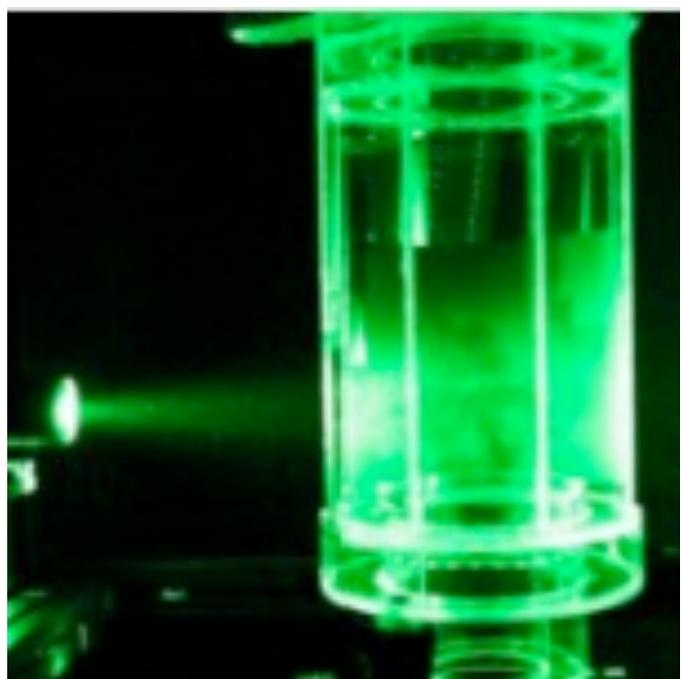
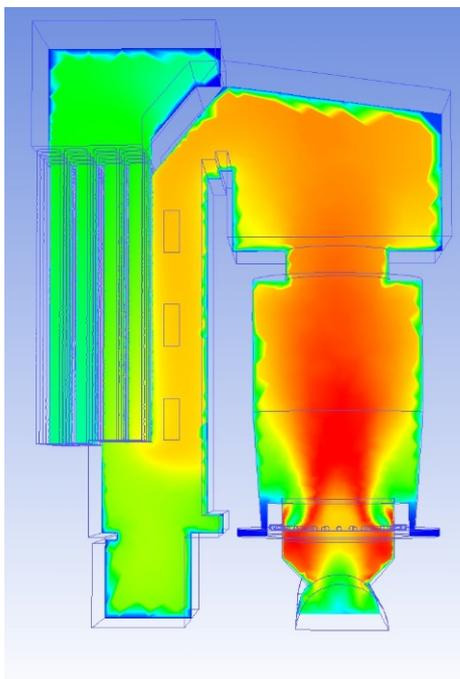




Schlussbericht vom 9. März 2020

ERANET: Schneckenrostfeuerung

Entwicklung einer Schneckenrostfeuerung von 100 kW
bis 300 kW – Scale up and development of screw burner
concept to small commercial scale (100 – 300 kW)



Links: CFD-Berechnungen der Temperaturverteilung in der Schneckenrostfeuerung.

Rechts: Mit Laser visualisiert Strömung im Modell der Schneckenrostfeuerung.





Datum: 9. März 2020

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Ko-Finanzierung:

Innosuisse – SCCER Biosweet, CH-3003 Bern, www.innosuisse.ch

Subventionsempfängerinnen:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, CH-6048 Horw, www.hslu.ch
Verenum, Langmauerstrasse 109, CH-8006 Zürich, www.verenum.ch

Autoren:

Prof. Dr. Thomas Nussbaumer, Hochschule Luzern, CH-6048 Horw und Verenum, CH-8006 Zürich
Dr. Gabriel Barroso, Hochschule Luzern, CH-6048 Horw (bis 31.03.2019)
Dr. Jürgen Good, Hochschule Luzern, CH-6048 Horw und Verenum, CH-8006 Zürich
Adrian Lauber, Verenum, CH-8006 Zürich
Dr. Peter Zotter, Verenum, CH-8006 Zürich

Mitarbeit:

Markus Ulrich, Schmid AG energy solutions, 8360 Eschlikon
Thomas Reiterer, Schmid energy solutions GmbH, 2871 Zöbern, Österreich

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Sandra Hermle, Bundesamt für Energie, CH-3003 Bern, sandra.hermle@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501346-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren verantwortlich



Zusammenfassung

Da die Qualität von Waldhackschnitzeln schwankt und zudem auch biogene Reststoffe aus der Landwirtschaft als Brennstoffe infrage kommen, besteht ein Interesse an Feuerungen für Brennstoffe mit erhöhtem Aschegehalt. Im Projekt wurde dazu ein Schneckenbrenner im Leistungsbereich von 100 kW bis 300 kW entwickelt, der eine gestufte Verbrennung mit niedrigen Temperaturen im Glutbett aufweist und dank kontinuierlicher Ascheaustragung Betriebsstörungen durch Ascheverschlackung verhindert.

Das Projekt erfolgte in einer Zusammenarbeit zwischen Institutionen aus Österreich, Schweden und der Schweiz im ERANET-Projekt «Advanced adjustable grate solutions for future fuel flexible biomass combustion technologies – GrateAdvance». Der schweizerische Teil umfasste ein Scale-up von 33 kW bzw. 35 kW auf 150 kW und die Realisierung einer 150 kW-Versuchsanlage. Zur Auslegung der Schnecken-geometrie erfolgte eine Modellierung der Feststoffumwandlung auf dem Rost. Daneben wurden die Brennkammer und die Luftzuführung mit numerischen und experimentellen Strömungsmethoden optimiert.

Anhand von Messungen der Partnerinstitution in Österreich an einer 35 kW-Prototypanlage wurden die Simulationsmodelle validiert und anschliessend für das Scale-up verwendet. Dabei wurde die Feuerung in drei Zonen unterteilt, in denen die jeweils entscheidende charakteristische Grösse identifiziert und für das Scale-up wie folgt konstant gehalten wurde:

1. in der Brennstoffkonversionszone wurde die thermische Rostflächenbelastung konstant gehalten,
2. in der Brennkammer die Gasverweilzeit und
3. für die Sekundärluftdüsen wurde das Impulsstromdichteverhältnis konstant eingestellt.

Messungen an der Prototypanlage mit 35 kW zeigen, dass die Schneckenrostfeuerung für unterschiedliche Biomassebrennstoffe geeignet ist und tiefe Emissionen an Kohlenmonoxid (CO), Staub und Stickoxiden (NO_x) erreichen kann. Mit Holzpellets wurden folgende Emissionswert sicher erreicht:

CO < 50 mg/m_n³, Staub < 30 mg/m_n³ und NO_x < 150 mg/m_n³ bei 13 Vol.-% O₂.

Daneben konnten auch landwirtschaftliche Brennstoffe mit Aschegehalten bis zu 7 Gew.-% verbrannt werden, wobei die Emissionen an Staub und Stickoxiden anstiegen. In einer Messreihe an der 150 kW-Versuchsanlage konnten ähnliche oder niedrigere Emissionswerte erzielt und das Vorgehen zum Scale-up sowie die Eignung des Funktionsprinzips für die grössere Leistung bestätigt werden.

Die im Projekt entwickelten Methoden und die erzielten Resultate sind in den Publikationen [1] bis [3] und den Tagungsbeiträgen [4] bis [7] ausführlich beschrieben.



Résumé

Parce-que la qualité des copeaux forestiers varie et comme les résidus biogènes de l'agriculture sont également des combustibles potentiels, il y a un intérêt pour des systèmes de combustion de combustibles à une teneur en cendres plus élevée. Dans le cadre de ce projet, un système de combustion en vis d'une puissance de 100 à 300 kW a été mis au point. Il se caractérise par une combustion étagée avec des températures basses dans les braises et il évite les perturbations opérationnelles dues à la scorification des cendres grâce à un déchargement en continue des cendres.

Le projet a été réalisé en coopération avec des institutions d'Autriche, de Suède et de Suisse dans le cadre du projet ERANET "Advanced adjustable grate solutions for future fuel flexible biomass combustion technologies – GrateAdvance". La partie suisse comprenait une augmentation d'échelle de 33 kW ou 35 kW à 150 kW et la réalisation d'une installation pilote de 150 kW. Pour la conception des géométries à vis, la conversion des parties solides du combustible sur la grille a été modélisée. En outre, la chambre de combustion et l'alimentation en air ont été optimisées à l'aide de méthodes numériques et expérimentales de la dynamique des fluides.

Sur la base de mesures effectuées par l'institution partenaire en Autriche avec un prototype de 35 kW, les modèles de simulation ont été validés et utilisés par la suite pour la mise à l'échelle. Le système de combustion a été divisée en trois zones, dans lesquelles la variable caractéristique décisive a été identifiée et maintenue constante pour le scale-up comme suit

1. dans la zone de conversion du combustible, la charge thermique de la grille a été maintenue constante,
2. dans la chambre de combustion, le temps de résidence des gaz et grille a été maintenu constant,
3. le rapport de densité du flux d'impulsion a été fixé à une valeur constante pour l'air secondaire.

Les mesures effectuées sur le prototype de 35 kW démontrent que la combustion en vis convient à différents combustibles de biomasse et permet d'obtenir de faibles émissions de monoxyde de carbone (CO), de particules et d'oxydes d'azote (NO_x). Avec les granulés de bois, les valeurs d'émission suivantes ont été atteintes de manière fiable :

CO < 50 mg/m³, particules < 30 mg/m³ et NO_x < 150 mg/m³, à 13 % O₂ en volume.

En outre, des combustibles agricoles dont la teneur en cendres peut atteindre 7 % en poids peuvent également être brûlés, ce qui entraîne une augmentation des émissions de poussières et d'oxydes d'azote. Dans une série de mesures effectuées avec le prototype de 150 kW, des valeurs d'émission similaires ou inférieures ont été obtenues et la procédure de mise à l'échelle et l'adéquation du principe de fonctionnement pour la puissance supérieure ont été confirmées.

Les méthodes développées dans le cadre du projet et les résultats obtenus sont décrits en détail dans les publications [1] à [3] et les documents de conférence [4] à [7].



