



Schlussbericht vom 28. Januar 2022

LowEMI – Entwicklung eines neuen Mikro-Pellet-Ofens mit fortschrittlicher Regelung, tiefen Kosten und tiefen Emissionen

LowEMI - Development of a new low-cost low-emission Micro Pellet Stove with advanced process control



Quelle: ©FHNW



Fachhochschule
Nordwestschweiz

Datum: 28. Januar 2022

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

SCCER

Subventionsempfänger/innen:

Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
Fachhochschule Nordwestschweiz
Klosterzelgstrasse 2
CH-5210 Windisch
www.fhnw.ch/technik/ibre

Autor/in:

Tom Strebel, FHNW, tom.strebel@fhnw.ch
Daniel Lustenberger, FHNW, daniel.lustenberger@fhnw.ch
Joris Strassburg, FHNW, joris.strassburg@students.fhnw.ch
Dieter Winkler, FHNW, dieter.winkler@fhnw.ch
Josef Wüest, FHNW, josef.wueest@fhnw.ch
Timothy Griffin, FHNW, timothy.griffin@fhnw.ch
Alexander Urfer, FHNW, Alexander.urfer@fhnw.ch
Fabienne Mangold, FHNW
Dardan Bajrami, FHNW

BFE-Projektbegleitung:

Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501839-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Moderne Häuser oder Häuser, die energetisch saniert wurden, sind sehr gut isoliert und benötigen entsprechend weniger Leistung für die Beheizung. Herkömmliche Pelletöfen mit einer Leistung von 10 kW sind überdimensioniert und erlauben keinen kontinuierlichen Betrieb, ohne die Raumtemperatur zu überhöhen. Um den Markt der Neubauten und energetisch sanierten Häuser für Pelletöfen zugänglich zu machen, wurde im Rahmen von diesem ERA-NET Bioenergy Projekt ein Pelletofen (MPS Micro Pellet Stove) entwickelt mit 4 kW Nennleistung und einer fortschrittlichen Regelstrategie. Die Regelstrategie stellt mittels der Abgastemperaturmessung am Brennkammeraustritt und einem CO-Sensor durch automatisches Optimieren der Sekundärluftmenge sicher, dass der Ofen immer mit maximiertem Wirkungsgrad und tiefen CO Emissionen betrieben wird.

Die Auslegung des MPS erfolgte durch BIOS Bioenergiesysteme GmbH, der Ofen wurde gebaut durch RIKA Innovative Ofentechnik GmbH, LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG steuert die CO-Sensoren bei, die Fachhochschule Nordwestschweiz war zuständig für die Entwicklung der fortschrittlichen Regelstrategie.

Zur Entwicklung der Regelstrategie wurde ein Modell entwickelt, mit dem das Verhalten eines Pelletofens simuliert werden kann. Mithilfe dieses Modells können mehrere Stunden Betrieb des Ofens in wenigen Sekunden simuliert werden. Die Entwicklung einer Regelstrategie kann so effizienter durchgeführt werden, da nur Regelstrategien auf dem Ofen getestet werden, die sich im Modell bewährt hatten. Vergleiche zwischen Modell und realem Ofen haben gezeigt, dass das Modell das Verhalten des Realen Ofens wiedergeben kann und so für die Reglerentwicklung verwendet werden kann.

Je tiefer der Restsauerstoffgehalt im Abgas, desto höher ist der Wirkungsgrad des Ofens. Durch nicht perfekte Mischung von Luft mit Brennstoff steigen die CO-Emissionen bei tiefem Restsauerstoffgehalt stark an. Dieser CO-Anstieg (CO-Kante) begrenzt das Betriebsfenster des Pelletofens. Ziel der Regelstrategie ist es, den Ofen möglichst nahe an der CO-Kante zu betreiben ohne erhöhte CO Emissionen.

Die für dieses Projekt entwickelte NEO-Regelstrategie verwendet die Abgastemperaturmessung am Brennkammeraustritt als Regelgrösse für die Klappenregelung. Die Abgastemperaturmessung am Brennkammeraustritt und der CO-Sensor von Lamtec wird für die Sollwertfindung verwendet. Hierzu erzeugt die Regelstrategie einen CO-Verlauf über der Abgastemperatur und identifiziert darin die CO-Kante. Wurde die CO-Kante gefunden, wird die entsprechende Abgastemperatur abzüglich einer Sicherheitsmarge als Sollwert für die Regelung verwendet.

Die NEO-Regelstrategie ist in der Lage den optimalen Betriebspunkt zu finden. In Testabbränden wurde ein Wirkungsgrad von 93% bei Nennlast ermittelt, dies bei gleichzeitig tief bleibenden CO-Emissionen von 66 mg/m³N. Zudem kann die Regelstrategie verändernde Umgebungsbedingungen kompensieren durch eine angepasste Sekundärluftklappenposition.

Résumé

Les maisons modernes ou les maisons qui ont fait l'objet d'une rénovation énergétique sont très bien isolées et nécessitent en conséquence moins de puissance pour le chauffage. Les poêles à pellets traditionnels d'une puissance de 10 kW sont surdimensionnés et ne permettent pas un fonctionnement continu sans surchauffer la température ambiante. Afin de rendre le marché des nouvelles constructions et des maisons rénovées énergétiquement accessible aux poêles à pellets, un poêle à pellets (MPS Micro Pellet Stove) d'une puissance nominale de 4 kW et doté d'une stratégie de régulation avancée a été développé dans le cadre de ce projet ERA-NET Bioenergy. Grâce à la mesure de la température des gaz d'échappement à la sortie de la chambre de combustion et à un capteur de CO, la stratégie de régulation garantit, par l'optimisation automatique de la quantité d'air



secondaire, que le poêle fonctionne toujours avec un rendement maximal et avec de faibles émissions de CO.

La conception du MPS a été réalisée par BIOS Bioenergiesysteme GmbH, le four a été construit par RIKA Innovative Ofentechnik GmbH, LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG a fourni les capteurs de CO et la Fachhochschule Nordwestschweiz a été chargée de développer la stratégie de régulation avancée.

Pour développer la stratégie de régulation, un modèle a été mis au point, permettant de simuler le comportement d'un poêle à pellets. Ce modèle permet de simuler plusieurs heures de fonctionnement du poêle en quelques secondes. Le développement d'une stratégie de régulation peut ainsi être effectué de manière plus efficace, car seules les stratégies de régulation qui ont fait leurs preuves dans le modèle sont testées sur le poêle. Des comparaisons entre le modèle et le four réel ont montré que le modèle peut reproduire le comportement du four réel et peut donc être utilisé pour le développement de régulateurs.

Plus la teneur en oxygène résiduel dans les gaz d'échappement est faible, plus le rendement du four est élevé. En raison d'un mélange imparfait de l'air et du combustible, les émissions de CO augmentent fortement lorsque la teneur en oxygène résiduel est faible. Cette forte augmentation de CO (seuil de CO) limite la plage de fonctionnement du poêle à pellets. L'objectif de la stratégie de régulation est de faire fonctionner le poêle le plus près possible du seuil de CO sans augmenter les émissions de CO.

La stratégie de régulation NEO développée pour ce projet utilise la mesure de la température des gaz d'échappement à la sortie de la chambre de combustion comme grandeur de régulation pour le réglage du clapet. La mesure de la température des gaz d'échappement à la sortie de la chambre de combustion et le capteur de CO de LAMTEC sont utilisés pour déterminer la valeur de consigne. Pour cela, la stratégie de régulation génère une courbe de CO en fonction de la température des gaz d'échappement et identifie le seuil de CO. Une fois le seuil de CO trouvé, la température des gaz d'échappement correspondante, moins une marge de sécurité, est utilisée comme valeur de consigne pour la régulation.

La stratégie de régulation NEO est en mesure de trouver le point de fonctionnement optimal. Des tests de combustion ont permis de déterminer un rendement de 93% à charge nominale, tout en maintenant les émissions de CO à un niveau faible de 66 mg/m³N. De plus, la stratégie de régulation peut compenser les changements de conditions ambiantes en adaptant la position des clapets d'air secondaire.

Summary

Modern houses or houses that have been energetically renovated are very well insulated and therefore require less power for heating. Conventional pellet stoves with an output of 10 kW are oversized and do not allow continuous operation without increasing the room temperature. In order to make the market for new buildings and energetically renovated houses accessible for pellet stoves, a pellet stove (MPS Micro Pellet Stove) with a nominal output of 4 kW and an advanced control strategy was developed as part of this ERA-NET Bioenergy project. The control strategy uses the exhaust gas temperature measurement at the combustion chamber outlet and a CO sensor to automatically optimize the amount of secondary air to ensure that the furnace is always operated with maximum efficiency and low CO emissions.

The MPS was designed by BIOS Bioenergiesysteme GmbH, the furnace was built by RIKA Innovative Ofentechnik GmbH, LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG contributed the CO sensors, and the Northwestern Switzerland University of Applied Sciences was responsible for developing the advanced control strategy.

To develop the control strategy, a model was developed with which the behavior of a pellet stove can be simulated. With the help of this model, several hours of operation of the furnace can be simulated in a few seconds. The development of a control strategy can be carried out more efficiently because



only control strategies that have proven themselves in the model are tested on the furnace. Comparisons between the model and the real furnace have shown that the model can reproduce the behavior of the real furnace and can thus be used for controller development.

The lower the residual oxygen content in the exhaust gas, the higher the efficiency of the furnace. If the air and fuel are not perfectly mixed, the CO emissions increase sharply when the residual oxygen content is low. This CO increase (CO edge) limits the operating window of the pellet stove. The aim of the control strategy is to operate the furnace as close as possible to the CO edge without increasing CO emissions.

The NEO control strategy developed for this project uses the exhaust gas temperature measurement at the combustion chamber outlet as a control variable for flap control. The exhaust gas temperature measurement at the combustion chamber outlet and the CO sensor from Lamtec are used to determine the setpoint. To do this, the control strategy generates a CO profile over the exhaust gas temperature and identifies the CO edge from it. Once the CO edge has been found, the corresponding exhaust gas temperature minus a safety margin is used as the target value for the control.

The NEO control strategy is able to find the optimum operating point. In test burns, an efficiency of 93% was determined at nominal load, while at the same time CO emissions remained low at 66 mg/m³_N. In addition, the control strategy can compensate for changing ambient conditions by adjusting the position of the secondary air flap.

Take-home messages

- Der geringe Heizenergiebedarf moderner Häuser und energetisch sanierter Häuser kann durch heutige, für diese Anwendung überdimensionierte, Pelletöfen nicht bereitgestellt werden.
- Ein emissionsarmer Betrieb bei kleiner Leistung ist in einem schmalen Betriebsfenster möglich und kann nur durch eine fortschrittliche Regelstrategie sichergestellt werden.
- Durch die Entwicklung eines numerisches Ofenmodells, das das Betriebsverhalten des realen Ofens abbildet, konnte eine Effizienzsteigerung bei der Regelstrategieentwicklung erreicht werden.
- Die Entwicklung günstiger CO-Sensoren erlaubt die direkte Beurteilung der Verbrennungsqualität durch die Regelung und kontinuierliche Optimierung des Verbrennungsprozesses.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Take-home messages	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	9
1.2 Motivation des Projektes	9
1.3 Projektziele	10
2 Vorgehen und Methode.....	11
2.1 Projektanforderungen an die Regelung.....	13
3 Testhardware und Prüfstand.....	15
3.1 Micro Pellet Stove.....	15
3.2 Prüfstand FHNW	18
3.3 Sensoren von Lamtec.....	20
3.3.1 Funktionsprinzip der CO _e -Sensoren (1)	20
3.3.2 Neuentwicklung des CO-Sensors durch Lamtec.....	21
3.4 Auswahl Sensortyp.....	23
3.5 Langzeitdriftmessung LHyCon_CarboSen LH64-7	26
4 Black-Box-Modell	27
4.1 Aufbau des Black-Box-Modells	27
4.1.1 Luftverteilungsmodul	28
4.1.2 Primärzonenmodul	30
4.1.3 Sekundäres Verbrennungsmodul.....	32
4.1.4 Wärmeabgabemodul	33
4.1.5 Regelungsmodul.....	37
4.2 Aufbau Raummodell.....	38
5 Ergebnisse und Diskussion	41
5.1 Entwicklung der Regelstrategie.....	41
5.1.1 erste Regelstrategie	41
5.1.2 zweite Regelstrategie	41
5.1.3 dritte Regelstrategie	41
5.1.4 NEO-Regelstrategie	42
5.1.5 PDI-Regler.....	46



5.2	Resultate der NEO-Regelstrategie	47
5.2.1	Vergleich MPS mit Black-Box-Modell	47
5.2.2	Vergleich von Regelstrategien unter gleichen Bedingungen	50
5.2.3	beReal-Lastzyklentest	50
5.2.4	Vergleich der Messungen mit BIOS	54
5.2.1	Vergleich Pellets mit unterschiedlicher Qualität	54
5.2.2	Auswirkung auf die Verbrennung bei einem Störeinfluss	56
5.3	Resultate Raummodell	57
6	Schlussfolgerungen und Fazit	60
7	Ausblick und zukünftige Umsetzung	60
8	Nationale und internationale Zusammenarbeit	61
9	Publikationen	61
10	Literaturverzeichnis	61



Abkürzungsverzeichnis

BBM	Black Box Modell
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO	Kohlenmonoxid
EN	Europäische Norm
ERA-NET	European Reseearch Area
FFT	Fast Fourier Transformation
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
GWP	Global Warming Potential
kW	Kilo Watt
m ³ _N	Normkubikmeter bei 0 Grad Celsius und einem Druck von 1,01325 bar
mg	Milligramm
MGA5+	Produktbezeichnung eines Abgasanalysegeräts der Firma MRU
MPS	Micro Pellet Stove
MRU	Firmenbezeichnung (Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz)
NEO	Near Edge Operation (Namen einer Regelstrategie)
OGC	Organic Gaseous Carbon (Organischer gasförmiger Kohlenstoff)
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
TRL	Technology Readiness Level



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Holzpellets sind neben Stückholz der meistgenutzte Biomassebrennstoff für Wohnraumfeuerungen in ganz Europa. Holzpellets werden typischerweise in automatisch beschickten Feuerungen eingesetzt, die auf einen kontinuierlichen Betrieb ausgelegt sind.

In den letzten Jahren ist die Energieeffizienz von Gebäuden schrittweise verbessert worden. Durch die bessere Isolation von neuen oder energetisch sanierten Gebäuden wird weniger Leistung zum Heizen der Gebäude benötigt. Wohnraumfeuerungen, wie zum Beispiel Pelletöfen, haben neben der Funktion als Raumheizung für den Aufstellungsraum auch die Funktion, für Wohlbehagen der Nutzer und für eine angenehme Stimmung im Raum zu sorgen. Um diese Funktionen erfüllen zu können, müssen die Wohnraumfeuerungen möglichst kontinuierlich betrieben werden, ohne den Raum übermässig aufzuheizen.

Typischerweise verfügen heutige Pelletöfen über einen Nennleistungsbereich von etwa 8 bis 10 kW und eine Mindestlast von etwa 3 bis 4 kW. Dieser Leistungsbereich ist zu hoch, um die Anlagen kontinuierlich betreiben zu können, ohne den Raum zu stark aufzuheizen. Daher zeigt sich ein Trend zu einem steigenden Interesse an Heizungsanlagen mit geringeren Nennleistungen.

Aufgrund ihrer relativ hohen Mindestleistung sind herkömmliche Pelletöfen für Neubauwohnungen und energetisch sanierte Wohnungen nicht geeignet. Die Neubauten werden infolgedessen ohne Kamin gebaut, was eine spätere Nachrüstung eines Pelletofens sehr aufwendig macht.

1.2 Motivation des Projektes

Heizen mit Pellets hat ein geringes Treibhauspotenzial. Daher wäre es wünschenswert, diese Technologie auch in modernen bzw. energetisch sanierten Wohnungen einsetzen zu können.

Das vorliegende Projekt hat sich zum Ziel gesetzt, einen kostengünstigen Pelletofen mit der Bezeichnung «Micro Pellet Stove» (MPS) im Leistungsbereich von 1 kW bis 4 kW zu entwickeln. Die Nachteile einer Holzheizung wie schädliche Feinstaub- (PM) und Kohlenmonoxidemissionen sollen durch die Bauart sowie eine intelligente Regelung der Feuerung minimiert werden.

Das Projekt wird im Rahmen von ERA-NET Bioenergy durchgeführt. Als Projektpartner sind folgende Organisationen beteiligt:

- BIOS Bioenergiesysteme GmbH (Koordinator des Konsortiums)
- Fachhochschule Nordwestschweiz (Hochschulpartner)
- RIKA Innovative Ofentechnik GmbH (Industriepartner)
- LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG (Industriepartner)

BIOS Bioenergiesysteme GmbH übernimmt im Projekt die Rolle des Projektkoordinators. Inhaltlich ist BIOS für die Entwicklung des Rosts der Brennkammer und der Brennstoffzuführung zuständig. Die Entwicklung wird auf CFD-Modelle sowie Modellversuche gestützt.

Die Fachhochschule Nordwestschweiz hat die Aufgabe, mit Hilfe von fortschrittlichen Sensoren und eines Black-Box-Modells des Ofens ein Regelungssystem für den Micro Pellet Stove zu entwickeln.

RIKA Innovative Ofentechnik GmbH ist ein Hersteller von Pelletöfen. RIKA wird im Projekt die Prototypen herstellen und hat ein Interesse daran, einen entsprechenden Pelletofen mit einem Leistungsbereich von 1 - 4 kW auf den Markt zu bringen.



LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG baut Regelautomaten für Feuerungen sowie Sensoren, die in der Lage sind, CO und andere brennbare Komponenten im Abgas zu detektieren. Die Sensoren werden heute in erster Linie in Gas- und Heizölanwendungen verwendet. LAMTEC hat ein Interesse daran, das Anwendungsfeld ihrer Sensoren zu erweitern. Im Projekt stellt LAMTEC die Sensoren zur Verfügung und entwickelt diese weiter, mit dem Ziel, die Herstellungskosten zu reduzieren.

1.3 Projektziele

Das Ziel des Projekts ist es, ein kostengünstiges Ofenkonzept für eine thermische Last von 1 bis 4 kW zu entwickeln. Die angestrebten Emissionen bei einem Referenzsauerstoffgehalt von 13 Vol.%, tr. betragen:

- Kohlenmonoxid (CO): $< 130 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$,
- Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (OGC): $< 2.5 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$
- Gesamtstaub: $< 13 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$

Diese Emissionsziele liegen deutlich unter den Emissionsgrenzwerten der EU-Ökodesign-Richtlinie und den nationalen Vorschriften in Deutschland, Österreich und der Schweiz (den Strengsten in Europa).

Das Ziel für den Gesamtwirkungsgrad von ca. 95 % (bezogen auf den unteren Heizwert) liegt 2–5 %-Punkte über dem heutigen Stand der Technik.

Mit diesen Leistungsdaten und einem geplanten «Technology Readiness Level» (TRL) von 5 (in einem relevanten Umfeld validierter Technologie) zum Projektende soll ein neuer technologischer Meilenstein in Bezug auf die saubere Verbrennung von Holz im Mikromassstab erreicht werden.

Die Projektziele sollen erreicht werden mittels:

- Entwicklung einer neuen Brennstoffzuführungstechnik, die (i) einen konstanten und gleichmässigen Brennstoffzufluss auch bei Minimallast ermöglicht bei (ii) einer minimalen Störung des Brennstoffbettes (z. B. durch seitliches Einbringen der Pellets, anstatt sie von oben in das Brennstoffbett fallen zu lassen).
- Entwicklung eines neuen Rostkonzepts, (i) um eine gleichmässig verteilte Primärluftzufuhr zum Brennstoffbett zu erreichen mit (ii) der Bildung eines homogenen Brennstoffbetts, das Streifen- und Kanalbildung vermeidet (wichtig zur Reduzierung der CO- und PM-Emissionen) und (iii) geeignete Entaschung mit einer minimalen Störung des Feuerungsbetriebs.
- Entwicklung einer neuen Brennkammer mit einem fortschrittlichen Isolationskonzept, um den Strahlungswärmeverlust zu reduzieren und damit die Verbrennungstemperaturen hochzuhalten. Dies wird als eine relevante Grundlage zur Überwindung einer entscheidenden Schwäche aktueller Pelletöfen angesehen, bei denen Strahlungsverluste durch die Wände und insbesondere durch das Fenster zu niedrigen Verbrennungstemperaturen bei Teillast und damit zu erhöhten Emissionen von CO, OGC und Russpartikeln führen.
- Entwicklung eines neuen fortschrittlichen Regelungskonzeptes auf Basis neuester Sensortechnologie
 - o Ein im Rahmen des Projekts zu entwickelndes sogenanntes Black-Box-Modell des Ofens soll die Grundlage für die Entwicklung und Bewertung verschiedener Regelungskonzepte bilden.
 - o Verwendung eines neuen CO-/ HC-Sensors mit geringer Signaldrift, um die Langzeitstabilität und Robustheit unter den spezifischen Betriebsbedingungen zu gewährleisten.
- Realisation einer automatischen Raumtemperaturregelung durch Lastmodulation.



2 Vorgehen und Methode

Die FHNW ist in diesem Projekt für die Entwicklung einer fortschrittlichen Regelstrategie verantwortlich. Eine solche Strategie zeichnet sich dadurch aus, dass die Regelung selbstständig für jeden Lastzustand den optimalen Betriebspunkt findet, unabhängig vom Driftverhalten von den eingesetzten Sensoren. Der optimale Betriebspunkt befindet sich jeweils an dem Punkt mit dem geringsten Luftüberschuss, an dem die CO-Emissionen noch unterhalb der Projektzielvorgaben liegen.

In diesem Projekt wurde der Micro Pellet Stove in einem zweistufigen Vorgehen entwickelt, wobei für jede Stufe ein Prototyp hergestellt wurde. Der erste Prototyp wurde mittels CFD-Simulationen durch BIOS ausgelegt und von RIKA hergestellt. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse und Erfahrungen mit dem ersten Prototyp sowie weiteren CFD-Simulationen wurde der zweite Prototyp von BIOS ausgelegt und wieder von RIKA gebaut. Von jedem Prototyp wurden jeweils zwei Stück hergestellt und der FHNW davon jeweils einer für die Entwicklung der Regelstrategie zur Verfügung gestellt.

Für die Entwicklung einer fortschrittlichen Regelung wurde ein Modell des Ofens zur Simulation des Betriebsverhaltens und der eingebauten Sensoren erstellt (BBM: Black-Box-Modell). Mithilfe des BBM sollen die Entwicklungszyklen für neue Regelungskonzepte beschleunigt werden, indem die neuen Regelstrategien im BBM getestet werden und nur die vielversprechenden Ansätze im realen Pelletofen implementiert werden. Mit dem BBM ist es möglich, mehrere Stunden Ofenbetrieb innerhalb weniger Sekunden zu simulieren.

Für die Entwicklung des BBM wurden zunächst Grundlagenversuche mit einem an der FHNW konstruierten Einzelpellet-Verbrennungsprüfstand und des Weiteren mit einem herkömmlichen Pelletofen, der dem Stand der Technik entspricht, durchgeführt. Mit dem Einzelpellet-Verbrennungsprüfstand konnte die Geschwindigkeit und die Phasen des Abbrennens eines Pellets bestimmt werden. Mit dem herkömmlichen Pelletofen konnte die CO-Bildung in einem Pelletofen untersucht werden und die CO-Sensoren vom Projektpartner Lamtec charakterisiert werden. Ziel der Charakterisierung war es, das Driftverhalten des Sensors über die Betriebszeit zu ermitteln.

Mit dem ersten der zwei Prototypen des MPS konnten in Referenzversuchen das CO-Emissionsverhalten und die Druckverluste ermittelt werden. Mit diesen Daten konnte das BBM vervollständigt und validiert werden. Es zeigte sich, dass der stationäre Betrieb korrekt simuliert werden konnte, jedoch noch nicht das instationäre Betriebsverhalten. Trotzdem war es möglich, erste Regelstrategien im BBM zu entwickeln und die aussichtsreichsten im MPS zu testen. Diese Regelstrategien konnten grundsätzlich selbstständig einen optimalen Betriebspunkt finden, waren jedoch noch nicht stabil genug.

Auf der Grundlage der erzielten Erkenntnisse konnte das BBM verbessert werden, sodass das transiente Verhalten besser simuliert werden konnte. Der Projektpartner Lamtec hatte dem Projekt neu entwickelte kostengünstigere Sensoren in verschiedenen Ausführungen zu Verfügung gestellt. Die FHNW führte Versuche zur Charakterisierung der neuen Sensoren durch und wählte den besten Sensortyp für die weitere Verwendung im Projekt aus. Die Regelstrategien wurden mit dem BBM weiterentwickelt mit dem Ziel, die Stabilität zu verbessern.

