

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

21/12/2018

Projekttitlel:

Modellbasierte Regelung von ScheitholzkesseIn
mit Pufferspeicher

Smart logwood boiler

Projektnummer:

848797

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Ausschreibung	1. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/07/2015
Projektende	31/08/2018
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	28 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	BIOENERGY 2020+ GmbH
Ansprechpartner	Markus Gölles
Postadresse	Inffeldgasse 21b, 8010 Graz, Österreich
Telefon	+43 316 873 - 9208
Fax	+43 316 873 - 9202
E-mail	markus.goelles@bioenergy2020.eu
Website	www.bioenergy2020.eu

Modellbasierte Regelung von Scheitholzkesseln mit Pufferspeicher

Smart logwood boiler

AutorInnen:

Markus Deutsch

Markus Gölles

Christopher Zemann

Sandra Zlabinger

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	6
3	Versuchssystem.....	8
3.1	Scheitholzessel	9
3.2	Zusätzliche Sensoren und Aktuatoren am Scheitholzessel	10
3.2.1	Zusätzlich eingebaute Sensoren und Messstellen	10
3.2.2	Nichtinvasive Luftmessstrecken	10
3.2.3	Rauchgasmessstrecke	11
3.3	Zusätzliche Sensoren und Aktuatoren im Hydrauliksystem	12
3.3.1	Zusätzlich eingebaute Sensoren und Messstellen	12
3.3.2	Hydraulikprüfstand	13
3.4	Schaltschrank und Versuchsstandsoftware	13
3.4.1	Schaltschrank.....	13
3.4.2	Versuchsstandsoftware	14
4	Regelungsstrategie	15
4.1	Feuerungsregelung	15
4.1.1	Konzept der Feuerungsregelung	15
4.1.2	Vorlauftemperaturregelung.....	17
4.1.3	Massenstromregelung.....	18
4.1.4	Leistungsregelung.....	19
4.1.5	O ₂ -Regelung	20
4.1.6	CO- λ -Regelung	21
4.2	Systemregelung	23
4.2.1	Last- und Solarertragsprognose	23
4.2.2	Feuerung.....	23
4.2.3	Pufferspeicher	26
4.2.4	Systemoptimierung.....	28
4.2.5	Benutzerinteraktion	30
5	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	32
5.1	Feuerungsregelung	32
5.1.1	Beschreibung der Testläufe.....	32
5.1.2	Überblick über Testlaufergebnisse	33
5.1.3	Vorlauftemperaturregelung.....	34
5.1.4	Massenstromregelung.....	34
5.1.5	Leistungsregelung.....	34
5.1.6	O ₂ -Regelung	35
5.2	Systemregelung	40
5.2.1	Testlaufbeschreibung.....	40

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

5.2.2	Vergleich mit der kommerziell erhältlichen Regelung	42
5.2.3	Bewertung der Ergebnisse	44
6	Ausblick und Empfehlungen.....	49
6.1	Feuerungsregelung	49
6.1.1	Feuerungsregelung	49
6.2	Systemregelung	49
6.2.1	Anpassung an vor Ort vorhandene System	49
6.2.2	Benötigte Sensorik	49
7	Zusammenfassung	51
8	Kontaktdaten.....	53

2 Einleitung

Die Verwendung von biomasse-basierten Systemen zur Wärmeversorgung von Gebäuden nimmt seit mehr als zwei Dekaden stetig zu. Neben den komfortablen, vollautomatisierten Hackgut- und Pellet-Feuerungen kommen dabei insbesondere in landwirtschaftlichen Betrieben auch häufig Scheitholzkessel zum Einsatz.

Typische Heizungssysteme mit Scheitholzkessel bestehen aus der Feuerung, einem oder mehreren Pufferspeichern und Solarkollektoren. Diese Heizungssysteme haben den wesentlichen Nachteil, dass sie selbst keinen Einfluss auf die zugeführte Brennstoffmenge sowie auch den Zeitpunkt des Nachlegens haben, wodurch es häufig zu ungünstigen Betriebszuständen kommt. So kann es zum Beispiel dazu kommen, dass zur Verfügung stehende Solarenergie nicht genutzt werden kann, weil der Pufferspeicher schon zuvor durch einen Abbrand gefüllt worden ist. Ein weiterer ungünstiger Betriebsfall tritt ein, wenn dem System mehr Energie zugeführt als entnommen wird bzw. noch im Pufferspeicher gespeichert werden kann. Dadurch muss die feuerungsseitig umgesetzte Wärmemenge auf ein Minimum (üblicherweise 50% der Nennleistung) reduziert werden, was hohe Schadstoffemissionen (CO, org. C, Feinstaub) sowie erhöhter Teerbildung und Verschmutzung im Füllraum zur Folge hat. Falls diese Reduktion noch nicht ausreicht, kann der Kessel bis zum Ansprechen einer Sicherheitsgrenze und der damit verbundenen thermischen Ablaufsicherung erhitzen. Ein weiteres Problem dieser Heizungssysteme liegt in der Regelung des Verbrennungsprozesses. Aufgrund von Schwankungen der Brennstoffeigenschaften (Rindenanteil, Wassergehalt, Holzart), unterschiedlicher Mengen und Arten der Einbringung des Brennstoffs oder auch einem erhöhten Falschlufteintrag aufgrund eines undichten Schließens der Feuerraumtüre, kommt es zu großen Variationen im Betriebsverhalten des Scheitholzkessels. Die typischerweise eingesetzten lineare Regler können diese Variationen nicht kompensieren, wodurch es besonders bei Leistungswechseln und bei Störungen im Verbrennungsprozess zu hohen Schadstoffemissionen (CO, org. C, Feinstaub) kommt.

Das Ziel des Projektes war die komplette Neuentwicklung einer modellbasierten Regelstrategie für Heizungssysteme bestehend aus Scheitholzkessel, Pufferspeicher und Solarkollektor. Es sollte eine übergeordnete Regelung entwickelt werden, die auf Basis von Prognosen für Solarertrag und Leistungsbedarf der Bewohner sowie durch Nutzung mathematischer Modelle der Komponenten des Heizungssystems eine optimale Betriebsstrategie ableitet. Diese Betriebsstrategie sollte die zuvor beschriebenen ungünstigen Betriebszustände verhindern und gleichzeitig die Energieeffizienz des Heizungssystems sowie den Komfort des Benutzers steigern. Sie sollte von einer untergeordneten Feuerungsregelung umgesetzt werden, welche direkt die Stellgeräte des Scheitholzkessels ansteuert um einen emissionsarmen Verbrennungsprozess zu erzielen. Darüber hinaus war es ein Ziel, eine Methode zur Interaktion mit dem Benutzer des Heizungssystems zu entwickeln. Diese sollte dem Benutzer eine Menge an Brennstoff vorgeben, die in einem optimal berechneten Zeitfenster nachgelegt werden soll. Bei der Berechnung dieses Zeitfensters sollten die Eingaben und Wünsche des Benutzers, insbesondere Zeiten in denen kein Brennstoff nachgelegt werden kann, berücksichtigt werden.

Durch die Kombination der übergeordneten Regelung des Gesamtsystems, der untergeordneten Feuerungsregelung und der Methode zur Benutzerinteraktion sollten Nutzungsgrad und der

Benutzerkomfort des gesamten Heizungssystems gesteigert und gleichzeitig die Schadstoffemissionen deutlich verringert werden. Der Einsatz eines solchen Regelungskonzepts für Heizungssysteme mit Scheitholzkessel ist in dieser Form einzigartig. Das Projekt leistet dadurch einen wesentlichen Beitrag zu allen drei Programmzielen des Energieforschungsprogramms:

- Ziel 1: Beitrag zur Erfüllung der energie-, klima- und technologischen Vorgaben der österreichischen Bundesregierung
- Ziel 2: Erhöhung der Leistbarkeit von nachhaltiger Energie und innovativen Energietechnologien
- Ziel 3: Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit

Im ersten Schritt wurde ein Versuchssystem bestehend aus einem kommerziell erhältlichen Scheitholzkessel, zwei in Serie geschalteten Pufferspeichern und einem Hydraulikprüfstand zur Simulation eines Solarkollektors und eines Verbrauchers aufgebaut. Das System (beschrieben in Abschnitt 3) wurde mit zusätzlichen Sensoren und Aktuatoren ausgestattet um das Systemverhalten besser untersuchen zu können.

Auf diesem Versuchssystem wurden zahlreiche Testläufe zur Untersuchung des Betriebsverhaltens und zur Modellierung von Scheitholzkessel und Pufferspeicher durchgeführt. Auf Basis dieser Testläufe und der daraus resultierenden Modelle wurden die übergeordnete Regelung des Gesamtsystems, die Feuerungsregelung und die Methode für die Benutzerinteraktion entwickelt. Diese werden im Detail in Abschnitt 4 beschrieben.

Die entwickelten Regelungen wurden am Versuchssystem implementiert und auf Basis von ausführlichen Testläufen verifiziert und bewertet. Diese Ergebnisse sind in Abschnitt 5 beschrieben.

Abschnitt 6 gibt einen Ausblick auf die praktische Umsetzbarkeit der entwickelten Regelstrategie.

3 Versuchssystem

Die Basis für die Arbeiten zur Modellbildung und Reglerentwicklung in diesem Projekt bildet ein Versuchssystem bestehend aus einem Scheitholzessel und zwei seriell miteinander verbundenen Pufferspeichern. Zur Simulation der Wärmeabnahme durch Verbraucher wird ein Hydraulikprüfstand eingesetzt, welcher mit beiden Pufferspeichern verbunden ist. Dieser verfügt auch über eine Heizung, die zur Simulation eines Solarkollektors verwendet wird, welcher Wärme über ein Solarregister in einen der Pufferspeicher einspeist. Im hydraulischen Kesselkreis befinden sich eine drehzahlregelbare Kesselkreispumpe und ein Mischventil zur Anhebung der Rücklauftemperatur, des in den Wärmeübertrager des Scheitholzessels strömenden Wassers. Abbildung 1 stellt dieses Versuchssystem schematisch dar.

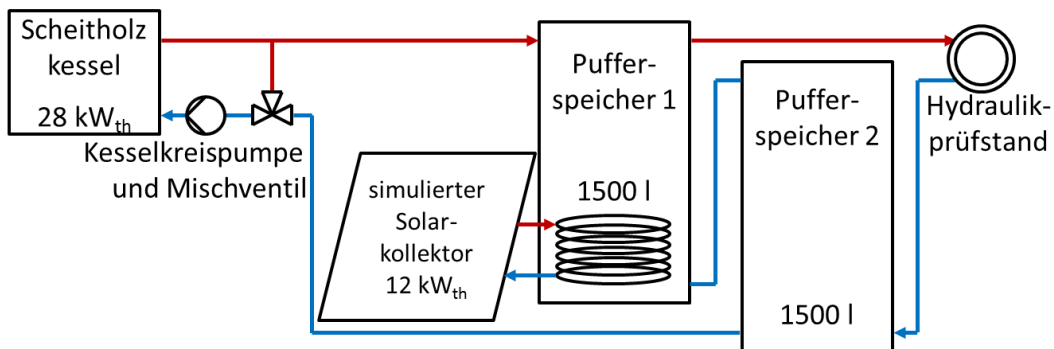


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchssystems

Um die Modellbildung zu unterstützen, wurde dieses Versuchssystem zusätzlich zu den vom Hersteller des Systems standardmäßig eingebauten Sensoren mit zahlreichen weiteren Sensoren und Aktuatoren ausgestattet. Dies beinhaltet eine Reihe von Sensoren direkt im Scheitholzessel und sogenannte nichtinvasive Luft- und Rauchgasmesstrecken (Abschnitt 3.2) sowie mehrere Sensoren im Hydraulikkreis (Abschnitt 3.3). Die Messdaten werden über ein Datenverarbeitungssystem (Schaltschrank und Versuchsstandssoftware) verarbeitet, welches in Abschnitt 3.4 genauer erläutert wird. Die Komponenten des Versuchssystems werden in Abbildung 2 gezeigt, diese sind:

- **Scheitholzessel** vom Typ (Abschnitt 3.1) ClassicFire2 (Kesselnennleistung: 28 kW) mit zahlreichen zusätzlichen Sensoren.
- **Zwei Pufferspeicher** (je 1500 l) vom Typ EmpaCompact und EmpaEco einmal mit und einmal ohne Solarregister.
- **Nichtinvasive Luftmesstrecken** (Abschnitt 3.2.2) zur Erfassung der zugeführten Primär- und Sekundärluftmassenströme, ohne das Betriebsverhalten des Kessels zu beeinflussen.
- **Rauchgasmesstrecke** (Abschnitt 3.2.3) mit diversen Anschlüssen für Prandtl-Rohr-Messung, Venturi-Rohr-Messung, Staubmessungen, Rauchgasanalyse usw.
- **Komponenten des Hydrauliksystems** (Abschnitt 3.3) bestehend aus Kesselkreispumpe und Mischventil zur Rücklaufanhebung.

- **Hydraulikprüfstand** (Abschnitt 3.3) zur Simulation der Wärmeabnahme durch den Verbraucher und Simulation des Solareintrags durch eine im Prüfstand verbaute Heizung.
- **Schaltschrank** (Abschnitt 3.4.1) zur elektrischen Erfassung der zusätzlichen Sensorsignale und Ansteuerung zusätzlicher Aktuatoren.
- **Versuchsstandssoftware** (Abschnitt 3.4.2) zur Visualisierung und Datenaufzeichnung sowie der Prüfstandregelung mit der Ansteuerung der Aktuatoren einschließlich der ClassicFire2-Aktuatoren und Sensoren.



Abbildung 2: Überblicksdarstellung des Versuchssystems

3.1 Scheitholzboiler

Der Scheitholzboiler (dargestellt in Abbildung 3) ist ein im Handel erhältliches down-draft Verbrennungssystem vom Typ Classic Fire 2 des Herstellers KWB mit einer Nennleistung von 28 kW_{th}. Der Brennstoff wird in den Füllraum eingelegt und durchläuft dort die Phasen der Trocknung, pyrolytischen Zersetzung und unvollständigen Verbrennung durch den Primärluftmassenstrom. Das unvollständig verbrannte Gas wird dann in der Sekundärverbrennungszone durch den eingeblasenen Sekundärluftmassenstrom vollständig verbrannt.

Der Scheitholzboiler verfügt über einen Saugzugventilator und voneinander unabhängig einstellbare Regelklappen an den Primär- und Sekundärlufteinlässen. Die Primärluft wird von beiden Seiten der Feuerung (links und rechts im Füllraum) über zwei separate Lufteinlässe eingeblasen, während die Sekundärluft direkt über einen einzelnen Kanal durch den Rost zugeführt wird. Durch diese Anordnung ist prinzipiell die getrennte Vorgabe des Primär- und Sekundärluftmassenstroms möglich. Ein großer Bereich der Sekundärverbrennungszone ist schamottiert, während der Rest der Feuerung (Füllraum und Ende der Sekundärverbrennungszone) von einem wassergekühlten Mantel umgeben ist. Die Feuerung verfügt auch über eine Breitbandlambdasonde zur Messung des Restsauerstoffgehalts des Rauchgases und eine automatische Zündvorrichtung.

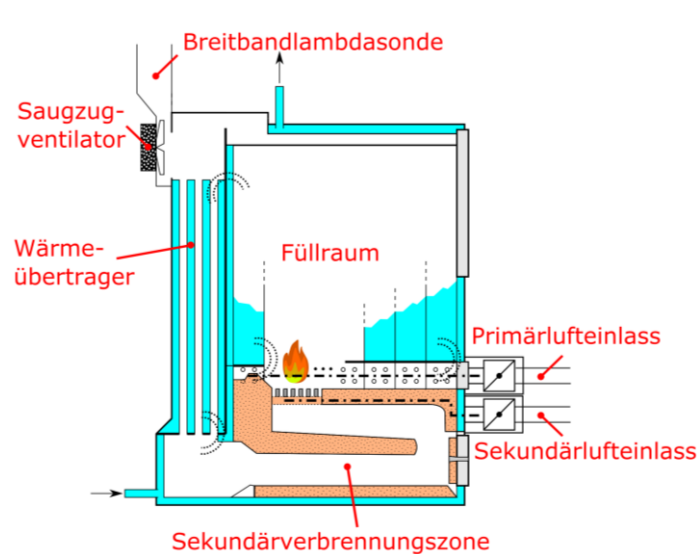


Abbildung 3: Scheitholzkessel

3.2 Zusätzliche Sensoren und Aktuatoren am Scheitholzkessel

3.2.1 Zusätzlich eingebaute Sensoren und Messstellen

Der Scheitholzkessel wurde mit umfassender Sensorik, zusätzlich zur bereits bestehenden Standardsensorik ausgestattet. Es wurde bei der Auswahl und beim Einbau der Sensoren besonderes Augenmerk darauf gelegt, dass die zusätzlich eingebaute Sensorik das Betriebsverhalten der Anlage soweit möglich nicht verändert. Bei den zusätzlichen Messgrößen im Scheitholzkessel handelt es sich um:

- die Massenströme (nichtinvasive Luftmessstrecken) und Temperaturen vom Primär- und Sekundärluft,
- die Differenzdrücke in verschiedenen Bereichen des Kessels (Füllraum, Brennkammer, nach dem Wärmeübertrager und vor dem Saugzugventilator) gegen den Umgebungsdruck,
- die Temperaturen in verschiedenen Bereichen des Kessels (Füllraum, Brennkammer, nach dem Wärmeübertrager und vor dem Saugzugventilator),
- eine kombinierte Messung des Sauerstoffgehaltes und Detektion unverbrannter Komponenten im Rauchgas (KS1D des Projektpartners LAMTEC),
- die Vorlauftemperatur und Rücklauftemperatur direkt am Kessel
- weitere Wassertemperaturen zwischen Teilen des Kessels
- den Wassermassenstrom durch den Kessel und
- das Gesamtgewicht des Kessels.

3.2.2 Nichtinvasive Luftmessstrecken

Bei der Messung der Primär- und Sekundärluftmassenströme wird üblicherweise jeweils nur ein längeres Rohr auf die Lufteinlässe montiert, in dem sich ein Massenstrommessgerät befindet. Durch einen Massenstrom kommt es jedoch zu einem Druckverlust über diese Anordnung, wodurch das Betriebsverhalten der zu untersuchenden Anlage massiv beeinflusst wird. Daher wurden die drei Luftmassenstrommessungen (linker Primär-, rechter Primär- und Sekundärluftmassenstrom) jeweils mit einem

zusätzlichen Ventilator ausgestattet, der den Druck unmittelbar vor dem eigentlichen Lufteinlass auf Umgebungsdruck regelt. Somit handelt es sich bei den drei installierten Luftmessstrecken um eine weitgehend nichtinvasive Messung des Primär- und Sekundärluftmassenstroms. Die Messung der Massenströme erfolgt über Heißfilm-Luftmassensensoren der Fa. BOSCH. Die nichtinvasiven Luftmessstrecken am Versuchssystem werden in Abbildung 4 gezeigt.



Abbildung 4: Nichtinvasive Luftmessstrecken

3.2.3 Rauchgasmessstrecke

Zwischen Rauchgasaustritt des Scheitholzkessels und dem Kamin wurde eine Rauchgasmessstrecke montiert. Diese besteht aus einem langen, geraden Rohr in dem mehrere Messstellen für den Anschluss externer Messgeräte wie Rauchgasanalysatoren, Staubmessungen und Prandtl-Rohre angebracht sind. Dabei wurde darauf geachtet, dass die notwendigen Ein- und Auslaufstrecken für alle relevanten Messgeräte eingehalten werden. Messungen der Zusammensetzung des Rauchgases und der partikelförmigen Emissionen des Scheitholzkessels werden in dieser Rauchgasmessstrecke durchgeführt. In der Rauchgasmessstrecke sind dauerhaft:

- ein Prandtl-Rohr zur Bestimmung des Rauchgasmassenstroms,
- eine Differenzdruckmessung nach dem Saugzugventilator gegen Umgebung und
- eine Messung der Temperatur des Rauchgases

montiert. Daneben wurde für einzelne Testläufe ein Sensor zur Bestimmung der relativen Feuchte des Rauchgases (Hygrothermogeber der Firma JUMO) in der Rauchgasmessstrecke verbaut.

Der, aufgrund des Massenstroms durch die Rauchgasmessstrecke auftretende, Druckverlust wird durch einen Ventilator kompensiert, wodurch eine Beeinflussung der Messungen in der Rauchgasmessstrecke auf das Betriebsverhalten der Feuerung verhindert wird.