Summary

Since the quality of wood chips varies and biogenic residues from agriculture are also potential fuels, there is an interest in combustion systems for fuels with increased ash content. In the project, a screw burner in the power range from 100 kW to 300 kW was developed, which features a staged combustion with low temperatures in the embers and prevents operational disturbances due to ash slagging thanks to continuous ash discharge.

The project was carried out in cooperation between institutions from Austria, Sweden and Switzerland in the ERANET project "Advanced adjustable grate solutions for future fuel flexible biomass combustion technologies - GrateAdvance". The Swiss part included a scale-up from 33 kW or 35 kW to 150 kW and the realisation of a 150 kW pilot plant. For the design of the screw geometries, the solid matter conversion on the grate was modelled. In addition, the combustion chamber and the air supply were optimised using numerical and experimental fluid dynamics methods.

Based on measurements of the partner institution in Austria at a 35 kW prototype plant, the simulation models were validated and subsequently used for the scale-up. The furnace was divided into three zones, in which the decisive characteristic variable was identified and kept constant for the scale-up as follows

1. in the fuel conversion zone the thermal grate surface load was kept constant,
2. in the combustion chamber the gas residence time was kept constant, and
3. the effective momentum flux ratio for the secondary air nozzles was set to a constant value.

Measurements on the prototype plant with 35 kW show that the screw burner system is suitable for different biomass fuels and can achieve low emissions of carbon monoxide (CO), dust and nitric oxides (NO_x). With wood pellets the following emission values were reliably achieved:

CO < 50 mg/m³, particulate matter < 30 mg/m³ and NO_x < 150 mg/m³ at 13 Vol.-% O₂.

In addition, agricultural fuels with an ash content of up to 7 % by weight could also be burned, however with increased emissions of particulate matter and nitric oxides. In a series of measurements at the 150 kW test plant, similar or lower emissions were achieved and the scale-up procedure and the suitability of the operating principle for the higher output were confirmed.

The methods developed in the project and the results obtained are described in detail in the publications [1] to [3] and the conference papers [4] to [7].



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Résumé	5
Summary	6
Inhaltsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation des Projektes	9
1.3 Projektziele	9
2 Anlagenbeschrieb	10
3 Vorgehen und Methode	11
3.1 Modellierung der Brennstoffkonversion auf dem Rost.....	11
3.2 Modellierung der Strömung und Reaktionskinetik	11
3.3 Skalierungskonzept	11
4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	13
4.1 Modellierung der Brennstoffkonversion	13
4.2 Validierung der CFD-Modellierung mit Messungen am 35 kW Prototyp	13
4.3 Strömungsoptimierung mit CFD	16
4.4 Realisierung und Test der 150 kW-Prototypanlage.....	19
5 Bewertung der Ergebnisse	25
6 Weiteres Vorgehen	25
7 Nationale und internationale Zusammenarbeit	25
8 Kommunikation	25
9 Publikationen	26
10 Literaturverzeichnis	26



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Energieholz und andere biogene Brennstoffe können fossile Brennstoffe substituieren. Bis anhin steht dabei die Versorgung von Gebäuden mit Wärme im Vordergrund, wo Energieholz mit hoher Effizienz eingesetzt werden kann. Die Holzenergie deckt heute knapp 5 % der schweizerischen Energieversorgung [8]. Die Zunahme der Energieholznutzung während der letzten drei Jahrzehnte führte auch zu einer Verschiebung der Einsatzgebiete von handbeschickten zu automatischen Anlagen, sodass die automatischen Feuerungen in der Zwischenzeit den Hauptanteil abdecken [9]. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Trend anhält und das noch ungenutzte Energieholzpotenzial, das noch eine Erhöhung um rund 50 % ermöglicht, bis 2050 ausgeschöpft wird.

Um den Anteil der Biomasse zur Energieversorgung weiter zu steigern, ist daneben eine vermehrte Nutzung von biogenen Reststoffen anzustreben, die heute noch nicht genutzt werden, weil deren Bereitstellung und Verwertung zu kostenintensiv oder betrieblich zu aufwändig ist. Dazu zählen minderwertige holzartige Biomasse wie Flurholz, zur Vergärung ungeeignete landwirtschaftliche Reststoffe wie Stroh und auch Vergärungsrückstände aus Biogasanlagen, die nur unvollständig umgewandelt wurden. All diese Biomassesortimente weisen für die Verbrennung folgende erhöhten Anforderungen auf:

1. erhöhter Aschegehalt mit aschebildenden Elementen wie Kalium, Calcium, Natrium und Phosphor,
2. tiefere Ascheeschmelzpunkte,
3. höherer Gehalt an Stickstoff, Chlor und anderen Spurenelementen.

Konventionelle automatische Holzfeuerungen im Leistungsbereich bis 300 kW sind in der Regel nicht für diese erhöhten Anforderungen ausgelegt. Eine Verwendung aschereicher Brennstoffe in konventionellen Holzfeuerungen führt deshalb zu unzulässiger Verschlackung im Feuerraum sowie zu erhöhten Emissionen an Staub und Stickoxiden. Da daneben auch die Qualität von Waldhackschnitzeln schwankt und phasenweise erhöhte Aschegehalte auftreten können, besteht ein Bedarf an Feuerungen, welche auch die Nutzung von Brennstoffen mit erhöhtem Aschegehalt ermöglichen. Dazu muss Verschlackung verhindert oder durch eine geeignete Entaschung und Austragung soweit beherrscht werden, dass ausreichend lange Betriebszeiten ohne Unterbruch erzielt werden. Wegen des entsprechenden Aufwands stellen aschereiche Brennstoffe eine besondere Herausforderung in Feuerungen im Bereich von weniger als 1 MW oder gar weniger als 300 kW dar.

Aus früheren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist bekannt, dass eine gestufte Verbrennung und niedrige Glutbetttemperaturen vorteilhaft sind zur Vermeidung von Verschlackung und zur Erzielung niedriger Emissionen an Feinstaub aus Aschebestandteilen [10]. Durch gestufte Verbrennung und Luftstufung kann zudem eine Reduktion der Stickoxidemissionen durch Primärmassnahmen erzielt werden [11].



1.2 Motivation des Projektes

Um in Zukunft auch aschereiche Holzsortimente und wo geeignet biogene Rückstände energetisch nutzen zu können, besteht in vielen europäischen Ländern ein Bedarf an Techniken für diese Anwendung. Dieser Bedarf bildet die Motivation zur Entwicklung einer Schneckenrostfeuerung für aschereiche Biomassebrennstoffe im Rahmen des ERANET-Projekts «Advanced adjustable grate solutions for future fuel flexible biomass combustion technologies – GrateAdvance», das in Zusammenarbeit von Institutionen aus Österreich (BEST GmbH (vormals Bioenergy 2020+), TU Graz und Schmid AG Standort Zöbern), Schweden (Umea University und Lulea University of Technology) und der Schweiz (Hochschule Luzern, Verenum Zürich und SCHMID AG energy solutions, Eschlikon) durchgeführt wurde [12].

In Österreich wurde dabei der Schneckenbrenner im Leistungsbereich von 33 kW und 35 kW untersucht, während in der Schweiz ein 150 kW-Prototyp entwickelt und in Schweden die Verschlackung untersucht wurde. Der vorliegende Bericht behandelt die Entwicklung der 150 kW-Schneckenrostfeuerung.

1.3 Projektziele

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines neuartigen Konzepts einer automatischen Holzfeuerung, das im Leistungsbereich von 100 kW bis 300 kW eingesetzt werden kann und eine erhöhte Flexibilität bezüglich Brennstoffeigenschaften ermöglicht. Von einem Prototyp für Holzpellets mit 33 kW Leistung soll eine Skalierung erfolgen und die Feuerung für Waldhackschnitzel oder andere Brennstoffe mit erhöhtem Aschegehalt ausgelegt werden.



2 Anlagenbeschreibung

Im Rahmen des Projekts wurde eine 150 kW-Versuchsanlage realisiert. Bild 1 zeigt den Aufbau des 35 kW-Prototyps der Schneckenfeuerung bzw. Schneckenrostfeuerung¹, Bild 3 zeigt den Aufbau des 150 kW-Prototyps. Zur Validierung der numerischen Strömungsberechnungen wurden daneben ein Plexiglasmodell für experimentelle Strömungsuntersuchungen nach Bild 2 realisiert, das mit Lasermesstechnik an der Hochschule Luzern untersucht wurde.

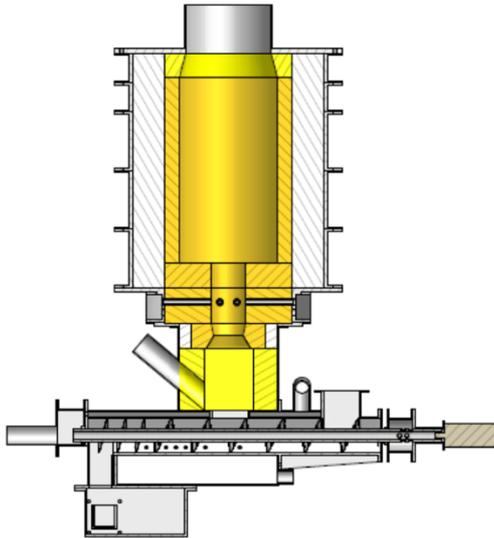


Bild 1 Aufbau der Schneckenrostfeuerung (35 kW) [3]. Die Brennstoffzuführung erfolgt über einen Einfallschacht auf die am Ende der Schnecke auf der linken Seite.



Bild 2 Skaliertes Plexiglasmodell der Brennkammer für experimentelle Strömungsuntersuchungen im Labor.