Mit dem zweiten, schon seriennahen Prototyp konnten die neu entwickelten Regelstrategien mit dem ausgewählten CO-Sensor von Lamtec getestet und feinjustiert werden, bis eine robuste Regelstrategie gefunden war, die zuverlässig bei jeder Leistung den optimalen Betriebspunkt finden kann.

Das Projekt umfasst neben der Entwicklung einer fortschrittlichen Regelstrategie die Auslegung, Konstruktion und den Bau der Prototypen, die Entwicklung eines Raummodells für die Temperaturregelung im Wohnraum sowie die techno-ökonomische Analyse des Erreichten und die Publikation der Ergebnisse. Dazu wurde das Projekt in acht Arbeitspakete unterteilt, die jeweils von einem der Projektpartner als Arbeitspaketleiter geführt wurden. Die FHNW war verantwortlich für die Umsetzung des Arbeitspakets 3 zur Entwicklung eines fortschrittlichen Regelkonzepts. In den anderen Arbeitspaketen war die FHNW unterstützend beteiligt.



No.	Work Package Title	WP Leader	Partners involved
1	Project Management	BIOS	BIOS, RIKA, FHNW , LAMTEC
2	Development of a first basic version of the new low-cost and low-emission micro-scale pellet stove	BIOS	BIOS, RIKA
3	Sensor development and development of an advanced control concept	FHNW	BIOS, RIKA, FHNW, LAMTEC
4	Design and construction of a first basic testing plant as well as performance and evaluation of test runs	RIKA	BIOS, RIKA, FHNW , LAMTEC
5	Development of an improved stove concept	BIOS	BIOS, RIKA, FHNW , LAMTEC
6	Design, construction and test of advanced testing stoves, performance and evaluation of test runs and definition of the final stove and process control concept	RIKA	BIOS, RIKA, FHNW , LAMTEC
7	Accompanying techno-economic analyses and environmental impact assessments	RIKA	BIOS, RIKA, FHNW , LAMTEC
8	Dissemination, exploitation and publication of results	BIOS	BIOS, RIKA, FHNW , LAMTEC

Tabelle 1 Arbeitspakete im Micro Pellet Stove Projekt

Das gesamte Projekt war auf 3 Jahre angelegt Der offizielle Projektstart für die FHNW war im März 2019.



2.1 Projektanforderungen an die Regelung

Die fortschrittliche Regelstrategie soll den Pelletofen bei jeder Leistung unabhängig von Verschmutzungen oder Sensordriften im optimalen Betriebspunkt halten. Dieser optimale Betriebspunkt ergibt sich aus der CO-Emissions- und Wirkungsgrad-Charakteristik des Pelletofens.

Die CO-Emissionscharakteristik einer Feuerung zeigt in Funktion des Restsauerstoffgehalts im Abgas an beiden Enden des Betriebsbereichs bei hohem Restsauerstoffgehalt als auch bei tiefem Restsauerstoffgehalt einen Anstieg der CO-Emissionen. Dazwischen befindet sich ein Bereich mit konstant tiefen CO-Emissionen. Der Anstieg bei tiefem Restsauerstoffgehalt ergibt sich aus der nicht perfekten Mischung von Luft und Brennstoff. Innerhalb der Verbrennungszone entstehen so Gebiete mit hohem Brennstoffgehalt, in denen der lokal vorhandene Sauerstoff nicht ausreicht, um das vorliegende CO vollständig zu CO_2 zu oxidieren. Bei hohem Restsauerstoffgehalt führt die lokal tiefe Temperatur der Rauchgase zum Einfrieren (Quenching) der $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ -Reaktion. Die tiefen Temperaturen ergeben sich durch die hohen (kalten) Luftanteile, die durch die Verbrennung nicht stark genug aufgeheizt werden können.

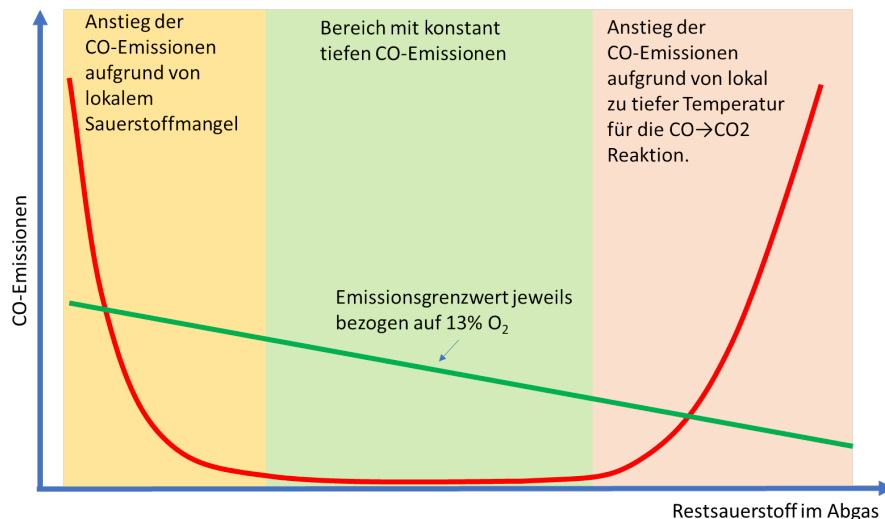


Abbildung 1: Typische CO-Charakteristik in Funktion des Restsauerstoffgehalts

Die gesamte zugeführte Energie durch den Brennstoff wird in Nutzenergie in Form von Wärme für den Aufstellungsraum und in Verluste aufgeteilt. Die Verluste setzen sich zusammen aus unverbrannten Anteilen in der Asche, aus nicht vollständig verbrannten Anteilen im Abgas (CO) und aus dem Wärmestrom des Abgases. Der Ascheverlust ist ein kleiner Verlustanteil, der sich proportional zum Brennstoffverbrauch verhält. Der Verlust aus nicht vollständig verbrannten Anteilen im Abgas ist proportional zur oben beschriebenen CO-Charakteristik. Der Wärmestrom des Abgases ist die grösste Verlustquelle und steigt mit der Menge des Abgasvolumenstroms. Der Abgasvolumenstrom steigt mit dem Luftüberschuss, charakterisiert durch den Restsauerstoffgehalt (Abbildung 2).

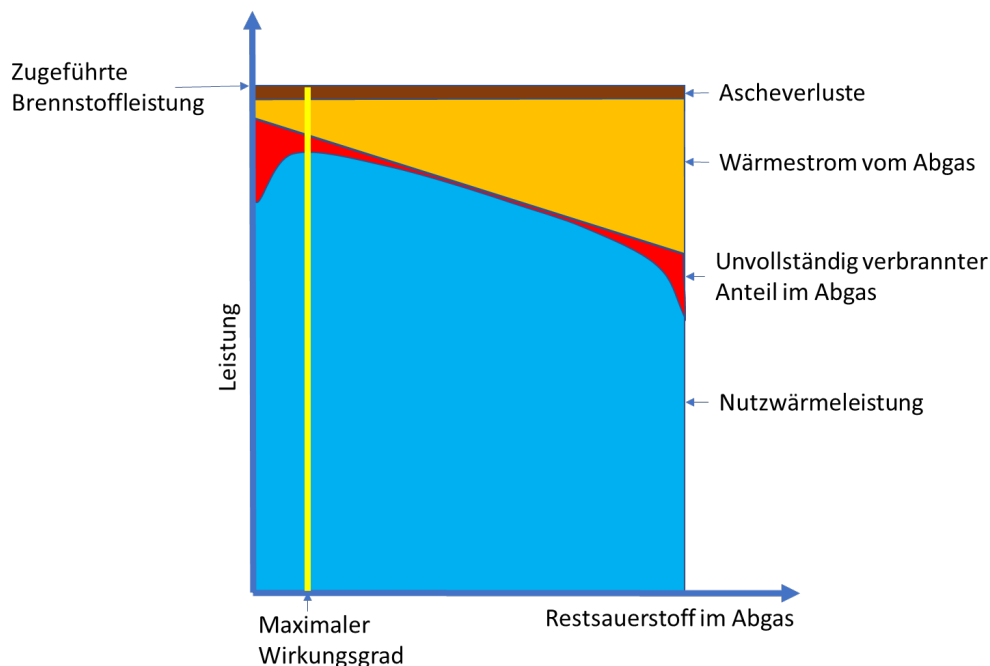


Abbildung 2: Typischer Verlauf der Nutzwärmeleistung und der Verluste als Funktion des Restsauerstoffgehalts

Die Aufgabe der Regelung ist es, den Punkt mit dem maximal möglichen Wirkungsgrad zu finden, jedoch ohne den CO-Grenzwert zu überschreiten. Wie in Abbildung 2 gezeigt, steigt der Wirkungsgrad mit der Reduktion des Restsauerstoffgehalts, da mit der Reduktion des Sauerstoffgehalts auch der Abgasvolumenstrom sinkt und sich somit der Wärmestrom, der mit dem Abgas den Ofen verlässt, verringert. Bei zu tiefem Restsauerstoffgehalt beginnen die CO-Emissionen stark zu steigen. Daher muss die Regelung in der Lage sein, den Anstieg der CO-Emissionen auf der sauerstoffarmen Seite der CO-Charakteristik sicher zu detektieren.

Der Restsauerstoffgehalt im Abgas an dem die CO-Emissionen zu steigen beginnen ändert sich mit der Leistung, dem Verschmutzungsgrad des Ofens oder mit der Falschluftrate. Eine Regelstrategie, die sich auf den Restsauerstoffgehalt im Abgas stützt und auf einen fix vorgegebenen Sauerstoffwert regelt, würde Verschiebungen der Charakteristik durch Verschmutzung oder Falschluftrate nicht detektieren können. Aus diesem Grund soll in diesem Projekt ein CO-Sensor für die Regelung verwendet werden. Nur durch die direkte Messung der CO-Emission kann sichergestellt werden, dass der MPS immer im optimalen Betriebspunkt betrieben wird.

Die CO-Emissionen können jedoch nicht direkt als Regelgröße verwendet werden, da sie keinem stetigen Verlauf folgen und sich über weite Bereiche des Restsauerstoffgehalts nicht ändern (Abbildung 1). Aus Kostengründen wurde im Projekt festgelegt, dass keine weiteren zusätzlichen Sensoren verwendet werden, sondern nur die Sensoren, die nach dem heutigen Stand der Technik in einem Pelletofen verbaut sind.

Nach dem heutigen Stand der Technik verfügen Pelletöfen über eine Temperaturmessung am Austritt der Brennkammer. Die Temperatur am Austritt der Brennkammer ist neben anderen Störgrößen eine Funktion des Restsauerstoffgehalts und steigt stetig mit der Absenkung des Restsauerstoffgehalts.

Für das neue Regelkonzept sollen daher der neue CO-Sensor und die Temperaturmessung am Austritt der Brennkammer in Kombination verwendet werden.



3 Testhardware und Prüfstand

3.1 Micro Pellet Stove

Für das Micro Pellet Stove Projekt wurden zwei Prototypen des MPS gebaut. Der erste Prototyp VA1 (Versuchs-Anlage 1) diente zur Demonstration der prinzipiellen Eignung des Konzepts. Der zweite Prototyp VA2 wurde aufgrund der Erkenntnisse aus dem Betrieb der VA1 weiterentwickelt. Das grundlegende Funktionskonzept für den MPS musste nicht modifiziert werden, die Verbesserungen betrafen die Grösse des Fensters, die Isolation des Abgasweges, die Brennstoffzuführung und die Integration einer Luftklappe in die Sekundärluftzuführung. Zudem wurde die VA2 seriennäher gestaltet, indem zum Beispiel eine automatische Entaschung integriert wurde. Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf den VA2-Prototyp.

Der Micro Pellet Stove verfügt über einen Pellet-Tagestank, aus dem die Pellets mittels einer Schnecke über einen Fallschacht in die Retorte geführt werden. Mittels einer gestuften Luftzuführung werden die Pellets verbrannt. Der Ausbrand der Flamme erfolgt in der Brennkammer, die über ein mittels Scheibenspülluft gespültes Fenster verfügt. Das Fenster erlaubt es dem Nutzer, die Flamme während des Betriebs zu betrachten. Über der Brennkammer befindet sich eine Nachbrennkammer, in der ohne weitere Luftzuführung der Ausbrand der Rauchgase abgeschlossen wird. Der Abschluss der Brennkammer bildet eine Platte aus Gusseisen zur Wärmeabgabe. Die Abgase werden über einen seitlichen rechteckigen Kanal zum unterhalb der Brennkammer angeordneten Abgasventilator geführt. Der Abgasventilator fördert die Rauchgase in die anschliessende Kaminanlage und sorgt für einen Unterdruck in der Brennkammer.

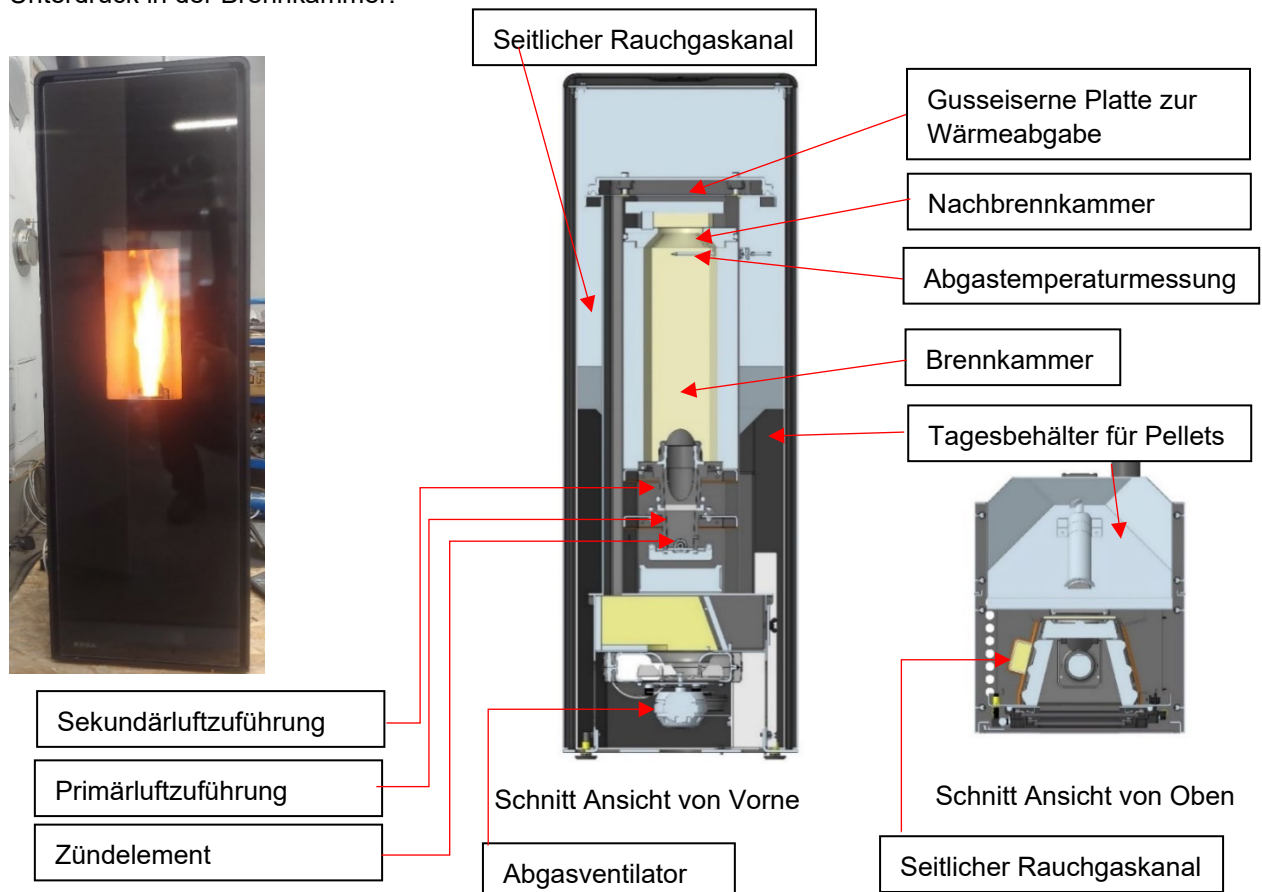


Abbildung 3: Aufbau Micro Pellet Stove



Die Regelung muss für jeden Betriebspunkt für einen optimalen Restsauerstoffgehalt sorgen, indem das Verhältnis von Brennstoff und Luft angepasst wird. Das Verhältnis von Brennstoff und Luft kann variiert werden, indem die Brennstoff-, Primärluft- oder Sekundärluftmenge variiert wird.

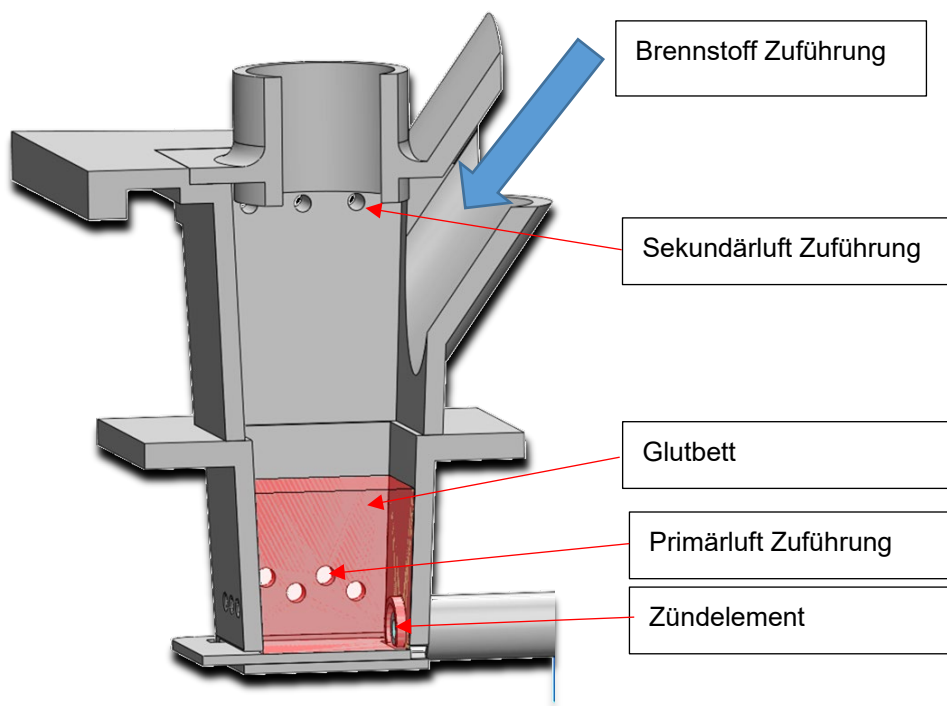


Abbildung 4: Retorte Micro Pellet Stove

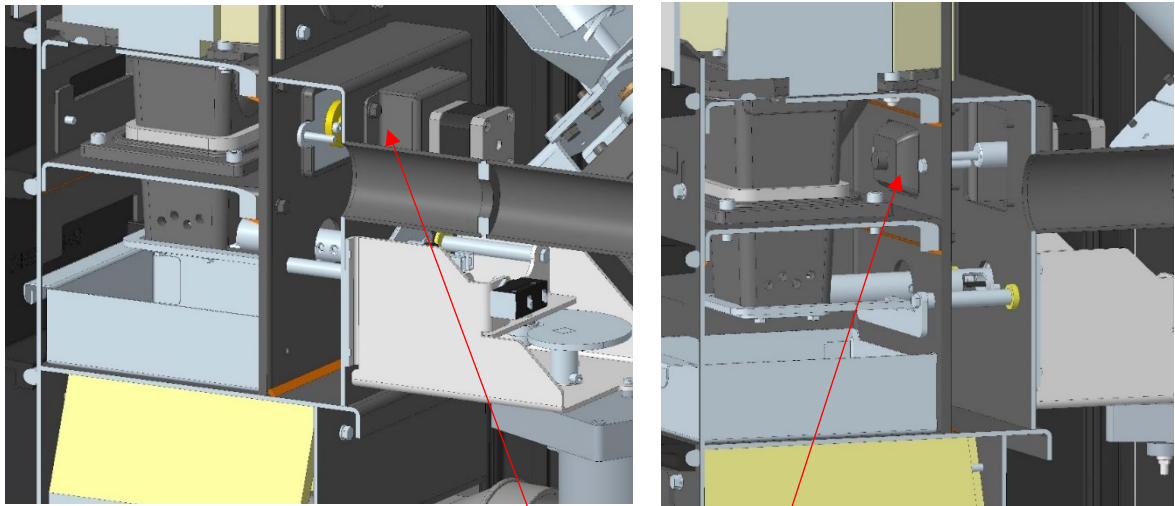
Die Verbrennung der Pellets erfolgt in einem zweistufigen Prozess. Die Pellets fallen über einen Fallschacht, der zwischen Sekundärluftzuführung und Primärluftzuführung angeordnet ist, ins Glutbett. Die Pellets werden unter Luftmangel durch die Primärluft getrocknet, pyrolysiert und vergast. Die entstehenden Holzgase werden mittels der Sekundärluft vollständig verbrannt. Die Menge an frisch zugeführten Pellets bestimmt die Leistung des Pelletofens, welche durch die übergeordnete Raumtemperaturregelung vorgegeben ist. Deshalb ist es nicht möglich, mit der Änderung der Brennstoffmenge den Restsauerstoffgehalt zu regeln.

Die Menge an Primärluft muss so dimensioniert werden, dass sich ein konstantes Glutbett etablieren kann, das nur durch den Zuwachs an Asche langsam ansteigt. Bei zu geringer Primärluftmenge ist es nicht möglich, die Pellets in nützlicher Frist umzusetzen, wodurch sich immer mehr Pellets ansammeln und die Glutbetthöhe kontinuierlich ansteigen lassen. Bei zu hoher Primärluftmenge kann sich kein stabiles Glutbett bilden, da die Pellets zu schnell umgesetzt werden und ein Teil schon in der ersten Stufe vollständig verbrannt wird. Durch die teilweise vollständige Verbrennung in der ersten Stufe hat das resultierende Holzgas einen tiefen Heizwert und es wird nur sehr wenig zusätzliche Sekundärluft benötigt, welche damit eine geringe Einströmgeschwindigkeit hat. Dies führt zu einer schlechten Durchmischung der Sekundärluft mit dem Holzgas aus der ersten Stufe und somit zu einem schlechten Ausbrand. Die Primärluft muss daher immer in einem festen Verhältnis zur Brennstoffmenge eingestellt werden und eignet sich nicht für eine Regelung der Verbrennungsqualität.

Die Sekundärluft sorgt für eine vollständige Verbrennung der Holzgase aus der ersten Stufe. Entsprechend der zugeführten Brennstoffmenge und der Sekundärluftmenge stellt sich ein Restsauerstoffgehalt im Abgas ein. Der Restsauerstoffgehalt kann durch Variation der Sekundärluft direkt beeinflusst werden, ohne die Feuerungsleistung zu ändern. Mit der Regelung soll die Feuerung



bei jeder Leistung mit dem minimal möglichen Restsauerstoffgehalt betrieben werden, sodass die CO-Emissionen noch nicht ansteigen und der Wirkungsgrad maximal ist. Die Sekundärluftmenge ist daher die ideale Regelstellgrösse zur Beeinflussung des Restsauerstoffgehalts, ohne das Glutbett oder die Leistung des Pelletofens zu beeinflussen. Im Prototyp VA2 wurde eine motorbetriebene Klappe für die Sekundärluft integriert. Die Klappe kann über eine RS232-Schnittstelle direkt angesteuert werden.



