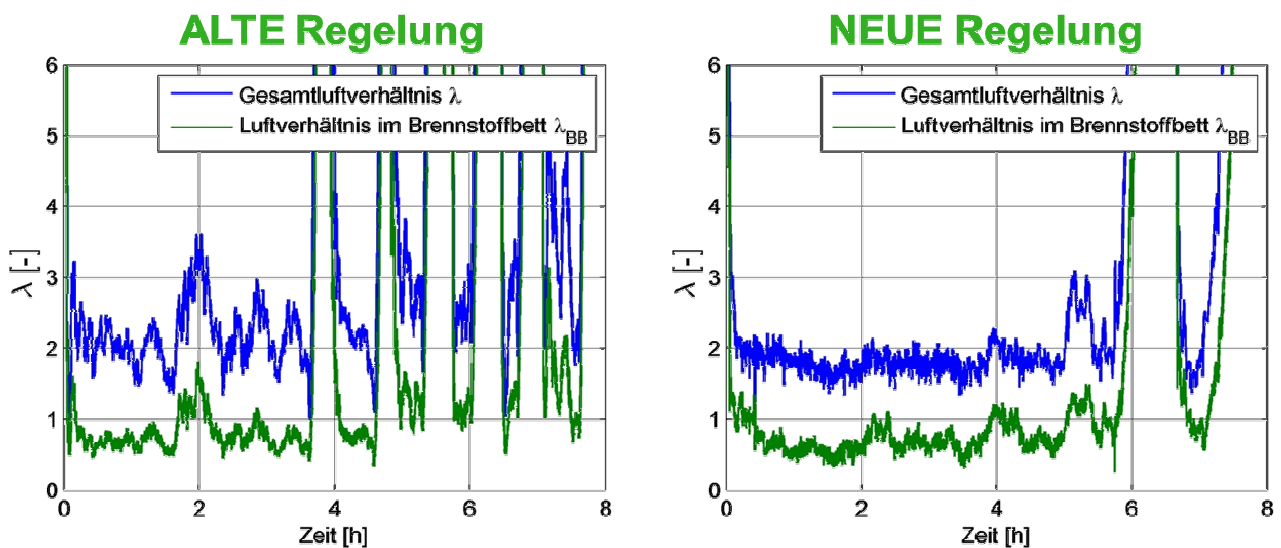
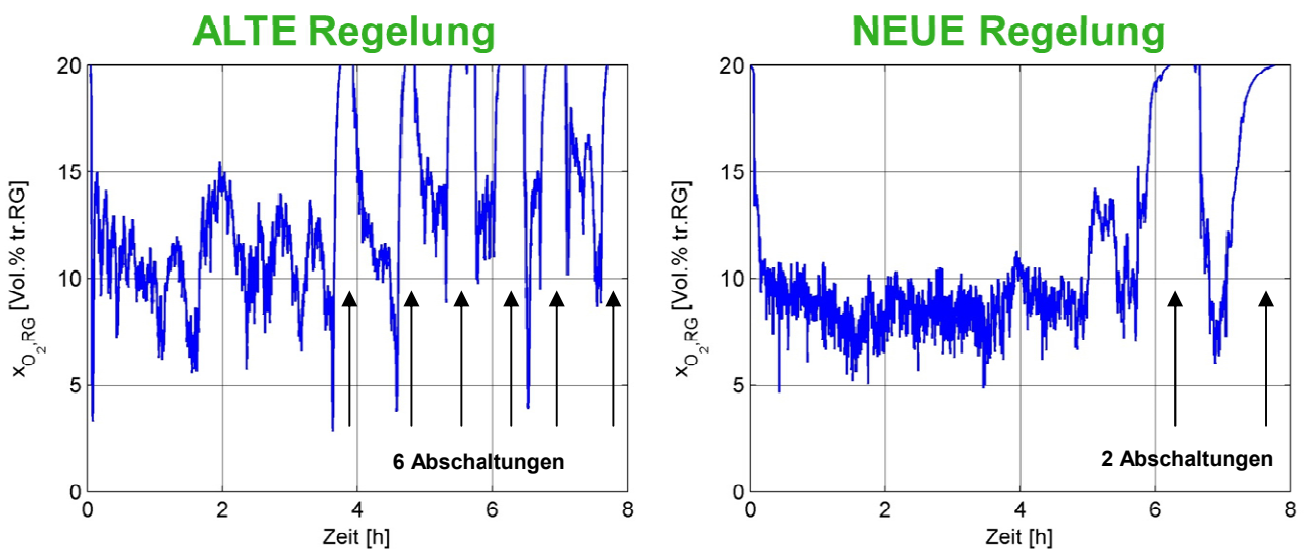
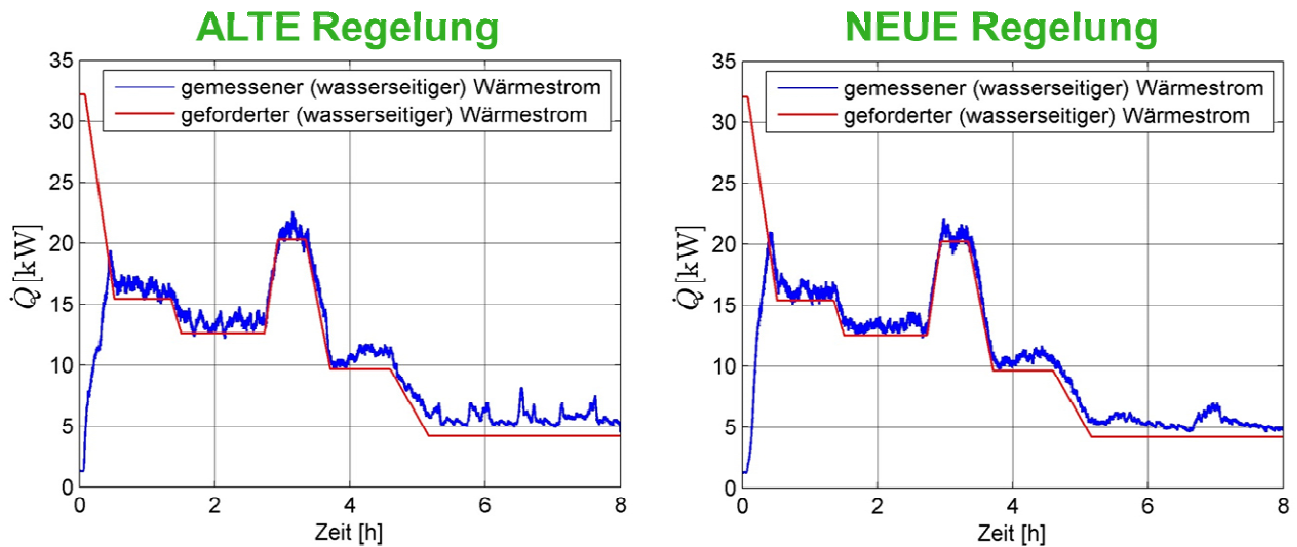
Tabelle 1: Mittelwerte der Staubemissionen in Abhängigkeit der Lastanforderung