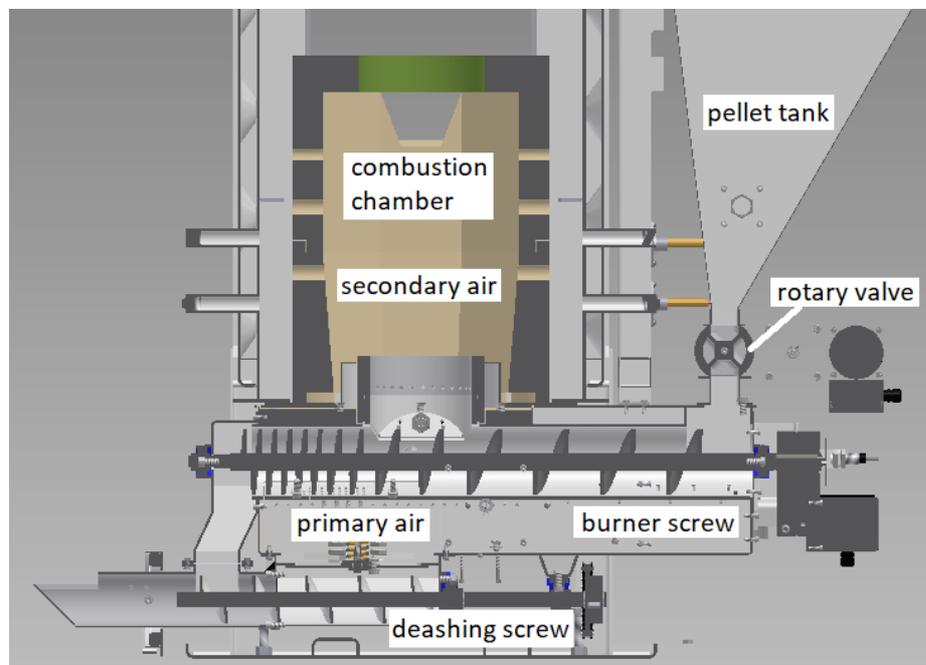


Bild 3 Schema der 150 kW-Versuchsanlage der Schneckenrostfeuerung [7].

¹ Das Prinzip wird in Englisch als «Screw burner» bezeichnet, was in Deutsch eigentlich einer «Schneckenfeuerung» entspricht, im Projekt jedoch auch als «Schneckenrostfeuerung» bezeichnet wurde.



3 Vorgehen und Methode

3.1 Modellierung der Brennstoffkonversion auf dem Rost

Zur Auslegung der Schnecke als zentrales Element des Feuerungskonzepts wurde die Konversion des festen Brennstoffs in einer wandernden Brennstoffsäule (Walking column) modelliert, die durch thermische und chemische Reaktionen sukzessive in Gase und Asche umgewandelt wird. Der Modellansatz ist in Bild 4 beschrieben und das Vorgehen in der Publikation [1] dokumentiert.

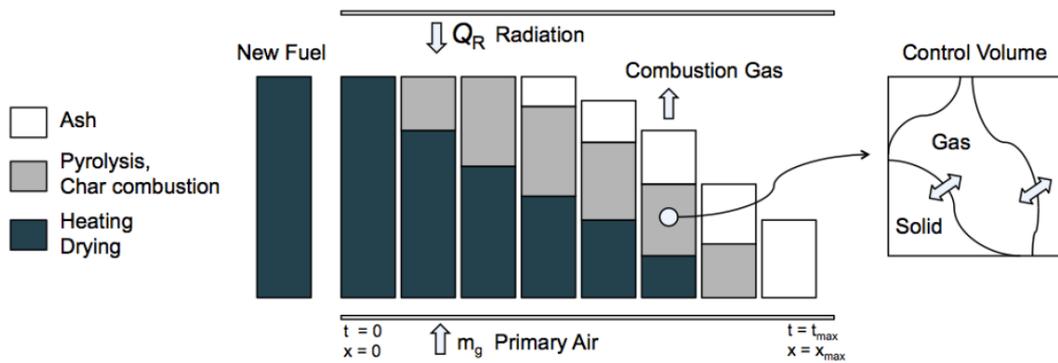


Bild 4 Modell der „wandernden Säulen“. Eine Brennstoff-Säule wird während ihres Weges über den bewegten Schneckenrost beobachtet (Lagrange-Formulierung) [1].

3.2 Modellierung der Strömung und Reaktionskinetik

Da die Geometrie der Brennkammer und die Eindüsung der Sekundärluft die Verbrennungsvorgänge massgeblich beeinflussen, erfolgten numerische Strömungsberechnungen dieser Anlagenteile mit Einbindung der Kinetik der wichtigsten Gasphasenreaktionen. Die Berechnungen erfolgten mit dem Ansys-Fluent CFD Code mit stationären reynoldsgemittelten Erhaltungsgleichungen (RANS) und Berücksichtigung der Turbulenz mit dem Standard $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell. Das Vorgehen ist [2] in dokumentiert.

3.3 Skalierungskonzept

Zur Beschreibung von Wärmeerzeugern wird der leistungsabhängige Skalierungsfaktor f wie folgt definiert:

$$f = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1}$$

\dot{Q}_1 = Feuerungswärmeleistung der Anlage im Basisfall

\dot{Q}_2 = Feuerungswärmeleistung der skalierten Anlage

Unter Vernachlässigung indirekter Skaleneffekte (etwa einem Anstieg der Temperatur als Folge von mit zunehmender Grösse sinkenden spezifischen Flächen und reduzierten spezifischen Wärmeverlusten) wird die Feuerung vereinfachend in eine Prozesseinheit der Feststoffumwandlung (Rost) und eine Prozesseinheit der Gasphasenreaktionen (Nachbrennkammer) unterteilt:

Prozesseinheit 1: Für den Rost ist der Erhalt der spezifischen Rostflächenbelastung in kW/m^2 anzustreben. Dafür gilt $A_2/A_1 = f$.

Prozesseinheit 2: Für die Gasphasenreaktionen wird als Scale-up-Anforderung vorausgesetzt, dass die mittlere Verweilzeit konstant bleibt. Dies ist gleichbedeutend mit einem Erhalt der spezifischen Volumen mit $V_2/V_1 = f$. Als erster Ansatz wird auch die Erhaltung der Form geprüft mit $(L_2/L_1)^3 = f$.

Die Eindüsung von Sekundärluft in die Hauptströmung in einer Brennkammer entspricht der Anordnung eines quer angeströmten Freistrahls (Jet in Cross Flow, JICF, [13]). Die wichtigste Kennzahl zur Charakterisierung



eines quer angeströmten Freistrahls ist das Produkt von Impulsverhältnis IV und Düsendurchmesser D [13]. Beim Impulsverhältnis handelt es sich um das Verhältnis der Impulsstromdichten. Für den Freistrah (Index D) in eine beliebige Grundströmung (Index G) gilt:

$$IV_{DG} = \sqrt{\frac{\rho_D \cdot u_D^2}{\rho_G \cdot u_G^2} \frac{D_D}{D_G}} = \sqrt{\frac{\rho_D \cdot u_D^2}{\rho_G \cdot u_G^2}} D^*$$

IV_{DG} Impulsverhältnis zwischen Düsen- und Grundströmung, [-]

D_D^* mit der relevanten Kanaldimension normierter Durchmesser der Eindüsung, [-]

Das Produkt von Impulsverhältnis IV und Düsendurchmesser D beeinflusst bei einem JICF die Eindringtiefe des Strahls in die Grundströmung. Für die Eindringtiefe des Strahls weit stromabwärts der Eindüsung gilt:

$$y_{D\infty} \sim IV_{DG} \cdot D_{BK}$$

Eigene Untersuchungen haben gezeigt [14], dass für optimale Durchmischung bei einseitiger Eindüsung ein normiertes Impulsstromdichteverhältnis von 0.2 bis 0.3 ideal ist, bei gegenseitiger Eindüsung um 0.5. Tabelle 1 zeigt die drei Skalierungsvarianten, welche die obigen Bedingungen erfüllen.

Tabelle 1 Analytierte reale Varianten.

Zone	Bauteil	Skalierungsregel		
		Variante 1	Variante 2	Variante 3
Rost	Schneckendurchmesser	$n^{0.5}$	$n^{0.5}$	$n^{0.5}$
Rost	Schneckenlänge	$n^{0.5}$	$n^{0.5}$	$n^{0.5}$
Rost/BK	BK-Durch. @ SL	$n^{0.5}$	$n^{0.5}$	$n^{0.5}$
BK	Brennkammerhöhe	$n^{0.33}$	1	$n^{0.166}$
BK	BK-Durchmesser 2	$n^{0.33}$	$n^{0.5}$	$n^{0.417}$
BK	BK-Durchmesser 3	$n^{0.33}$	$n^{0.5}$	$n^{0.417}$

Die Fläche des Rostes wird in allen drei Skalierungsvarianten proportional zur Leistung skaliert, sodass die Rostflächenbelastung für alle Skalierungsarten konstant bleibt. Der Schneckendurchmesser und die Länge der Schnecke nehmen proportional zur Wurzel des Skalierungsfaktors zu $\sim \sqrt[2]{n}$. Die Gasgeschwindigkeit bleibt über dem Rost konstant, was ein ähnliches Mitreissen von Partikeln erwarten lässt. Ein grosses Höhe-zu-Durchmesser-Verhältnis führt zu höherem Druckverlust und zu einer höheren Bauart (respektive Mehrzug-Brennkammer).

Anhand der in [6] beschriebenen Ergebnisse wird die Skalierung des Rostes mit konstanter Rostflächenbelastung als erster Ansatz gewählt. Für die Skalierung der Brennkammer wird Variante 1 gewählt. Da die maximale Höhe der Feuerung jedoch limitiert ist, wird eine in der Höhe gestauchte Variante 1 ausgeführt. Nachteil ist dabei, dass der Druckverlust im Vergleich zur Originalfeuerang und zu Variante 2 leicht zunimmt. Vorteilhaft ist dagegen das günstigere Höhe-zu-Durchmesserverhältnis der Brennkammer.



4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

4.1 Modellierung der Brennstoffkonversion

Bild 5 zeigt die mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Modell berechneten Verhalten der Brennstoffkonversion im Schneckenreaktor für zwei Prototypen, die mit unterschiedlichen Drehzahlen betrieben werden [6]. Daraus geht hervor, dass der durch Pyrolyse erzeugte Wasserdampf bei Prototyp 2 früher erscheint. Mit einem Sprung in der Steigung der Schnecke kann der Abbrand beschleunigt oder verlangsamt werden, sodass die Steigung der Schnecke als Optimierungsparameter verwendet werden kann.