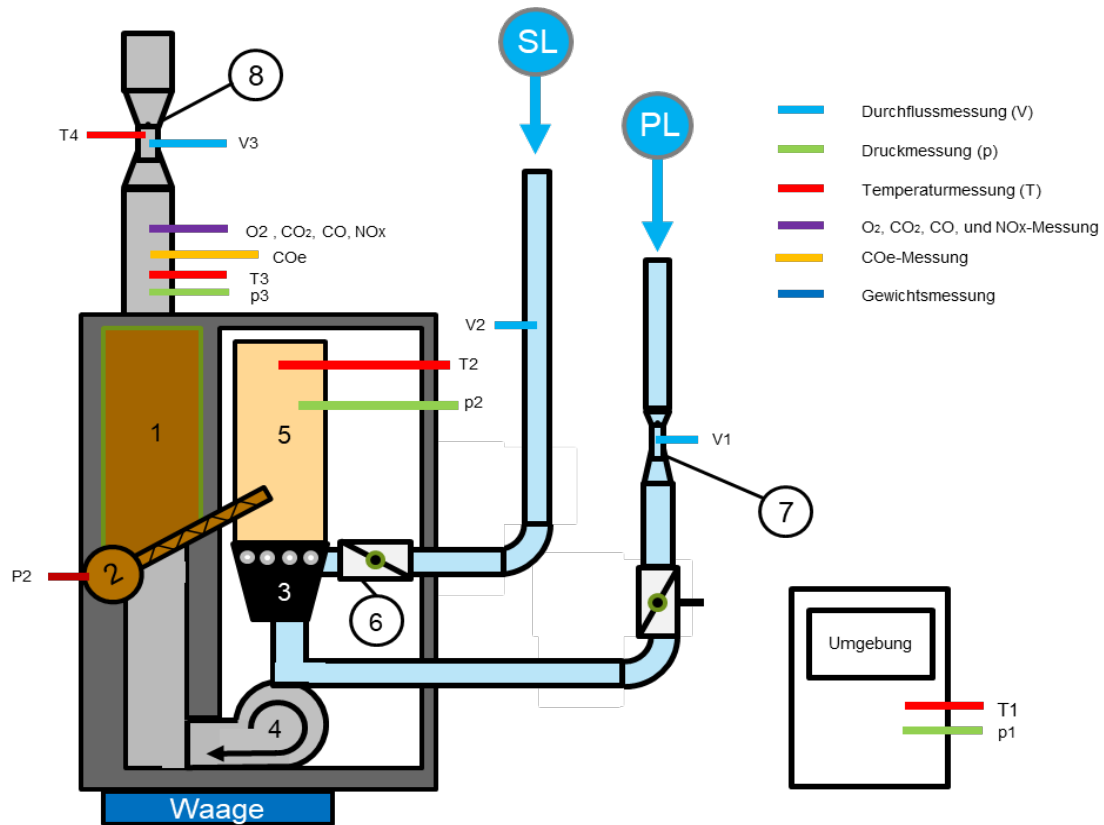
Motorgetriebene Sekundärluftklappe

Abbildung 5: Integration der Sekundärluftklappe



3.2 Prüfstand FHNW

Der Micro Pellet Stove wurde bei den Projektpartnern Bios, Rika und FHNW aufgebaut. Der Prüfstand an der FHNW umfasste folgende Messstellen:



- 1 Pellet-Behälter
- 2 Förderschnecke
- 3 Brennmulde
- 4 Saugzuggebläse
- 5 Brennkammer
- 6 Sekundärluftklappen
- 7 Konvergente/divergente Düse (PL)
- 8 Konvergente/divergente Düse (RG)

Abbildung 6: Messstellen Prüfstand FHNW



Folgende Messgeräte wurden eingesetzt:

Volumenstrom		
Bez.	Messgrösse	Messgerät
v1	Volumenstrom Primärluft	Ahlborn Almemo Thermoanemometer FVAD35
v2	Volumenstrom Sekundärluft	Ahlborn Almemo Thermoanemometer FVAD35
v3	Volumenstrom Abgas	Höntzsch Flügelrad-Strömungsmesssensor
Temperaturmessung		
Bez:	Messgrösse	Messgerät
T1	Umgebungstemperatur	Thermoelement Typ K
T2	Abgastemperaturmessung am Brennkammeraustritt	Thermoelement Typ K
T3	Abgastemperatur an Normmessstelle	Thermoelement Typ K
T4	Abgastemperatur bei an der Messstelle der Volumenstrommessung	Thermoelement Typ K
Druckmessung		
Bez:	Messgrösse	Messgerät
p1	Umgebungsdruck	Comet T7511 Barometrischer Druck-, Feuchtigkeits-, Temperatur-Sensor
p2	Druck in der Brennkammer	Differenzdruckmessumformer PI-I4
P3	Kaminzug	Drucksensor Serie LP 1000
Gewicht		
Bez:	Messgrösse	Messgerät
g1	Gewicht des gesamten Aufbaus inklusive Pellet-Behälter	Pesa 600 kg
Abgasanalyse		
Bez:	Messgrösse	Messgerät
O ₂	Sauerstoffgehalt im Abgas trocken gemessen.	MRU MAG 5+ / MAG Vario Luxx
CO ₂	Kohlenstoffdioxidgehalt im Abgas trocken gemessen.	MRU MAG 5+ / MAG Vario Luxx
CO	Kohlenstoffmonooxidgehalt im Abgas trocken gemessen.	MRU MAG 5+ / MAG Vario Luxx
NO _x	Stickstoffoxid im Abgas trocken gemessen.	MRU MAG 5+ / MAG Vario Luxx
CO _e	CO _e -sensitive Festkörperelektrolytsensoren	LHyCon_CarboSen LH-64-7 von Lamtec

Tabelle 2: Verwendete Messgeräte



Zur Beurteilung der Verbrennungsqualität und des Betriebspunkts wurde der Sauerstoff(O_2)- und Kohlenmonoxid(CO)-Gehalt im Abgas mit dem MRU MAG 5+ gemessen. Mithilfe der Volumenstrommessungen der Zuluftströme (v_1 und v_2) und des Abgasstroms (v_3) wurde die Falschlufthmenge des Ofens bestimmt. Die Leistung wurde über die Gewichtsabnahme des gesamten Versuchsaufbaus über der Zeit (g_1) sowie dem bekannten Heizwert der Pellets bestimmt. Mit dem Heizwert (chem. Zusammensetzung und Wassergehalt) der Pellets, dem Brennstoffverbrauch (g_1) und dem Restsauerstoffgehalt (O_2) im Abgas (Verbrennungs- und Überschussluft) kann die Abgasmenge (Massenstrom), die Zusammensetzung und Wärmekapazität berechnet werden. Mit der Abgasmenge und der Wärmekapazität und der gemessenen Abgastemperatur (T_3) kann der Abgasverlust gerechnet werden.

Der Regler konnte für die Regelung die Temperatur am Brennkammeraustritt (T_2) sowie die Signale des LHyCon_CarboSen LH-64-7 von Lamtec (CO_e) verwenden.

3.3 Sensoren von Lamtec

Bei diesem Projekt wird der Restsauerstoffgehalt nicht direkt über eine Lambda-Sonde geregelt. Der Sollwert für den optimalen Restsauerstoffgehalt ist abhängig von der Feuerungsleistung, der Betriebsdauer, des Verschmutzungsgrads und der Falschlufthmenge und kann daher nicht fest vorgegeben werden. Ein eindeutiges Mass für die Qualität der Verbrennung ist der CO -Gehalt im Abgas. Ziel ist es, den Pelletofen so zu betreiben, dass der Luftüberschuss minimal ist, ohne dass die CO -Emissionen ansteigen. So ist sichergestellt, dass der Pelletofen immer mit dem optimalen Restsauerstoffgehalt betrieben wird.

Der Projektpartner LAMTEC verfügt in seinem Produktportfolio über CO_e -sensitive Festkörper-Elektrolytsensoren. Die Sensoren sind in der Lage, den CO -Gehalt im Abgas direkt zu messen. Wobei der Sensor neben CO in unterschiedlichem Masse auch auf andere unverbrannte Stoffe wie Wasserstoff (H_2) und Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) reagiert. Daher wird das erhaltene Messsignal als Kohlenmonoxidäquivalent CO_e bezeichnet. Dieses Verhalten ist nicht nachteilig für die Regelungsstrategie, da die Menge der anderen nicht vollständig verbrannten Stoffe im Abgas dem CO -Verlauf folgt.

3.3.1 Funktionsprinzip der CO_e -Sensoren (1)

Ein CO_e -Sensor funktioniert nach demselben Grundprinzip wie eine klassische Lambdasonde. Beide Sensortypen sind als Feststoffelektrolyten aufgebaut. Der Elektrolyt besteht aus einer Keramik (Zirkoniumoxid dotiert mit seltenen Erden), welche ab einer Temperatur von ca. 300 °C durchlässig für Sauerstoffionen ist.

Bei der Lambdasonde sind die beiden Elektroden gasdicht durch den Festkörperelektrolyten getrennt. Die eine Seite der Lambdasonde (Anode) wird mit Abgas beaufschlagt. Die O_2 -Konzentration des Abgases ist unbekannt. Der O_2 -Partialdruck auf der Abgasseite ist bei einem Verbrennungsprozess immer tiefer als in der Umgebungsluft ($p_{O_2,abg} < 0.21$ bar). Die andere Seite der Lambdasonde (Kathode) wird mit Umgebungsluft (Partialdruck von $p_{O_2,ref} = 0.21$ bar) beaufschlagt. Angetrieben durch diesen Partialdruckunterschied nehmen O_2 -Moleküle an der Kathode 4 Elektronen auf, bilden 2 O^{2-} -Ionen und können so durch den Elektrolyten auf die Anodenseite wandern und dort die Elektronen wieder abgeben. Die dabei entstehende Spannung kann gemessen werden und korreliert mit dem O_2 -Gehalt im Abgas. Die Lambdasonde entspricht einem Nernstschen Sensor. Das heisst, die Konzentration der absorbierten Spezies (O_2) befindet sich im Gleichgewicht mit der die Elektroden umgebenden Gasatmosphäre.



Im Gegensatz zur Lambdasonde handelt es sich bei den CO_e-Sensoren um Nicht-Nernstsche Sensoren, bei denen diese Gleichgewichtsbedingung nicht gegeben ist. Die Anode und Kathode des CO_e-Sensors befinden sich beide auf der Abgasseite des Feststoffelektrolyten. Da beide Elektroden denselben Konzentrationen ausgesetzt sind, wird erwartet, dass sich keine messbare Spannung einstellt. Um ein Signal zu erhalten, müssen Konzentrationsunterschiede geschaffen werden, dazu werden unterschiedliche Materialien für die Elektroden gewählt, die eine unterschiedliche katalytische Aktivität aufweisen. Durch katalytische Umsetzung auf der Oberfläche von CO zu CO₂ an der katalytisch aktiven Anode wird O₂ verbraucht. Im Bereich der Anode sinkt die O₂-Konzentration unter die O₂-Konzentration der umgebenden Gasphase. Angetrieben durch diesen Konzentrationsunterschied wandern Sauerstoffionen von der Kathode durch den Festkörperelektrolyten zur Anode und reagieren dort mit dem CO zu CO₂. Durch das fortlaufende Binden von neuem CO und der Reaktion von CO zu CO₂ ergibt sich ein Gleichgewicht bedingt durch die Reaktionsgeschwindigkeiten und der Konzentration von CO im Abgas. Das erhaltene Spannungssignal korreliert mit der Konzentration von CO im Abgas. Dabei befindet sich die Konzentration der absorbierten Spezies (O₂) nicht im Gleichgewicht, mit der die Elektroden umgebenden Gasatmosphäre.

Die katalytisch aktivierte Oberfläche der Anode ist nicht selektiv auf CO beschränkt, sondern reagiert mit allen brennbaren Spezies im Abgas (H₂, C_nH_m). Dies führt zu einer Empfindlichkeit des Sensors auf alle brennbaren Spezies im Abgas und das erhaltene Sensorsignal entspricht nicht einem reinen CO-Signal, sondern dem CO_e-Signal, welches eine Mischung aus allen unverbrannten Spezies im Abgas darstellt.

Bei sehr hohen CO-Konzentrationen wird die Oberfläche von beiden Elektroden komplett mit CO belegt, es ist nicht mehr möglich, ein Konzentrationsgefälle zu etablieren, der Sensor ist gesättigt und das resultierende Sensorsignal geht gegen null. Dieses Sensorverhalten erforderte spezielle Beachtung bei der Entwicklung der Regelstrategie. Es musste eine Methode entwickelt werden, wie tiefe Sensorsignale, bedingt durch die Sättigung des Sensors, unterschieden werden konnten von tiefen Sensorsignalen, bedingt durch eine tiefe CO-Konzentrationen im Abgas.

3.3.2 Neuentwicklung des CO-Sensors durch Lamtec

Die bestehenden CO-Sensoren von Lamtec, der CarboSen (CO_e) und der KS1D (CO_e und O₂) wurden konzipiert für gasbetriebene Grossfeuerungen. Aus Sicherheitsgründen verfügen diese Sensoren über eine sehr hohe Verfügbarkeit und Redundanzen mit entsprechenden Mehrkosten für die Architektur der Sensoren. Für den Anwendungsfall in einem MPS sind die bestehenden Sensoren viel zu teuer und viel zu gross. Für diesen Fall, entwickelte Lamtec eine vereinfachte Version des Sensors der LHyCon_CarboSen. Für den LHyCon_CarboSen wurde die kleinere CT3 Sensorelektronik entwickelt (Abbildung 7). Die neue Elektronikplatine CT3 ist preiswerter als die CT1 und trotzdem immer noch robust. Die CT3 verfügt nur noch über eine RS232-Schnittstelle für den Datentransfer.

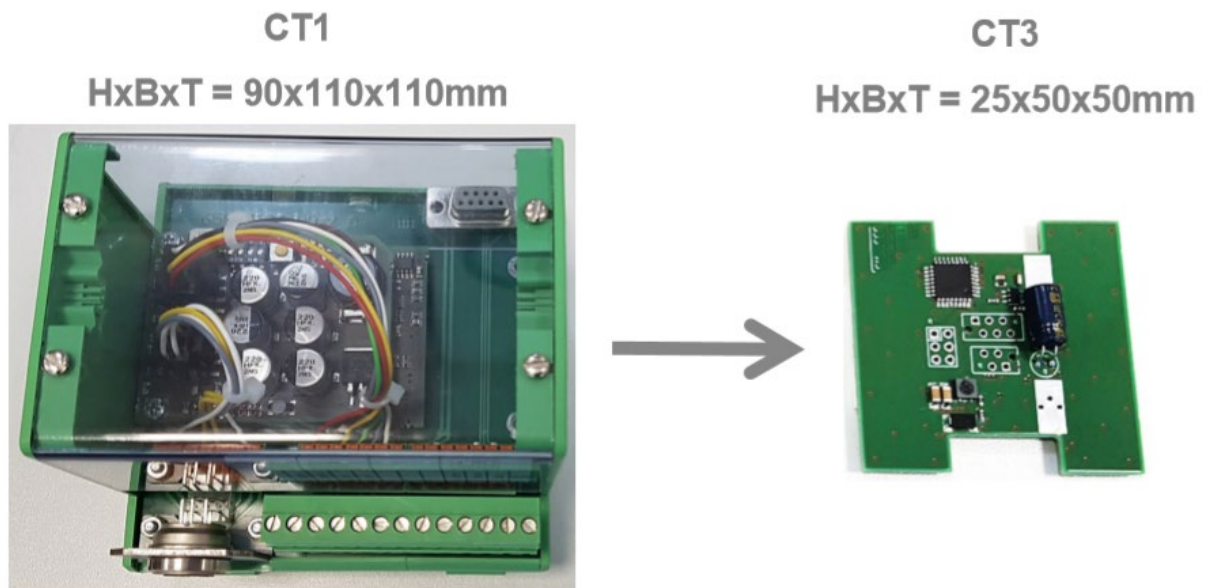


Abbildung 7: Miniaturisierung Sensorelektronik von CT1 bis CT3

Verglichen mit dem ursprünglichen CarboSen-Design konnte mit dem LHyCon_CarboSen eine Miniaturisierung des Sensors erreicht werden (Abbildung 8).

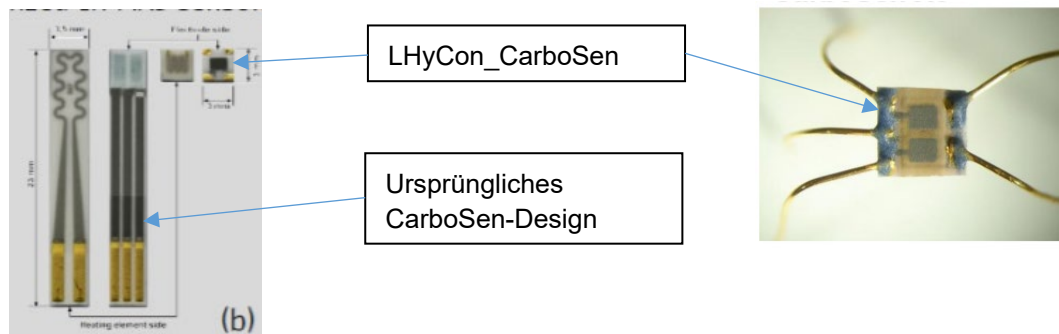


Abbildung 8: LHyCon_CarboSen verglichen mit dem ursprünglichen CarboSen-Design.

Neben den Kosteneinsparungen durch die vereinfachte Sensorelektronik und die Miniaturisierung wurde beim neuen Sensortyp auch die Driftstabilität verbessert. Als eine mögliche Ursache für das Driften des Sensorsignals hatte Lamtec die Wanderung der Goldatome aus der Elektrodenbeschichtung über die Zeit in das darunterliegende Elektrodenmaterial identifiziert. Das Konzentrationsgefälle zwischen dem Gold (in der Beschichtung) und dem Elektrodenmaterial fungierte als Antrieb für den Diffusionsprozess. Für den neuen LHyCon_CarboSen wurden neue Mischelektroden entwickelt, die schon bei der Produktion über eine gleichmässige Verteilung der Goldatome im gesamten Elektrodenmaterial verfügen. Durch diese Verteilung fehlt der Antrieb für die Diffusion der Goldatome und die Materialzusammensetzung der Elektroden bleibt stabil über der Zeit.



Abbildung 9: Bisherige Sintervariante (links) und neue Sintervariante (rechts)

3.4 Auswahl Sensortyp

Für dieses Projekt wurden durch Lamtec zwei Typen von LHyCon_CarboSen zur Verfügung gestellt, die beide mit demselben Herstellungsverfahren hergestellt wurden, aber ein unterschiedliches Gold-Platin-Verhältnis im Elektrodenmaterial aufweisen:

- LH68-8 hat ein Verhältnis Au:Pt von 0,5.
- LH64-7 hat ein Verhältnis Au:Pt von 5,7.

Für die Umsetzung des Regelkonzepts musste ein Sensortyp ausgewählt werden. Der Sensor sollte eine möglichst geringe Drift aufweisen. Dabei beschreibt die Drift die Veränderung/Änderung der Ausgangssignale von Sensoren bei konstanter Konzentration über der Betriebszeit. Das Verhalten ist bedingt durch Einwirkung äußerer Einflüsse wie Temperatur, chemische Reaktionen durch das Abgas oder durch Belegung mit Staub. Zudem sollte das Sensorsignal sich deutlich vom Rauschen abheben und eine klare Aussage über die momentanen CO-Emissionen zulassen.

Um zu entscheiden, welcher der beiden Sensoren für den Einsatz im Micro Pellet Stove der geeignetere ist, wurde ein Dauerlauftest mit beiden Sensoren durchgeführt. Das Verhalten des Sensorsignals, des LH68-8 und des LH64-7 wurde während des Tests verglichen mit einer Referenzmessung gemessen mit dem MGA5+ von MRU. Das MRU MGA5+ misst die CO-Emissionen mittels des Infrarot-Absorptionsverfahrens. Dieses Messverfahren entspricht dem Standardreferenzverfahren nach EN 15058.

Der Sensor LH64-7 wurde während 43 Stunden, der Sensor LH68-8 während 86 Stunden getestet. Beide Sensoren zeigten in den ersten Betriebsstunden eine starke Drift, die mit zunehmender Betriebszeit immer geringer wurde. Dieses Verhalten kann als ein Einlaufverhalten interpretiert werden. Die Signalverläufe der Rohsignale der Sensoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten verglichen mit dem MGA5+ sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

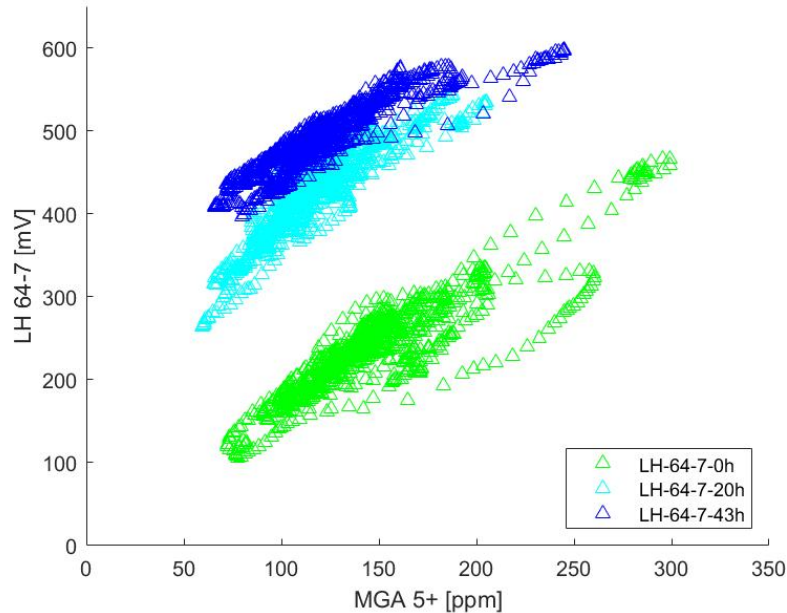


Abbildung 10: LH64-7 Sensor verglichen mit dem MRU MGA5+ nach unterschiedlichen Betriebsdauern.

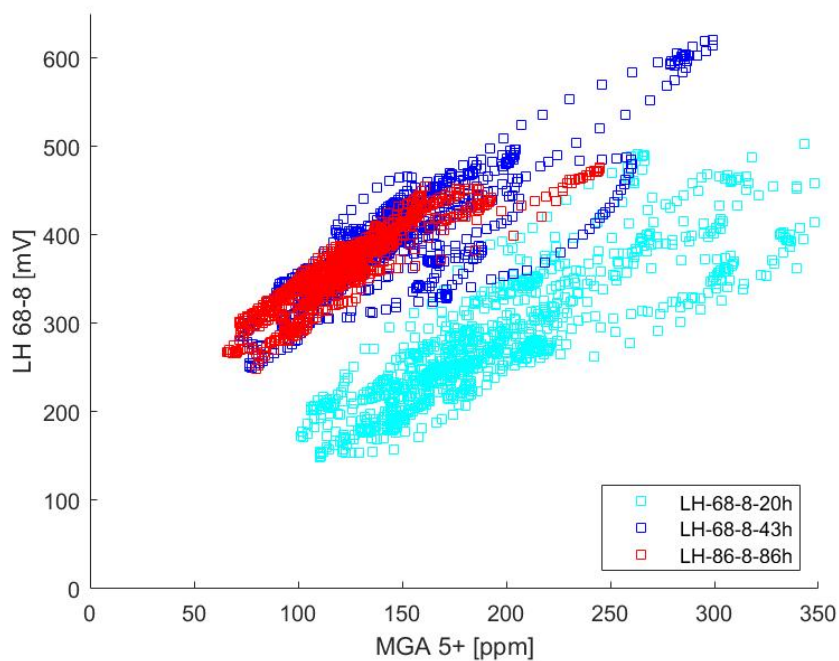


Abbildung 11: LH68-8 Sensor verglichen mit dem MRU MGA5+ nach unterschiedlichen Betriebsdauern.

Zum Vergleich der Sensoren zeigt Abbildung 12 die Rohsignalspannungen des LH64-7 und des LH68-8 gegenüber den Emissionswerten gemessen mit dem MGA5+ nach 43 Stunden Betrieb. Bei gleicher Temperatureinstellung am Sensor ist bei gleichem CO Messwert des MGA5+, das Spannungssignal des LH64-7 Sensors höher verglichen mit dem LH68-8. Die lineare Interpolationskurve des Sensors LH68-8 hat eine minimal grössere Steigung, was vorteilhaft ist für die Regelung der



Pelletfeuerung. Der gemessene Unterschied ist jedoch so gering, dass es vernachlässigt werden kann.

Auf die Regelstrategie hat die festgestellte Differenz der Spannungssignale der beiden Sensoren nach dem Einfahren keinen entscheidenden Einfluss. Der Sensor LH64-7 zeigt ein schnelleres Einfahrverhalten. Nach einem einwöchigen Dauerbetrieb weisen jedoch beide Sensoren kein signifikantes Driftverhalten mehr auf, deshalb kommen grundsätzlich beide Sensoren für die Regelung des Ofens in Frage. Aufgrund des höheren Ausgangssignals des Sensors LH64-7 bei gleicher Temperatureinstellung, bevorzugen wir diesen Sensor. Die weitere Optimierung der Regelung wird mit dem LH64-7 durchgeführt.

