

Bio masse feuerungs- anlagen

Cover Illustration: Stefanie Hilgarth

VORWORT	Seite 03
----------------	----------

Entwicklung einer Versuchsfeuerung mit optimiertem Wärmetauscher zur Integration eines Stirling-Moduls	Seite 05
---	----------

Es wird eine Pellets-Versuchsfeuerung zum Betrieb eines integrierten 5 kWel Stirling-Motors entwickelt. Durch einen Wärmetauscher und eine Verbrennungsluftvorwärmung durch Abgaswärmerückgewinnung werden dabei für Biomasse betriebene Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsmaschinen bisher unerreichte Effizienzen erlangt.

Strom- und Wärmegenerierung aus Biomasse mittels einer neuartigen Pellet-befeuerten Mikro-KWK	Seite 15
--	----------

In diesem Projekt soll ein neues Konzept einer Pellet-befeuerten Mikro-KWK mit bis zu 10 kWel und 60 kWth – das einen Rankine-Prozess mit Wasser als Arbeitsmedium und eine innovative Expansionsmaschine zur „Kraft-Generierung“ nutzt – untersucht werden.

Entwicklung der nächsten Generation von sauberen Kaminöfen	Seite 25
---	----------

In diesem Projekt sollen neue Technologien bzw. Komponenten für Scheitholz-Kaminöfen entwickelt und getestet werden, die zu maßgeblichen Emissionsreduktionen und Wirkungsgradsteigerungen führen.

Modellbasierte Regelung von Scheitholzkesseln mit Pufferspeichern	Seite 33
--	----------

Das Ziel des Projektes - die komplette Neuentwicklung einer modellbasierten Regelung für Scheitholzkessel mit Pufferspeichern - stellt einen Technologiesprung in Richtung einer drastischen Reduktion der Schadstoffemissionen bei gleichzeitiger Erhöhung des Nutzungsgrades und Benutzerkomforts dar.

Entwicklung eines heiztechnischen Prüfverfahrens für Scheitholzöfen mit hoher Praxisrelevanz	Seite 43
---	----------

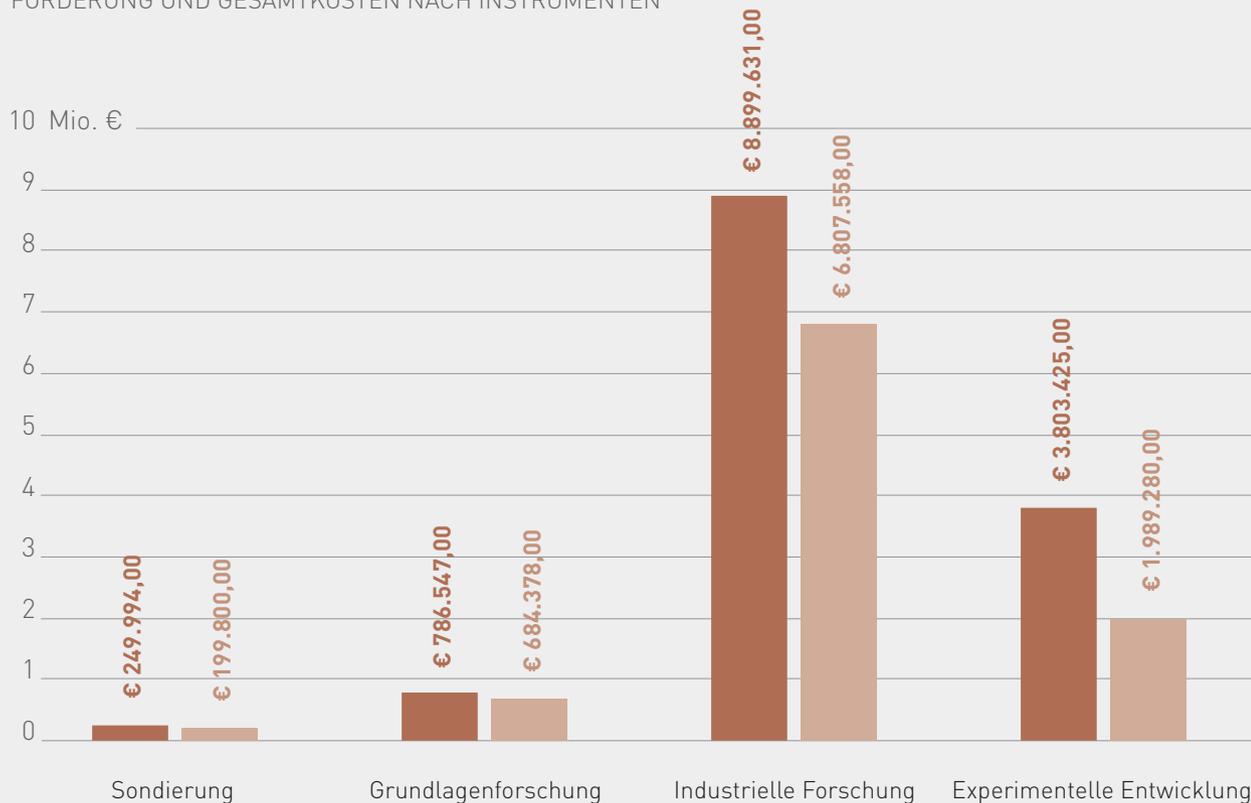
Ziel des Projekts ist es, ein neues Prüfverfahren zu entwickeln und zu testen, welches eine praxisrelevante Bewertung von Scheitholzöfen ermöglicht. Dadurch wird erstmals eine Produktdifferenzierung in Bezug auf den Praxisbetrieb erreicht.