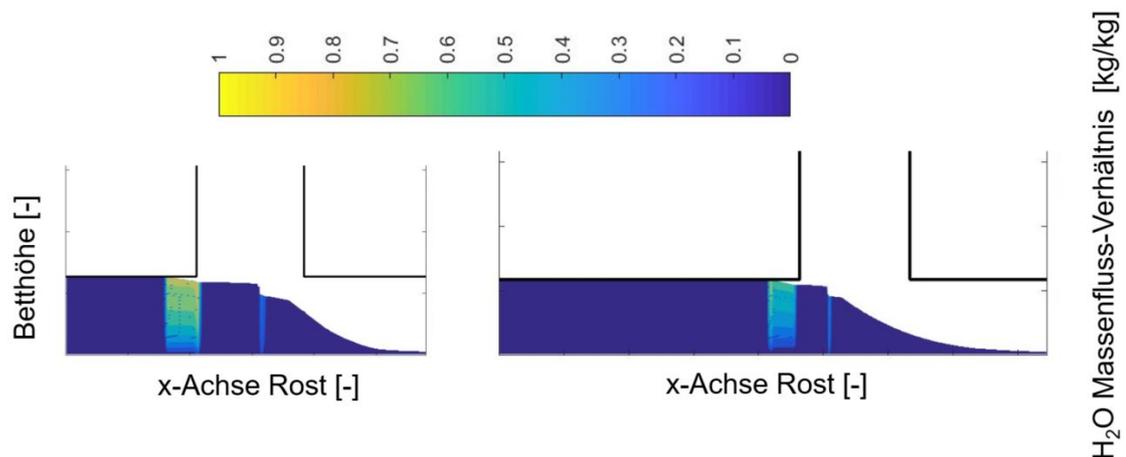


Bild 5 Simuliertes Brennstoffbett und Wassermassenflussbruchteil für die Schneckengeometrie von Prototyp 1 (links) und Prototyp 2 (rechts).

4.2 Validierung der CFD-Modellierung mit Messungen am 35 kW Prototyp

Mit der in Bild 1 gezeigten Feuerung mit 35 kW wurden von Bioenergy 2020+ umfangreiche Messungen mit den in Bild 6 gezeigten Brennstoffen durchgeführt. Für die Validierung mit Experimenten nach [12] werden davon drei Betriebspunktgruppen nach Tabelle 2 betrachtet. Diese werden so gewählt, dass analysiert werden kann, ob das Modell bei unterschiedlichen Betriebspunkten die Trends korrekt simuliert und für Voraussagen verwendet werden kann.

Die Resultate in Bild 7, Bild 8 und Bild 9 zeigen, dass die Modellierung geeignet ist zur Simulation des Verbrennungsverhaltens. Wegen der Vereinfachungen (stationäre Bedingungen, keine Interaktion zwischen Brennstoff und Schnecke, homogener Brennstoff, vereinfachte Wandwärmeverluste, keine Ablagerungen, Partikel vernachlässigt) ist jedoch bei der Vorausberechnung über mehrere Betriebspunkte mit Abweichungen zu rechnen. Das Modell ermöglicht aber eine Unterscheidung zwischen guten und schlechten Betriebspunkten. So simuliert es in der Betriebsgruppe 2 einen CO-Anstieg bei tiefem Luftüberschuss von $\lambda < 1.3$ und in Gruppe 3 einen Anstieg von CO bei hohem Luftüberschuss von $\lambda > 2.4$. Das Modell kann auch die experimentelle Erfahrung bestätigen, dass Betriebspunktgruppe 1 bei tieferen Luftüberschusszahlen niedrigere CO-Emissionen als Betriebspunktgruppe 2 und 3 aufweist. Dies ist eine Folge der zweistufigen Verbrennung, die im Idealfall ein Primär- λ im Bereich von 0.7 hat.

Schwieriger ist die exakte Voraussage des Punkts, ab dem der CO-Anstieg mit sinkendem λ auftritt. Dieser hängt von der lokalen Verfügbarkeit an Sauerstoff für die CO-Oxidation ab, was durch Interaktionen zwischen Turbulenz und Chemie mit Radikalen und zusätzlich transienten Phänomenen wie etwa der Rostbewegung beeinflusst wird, die im Modell nicht berücksichtigt sind. Diese Betriebspunkte zeigen jedoch auch im Experiment grosse Standardabweichungen.



Bild 6 Brennstoffe für Verbrennungsversuche in 35 kW-Prototyp: Fichtenpellets (ISO A1), Getreidemühlen-Rückstände, Virginia-Malve, Weide (SRC), Bambus, Getreideschalen, Miscanthus, Heu und Weinbergsbeschneidung, Mais (Mykotoxin-kontaminiert, Oliven-Steinschrot [7].

Tabelle 2 Betriebspunktgruppen für die Validierung der numerischen Modelle.

	1	2	3
Last	100 %	100 %	30 %
Leistung	35 kW	35 kW	10.5 kW
$\lambda_{\text{primär}}$ (Experiment)	0.7 ÷ 0.8	1.0 ÷ 1.35	1.37 ÷ 1.94
$\lambda_{\text{primär}}$ (Simulation)	0.77	1.06	1.68
λ_{total} (Experiment)	1.37 ÷ 1.68	1.40 ÷ 2.82	1.60 ÷ 3.30
λ_{total} (Simulation)	1.40 ÷ 1.62	1.23 ÷ 2.09	1.84 ÷ 4.04

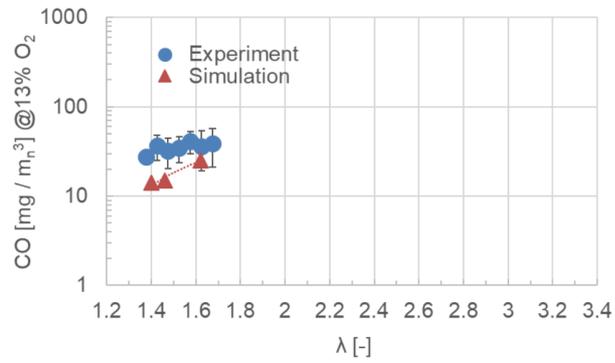


Bild 7 Gemessene und berechnete CO-Werte für Betriebspunktgruppe 1.

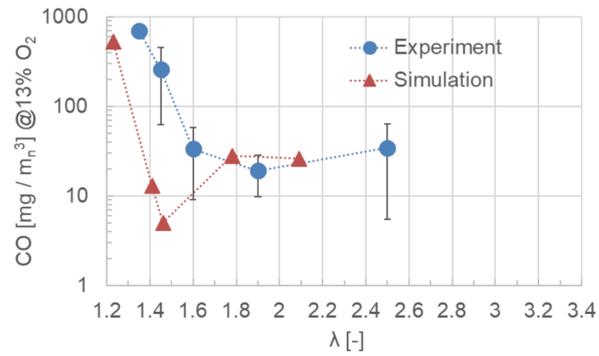


Bild 8 Gemessene und berechnete CO-Werte für Betriebspunktgruppe 2.

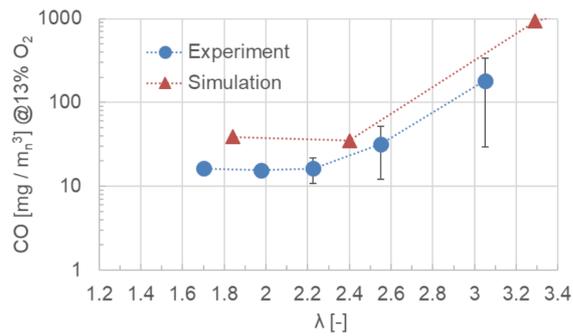


Bild 9 Gemessene und berechnete CO-Werte für Betriebspunktgruppe 3.



4.3 Strömungsoptimierung mit CFD

Die Erfahrung zeigt, dass eine zweistufige Verbrennung zu einer vollständigeren Verbrennung führen kann. Zur Optimierung der Verbrennung ist zudem eine gute Vermischung zwischen brennbaren Gasen und Sekundärluft notwendig. Zusätzlich kann durch Betrieb mit tiefer Primärluftzahl eine NO-Reduktion erreicht werden, sofern die Verweilzeit in der understöchiometrischen Reduktionszone genügend lang und die Temperatur ausreichend hoch ist, was als Luftstufung bezeichnet wird [11]. Zu diesen Effekten werden im Modell verschiedene Varianten untersucht und nachfolgend der Einfluss folgender Effekte beschrieben:

Parameter 1: Verweilzeit in der Reduktionszone

Parameter 2: Einsatz einer Drallströmung der Sekundärlufteindüsung

Parameter 3: Impulsstromdichtverhältnisse durch Anzahl Sekundärluftdüsen.

Parameter 1: Bild 10 zeigt drei Geometrien, in denen die Verweilzeit in der Reduktionszone variiert wird. Die Resultate in Bild 11 zeigen, dass die Simulation bei gleichem λ für die Geometrie mit dem längsten Abstand zwischen der Primär- und der Sekundärluft die niedrigsten CO-Werte vorausberechnet. Dies ermöglicht auch, dass bei gleichen CO-Werten ein tieferes λ gefahren werden kann, was zu einem höheren Wirkungsgrad führt.

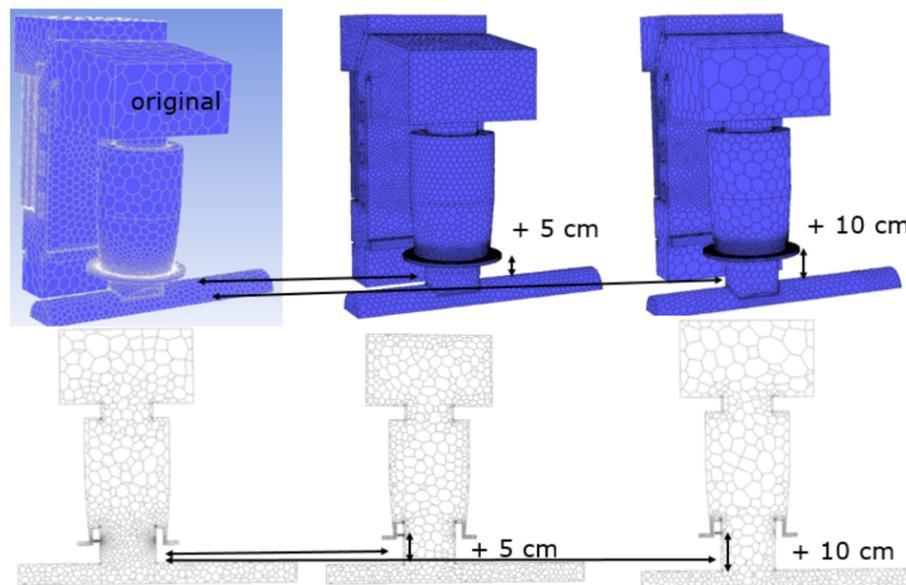


Bild 10 Numerische Netze und Schnitt für die Originalgeometrie (links) und einer um 5 cm respektive 10 cm vergrößerten Distanz zwischen Schnecke und Sekundärluft.