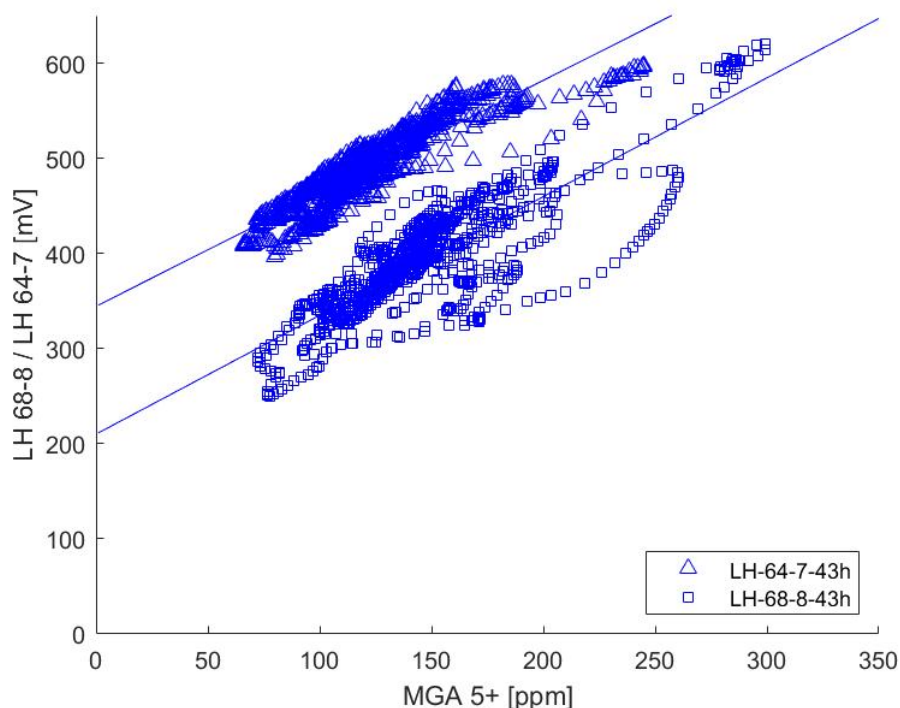


Abbildung 12: Vergleich der Sensoren LH68-8 und LH 64-7 nach 43h Dauerbetrieb



3.5 Langzeitdriftmessung LHyCon_CarboSen LH64-7

Der Sensor LH64-7, mit einem Verhältnis Au:Pt von 5.7, war während sämtlicher Versuche, die zur Optimierung des Reglers durchgeführt wurden, eingebaut und in Betrieb. Gesamthaft wurde der Sensor LH64-7 für 420 Stunden betrieben. Dies umfasst Betriebsstunden mit dem ersten Prototyp VA1 und mit dem zweiten Prototyp VA2. *Abbildung 13* zeigt die Signalstärke des Rohsignals vom Sensor LH64-7 nach unterschiedlicher Betriebsdauer. Es ist ein deutliches Driftverhalten zu Beginn des Dauerbetriebes zu erkennen, welches sich im weiteren Verlauf abschwächt. Dies wird deutlich, wenn die Drift zwischen den grünen Punkten und den hellblauen Punkten (Delta 20h) verglichen wird mit der Drift zwischen den hellblauen Punkten und den schwarzen Punkten (Delta 400h). Zwischen beiden Zeitabschnitten war die Signaldrift etwa gleich gross, obwohl der zweite Zeitabschnitt 20-mal länger war.

Das maximale Sensorrohsignal beträgt 1'000 mV. Aufgrund der stetigen Drift kommt der Sensor nach 420 h Messdauer bei 350 ppm CO den Bereich von 1'000 mV. Somit ist der Sensor nicht mehr in der Lage, Konzentrationen von mehr als 350 ppm CO zu messen, obwohl der ursprüngliche Messbereich auf 1'000 ppm ausgelegt war. Dank der tiefen Emissionen des MPS ist ein Messbereich von 350 ppm jedoch immer noch ausreichend, um den CO-Gehalt sicher zu detektieren. Bei fortschreitender Verringerung des Messbereichs muss entweder der Sensor nachkalibriert werden oder durch einen neuen Sensor ersetzt werden. Problematischer als diese Messbereichsreduktion war für die Regelung das Verhalten des Sensors bei sehr hohen Emissionen. Wie schon im Kapitel 3.2.1 beschrieben, gerät der Sensor bei hohen CO-Emissionen in eine Sättigung. Als Folge davon bricht das Sensorsignal zusammen. Der Regler muss daher unterscheiden können, ob ein tiefes Sensorsignal aufgrund aktuell tiefer CO-Emissionen oder aufgrund der Sättigung des Sensors zustande kommt.

Die stetige Drift des Sensors, die auch nach dem Einfahrverhalten weitergeht, macht es zwingend erforderlich, dass die Regelstrategie drifttolerant ausgeführt wird.

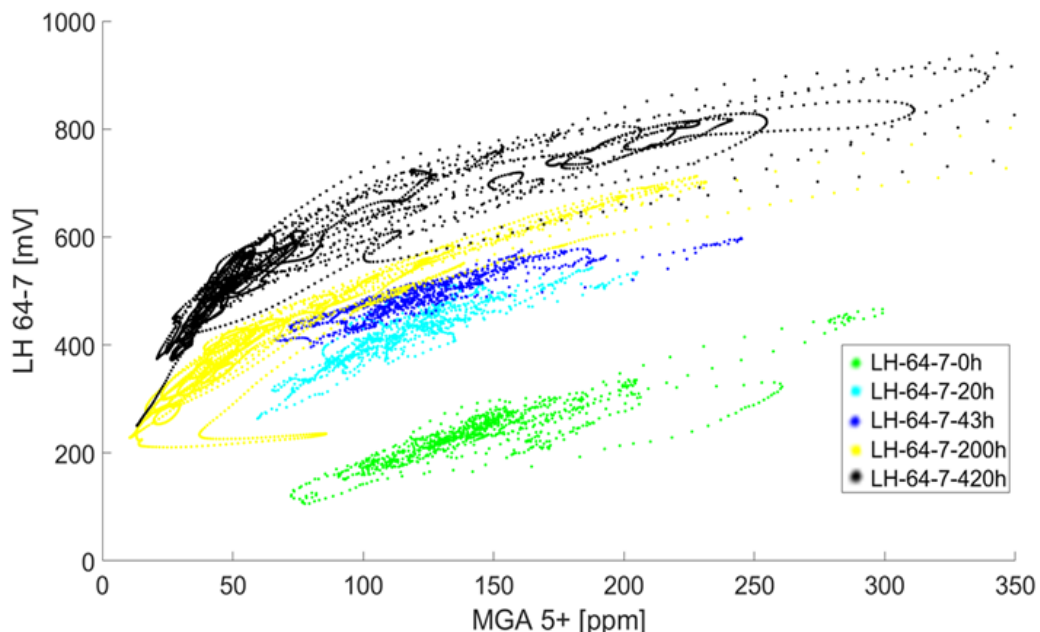


Abbildung 13: Signalstärke LHyCon_CarboSen [mV] vs. MRU MGA 5+ [ppm]: LH 64-7 zum Beginn der Messung (Grün), nach 20h (Cyan) und nach 43h (Blau), nach 200h (Gelb) und nach 420h (Schwarz)



4 Black-Box-Modell

4.1 Aufbau des Black-Box-Modells

Das Black-Box-Modell (BBM) dient als Grundlage, um neue Regelkonzepte zu testen und zu validieren. Es soll das Verhalten eines realen Pelletofens bei verschiedenen Bedingungen abbilden und mit stationären sowie transienten Vorgängen umgehen können.

Das Schema des Micro Pellet Stove ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Brennkammer besteht aus einer Primär- (1) und einer Sekundärverbrennungszone (2). Der für die Vergasung und Verbrennung benötigte Luftmassenstrom wird über ein Gebläse (3) gefördert. Der Sekundärluftstrom kann mittels einer Klappe (4) eingestellt werden. Über eine Schnecke (5), angetrieben durch einen Motor (M), werden die Pellets der Primärzone zugeführt, wo sie vergast werden. Dieses Produktgas steigt in die Sekundärzone auf, wo es dann mit der Sekundärluft vollständig reagiert, Wärme freisetzt und abgibt, direkt über die Strahlung durch das Fenster (6) und indirekt durch Aufheizen der Brennkammerwand (7). Durch diese Wärmeabgabe kühlt das Abgas auf dem Weg von der Flamme zum Brennkammeraustritt ab, was einen wichtigen Einfluss auf die Emissionen hat. Am Austritt werden verschiedene Parameter gemessen, wie zum Beispiel die Temperatur, der O_2 - oder der CO_e -Gehalt. Mit den gemessenen Temperaturen und CO_e -Werten wird über die Regelung (8) die Sekundärluftklappenstellung eingestellt.

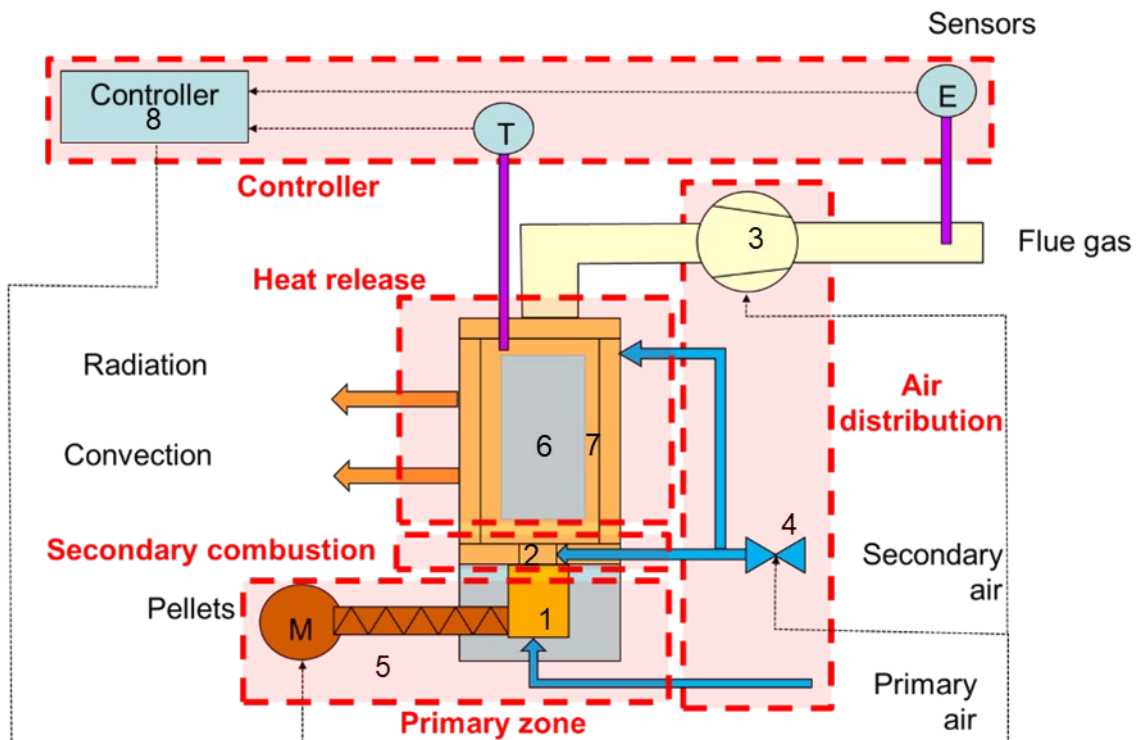


Abbildung 14: Schema des Micro Pellet Stoves und die Aufteilung in die verschiedenen Module



Das BBM wurde in Matlab/Simulink (Version 2019a) programmiert. Dazu wurde der Micro Pellet Stove in fünf Module gegliedert, welche miteinander interagieren (Abbildung 15):

- Luftverteilung (Air distribution)
- Primärzone (Primary Zone)
- Sekundäre Verbrennung (Secondary Combustion)
- Wärmeabgabe (Heat Release)
- Regelung (Controller) Das Simulink-Modell orientiert sich an diesem Aufbau, wie Abbildung 15 aufzeigt. Die einzelnen Module werden in den nächsten Abschnitten detailliert erläutert.

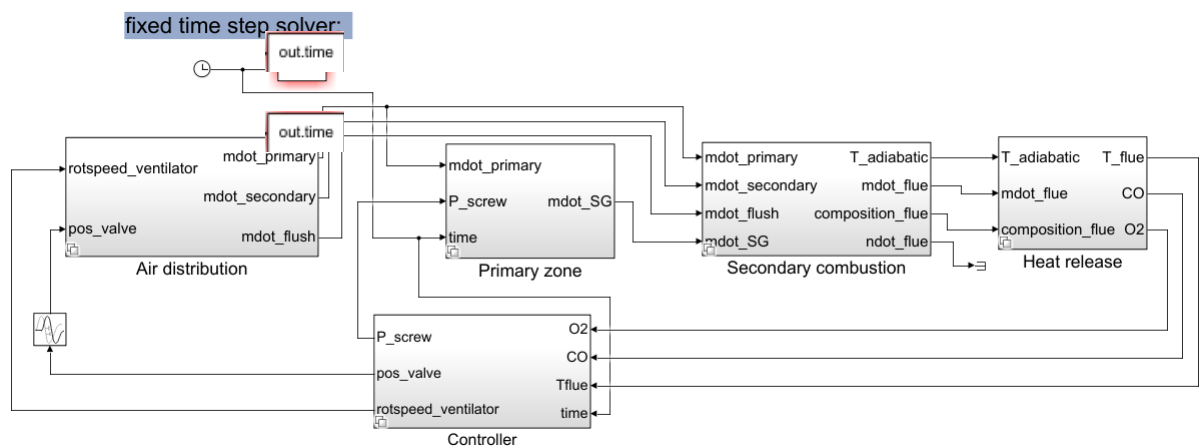


Abbildung 15: Aufbau des Simulinkmodells analog dem Schema respektive der Aufteilung des Micro Pellet Stoves

4.1.1 Luftverteilungsmodul

Der Ansatz des Luftverteilungsmoduls basiert auf dem Ansatz von Gölles (2). Der Volumenstrom wird auf der Grundlage der Ventilator Kennlinie sowie den Strömungswiderständen der einzelnen Strömungspfade bestimmt.

Die Volumenstrom-Druck Kennlinie des Ventilators wurde aus dem Typenblatt entnommen (3). Die Widerstandswerte wurden mit dem heißen Ofen ausgemessen. Der Ansatz ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt und die dazugehörigen Parameter werden in Tabelle 3 erläutert. Die Formeln in diesem Abschnitt wurden der Website (4) entnommen, welche einen guten Überblick über Widerstandswerte in der Strömungstechnik aufweist.



p_{CC}	[Pa]	Druck in der Brennkammer
p_0	[Pa]	Druck nach dem Gebläse (Kaminzug)
Δp_v	[Pa]	Druckverlust über den Ventilator
\dot{V}_{tot}	[m ³ s ⁻¹]	Totaler Volumenstrom in der Brennkammer
\dot{V}_P	[m ³ s ⁻¹]	Volumenstrom der Primärluft
\dot{V}_S	[m ³ s ⁻¹]	Volumenstrom der Sekundärluft
\dot{V}_V	[m ³ s ⁻¹]	Volumenstrom in der Brennkammer gefördert durch den Ventilator
f_V	[s ⁻¹]	Frequenz des Gebläses
p_{amb}	[Pa]	Umgebungsdruck
$R_{P,P}$	[kg m ⁻⁷]	Widerstand der Primärluft
$R_{P,S}$	[kg m ⁻⁷]	Rohrwiderstand der Sekundärluft
$R_{O,S}$	[kg m ⁻⁷]	Klappenwiderstand der Sekundärluft
R_{HX}	[kg m ⁻⁷]	Widerstand Wärmetauscher
R_{tot}	[kg m ⁻⁷]	Gesamtwiderstand

Tabelle 3: Beschreibung der Variablen zur Modellierung der Luftverteilung

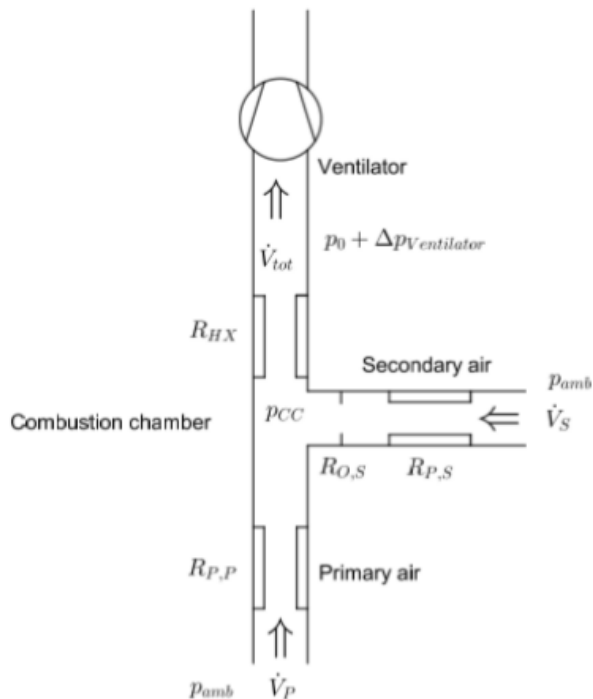


Abbildung 16: Schema des Luftmassenstroms mit Gebläse und Aufteilung in Primärluft und Sekundärluft

Der Gesamtströmungswiderstand vom Gesamtvolumenstrom berechnet sich wie folgt,



$$R_{tot} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R_{p,s} + R_{o,s}}} + \frac{1}{\sqrt{R_{p,p}}} \right)^2} + R_{HX}$$

Wobei die Widerstände $R_{p,s}$, $R_{p,p}$ und R_{HX} konstant sind, während $R_{o,s}$ je nach Klappenposition variiert.

Die Ventilator Kennlinie ist abhängig von der Ventilatorfrequenz f_v und der Dichte des Rauchgases, welche wiederum von der Temperatur in der Brennkammer abhängt. In einem iterativen Verfahren werden der Volumenstrom und die Druckdifferenz über den Ventilator berechnet.

$$[\dot{V}_v, \Delta p_v] = f(f_v, R_{tot}, \dot{V}_0, p_0)$$

Durch folgende Berechnungen kann der Brennkammerdruck und der Primär- sowie Sekundärluftvolumenstrom bestimmt werden.

$$p_{CC} = p_0 + \Delta p_v - (\dot{V}_0 + \dot{V}_v)^2 R_{HX}$$

$$\dot{V}_p = \sqrt{\frac{p_0 + \Delta p_v}{R_{p,p}}}$$

$$\dot{V}_s = \sqrt{\frac{p_0 + \Delta p_v}{R_{p,s} + R_{o,s}}}$$

4.1.2 Primärzonenmodul

Die wichtige Aufgabe dieses Moduls ist das Abbilden des instationären Verhaltens des Pelletofens, bedingt durch die nicht kontinuierliche Zugabe der Pellets und der davon abhängigen Leistungsänderung. Da die Beschreibung des Verhaltens eines Pellets oder eines Glutbetts über theoretische Ansätze nicht umsetzbar ist, wird für dieses Projekt davon ausgegangen, dass jedes Pellet einen Lebenszyklus hat, während dem es Energie, gemäss seiner Masse und dem Heizwert, abgeben kann.

Der Energiefreisetzungsvorlauf eines Pellets im Ofen ist theoretisch schwierig zu bestimmen. Es wurde deshalb ein Versuchsstand gebaut, mit welchem der Verbrennungsvorlauf einzelner Pellets bei verschiedenen Randbedingungen beobachtet werden konnte. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 17 dargestellt und zeigt den inneren Aufbau der Versuchsbrennkammer in Aussen- und in Schnittansicht sowie die Verbrennungsluftführung. Die Brennkammer mit Rost wurde in einem elektrischen Ofen auf die gewünschte Temperatur vorgewärmt. Die Primärluft wird vorgewärmt durch den Rost zugeführt, während die Sekundärluft nicht vorgewärmt wird. Die Dimension der Brennkammer entspricht etwa der des MPS. Die Abgaszusammensetzung wurde mit einem Gasanalysegerät gemessen.

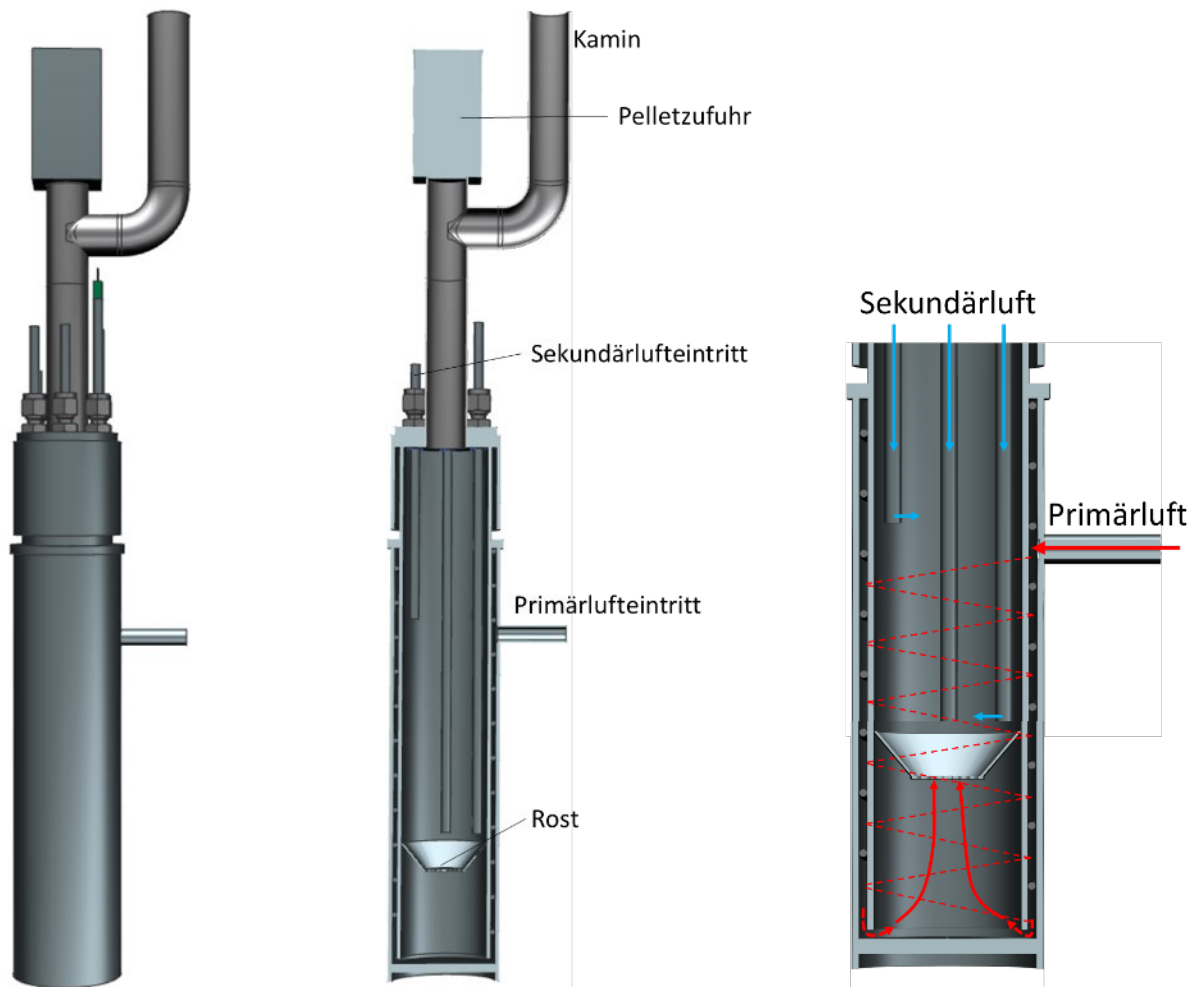


Abbildung 17: Ansicht der Versuchsbrennkammer von aussen im Schnitt und Verbrennungsluftführung

Die Ablaufgeschwindigkeit des Zyklus hängt von der Temperatur im Glutbett, der Primärluft sowie dem mittleren Sauerstoffgehalt im Glutbett ab. Um die gesamte momentane Leistung zu bestimmen, werden die jeweiligen Energiemengen der Lebenszyklusstadien der einzelnen Pellets summiert, siehe nachfolgende Gleichung und Abbildung 18 und Abbildung 19.

$$P(t) = \sum_i P_i(t)$$

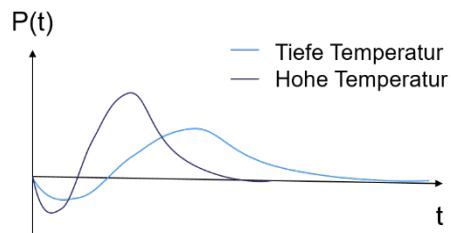


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der Leistungsaufnahme und -abgabe eines einzelnen Pellets

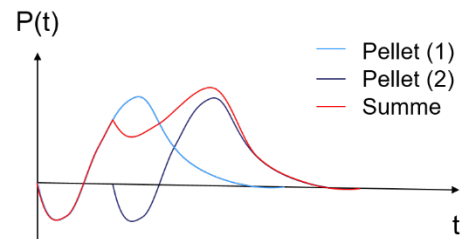


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der Leistungsaufnahme und -abgabe resultierend aus der Überlagerung von zwei Pellets mit unterschiedlichen Lebenszyklusstadien

4.1.3 Sekundäres Verbrennungsmodul

Im sekundären Verbrennungsmodul wird die adiabate Flammentemperatur berechnet. Der Brennstoff wird dazu als Gas mit konstanter Zusammensetzung modelliert. Der sogenannte Ersatzbrennstoff weist dieselben thermodynamischen Eigenschaften und dieselbe Elementarzusammensetzung wie Holzpellets auf. So stimmt die Elementarstoffzusammensetzung des Abgases aus der Verbrennung des Ersatzbrennstoffs mit der Abgaszusammensetzung beim Verbrennen von Holzpellets überein. Die Enthalpie des Ersatzbrennstoffes ist identisch mit derjenigen von Holzpellets. Aufgrund der aktuellen ermittelten Leistung aus der Primärzone wird der Massenstrom des Ersatzbrennstoffes bestimmt. Anschliessend kann über die Massenströme (Ersatzbrennstoff, Primär- und Sekundärluft) die Abgaszusammensetzung sowie iterativ die adiabate Verbrennungstemperatur berechnet werden. Diese wird im folgenden Wärmeabgabemodul benötigt, um den Wärmeverlust abschätzen zu können.