Die im Scheitholzkessel zusätzlich verbauten Sensoren und Aktuatoren und ihre Positionen sind in Abbildung 5 dargestellt.

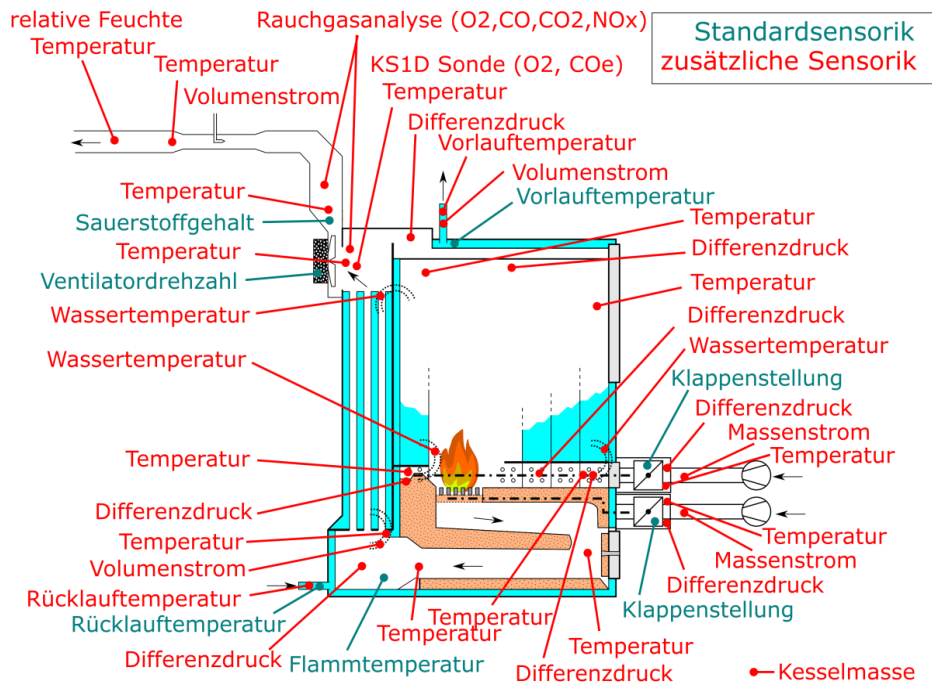


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Scheitholzessels mit den zusätzlich gemessenen Größen (rot) im Vergleich zu den vom Hersteller standardmäßig gemessenen Größen (türkis)

3.3 Zusätzliche Sensoren und Aktuatoren im Hydrauliksystem

3.3.1 Zusätzlich eingebaute Sensoren und Messstellen

Um das Systemverhalten testen und bewerten zu können, wurden eine Vielzahl von Sensoren im Hydrauliksystem verbaut. In Abbildung 6 sind die jeweiligen Sensorpositionen dargestellt. Um die Temperaturschichtung im Pufferspeicher genauer analysieren zu können, wurden in Speicher 1 elf Temperatursensoren eingebaut und in Speicher 2 vier. Die jeweiligen Positionen der Temperatursensoren sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 angegeben. Zur Durchflussmessung wurden Ultraschallsensoren in jeden hydraulischen Kreis verbaut.

Tabelle 1: Einbauhöhen der Temperatursensoren in Speicher 1 (Position von oben gemessen)

	Speicher 1										
Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Position im Speicher in m	0,12	0,28	0,42	0,56	0,69	0,82	0,96	1,10	1,38	1,52	1,83

Tabelle 2: Einbauhöhen der Temperatursensoren in Speicher 2 (Position von oben gemessen)

	Speicher 2				
Sensor	1	2	3	4	5
Position im Speicher in m	0,015	0,28	0,72	1,01	1,55

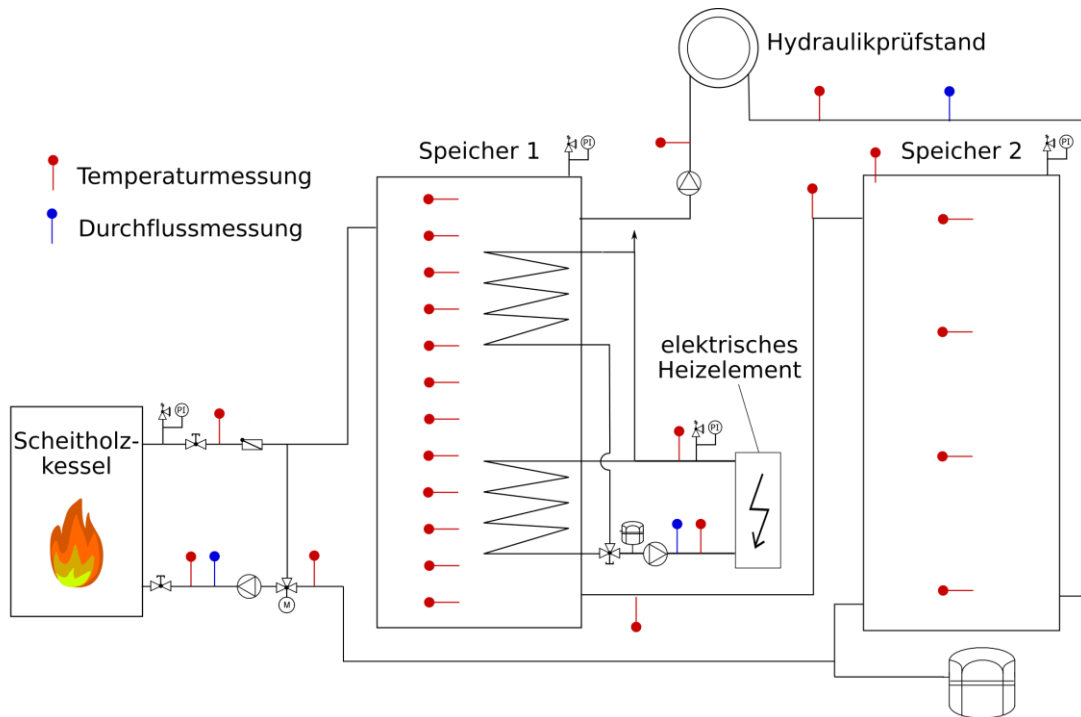


Abbildung 6: Hydraulische Verschaltung des Versuchssystems mit den installierten Sensoren

3.3.2 Hydraulikprüfstand

Der Hydraulikprüfstand wurde an das im Technikum vorhandene Kühlnetz angeschlossen, um so den Wärmeverbrauch durch einen Verbraucher zu simulieren. Das durchströmende Medium (hier Wasser) kann damit auf Temperaturen abgekühlt werden, die typischerweise als Rücklauftemperatur eines Verbrauchers auftreten. Zur Simulation von eingebrachter Solarenergie wurde ein elektrisches Heizelement mit einer Leistung von bis zu 15kW installiert. Beide Systeme ermöglichen Verläufe für den Verbrauch bzw. die eingebrachte Solarenergie zu generieren. Dadurch können vergleichbare Bedingungen für Tests erzeugt werden.

3.4 Schaltschrank und Versuchsstandsoftware

3.4.1 Schaltschrank

Alle zusätzlich verbauten Sensoren werden in einem Schaltschrank zusammengeführt und in einem CompactDAQ-System der Firma National Instruments eingelesen, verarbeitet und gespeichert. Neben Schnittstellen zum Einlesen von Messwerten bietet der Schaltschrank auch Anschlüsse für die Ansteuerung der zusätzlich verbauten Aktuatoren. Um den Einfluss von elektromagnetischen Störungen zu verringern, wurden ausschließlich verdrehte Kabel verwendet. Der Schaltschrank wird in Abbildung 7 (links) gezeigt.

3.4.2 Versuchsstandsoftware

Auf dem CompactDAQ-System im Schaltschrank wurde eine modulare Versuchsstandsoftware zur Aufzeichnung und Visualisierung von Messdaten in der LabVIEW implementiert. Diese Software liefert die Möglichkeit zur beinahe vollständig automatisierten Testlaufdurchführung. Darüber hinaus wurden auch die in diesem Projekt entwickelten Regelungen als Teil dieser Software implementiert. Ein Blockdiagramm der Versuchsstandsoftware wird in Abbildung 7 (rechts) gezeigt.

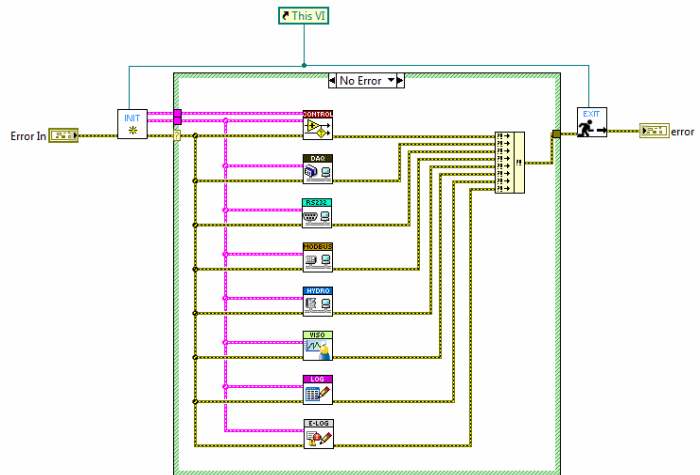


Abbildung 7: links: Schaltschrank, rechts: Blockdiagramm der modularen LabVIEW Software

4 Regelungsstrategie

4.1 Feuerungsregelung

4.1.1 Konzept der Feuerungsregelung

Die Aufgabe der Feuerungsregelung im Gesamtregelungskonzept ist es, einen möglichst hochqualitativen Verbrennungsprozess zu garantieren und gleichzeitig dafür zu sorgen, dass der Scheitholzessel eine Vorlauftemperatur mit geringstmöglichen Abweichungen vom Sollwert zur Verfügung stellt. Die entwickelte, modellbasierte Feuerungsregelung verwendet dazu die Stellgeräte des Scheitholzessels (Saugzugventilator, Primär- und Sekundärluftregelklappen, drehzahlregelbare Kesselkreispumpe), um die Vorlauftemperatur und den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases zu regeln und eine vom Rauchgas auf das Wasser übertragene Leistung einzustellen.

Die Verbrennung von Scheitholz kann in drei Phasen unterteilt werden:

- Anzündphase
- Hauptphase
- Ausbrandphase

In der **Anzündphase** wird das unverbrannte Holz im Füllraum durch eine automatische Zündvorrichtung erhitzt und der Verbrennungsprozess durch gleichzeitiges Zuführen von Primärluft gestartet. In dieser Phase kommt es typischerweise zu besonders hohen Schadstoffemissionen (speziell CO-Emissionen). Im Zuge dieses Projekts wurde eine Anzündstrategie eingesetzt, die ein möglichst schnelles Durchlaufen der Anzündphase ermöglicht und damit die Schadstoffemissionen im Vergleich zu bisherigen Anzündstrategien verringert. Dabei wird bei aktivierter Zündvorrichtung der Primärluftmassenstrom mit einer konstanten Steigung erhöht, bis der maximal mögliche Massenstrom erreicht wird. Währenddessen wird der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases durch den Sekundärluftmassenstrom auf einen Sollwert (typischerweise 5 Vol.-%) geregelt. Dadurch wird bereits während des Anzündens die Verbrennungsqualität geregelt. **In dieser Phase ist die modellbasierte Feuerungsregelung noch deaktiviert.**

Die **Hauptphase** stellt typischerweise den längsten Betriebszustand im Scheitholzessel dar. Der Beginn dieser Phase wurde für die Arbeiten in diesem Projekt definiert als jener Zeitpunkt, zu dem die Temperatur des Rauchgases vor dem Wärmeübertrager einen definierten Grenzwert (zum Beispiel 780°C für 2 Minuten) überschreitet. Dieser Grenzwert wurde empirisch aus mehreren Testläufen bestimmt und ist daher nur für den in dieser Arbeit verwendeten Scheitholzessel gültig. Bei Detektion des Beginns der Hauptphase wird die modellbasierte Feuerungsregelung aktiviert und der Anzündvorgang beendet (Deaktivierung der Zündvorrichtung). **Mit Beginn dieser Phase wird die modellbasierte Feuerungsregelung aktiviert.**

Die **Ausbrandphase** folgt auf die Hauptphase, wobei der Beginn definiert wurde als jener Zeitpunkt, bei dem der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases nicht mehr auf dem Sollwert gehalten werden kann (zum Beispiel Restsauerstoff > 9 % für 2 Minuten) und das Primärluftverhältnis einen definierten Grenzwert überschreitet (zum Beispiel $\lambda_{prim} > 1.4$ für 2 Minuten). In dieser Phase wird der Verbrennungsvorgang abgeschlossen und die modellbasierte Feuerungsregelung wird mit der Detektion des Beginns dieser Phase deaktiviert. Der Massenstrom an Primärluft wird vom letztgültigen Wert durch eine Rampe mit konstanter Steigung auf einen Minimalwert verringert. Der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases wird durch den Sekundärluftmassenstrom auf einen Sollwert (typischerweise 5 Vol.-%) geregelt. **In dieser Phase ist die modellbasierte Feuerungsregelung deaktiviert.**

Die **modellbasierte Feuerungsregelung** wurde auf Basis der Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen am Versuchssystem entwickelt und besteht aus mehreren Teilregelkreisen. Die einzelnen Regelkreise sind in Abbildung 8 dargestellt und werden in den Abschnitten 4.1.2 bis 4.1.5 genauer erläutert.

Die **Vorlauftemperaturregelung** steuert die Kesselkreispumpe so an, dass ein gewünschter Wert für die Vorlauftemperatur eingehalten wird.

Die **Massenstromregelung** steuert die Stellgrößen des Scheitholzessels (Saugzugventilator und Primär- und Sekundärluftregelklappen) an und ermöglicht die getrennte Vorgabe des Primärluft- und Sekundärluftmassenstroms.

Die **O₂-Regelung** gibt der Massenstromregelung einen Sollwert für den Sekundärluftmassenstrom vor und stellt damit den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases auf einen Sollwert ein.

Die **Leistungsregelung** gibt der Massenstromregelung einen Sollwert für den Primärluftmassenstrom vor, um einen gewünschten Massenstrom an abgebautem Brennstoff und damit indirekt eine rauchgasseitige Leistung einzustellen. Der Verlauf für den Sollwert des Massenstroms an abgebautem Brennstoff wurde dabei basierend auf experimentellen Untersuchungen am Versuchssystem gewählt.

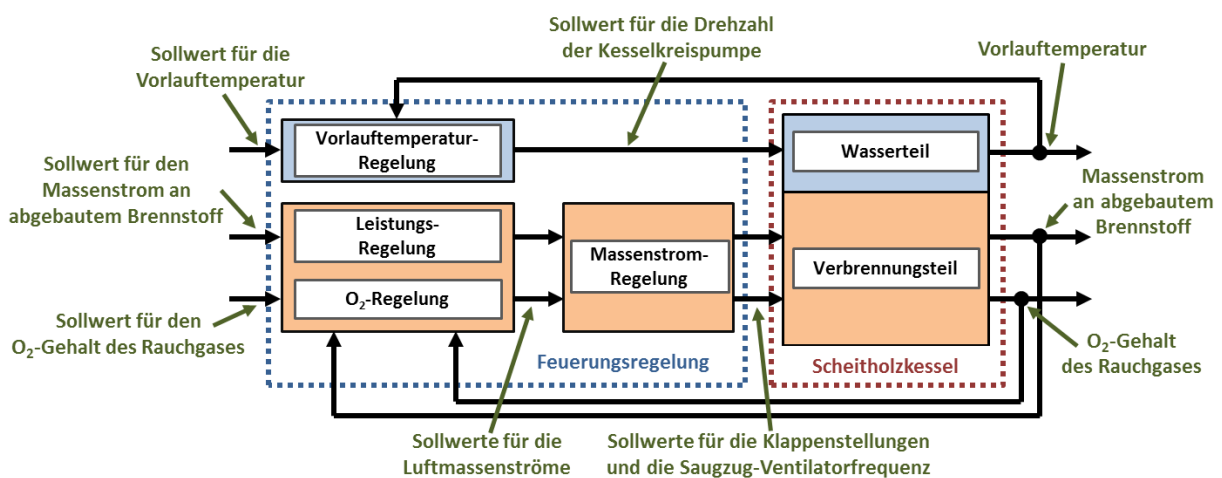


Abbildung 8: Struktur der modellbasierten Feuerungsregelung

4.1.2 Vorlauftemperaturregelung

Die Vorlauftemperaturregelung ist ein nichtlinearer Regler, der die Kesselkreispumpe und dadurch den Wassermassenstrom durch den Wärmeübertrager als Stellgerät bzw. Stellgröße für die Regelung der Vorlauftemperatur verwendet. Im stationären Zustand kann der Zusammenhang zwischen dem Wassermassenstrom \dot{m}_W , der Vorlauftemperatur T_{VL} , der Rücklauftemperatur T_{RL} und der vom Rauchgas auf das Wasser übertragenen Leistung \dot{Q} wie folgt beschrieben werden:

$$\dot{Q} = c_p \dot{m}_W (T_{VL} - T_{RL}) \tag{Formel 4-1}$$

Dabei ist c_p die mittlere, isobare spezifische Wärmekapazität des Wassers. Der Zusammenhang zwischen der Drehzahl der Kesselkreispumpe n_P und dem Wassermassenstrom durch den Wärmeübertrager \dot{m}_W wird mit einem linearen Zusammenhang (k ... Modellparameter) beschrieben:

$$\dot{m}_W = k n_P \tag{Formel 4-2}$$

Die aus einer gegebenen Drehzahl resultierende Vorlauftemperatur kann aus den beiden Gleichungen 4-1 und 4-2 berechnet werden:

$$T_{VL} = \frac{\dot{Q}}{c_p k n_P} + T_{RL} \tag{Formel 4-3}$$

Daraus ist erkennbar, dass die Drehzahl der Kesselkreispumpe und die Vorlauftemperatur nichtlinear miteinander zusammenhängen. Die Differenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur ist reziprok proportional zur Drehzahl der Kesselkreispumpe. Diese Nichtlinearität wird in der Vorlauftemperaturregelung kompensiert, indem dieser reziproke Zusammenhang direkt am Ausgang des Reglers mitberücksichtigt wird. Die Vorlauftemperaturregelung ist somit ein PI-Regler mit einer nachgeschalteten, nichtlinearen Berechnung (dargestellt in Abbildung 9)

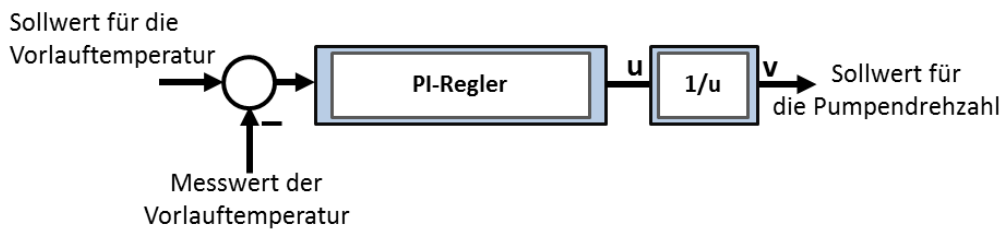


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Vorlauftemperaturreglers

In typischerweise eingesetzten klassischen Feuerungsregelungen wird der Wassermassenstrom durch den Wärmeübertrager konstant gehalten, sodass diese Regelungen die vom Rauchgas auf das Wasser übertragene Leistung variieren müssen, um die Vorlauftemperatur konstant zu halten. Dies hat zur Folge, dass der Verbrennungsvorgang und die Vorgänge im hydraulischen Netz eng miteinander verkoppelt sind. Plötzliche Änderungen der Rücklauftemperatur aufgrund schneller Leistungsanstiege wirken sich zum Beispiel direkt auf den Verbrennungsvorgang aus. Dies hat Einbrüche im Restsauerstoffgehalt des Rauchgases und dadurch erhöhte Schadstoffemissionen zur Folge.