	Gesamtstaub			Feinstaub		
	Mittelwerte [mg/Nm³ 13%O2 tr.RG]			Mittelwerte [mg/Nm³ 13%O2 tr.RG]		
Leistung	28 kW	20 kW	12 kW	28 kW	20 kW	12 kW
ALTE Regelung	34,2	26,9	31,8	22,7	19,0	17,4
NEUE Regelung	23,9	23,0	19,2	19,4	11,7	9,2

4.2 Jahresreferenzlastzyklus

Abbildung 12 zeigt den zeitlichen Verlauf des vom Wasserkreis abgenommenen Wärmestromes beim Jahresreferenzlastzyklus [8]. Der Jahresreferenzlastzyklus wurde entwickelt, um den typischen durchschnittlichen Lastverlauf einer Biomassekesselanlage über eine Heizungsperiode näherungsweise durch ein 8h-Lastprofil anzunähern. Dabei wurde die Anlage mit Hilfe eines speziellen Hydraulikteststandes so betrieben, dass jeweils maximal der in Abbildung 12 rot gekennzeichnete Wärmestrom abgenommen wurde. War der von der Biomassefeuerung bereitgestellte Wärmestrom unter dieser Grenze, so wurde genau die bereitgestellte Wärme abgenommen. Dabei wurde die Anlage grundsätzlich mit konstantem Wassermassenstrom betrieben und die Rücklauftemperatur gemäß des abnehmenden Wärmestromes variiert. Erst wenn die Rücklauftemperatur 55°C unterschritten hätte, wurde sie auf diesem Wert konstant gehalten, was genau dem Verhalten einer Rücklauftemperaturanhebung auf 55°C entspricht. Die geringfügigen mittleren Abweichungen der beiden Kurven resultieren aus den unisolierten Verbindungsleitungen, wodurch real etwas mehr Wärme von der Biomassefeuerung produziert wurde, als der Hydraulikteststand abgenommen hat.

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die zugehörigen Verläufe des Sauerstoffgehaltes und des Luftverhältnisses im Brennstoffbett.



Die modellbasierte Regelung war in der Lage die Anzahl der Abschaltungen um 2/3 von 6 auf 2 zu reduzieren, und darüber hinaus bei einem um ca. 2 Vol.% niedrigeren Sauerstoffgehalt (9,3 statt 11,4 Vol.% tr. RG) sowie einem stabileren und im Mittel um 0,13 niedrigeren (0,81 statt 0,94) Luftverhältnis im Brennstoffbett zu betreiben. Dadurch ergab sich schlussendlich auch eine Reduktion der mittleren CO-Emissionen durch die modellbasierte Regelung um ca. 45% von 1.222 auf 689 mg / MJ $H_{u,Brst}$. Der zeitliche Verlauf der CO-Emissionen ist in Abbildung 15 dargestellt. Die vergleichsweise hohen Werte liegen unter anderem auch an dem, mit einem Wassergehalt von 29 Gew.% FS, vergleichsweise feuchten Brennstoff.