4.1.4 Wärmeabgabemodul

Um die Bildung des Kohlenmonoxids abbilden zu können, ist es entscheidend, die Temperatur in der Brennkammer zu modellieren. Denn basierend auf der Abgaszusammensetzung, dem Restsauerstoffgehalt und der resultierenden Temperatur in der Brennkammer wird der CO-Gehalt bestimmt. Der Verlauf des CO-Gehalts im Abgas einer Feuerung in Abhängigkeit vom Restsauerstoffgehalt hat die Form ähnlich einer nach oben geöffneten Parabel, siehe Abbildung 20.

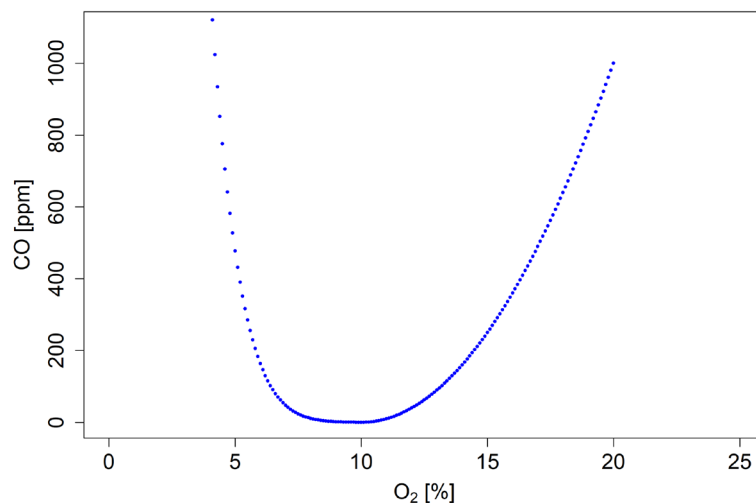
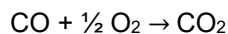


Abbildung 20: Typischer Verlauf des Kohlenmonoxidgehalts im Abgas einer Feuerung in Abhängigkeit des Restsauerstoffgehalts im Abgas

Die Zunahme an CO bei niedrigem O₂-Gehalt ist auf den Sauerstoffmangel, aufgrund von nicht idealer Mischung, zurückzuführen, da CO nicht weiter zu CO₂ reagieren kann.



Bei hohem Restsauerstoffgehalt im Abgas, verursacht durch hohen Luftüberschuss, ist die Temperatur im Abgas zu niedrig, um das in der Verbrennungsreaktion gebildete CO schnell genug zu CO₂ zu oxidieren. Man spricht vom Einfrieren der Reaktion (Quenching).

Im Folgenden wird die Modellierung der Abgastemperatur erläutert. In Tabelle 4 sind alle verwendeten Parameter aufgelistet.

T_{ad}	[°C]	Adiabate Verbrennungstemperatur
T_{flue}	[°C]	Rauchgastemperatur
$T_{ins,i}$	[°C]	Temperatur Brennkammerisolation (innen)
$T_{ins,m}$	[°C]	Temperatur Brennkammerisolation (mitte)
$T_{ins,o}$	[°C]	Temperatur Brennkammerisolation (aussen)
T_w	[°C]	Temperatur Aussenwand
T_{amb}	[°C]	Temperatur Umgebung
$R_{ins,rad}$	[K/W]	thermischer Widerstand Strahlung Brennkammerisolation (innen)
$R_{ins,conv}$	[K/W]	thermischer Widerstand Konvektion Brennkammerisolation (innen)



$R_{ins,cond,1}$	$[K/W]$	thermischer Widerstand Wärmeleitung Brennkammerisolation (innen)
$R_{ins,cond,2}$	$[K/W]$	thermischer Widerstand Wärmeleitung Brennkammerisolation (aussen)
$R_{w,rad}$	$[K/W]$	thermischer Widerstand Strahlung Wand (aussen)
$R_{w,conv}$	$[K/W]$	thermischer Widerstand Konvektion Wand (aussen)
$R_{w,cond}$	$[K/W]$	thermischer Widerstand Wärmeleitung Wand
$R_{win,conv,i}$	$[K/W]$	thermischer Widerstand Konvektion Fenster (innen)
$R_{win,conv,o}$	$[K/W]$	thermischer Widerstand Konvektion Fenster (aussen)
$R_{win,cond}$	$[K/W]$	thermischer Widerstand Wärmeleitung Fenster
A_w	$[m^2]$	Wandfläche (aussen)
$A_{ins,i}$	$[m^2]$	Fläche Brennkammerisolation (innen)
$A_{win,i}$	$[m^2]$	Fläche Fenster (innen)
$\dot{Q}_{ins,i}$	$[W]$	Wärmetransfer über die Brennkammerisolation (innen)
$\dot{Q}_{ins,o}$	$[W]$	Wärmetransfer über die Brennkammerisolation (aussen) und die Ofenwand
$\dot{Q}_{win,rad}$	$[W]$	Wärmetransfer durch Strahlung über das Fenster
$\dot{Q}_{win,cond}$	$[W]$	Wärmetransfer durch Wärmeleitung und Konvektion über das Fenster
\dot{Q}_{ins}	$[W]$	Gesamter Wärmetransfer über die Brennkammerisolation
\dot{Q}_{win}	$[W]$	Gesamter Wärmetransfer über das Fenster
\dot{m}_{flue}	$[kg/s]$	Rauchgasmassenstrom durch den Ofen
m_{ins}	$[kg]$	Masse Brennkammerisolation
$c_{p,ins}$	$[J/K]$	spezifische Wärmekapazität Brennkammerisolation
σ	$[W/(m^2 K^4)]$	Stefan Boltzmann-Konstante
ε_{flue}	$[-]$	Emissivität Rauchgas
τ_{win}	$[-]$	Transmissivität Fenster

Tabelle 4: Wärmeabgabemodul

Das Wärmeabgabemodul ist in 10 Teilabschnitte unterteilt. Für jeden Teilabschnitt wurde die Austrittstemperatur bestimmt, unter Berücksichtigung der lokalen Strahlungsverluste und Wärmekonvektion. Diese Austrittstemperatur ist jeweils die Eintrittstemperatur für den nächsten Teilabschnitt. Abbildung 21 zeigt die Energiebilanz der Brennkammer mit den Wärmeverlusten und der Rauchgastemperatur für jeden Teilabschnitt in der Brennkammer.

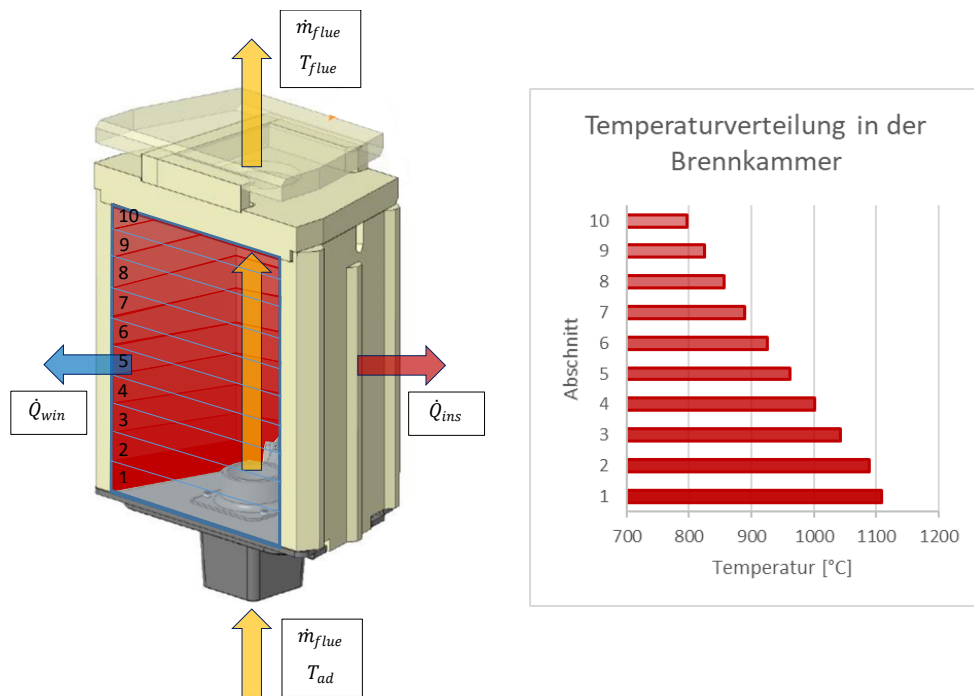


Abbildung 21: Energie und Massenbilanz der Brennkammer mit den dazugehörigen Temperaturen des Rauchgases über den jeweiligen Ofenabschnitt bei 4 kW Leistung

Für eine vereinfachte Berechnung wird die Brennkammer als zylindrischer Hohlkörper angenommen. Die Wärmeverluste über die Brennkammerwand \dot{Q}_{ins} und das Fenster \dot{Q}_{win} können mithilfe von Wärmeleitwiderständen berechnet werden. Die Wärmeleitwiderstände in zylindrischer Form berechnen sich wie folgt:

$$R_{conv} = \frac{1}{\alpha A}$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi L \lambda}$$

$$R_{rad} = \frac{1}{\frac{\varepsilon \sigma A_2 (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}}$$

Als Eintrittstemperatur für den ersten Teilabschnitt wird angenommen, dass die Rauchgastemperatur der adiabaten Flammentemperatur entspricht.

Beim Zünden des Brennstoffs entspricht die Brennkammerisolationstemperatur der Umgebungstemperatur.

$$T_{flue}(1) = T_{ad}$$

$$T_{ins,m}(t = 0) = T_{amb}$$



Die Brennkammerisolation wird als Energiespeicher simuliert und der Wärmetransfer an der inneren Brennkammerwand (bis Mitte der Brennkammerisolation), sowie an der äusseren Brennkammerwand berechnet.

Das Wärmeleitschema mit den dazugehörigen Widerständen ist in allen Teilabschnitten identisch und wird in Abbildung 22 schematisch dargestellt. Die Strahlung an die Brennkammerwand kann vernachlässigt werden, siehe Gölles (5).

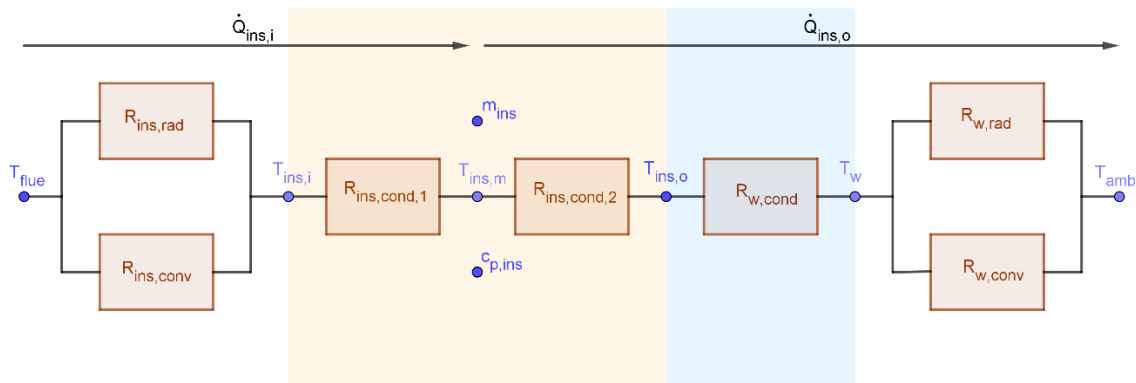


Abbildung 22: Wärmeleitwiderstandsschema MPS (Ofenwand)

Für den Wärmestrom vom Rauchgas bis zur Mitte der Brennkammerisolation für den Teilabschnitt j gilt:

$$\dot{Q}_{ins,i}(j) = \frac{T_{flue}(j) - T_{ins,m}(j)}{R_{ins,cond,1} + \frac{R_{ins,rad}R_{ins,conv}}{R_{ins,rad} + R_{ins,conv}}}$$

wobei in den Widerständen die Bezeichnungen *ins* für die Isolation (Vermiculit) verwendet wird. Für den Wärmestrom von Mitte Brennkammerisolation zur Umgebung gilt folgende Beziehung:

$$\dot{Q}_{ins,o}(j) = \frac{T_{ins,m}(j) - T_{amb}(j)}{R_{ins,cond,2} + R_{w,cond} + \frac{R_{w,rad}R_{w,conv}}{R_{w,rad} + R_{w,conv}}}$$

wobei hier zusätzlich die Bezeichnung *w* für Wand verwendet wird. Daraus wird nun für den nächsten Teilabschnitt im Ofen die Rauchgastemperatur berechnet mit:

$$T_{flue}(j+1) = T_{flue}(j, t) - \frac{\dot{Q}_{ins,i}(j, t)}{\dot{m}_{flue}c_{p,flue}}$$

Die mittlere Temperatur von jedem Teilabschnitt *j* der Brennkammerisolation wird schliesslich mithilfe der Wärmekapazität und Masse der Brennkammerisolation für jeden weiteren Zeitschritt *t* neu berechnet. Mithilfe dieser können die neuen Wärmeströme berechnet werden:

$$T_{ins,m}(j, t+1) = T_{ins,m}(j, t) + \frac{\dot{Q}_{ins,i}(j, t) - \dot{Q}_{ins,o}(j, t)}{\dot{m}_{ins}c_{p,ins}}$$



Zusätzlich zur Wärmeleitung über die Brennkammerisolation wird der Wärmeverlust durch das Ofenfenster berücksichtigt. Entgegen der Betrachtung der Brennkammerwand kann die Strahlung über die Fensterscheibe nicht vernachlässigt werden.

$$\dot{Q}_{win,cond} = \frac{T_{flue} - T_{amb}}{R_{win,conv,i} + R_{win,cond} + R_{win,conv,o}}$$

Das dazugehörige Wärmeleitschema ist für jeden Fensterabschnitt identisch und wird in Abbildung 23 dargestellt.

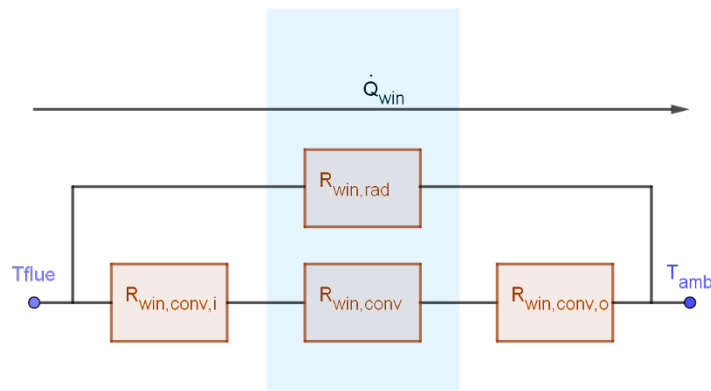


Abbildung 23: Wärmeleitwiderstandsschema MPS (Fenster)

Bei der Wärmestrahlung durch das Fenster wird die Emissivität des Rauchgases und die Transmissivität des Fensters berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{rad,win} = A_{win,i} \sigma \epsilon_{flue} \tau_{win} (T_{flue}^4 - T_{amb}^4)$$

Die ermittelte Rauchgastemperatur nach dem zehnten Abschnitt entspricht der Rauchgastemperatur am Austritt der Brennkammer.

$$\text{Austrittstemperatur der Brennkammer} = T_{flue} (j = 11)$$

Mit dieser Austrittstemperatur und dem Restsauerstoffgehalt im Rauchgas wird eine Abschätzung der CO-Konzentration vorgenommen.

4.1.5 Regelungsmodul

Im Regelungsmodul werden die gemessenen Werte (Austrittstemperatur, Sauerstoffgehalt, CO_e-Gehalt des Abgases) verarbeitet. Aus diesen Werten werden mit einem Regelkonzept die Stellsignale für das Gebläse, die Luftklappe oder die Pelletzufuhr ermittelt.

Auf die unterschiedlichen Regelstrategien wird im Absatz 5.1 detailliert eingegangen. Diese Regelkonzepte wurden als Varianten im Modell implementiert, sodass sie verglichen werden können.



4.2 Aufbau Raummodell

Das Raummodell soll die Interaktion zwischen Raumtemperatur und Ofen simulieren. Zudem soll eine Regelung entwickelt werden, welche ein möglichst gutes Raumklima erzeugt bei gleichzeitiger Reduktion des Energieverbrauches.

Um den Einsatzbereich des MPS zu evaluieren, werden unterschiedliche Gebäudetypen berücksichtigt mit Energiekennzahlen von 20 kWh/(m² a), 50 kWh/(m² a) und 80 kWh/(m² a).

Bei einer Raumgrösse von 100 m² Wohnfläche resultieren daraus die Raumwärmebedarfe von 2 MWh/a, 5 MWh/a respektive 8 MWh/a.

In Abbildung 24 ist das Wärmeleitschema des Raummodells ersichtlich. Die Bewohner und deren technischen Geräte wie Waschmaschine, Kochherd etc. sind zusätzliche Wärmequellen. Das daraus resultierende Benutzerprofil über den Tagesverlauf ist in Abbildung 25 dargestellt. Der durchschnittliche Wärmeeintrag durch die Bewohner und deren technischen Geräte beträgt 477 Watt. Als Hauptwärmequelle dient der Mikro-Pellet-Ofen (MPS), welcher über die Raumtemperatur geregelt wird. Schliesslich wird noch die Sonnenstrahlung durch ein Südfenster (6 m²) als Wärmequelle berücksichtigt mit einer Transmissivität von 0.75. Während den typischen Heiztagen, von Anfang Oktober bis Ende April, beträgt die durchschnittliche Globalstrahlung etwa 52 W/ m² was einem durchschnittlichen Wärmeeintrag über alle Südfenster von 234 W entspricht. Die Wärmeverluste erfolgen über die äussere Gebäudehülle.

Das Haus speichert Wärme und funktioniert analog zum elektrischen Schaltkreis als Kondensator. Die Wärmekapazitäten betragen 240 kJ/K (Luft), 200'000 kJ/K (Aussenwände) respektive 20'000 kJ/K (Inneneinrichtung und Innenwände). Insbesondere die Wärmekapazitäten der Wände haben einen grossen Einfluss auf die Trägheit des Systems und können je nach Gebäudetyp stark variieren. Aufgrund der grösseren Oberfläche und der dünneren Innenwände wird der Wärmetransfer von der Innenausstattung an die Raumluft um einen Faktor 10 besser angenommen wie über die Aussenwand.

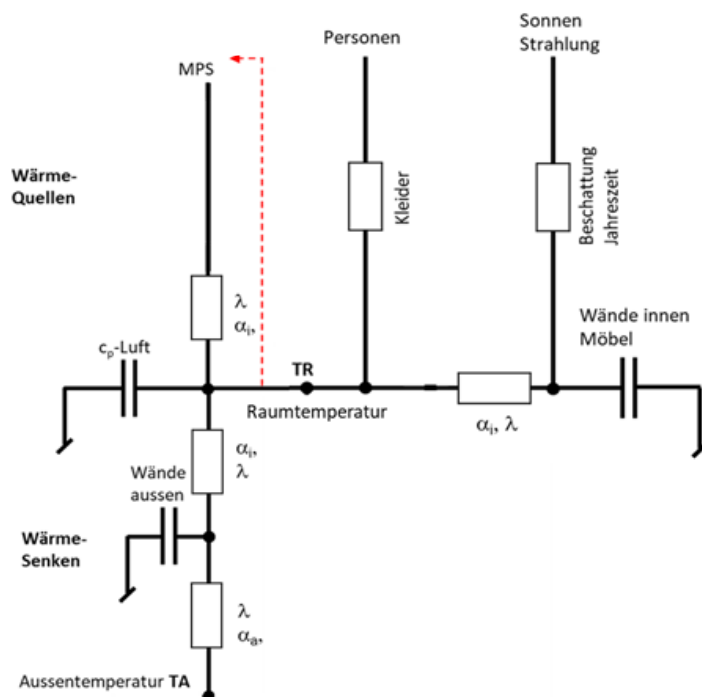


Abbildung 24: Wärmeleitschema Raummodell

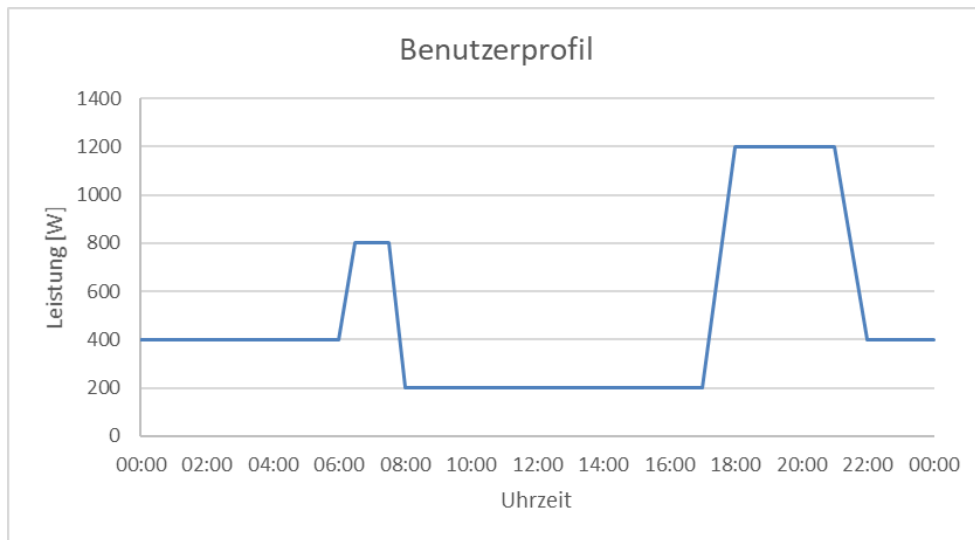


Abbildung 25: Benutzerprofil 100 m² Wohnung (Leistungsabgabe durch Bewohner und technische Geräte)

Um die Heizleistung in Abhängigkeit von der Aussentemperatur darzustellen, wird eine Lastkennlinie (Abbildung 26) erstellt. Diese ist abhängig vom Aussentemperaturverlauf über das Jahr und der Heizgrenze. Die Heizgrenze liegt bei 11.5 °C (2 MWh/a), 14.5 °C (5 MWh/a), respektive 16 °C (8 MWh/a)

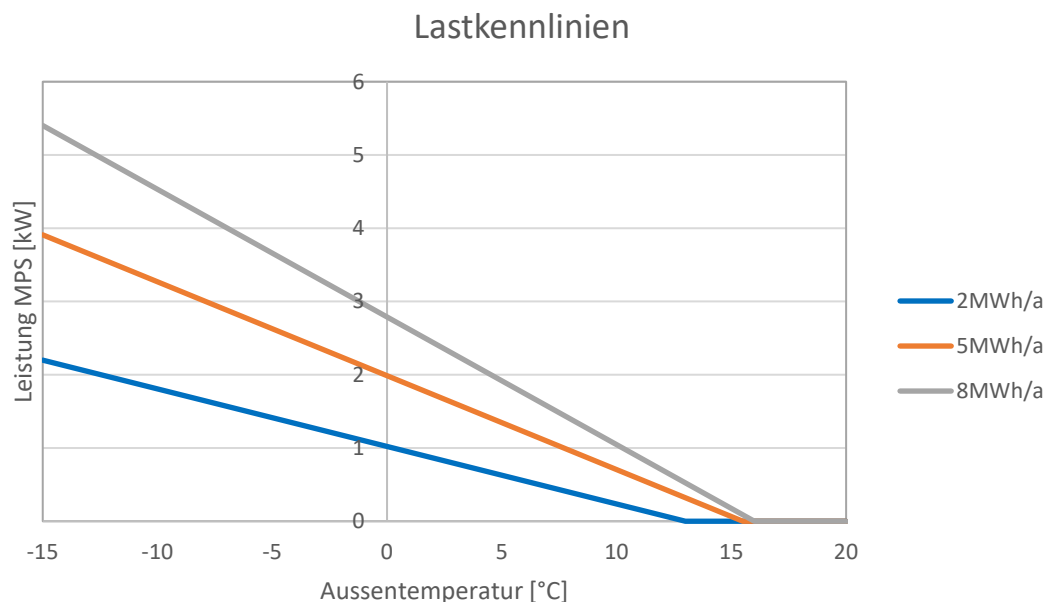


Abbildung 26: Reale Lastkennlinien bei einem Wärmebedarf von 2 MWh/a, 5 MWh/a und 8 MWh/a

Zur Verifizierung des Modells wurde eine Simulation der Lastkennlinie bei 5 MWh/a ausgeführt (siehe Abbildung 27). Der Wärmeeintrag durch die Bewohner, technische Geräte und Globalstrahlung wird als konstant angenommen. Während den ersten 5 Tagen entspricht die Aussentemperatur (blaue Kurve) der Heizgrenze, danach folgt eine zehntägige konstante Abkühlung bis auf -5 °C und schliesslich nochmals ein 15-Tage-Intervall mit konstanter Temperatur. Mithilfe eines PID-Reglers wird



die Innentemperatur (blau gestrichelt) konstant gehalten. Die Leistung ohne Speicherwirkung der Wände gemäss Lastkennlinie wird als rot gestrichelte Linie dargestellt.