Durch die Verwendung des Wassermassenstroms zur Einstellung der Vorlauftemperatur werden die vom Rauchgas auf das Wasser übertragene Leistung und die Vorlauftemperatur voneinander entkoppelt. Es ist möglich, für jede vom Rauchgas auf das Wasser übertragene Leistung den Wassermassenstrom so einzustellen, dass die Vorlauftemperatur konstant ist. Lediglich für den Fall, dass die Kesselkreispumpe in ihre Schranken läuft (maximale und minimale Drehzahl), ist diese Entkopplung aufgehoben. Durch die Entkopplung kann die modellbasierte Feuerungsregelung den Verbrennungsvorgang mit hoher Ausbrandqualität regeln und gleichzeitig dafür sorgen, dass die gewünschte Vorlauftemperatur eingehalten wird.

4.1.3 Massenstromregelung

Der Verbrennungsteil des Scheitholzkessels verfügt über drei Stellgeräte:

- Saugzugventilator
- Primärluftregelklappen (links und rechts, angesteuert durch einen gemeinsamen Motor)
- Sekundärluftregelklappe

Dabei sind die Einlässe der Primärluft und Sekundärluft strömungstechnisch miteinander verkoppelt (siehe Abbildung 10). Eine Änderung in einem einzelnen Stellgerät beeinflusst alle Luftmassenströme im Scheitholzkessel. Da der Primärluft- und der Sekundärluftmassenstrom jeweils unterschiedliche Einflüsse auf den Verbrennungsprozess haben, ist die Möglichkeit beide Massenströme getrennt voneinander einstellen zu können jedoch von zentraler Bedeutung für die Feuerungsregelung.

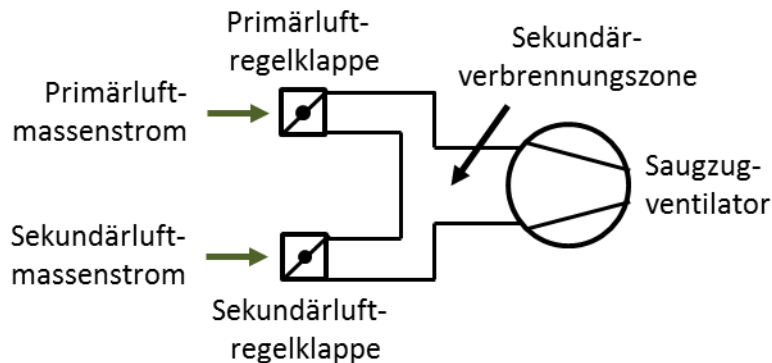


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Strömungswege im Scheitholzkessel unter Vernachlässigung des sich im Füllraum befindenden Brennstoffs

Die nichtlineare, modellbasierte Massenstromregelung steuert die Stellgeräte des Verbrennungsteils so an, dass der Primärluft- und Sekundärluftmassenstrom unabhängig voneinander vorgegeben werden können. Dazu verwendet die Regelung ein mathematisches Modell der Strömungsverhältnisse im Scheitholzkessel. Zur Modellierung der Strömungsverhältnisse wird der Verbrennungsteil des Scheitholzkessels modellhaft durch eine Verschaltung miteinander verkoppelter Strömungswiderstände und einem idealisierten Ventilator angenähert (dargestellt in Abbildung 11). Dies entspricht einem, in der Literatur¹ typischen Vorgehen.

¹ Bauer, R., M. Gölles, T. Brunner, N. Dourdoumas und I. Obernberger: Modellierung der Druck- und Volumenstromverhältnisse in einer Biomasse-Feuerung. at-Automatisierungstechnik, 55:404-410, August 2007

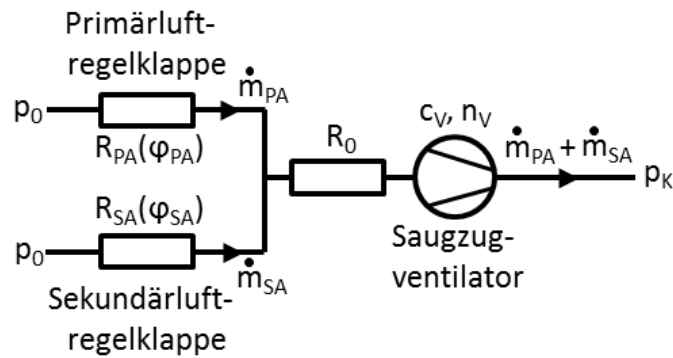


Abbildung 11: Modellhafte Sicht der Strömungsverhältnisse im Scheitholzkessel

Dabei sind p_0 der Umgebungsdruck und p_K der Druck vor dem Kamin. Es wird für das Modell vereinfachend $p_K = p_0$ angenommen. Dieser Modellfehler wird durch die Massenstromregelung ausgeglichen. R_{PA} und R_{SA} sind die Strömungswiderstände im Primärluft- und Sekundärluftzweig, welche von der jeweiligen Regelklappenstellung φ abhängen. Der idealisierte Ventilator wird über seine Drehzahl n_V , den Modellparameter c_V und den Strömungswiderstand R_0 beschrieben. Der Zusammenhang zwischen der Drehzahl des Saugzugventilators n_V und den Massenströmen an Primärluft \dot{m}_{PA} und Sekundärluft \dot{m}_{SA} kann durch folgende Gleichungen beschrieben werden:

$$R_{PA}(\varphi_{PA}) \dot{m}_{PA}^2 = R_{SA}(\varphi_{SA}) \dot{m}_{SA}^2 \tag{Formel 4-4}$$

$$R_{SA}(\varphi_{SA}) \dot{m}_{SA}^2 + R_0 \cdot (\dot{m}_{PA}^2 + \dot{m}_{SA}^2) = c_V n_V^2 \tag{Formel 4-5}$$

Die Zusammenhänge $R_{PA}(\varphi_{PA})$ und $R_{SA}(\varphi_{SA})$ wurden experimentell bestimmt. Das mathematische Modell für die Strömungsverhältnisse im Verbrennungsteil des Scheitholzkessels ermöglicht die Berechnung jener Regelklappenstellungen, die notwendig sind, um bei einer gegebenen Drehzahl des Saugzugventilators einen Massenstrom an Primärluft und Sekundärluft einzustellen. Die modellbasierte Massenstromregelung verwendet dieses Modell im Konzept der Internal Model Control (IMC).

4.1.4 Leistungsregelung

Ein Ziel der Feuerungsregelung ist es, einen gleichmäßigen Verbrennungsprozess mit einem hochqualitativen Ausbrand zu erreichen. Der Primärluftmassenstrom wirkt direkt auf den Verbrennungsprozess im Füllraum und hat somit eine direkte Auswirkung auf die Qualität der Verbrennung. Eine Änderung des Primärluftmassenstroms bewirkt eine Änderung des Massenstroms an abgebautem Brennstoff und damit eine Änderung der vom Rauchgas auf das Wasser übertragenen Leistung. Im typischen Betriebsbereich hängt der resultierende Massenstrom an abgebautem Brennstoff proportional mit dem Primärluftmassenstrom zusammen.

Daher wird ein linearer PI-Regler (siehe Abbildung 12) eingesetzt, der den Primärluftmassenstrom als Stellgröße verwendet, um einen gewünschten Massenstrom an abgebautem Brennstoff einzustellen. Störungen im Verbrennungsprozess, wie zum Beispiel ein Flammabbriss (Störung des Brennstoffabbaus im Füllraum), werden damit unmittelbar detektiert und kompensiert.

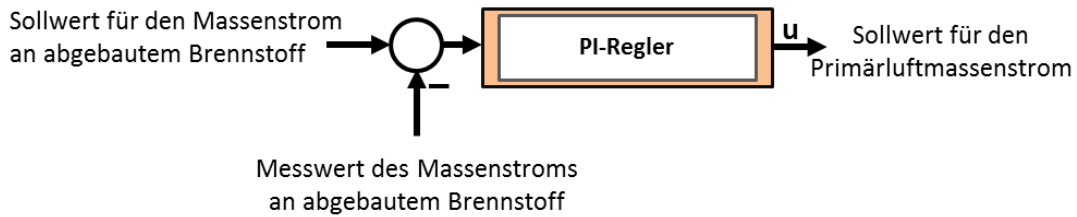


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Leistungsreglers

Die Bestimmung des Massenstroms an abgebauten Brennstoff geschieht durch eine Verbrennungsrechnung, welche Messwerte des Restsauerstoffgehalts des Rauchgases und des Primär- und Sekundärluftmassenstroms verwendet. Dabei wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Verdampfung des im Brennstoff gespeicherten Wassers und der Abbau des trockenen Brennstoffs simultan verlaufen. Die daraus resultierende Abweichung zwischen dem berechneten und dem realen Massenstrom an abgebauten Brennstoff wird dadurch von der Regelung vernachlässigt. Aus diesem Grund ist eine genaue Einstellung des Massenstroms an abgebautem Brennstoff nicht möglich. Da das Ziel dieser Regelung jedoch nicht die genaue Einstellung dieses Massenstroms ist, sondern die Vergleichmäßigung des Verbrennungsvorgangs, wird dieser Fehler in Kauf genommen.

Eine weitere Vereinfachung dieser Regelung ist die Annahme, dass der Primärluftmassenstrom in seinem gesamten Einstellbereich proportional mit dem Massenstrom an abgebautem Brennstoff zusammenhängt. Real führen sowohl zu geringe Werte als auch zu hohe Werte des Primärluftmassenstroms zu einer Verringerung des Brennstoffabbaus oder gar zu einem Erlischen der Verbrennung. Der proportionale Zusammenhang gilt lediglich in einem engen Betriebsbereich, dessen Grenzen sich über den Abbrandvorgang verändern. Der Sollwert für den Massenstrom an abgebautem Brennstoff muss geeignet gewählt werden, sodass der proportionale Zusammenhang gültig bleibt. Ein realisierbarer Verlauf für den Sollwert wurde basierend auf Testlaufergebnissen für den Scheitholzessel im Versuchssystem bestimmt.

4.1.5 O₂-Regelung

Die O₂-Regelung (Abbildung 13) ist ein linearer PI-Regler, welcher den Sekundärluftmassenstrom als Stellgröße verwendet, um den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases zu regeln. Der Massenstrom und die Zusammensetzung des unverbrannten Gases aus dem Füllraum stellen für diesen Regler Störgrößen dar. Durch eine geeignete Wahl der Reglerparameter wurde sichergestellt, dass diese Störgrößen weitestgehend kompensiert wurden und sich geringstmöglich auf den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases auswirken. Der Sollwert für den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases kann entweder konstant gewählt werden oder von der CO-λ-Regelung vorgegeben werden.

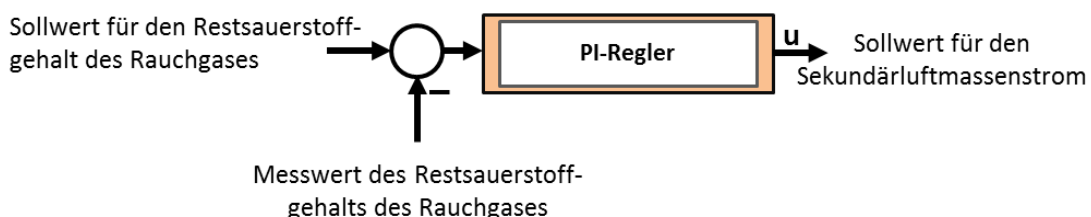


Abbildung 13: Schematische Darstellung des O₂-Reglers

4.1.6 CO- λ -Regelung

Es wurden gezielte Versuche geplant, durchgeführt und ausgewertet, die eine phänomenologische Untersuchung der CO- λ -Charakteristik über die unterschiedlichen Phasen der Verbrennung von Scheitholz zum Ziel hatte. Bei diesen Versuchen wurde der Scheitholzkessel im sogenannten massenstromgeregelten Betrieb betrieben. Dabei wurde der Primärluftmassenstrom konstant gehalten und der Sekundärluftmassenstrom und dadurch der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases sinusförmig variiert. Durch die Auswertung dieser Versuche wurden folgende wesentlichen Ergebnisse für die CO- λ -Charakterisierung bei Scheitholzkessel erarbeitet:

1. Die Entwicklung der CO- λ -Charakteristik nach dem Anheizen des Kessel bis zur Erreichung der Hauptphase zeigt sowohl ein Aufklappen der Charakteristik als auch eine Verschiebung des optimalen Sauerstoffgehaltes (beim CO-Minimum) in Richtung niedrigerer Werte (vgl. Abbildung 14 oben).
2. Die Entwicklung der CO- λ -Charakteristik in der Ausbrandphase zeigt eine Verschiebung der rechten Flanke (vgl. Abbildung 14 unten) in Richtung niedrigerer O₂-Werte.

Die Vorgabe eines über den gesamten Verbrennungsvorgang konstanten Sollwerts für den Restsauerstoffgehalt ist daher unvorteilhaft. In der Anzündphase muss ein höherer Sollwert für den Sauerstoffgehalt gewählt werden um hohe CO-Emissionen zu verhindern. Während der Hauptphase kann der Sollwert jedoch verringert werden, um den Wirkungsgrad der Verbrennung zu steigern. Dies geschieht über eine sogenannte CO- λ -Regelung. Diese Regelung schätzt die CO- λ -Charakteristik unter Verwendung eines kombinierten Sensors zur Sauerstoffmessung und Detektion unverbrannter Komponenten (KS1D Sonde der Fa. LAMTEC) kontinuierlich während des Verbrennungsvorgangs. Basierend auf dieser geschätzten Charakteristik gibt die CO- λ -Regelung der unterlagerten O₂-Regelung einen Sollwert für den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases so vor, dass der Wirkungsgrad maximiert wird bei gleichzeitig minimierten CO-Emissionen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

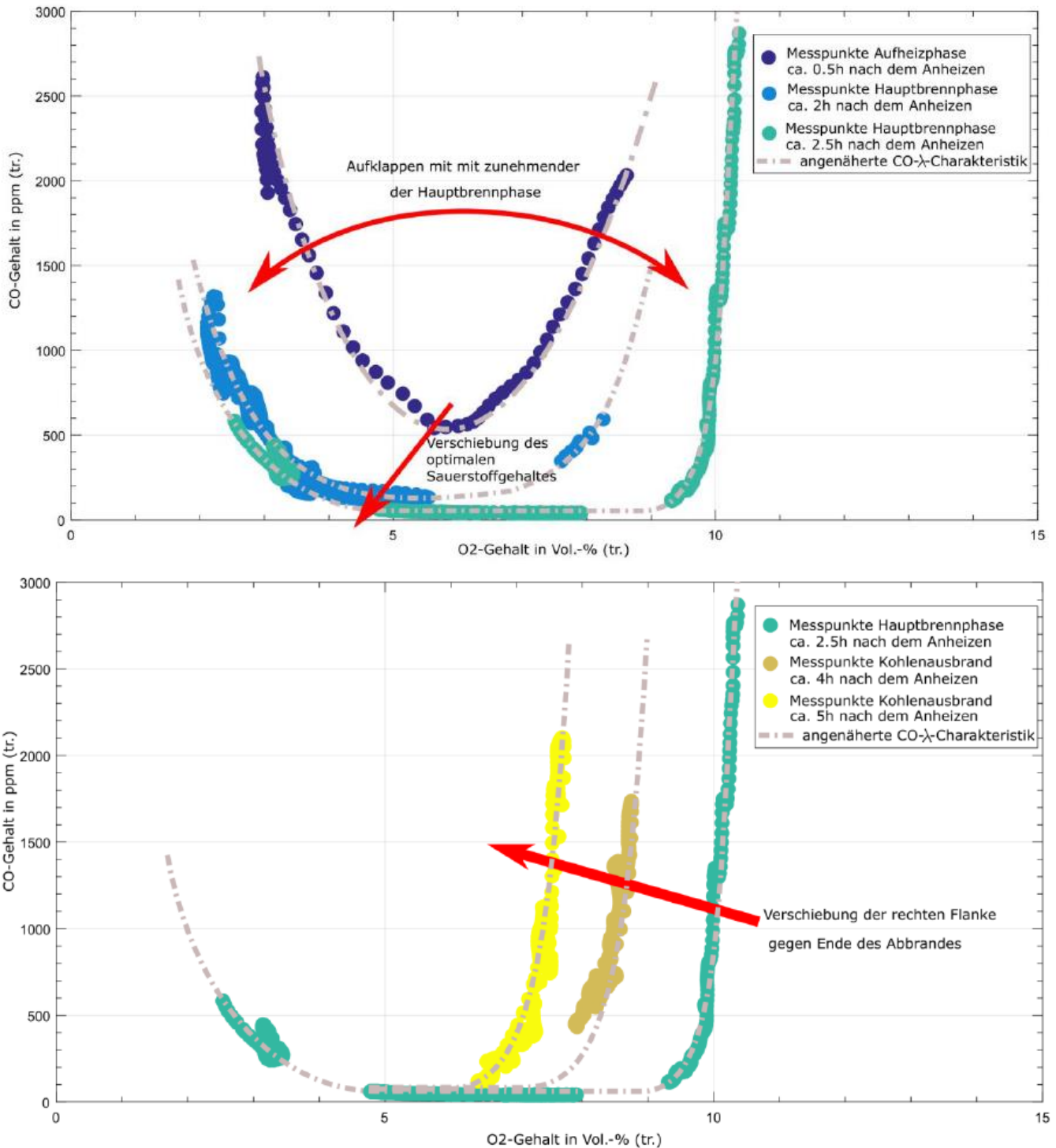


Abbildung 14: Die zeitliche Entwicklung der CO-λ-Charakteristik vom Anheizen des Kessels bis zum Kohlenausbrand. Oben: Die Entwicklung der CO-λ-Charakteristik nach dem Anheizen des Kessels bis zum Erreichen der Hauptphase zeigt sowohl ein Aufklappen der Charakteristik als auch eine Verschiebung des optimalen Sauerstoffgehaltes (beim CO-Minimum) in Richtung niedrigerer Werte. Unten: Die Entwicklung der CO-λ-Charakteristik in der Kohlenausbrandphase zeigt eine Verschiebung der rechten Flanke.

4.2 Systemregelung

Die Systemregelung optimiert den Betrieb des Systems. Der Betrieb des Systems ist optimal, wenn die genützte Solarenergie und der Komfort des Benutzers maximiert und gleichzeitig die Pufferverluste minimiert werden. Das System inklusive Systemregelung ist schematisch in Abbildung 15 dargestellt. Herzstück der Systemregelung ist die in diesem Projekt entwickelte Pufferoptimierung. Diese simuliert den zukünftigen Verlauf der Temperaturen im Pufferspeicher basierend auf prognostizierten Verläufen für den Energieverbrauch des Haushaltes, dem gelieferten Solarertrag der Solarkollektoren und gelieferten Leistung der Scheitholzfeuerung. Zusätzlich berücksichtigt die Systemregelung noch durch den Benutzer vorgegebene Nachlegezeiten. In den nächsten Absätzen werden die einzelnen Prognosemodule und darauf folgend die Methodik hinter der Pufferoptimierung erläutert.

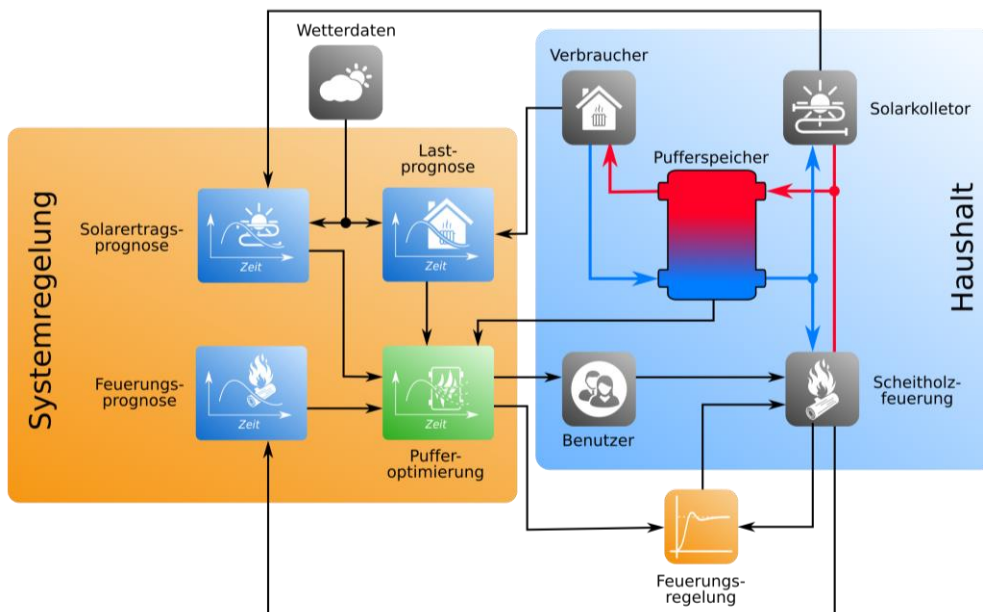


Abbildung 15: Schematische Darstellung der entwickelten Systemregelung.