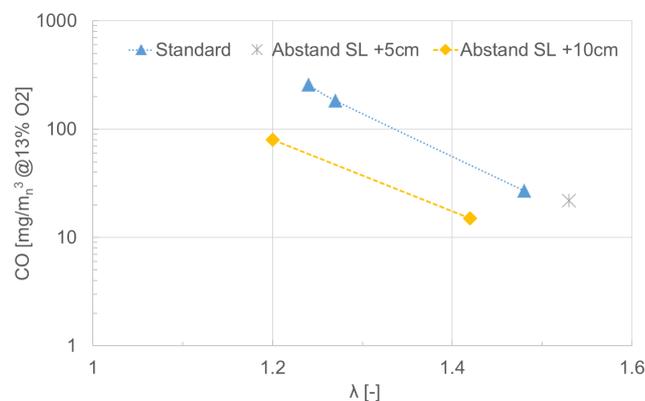


Bild 11 CO-Emissionen in Funktion von λ für unterschiedliche Distanzen Schnecke/Sekundärluft.

Parameter 2: Bild 12 zeigt die numerischen Netze für die Originalgeometrie und für die Geometrie mit Drall. Der berechnete CO-Gehalt in Bild 13 zeigt, dass der Drall nicht vorteilhaft ist, weshalb das Strömungsverhalten weiter untersucht wird. Bild 14 und Bild 15 zeigen dazu die Iso-Volumen mit CO-Konzentration über 500 mg/m^3 bei 13



Vol.-% O₂ im Standardfall ohne Drall und im Fall mit Drall bei Volllast (150 kW) (Bild 16 und Bild 17). Es ist erkennbar, dass das CO ohne Drall (Bild 16) früher oxidiert wird als mit Drall (Bild 17), da sich mit Drall eine Zyklonströmung ausbildet, welche die chaotische Durchmischung hemmt.

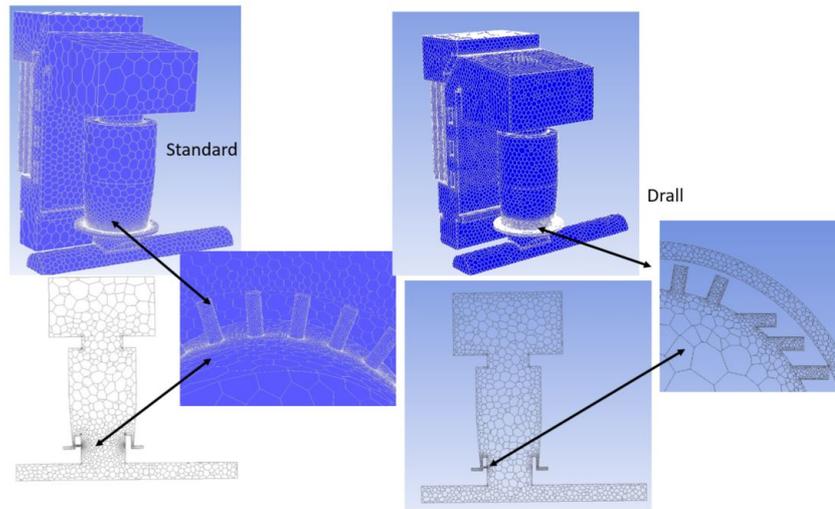


Bild 12 Numerische Netze und Schnitt für die Originalgeometrie und für die Geometrie mit Drall.

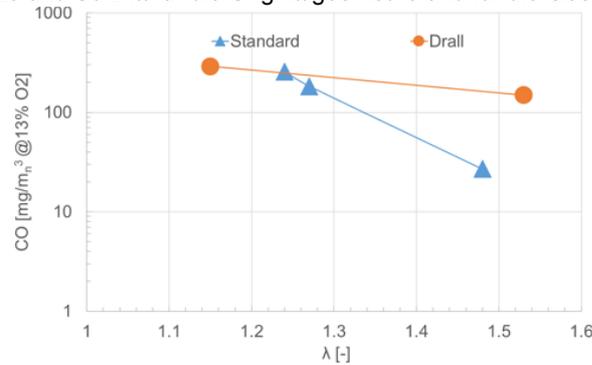


Bild 13 CO in Abhängigkeit von λ für Fälle mit und ohne Drall.

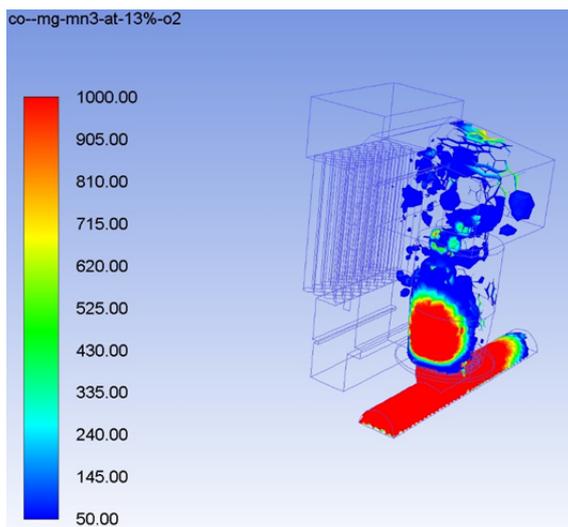


Bild 14 CO Iso-Volumen mit CO > 500 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ im Standardfall ohne Drall bei Volllast (150 kW).

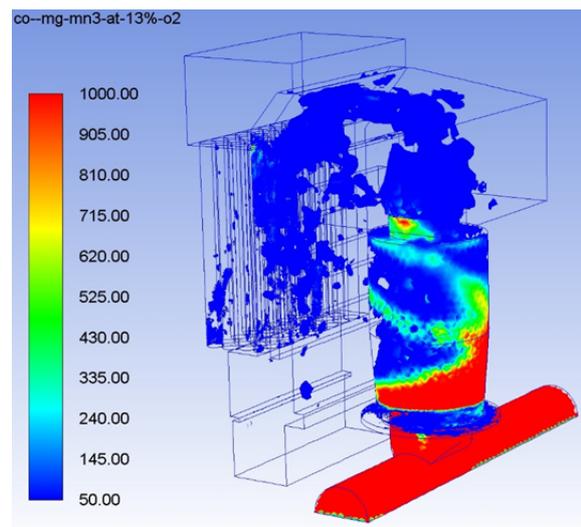


Bild 15 CO Iso-Volumen mit CO > 500 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ im Fall mit Drall bei Volllast (150 kW).

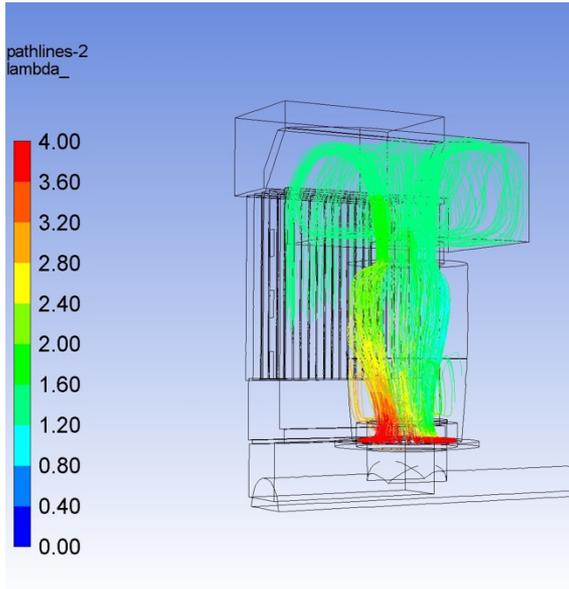


Bild 16 Stromlinien aus der Sekundärluft im Standardfall ohne Drall bei Volllast (150 kW).

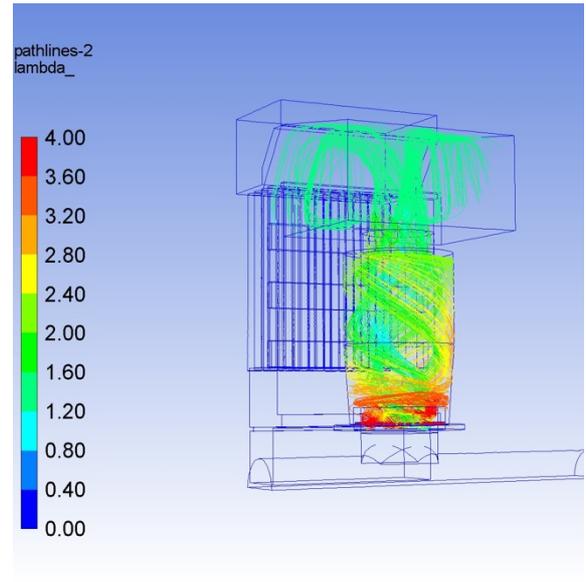


Bild 17 Stromlinien aus der Sekundärluft im Fall mit Drall bei Volllast (150 kW).

Parameter 3: Alle bisher beschriebenen Varianten wurden mit einem für die vorliegende Anordnung günstigen Impulsstromdichteverhältnis von rund 0.48 (wie in Kapitel 3 beschrieben) ausgeführt. Durch Reduktion der Düsenzahl wird das Impulsstromdichteverhältnis in den nachfolgend untersuchten Fällen um einen Faktor von ungefähr 2 und 4 reduziert.