Modellbasierte Regelung und Elektrofilterintegration zur schadstoffarmen Verbrennung	Seite 51
---	----------

Im Zuge dieses Projektes werden die Grundlagen zur Entwicklung einer brennstoffflexiblen, emissionsarmen und hocheffizienten Biomassefeuerung geschaffen. Dies wird ua. durch den Einsatz innovativer modellbasierter Regelungsstrategien, einer Steigerung der Anlageneffizienz sowie Reduktion von Emissionen und durch Optimierung der Verbrennungsbedingungen erreicht.

Alle geförderten Projekte im Überblick	Seite 60
---	----------

FÖRDERUNG UND GESAMTKOSTEN NACH INSTRUMENTEN



QUELLE:

Klima- und Energiefonds, Stand: Februar 2016



„Bioenergietechnologien haben das Potenzial, in zukünftigen Energieszenarien eine wesentliche Rolle zu spielen. Der Klima- und Energiefonds unterstützt deshalb intensiv mit seinem Energieforschungsprogramm die Entwicklung und Erprobung von innovativen Technologiekonzepten zur effizienten und umweltschonenden Nutzung von Biomasse.“ THERESIA VOGEL, GESCHÄFTSFÜHRERIN DES KLIMA- UND ENERGIEFONDS

Wärme wächst nach

“Wohltätig ist des Feuers Macht, wenn sie der Mensch bezähmt, bewacht“ heißt es in Friedrich Schillers „Lied von der Glocke“.

Auf dem Weg vom wärmenden Lagerfeuer zur innovativen Biomassefeuerung konnten zunehmend bessere Wirkungsgrade erzielt werden. Aufgrund intensiver Forschungstätigkeiten haben österreichische Unternehmen einen anerkannten hohen Stand der Technik erreicht. Mit typischen Exportquoten von ca. 70% sorgen sie weltweit für wohlige Wärme.

Seit 2007 unterstützte der Klima- und Energiefonds zukunftsweisende Entwicklungen bei Biomassefeuerungen mit rund 10 Millionen Euro. Die aktuellen Forschungsanstrengungen der heimischen Technologieentwickler fokussieren auf neue Feuerungskonzepte, Integration von Speichermaterialien, intelligenter Verbrennungs- und Leistungsregelung sowie die Verbrennung von aschereichen Brennstoffen. Auch die Entwicklung von marktfähigen Klein- und Mikro-KWK Systemen ist Gegenstand laufender Forschungsaktivitäten.