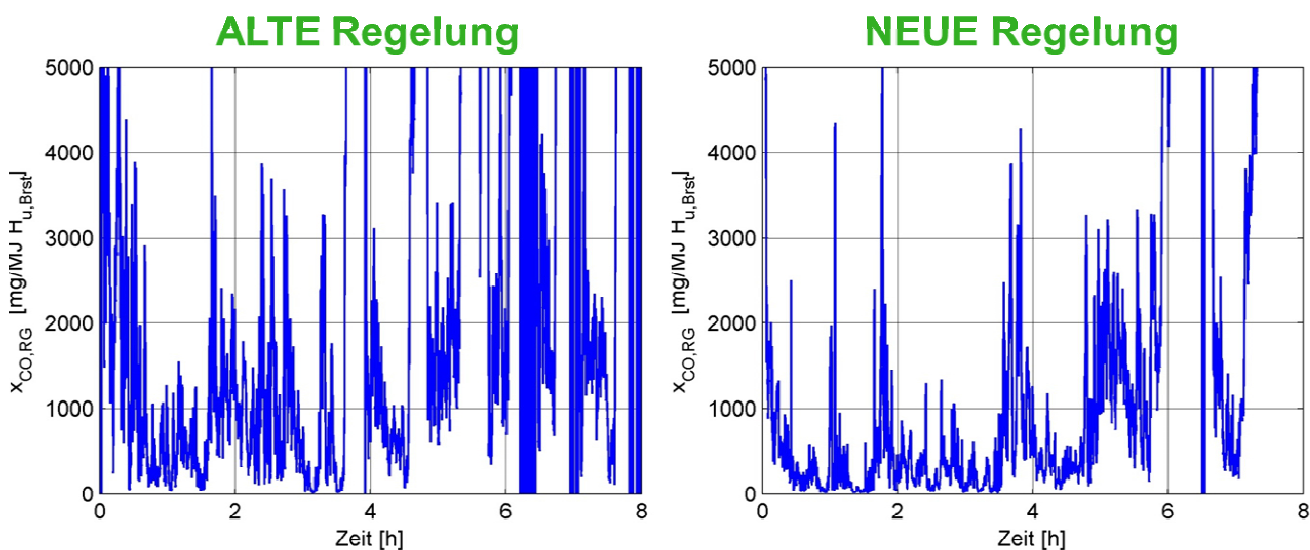


Abbildung 15: CO-Emissionen beim Jahresreferenzlastzyklus

Auch wenn die letztendlich auf den Wasserkreis übertragene Wärmemenge bei beiden Regelungen vergleichbar ist, ermöglicht die modellbasierte Regelung doch eine beträchtliche Verbesserung. Neben der Reduktion der Schadstoffemissionen und der Absenkung des Sauerstoffgehaltes im Betrieb von 2 Vol.% kommt insbesondere der Reduktion der An- und Abfahrvorgänge besondere Bedeutung zu. Das häufige An- und Abfahren geht neben Emissionsspitzen mit erheblichen Wirkungsgradeinbußen einher, und zusätzlich dazu kommt es zu einer deutlich erhöhten Materialbeanspruchung durch das ständige Abkühlen und Erwärmen des Materials.

4.3 Typtag Wintertag heiter

Die Ergebnisse der Typtag-Testläufe bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse des Jahresreferenzlastzyklus, der auch als zusammenfassende Betrachtung der verschiedenen Betriebsanforderungen dienen soll. Beispielhaft für die untersuchten, dem Jahresreferenzlastzyklus zu Grunde liegenden, Typtage [8] zeigt Abbildung 16 den zeitlichen Verlauf des beim Typtag *Wintertag heiter* vom Hydraulikkreis abgenommenen Wärmestromes. Dabei zeigt sich deutlich, dass die modellbasierte Regelung den raschen Lastanstiegen deutlich besser folgen kann, wodurch sich schlussendlich auch eine stabilere Vorlauftemperatur ergibt. Abbildung 17 zeigt die zugehörigen Verläufe des Sauerstoffgehaltes des Rauchgases.