4.2.1 Last- und Solarertragsprognose

Für die Prognose der Verläufe von Last- und Solarertrag können adaptive Prognosemodelle herangezogen werden, wie sie parallel zu diesem Projekt von BE2020+ im Rahmen des COMET-Programmes (Projekt C-I-2-7 model based load management) und des FFG-Projektes Solar Predictive Control (FFG-Nr. 848776) erarbeitet wurden. Diese nutzen Wetterprognosen und vergangene Verläufe, um Prognosen für die Verläufe von Last und Solarertrag zu erstellen.

4.2.2 Feuerung

Für die Pufferoptimierung ist die von der Feuerung gelieferte Leistung und die Vorlauftemperatur der Feuerung relevant. Durch die in Abschnitt 4.1 präsentierte modellbasierte Feuerungsregelung konnte die Vorlauftemperatur von der wasserseitigen Leistung des Scheitholzkessels entkoppelt werden. Dadurch konnte auf ein komplexes Abbrandmodell verzichtet und davon ausgegangen werden, dass die Leistung mit konstanter Temperatur äquivalent zur gewünschten Vorlauftemperatur geliefert wird.

Die für die Optimierung benötigte Information reduziert sich dadurch auf den, von der Feuerung an den Pufferspeicher gelieferten, Leistungsverlauf (der Vorlauftemperatursollwert wird von der Optimierung vorgegeben) und wie lange es ab dem Zündzeitpunkt dauert, bis wieder Brennstoff in die Feuerung nachgelegt werden kann (die Temperatur in der Brennkammer muss kleiner 80 °C sein). Der Leistungsverlauf kann durch das Modell in Abbildung 16 beschrieben werden. Es unterteilt den Abbrand in drei Phasen: eine Startphase (t_{start} bis $t_{\text{Hauptphase}}$), eine Hauptphase ($t_{\text{Hauptphase}}$ bis t_{Ausbrand}) und eine Ausbrandphase (ab t_{Ausbrand}). Abbildung 17 zeigt die hervorragende Übereinstimmung des Feuerungsmodelles (rot) mit verschiedenen gemessenen Abbränden (blau). Bei jedem Abbrand wurde die Brennkammer vollgefüllt. Insbesondere die für die Optimierung wichtige gelieferte Energie zeigt hohe Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Diese Tests zeigten auch, dass ein vollständiger Abbrand immer diese generelle Form hat und sich Unterschiede in Füllmenge oder Brennstoffqualität hauptsächlich in der Dauer der Hauptphase auswirken. Abbildung 18 zeigt den Unterschied im Leistungsverlauf bei Abbrand einer vollen bzw. halben Füllung. Man erkennt, dass der Abbrand einer vollen Füllung erwartungsgemäß länger dauert aufgrund der höheren Brennstoffmasse in der Brennkammer. Abbildung 19 zeigt den Unterschied der Feuerungsleistung zwischen Weichholz (rot) und Hartholz (blau). Man erkennt, dass der Abbrand von Hartholz eine längere Hauptphase als der Abbrand von Weichholz aufweist. Dies ist begründet durch die größere Dichte von Hartholz gegenüber Weichholz und daraus folgend der größeren Brennstoffmenge in der Brennkammer bei gleicher Füllung.

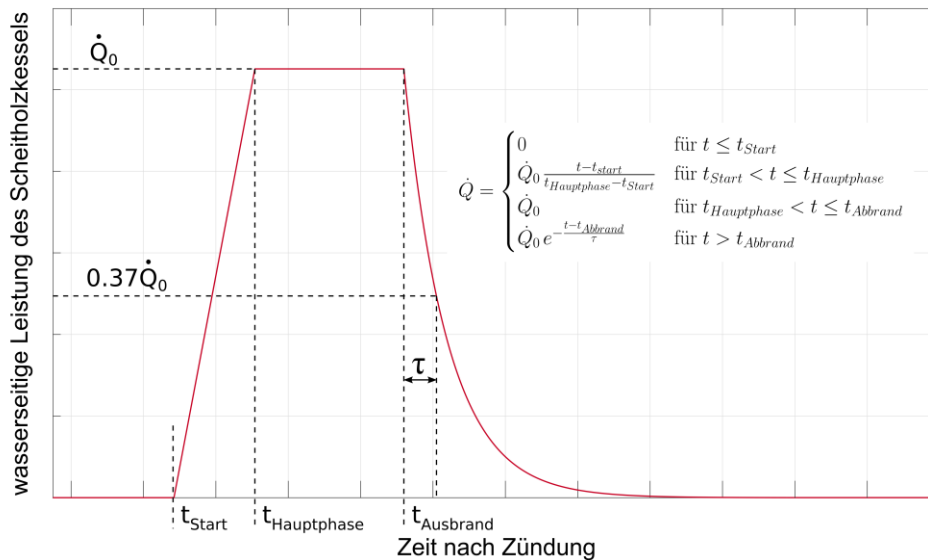


Abbildung 16: Feuerungsmodell für die Systemregelung.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

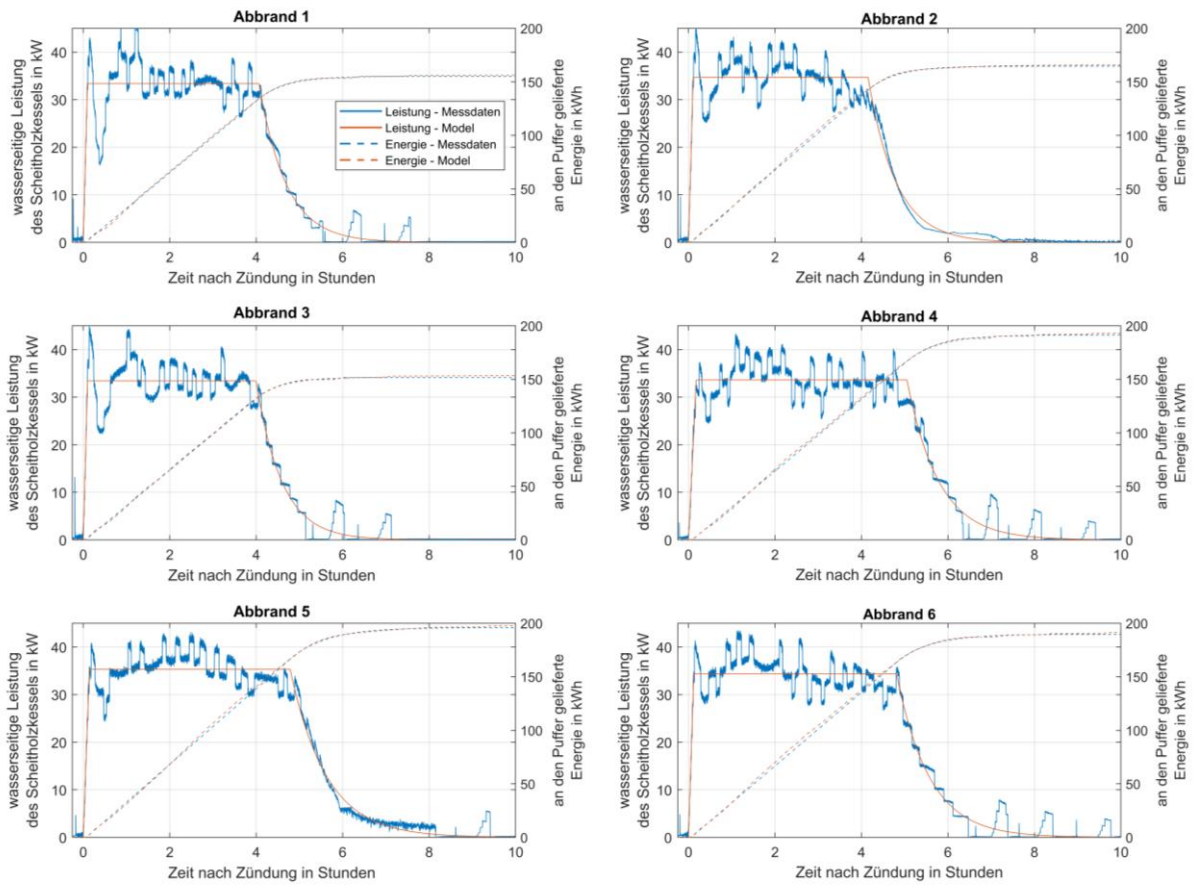


Abbildung 17: Modellierung unterschiedlicher Leistungskurven mit dem Feuerungsmodell für die Systemregelung.

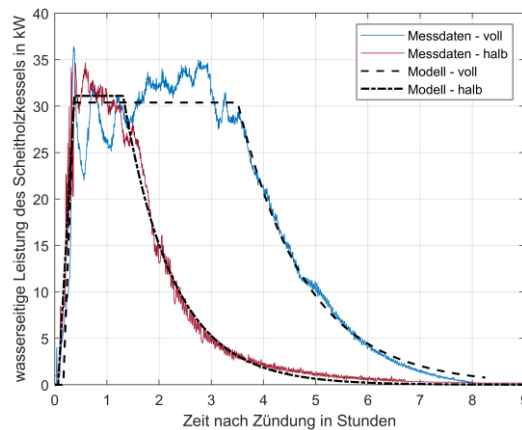


Abbildung 18: Unterschied den Leistungskurven beim Abbrand einer vollen bzw. halben Füllung von Weichholz

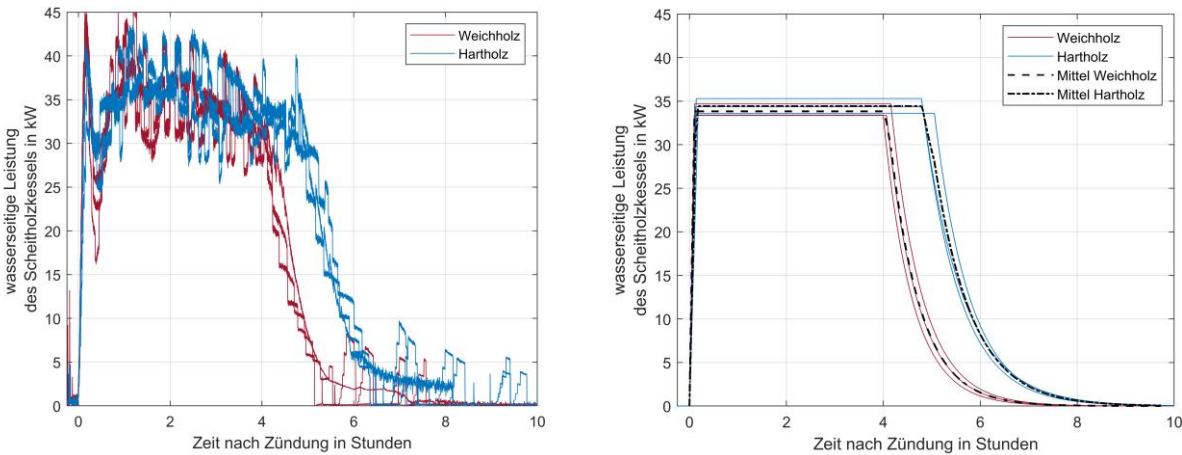


Abbildung 19: Unterschied im Abbrandverhalten zwischen Weichholz und Hartholz. Links: Vergleich von Messdaten – rechts: Vergleich der modellierten Abbrände

4.2.3 Pufferspeicher

Der Pufferspeicher ist essentiell für den Einsatz der Systemregelung. Er ermöglicht es, den rasch schwankenden Wärmebedarf mit einem relativ trägen Scheitholzkessel abdecken zu können. Um das für die Systemregelung relevante Verhalten des Pufferspeichers abbilden zu können, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das den vertikalen Temperaturverlauf von Pufferspeicher abbilden kann. Es berücksichtigt deren Abhängigkeit von axialer Wärmeleitung, konvektiver Energiezufuhr und -abfuhr, Umgebungsverlusten, Energiezufuhr durch interne Wärmeübertrager und natürliche Konvektion. Um den Bedarf an Rechenleistung und -geschwindigkeit möglichst niedrig zu halten, wurden verschiedene Modellvereinfachungen untersucht. Das entwickelte Modell wird in der Folge in kurzen Worten beschrieben.

Basierend auf den Ergebnissen einer extensiven Literaturrecherche wurde ein eindimensionales Modell, das auf der numerischen Lösung von Erhaltungsgleichungen basiert, in Kombination mit einem Mischalgorithmus verwendet. Dabei wird der zu simulierende Speicher in N Zellen unterteilt und für jede Zelle die jeweiligen Massen- und Energieerhaltungsgleichungen gelöst. Diese wurden mit dem Finite-Differenzen-Verfahren diskretisiert. Nach jedem Rechenschritt wurde der Mischalgorithmus angewandt. Dabei wird überprüft, ob der zuvor berechnete vertikale Temperaturverlauf im Speicher nach unten hin monoton fallend ist. Sollte dies nicht der Fall sein, liegt eine wärmere Schicht unter einer kühleren. Dann werden die beiden Schichten an der entsprechenden Stelle gemischt und der vertikale Temperaturverlauf erneut überprüft. Dies geschieht so lange, bis die Temperatur im gesamten Speicher nach unten hin monoton fallend ist. Die Verwendung dieses sehr einfachen Mischalgorithmus ermöglicht es, die Auswirkungen von natürlicher Konvektion zu simulieren, ohne dabei (zusätzlich zur Massen- und Energieerhaltungsgleichung) auch noch die Impulsbilanzgleichung lösen zu müssen. Dadurch konnte deutlich an Rechengeschwindigkeit gewonnen werden.

Für die Beschreibung der Auswirkungen von Wärmeverlusten und der Energiezufuhr durch interne Wärmeübertrager wurden zusätzliche Modelle für die Wärmedurchgangskoeffizienten der Pufferspeicher- und Wärmeübertragerwände entwickelt. Dazu wurde ein empirisch parametrisiertes Modell entwickelt und experimentell an dem im Abschnitt 3 beschriebenen Prüfstand validiert. In Abbildung 20 ist ein Vergleich von gemessenen und simulierten Temperaturen auf verschiedenen Höhen

im Speicher während eines Versuches über 24 Stunden zu sehen. Im Zuge dieses Versuchs wurde der Speicher durch den Scheitholzessel und die simulierte Solaranlage geladen und über den simulierten Wärmeverbraucher entladen. Prinzipiell ist erkennbar, dass simulierte und gemessene Temperaturen bis auf wenige Ausnahmen gut übereinstimmen. Lediglich die gemessenen und simulierten Temperaturen bei $z = 0,12\text{ m}$ und $z = 1,83\text{ m}$ weisen relevante Abweichungen auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese beiden Temperatursensoren sich in der Nähe von Anschlussöffnungen und im oberen bzw. unteren Totvolumen befinden. In der Realität entstehen im Bereich der Anschlüsse Sekundärströmungen in Form von Wirbeln, die eine Vermischung des Wassers in diesem Bereich (hier teilweise im Totvolumen) bewirken. Im Modell wurde diese Vermischung durch Wirbel nicht berücksichtigt. Da für die Speichersimulation im Zuge der Systemregelung die Temperaturen im Totvolumen jedoch untergeordnete Relevanz haben, können diese Abweichungen für die Systemoptimierung vernachlässigt werden.

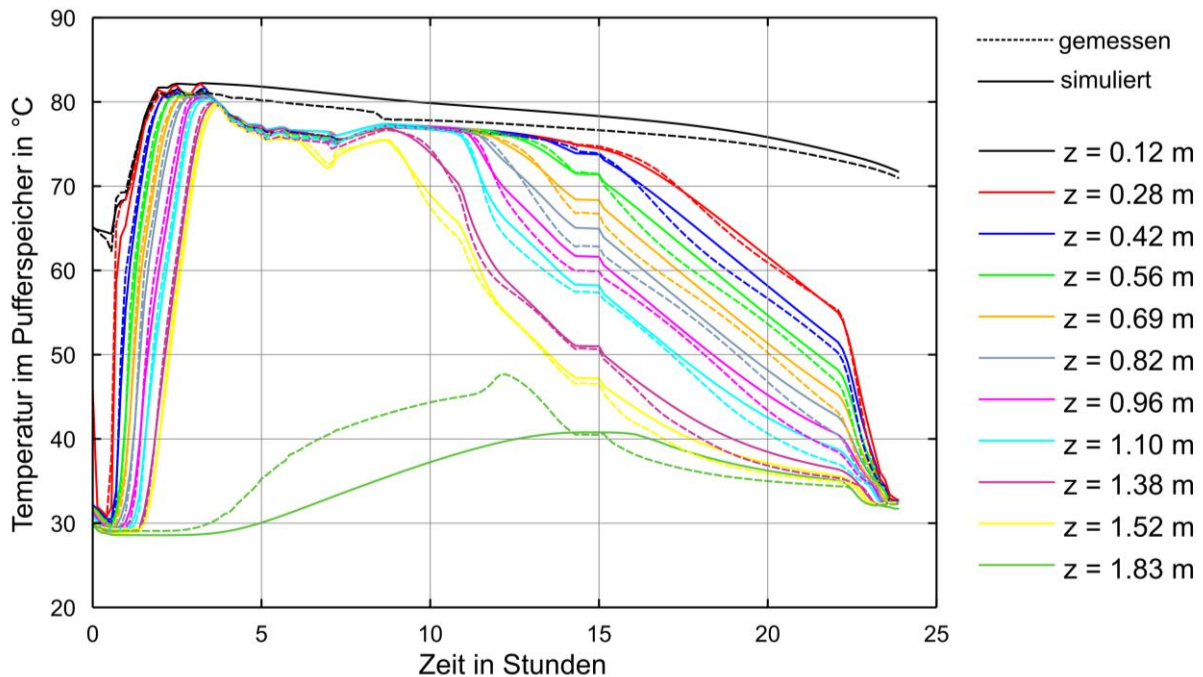


Abbildung 20: Validierung des Pufferspeichersmodells mit 50 Zellen anhand von Messdaten aus Speicher 1 des Versuchssystems (z ist die Einbauhöhe gemessen vom Kopf des Pufferspeichers)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das entwickelte Simulationsmodell das dynamische Verhalten der untersuchten Pufferspeicher sehr gut wiedergeben kann und die dafür nötige Rechenzeit mit rund 5 Minuten für 24 h simulierte Zeit (an einem üblichen Bürocomputer mit 150 Zellen und einer zeitlichen Diskretisierung von 5 Sekunden) eindeutig niedrig genug ist, um das Simulationsmodell in die Systemoptimierung einbinden zu können.

4.2.4 Systemoptimierung

Ziel der Systemoptimierung ist es den Betrieb des Systems aus energetischer Sicht zu optimieren und gleichzeitig den Komfort des Benutzers zu erhöhen. Zur energetischen Optimierung müssen folgende Ziele erreicht werden:

- Der Solarertrag soll maximiert werden
Dieser wird dann maximiert, wenn Eintrittstemperatur in den Solarkollektor so gering wie möglich gehalten wird. Die Energieaufnahme im Solarkollektor ist einerseits durch die Kollektoraustrittstemperatur und andererseits durch das maximale Fördervolumen der Pumpe limitiert. Die Kollektoraustrittstemperatur ist sicherheitstechnisch begrenzt um Verdampfen der Kollektorflüssigkeit zu verhindern, das Fördervolumen aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten. Eine geringere Eintrittstemperatur reduziert zusätzlich die Kollektorverluste aufgrund von Abstrahlung. Die Eintrittstemperatur des Solarkollektors ist dann gering, wenn die Puffertemperatur im Bereich des Solarregisters so gering wie möglich gehalten wird.
- Die Pufferverluste sollen minimiert werden
Diese werden minimiert, wenn die Temperaturen im Puffer so gering wie möglich gehalten werden. Dadurch wird die Temperaturdifferenz zur Umgebung minimiert, wodurch in weiterer Folge der Wärmeverluststrom an die Umgebung durch Wärmeleitung durch die Behälterwand minimiert wird. Diese Forderung unterstützt gleichzeitig die Maximierung der genutzten Solarenergie, da dadurch die Puffertemperatur im Bereich des Solarregisters so gering wie möglich gehalten wird.
- Die Anzahl der Abbrände soll minimiert werden
Durch die Minimierung der Abbrände werden Verluste der Feuerung durch vermehrtes Aufwärmen der Peripherie (Schamott, Rost usw.) der Feuerung reduziert. Weiteres werden die meisten Schadstoffemissionen in der Startphase des Abbrandes produziert. Eine Minimierung der Abbrände führt folglich auch zu einer Minimierung der Schadstoffemissionen. Durch die Maximierung der genutzten Solarenergie und die Minimierung der Pufferverluste wird indirekt der Bedarf an zusätzlicher Energie aus Brennstoff reduziert, wodurch die Anzahl der benötigten Abbrände reduziert wird. Daraus folgt auch, dass der Abbrand einer vollen Füllung dem Abbrand einer halben Füllung vorzuziehen ist.