Eine aufschlussreiche Lektüre wünscht Ihnen

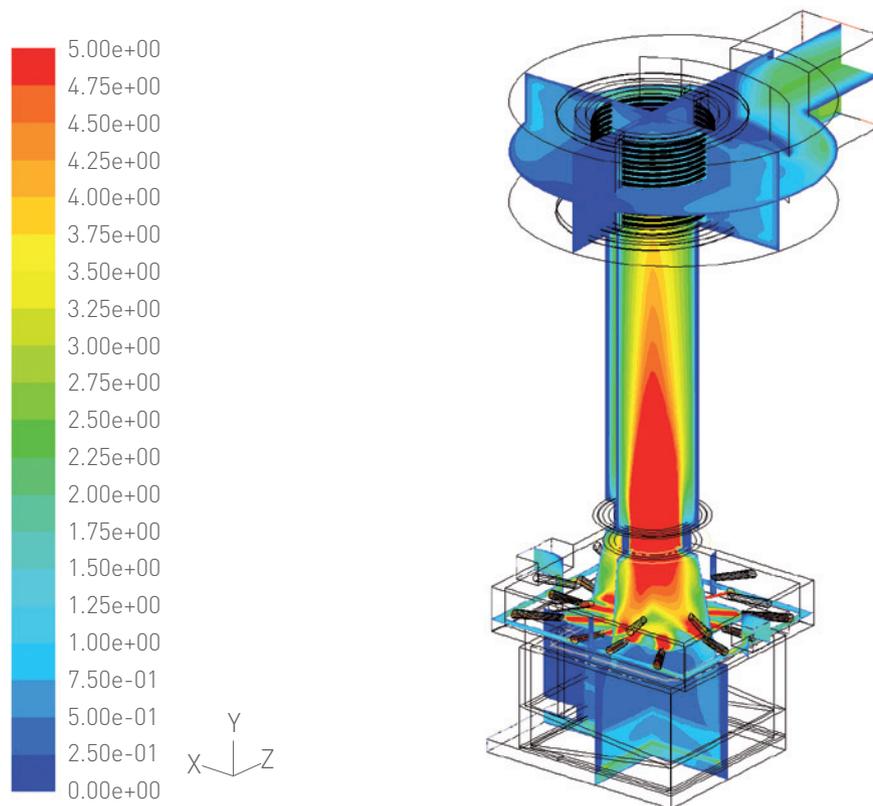
Ihr Klima- und Energiefonds



Projektleitung: ERNST HÖFTBERGER
BIOENERGY 2020+ GmbH

Computational Fluid Dynamic (CFD) Simulation

ABBILDUNG 1



Contours of Velocity Magnitude [m/s]

Dec 12, 3013
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, spe, rke)

StirBio

Entwicklung einer Versuchsfeuerung mit optimiertem Wärmetauscher zur Integration eines Stirling-Moduls

Ausgangssituation

Stirling-Motoren wird ein sehr hohes Marktpotenzial, besonders für Kleingewerbebereiche und den Haushaltssektor, zugeschrieben. Langfristig könnte der Markterfolg der Stirling-Technik nicht zuletzt in der Möglichkeit liegen, kostengünstige erneuerbare Energieträger auf Biomassebasis zu nutzen. Da beim Stirlingmotor, im Gegensatz zum Otto- oder Dieselmotor, die Verbrennung extern stattfindet, ist er auch für feste Brennstoffe wie Holzpellets, Holzhackschnitzel und Scheitholz geeignet. Damit könnte nicht nur ein wachsender Markt in waldreichen Ländern Europas und Nordamerikas, sondern auch in Entwicklungs- und Schwellenländern erschlossen werden. Deshalb konzentrieren sich die Entwicklungsaktivitäten am Stirling-Motor inzwischen auch auf feste Holzbrennstoffe. Die Übertragung der Wärme aus dem Abgasstrom einer Biomassefeuerung auf das Arbeitsgas im Stirling-Motor ist dabei die größte Herausforderung. Da die Wärmeübertrager mit den aschebeladenen Abgasen direkt beaufschlagt werden, muss der Aufbau einer Ascheschicht verhindert oder zumindest verzögert werden, um einer Verminderung der Wärmeübertragung und damit des Wirkungsgrads vorzubeugen. Zudem hat die Praxis gezeigt, dass die – sich auf der Wärmeübertrageroberfläche ablagernden – Asche-Anteile korrosiv wirken können. Um die Wärmeübertragerverschmutzung und -korrosion zu begrenzen, sehen die meisten Hersteller asche- und chlorarme Brennstoffe vor; im größeren Leistungsbe- reich werden auch automatische Reinigungssysteme erprobt.

Ziel des Projekts

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung und der erfolgreiche Test einer Pellets-Versuchsfeuerung zum Betrieb eines integrierten 5 kWel Stirling-Motors mit bisher unerreichter elektrischer Effizienz.

Dieses Ziel erfordert einerseits die vollständige Integration des Stirlingmotors in eine Feuerungsanlage, die in Bezug auf hohe Verbrennungsgastemperaturen, durch Abgaswärmerückgewinnung und niedrige partikelförmige Emissionen optimiert ist. Anforderungen von hohen Verbrennungsgastemperaturen wie die thermische Belastung der Materialien, Bildung von thermischen NO_x und Schlacke werden dabei berücksichtigt.