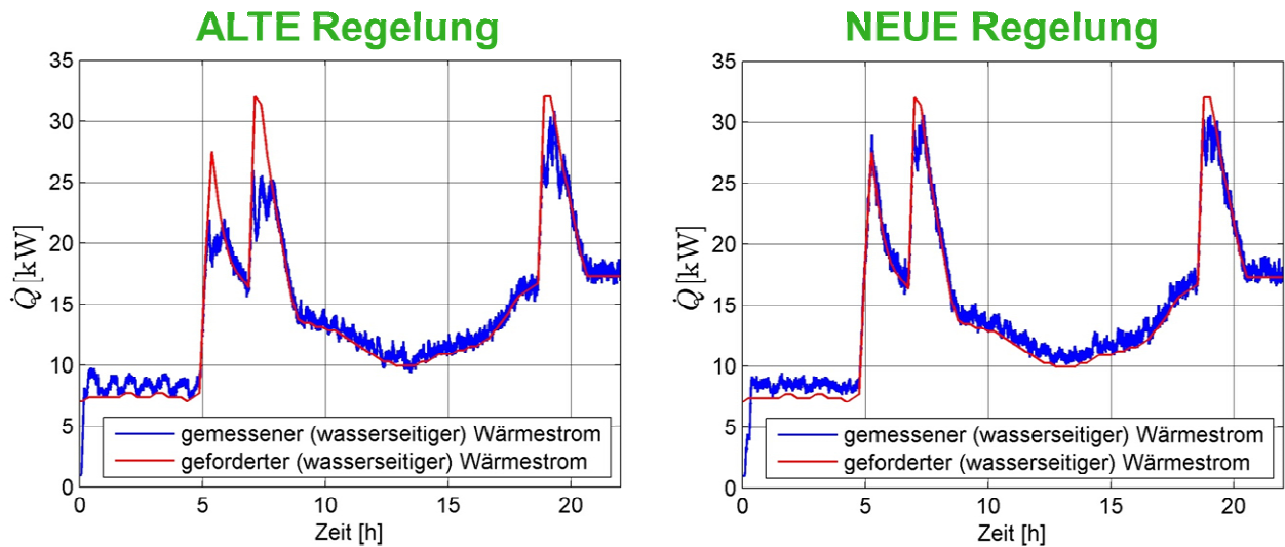


Abbildung 16: Übertragener Wärmestrom beim Typtag *Wintertag heiter*

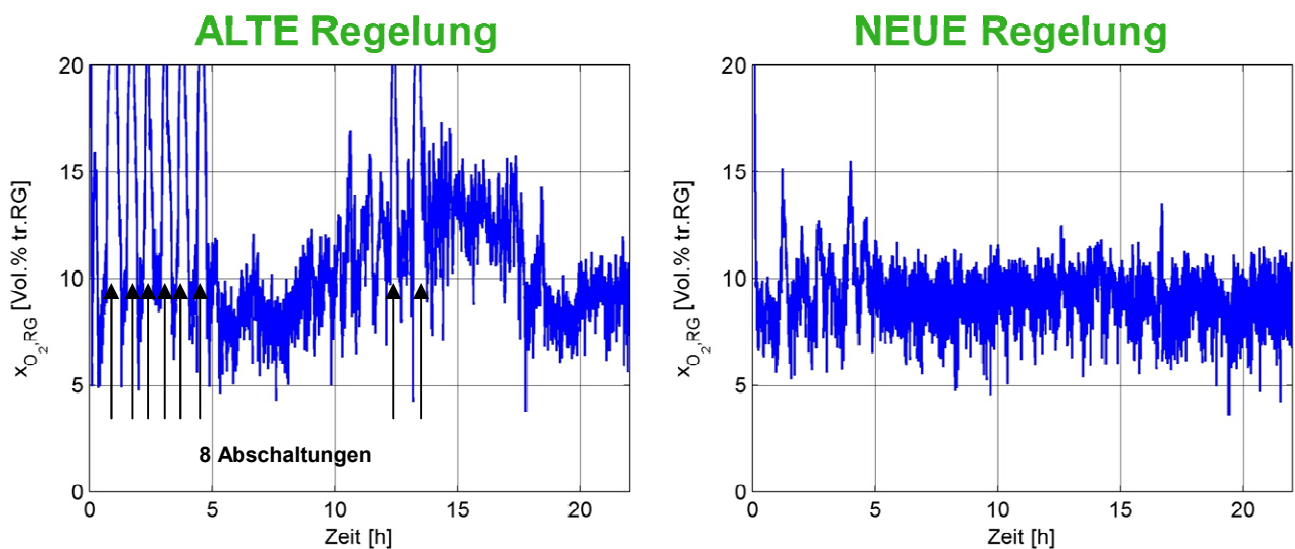


Abbildung 17: Sauerstoffgehalt beim Typtag *Wintertag heiter*

Dabei zeigt sich, dass es beim Betrieb mit der Standardregelung sowohl während der geringen Lastabnahme am Anfang aber auch bei einer Lastabnahme über 33% der Nennleistung (ca. zur Stunde 13) durch Überschreitung der Rücklauf- oder der Vorlauftemperatur von Grenzwerten in Folge der größeren Temperaturschwankungen zu Abschaltungen der Anlage kam (in Summe 8 Abschaltungen), wohingegen die neue Regelung zu keiner einzigen Abschaltung führte, da sie die Vorlauftemperatur und damit auch die Rücklauftemperatur stabiler halten konnte. Zusätzlich dazu konnte der Sauerstoffgehalt abermals stabiler und in diesem Fall um ca. 1,3 Vol.% niedriger gehalten werden.

4.4 Sprungförmige Änderungen des Brennstoffwassergehaltes

Eine der wesentlichen durch die Anwendung einer modellbasierten Regelung erzielbaren Verbesserungen ist die verbesserte Brennstoffflexibilität. Beispielhaft dafür soll ein Testlauf betrachtet werden, bei dem der Brennstoffwassergehalt bei stationärer Lastanforderung von ca. 25 kW

sprungförmig geändert wurde. Dabei wurde die bereits vollständig hochgefahrte Anlage zunächst für 2 Stunden mit feuchtem Brennstoff (33 Gew.% FS) betrieben. Anschließend wurde für 3 Stunden auf trockenen Brennstoff (16 Gew.% FS) gewechselt, bevor zur Stunde 5 des Versuchs wieder auf den feuchten Brennstoff (33 Gew.% FS) zurück gewechselt wurde. Abbildung 18 zeigt die zugehörigen Verläufe des in den Wasserkreis übertragenen Wärmestromes jeweils für die Standardregelung und die modellbasierte Regelung.

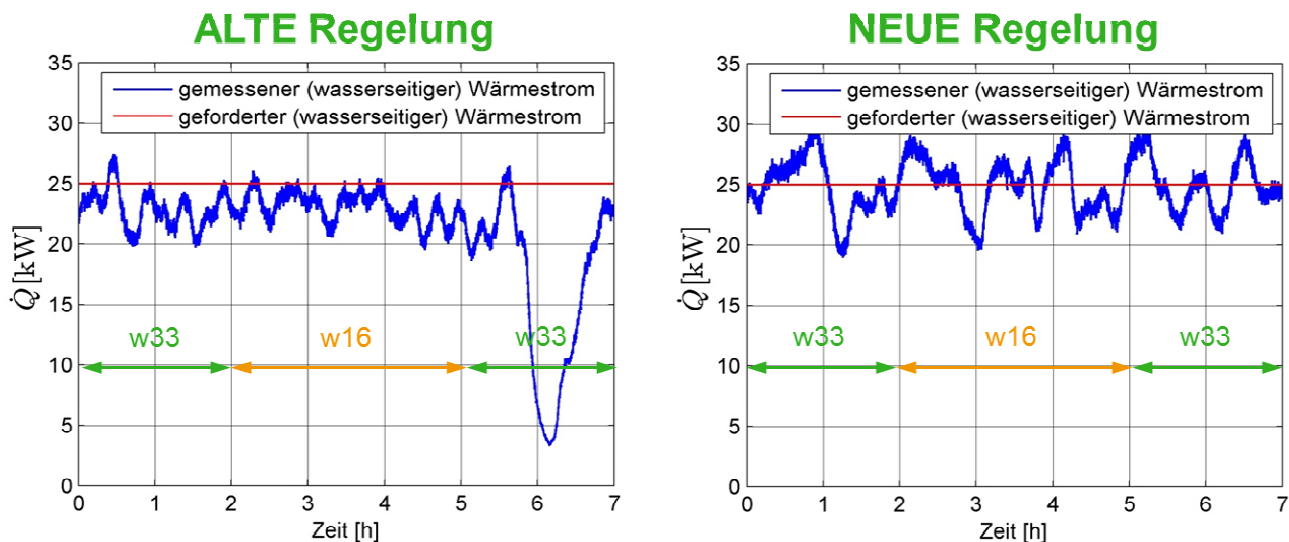


Abbildung 18: Übertragener Wärmestrom bei Änderungen des Brennstoffwassergehaltes