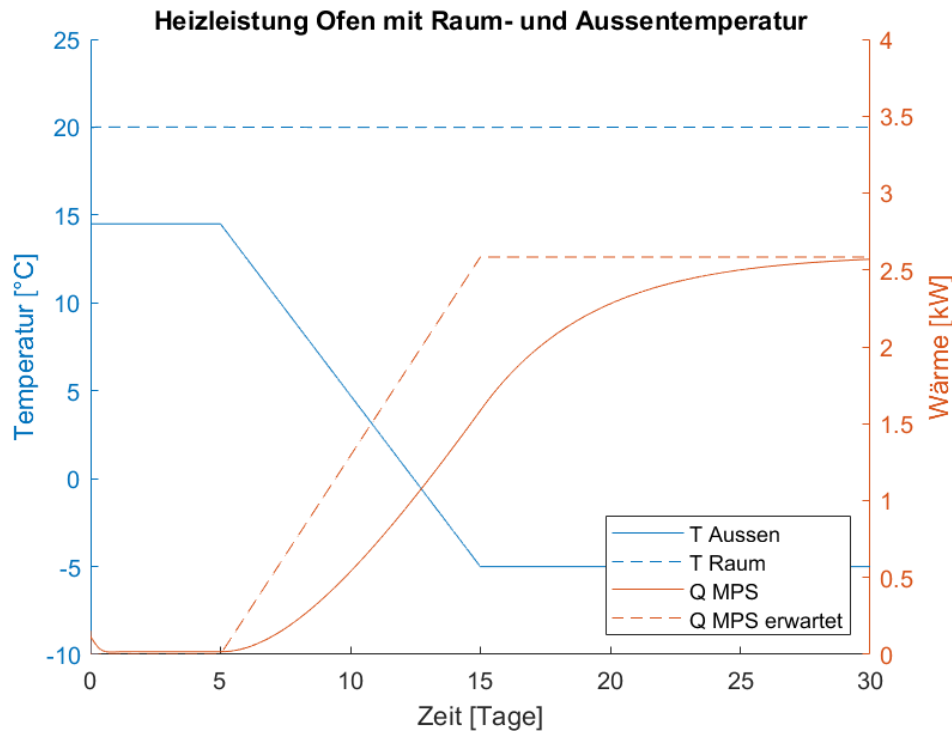


Abbildung 27: Verifizierung Lastkennlinie bei 5 MWh/a mit der Aussentemperatur (blau), der Raumtemperatur (blau gestrichelt), der Heizleistung gemäss Simulation (rot) und der erwarteten Heizleistung nach Lastkennlinie (rot gestrichelt)

Aufgrund der gespeicherten Wärme im Haus wird die Heizleistung langsamer hochgeregelt, als gemäss Lastkennlinie (rot gestrichelt) zu erwarten wäre. Vor dem Absinken der Aussentemperatur und gegen Ende der Simulation entspricht die Ofenleistung der erwarteten Heizleistung.

Während der Abwesenheit der Bewohner und der Schlafenszeit wird eine Tag- und Nachtabschaltung vorgenommen. Dies ermöglicht eine bessere Regelung der Raumtemperatur durch den MPS für Wohnungen mit sehr geringem Energieverbrauch und senkt auch den Gesamtenergiebedarf.

Der Ausschaltzeitpunkt des MPS bleibt immer gleich (08:00 respektive 22:00). Der Einschaltzeitpunkt wird angepasst, wenn die Solltemperatur zu einer definierten Zeit (06:00 respektive 17:00) um mehr als 0.5 °C unter- respektive überschritten wird. Von 06:00-08:00 und 17:00-22:00 wird die Raumtemperatur auf eine benutzerdefinierte Temperatur geregelt.



5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Entwicklung der Regelstrategie

Für die Entwicklung der Regelstrategie wurden verschiedene Konzepte zuerst im Black-Box-Modell getestet und danach im MPS implementiert.

5.1.1 erste Regelstrategie

- CO-Signal ist Regelgrösse
- Sekundärluftklappenöffnung ist die Stellgrösse
- Damit die Drift des CO-Sensors keine Rolle spielt, werden nicht die Absolutwerte, sondern nur die relativen Änderungen des CO-Signals für die Regelung verwendet.
- Der Regler schliesst kontinuierlich die Sekundärluftklappe, bis ein Anstieg des CO-Signals detektiert wird und öffnet dann die Klappe um eine festgelegte Schrittgrösse.

Das CO-Signal sollte nicht direkt als Regelsignal verwendet werden, da das Signal für weite Bereiche vor der Kante konstante Werte annimmt und es so keinen eindeutigen Wert gibt, auf den geregelt werden kann, ohne dass man in die Kante hineinfährt. Dieses Regelverhalten führt dazu, dass der Ofen ständig im Bereich der CO-Kante betrieben wird, mit entsprechend hohen Emissionen.

5.1.2 zweite Regelstrategie

- Abgastemperatur am Brennkammeraustritt ist Regelgrösse
- Sekundärluftklappenöffnung ist die Stellgrösse
- CO-Signal wird für die Festlegung des Temperatursollwerts verwendet.
- Der Regler schliesst die Sekundärluftklappe, bis ein CO-Anstieg (CO-Kante) detektiert wird. Die zu diesem Zeitpunkt gemessene Abgastemperatur am Brennkammeraustritt abzüglich von 5 K wird als neuer Sollwert für die Abgastemperatur verwendet.

Diese Regelstrategie erlaubt einen stabileren Betrieb, sie kann sich jedoch nicht kontinuierlich an Änderungen im Betriebsverhalten des Ofens anpassen, da die Regelung eine Verschiebung der Kante nicht detektieren kann.

5.1.3 dritte Regelstrategie

- Abgastemperatur am Brennkammeraustritt ist Regelgrösse
- Sekundärluftklappenöffnung ist die Stellgrösse
- Die 20 tiefsten CO-Werte und die zeitgleichen Temperaturwerte der letzten fünf Minuten werden identifiziert.
- Der Mittelwert über die fünf höchsten dieser 20 Temperaturen wird als neuer Sollwert verwendet.

Da die CO-Signale über einen grossen Bereich des Betriebsfensters sich nicht stetig ändern, ist das gefundene CO-Minimum kein eindeutiger Betriebspunkt des Ofens, sondern mehr ein Ausdruck der zufälligen Schwankungen im Betrieb des Ofens. Entsprechend war es nicht möglich, einen stabilen Sollwert für die Regelung zu finden. Zudem führte die Suche nach dem CO-



Minimum zu hohen Restsauerstoffgehalten im Abgas, da die Kante CO-Kante mit dieser Methode nicht detektiert werden konnte.

Deshalb wurde die finale Regelstrategie NEO (NEO – Near Edge Operation) entwickelt, welche die CO-Kante detektieren kann und über längere Zeit einen konstanten Betrieb des Ofens ermöglicht. Die NEO-Regelstrategie wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

5.1.4 NEO-Regelstrategie

- Die Abgastemperatur am Brennkammeraustritt ist die Regelgrösse
- Sekundärluftklappenöffnung ist die Stellgrösse
- Es wird eine Matrix aus Temperaturwerten (Abgastemperatur gemessen am Brennkammeraustritt) und den dazugehörigen CO-Werten aufgebaut. Daraus ergibt sich ein Verlauf der CO-Messwerte in Funktion der Temperatur wie in Abbildung 28 idealisiert dargestellt. Der Gradient dieser Kurve (1. Ableitung) zeigt negative Werte auf der kalten Seite der Kurve und ein positives Maximum beim Anstieg des CO auf der heissen Seite der Kurve. Im realen Betrieb schwanken die CO-Werte über die Zeit, daher kann der reale Gradientenverlauf mehrere Peaks aufweisen bei unterschiedlichen Temperaturen. Es hat sich gezeigt, dass der Gradient an der Kante (CO-Anstieg auf der heissen Seite) die höchsten Werte aufweist. So kann die Kante über den höchsten CO-Gradient frühzeitig sicher identifiziert werden.
- Die Solltemperatur für die Regelung ergibt sich aus dem Temperaturwert für die identifizierte Kante abzüglich einer Sicherheitsmarge von 20K.
- Um auf schleichende Änderungen im Verhalten des Ofens reagieren zu können, werden die CO / Abgastemperatur-Werte nach einer halben Stunde gelöscht und durch aktuelle Werte ersetzt.
- Bei starken Störungen des Regelablaufs oder bei Lastwechseln werden alle gespeicherten Werte der Daten-Matrix bis auf die letzten zwei Minuten gelöscht und durch aktuelle Werte wieder aufgefüllt, so kann die Regelstrategie sich schnell auf neue Situationen einstellen, ohne durch den vorherigen Betriebszustand beeinflusst zu werden.
- Die Solltemperatur wird vom Regler mittels Ansteuerung der Sekundärluftklappe eingestellt. Bei zu tiefer Temperatur schliesst die Klappe, die (kalte) Sekundärluftmenge wird reduziert und die Abgastemperatur am Brennkammeraustritt steigt wieder an. Beim Öffnen der Klappe reagiert das System entsprechend entgegengesetzt. Die Reaktion auf eine Änderung der Klappenstellung erfolgt nicht unmittelbar, sondern ist von verschiedenen unterschiedlichen Verzögerungsfaktoren abhängig. Mit einem herkömmlichen PID-Regler war es nicht möglich, das System stabil regeln zu können. Deshalb wurde für dieses Projekt ein PDI-Regler verwendet (6). Der PDI-Regler hat zusätzliche dämpfende Eigenschaften, die die Stabilität der Regelstrecke erhöhen. Der PDI-Regler ist in Kapitel 5.1.2 detailliert beschrieben.

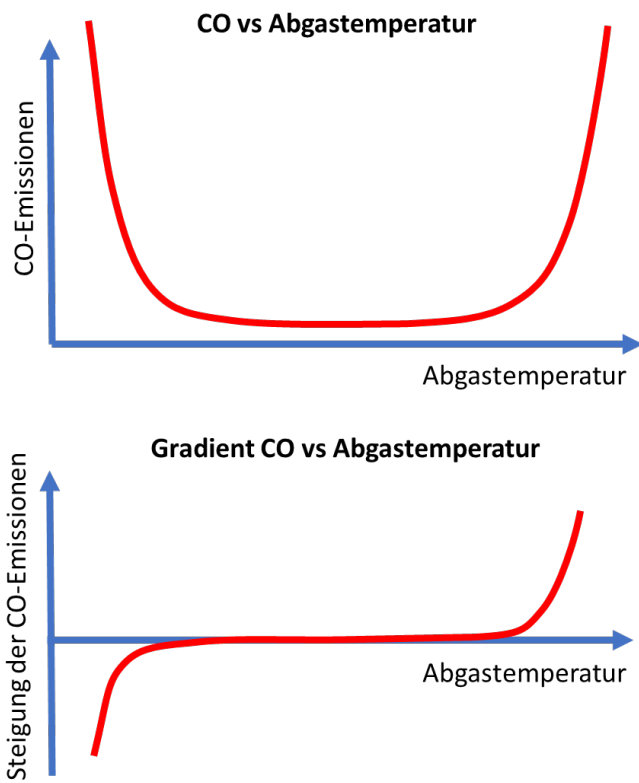


Abbildung 28: CO-Verlauf in Funktion der Abgastemperatur am Brennkammeraustritt und 1. Ableitung davon



Eine Übersicht über die aktuelle Regelstrategie bietet Abbildung 29. Der Regler besteht aus einer Regelstrecke (Blau), einer Sollwertfindung (Grün) und verschiedenen Sicherheitsabfragen (Rot). Das Stellglied für die Regelung ist die Sekundärluftklappe (7b). Der CO-Gehalt und die Abgastemperatur werden als Rückmeldung der Regelstrecke verwendet.

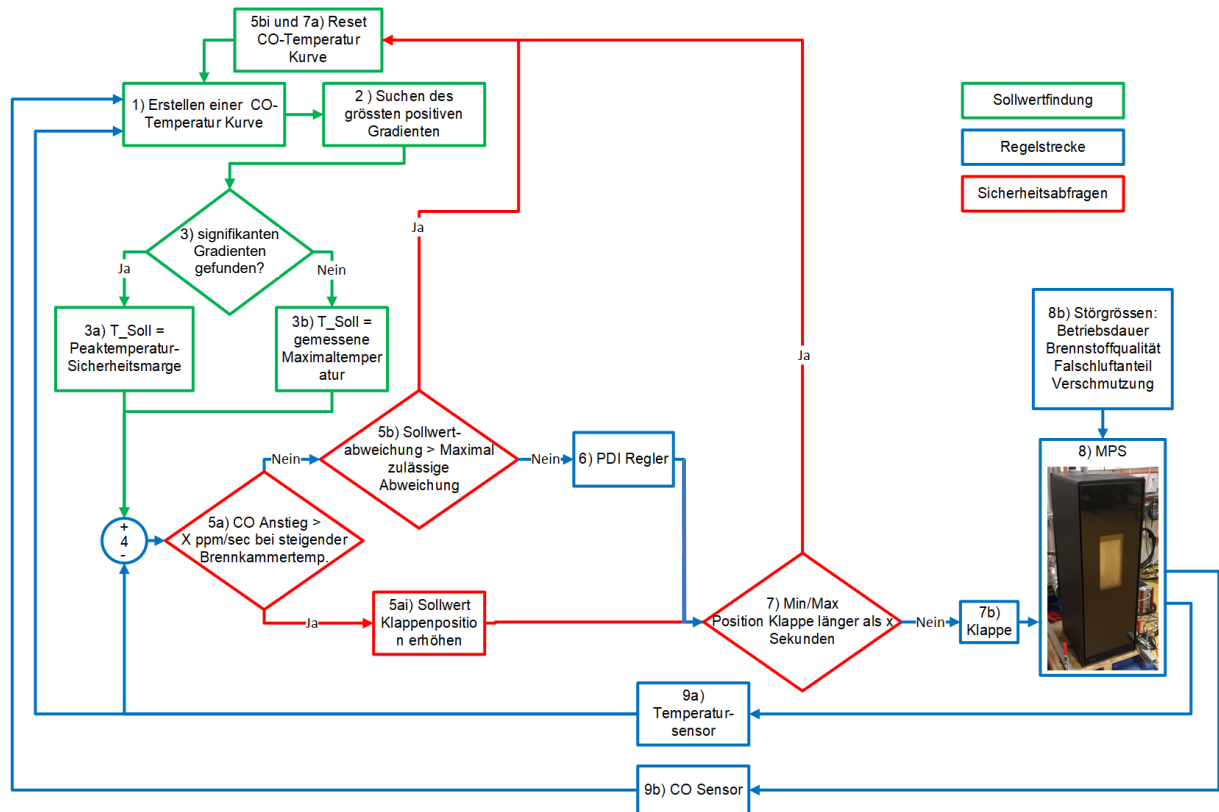


Abbildung 29: Schema NEO Regelstrategie

Der in Abbildung 29 dargestellte Regelablauf wird jede Sekunde einmal durchlaufen und funktioniert wie folgt:

- 1) Die CO-Temperatur-Kurve wird über mehrere Zwischenschritte erstellt:
 - a. Glätten der CO-Werte mittels Tiefpassfilter über die Zeit.
 - b. Korrektur des Zeitversatzes zwischen der Messung mit dem CO-Sensor und dem Temperatur-Sensor in der Brennkammer. Bilden von Wertepaaren CO und Temperatur.
 - c. Sortieren der CO/Temperatur Wertepaare nach der Temperatur.
 - d. Reduktion der Wertepaare durch Mittelung von jeweils 40 benachbarten Wertepaaren.
 - e. Glätten der CO-Werte mittels Tiefpassfilter über die Temperatur.
- 2) Suchen des grössten positiven Gradienten der CO-Temperatur Kurve über mehrere Zwischenschritte:
 - a. Ableitung der CO-Temperatur-Kurve bildet eine Gradientenkurve.
 - b. Suchen der positiven Maxima in der Gradientenkurve.



- 3) Es wird geprüft, ob der gefundene maximale Gradient ein Minimalwert überschreitet.
 - a. Maximaler Gradient > Minimalwert:

Kante wurde gefunden, Sollwert für die Temperatur (T_{Soll}) entspricht der dem Peak entsprechenden Temperatur abzüglich einer Sicherheitsmarge.
 - b. Maximaler Gradient < Minimalwert:

Es wurde keine Kante gefunden, Sollwert für die Temperatur (T_{Soll}) entspricht der höchsten bisher gemessenen Temperatur.
- 4) Abweichung zu Sollwert ist Wert.
- 5) Um zu verhindern, dass der Ofen unnötig bei zu hohem CO betrieben wird, sind verschiedene Sicherheitsabfragen integriert:
 - a. Es wird geprüft, ob ein starker CO-Anstieg vorliegt bei gleichzeitigem Anstieg der Abgastemperatur:
 - i. CO Anstieg > maximal zulässiger CO-Anstieg

Die Klappe wird schrittweise geöffnet, bis der CO-Anstieg gebremst ist.
 - ii. CO Anstieg < maximal zulässiger CO-Anstieg

Weiter mit der nächsten Sicherheitsabfrage
 - b. Es wird geprüft, ob die Istwert-Temperatur eine maximal zulässige Abweichung von der Solltemperatur überschreitet,
 - i. Sollwertabweichung > maximal zulässige Abweichung

Es wird angenommen, dass die hinterlegte CO-Temperatur Kurve nicht mehr dem aktuellen Zustand des Ofens widerspiegelt, deshalb werden alle gespeicherten Werte der CO/Abgastemperatur-Matrix bis auf die letzten zwei Minuten gelöscht.
 - ii. Sollwertabweichung < maximal zulässige Abweichung

Weiter zum PDI-Regler Nr. 6).
- 6) Der PDI gibt den Stellwert für die Sekundärluftklappe aufgrund des geprüften Sollwertes aus.
- 7) Um zu verhindern, dass der PDI Regler versucht, Sollwerte ausserhalb des Betriebsfensters des Ofens zu erreichen und die Sekundärluftklappe entweder konstant auf der Maximal- oder Minimalstellung laufen lässt, wird die Betriebszeit mit Maximal- oder Minimalstellung überwacht.
 - a. Betrieb mit Min/Max-Position Klappe > maximal zulässige Dauer

Es wird angenommen, dass die hinterlegte CO-Temperatur Kurve nicht mehr dem aktuellen Zustand des Ofens widerspiegelt, deshalb werden alle gespeicherten Werte der CO/Abgastemperatur-Matrix bis auf die letzten zwei Minuten gelöscht.
 - b. Betrieb mit Min/Max-Position Klappe < maximal zulässige Dauer.

Stellwertvorgaben für die Klappenposition gemäss PDI-Regler
- 8) Micro Pellet Stove (Regelstrecke):



- a. Die CO-Emissionen und die Abgastemperatur stellen sich ein aufgrund der Brennstoffzufuhr (nicht geregelt), Abgasventilatorzahl (nicht geregelt) und der Sekundärluftklappenstellung (geregelt).
- b. Weiter werden die Emissionen und die Abgastemperatur durch Störgrößen beeinflusst wie zum Beispiel die Betriebsdauer, die Brennstoffqualität, der Falschlufanteil oder die Verschmutzung.

9) Sensoren:

- a. Die Abgastemperatur wird mit einem Thermoelement am Austritt der Brennkammer gemessen.
- b. Die CO-Emissionen werden gemessen mit dem LHyCon_CarboSen LH-64-7 von Lamtec. Der Sensor neigt zu einer Drift über die Zeit, weshalb nur die Änderungen des Signals für die Temperatursollwertfindung verwendet werden.

5.1.5 PDI-Regler

Zur Regelung wird der sogenannte PDI-Regler (6) verwendet. Da die Regelstrecke des Micro Pellet Stove ein komplexes Zeitverhalten aufweist, hat sich der PDI-Regler besser bewährt, weil mit dem D-Anteil das Stellsignal frühzeitig reduziert.

Abbildung 30 und Tabelle 5 zeigen den Unterschied eines herkömmlichen PID-Reglers im Vergleich zu einem PDI-Regler. Der PDI-Regler besteht wie der herkömmliche PID Regler aus einem P-Anteil (proportional), D-Anteil (differenzial) und einem I-Anteil (integral). Im Gegensatz zum PID-Regler, wo der I-Anteil nur durch den P-Anteil beeinflusst wird, beeinflusst beim PDI Regler sowohl der P- wie auch der D-Anteil den I-Anteil. Für die Berechnung des D-Anteils wird die Änderung des Istwertes und nicht der Regelabweichung genommen, da der Sollwert ständig angepasst wird.

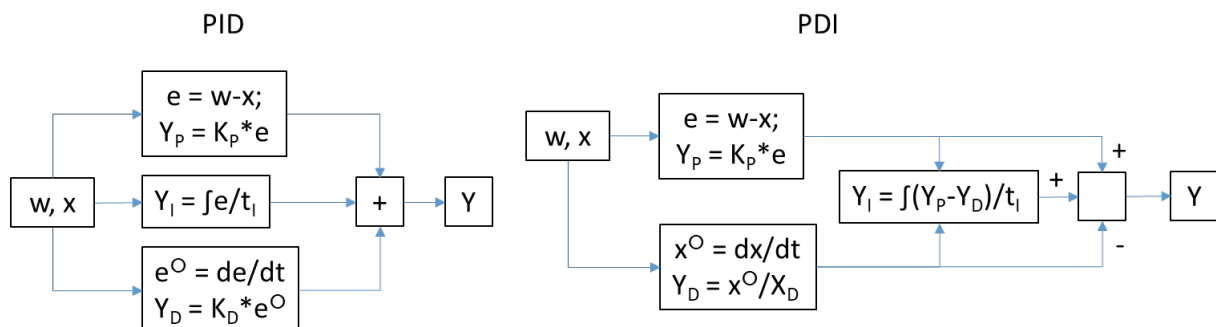


Abbildung 30: Flussdiagramm eines PDI-Reglers im Vergleich zu einem PID-Regler

PID	PDI
$Y = Y_P + Y_I + Y_D$	$Y = Y_P' - Y_D' + Y_I'$
$Y = K_P * e + \frac{1}{T_I} \int e dt + T_D \frac{de}{dt}$	$Y = \frac{1}{X_P} * e - \frac{1}{X_D} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{X_I} \int (Y_P - Y_D) dt$

Tabelle 5: Vergleich des PID- und PDI-Reglers, rote Einfärbung= Abweichung des PDI- vom PID Regler, Quelle PID Regler: (LTAM)



Formelzeichen	Beschreibung
x	Istwert
w	Sollwert
$e = w - x$	Abweichung e zwischen Soll- w und Istwert x
$Y_P = e / X_P$	P-Anteil ist proportional zur Abweichung
$Y_D = dx / X_D$	D-Anteil ist proportional zum Gradienten der Regelgrösse x (z.B. steigende oder fallende Temperatur) und nicht zur Regelabweichung wie beim herkömmlichen PID-Regler. Durch die Verwendung der Änderung des Istwertes zur Bildung des D-Anteils und durch die Subtraktion des D-Anteils bei der Bildung des Ausgangssignals, wird das Ausgangssignal reduziert bei stark ansteigendem Ist-Wert und ein Überspringen verhindert.
$Y_I = Y_P + (Y_P - Y_D) / X_I$	I-Anteil wird aus dem P-Anteil und dem D-Anteil ermittelt. Wobei ein starker Anstieg der Temperatur (grosser D-Anteil) den I-Anteil reduziert und so einem Überspringen entgegenwirkt.
$Y = Y_P - Y_D + Y_I$	Ausgangssignal
$dx (dT)$	Änderung des Istwertes (z.B. Temperatur)
K_P	Verstärkungsfaktor P-Anteil im PID Regler (ist gleich 1/P-Band im PDI-Regler).
T_D	Verstärkung D-Anteil im PID Regler
T_I	Integrationskonstante im PID Regler
X_P	Proportionalband im PDI Regler. Eine Abweichung $e = X_P$ führt zu 100% Stellsignal.
$X_D = dx_{max}$	Differenzialband im PDI-Regler. Den maximalen Gradienten dx_{max} erhält man, wenn der Bedarf und die erzeugte Energie maximal auseinanderliegen.
X_I	Integrationszeitkonstante: nach dieser Zeit wird 63% der Abweichung aufkumuliert.