Dieses Ziel erfordert andererseits die Entwicklung eines für Biomasseheißgase optimierten Erhitzer-Wärmetauscher mit Reinhalte- und Abreinigungskonzept, optimalen Wärmeübergangseigenschaften und einem Störungsmanagement zum Schutz vor Überhitzung. Darüber hinaus muss der Stirlingmotor geringe Kolbenreibung aufweisen.

Als Projektergebnis wurde ein optimal abgestimmtes Biomasse-Pelletsessel-Stirling-System mit bisher unerreichtem elektrischen Wirkungsgrad von 15% bei einer elektrischen Dauerleistung von 5 kWel erwartet. Erste Betriebserfahrungen sollten zusätzliche Erkenntnisse für nachfolgende Entwicklungsschritte liefern.

Methodische Vorgehensweise

Eine umfangreiche Recherche und Analyse von Vor- und Nachteilen von bestehenden Feuerungssystemen mit ähnlichen Anforderungen bildete die Grundlage

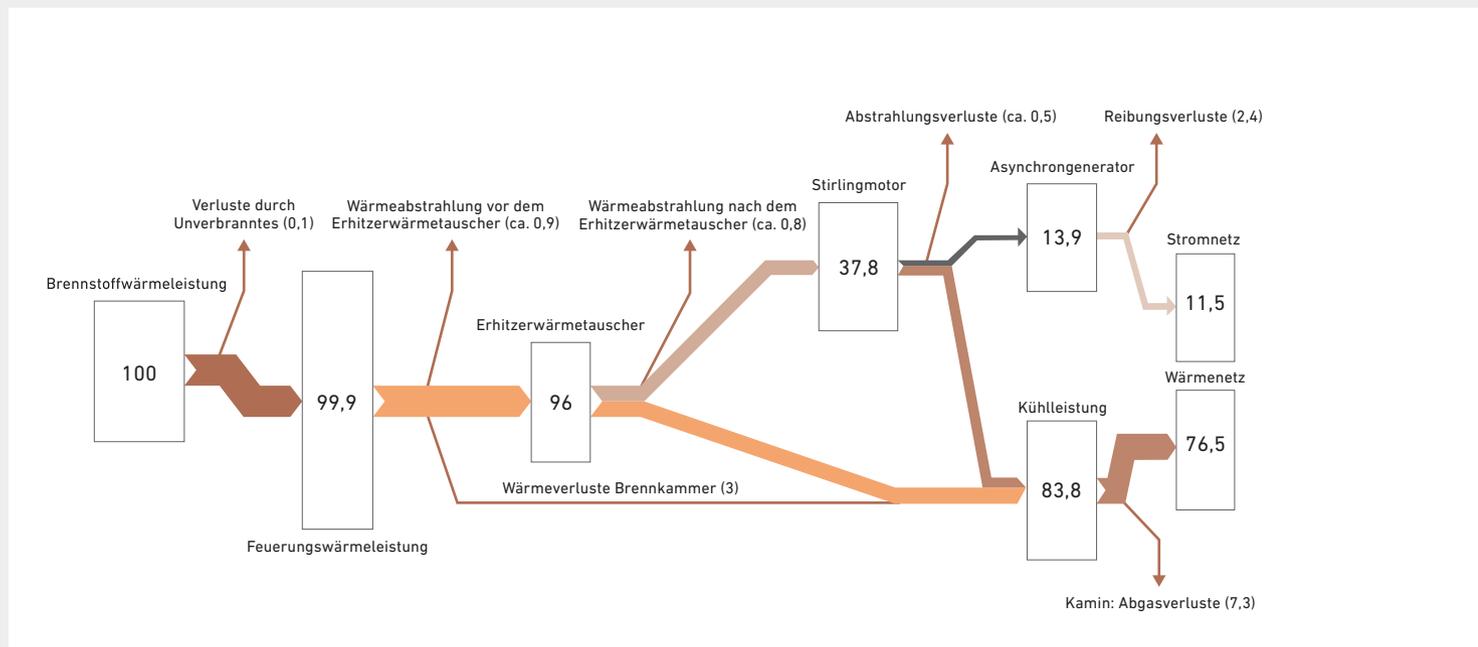
Versuchsteam bei der Inbetriebnahme

ABBILDUNG 2



Energieflussdiagramm

ABBILDUNG 3



für den Entwurf der ersten Versuchsfeuerungsanlage. Mittels Brainstorming von allen beteiligten Projektpartnern wurden Ideen und Vorschläge gesammelt und erste Entwurfsskizzen des Brenners gezeichnet. Für die weitere Konzipierung des Brenners wurde eine Computational Fluid Dynamic (CFD) Simulation eingesetzt. Diese ermöglichte die Simulation des Brennraumes, der Luftvorwärmung sowie des Verbrennungsgasstroms über den Erhitzerwärmetauscher und die dabei ablaufenden Reaktionen und Mischungsvorgänge der einzelnen Gasströme (Primär-, Sekundärluft).