Dabei zeigt sich zunächst, dass die Standardregelung den geforderten Wärmestrom dauerhaft leicht unterschreitet, was aber zulässig ist, da sie generell für einen Brennstoffwassergehalt bis 30 Gew.% FS verkauft wird und in der Produktbeschreibung darauf hingewiesen wird, dass darüber mit Leistungseinbußen zu rechnen ist. Nach dem Wechsel auf den trockeneren Brennstoff sollte sie aber den geforderten Wärmestrom bereitstellen, was wahrscheinlich aufgrund des vorangegangenen lange andauernden Betriebes mit feuchterem Brennstoff in den betrachteten 3 Stunden nicht möglich war. Zu großen Problemen kam es beim Wechsel vom trockenen auf den feuchten Brennstoff zur Stunde 5, die letztendlich sogar zu einer temporären Abschaltung der Anlage führte. Die modellbasierte Regelung ist dahingegen während des ganzen Versuches stets in der Lage den geforderten Wärmestrom bereitzustellen und kann selbst nach dem grundsätzlich sehr anspruchsvollen Sprung vom trockenen zum feuchten Brennstoff zur Stunde 5 die Anlage noch immer bei (für diesen hohen Brennstoffwassergehalt von 33 Gew.% FS) sehr zufriedenstellenden CO-Emissionen mit einem Mittelwert von $159 \text{ mg} / \text{MJ } H_{u, \text{Brst}}$ betreiben (siehe Abbildung 19).

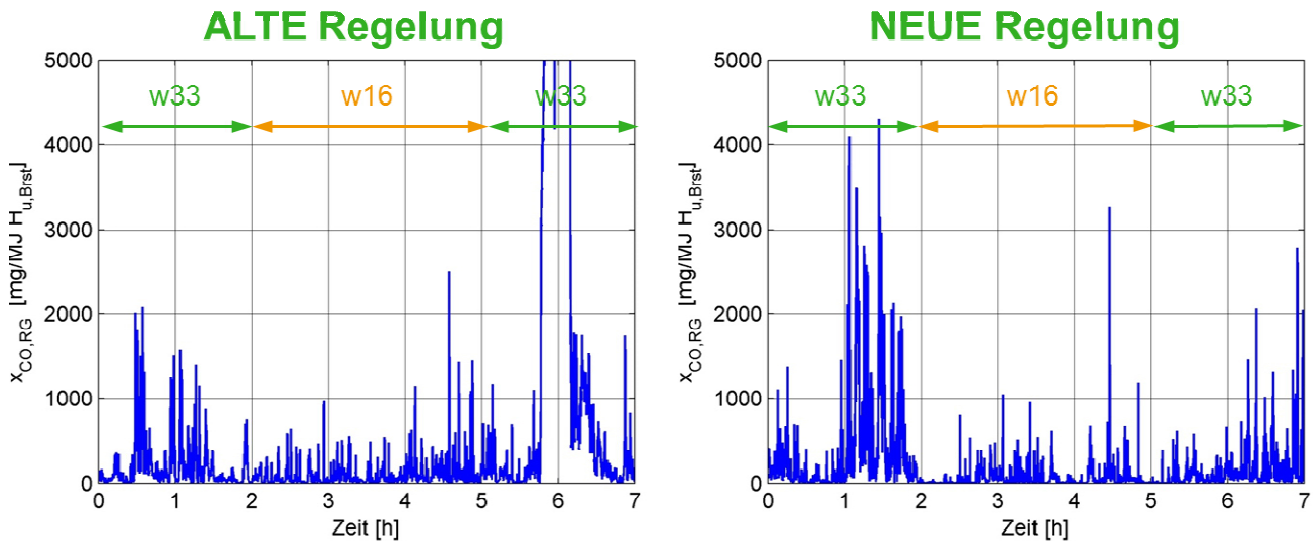


Abbildung 19: CO-Emissionen bei Änderungen des Brennstoffwassergehaltes

4.5 Undichtes Verschließen der Aschebox

Zur Bewertung der entwickelten Methode zur CO- λ -Regelung wurde unter anderem auch das undichte Verschließen der Aschebox simuliert, wozu gezielt ein Falschlufstrom von 5 m³/h im Bereich der Ascheschnecke des Wärmeübertragers zugeführt wurde, d.h. der Falschlufstrom nimmt nicht an der Verbrennung teil, beeinflusst aber sehr wohl den gemessenen Sauerstoffgehalt. Zur Bewertung der Modularität der entwickelten CO- λ -Regelung, sie soll auch ohne modellbasierte Regelung einsetzbar sein, wurden diese Versuche mit einfachen PID-Reglern zur Regelung der Vorlauftemperatur sowie des Sauerstoffgehaltes durchgeführt. Dabei wurde bei stationärer Lastanforderung von 25 kW die Anlage jeweils für 1 h ohne und danach mit entsprechendem Falschlufteintrag betrieben. Abbildung 20 zeigt die zeitlichen Verläufe des Sauerstoffgehaltes für den Betrieb mit und ohne CO- λ -Regelung.