Tabelle 6: Symbolverzeichnis für den PDI und PID Regler

5.2 Resultate der NEO-Regelstrategie

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Resultate der Tests mit der NEO-Regelstrategie aufgezeigt.

5.2.1 Vergleich MPS mit Black-Box-Modell

Sowohl für die Simulation (Regelung des BBM) als auch für den realen MPS wurde der gleiche NEO-Regelalgorithmus eingesetzt, um so die Simulationsergebnisse mit den Messungen vergleichen zu können (Validierung des BBM).

In Abbildung 31 werden der Verlauf der Brennkammertemperatur und die CO-Emissionen beim Nennlastbetrieb von 4 kW dargestellt. Nach etwa 50 Minuten Betrieb ist der Ofen aufgeheizt und es ist ein stabiler Betriebspunkt erreicht. Die Brennkammertemperatur schwankt immer noch, aber steigt im Mittel nicht mehr an. Für die nächsten 90 min werden Mittelwerte und deren Standardabweichungen ermittelt (siehe Tabelle 5), welche dazu verwendet werden, das BBM zu validieren.

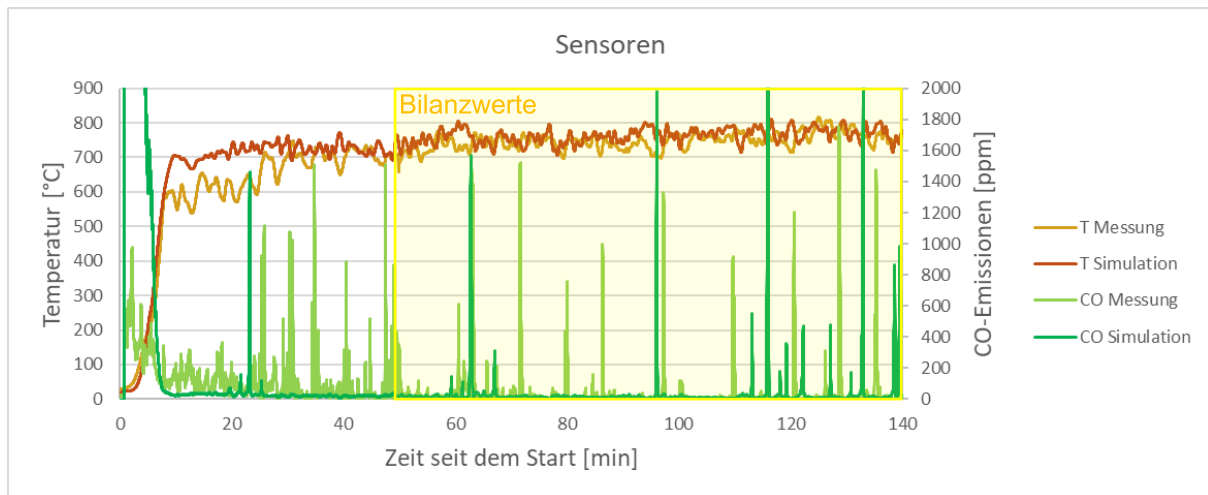


Abbildung 31: Sensorsignale von einer Messung und dem Blackbox Modell während dem Start und im konstanten Betrieb (gelber Bereich)

Sekundärluftklappe

Die Sekundärluftklappe (blau) hat im Mittel eine vergleichbare Position und wird auch etwa gleich stark angesteuert (vergleichbare Standardabweichung).

Luftverteilung

- Die Primärluftzufuhr von BBM und Messung stimmen sehr gut überein.
- Bzgl. Sekundärluftzufuhr weisen BBM und Messung eine grosse Abweichung von durchschnittlich 0.63 g/s auf. Grund:
Beim Ofen wird aufgrund des Unterdruckes Falschlufft angesaugt über kleine Leckagen. Diese Falschlufft muss im Modell berücksichtigt werden, um den Einfluss des Regelalgorithmus korrekt darzustellen. Deshalb wird der Falschluffanteil im Modell bei der Sekundärluft dazugerechnet.
- Bei der Abgasluftmenge ist der Unterschied mit 0.22 g/s (8%) wiederum geringer als der Unterschied der Sekundärluft.

CO und Brennkammertemperatur

Die absoluten Werte für den CO-Gehalt im Abgas (grün) und Brennkammertemperatur (rot) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität.

Für die Bewertung des Modells sind aber die Standardabweichungen besonders relevant, weil die Regelung auf die Änderungen der Regelgrösse fokussiert.

Die CO-Peaks sind im Modell etwas höher als in Realität (Abbildung 31), was auch an der höheren Standardabweichung ersichtlich ist. Das BBM reagiert offenbar sensibler auf den Regelalgorithmus bzgl. CO-Emissionen.



	Einh eit	Mittelwerte			Standardabweichung		
		Messung	BBM	Δ relativ	Messung	BBM	Δ
Sekundärluft klappe	%	55.1	57.7	5%	11.7	12.2	0.5
Luftverteilung							
Primärluft	g/s	0.448	0.447	-0.2%	0.014	0.005	0.009
Sekundärluft	g/s	1.55	2.18*	29%	0.13	0.17*	0.04
Abgas	g/s	2.65	2.87	8%	0.14	0.25	0.11
Abgaszusammensetzung							
CO ₂	%	11.9	9.6	-24%	1.06	0.93	0.13
O ₂	%	7.83	8.33	6%	1.27	1.19	0.08
CO	ppm	44.8	46.8	4%	179	257	82
Temperatursensor							
Brennkammer	°C	748	763		23.4	21.7	1.7

Tabelle 7: Vergleich vom Black Box Modell mit einer Messung bei 4kW im konstanten Betrieb (*Sekundärluft im BBM wird zusammen mit dem Falschlufanteil betrachtet)

Mit der Erfassung der Mittelwerte und Standardabweichung der Brennkammertemperatur lässt sich etwas über die absoluten Werte und die Amplituden der Schwankungen aussagen. Genauso wichtig für die Entwicklung eines Reglers ist jedoch die korrekte Wiedergabe des transienten Systemverhaltens. Ein Mass für dieses Systemverhalten sind die Frequenzen, mit der die einzelnen Parameter während des Betriebs schwingen. Abbildung 32 zeigt die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Abgastemperatur.

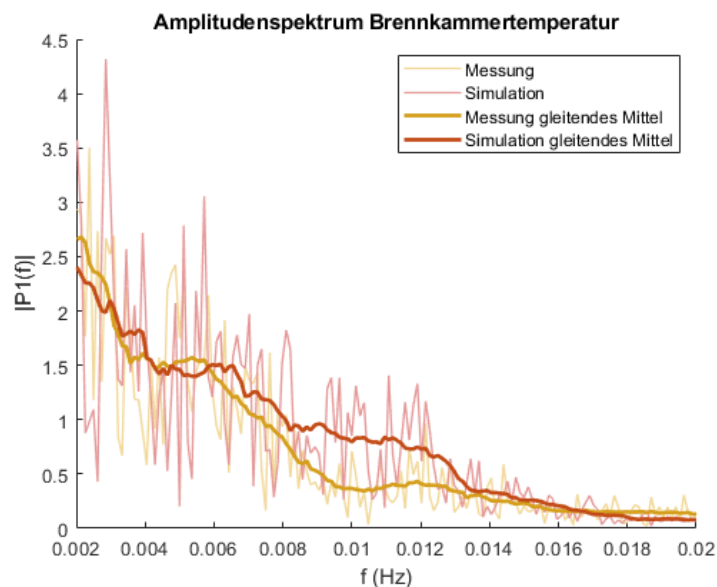


Abbildung 32: FFT Amplitudenspektrum im Vergleich von Black Box Modell und Simulation



Die Temperatursignale in der Brennkammer werden mit einer Frequenz von 1 Hz abgetastet. Anschliessend wird mittels FFT (Fast Fourier Transformation) ein Spektrum erstellt, welches die Frequenzen von 0.002 bis 0.02 Hz abdeckt. In Abbildung 32 werden diese Frequenzspektren und die dazugehörigen gleitenden Mittelwerte für Messung und Simulation dargestellt. Anhand der gleitenden Mittelwerte (dicke Linien) ist ersichtlich, dass das BBM und die Messung am Ofen vergleichbare Frequenzen aufweisen.

5.2.2 Vergleich von Regelstrategien unter gleichen Bedingungen

In Tabelle 6 werden die Mittelwerte der NEO-Regelstrategie mit einer älteren Regelstrategie (dritte Regelstrategie, Kap. 5.1.3) verglichen. Da es für die dritte Regelstrategie keine Messdaten mit dem MPS VA2 gibt, werden ältere Messwerte vom MPS VA1 als Vergleich verwendet.

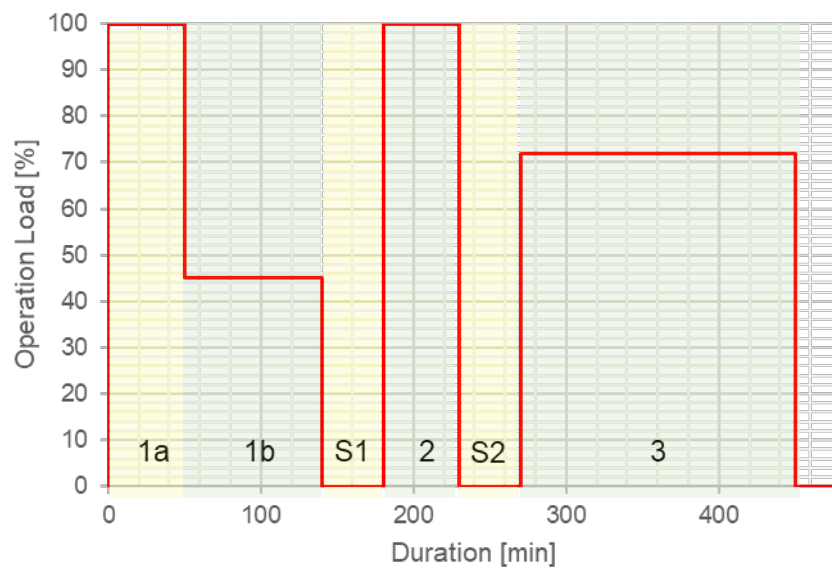
	NEO-Regelstrategie		Dritte Regelstrategie		Einheit
Ofen	MPS VA2		MPS VA1		
Leistung	4	2	4	2	kW
CO @13% O ₂	66	130	14	45	mg/m ³ _N
NO @13% O ₂	120	97	103	79	mg/m ³ _N
O ₂	8.0	8.9	9.8	9.6	Vol %
T BK	765	578	753	612	°C
T Norm	114	48	132	58	°C
Wirkungsgrad	93.4	98.0	91.0	97.1	%

Tabelle 8: Reglertest, Resultate gemittelt bei 4 kW und 2 kW Ofenleistung

Der Sauerstoffgehalt im Abgas sinkt mit der NEO-Regelstrategie, da die Sekundärluftzufuhr näher an der CO-Kante mit Sauerstoffarmut betrieben wird. Dies hat einen höheren CO-Gehalt zur Folge, welcher jedoch immer noch dem Projektziel von 130 mg/m³_N entspricht. Im Gegenzug werden dafür mit der NEO-Regelstrategie höhere Wirkungsgrade sowohl bei 4 kW als auch bei 2 kW erzielt.

5.2.3 beReal-Lastzyklentest

Um das Betriebsverhalten der NEO-Regelstrategie zu testen, wurde sie nach den Vorgaben des beReal (7) Lastzyklentest getestet. Der beReal-Lastzyklentest wurde im Rahmen eines Vorgängerprojekts durch ein europäisches Konsortium entwickelt, mit dem Ziel das reale Nutzerverhalten in einem standardisierten Lastzyklus abbilden zu können. In Abbildung 33 ist der Ablauf des Lastzyklus nach beReal dargestellt. Der Lastzyklus besteht aus Sequenzen mit Nennlastbetrieb (1a und 2), mit minimaler Leistung (1b) und mit einer mittleren Leistung (3). Dazwischen sind noch zwei Sequenzen eingebaut, an denen der Ofen nicht betrieben wird (S1 und S2)



	Operation	Load Level	Duration
1a	Cold start	Full load	50 min
1b	Load change	Part load 45%	90 min
S1	Stand by	0 %	40 min
2	Warm start	Full load	50 min
S2	Stand by	0 %	40 min
3	Warm start	Part load 72%	180 min

Abbildung 33: Verlauf des beReal-Lastzyklus, Quelle: (7)



Abbildung 34 zeigt eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf der Messdaten, während dem beReal-Test mit der aktiven NEO-Regelstrategie.

Im oberen Diagramm sind der Sauerstoffgehalt (Blau), und die Abgastemperatur am Brennkammeraustritt (Rot) dargestellt. Die Sollwerttemperatur (Magenta) wurde durch die (in Kapitel 5.1 beschriebene) NEO-Regelstrategie vorgegeben.

Im unteren Diagramm wird die Klappenöffnung (Rot) und der CO-Gehalt (Türkis) im Abgas dargestellt. Die Sekundärluftklappenposition wird über einen Schrittmotor angesteuert mit 250 Schritten zwischen 0% und 100% Klappenöffnung. Für den Betrieb wird der regelbare Bereich der Klappe aber zwischen 90 Schritten (36%) und 190 Schritten (76%) eingeschränkt. Die CO-Emissionen werden vom Lamtec-Sensor für die Regelung erfasst und mit dem MRU-Messgerät (Blau) als Referenzgerät zur Überprüfung des Betriebszustands erfasst.

Generell treten unmittelbar nach einem Start oder Lastwechsel höhere CO-Emissionen auf, welche sich im Verlauf eines konstanten Betriebs reduzieren, da die Regelung sich automatisch an die neuen Betriebsbedingungen anpasst und eine optimale Klappenstellung findet.

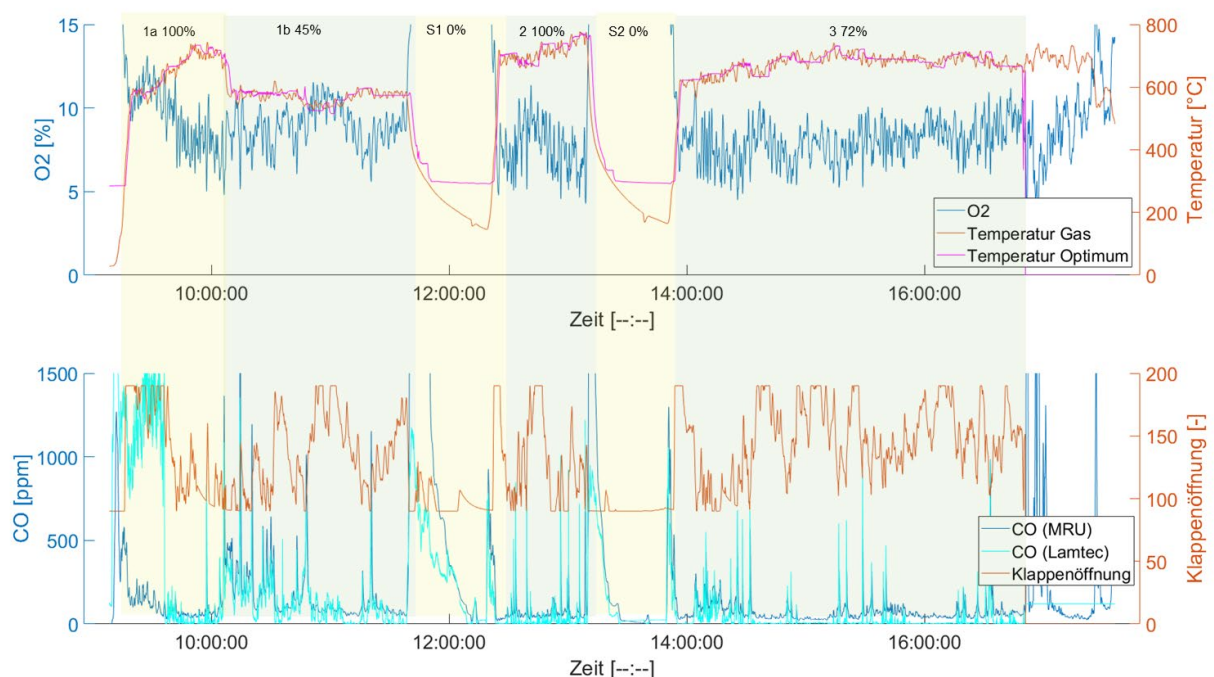


Abbildung 34: Übersicht Messung beReal

In Abbildung 35 ist der Ausschnitt 3 mit 72% Leistung (2.9 kW) dargestellt. Um 14:30 sinken die CO-Emissionen und bleiben für die nächsten 45 min tief. Die Abgastemperatur am Brennkammeraustritt wird durch das Ansteuern der Sekundärluftklappe auf den optimalen Wert geregelt. Der Regler hat eine sogenannte CO-Kante (starker Anstieg der CO-Konzentration aufgrund Sauerstoffmangels) gefunden. Um 15:15 können weitere CO-Peaks erkannt werden. Diese entstehen, weil die alten Werte, welche über eine halbe Stunde zurückliegen, gelöscht werden und der Regler für kurze Zeit keine Kante mehr findet. Dadurch wird die optimale Temperatur auf die höchste gemessene Temperatur der letzten halben Stunde erhöht. Der PDI-Regler reagiert auf die Abweichung zum neuen höheren Sollwert für die Abgastemperatur und beginnt die Sekundärluftklappe zu schliessen. Dies resultiert in einem geringen Restsauerstoffgehalt, welcher wiederum zu erhöhten CO-Emissionen



führt. Der Regler hat um 15:40 eine neue CO-Kante gefunden und passt den Sollwert für die Abgastemperatur wieder an.

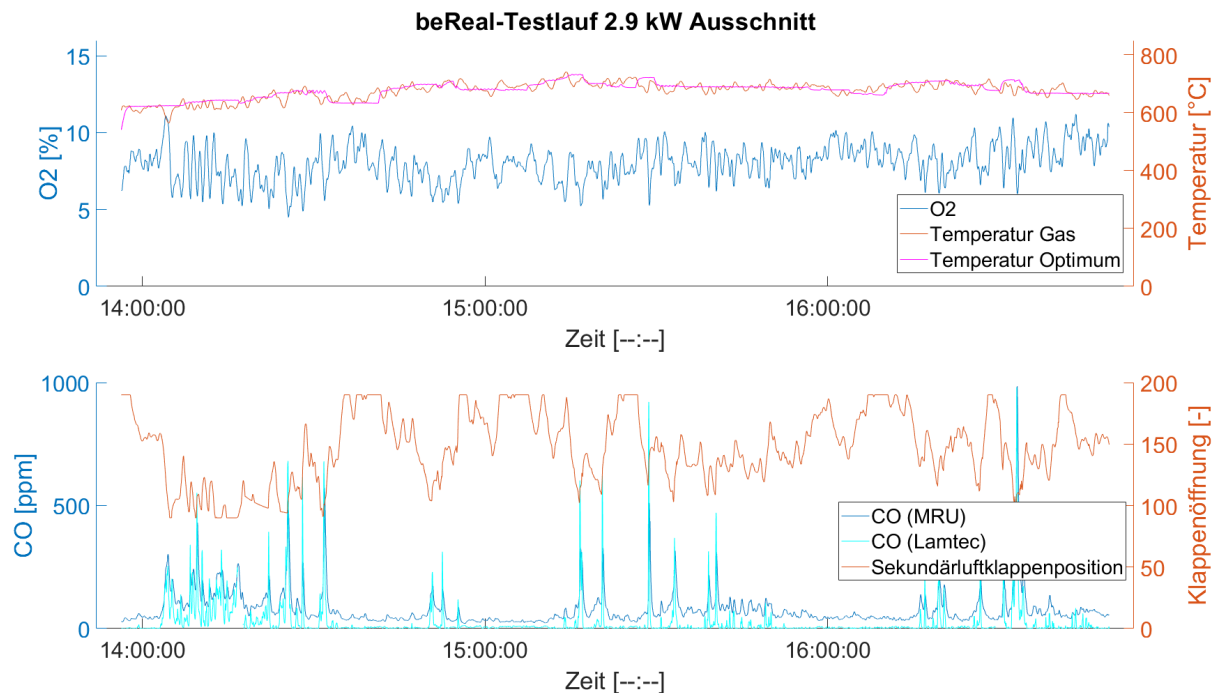


Abbildung 35: beReal Messung Ausschnitt 2.6 kW

Leistung [kW]	Sauerstoffgehalt [Vol %]	Abgastemperatur Normmesstelle [°C]	Abgastemperatur Brennkammeraustritt [°C]	CO @13% O ₂ [mg/m ³ _N]
1.8 (45% Sequenz 1b)	8.9	59	569	149
2.9 (72 % Sequenz 3)	8.0	78	675	61
4 (100 % Sequenz 2)	7.6	80	712	59

Tabelle 9: Auswertung Sequenzen beReal Lastzyklentest

Bei 4 kW Leistung (Sequenz 2) betragen die CO-Emissionen durchschnittlich 59 mg/m³_N, bei 2.9 kW (Sequenz 3) betragen sie 61 mg/m³_N und liegen somit beide unterhalb des Projektziels von 130 mg/m³_N. Bei einer Leistung von 1.8 kW (Sequenz 1b) wird die Regelung des MPS zunehmend schwierig, da das Betriebsfenster stark eingeengt ist. Nach ca. 1 h ist es der Regelung gelungen, einen stabilen Betriebspunkt zu finden. Über die gesamte Betriebsdauer mit 45% Leistung lagen die Emissionen bei 148.7mg/m³_N @13% O₂. Dieser Wert ist leicht über dem Projektziel von 130 mg/m³_N, welches jedoch nur für Nennwärmeleistung im stabilen Betrieb definiert wurde, ohne das Einregeln auf den Betriebspunkt. Wäre der Ofen in der Sequenz 1b länger betrieben worden, wären die gemittelten Emissionen weiter gesunken.



5.2.4 Vergleich der Messungen mit BIOS

An der FHNW und bei BIOS in Graz wurde ein MPS-Ofen jeweils mit der NEO-Regelstrategie getestet. Dazu wurde der MPS an beiden Standorten konstant bei 4 kW und bei 1.8 kW betrieben.

	BIOS	FHNW
	Sauerstoffgehalt [Vol %]	
45 % Leistung (1.8 kW)	9.0	10.7
100 % Leistung (4 kW)	7.0	7.8
	Abgastemperatur Normmesstelle [°C]	
45 % Leistung (1.8 kW)	74	53
100 % Leistung (4 kW)	91	103
	Abgastemperatur am Brennkammeraustritt [°C]	
45 % Leistung (1.8 kW)	557	539
100 % Leistung (4 kW)	769	748
	CO @13% O ₂ [mg/m ³ N]	
45 % Leistung (1.8 kW)	61	105
100 % Leistung (4 kW)	12	55

Tabelle 10: Resultate des Vergleichs zwischen BIOS und der FHNW jeweils mit der NEO-Regelstrategie

Die Resultate sind in Tabelle 8 dargestellt. Beide Öfen zeigen ein ähnliches Verhalten. Der O₂-Anteil im Abgas wurde durch die Regelung in beiden Fällen erhöht bei geringerer Leistung. Der MPS, der bei BIOS betrieben wurde, hatte einen tieferen Falschlufanteil als der MPS an der FHNW. Dies kann die unterschiedlichen O₂-und CO-Gehalte erklären.