Die Berechnungen zeigen, dass für den Standardfall mit dem nach früheren Untersuchungen optimalen Impulsstromdichteverhältnis sowohl CO (Bild 18) als auch NO_x bei gleichem λ die tiefsten Werte erzielen. Bei Reduktion der Anzahl Düsen und somit des Impulsstromdichteverhältnisses steigen die CO-Emissionen infolge schlechterer Durchmischung an.

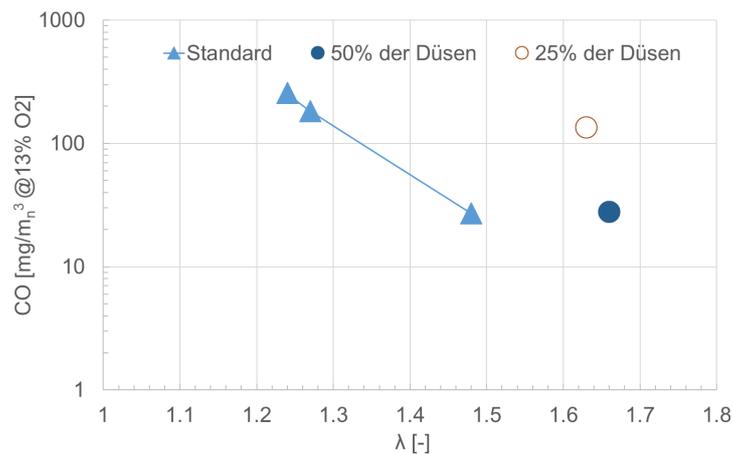


Bild 18 CO in Funktion von λ für Fälle mit unterschiedlicher Düsenanzahl der Sekundärluft.



4.4 Realisierung und Test der 150 kW-Prototypanlage

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Optimierungen wurde die Konstruktion einer Schneckenrostfeuerung mit 150 kW ausgeführt und ein Prototyp gebaut, der im Versuchsraum in Betrieb genommen und getestet wurde. Bild 19 zeigt das Schema der Feuerung inklusive der wichtigsten Messparameter. Bild 20 zeigt Fotos der Feuerung und der Messstelle für die Emissionsmessung. Unter Leitung von Verenum wurden mit Schmid AG das Messprogramm, die Versuchsplanung und das Vorgehen zur Datenerfassung und Datenauswertung festgelegt. Die Versuchsanlage wurde auf dem Prüfstand in von Schmid AG in Zöbern (Österreich) aufgebaut und betrieben und die Versuche wurden von Verenum begleitet.

Tabelle 3 zeigt eine Zusammenstellung der gemessenen Parameter. Die gasförmigen Schadstoffemissionen (CO, NO_x, VOC (C_xH_y) sowie der Sauerstoffgehalt wurden mit einem ecom-J2KNpro INDUSTRY analysiert und der Staubgehalt mit einem Testo 380 (somit ohne Grobstaub) gemessen. Ausserdem wurden an mehreren Stellen in der Schnecke und der Brennkammer die Temperaturen gemessen (Bild 21) und zusätzlich die Abgasgeschwindigkeit, die Volumenströme von Primär- und Sekundärluft, der Kamin- und Brennkammerunterdruck sowie Informationen zur Schnecke erfasst.

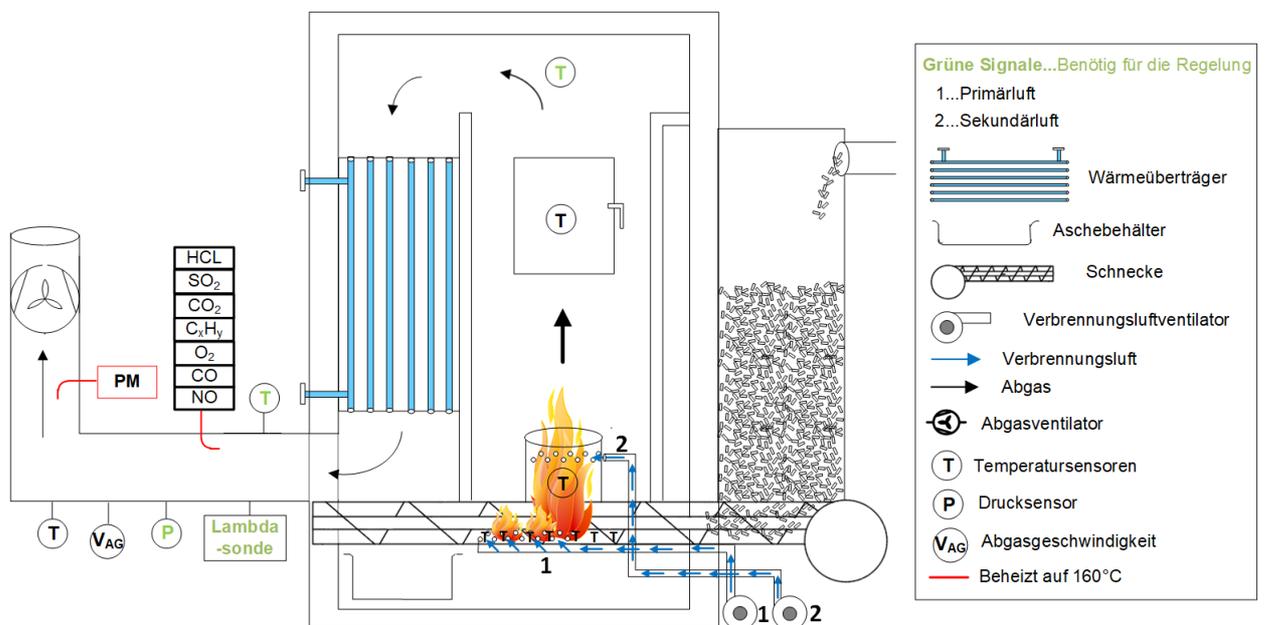
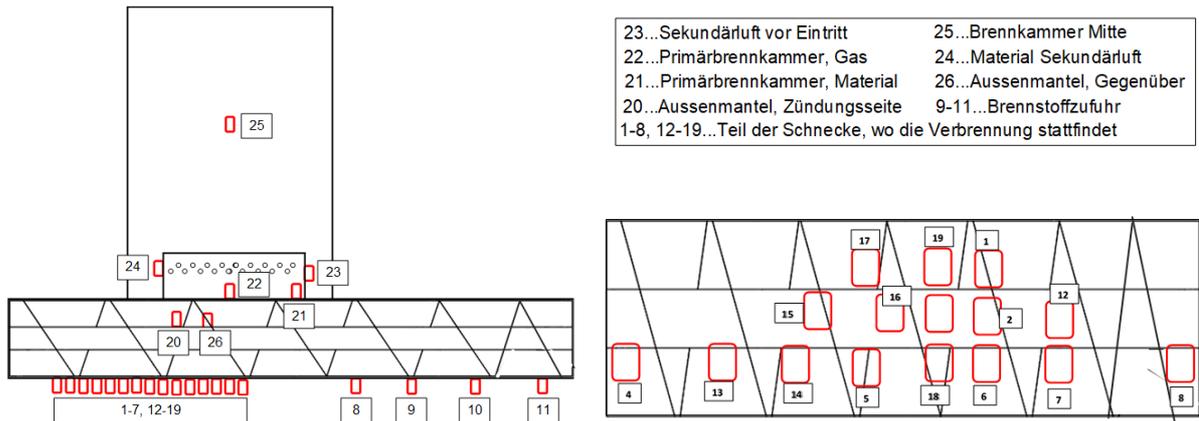


Bild 19 Schema der 150 kW-Schneckenrostfeuerung mit Angabe der gemessenen Parameter und deren Messposition. Die Parameter in grüner Schrift werden auch für die Regelung des Kessels verwendet.



Bild 20 Fotos des Prototyps. Links oben: Front und Seitenansicht.
Links unten: Seitenansicht mit Brennstoffbehälter.
Rechts: Rückseite mit Kaminrohr, an dem die Emissionsmessungen durchgeführt wurden.



23...Sekundärluft vor Eintritt 25...Brennkammer Mitte
 22...Primärbrennkammer, Gas 24...Material Sekundärluft
 21...Primärbrennkammer, Material 26...Aussenmantel, Gegenüber
 20...Aussenmantel, Zündungsseite 9-11...Brennstoffzufuhr
 1-8, 12-19...Teil der Schnecke, wo die Verbrennung stattfindet

Bild 21 Position und Nummerierung der Temperatursensoren (Brennstofffluss v.r.n.l.).
 Links: Seitenansicht der Schnecke und Nachbrennkammer.
 Rechts: Ansicht von unten im Verbrennungsteil mit Temperatursensoren 1-7 und 12-19.

Tabelle 3 Übersicht über die gemessenen Parameter.

Kategorie	Parameter	Messgerät und/oder Messprinzip	
Emissionen	O ₂ [%]	Elektrochemisch	
	CO ₂ [%]	Infrarot	
	CO (0 - 63000 ppm)	Infrarot	
	NO (0 - 5000 ppm)	Elektrochemisch	
	NO ₂ (0 - 1000 ppm)	Elektrochemisch	ecom-J2KNpro INDUSTRY
	CxHy (0 - 1000 ppm)	Infrarot	
	SO ₂ (0 - 5000 ppm)	Elektrochemisch	
	HCL (0 - 100 ppm)	Infrarot	
H ₂ [ppm]	Elektrochemisch		
	Staub (< PM ₁₀)	Rotationsverdünnung Δm anhand von ΔF* Testo 380	
Temperaturen	Kessel	Thermoelemente	
	Rücklauf		
	Abgas		
	Umgebungsluft		
	Brennkammer		
	Primärluft		
	Sekundärluft		
Zahlreiche Positionen in Schnecke			
Weitere Parameter	Kesselleistung [kW]	Differenzdruck	
	Unterdruck im Kamin [Pa]		
	Umgebungsdruck [mbar]	Barometrisch	
	O ₂ [%]	Lambdasonde	
	Primärluftmenge [m ³ /h]	EE671 HLK Miniatur Strömungsmessumformer	
	Sekundärluftmenge [m ³ /h]	EE671 HLK Miniatur Strömungsmessumformer	
	Unterdruck im Kessel [Pa]	Differenzdruck	
	Scheckengeschwindigkeit [%]		
	Schneckenposition [-]		
	Lichtschanke um Überfüllung zu vermeiden		
Abgasgeschwindigkeit [m/s]	Prandtlrohr & Flügelradanemometer		

* Δm...Massenänderung; ΔF...Frequenzänderung; Je nach Masse der sich absetzenden Partikel ändert sich die Schwingfrequenz des Staubsensors aus der dann die Partikelmasse abgeleitet werden kann.