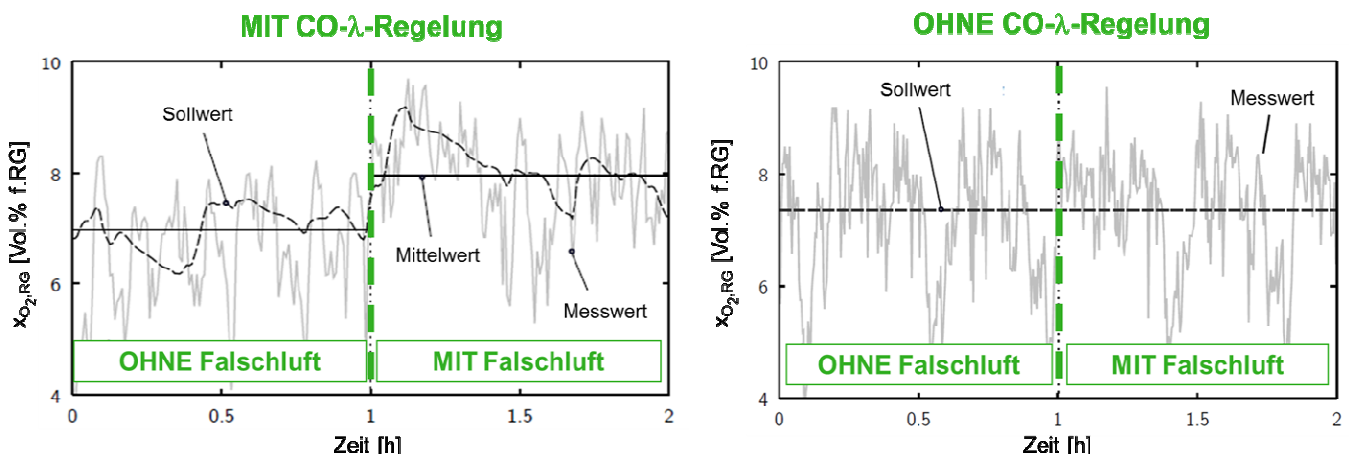


Abbildung 20: Sauerstoffgehalt bei Falschlufteintrag im Wärmeübertrager

Beim Versuch mit CO- λ -Regelung ist eine deutliche Anpassung der geschätzten CO- λ -Charakteristik und somit der Führungsgröße (Sollwert) für den Sauerstoffgehalt, wohingegen ohne CO- λ -Regelung dauerhaft auf den konstant vorgegebenen Wert geregelt wurde. Der beim Betrieb ohne CO- λ -Regelung

durch den Falschlufteintrag resultierende Sauerstoffmangel in der Verbrennungszone führt fast zu einer Verdoppelung der mittleren CO-Emissionen über die ganzen 2 h (320 statt 166 mg / MJ $H_{u,Brst}$). Die entwickelte Methode zur CO- λ -Regelung führt aber auch ohne modellbasierte Regelung zu einer Verbesserung (Modularität), wobei der geforderte Sauerstoffgehalt von einer modellbasierten Regelung aber besser umgesetzt werden könnte.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine serienmäßige Implementierung einer CO- λ -Regelung auch eine deutliche Erhöhung der Robustheit der Anlage ermöglichen könnte. Dazu sind aber noch umfassende weitere Bewertungen erforderlich. Im Wesentlichen sind dies Langzeituntersuchungen der Sensoren, eine Weiterentwicklung für CO- λ -Charakteristika mit flachem Anstieg auf der rechten Seite (Sauerstoffüberschuss), umfassende Robustheitsuntersuchungen der Methode und insbesondere eine Verbesserung der Schätzgeschwindigkeit.

4.6 Zusammenfassung der Auswirkungen der modellbasierten Regelung auf die wesentlichen Betriebsparameter und der daraus resultierenden Vorteile

Die modellbasierte Regelung kann sehr schnell auf Last- und Brennstoffwassergehaltsänderungen reagieren und dadurch viele Abschaltungen, und die damit verbundenen Emissionsspitzen und Nutzungsgradverluste sowie auch die erhöhte Materialbeanspruchung, vermeiden.

Der Sauerstoffgehalt kann insbesondere im Teillastbetrieb abgesenkt werden, wodurch schlussendlich im für den Realbetrieb sehr repräsentativen Jahreslastzyklusbetrieb eine mittlere Absenkung von ca. 2 Vol.% erzielt wurde. Durch den daraus resultierenden effizienteren Betrieb kann eine Erhöhung des Jahresnutzungsgrades von ca. 1,5% abgeleitet werden.

Das ursprünglich angestrebte Luftverhältnis im Brennstoffbett von 0,4 konnte nicht ganz erreicht werden, da auch bei extrem feuchtem Brennstoff (über 45 Gew.% FS) eine Überfüllung des Brennstoffbettes in jedem Fall vermieden werden muss. Um für den Realbetrieb repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurde die Untergrenze der Führungsgröße (Sollwert) für das Luftverhältnis im Bett somit auf 0,5 gesetzt und zusätzlich im Teillastbetrieb gezielt angehoben. Letztendlich konnte das Luftverhältnis im Brennstoffbett aber stets auf den geforderten Werten gehalten werden, was eine deutliche Verbesserungen zu Standardregelungen darstellt, bei denen sich üblicherweise, je nach Betriebszustand, eine bestimmte Luftstufung einstellt.

Sowohl die CO-Emissionen als auch die Gesamt- und Feinstaubemissionen können (aufgrund des stabileren Betriebs bei verbesserter Luftstufung und höheren Verbrennungstemperaturen aufgrund des abgesenkten Sauerstoffgehaltes) durch die modellbasierte Regelung deutlich reduziert werden.

Die Stickoxidemissionen blieben jedoch kaum beeinflusst, was letztendlich auf die sehr geringe Beeinflussbarkeit in Folge der kurzen Reduktionszone bis zur Sekundärlufteindüsung zurück zu führen ist. Bei Feuerungen mit ausgeprägter Reduktionszone sollte ein deutlicher Einfluss (NO_x -Reduktion) erreichbar sein.

Des Weiteren wurde eine Methode zur Ausbrandregelung (CO- λ -Regelung) basierend auf einer laufenden Schätzung der CO- λ -Charakteristik entwickelt und getestet, die Veränderungen der CO- λ -

Charakteristik, Messfehler oder Falschlufteintrag kompensieren kann und dadurch signifikant zur Erhöhung der Robustheit von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen beitragen kann.