5.2.1 Vergleich Pellets mit unterschiedlicher Qualität

An der FHNW werden die herkömmlich verwendeten Pellets von Energie 360° mit Plospan Pellets verglichen um zu prüfen wie die neue Regelstrategie auf unterschiedliche Pelletqualitäten reagiert. Die Pellets sind in Abbildung 36 abgebildet. Die Pellets von Energie 360° erfüllen die Eigenschaftsklasse A1 gemäss EN ISO 17225-2. Die Plospan Pellets erfüllen die meisten Bedingungen nur knapp und sind beim Aschegehalt sogar leicht zu hoch (siehe Tabelle 9).



Abbildung 36: Pellets Energie 360° (A), und Plospan (B)



	Einheit	EN ISO 17225-2 (Eigenschaftsklasse A2)	Pellets Plospan
Wassergehalt	Gew%*	≤ 10	9.5
Heizwert	MJ/kg*	≥ 16.5	17.0
Aschegehalt	Gew%**	≤ 0.7	0.71
N	Gew%**	≤ 0.3	0.21
S	mg/kg**	≤ 400	128
Cl	mg/kg**	≤ 200	113
Zn	mg/kg**	≤ 100	18

Tabelle 11: Plospan Pellets im Vergleich zur Norm EN ISO 17225-2 (* bezogen auf Gesamtmasse, ** bezogen auf Trockensubstanz)

In einem Testlauf bei 4 kW Nennlast werden die beiden Pelletsorten miteinander verglichen. Die Resultate sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Die NEO-Regelstrategie erreicht mit beiden Pellets vergleichbare CO-Emissionen und Wirkungsgrade. Nur der NO-Anteil ist bei den Plospan Pellets doppelt so hoch, was aber mit dem mutmasslich höheren Stickstoffanteil erklärt werden kann.

	Einheit	Pellets Energie 360°	Pellets Plospan
Leistung	kW	4	4
CO @13% O2	mg/m3N	66	86
NO @13% O2	mg/m3N	120	243
O2	Vol %	8.0	7.0
T BK	°C	765	761
T Norm	°C	114	113
Wirkungsgrad	%	93.4	93.8

Tabelle 12: Pellets Energie 360° im Vergleich zu Plospan Pellets bei 4 kW



5.2.2 Auswirkung auf die Verbrennung bei einem Störeinfluss

Die NEO-Regelstrategie soll unabhängig von äusseren Störeinflüssen den optimalen Betriebspunkt finden. Um einen solchen Störeinfluss zu simulieren, wird die Gebläsedrehzahl während laufendem Regelbetrieb erhöht. Abbildung 37 zeigt den Verlauf bei 4 kW Nennlast 50 min vor und 50 min nach einer Erhöhung der Saugzuggebläsedrehzahl um 400 rpm. In Tabelle 11 sind die dazugehörigen Mittelwerte dargestellt.

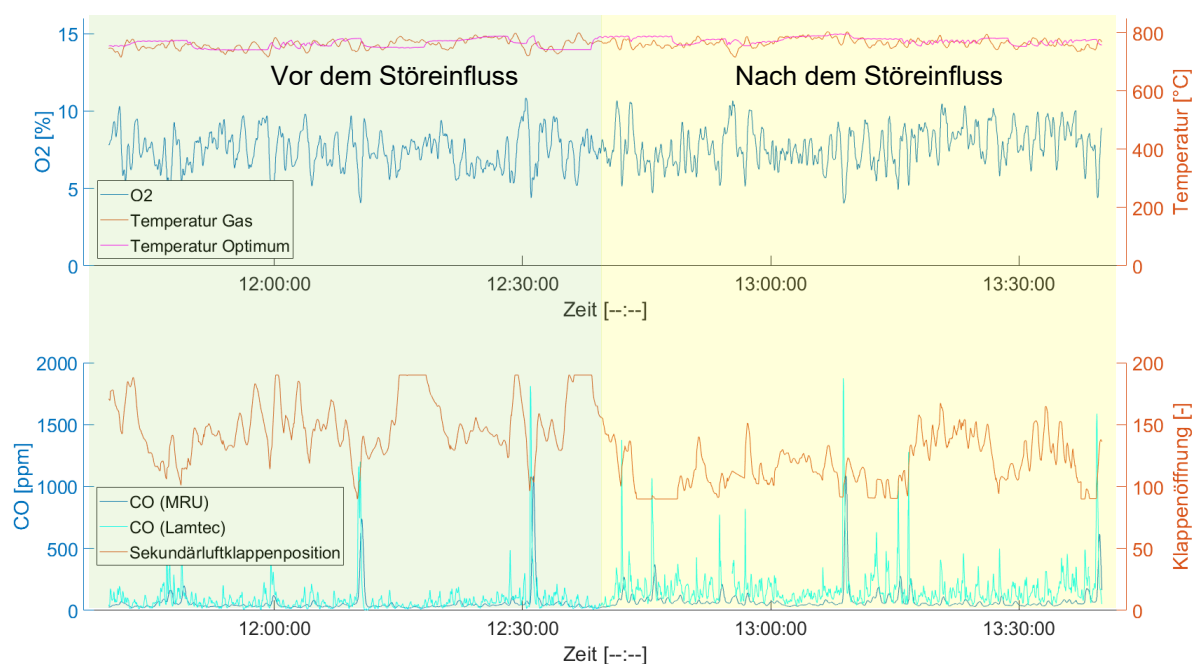


Abbildung 37: Off-Condition bei 4 kW

	Einheit	Vor dem Störeinfluss	Nach dem Störeinfluss
Saugzuggebläse	rpm	1900	2300
Leistung	kW	4	4
Klappenposition	-	150	117
x O₂	Vol %	7.5	7.7
T BK	°C	759	765
T Norm	°C	119	125
Wirkungsgrad	%	93.2	92.6
CO @13% O₂	mg/m ³ _N	41.9	60.6

Tabelle 13: Durchschnittswerte vor der Erhöhung vom Saugzuggebläse und danach

Der Regler kompensiert den zusätzlich geförderten Sauerstoff, indem er die Sekundärluftklappenöffnung erheblich reduziert (siehe Tabelle 11). Die geförderte Sekundärluftmenge ändert sich dadurch nicht und somit bleiben alle anderen Messgrößen nach dem Störeinfluss gleich. Nur die CO-Emissionen erhöhen sich leicht, da der Regler nach dem Störeinfluss wieder nach einem neuen Optimum suchen muss.



5.3 Resultate Raummodell

Die Simulation wird für 20 Tage ausgeführt für Jahresenergiebedarfe von 2 MWh/a, 5 MWh/a und 8 MWh/a für 100 m². Dabei wird in den Resultaten jeweils der 20. Tag dargestellt. Die Ofenleistung beträgt minimal 1.3 kW und maximal 4 kW. Die Raumtemperatur soll von 06:00-08:00 und 17:00-22:00 auf 20 °C gehalten werden, was gut gelingt mit einer maximalen Abweichung von 0.5 K. Das Hoch- und Herunterfahren des Ofens benötigt jeweils etwa 1 h. Aus Abbildung 38 wird ersichtlich, wie sich der Einschaltzeitpunkt nach vorne verschiebt bei einer Erhöhung von 2 MWh/a über 5 MWh/a zu 8 MWh/a. Zudem läuft der Ofen bei höheren Raumwärmebedarfen oft nahe an der Nennlast von 4 kW, was einen positiven Effekt auf die CO-Emissionen hat. Während der Tag-, Nachtabenkung sinkt die Temperatur etwa auf 18 °C.

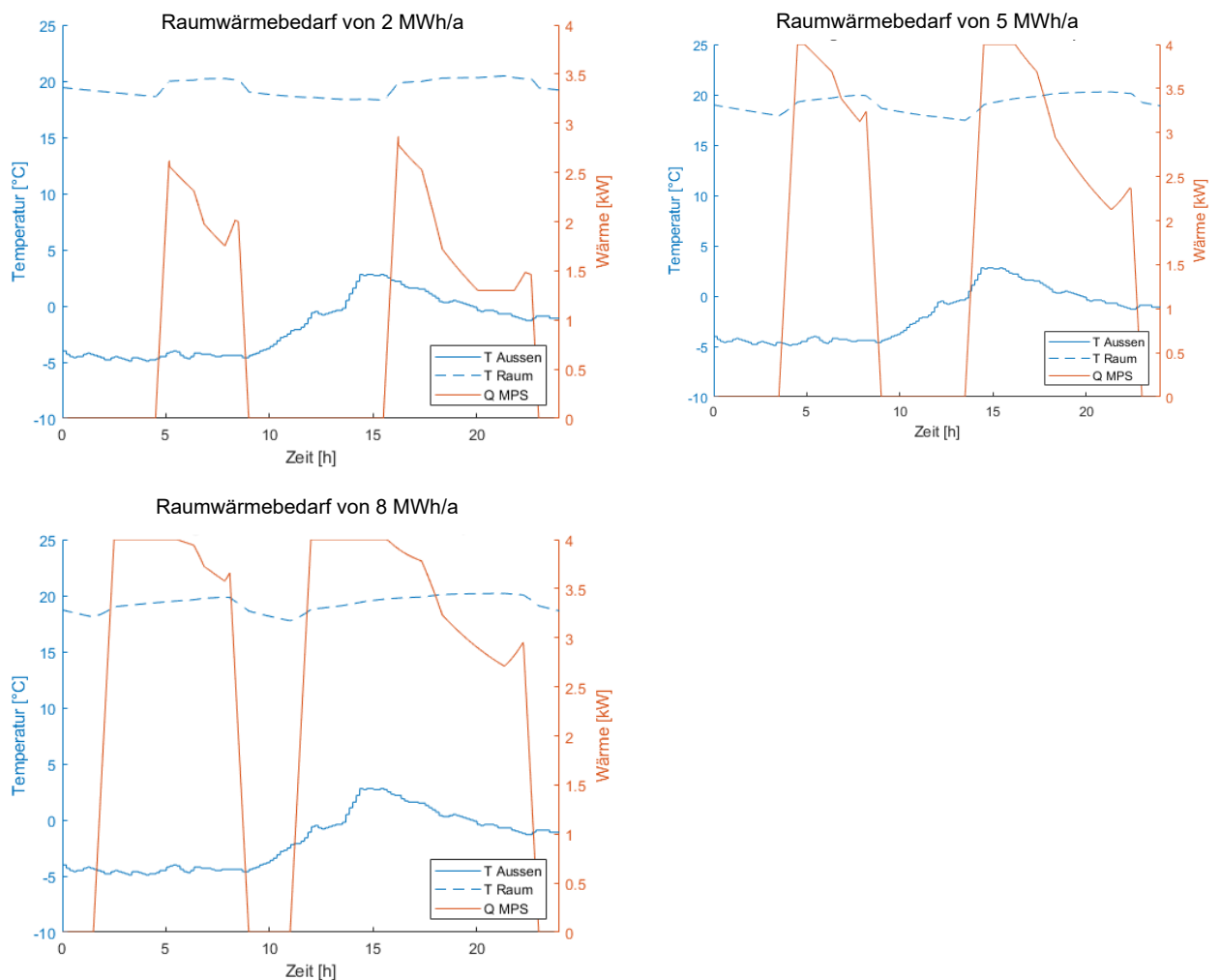


Abbildung 38: Simulation der Heizleistung von einem Wintertag (24 h) mit einer durchschnittlichen Aussentemperatur von -1.8 °C bei Raumwärmebedarfen von 2 MWh/a, 5 MWh/a und 8 MWh/a



Während den Übergangszeiten im Oktober und im April läuft die Heizung nur teilweise, was für die Temperaturregelung eine Herausforderung darstellt. Dieser Übergangszeitraum wird für die ersten 20 Tage im Oktober in Abbildung 39 dargestellt. Der Regler kann diese Temperaturschwankungen gut meistern mit einer maximalen Abweichung der Raumtemperatur zur Sollwerttemperatur von 2 K.

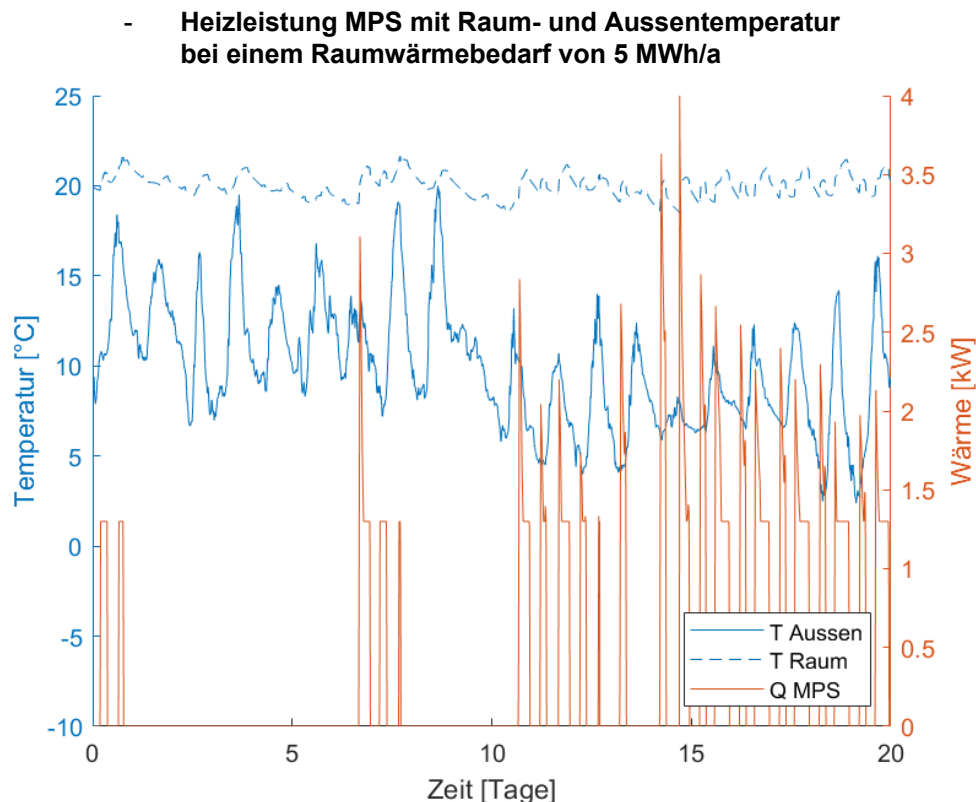


Abbildung 39: Simulation der Heizleistung von 20 aufeinanderfolgenden Wintertagen während der Übergangszeit im Oktober bei einem Raumwärmebedarf von 5 MWh/a, einer Raumsolltemperatur von 22 °C und mit Tagnachtabenkung

Um eine Extremsituation zu simulieren, wurde eine starke Frostperiode (Februar 2012) und eine Raumsolltemperatur von 22 °C angenommen. Die Resultate sind in Abbildung dargestellt. Die benötigte Heizleistung kann bei einem Raumwärmebedarf von 8 MWh/a vom MPS nicht mehr bereitgestellt werden. Die Raumtemperatur sinkt auf unter 20 °C. Für eine Wohnung mit einem geringeren Raumwärmebedarf von 5 MWh/a kann auch diese Frostperiode mit dem MPS überbrückt werden.

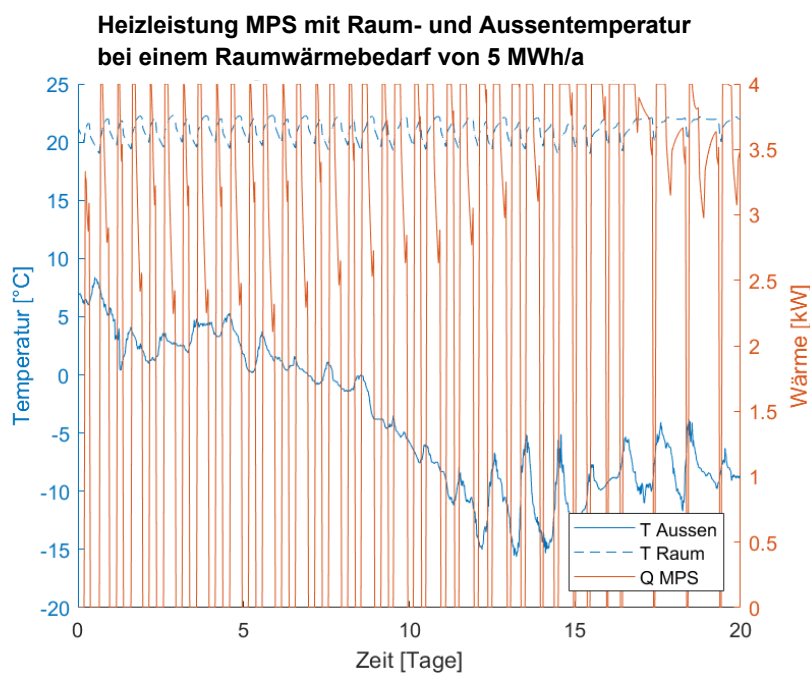
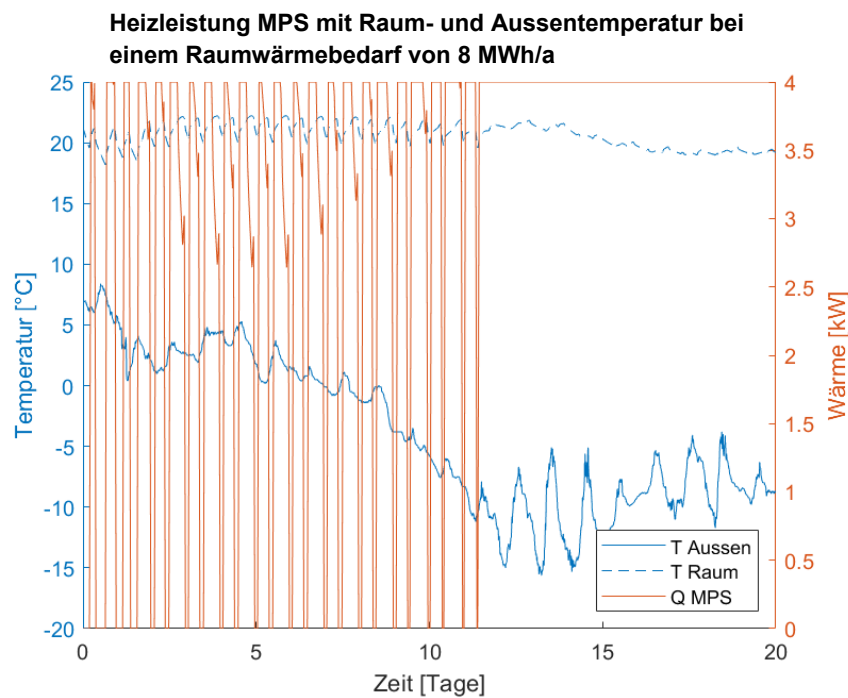


Abbildung 40: Simulation der Heizleistung von 20 aufeinanderfolgenden Wintertagen, mit einer ausgeprägten Frostperiode (Februar 2012) bei einem Raumwärmebedarf von 5 MWh/a und 8 MWh/a, mit einer Raumsolltemperatur von 22 °C

Aufgrund der Möglichkeit von starken Frostperioden, wie im Februar 2012, kann der MPS als alleinige Heizquelle den Wärmebedarf für eine Wohnung mit einem Raumwärmebedarf von 8 MWh/a nicht immer decken und gelangt an seine Grenze. Ansonsten deckt der MPS ein breites Spektrum an



Raumwärmebedarfen ab. Für die Übergangszeiten und einen geringen Raumwärmebedarf von 2 MWh/a kann der MPS mittels Tag- und Nachtabstaltung die Temperatur halten, läuft jedoch Minimalleistung und somit mit erhöhten CO-Emissionen. Deshalb ist der Ofen für einen Raumwärmebedarf von 5 MWh/a am besten geeignet.

6 Schlussfolgerungen und Fazit

Der Micro Pellet Stove hat gezeigt, dass es möglich ist auch Pelletöfen mit einer Nennwärmeleistung von nur 4 kW emissionsarm betreiben zu können. Der Einsatz eines CO-Sensors ermöglicht es, die Verbrennungsqualität direkt zu beurteilen und den Ofen immer in einem Bereich mit tiefen CO-Emissionen zu betreiben. Zusammen mit einem Temperaturfühler in der Brennkammer bildet der CO-Sensor die Basis für eine optimale Verbrennungsregelung mit einem hohen Wirkungsgrad.

Der neu entwickelte LHyCon_CarboSen misst die Änderungen des CO-Gehalts im Abgas zuverlässig. Bei einer Leistung von weniger als 1.8 kW werden oft CO-Emissionen von mehr als 1000 ppm registriert, dies führt zu Einbrüchen des Sensorsignals und erschwert eine robuste Regelung. Aus diesem Grund wurde die minimale Ofenleistung erhöht und auf 1.8 kW begrenzt. Zudem wird über einen längeren Zeitraum ein Driftverhalten des CO-Sensors beobachtet, aufgrund der Drifttoleranten Auslegung der Regelstrategie hatte dies keinen Einfluss auf die Regelgüte.

Für die effiziente Entwicklung von Regelstrategien wurde ein digitaler Zwilling des realen Ofens erstellt, das sogenannte Black-Box-Modell (BBM). Das BBM wurde in Matlab-Simulink programmiert, Die Ofensteuerung im realen Ofen wurde mit Lab-View programmiert. Über eine TCP/IP-Schnittstelle konnten, die in Lab View programmierten Regler direkt im BBM getestet werden. Durch den Einsatz des BBM konnte die Regelstrategieentwicklung effizienter gemacht werden, dank der 10-mal schnelleren Simulation, verglichen mit Messungen in realem Betrieb.

Die CO-Emissionen eignen sich nicht direkt als Regelgrösse für die Sekundärluftregelung, da der Verlauf der CO-Emissionen über den Restsauerstoffgehalt nicht stetig verläuft. Deshalb verwendet die, im Rahmen dieses Projekts entwickelte, NEO-Regelstrategie die Abgastemperatur als Regelgrösse und die CO-Messung wird für die Sollwertfindung eingesetzt. So ist der Regler in der Lage, den optimalen Betriebspunkt selbstständig zu finden, unabhängig von der Leistung oder anderen Störgrössen wie z.B. der Brennstoffqualität, dem Falschlufanteil oder von Verschmutzungen und einen sauberen und energieeffizienten Betrieb gewährleisten.

7 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Firma Rika Ofentechnik GmbH plant den Micro Pellet Stove in den nächsten drei Jahren auf den Markt zu bringen. Der LHyCon_CarboSen wird durch die Firma Lamtec weiterentwickelt, um die Signaldrift weiter minimieren zu können. Zusätzlich muss der neue Sensor in ein kostengünstiges Gehäuse integriert werden, um die Herstellungskosten weiter zu reduzieren und so auch für Low-Cost Anwendungen, wie den MPS, interessant zu werden.

Die Regelstrategie kann weiterentwickelt werden, indem Elemente aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz und maschinellem Lernen integriert werden, wie zum Beispiel neuronale Netzwerke oder selbstlernende Systeme.



8 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wird im Rahmen von ERA-NET Bioenergy durchgeführt. Als Projektpartner sind folgende Organisationen beteiligt:

- BIOS Bioenergiesysteme GmbH (Koordinator des Konsortiums)
- Fachhochschule Nordwestschweiz (Hochschulpartner)
- RIKA Innovative Ofentechnik GmbH (Industriepartner)
- LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG (Industriepartner)

9 Publikationen

Es ist geplant eine Veröffentlichung im Journal Energies über das Vorgehen bei der Entwicklung von Regelstrategien mithilfe von Modellen.

10 Literaturverzeichnis

1. **Hammer, Frank.** *Entwicklung eines miniaturisierten Festkörperelektrolytsensors aus der Raumfahrt zur Optimierung von Verbrennungsprozessen.* Stuttgart : VDI, 2002.
2. **Gölles, Markus.** *Grundlagen für die modellbasierte Regelung einer Biomasse-Feuerung.* Graz : Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften AG Co. KG , 2009.
3. **EBM-Papst.** Ventilatoren für Feststoffheizungen. 2011.
4. **Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau.** [Online] 28. 05 2020. [Zitat vom: 31. 08 2020.] <https://www.schweizer-fn.de/stroemung/widerstand/widerstand.php>.
5. **Gölles, Markus.** *Modellbasierte Regelung von Scheitholzkesseln mit Pufferspeicher.* Graz : s.n., 2018.
6. **Wüest, Josef.** *Selbstadaptiver PID-Regler.* EP 0 974 880 A1 Zug (CH), 26. 01 2000.
7. **Reichert, Gabriel, et al.** *Final Report: Definition of Suitable measurement method and advanced type testing procedure for real life conditions.* Graz : Bioenergy 2020+, 2016.