Die einzige Eingriffsmöglichkeit der Optimierung in das System ist die Feuerung. Die Optimierung hat die Möglichkeit der untergelagerten Feuerungsregelung einen Sollwert für die Vorlauftemperatur vorzugeben sowie den Zündzeitpunkt zu definieren. Dem Benutzer kann vorgegeben werden, wann er nachlegen muss und welche Menge an Brennstoff für die nächste Zündung benötigt wird (somit welche Energie im nächsten Abbrand zu Verfügung steht).

Um den Komfort des Benutzers zu erhöhen, wurde die Variation der geforderten Brennstoffmenge auf entweder eine volle oder eine halbe Füllung der Brennkammer limitiert. Als zusätzliche Randbedingung kann der Benutzer bevorzugte Zeitfenster zur Füllung der Feuerung angeben. Dabei wurde die Einschränkung getroffen, dass mindestens 2 Nachlegefenster mit je 2 Stunden vorhanden sein müssen. Diese müssen einen Abstand von mindestens 8 Stunden haben. Dies entspricht typischerweise einer

Nachlegemöglichkeit in der Früh und einer Abends. Die Optimierung versucht dann die Zündung zeitlich so zu wählen, dass ein Nachlegen innerhalb der definierten Fenster möglich ist. Dafür muss die Temperatur in der Brennkammer der Feuerung unter 75°C betragen. Dieser Wert wurde experimentell gefunden.

Die oben geforderten energetischen Ziele werden grundsätzlich erreicht, wenn die Feuerung so spät wie möglich zündet. Dadurch wird der Pufferspeicher immer so leer wie möglich gefahren und die Puffertemperaturen bleiben niedrig. Gleichzeitig soll aber der Komfort des Benutzers nicht eingeschränkt werden. Es kann vorkommen, dass der optimale Zündzeitpunkt dazu führen würde, dass dem Benutzer kein nutzbares Nachlegefenster zu Verfügung steht. Es wurde für wichtiger erachtet den Komfort des Benutzers nicht einzuschränken als den optimalen Betrieb aus energietechnischer Sicht zu erreichen. Die Systemregelung sucht daher unter Berücksichtigung der aktuellen Prognosen für Lastbedarf, Solarertrag und gelieferte Feuerungsleistung nach dem Zündzeitpunkt, der Vorlauftemperatur und dem Füllgrad der Feuerung, um die energetischen Ziele so weit wie möglich zu erfüllen und dem Benutzer das Nachlegen innerhalb eines der bevorzugten Nachlegefenster zu ermöglichen.

Um die Komplexität des Optimierungsproblems zu reduzieren, wurde angenommen, dass von der Feuerung nur zwei mögliche Vorlauftemperaturen geliefert werden können. Dabei stellt die niedrigere Temperatur den Standardwert da. Die höhere Temperatur wird nur verwendet um den Pufferspeicher zu überfüllen, sollte anders kein Nachlegen innerhalb der bevorzugten Nachlegefenster möglich sein. Dieses Vorgehen ist auch aus Sicht des Pufferspeichers sinnvoll. Durch das Laden des Speichers mit konstanter Temperatur entsteht eine geschichtete Temperaturverteilung im Speicher, wodurch Mischvorgänge im Pufferspeicher reduziert werden. Zusätzlich führt das Laden des Pufferspeichers mit höherer Temperatur zu einer höheren thermischen Belastung der Komponenten des Systems, wodurch das System bei dauerhafter Belastung Schaden nimmt.

Im Folgenden ist das Optimierungsverfahren der Systemregelung schrittweise dargestellt.

1. Durch Simulation des Puffers unter Berücksichtigung der aktuellen Prognosen für Lastbedarf, Solarertrag und gelieferte Feuerungsleistung und niedriger Vorlauftemperatur wird der Zeitpunkt T_1 gesucht, an dem die Feuerung spätestens gezündet werden muss (Pufferspeicher wird leer), damit der prognostizierte Lastbedarf noch erfüllt werden kann.
2. In der Simulation wird dann zu T_1 eine volle Füllung gezündet und berechnet wann der Puffer wieder (zum zweiten Mal) leer wird. Dies ist der prognostizierte Zeitpunkt T_2 der zweiten notwendigen Zündung.
3. Wenn es dem Benutzer möglich ist zwischen T_1 und T_2 nachzulegen (d.h. mindestens ein bevorzugtes Nachlegefenster zwischen T_1 und T_2 liegt und die Feuerung ist kalt genug) dann ist die Optimierung abgeschlossen.
4. Sollte das nicht möglich sein, wird der erste Zündzeitpunkt T_1 nach vorne geschoben bis ein bevorzugtes Nachlegefenster zwischen $T_{1,\text{neu}}$ und T_2 fällt. T_1 kann nur soweit vorgezogen werden bis der Pufferspeicher an seine Füllgrenze stößt.

5. Sollte es nicht möglich sein T_1 soweit vorzuziehen, dass ein Nachlegen möglich ist, wird versucht statt einer voller Füllung eine halbe Füllung zu zünden und die Schritte 3 und 4 wiederholt.
6. Sollte trotz halber Füllung ein Nachlegen nicht möglich sein wird die Vorlauftemperatur auf das höhere Temperaturniveau angehoben und die Optimierung wiederholt.

4.2.5 Benutzerinteraktion

Die größte Auswirkung auf die von der Feuerung gelieferte Energie hat der Benutzer. Die Systemregelung fordert vom Benutzer entweder eine halbe oder eine volle Füllung der Brennkammer. Dieser ist dafür verantwortlich, dass diese Forderung entsprechend umgesetzt wird. Jeder Benutzer schichtet dabei unterschiedlich wieviel Brennstoff ein. Es gibt Unterschiede, wann die Feuerung für voll bzw. halbvoll gehalten wird und ob der Brennstoff regelmäßig eingeschichtet oder zufällig in die Kammer geworfen wird. Dadurch ändert sich die Masse an Brennstoff in der Brennkammer. Zusätzlich kann es zu Brennstoffwechsel mit Änderung des Energiegehaltes kommen, wodurch trotz gleich durchgeführter Füllung unterschiedlich viel Energie zu Verfügung steht.

Für eine richtige Prognose ist es daher essentiell, dass die Pufferoptimierung entsprechend auf das Benutzerverhalten angepasst wird. Da es nicht möglich ist das Benutzerverhalten vorab durch den Servicetechniker zu definieren, wurde eine Methode entwickelt, die das Benutzerverhalten erlernt und Brennstoffwechsel erkennt und so eine bessere Prognose der Feuerung ermöglicht.

Die Systemregelung speichert jeweils ein Werteset für die Parameter des Feuerungsmodells für eine volle bzw. halbvolle Füllung. Nach jedem Abbrand wird ein Set neuer Parameter für das Feuerungsmodell ermittelt, sodass der gemessene Leistungsverlauf abgebildet wird. Die gespeicherten Werte werden mit den neuen Werten basierend auf folgendem Zusammenhang aktualisiert:

$$\hat{p}_{n+1} = \omega(p_n - \hat{p}_n) + \hat{p}_n \quad \text{Formel 4-6}$$

Dabei ist p_n der jeweilige neu ermittelte Parameter, der \hat{p}_n aktuell gespeicherte Wert und \hat{p}_{n+1} der neu gespeicherte Wert für den jeweiligen Parameter, ω ist die Gewichtung wie stark sich der neue Wert auswirkt ($\omega = 0$ bedeutet keine Auswirkung, $\omega = 1$ bedeutet vollständiges Vergessen des alten Wertes).

Dadurch wird das jeweilige, zum geforderten Füllgrad passende, Modell schrittweise angepasst, um die neuen Messdaten zu berücksichtigen.

Um das Erlernen des Nutzerverhaltens zu demonstrieren, wurden Testläufe mit einem Wechsel der Brennstoffqualität durchgeführt. Nach dem Abbrand von drei vollen Füllungen mit Weichholz wurden drei volle Füllungen Hartholz verbrannt. Abbildung 21 zeigt die Anpassung des Feuerungsmodells aufgrund der Änderung der Brennstoffqualität. Nach jedem Abbrand wird das Feuerungsmodell aktualisiert. Solange sich der Brennstoff nicht ändert (Abbrand 1 bis 3), sind nur kleine Änderungen in der Prognose sichtbar. Nach dem Brennstoffwechsel (Abbrand 4) wird die Prognose schrittweise an die neue Brennstoffqualität angepasst. Die zulässige Änderung pro Abbrand der Prognose wurde begrenzt damit einmalige Ereignisse wie z.B. einmalige Füllfehler keine starke Auswirkung auf die Prognose haben.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

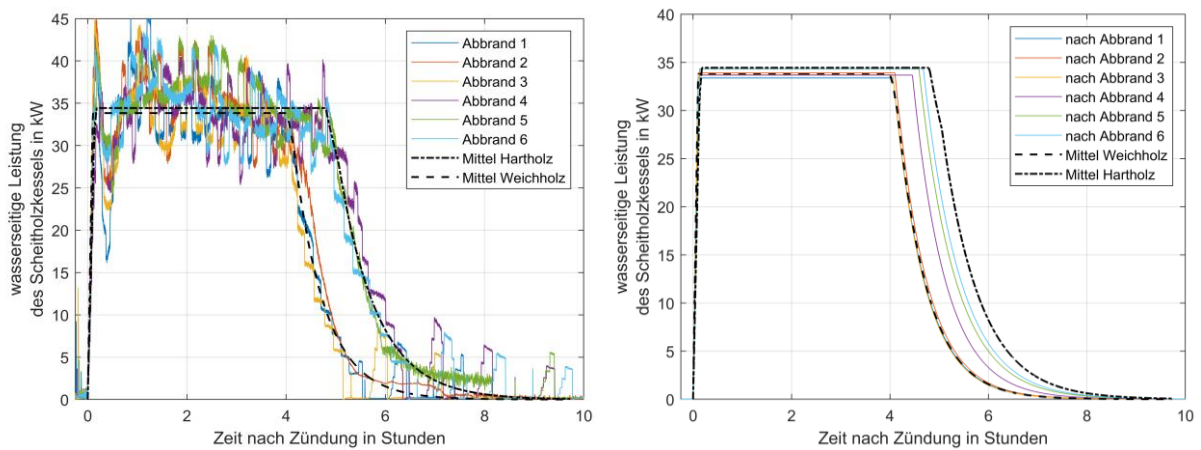


Abbildung 21: Lernen von Änderungen der Brennstoffeigenschaften beim Wechsel der Brennstoffqualität von Weichholz auf Hartholz. Links: Die durch die einzelnen Abbrände gelieferten Leistungen. Rechts: Die Änderung der prognostizierten Feuerungsleistung nach jedem Abbrand ($\omega = 0.2$).

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

5.1 Feuerungsregelung

5.1.1 Beschreibung der Testläufe

Zur Evaluierung der modellbasierten Feuerungsregelung und zum Vergleich mit einer klassischen Feuerungsregelung wurden Testläufe durchgeführt. Dabei wurden mit beiden Feuerungsregelungen jeweils drei aufeinanderfolgende Abbrände durchgeführt. Jeder einzelne Abbrand wurde vom kalten Anlagenzustand aus gestartet mit etwa 16 Stunden Zeit zur Abkühlung der Feuerung nach jedem Abbrand. Beim jeweils ersten Abbrand wurde die Asche vollständig aus dem Feuerraum entfernt, für die nächsten beiden Abbrände wurde die Asche im Feuerraum belassen. Beim Einschichten des Brennstoffs in den Füllraum wurde auf ein immer gleichbleibendes Vorgehen und eine gleichmäßige Belegung des Füllraums geachtet. Die Versuchsparameter waren wie folgt:

- Brennstoff:
 - 45kg Weichholz (Fichte)
 - Wassergehalt 11,5 Gew.-%
 - C-Anteil: 51,33 Gew.-% TS
 - H-Anteil: 6,25 Gew.-% TS
 - O-Anteil: 42,1 Gew.-% TS
 - N-Anteil: <0,1 Gew.-% TS
 - Aschegehalt: 0,22%
- Sollwerte:
 - Vorlauftemperatur: 80°C
 - Restsauerstoffgehalt des Rauchgases: 5 Vol.-%

Im Rahmen der Testläufe wurde ein konventioneller Rauchgasanalysator zur Bestimmung der gasförmigen Emissionen eingesetzt. Daneben wurde eine Gesamtstaubmessung nach VDI 2066-1, welche auf der EN 13284-1 basiert, durchgeführt. Bei dieser Methode wird ein Teilstrom des Rauchgases isokinetisch dem Rauchgaskanal entnommen und über einen Filter (Stopfhülse oder Planfilter) gesaugt. Für die Testläufe dieses Projektes wurden Planfilter eingesetzt, die den Staub im Filter zurückhalten. Die Staubbiladung des Rauchgases wird aus der Gewichtsdiiferenz des Filters vor und nach der Messung sowie dem abgesaugten Rauchgasvolumen, welches mittels Gasmengenzähler bestimmt wird, berechnet. Die Gesamtstaubmessungen wurden im unverdünnten Rauchgasteilstrom durchgeführt.

5.1.2 Überblick über Testlaufergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der in 5.1.1 erläuterten Testläufe dargestellt und beide Regelungen miteinander verglichen. Tabelle 3 stellt die Regelfehler der klassischen und der modellbasierten Feuerungsregelung in der Hauptphase dar.

- Beginn der Hauptphase: nach dem Zünden, wenn die Temperatur des Rauchgases einen Wert von 780°C für 2 Minuten überschreitet
- Ende der Hauptphase: wenn der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases für 2 Minuten größer als 9 Vol.-% ist und das Primärluftverhältnis für 2 Minuten größer als 1,4 ist.

Es ist zu erkennen, dass die modellbasierte Regelung sowohl die Vorlauftemperatur als auch den Restsauerstoffgehalt des Rauchgases deutlich genauer auf dem jeweiligen Sollwert halten kann.

Tabelle 3: Regelfehler der klassischen und der modellbasierten Feuerungsregelung in der Hauptphase

Regelfehler	Vorlauftemperatur in °C		Restsauerstoffgehalt in Vol.-% (feucht)	
	Mittelwert	Std.-Abw.	Mittelwert	Std.-Abw.
konventionelle Reg. Testlauf 1	0,65	1,44	-0,55	0,79
konventionelle Reg. Testlauf 2	0,3	1,84	-0,38	0,62
konventionelle Reg. Testlauf 3	0,45	2,41	-0,4	1,31
modellbasierte Reg. Testlauf 1	0,45	3,04	-0,11	1,04
modellbasierte Reg. Testlauf 2	0,003	0,18	0,04	0,39
modellbasierte Reg. Testlauf 3	0,001	0,21	0,003	0,32

In Tabelle 4 sind der Mittelwert und der Spitzenwert der CO-Emissionen in der Hauptphase für die klassische und die modellbasierte Feuerungsregelung dargestellt. Die CO-Emissionen sind für beide Regelungen in ähnlichen Bereichen, wobei der Betrieb mit der modellbasierten Regelung typischerweise geringere CO-Emissionen aufweist.

Tabelle 4: CO-Emissionen in der Hauptphase für die klassische und die modellbasierte Feuerungsregelung

gasförmige Emissionen	CO-Emissionen in mg/Nm ³ bezogen auf 13 Vol.-% O ₂	
	Mittelwert	Spitzenwert
konventionelle Reg. Testlauf 1	655	26608
konventionelle Reg. Testlauf 2	186	38841
konventionelle Reg. Testlauf 3	73	7383
modellbasierte Reg. Testlauf 1	958	26497
modellbasierte Reg. Testlauf 2	154	14361
modellbasierte Reg. Testlauf 3	65	2608

In den folgenden Abschnitten 5.1.3 bis 5.1.6 werden die Ergebnisse des jeweils dritten Versuchs der beiden Testreihen („konventionelle Reg. Testlauf 3“ und „modellbasierte Reg. Testlauf 3“) miteinander verglichen. Es wurden für die einzelnen Regelgrößen unterschiedliche Zeitbereiche definiert, in denen die beiden Regelungen miteinander verglichen werden („ausgewerteten Bereich“). Diese Zeitbereiche sind wie folgt definiert:

- Vorlauftemperatur:
 - Beginn: erstes Erreichen der Sollwerts
 - Ende: letztes durchschreiten des Sollwerts
- Massenstromregler:
 - Beginn: Beginn der Hauptphase
 - Ende: Ende der Hauptphase
- Leistungsregelung:
 - Beginn: Beginn der Hauptphase
 - Ende: Ende der Hauptphase
- O₂-Regelung:
 - Beginn: erstes Erreichen der Sollwerts
 - Ende: letztes durchschreiten des Sollwerts

5.1.3 Vorlauftemperaturregelung

Abweichung des Messwerts vom Sollwert im ausgewerteten Bereich	Klassische Feuerungsregelung		Modellbasierte Feuerungsregelung	
	Mittelwert	Std.-Abw.	Mittelwert	Std.-Abw.
Vorlauftemperatur in [°C]	-0,89	2,98	-0,024	0,22

Abbildung 22 zeigt einen Vergleich der durch beide Regelungen eingestellten Vorlauftemperaturen. Die Vorlauftemperatur erreicht mit der modellbasierten Feuerungsregelung schneller einen stationären Verlauf um den Sollwert und kann auch über den gesamten Abbrand deutlich genauer auf dem Sollwert gehalten werden.

5.1.4 Massenstromregelung

Abbildung 23 zeigt die Massenströme an Primär- und Sekundärluft während eines Abbrands für beide Regelungen. Während des Betriebs mit der modellbasierten Feuerungsregelung werden diese Massenströme geregelt. Abbildung 23 (rechts) stellt einen Vergleich zwischen Soll- und geregelten Messwerten dar. Die modellbasierte Massenstromregelung kann die Massenströme im gesamten Betriebsbereich (Hauptphase und Ausbrandphase) auf ihren Sollwerten halten.

5.1.5 Leistungsregelung

Abbildung 24 zeigt den Massenstrom an abgebautem Brennstoff während eines Abbrands für beide Regelungen. Während des Betriebs mit der modellbasierten Feuerungsregelung wird dieser Massenstrom geregelt.