Aus der im (für den Realbetrieb sehr repräsentativen) Jahreslastzyklusbetrieb erzielten Reduktion der Abschaltungen um 66,6% (2 statt 6 Abschaltungen) kann gemäß der Untersuchungen und TRNSYS-Simulationen im von BIOS durchgeführten Projekt *Smart residential heat* eine Erhöhung des Jahresnutzungsgrades von ca. 5% abgeleitet werden.

In Summe ergibt sich somit eine Erhöhung des Jahresnutzungsgrades um ca. 6,5% (1,5% durch O₂-Absenkung und 5% durch weniger Abschaltungen) durch die modellbasierte Regelung.

4.7 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung der modellbasierten Regelung erfolgte auf Basis einer Vollkostenrechnung wobei eine 15 kW Hackgut-Zentralheizheizung mit einer konventionellen Regelung einer Anlage gleicher Größe mit modellbasierter Regelung gegenübergestellt wird.

In Tabelle 2 sind die allgemeinen Rahmenbedingungen für Heizsysteme in einem österreichischen Einfamilienhaus dargestellt. Diese Rahmenbedingungen wurden sowohl für die konventionelle als auch für die modellbasierte Regelung herangezogen.

Tabelle 2: Allgemeine Rahmenbedingungen für die Vollkostenrechnung

Parameter	Wert	Einheit
Zentralheizungskessel-Nennleistung	15	kW
Kessel-Volllaststunden	1.500	h p.a.
Strompreis	173,40	€/MWh
Arbeitsstundensatz (Eigenleistung)	5,86	€/h
Baukosten Lager- und Kesselraum (Kellergeschoß)	244,16	€/m ²
Versicherung (in % d. Investitionskosten)	0,50	% p.a.
Nutzungsdauer Kessel (nicht Übergabestation)	20	Jahre
Nutzungsdauer Tank/Lagerraum	20	Jahre
Nutzungsdauer Bautechnik, Kamin	50	Jahre
Instandsetzung Bautechnik (% der Investitionskosten)	1,0	% p.a.
Kalkulationszinsatz	6,0	% p.a.

In Tabelle 3 sind die Basisdaten für die Vollkostenrechnung einer mit Hackgut befeuerten Zentralheizungsanlage dargestellt. Ein durchschnittlicher Jahresnutzungsgrad für eine konventionelle Hackgutfeuerung wird mit 80% angegeben. Durch die modellbasierte Regelung wird von einer Verbesserung des Jahresnutzungsgrades auf 86,5% ausgegangen. Die Verbesserung von 6,5% ergibt sich aufgrund einer Reduktion des durchschnittlichen O₂-Gehalts im Rauchgas von ca. 2 Vol.% tr. RG (ca. 1,5% Verbesserung Jahresnutzungsgrad) und durch eine zu erwartende wesentliche Verbesserung aufgrund deutlich weniger Abschaltungen in Schwachlastphasen (ca. 5% Verbesserung – siehe vorhergehende Abschnitte). Der bessere Jahresnutzungsgrad führt zu einem geringeren Brennstoffbedarf wodurch auch anteilig das erforderliche Hackgut-Lagervolumen reduziert werden kann.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Vollkostenrechnung nach VDI 2067 einer Hackgut-Zentralheizung mit konventioneller Regelung den Ergebnissen einer Anlage mit einer modellbasierten Regelung gegenübergestellt. Die Investitionskosten für die Feuerungsanlage und die Regelung wurden bei beiden Varianten gleich angesetzt, da davon ausgegangen werden kann, dass es bei einer serienmäßigen

Implementierung der modellbasierten Regelung zu keinen relevanten Mehrkosten kommen wird. Die Kosten für das Brennstofflager wurden an den Brennstoffverbrauch angepasst und sind aus diesem Grund bei der Berechnungsvariante mit modellbasierter Regelung etwas geringer.

Tabelle 3: Basisdaten für die Vollkostenrechnung einer Hackgut-Zentralheizung

Erläuterungen: Die gelb markierten Bereiche gelten für eine konventionelle Regelung; die grün markierten Bereiche gelten für die modellbasierte Regelung; die nicht markierten Bereiche wurden für beide Regelungsvarianten gleich angesetzt.

Parameter	Wert	Einheit
Jahresnutzungsgrad	80,0	%
Jahresnutzungsgrad	86,5	%
Heizwert (w25)	3,72	kWh/kg FS
Brennstoffbedarf	7.560	kg p.a.
Brennstoffbedarf	6.992	kg p.a.
Schüttdichte Hackgut	233	kg FS/m3
Elektrische Leistungsaufnahme (in % der Kesselnennleistung)	0,80	%
Brennstoffpreis (absolut)	130,2	€/t FS
Brennstoffpreis (spezifisch)	35,0	€/MWhHu
Wartungs- und Organisationsaufwand (Eigenleistung)	0,27	h/Woche
Rauchfangkehrer	143	€ p.a.
Instandsetzung Feuerungsanlage (% der Investitionskosten)	2,0	% p.a.
Förderungsausmaß (in % der Investitionskosten)	25	%
Förderungsausmaß (Höchstbetrag)	1.400	€

Tabelle 4: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für eine Hackgut-Zentralheizung

Erläuterungen: Die gelb markierten Bereiche gelten für eine konventionelle Regelung; die grün markierten Bereiche gelten für die modellbasierte Regelung; die nicht markierten Bereiche wurden für beide Regelungsvarianten gleich angesetzt.