Nach Messprogramm waren Versuche mit folgenden Brennstoffen geplant:

- Brennstoff mit hoher Qualität und geringem Aschegehalt
 - EN zertifizierte Holzpellets
 - Qualitätswaldhackschnitzel mit hohem Wassergehalt (W40)
- Brennstoff mit hohem Aschegehalt und Verschlackungspotenzial: MNP-Pellets (Müllereinebenenprodukte).

Zudem sollten Messungen bei Volleistung und bei Teilleistung sowie bei An- und Abfahren durchgeführt werden. Aus den Messungen mit dem Brennstoff mit hoher Qualität sollten Parameter (Luft Einstellungen für Primär- und Sekundärluftzufuhr, Geschwindigkeit der Förderschnecke, Brennstoffbetthöhe, etc.) für einen Betrieb mit geringen Schadstoffen, hohem Wirkungsgrad und geringer Verschlackung gefunden werden. Als Basis dazu dienten umfangreiche Tests und Erfahrungen vom 35 kW-Prototyp der Messungen von Bioenergy 2020+. Für die Inbetriebnahme und das Finden von Einstellungen für die Verbrennungsversuche an der 150 kW-Feuerung wurden zahlreiche Testläufe mit EN zertifizierten Pellets durchgeführt. In den ersten fünf Testtagen wurden

- die Software evaluiert sowie die Dichtheit des Brenners und des Wärmeüberträgers überprüft,
- die Drehzahl der Brennerschnecke und Brennstoffzuführung auf einen stabilen Betrieb eingestellt
- Tests mit ca. 75 kW Leistung durchgeführt.

An drei weiteren Tagen wurden Tests durchgeführt, um den idealen Luftüberschuss (O_2 -Gehalt) zu ermitteln und im Anschluss die Leistung zu erhöhen. An zwei weiteren Tagen wurden die Einstellungen auf hohe Ausbrandqualität optimiert. Anschliessend erfolgte während drei Tagen ein Betrieb mit zahlreichen Starts und Stopps und gleichzeitigem Test der Software.

Während der Inbetriebnahme und der ersten Testphase traten verschiedene Störungen auf. Diese konnten durch konstruktive Änderungen behoben werden, führten aber zu Verzögerungen, weshalb die Verbrennungsversuche auf den Betrieb mit EN zertifizierten Pellets begrenzt wurden. Von diesen Versuchen werden nachfolgend die Resultate der drei mit Emissionsmessungen durchgeführten Versuche im Zeitraum vom 21. März bis zum 26. März 2019 ausgewiesen.

Bild 22 zeigt einen Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs einer Messung während 30 Minuten. Darauf ist zu erkennen, dass die Emissionen sowie der Sauerstoffgehalt und die Abgastemperatur periodisch schwingen. Dieses Schwingen des Verbrennungsverlaufs ist von der Schneckendrehung abhängig. O_2 , CO und VOC verhalten sich gleichläufig zum Signal «Zellradschleuse Drehzahlvorgabe», NO_x und die Abgastemperatur verhalten sich gegenläufig dazu. Die Minimal- und Maximalwerte der Signale bleiben während des stabilen Volllastbetriebs auf dem gleichen Niveau annähernd konstant. Das zeitliche Verhalten, sowie die absoluten Werte waren für alle drei Messungen ähnlich. Geringe Schwankungen, ausgewiesen als prozentuale Standardabweichung des Mittelwerts aller über die drei Messungen aufgezeichneten Datenpunkte, weisen die Temperaturen ($\pm 1.2\% - 3.4\%$, Tabelle 4) sowie NO_x und die Kesselleistung ($\pm 6.2\%$, Tabelle 5) auf.

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte der Temperaturen zusammengefasst. Im Bereich der Brennstoffzufuhr in der Schnecke betragen diese zwischen $46 - 53\text{ °C}$. In der Zone der Schnecke, in der die Verbrennung stattfindet, steigen die Temperaturen kontinuierlich an und in der Zone rund um der Primärbrennkammer herrschen dann Temperaturen zwischen $450 - 750\text{ °C}$. In der Primärbrennkammer und Brennkammermitte wurden Temperaturen zwischen 1000 °C und 1100 °C gemessen. Am Ende der Schnecke sinkt die Temperatur bis auf 144 °C ab.

Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte über alle Messungen für die wichtigsten Parameter. Der Kessel wurde mit einer mittleren Leistung von $128 \pm 8\text{ kW}$ betrieben. Das entspricht etwa 87% der angestrebten Maximalleistung von 150 kW. Tiefe Werte wurden für VOC ($1.5 \pm 0.7\text{ mg/m}_n^3$ bei 13 Vol.-% O_2), sowie SO_2 und HCl (unter der Nachweisgrenze) gefunden.

Die Emissionen an CO ($76 \pm 22\text{ mg/m}_n^3$), NO_x ($190 \pm 12\text{ mg/m}_n^3$) und Staub ($21 \pm 2\text{ mg/m}_n^3$) sind deutlich tiefer als die Emissionsgrenzwerte der LRV (CO: 500 mg/m_n^3 , Staub: 50 mg/m_n^3 , NO_x : 250 mg/m_n^3 ab 2500 g/h), wobei alle Werte bei 13 Vol.-% O_2 angegeben sind.

Der Restsauerstoffgehalt von $9 \pm 2\%$ entspricht einer mittleren Luftüberschusszahl von 1.75. Dieser Wert könnte durch Optimierung noch abgesenkt werden und voraussichtlich zu tieferen Emission führen.

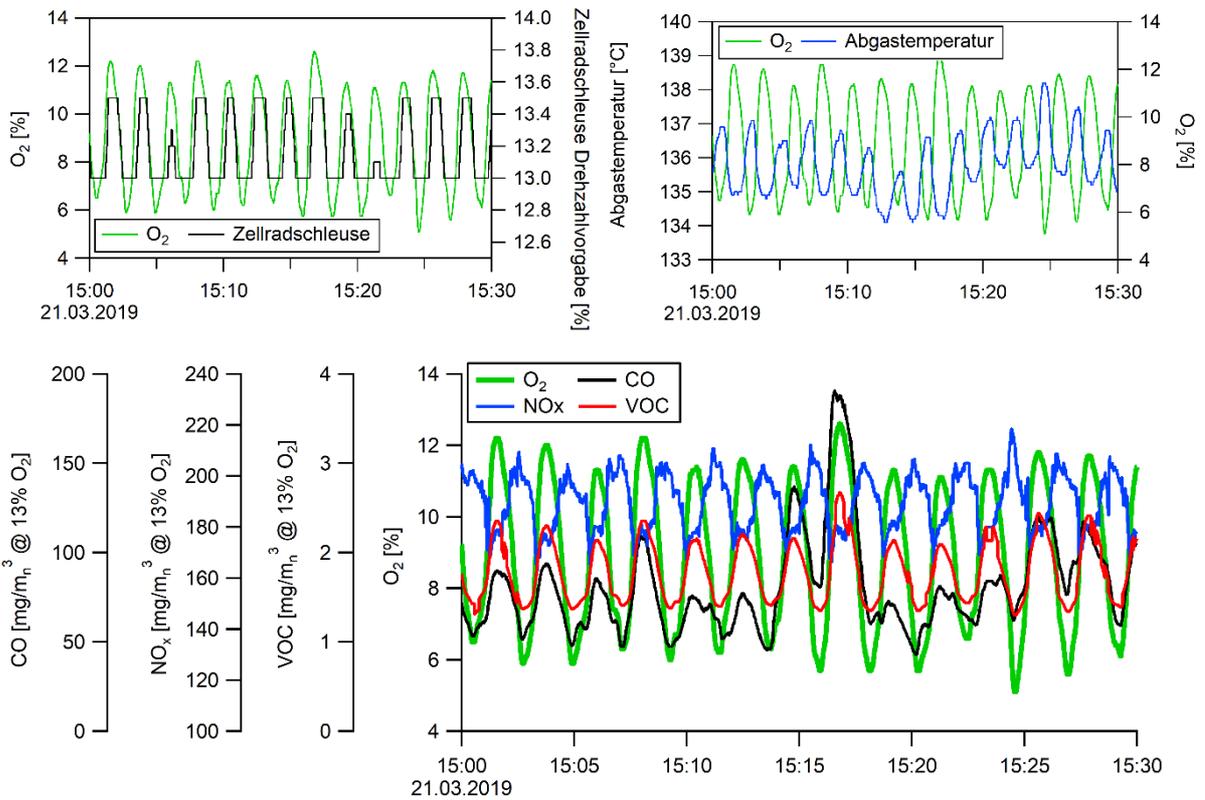


Bild 22 30 Minuten Ausschnitt der Messung vom 21.03.2019. Die Grafiken zeigen einen zeitlichen Verlauf verschiedener Parameter im Vergleich mit dem zeitlichen Verhalten von O₂.

Tabelle 4 Übersicht über die Luft- bzw. Gastemperaturen in °C der drei Verbrennungsexperimente mit EN Pellets.