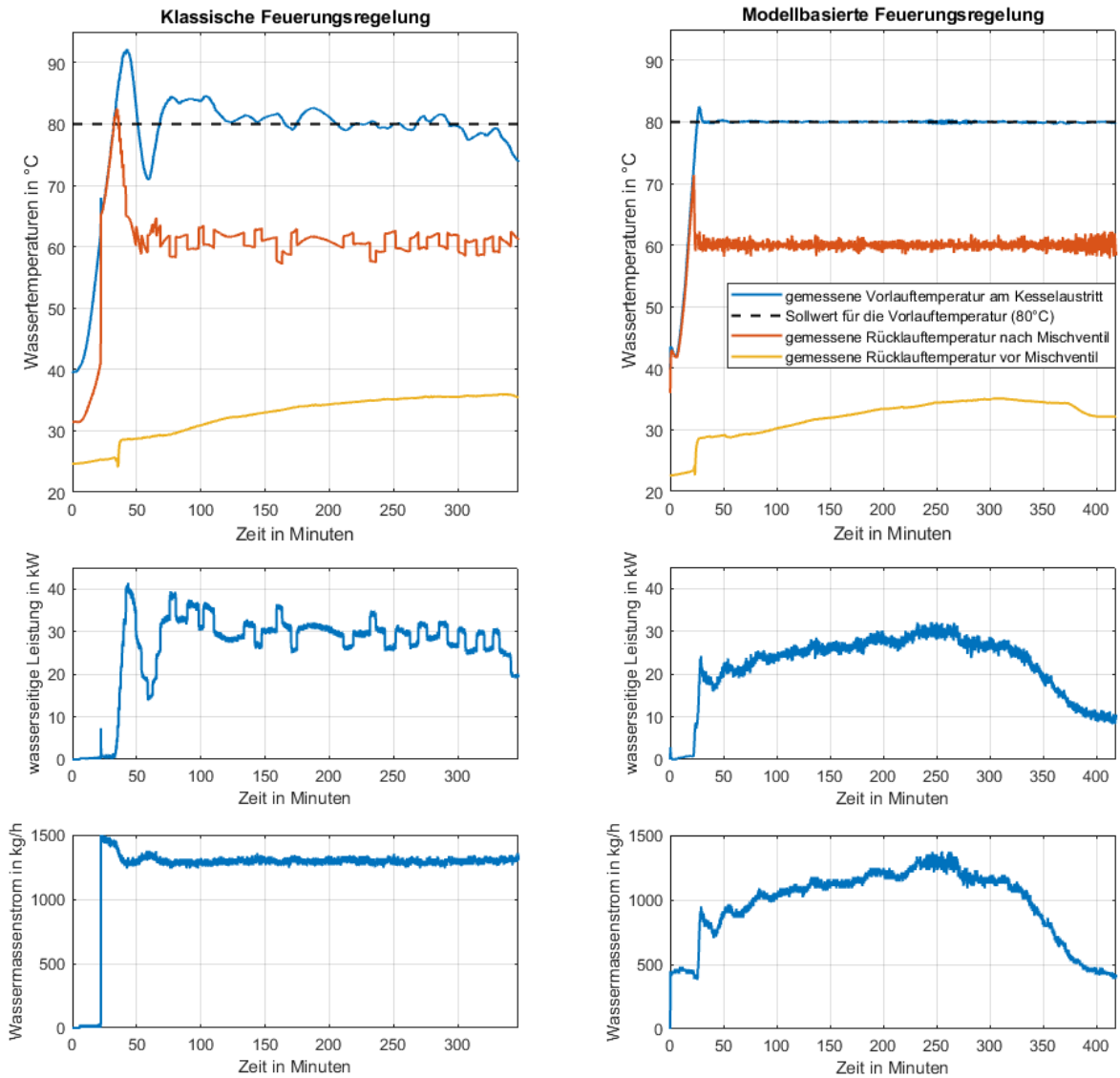
Abbildung 24 (rechts) stellt einen Vergleich zwischen Soll- und geregelten Messwerten dar. Die modellbasierte Feuerungsregelung kann den Massenstrom im gesamten Betriebsbereich (Hauptphase) auf dem Sollwert halten.

5.1.6 O₂-Regelung

Abbildung 25 zeigt einen Vergleich des durch beide Regelungen eingestellten Restsauerstoffgehalts des Rauchgases. Der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases erreicht mit der modellbasierten Feuerungsregelung deutlich schneller einen stationären Verlauf um den Sollwert und kann auch über den gesamten Abbrand deutlich genauer auf dem Sollwert gehalten werden. Dadurch kommt es auch zu signifikant verringerten CO-Emissionen mit der modellbasierten Feuerungsregelung.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

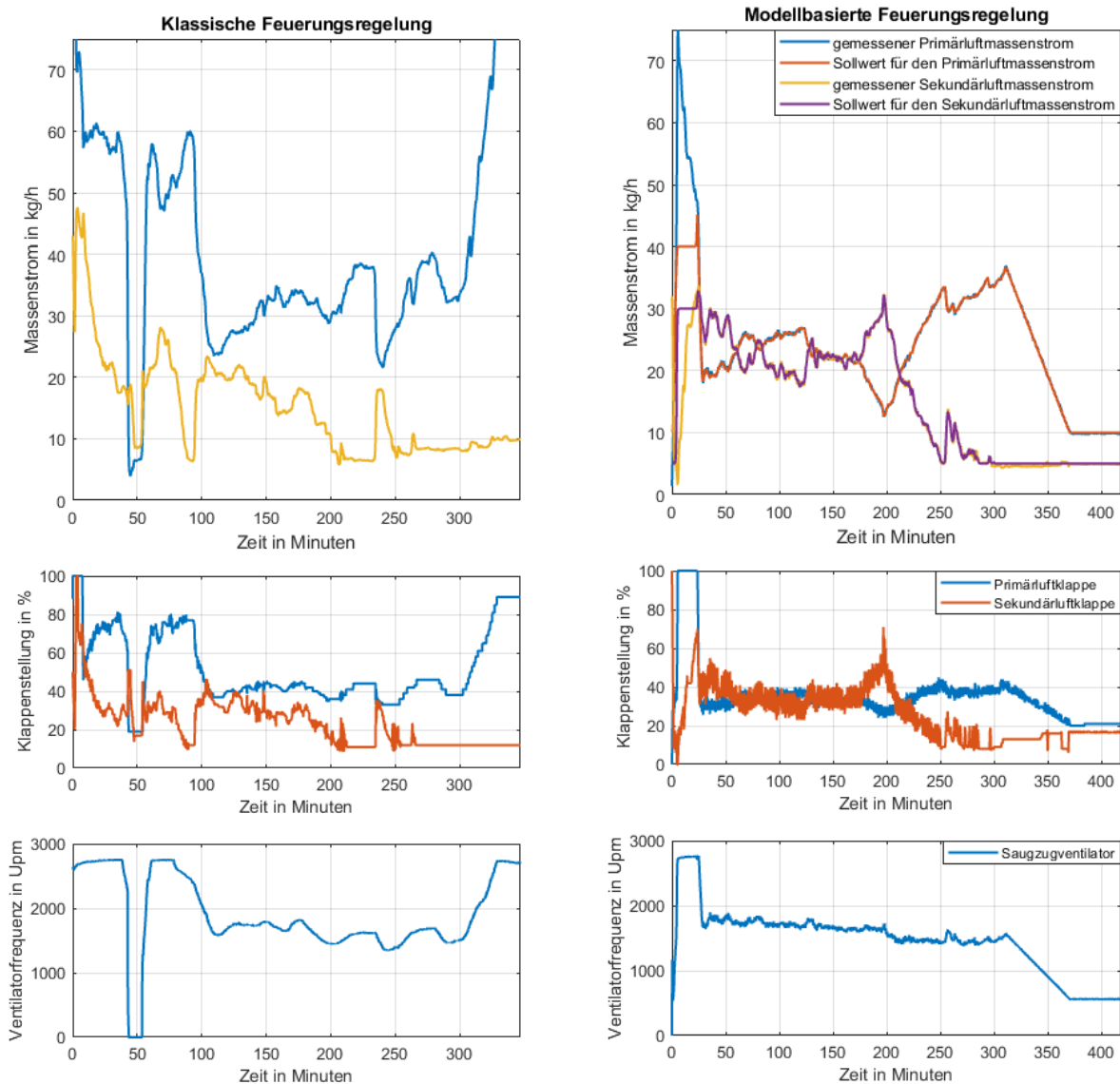


Abweichung des Messwerts vom Sollwert im ausgewerteten Bereich	Klassische Feuerungsregelung		Modellbasierte Feuerungsregelung	
	Mittelwert	Std.-Abw.	Mittelwert	Std.-Abw.
Vorlauftemperatur in [°C]	-0,89	2,98	-0,024	0,22

Abbildung 22: Vergleich der durch beide Regelungen geregelten Vorlauftemperatur und der dazugehörigen Stellgrößenverläufe des Wassermassenstroms sowie der wasserseitigen Leistung

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

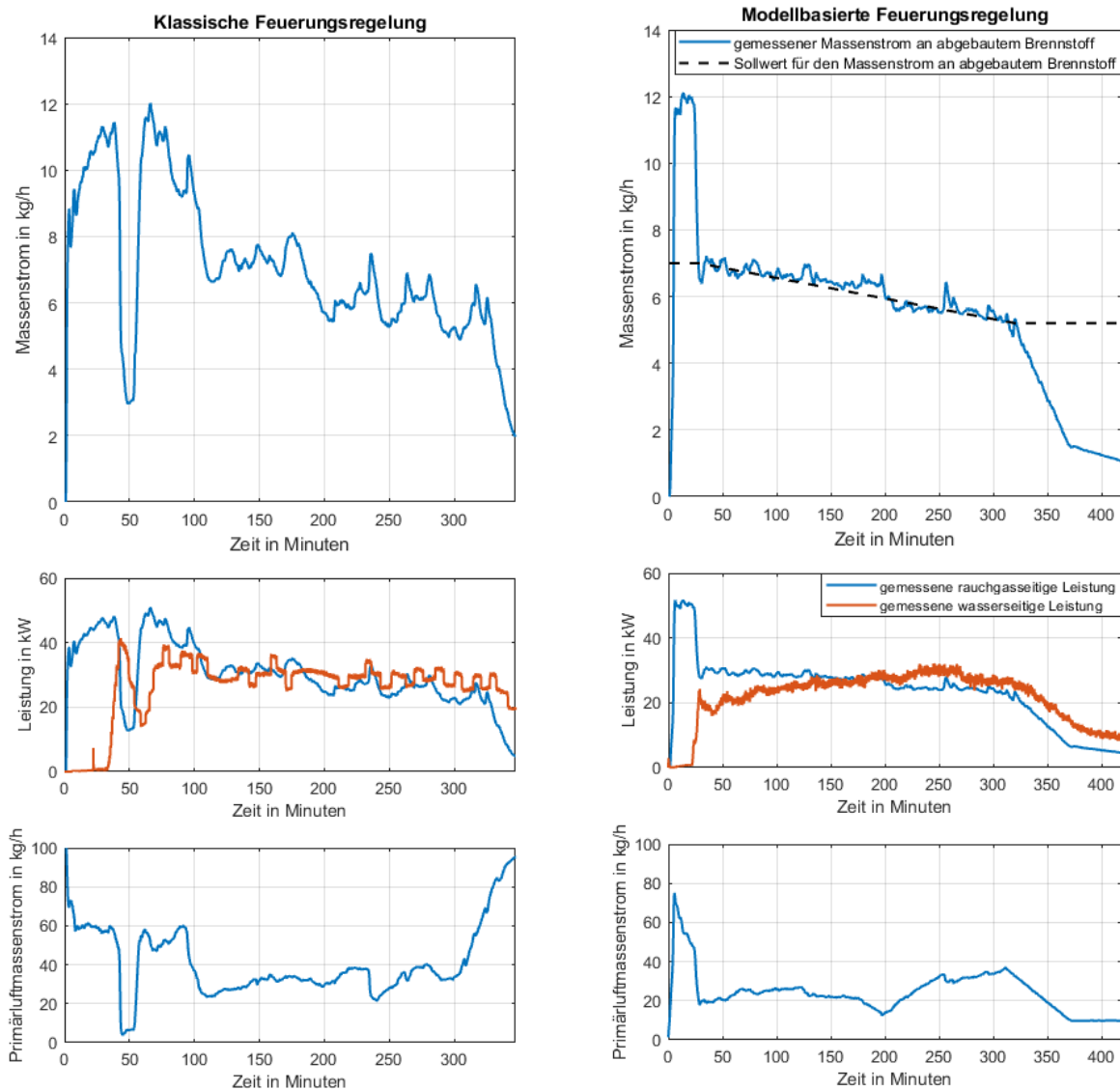


Abweichung des Messwerts vom Sollwert im ausgewerteten Bereich	Klassische Feuerungsregelung		Modellbasierte Feuerungsregelung	
	Mittelwert	Std.-Abw.	Mittelwert	Std.-Abw.
Primärluftmassenstrom in [kg/h]	-	-	-0,02	0,26
Sekundärluftmassenstrom in [kg/h]	-	-	0,06	0,4

Abbildung 23: Primär- und Sekundärluftmassenströme und die dazugehörigen Stellgrößenverläufe der Saugzugventilatorfrequenz und Regelklappenstellungen während eines Abbrands für beide Regelungen, rechts: durch die modellbasierte Regelung geregelten Massenströme

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

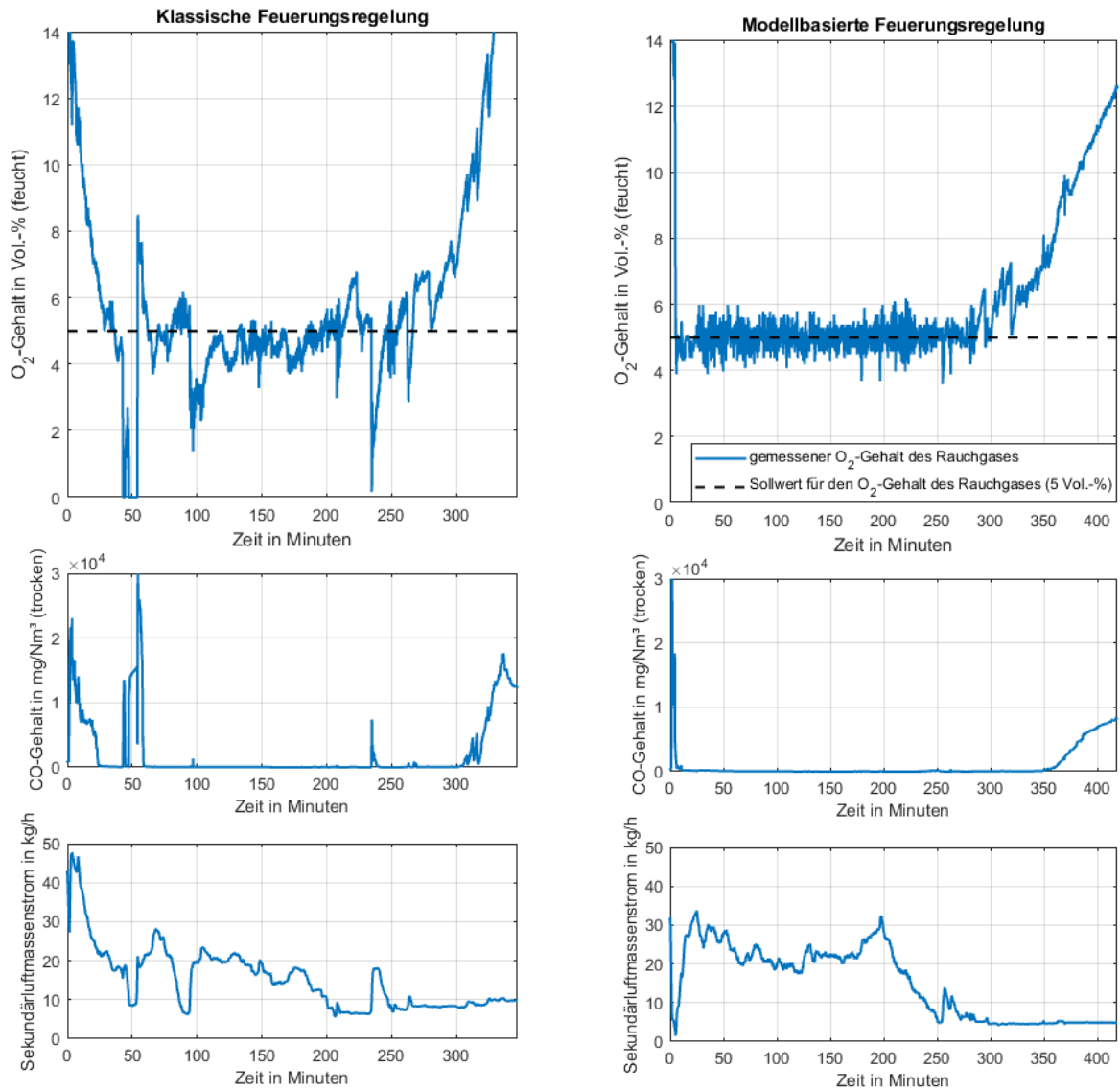


Abweichung des Messwerts vom Sollwert im ausgewerteten Bereich	Klassische Feuerungsregelung		Modellbasierte Feuerungsregelung	
	Mittelwert	Std.-Abw.	Mittelwert	Std.-Abw.
Massenstrom an abgebautem Brennstoff in [kg/h]	-	-	-0,1	0,21

Abbildung 24: Massenstrom an abgebautem Brennstoff und die dazugehörigen Stellgrößenverläufe des Primärluftmassenstroms während eines Abbrands für beide Regelungen, rechts: durch die modellbasierte Regelung geregelter Massenstrom

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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



Abweichung des Messwerts vom Sollwert im ausgewerteten Bereich	Klassische Feuerungsregelung		Modellbasierte Feuerungsregelung	
	Mittelwert	Std.-Abw.	Mittelwert	Std.-Abw.
O ₂ -Gehalt in [Vol.-%]	0,51	1,27	-0,03	0,34

Emissionen im ausgewerteten Bereich	Klassische Feuerungsregelung		Modellbasierte Feuerungsregelung	
	Mittelwert	Max. Wert	Mittelwert	Max. Wert
CO Emissionen in [mg/Nm ³] bezogen auf 13 Vol.-% O ₂	937,6	30389	60,1	1135,6

Abbildung 25: Vergleich des durch beide Regelungen geregelten Restsauerstoffgehalts des Rauchgases und der dazugehörigen Stellgrößenverläufe des Sekundärluftmassenstroms sowie der CO-Emissionen

5.2 Systemregelung

5.2.1 Testlaufbeschreibung

Zur Bewertung der entwickelten Systemregelung war es notwendig einen Validierungsversuch zu entwickeln der eine möglichst generelle Bewertung zulässt. Die generelle Betriebsweise des Systems ist dabei von vielen Faktoren abhängig, die wichtigsten sind Jahreszeit und Benutzer.

Je nach Jahreszeit hat die Systemregelung mehr bzw. weniger Optimierungsspielraum. Im Winter sind die Anlagen typischerweise so dimensioniert, das täglich mindestens einmal, an kalten Tagen oft auch zweimal gezündet werden muss. Gleichzeitig ist es in den Sommermonaten über viele Tage gar nicht nötig zu zünden.

Auch die Lebenssituation der Benutzer hat Einfluss auf den Optimierungsspielraum. Von einer Familie mit jungen Kindern ist möglicherweise ein wesentlich regelmäßigeres Verhalten zu erwarten als von einem alleine stehenden Geschäftsmann oder einer alleine stehenden Geschäftsfrau. Dies hat direkte Auswirkungen auf das Lastverhalten und auf die Art wie die Feuerung betrieben wird.

Es gibt auch durchaus Benutzer, die ihre Feuerung flexibel und unter Berücksichtigung der aktuellen Wetterprognose betreiben. Dadurch übernimmt der Benutzer direkt die Rolle der Systemregelung. Gegenüber solch einem Fall sind nur noch minimale Verbesserungen durch die Systemregelung zu erwarten.

Aufgrund der Vielzahl von Kombinationen war es nicht möglich alle Fälle in den Validierungsversuchen abzubilden. Die Rahmenbedingungen der Validierungsversuche wurden mithilfe der Erfahrungen des Projektpartners KWB derart gewählt, dass möglichst häufig eintretende Situationen durch die Versuche abgebildet werden und der Nutzen der Systemregelung anhand der Ergebnisse bewertet werden kann.

Zur experimentellen Verifikation der Funktionsweise der Systemregelung wurden mehrtägige Testläufe durchgeführt. Dazu wurden repräsentative Last- und Solarertragsprofile erstellt und diese auf das System aufgeprägt. Für die Systemregelung wurden, basierend auf den Profilen für Last und Solarertrag, Prognosen erstellt. Dafür wurden die aufgeprägten Profile derart modifiziert, dass sowohl Zeiten mit zu hoher Prognose als auch Zeiten mit zu geringer Prognose abgebildet werden. Die gewünschten Nachlegefenster des Benutzers waren definiert von 8:00 - 10:00 und 18:00 - 20:00.

5.2.1.1 Lastprofil

Zur Simulation der Verbraucher durch die Bewohner wurde das Lastprofil, typisch für Tage in der Übergangszeit, mittels Wärmetauscher aus dem Pufferspeicher entnommen. Dabei wurde angenommen, dass die Rücklauftemperatur von Verbraucher zu Pufferspeicher immer 30°C beträgt und der Massenstrom durch den Heizkreis durch die Pumpe limitiert ist. Daraus folgt, dass die geforderte Leistung nicht geliefert werden konnte, sollte die Temperatur im Pufferspeicher bei Entnahme zu gering werden (der Puffer ist leer). In Abbildung 26 ist das verwendete Lastprofil (blau) sowie modifizierte Prognose (rot) dargestellt.