	Investitions- kosten €	Kapital- kosten € p.a.	Instand- setzungs- kosten € p.a.	Verbrauchs- gebundene Kosten € p.a.	Betriebsge- bundene Kosten € p.a.	Sonstige Kosten € p.a.	Summe der Kosten € p.a.	Spezifische Kosten €/MWh
Hackgut-Heizkessel	18.600	1.622	372				1.994	88,6
Raumaustragung, Lagerraumeinbauten	3.200	279	64				343	15,2
Kamin	2.700	171	27				198	8,8
Baukosten Heizraum, 6,4 m2	1.563	99	16				115	5,1
Baukosten Lagerraum, 12,5 m2	3.052	194	31				224	10,0
Brennstoffkosten				984			984	43,8
Brennstoffkosten				910			910	40,5
Stromkosten				31			31	1,4
Wartung (Eigenleistung)					82		82	3,7
Sonstige Kosten						146	146	6,5
Zinsendienst Brennstofflagerung				30			30	1,3
Zinsendienst Brennstofflagerung				27			27	1,2
Rauchfangkehrer					143		143	6,4
Summe der Kosten	29.115	2.365	509	1.045	226	146	4.290	190,7
Spezifische Kosten in €/MWh		105,1	22,6	46,4	10,0	6,5		190,7
Summe der Kosten	29.115	2.365	509	969	226	146	4.214	187,3
Spezifische Kosten in €/MWh		105,1	22,6	43,1	10,0	6,5		187,3

Durch die Implementierung einer modellbasierte Regelung kann bei den getroffenen Ansätzen (15 kW Kesselnennleistung, 1.500 Volllaststunden) mit einer Kosteneinsparung von rund 76 € pro Jahr gerechnet werden. Die Kosteneinsparung ergibt sich vorwiegend durch die Einsparung von Brennstoffkosten. Bei größeren Hackgutfeuerungen kann von einer entsprechend höheren Kosteneinsparung ausgegangen werden.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die modellbasierte Regelung stellt einen technologischen Meilenstein für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen dar. 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 Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen nutzbar zu machen bzw. noch besser quantifizieren zu können.

Nachdem das mathematische Modell für das Brennstoffbett und in weiterer Folge die modellbasierte Regelung bislang nur für Rostfeuerungen entwickelt wurde, Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen aber 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 basierend darauf die modellbasierte Regelung geeignet anzupassen. Zusätzlich dazu soll auch eine Weiterentwicklung für Pellets sowie alternative Brennstoffe erfolgen, da die modellbasierte Regelung insbesondere für die Verbrennung alternativer Brennstoffe und der damit häufig einhergehenden Probleme (wie z.B. verstärkter Gefahr von Ascheschmelze) durch die integrierte Bettregelung besonders vorteilhaft sein kann.

In der zukünftigen Energieversorgung werden auch die sich aktuell noch im Entwicklungsstadium befindlichen kleinen Biomasse-KWK-Anlagen eine wesentliche Rolle spielen. Durch die Erhöhung der Komplexität wird auch dort die Regelung zunehmend an Bedeutung gewinnen, wofür unbedingt modellbasierte Ansätze verfolgt werden sollten. Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Projekt werden auch dafür einen entscheidenden Vorteil mit sich bringen.

Besonders großes Potential hat auch die entwickelte Methode zur kontinuierlichen Schätzung der CO- λ -Charakteristik und der darauf aufbauenden Ausbrandregelung, da diese nicht nur auf die betrachteten Hackgut-Kleinfeuerungsanlagen beschränkt ist, sondern für alle Biomassefeuerungsanlagen anwendbar ist und sowohl mit als auch ohne modellbasierter Regelung in die Regelung von Biomasse-Feuerungen implementiert werden kann. Sowohl die Untersuchung der Langzeiteigenschaften der Sensoren als auch die Weiterentwicklung der Schätzmethode sowie der darauf basierenden Ausbrandregelung soll Teil zukünftiger Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zur modellbasierten Regelung sein.

Um die Vorteile durch die modellbasierte Regelung letztendlich bestmöglich nutzen zu können, ist es erforderlich die Eigenschaften einer 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. Letztendlich soll die modellbasierte Regelung der Biomasse-Feuerungsanlage (sowohl in Gebäuden als auch in Wärmenetzen) auf das Gesamtsystem ausgeweitet werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] R. Bauer, Modellbildung und modellbasierte Regelungsstrategien am Beispiel einer Biomasse-Feuerungsanlage, Habilitationsschrift, Technische Universität Graz, 2009.
- [2] R. Bauer, M. Göller, 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. Göller, 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. Göller, 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. Göller, Entwicklung mathematischer Modelle einer Biomasserostfeuerungsanlage als Grundlage für modellbasierte Regelungskonzepte, Dissertationsschrift, Technische Universität Graz, 2008.
- [6] M. Göller, 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.
- [7] Göller, M.; Reiter, S.; Brunner, T.; Dourdoumas, N.; Obernberger, I.: Model based control of a small-scale biomass boiler. In: Control engineering practice 22 (2014) 1, S. 94 – 102
- [8] M. Heckmann, G. Friedl, M. Schwarz, P. Rossmann, H. Hartmann, H. Baumgartner, et al.: Bestimmung von Jahresnutzungsgrad und Emissionsfaktoren von Biomasse-Kleinfeuerungen am Prüfstand. Projektendbericht Bioenergy 2020+ GmbH, September 2010, Wieselburg.
- [9] S. Reiter, M. Göller, 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.

7 Kontaktdaten

Projektleiter:

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

Unternehmen und Kontaktadresse:

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

Projektpartner:

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

IMPRESSUM

Verfasser

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
Web: www.bios-bioenergy.at
Projektleiter: Ingwald Obernberger

Projektpartner

Bioenergy 2020+ GmbH
Inffeldgasse 21b, 8010 Graz
E-Mail: office@bioenergy2020.eu
Tel.: ++43 (0) 316 873 9201
Fax.: ++43 (0) 316 873 9202
Web: www.bioenergy2020.eu

Autoren

BIOENERGY 2020+ GmbH
Markus Gölles
Viktor Unterberger

BIOENERGY 2020+ GmbH
Ingwald Obernberger
Erwin Reisenhofer

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