Position	Teil der Schnecke, in dem die Verbrennung stattfindet					Brennstoff-zufuhr in Schnecke	Primär-brenn-kammer	Brenn-kammer Mitte		
Sensor										
Mittelwert	T17	T19	T1				T22	T25		
	661	710	668				1085	1003		
σ*	15	14	12				32	61		
σ [%]	2.3	1.9	1.8				3.0	6.1		
Sensor	T15	T16	T3	T2	T12					
Mittelwert	546	696	750	648	147					
σ*	13	10	10	10	3					
σ [%]	2.5	1.4	1.3	1.5	2.4					
Sensor	T4	T13	T14	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
Mittelwert	144	239	446	611	540	298	300	53	51	46
σ*	3	8	8	5	12	5	8	2	2	1
σ [%]	2.3	3.4	1.8	0.9	2.2	1.5	2.7	3.2	3.0	2.9

*σ...Standardabweichung des Mittelwerts



Tabelle 5 Mittelwert wichtiger Parameter und der Emissionen von allen Messpunkten der drei Verbrennungsexperimente mit EN Pellets. SO₂ und HCL Konzentrationen waren unter der Nachweisgrenze des Messgeräts

	Kessel- leistung	$\eta^{\#}$	Temperatur		O ₂	CO ₂	CO	NO _x	C _x H _y	Staub
			Abgas	Brenn- kammer						
Einheit	[kW]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[%]		[mg/m _n ³ bei 13% O ₂]		
Mittelwert	128.2	92.2	136.5	658.0	9.0	11.8	76.2	190.5	1.5	21.3
σ^*	7.9	1.1	1.6	20.9	2.0	2.0	22.0	11.8	0.7	1.5
σ [%]	6.2	1.2	1.2	3.2	22.3	16.8	28.8	6.2	43.0	6.9
Min.	78.2	89.7	130.9	597.4	4.6	8.1	38.2	137.1	0.0	18.3
Max.	206.2	94.2	140.1	713.9	12.8	16.2	190.6	231.5	3.3	22.9

* σ ...Standardabweichung des Mittelwerts

$\eta^{\#}$ _{Feuer}...Kesselwirkungsgrad indirekt berechnet über den Feuertechnischen Wirkungsgrad abzüglich der Abgasverluste

Während der Inbetriebnahme und Tests traten einige Störungen auf, die für eine spätere Kommerzialisierung noch die in Tabelle 6 beschriebenen Optimierungspotenziale aufzeigen.

Tabelle 6 Übersicht über Probleme und Optimierungspotenziale des Prototyps der Schneckenrostfeuerung.

Optimierungspotenzial	Lösungsansatz
O ₂ Schwankungen	Optimieren der O ₂ -Regelung
Kaminzug-Schwankungen	Optimierung des Regelkreises bzw. Einbauen eines Zugreglers
Messung der Primär- und Sekundärluftmassen	Messsignale ungenau und evtl. Drift, daher Einbau von genaueren Sensoren und/oder bessere Kalibrierung
Zellrad für Pellets zu gross	Kleineres Zellrad für präzisere Leistungsregelung
Brennkammervolumen für Teillast zu gross und Brennkammer-Montage aufwändig	Optimieren für Teillastbetrieb und Konstruktion für leichtere Montage (aktuell je Hälfte ca. 30 kg, besser mehrteilige Lösung)
Primär- und Sekundärlufführung mit zu engen Querschnitten	Konstruktion mit grösseren Kanalquerschnitten zur Reduktion des Druckverlustes und der Ventilatorleistung mit.
Entaschung unter Rost (Dichtheit)	Wichtiges Thema da es ansonsten die Primärluft über die Rostentaschung gedrückt wird und somit nicht an der richtigen Stelle wirkt
Glutbetthöhenüberwachung eingeschränkt, da die Lichtschranke immer voll wird	Verbesserung der Glutbetthöhenüberwachung bzw. deren Regelung
Aufbau und Demontage des Brenners sind aufwändig	Optimierung der Konstruktion für einfachere Montage



5 Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus dem Testbetrieb der Prototypanlagen zeigen, dass die Nutzung von aschereichen mit dem Prinzip der Schneckenrostfeuerung möglich ist und dass durch geeignete Optimierung der Brennkammergeometrie und Sekundärlufteindüsung ein Betrieb mit niedrigen Schadstoffemissionen erzielt werden kann. Daneben konnten die im Projekt entwickelte und in Publikationen dokumentierten Methoden zum Scale-up von Feuerungsanlagen anhand von Messergebnissen validiert werden und stehen für weitere Entwicklungen von Holzfeuerungen zur Verfügung.

6 Weiteres Vorgehen

Die Untersuchungen des Schneckenreaktors als erste Konversionseinheit einer Feuerungsanlage sind abgeschlossen. Aufgrund der Ergebnisse wird eine Kommerzialisierung als technisch machbar beurteilt, wegen seit Projektstart veränderter Rahmenbedingungen zur Zeit aber nicht weiter verfolgt.

Das Prinzip der Brennstoffumwandlung in einer Schnecke kommt aber auch als Konversionssystem für eine unvollständige Umwandlung des Kohlenstoffs infrage, bei dem ein brennbares Gas und ein fester, kohlenstoffhaltiger Rückstand in Form von Koks produziert werden. Entsprechende Systeme wurden zum Beispiel als Anlagen zur Pyrolyse von Biomasse und Abfallstoffen entwickelt ([15], [16]). In der Zwischenzeit besteht auch ein Bedarf an der Produktion von Pflanzenkohle, die für Anwendungen ausserhalb der Energieerzeugung (zum Beispiel in der Landwirtschaft) geeignet ist. Aus diesem Grund sind weitere Untersuchungen zur Adaption des Schneckenreaktors zur Produktion von Pflanzenkohle von Interesse.

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das schweizerische Projekt wurde in einer Zusammenarbeit von Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Verenum und SCHMID AG energy solutions durchgeführt. Im Rahmen des SCCER Biosweet erfolgte zudem eine Zusammenarbeit zur Verbrennungsmodellierung mit Partnerinstitutionen im SCCER.

Das ERANET-Projekt wurde in Zusammenarbeit mit folgenden Partnerinstitutionen durchgeführt :

- BEST Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH, Wieselburg, Österreich (Projektleitung) (bis 2019: BIOENERGY 2020+ GmbH)
- Graz University of Technology (TUG), Institute for Thermal Engineering, Österreich (Modellierung)
- Umea University, Schweden (Brennstoff- und Ascheeigenschaften)
- Lulea University of Technology (LTU), Schweden (Brennstoff- und Ascheeigenschaften)
- Arterm AB, Schweden (Feuerungshersteller, andere Bauart für Versuche in Schweden)
- Ligno Heizsysteme GmbH (Ligno), Zöbern, Österreich (Feuerungshersteller, 33 kW Prototyp).

8 Kommunikation

In der Schweiz wurde das Projekt am Holzenergie-Symposium und an der SCCER Biosweet Conference vorgestellt. International wurden wissenschaftliche Teile an den europäischen Biomasse-Konferenzen (EU Biomass Conference und Central European Biomass Conference) präsentiert. Daneben wurden die Erkenntnisse in der IEA Bioenergy Task 32 eingebracht.



9 Publikationen

Peer reviewed journal articles

- [1] Barroso, G.; Roth, S.; Nussbaumer, T.: Investigation of biomass conversion on a moving grate by pyrolysis gas analysis and fuel bed modelling, *Energy* 174 (2019) 897–910, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219304062>
- [2] Barroso, G.; Hediger, L.; Nussbaumer, T.: Modelling and validation of biomass combustion in a screw burner, *Fuel*, Volume 254, 15 October 2019, 115672, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115672>
- [3] Barroso, G.; Nussbaumer, T.; Ulrich, M.; Reiterer, T.; Feldmeier, S.: Scale-up methodology for automatic biomass furnaces, *Journal of the Energy Institute*, 14 June 2019, <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.06.006>

Konferenz- und Tagungsbeiträge

- [4] Nussbaumer, T.: Biomass combustion: Challenges and contribution to the future energy supply, Biomass for Swiss Energy Future Conference 2016, SCCER Biosweet, Brugg, 7 September 2016
- [5] Barroso, G.; Roth, S.; Nussbaumer, T.: Development and Validation of a Combined 1D-Fuel-Bed- and 3D-CFD-Model for the Simulation of Moving Grate Boilers, 25th European Biomass Conference and Exhibition, Stockholm, 12–15 June 2017 Paper W13976
- [6] Barroso, G.; Reiterer, T.; Ulrich, M.; Feldmeier, S.; Nussbaumer, T.: Schneckenrostfeuerung, 15. Holzenergie-Symposium. ETH Zürich 14.9.18, Bundesamt für Energie, Verenum Zürich, 89–110
- [7] Wopienka, E. et al.: GrateAdvance - Advanced adjustable grate solutions for future fuel flexible biomass combustion technologies, 6th European Biomass Conference and Exhibition, Graz, 22–24 January 2020

10 Literaturverzeichnis

- [8] Thees, O.; Kaufmann, E.: Energieholzpotenziale im Schweizer Wald, *Schweiz. Z. Forstwes.* 164 (2013), 12: 351-364
- [9] Müller, B.: Luftreinhalte-Verordnung (LRV): Anpassungen an den Stand der Technik, 14. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich, 16.9.2016, www.holzenergie-symposium.ch
- [10] Oser, M.; Nussbaumer, T.: Low particle furnace for wood pellets based on advanced staged combustion, *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*, Volume 1, CPL Press, Newbury Berks (UK), 2006, ISBN 1-872691-97-8, 215–227
- [11] Nussbaumer, T.: Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction, *Energy & Fuels*, 2003, pp. 1510 – 1521.
- [12] Feldmeier, S.; Wopienka, E.; Schwarz, M.; Pfeifer, C.: Utilization of various non-woody biomass fuels in an innovative multi-fuel combustion concept, *European Biomass Conference and Exhibition 2018*, Copenhagen
- [13] Margason, R: Fifty Years of Jet in Cross Flow Research; NASA Ames Research Center, USA; 1993.
- [14] Nussbaumer, T.; Kiener, M.; Horat, P.: Fluid dynamic optimization of grate boilers with scaled model flow experiments, CFD modeling, and measurements in practice, *Biomass and Bioenergy*, 76:11-23; 2015
- [15] Meier, D.: Reaktoren mit Doppelschnecke. In: *Energie aus Biomasse*, 2. Auflage, Springer 2009, 680
- [16] Dahmen, N.; Dinjus, E.; Henrich, E.: Synthesis gas from biomass – problems and solutions en route to technical realization. *Oil & Gas European Magazine*, 1/2007, 31, (2007)