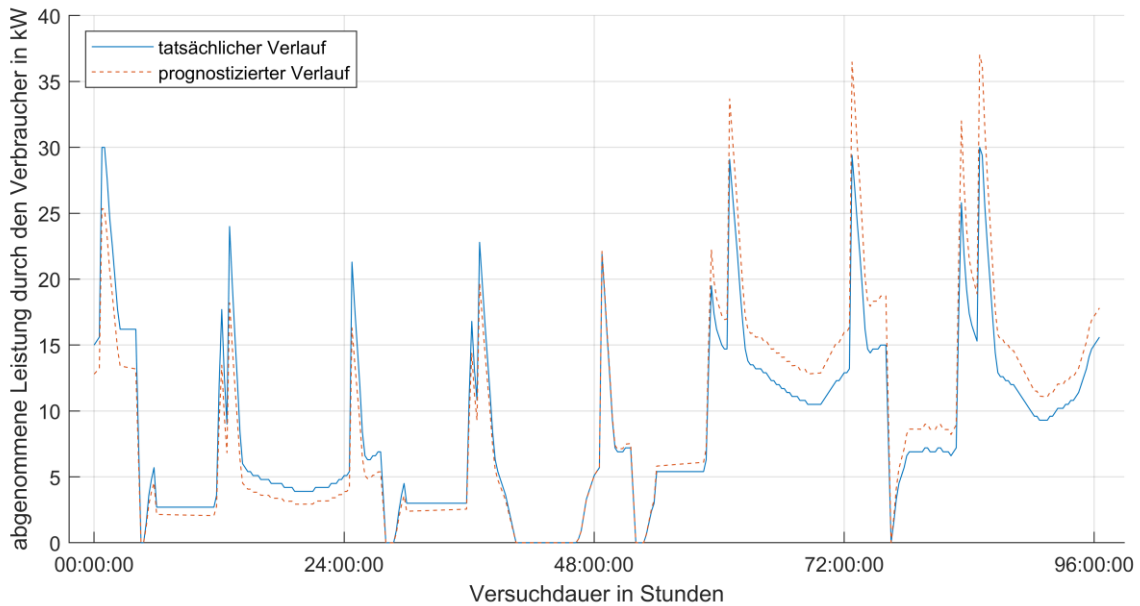


Abbildung 26: tatsächlicher und prognostizierter Verlauf des Lastprofils des Verbrauchers

5.2.1.2 Solarertragsprofil

Der Solarertrag wurde durch eine elektrische Heizung simuliert. Dabei wurde von der elektrische Heizung ein Leistungsprofil bereitgestellt, das dem Solarertrag typischer Übergangstage entspricht. Zusätzlich durfte die Temperatur des zum Pufferspeicher zurücklaufenden Mediums 80°C nicht überschreiten. Daraus folgte, dass der Solarertrag nicht voll genutzt werden konnte, sollte die Temperatur im Puffer zu hoch werden (der Puffer ist voll). In Abbildung 27 ist das verwendete Solarertragsprofil (blau) sowie die modifizierte Prognose (rot) dargestellt.

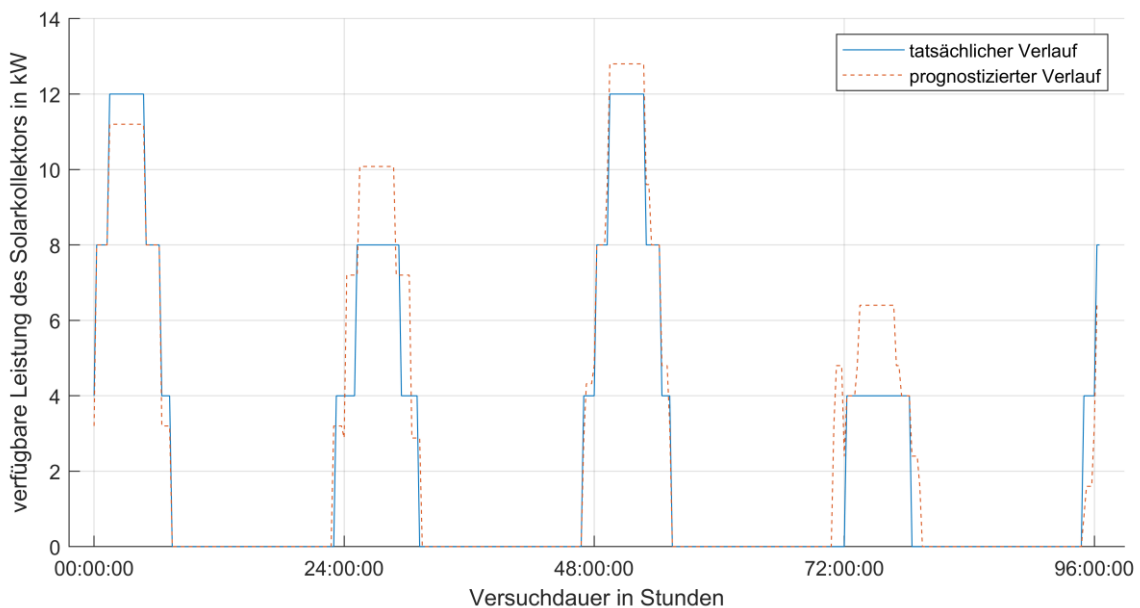


Abbildung 27: tatsächlich und prognostizierte Verlauf des Solarertragsprofils

5.2.1.3 Feuerungsprognose

Für die Feuerungsprognose wurde das Feuerungsmodell mit Parameter für einen typischen Abbrand von Weichholz (voll und halb gefüllt) initialisiert (Tabelle 5). Diese wurden während des Tests durch die in Abschnitt 4.2.5 beschriebene Benutzerinteraktion adaptiert.

Tabelle 5: Startparameter für das Feuerungsmodell

	voll gefüllt	halb gefüllt
\dot{Q}_0	34720 W	31100 W
t_{Start}	1630 s	240 s
$t_{Hauptphase}$	2025 s	1360 s
$t_{Abbrand}$	16600 s	4720 s
τ	2300 s	3430 s

5.2.2 Vergleich mit der kommerziell erhältlichen Regelung

Um die Systemregelung bewerten zu können, wurde der beschriebene Testlauf mit der kommerziell erhältlichen Regelung wiederholt. Dabei wurde typisches Benutzerverhalten angenommen, welches anhand von Erfahrungswerten des Firmenpartners KWB folgendermaßen definiert wurde: Der Pufferzustand wurde in jedem Nachlegefenster einmalig überprüft. Sollte die mittlere Puffertemperatur kleiner als 58°C betragen, wurde die Feuerung mit einer vollen Füllung Brennstoff gestartet.

Abbildung 30 bis Abbildung 31 zeigen den Vergleich eines Ausschnitts der beiden Testläufe. Der Testlauf mit der Systemregelung (SR) ist in grün dargestellt, der Testlauf mit der klassischen Regelung (KR) in rot. Beide Testläufe wurden um 9:00 mit leerem Puffer durch die Zündung einer vollen Füllung gestartet.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

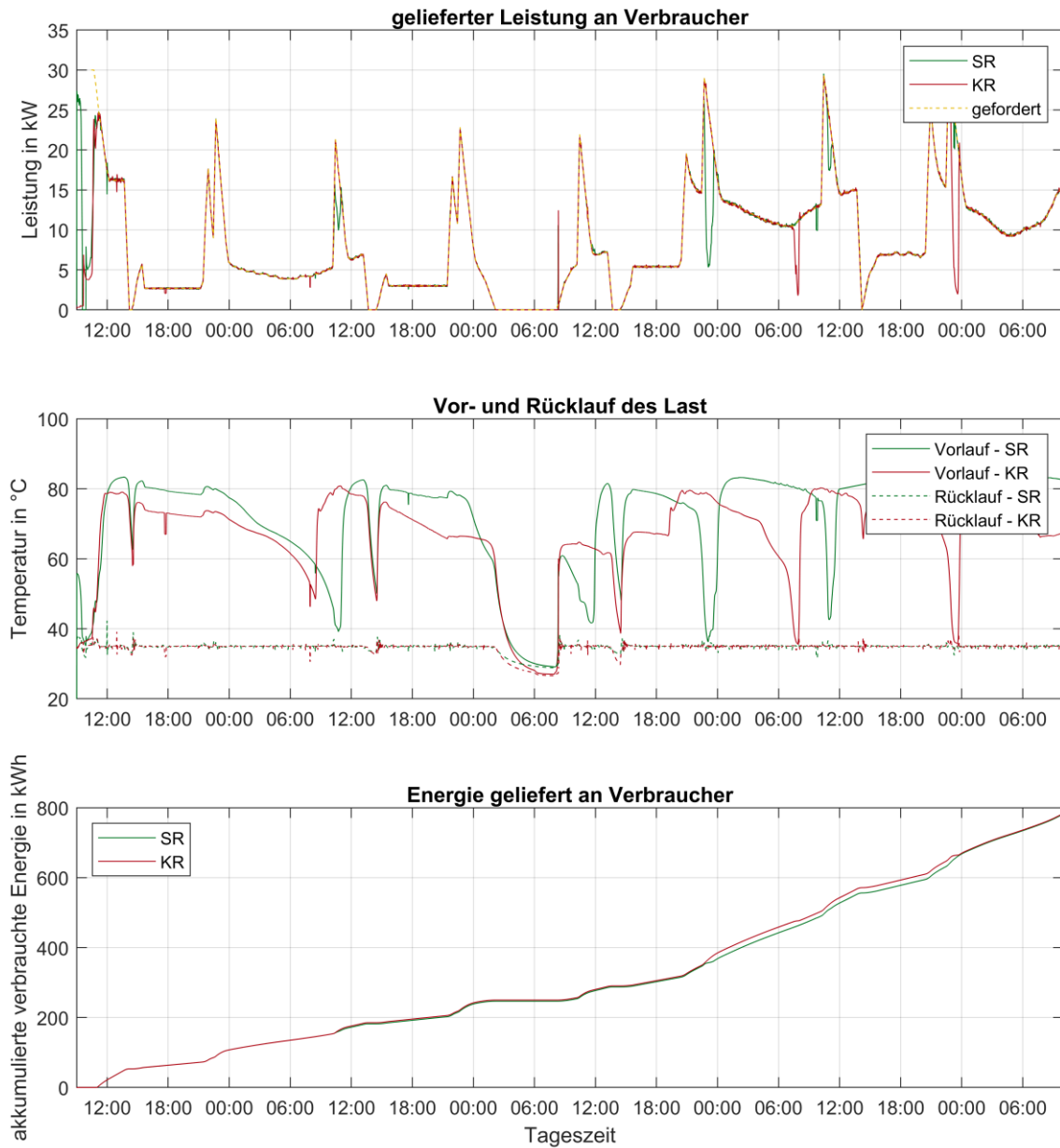


Abbildung 28 zeigt das Verhalten der Last. Das oberste Diagramm zeigt, dass die geforderte Leistung über die meiste Zeit an den Verbraucher geliefert werden konnte. Beide Regelungen hatten Probleme die Spitzen gegen Ende zu decken. Im mittleren Diagramm kann man erkennen, dass zu diesen Zeiten die Vorlauftemperatur eingebrochen ist und daher der Puffer leer war. Das unterste Diagramm zeigt im Vergleich, dass beide Regelungen dieselbe Menge an Energie an die Verbraucher liefern konnten und daher derselbe Komfort bereitgestellt wurde.

In Abbildung 29 zeigt das Verhalten des Scheitholzkessels während des Testlaufs. Im obersten Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass die Feuerungen unterschiedlich gezündet wurden. Bei der zweiten und dritten Zündung der Systemregelung wurde nur jeweils eine halbe Füllung gezündet. Im Testlauf mit der Systemregelung wurde eine Zündung mehr durchgeführt, wobei aufgrund der

zweimaligen Zündung einer halben Füllung die aus Brennstoff gelieferte Energie in beiden Testläufen ident war (unterstes Diagramm).

Die unterschiedlichen Zündungen hatten zu Folge, dass die Solarenergie unterschiedlich genutzt werden konnte (Abbildung 30). Im obersten Diagramm ist ersichtlich, dass aufgrund der späteren halben Zündung der Systemregelung an Tag zwei, die verfügbare Solarenergie an diesem Tag besser genutzt werden konnte.

Abbildung 31 zeigt den Verlauf des Pufferspeichers über den Testlauf. Das oberste Diagramm zeigt die im Pufferspeicher gespeicherte Energie. Diese wurde mit einer Bezugstemperatur von 40°C berechnet. Man erkennt, dass die Systemregelung durch die Zündung von halben Füllungen, das Energieniveau und damit auch die mittlere Temperatur im Pufferspeicher (mittleres Diagramm) niedrig hält. Die Pufferspeicherverluste an die Umgebung sind dadurch geringer (unteres Diagramm).

5.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Der Vergleich der beiden Regelungen zeigt, das Potential der Systemregelung. Zwar konnte die Anzahl der Zündungen gegenüber der kommerziell erhältlichen Regelung nicht reduziert werden, dies lässt sich aber darauf zurückführen, dass die Regelung in Zündungen mit halber Füllung in Kauf genommen hat um die genutzte Solarenergie zu erhöhen und die Temperatur im Pufferspeicher zu senken. Grundsätzlich ist erkennbar, dass durch die Systemregelung die Zündungen generell später erfolgen, wodurch bei einer längeren Versuchsdauer zu erwarten ist, dass durch die Systemregelung Zündungen gegenüber der kommerziellen Regelung eingespart werden können.

Der Einsatz der Systemregelung hat zu einer Steigerung der genutzten Solarenergie geführt. Die kommerziell erhältliche Regelung nützte 117 kWh, während die neuentwickelte Systemregelung um rund 8 % mehr Energie (126 kWh) nutzen konnte. Zusätzlich konnte durch die Systemregelung die mittlere Temperatur über den Testlauf um rund 1°C gesenkt werden. Daraus ergab in weitere Folge eine Reduktion der Pufferverluste um rund 14 % von 122 kWh auf 105 kWh. Diese Erhöhungen der energetischen Effizienz des Systems konnten ohne Verlust von Komfort für den Benutzer umgesetzt werden.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

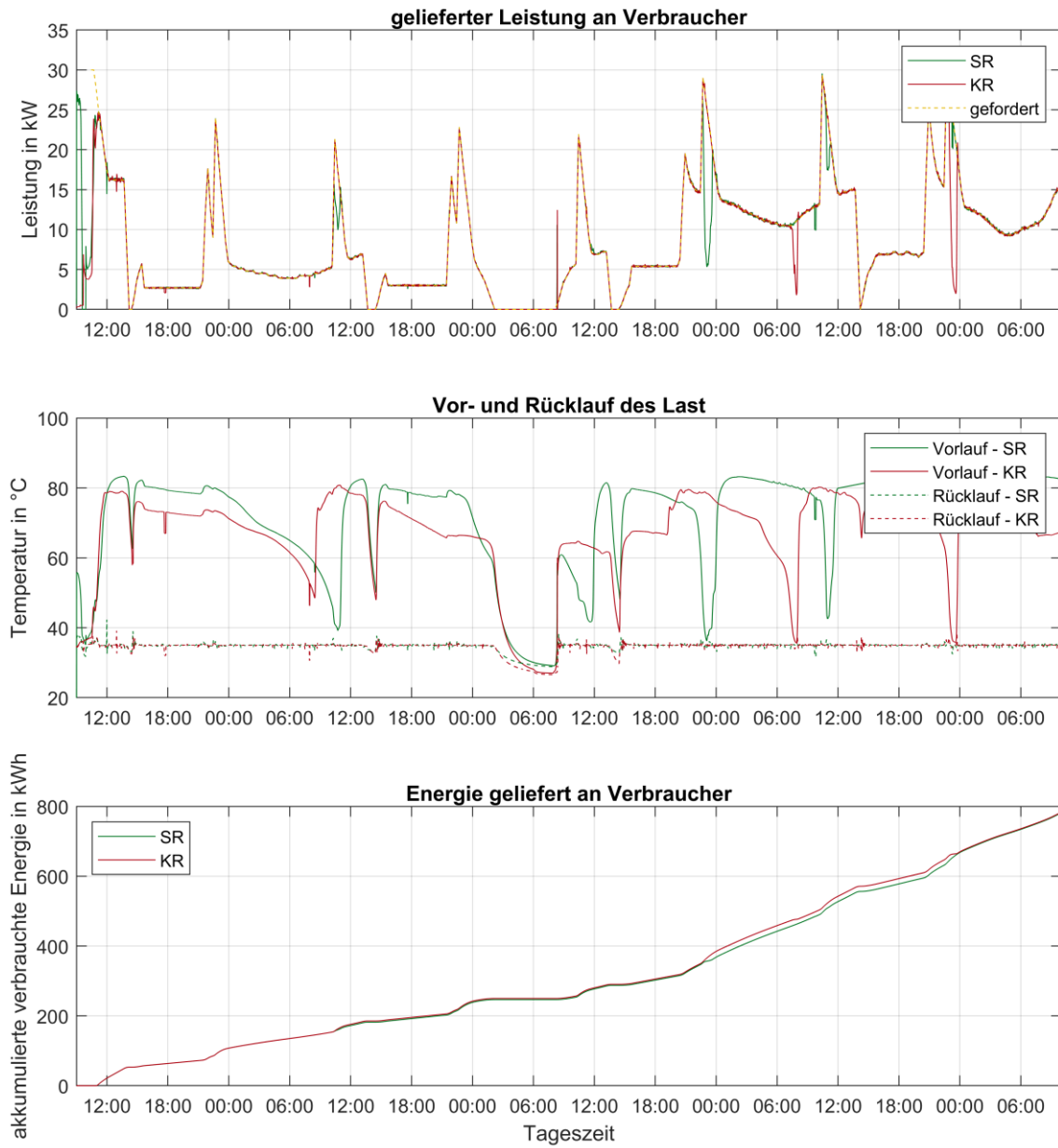


Abbildung 28: Vergleich der Systemregelung (SR) mit der klassischen Regelung (KR) – Verhalten der Last

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

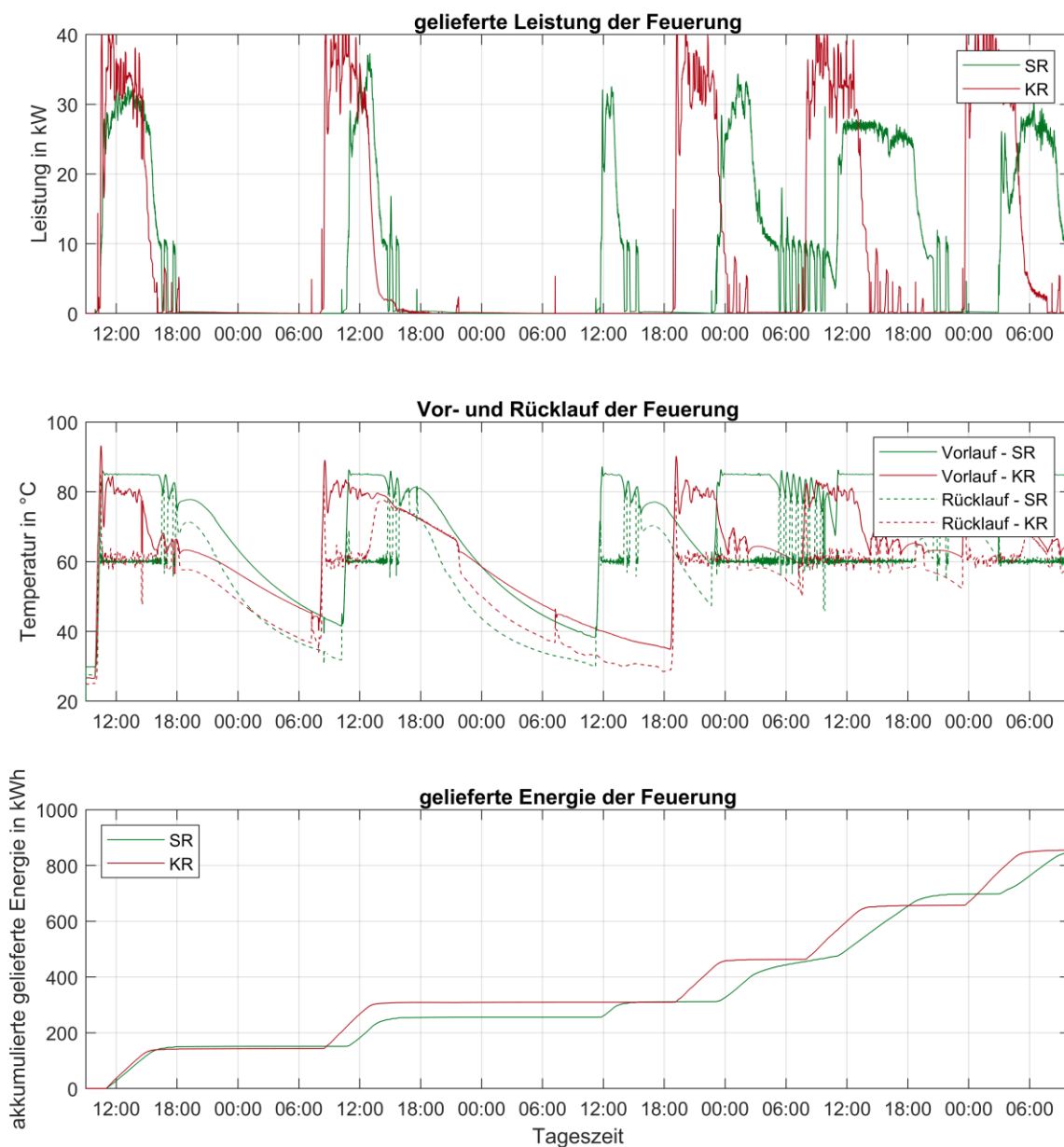


Abbildung 29: Vergleich der Systemregelung (SR) mit der klassischen Regelung (KR) – Verhalten der Feuerung

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

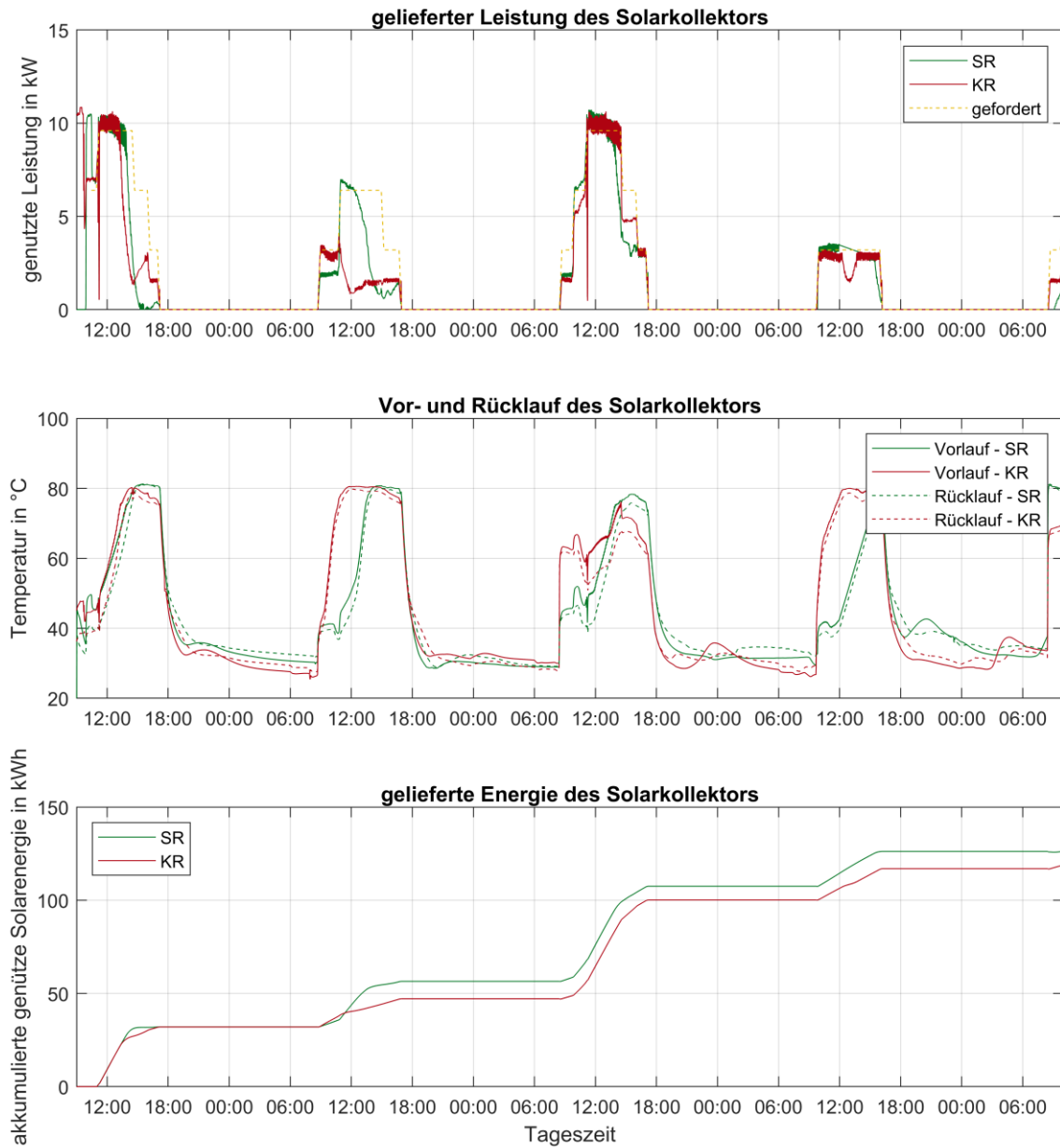


Abbildung 30: Vergleich der Systemregelung (SR) mit der klassischen Regelung (KR) – Verhalten des Solarkollektors

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

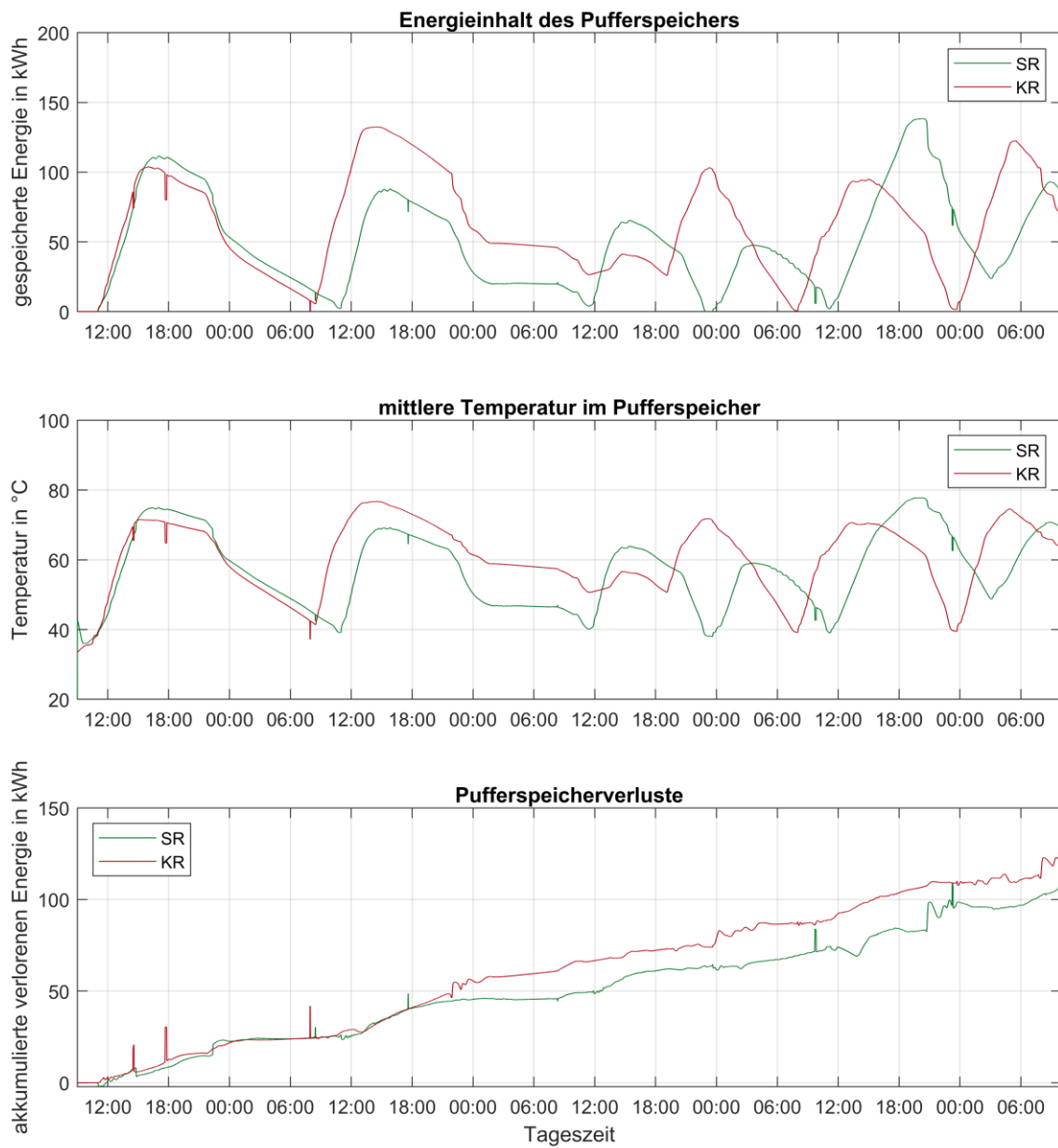


Abbildung 31: Vergleich der Systemregelung (SR) mit der klassischen Regelung (KR) – Verhalten des Pufferspeichers

6 Ausblick und Empfehlungen

6.1 Feuerungsregelung

6.1.1 Feuerungsregelung

Die entwickelte modellbasierte Feuerungsregelung kann grundsätzlich auf anderen Scheitholzkesseln implementiert werden. Zur Regelung ist jedoch eine Messung der Massenströme von Primär- und Sekundärluft notwendig. Diese Messungen sind typischerweise nicht an im Handel erhältlichen Scheitholzkesseln vorhanden. Daher ist für die praktische Umsetzung der Regelung noch eine Weiterentwicklung der bestehenden Methode notwendig, um auf Massenstrommessungen verzichten zu können.

Darüber hinaus benötigt die Feuerungsregelung noch eine Vorgabe für den Sollwert des Massenstroms an abgebautem Brennstoff. Ein realisierbarer Sollwertverlauf wurde in diesem Projekt experimentell aus mehreren Testläufen bestimmt. Daher ist dieser Verlauf lediglich für Scheitholzkessel vom untersuchten Typen gültig. Für eine praktische Umsetzung der Regelung muss noch eine Methode zur automatischen Vorgabe des Sollwerts an abgebautem Brennstoff entwickelt werden.

6.2 Systemregelung

Zwei Punkte sind relevant, damit die Systemregelung erfolgreich in der Praxis eingesetzt werden kann:

- Die von der Systemregelung benötigte Sensorik muss vorhanden sein.
- Die Anpassung der Systemregelung an das vor Ort vorhandene System muss durch den Servicetechniker bei Installation durchgeführt werden können.

Im Weiteren werden die beiden Punkte näher diskutiert.

6.2.1 Benötigte Sensorik

Alle Prognosen benötigen die jeweiligen Leistungsverläufe um sich entsprechend zu parametrieren. Dazu werden entweder Wärmemengenzähler oder Durchflusssensoren und die dazugehörigen Temperatursensoren in den jeweiligen hydraulischen Kreisen benötigt. Aus wirtschaftlichen Gründen sind diese Sensoren meist in den derzeit kommerziell erhältlichen Geräten nicht vorhanden. Durch weitere Forschungsarbeiten und dem Einsatz von modellbasierten Schätzverfahren kann der Bedarf an benötigten Sensoren minimiert werden bzw. diese durch günstigere Sensoren ersetzt werden.

6.2.2 Anpassung an vor Ort vorhandene Systeme

Zur Anpassung der entwickelten Systemregelung an Systeme bestehend aus Scheitholzkessel, Solarkollektor und Pufferspeicher wurden relevante Ähnlichkeiten und Unterschiede der marktverfügbaren Systeme verschiedener Hersteller analysiert. Dabei wurden sowohl unterschiedliche Leistungsklassen wie auch unterschiedliche Konfigurationen berücksichtigt.

Die Analyse der verschiedenen Systeme und Konfigurationen ergab, dass sich die entwickelte Systemregelung mit geringem Aufwand auf verschiedenste Konfigurationen anwenden lässt. Nachfolgend sind die Voraussetzungen und erforderlichen Arbeiten für die jeweiligen Komponenten der übergeordneten Regelung im Detail beschrieben:

6.2.2.1 Pufferspeichermodell

Das Pufferspeichermodell wurde für die, in diesem Projekt, verwendete, weit verbreitete Bauform des Pufferspeichers entwickelt. Wesentlich für diese Bauform ist, dass die Einspeisung bzw. Entnahme an definierten Positionen stattfinden. Alternativ dazu gibt es Pufferspeicher mit Schichtladelanzeln, bei denen die Einspeisung in unterschiedlichen Höhen entsprechend der Temperatur des Puffers und der einzuspeisenden Flüssigkeit stattfindet. Diese können mit dem entwickelten Modell nicht abgebildet werden.

Das entwickelte Pufferspeichermodell benötigt geometrische Daten des Speichers. Neben Höhe und Radius des Speichers wird auch das Flüssigkeitsvolumen des Speichers benötigt. Je nach Ausführung sind können Solarregister vorhanden sein, welche das Flüssigkeitsvolumen im Pufferspeicher reduzieren. Zusätzlich werden die Höhen von allen Ein- und Auslaufstutzen sowie die Dicke der Isolierung benötigt. Diese Daten sind normalerweise entweder von Hersteller des Pufferspeichers verfügbar gemacht oder lassen sich durch den Servicetechniker vor Ort abmessen.

6.2.2.2 Last- und Solarertragsprognose

Zur belastbaren Prognose von Lastverlauf und Solarertrag werden Wetterprognosen benötigt. Durch die zunehmende Vernetzung aller Geräte (Stichwörter IoT, Smart Home) ist anzunehmen, dass die installierten Systeme zukünftig über Internetanbindung verfügen werden, sodass der Zugriff auf lokale Wetterprognosen möglich ist. Basierend auf Kennzahlen, wie Bewohneranzahl und Solarkollektor- und Wohnraumfläche, können standardisierte Parameter für die Lastprognose geladen werden. Diese können zusammen mit Wetterprognosen erste ungefähre Prognosen für Solarertrag und Last liefern. Um eine detaillierte Prognosen für den individuellen Haushalt zu errechnen, werden zusätzlich die Wärmeströme in den einzelnen Kreisen benötigt. Anhand dieser werden die Parameter während des Betriebes angepasst und die Prognosen werden genauer.

Es sind daher nur geringe zur Parametrierung durch den Servicetechniker oder Betreiber notwendig.

6.2.2.3 Feuerungsprognose

Es kann davon ausgegangen werden, dass Scheitholzessel unterschiedlicher Leistungsklassen ähnliche Abbrandcharakteristik aufweisen. Daher können sie mit demselben Modell beschrieben werden. Dazu muss der Verlauf der vom Scheitholzessel produzierten wasserseitigen Leistung bekannt sein. Aufgrund der adaptiven Fähigkeiten des Feuerungsmodells werden die Parameter nach den ersten Abbränden automatisch angepasst und keinerlei zusätzliche Versuche zur Parametrierung sind erforderlich. Generell sind daher keinerlei Arbeiten zur Parametrierung durch den Servicetechniker oder Betreiber notwendig. Bereits vorhandene Messdaten können genutzt werden um bessere Startwerte für die Parameter der Feuerungsprognose zu identifizieren und so den Lernvorgang zu Beginn der Laufzeit zu beschleunigen.

7 Zusammenfassung

Scheitholzkessel sind nach wie vor die am häufigsten verwendete Zentralheizungsanlage für feste Biomassebrennstoffe. Moderne Heizungssysteme auf Scheitholzbasis bestehen in der Regel aus einem Scheitholzkessel, einem Pufferspeicher und Solarkollektoren. Solche Konfigurationen sorgen für eine sichere Wärmeversorgung über den Tag und nutzen gleichzeitig die Sonnenenergie.

Die derzeit angewandten konventionellen Regelstrategien aktivieren den Scheitholzkessel in der Regel, wenn die Pufferspeichertemperatur auf einem bestimmten Niveau einen definierten Schwellenwert unterschreitet. Sie berücksichtigen kein a-priori Wissen über den Solarertrag oder den Leistungsbedarf der Bewohner. Dies kann zum Fehlbetrieb des gesamten Heizungssystems führen, wodurch entweder der Solarertrag nicht vollständig genutzt wird oder der Scheitholzkessel zwangsweise gedrosselt oder sogar abgeschaltet wird, um eine Überhitzung der Anlage zu verhindern. Beide ungünstigen Bedingungen führen zu Effizienzverlusten und erhöhten Schadstoffemissionen.

In diesem Projekt wurde es ein neues Regelkonzept für solche Heizungssysteme entwickelt und getestet. Es besteht aus zwei gekoppelten Regelsystemen, einer übergeordneten Systemregelung und einer unterlagerten Verbrennungsregelung. Die übergeordnete Systemregelung koordiniert die einzelnen Komponenten im Heizungssystem. Ausgehend von Prognosen für den Solarertrag und den Leistungsbedarf der Bewohner sowie mathematischen Modellen des Scheitholzkessel und des Pufferspeichers wird eine optimierte Betriebsstrategie für die gesamte Heizungsanlage ermittelt. Dabei soll dem Benutzer die Möglichkeit gegeben werden, bevorzugte Zeiträume für das Nachfüllen zu definieren und so den Komfort für den Benutzer zu erhöhen. Gleichzeitig soll auch die Energieeffizienz des Systems erhöht werden, indem die genutzte Solarenergie erhöht und die Pufferverluste verringert werden. Dies wird erreicht, indem die Temperaturen im Pufferspeicher durch intelligentes Zünden der Feuerung so niedrig wie möglich gehalten werden.

Die sich daraus ergebende, optimierte Betriebsstrategie für den Kessel wird von einer untergeordneten Verbrennungsregelung, die den Scheitholzkessel direkt ansteuert, umgesetzt. Diese untergeordnete Regelung sorgt für eine Verbrennung mit minimierten Schadstoffemissionen und hält die Vorlauftemperatur auf einem gewünschten Wert.

Die Systemregelung weist den Nutzer auch an, wann er den Scheitholzkessel nachfüllen muss und wie viel Brennstoff er nachlegen muss, um sicherzustellen, dass der Lastbedarf der Bewohner jederzeit gedeckt werden kann. Die Regelstrategie erlernt anhand von Messdaten typische Muster im Nutzerverhalten und passt die Betriebsstrategie entsprechend an.

Die Regelstrategie wurde an einem Testsystem umgesetzt, das aus einem handelsüblichen Scheitholzkessel mit einer Nennleistung von $28 \text{ kW}_{\text{th}}$, zwei Pufferspeichern mit einer Kapazität von je 1500 l und einer Heizvorrichtung zur Simulation eines Solarkollektors mit bis zu $12 \text{ kW}_{\text{th}}$ besteht.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Es wurden Testläufe durchgeführt, bei denen die neu entwickelte Regelstrategie mit einer herkömmlichen Regelstrategie verglichen wurde, die normalerweise vom Kesselhersteller angewendet wird. Die Anwendung der neuen modellbasierten Regelstrategie führte zu einer deutlich verbesserten Effizienz des Systems. Es konnte 8 % mehr Solarertrag erzielt werden und die Pufferspeicherverluste gegenüber dem Betrieb mit der konventionellen Regelstrategie wurden um 14 % reduziert. Gleichzeitig wurden die CO-Emissionen im Durchschnitt um 36 % verringert.

Weitere Test mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen müssen noch durchgeführt werden um eine umfassende Bewertung der Systemregelung zu erlauben. Die durchgeführten Validierungsversuche konnten jedoch klar den positiven Effekt der Systemregelung in Bezug auf Energieeffizienz und Benutzerkomfort zeigen.

8 Kontaktdaten

Projektkoordinator:

Dr. Markus Göllés
BIOENERGY2020+ GmbH
Inffeldgasse 21b, A-8010 Graz
Tel.: +43 316 873 9201
office@bioenergy2020.eu
<https://www.bioenergy2020.eu>

Kooperationspartner:

Dipl.-Ing. Georg Hofmeister
KWB - Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH
Industriestraße 235, A-8321 St. Margarethen a.d. Raab
Tel.: +43 3115 6116
Fax: +43 3115 6116-4
office@kwb.at
<https://www.kwb.net>

Dr. Frank Hammer
LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG
Wiesenstraße 6, D-69190 Walldorf (Baden)
Tel.: +49 6227 6052-0
Fax: +49 6227 6052-57
info@lamtec.de
<https://www.lamtec.de>