Weiters konnte die Ausnutzung des Brennraums, die Geschwindigkeitsverteilung und die Auswirkung auf den Ascheflug berechnet werden.

Die Materialauswahl für die erste Versuchsanlage erfolgte aufgrund der getroffenen Materialspezifikationen und den rechnerischen bzw. per Simulation ermittelten Ergebnissen. Mit dieser Versuchsanlage A, welche mit einem radial durchströmten Wärmetauscher betrieben wurde, wurden sodann die ersten Betriebserfahrungen gesammelt. Die gesammelten Erkenntnisse bildeten die Basis für die Planung der Versuchsanlage B. Details im Bereich des Wärmetauschers wurden mithilfe einer CFD-Simulation evaluiert. Im Anschluss wurde Versuchsanlage B mit einem axial durchströmten Wärmetauscher und einer Vorwärmung der Sekundärluft ausgeführt.

Mit der Versuchsanlage B wurden dann nach einer ersten Inbetriebnahmephase noch folgende spezifische Versuche bzw. Evaluierungen durchgeführt:

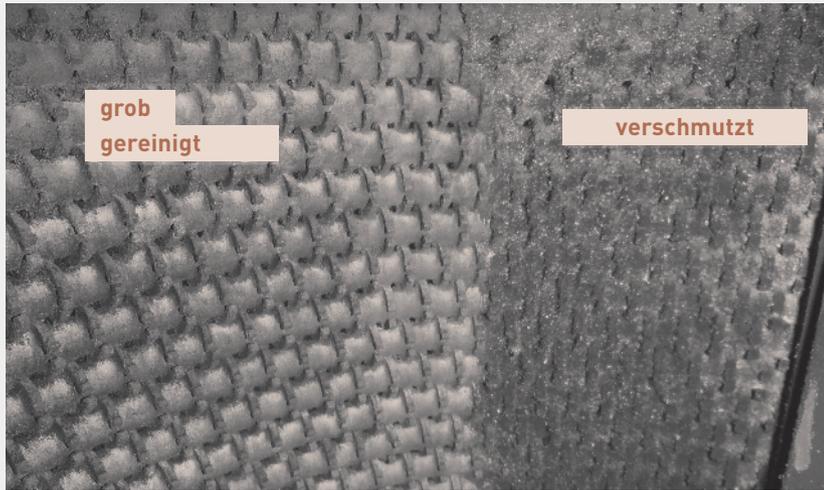
- Emissionsmessungen nach EN 303-5: Dies ist eine Norm, die die zulässigen Emissionen von Heizkessel regelt. Für die mit Pellets befeuerte Versuchsanlage zum Betrieb eines Stirlingmotors wurde in dem Projekt der gleiche hohe Anspruch gestellt. Die gasförmigen Emissionen CO_2 , CO und O_2 wurden nach dem nichtdispersive-IR-Absorption Prinzip (NDIR) bzw. mittels elektro-chemischen

Zellen gemessen. Die organischen Kohlenwasserstoffe wurden mittels Flammenionisationsdetektoren (FID) erfasst. Für die Bestimmung von partikelförmigen Emissionen wurde das gravimetrische Staubmessverfahren nach VDI 2066-1 angewendet.

- Zur Evaluierung des Langzeitverhaltens wurde ein 100h Dauerversuch durchgeführt und der Einfluss der Verschmutzung des Wärmetauschers auf die elektrische Effizienz der Mikro-KWK-Anlage evaluiert.
- Der Erhitzerwärmetauscher wurde sowohl auf der Arbeitsgasseite als auf der Verbrennungsgasseite mit Hilfe diverser Berechnungsmethoden optimiert. Der Fokus lag dabei auf den verwendeten Materialien, einer hitzebeständigen Füge-technik (Hochtemperatur-Lötverfahren), der Art der Berippung für eine leichte Reinigbarkeit und einer kompakten Bauweise.
- Die Reinigbarkeit des Wärmetauschers wurde durch eine geeignete Geometrie gewährleistet. Ein in der Zwischenzeit zum Patent eingereichtes Reinigungskonzept wurde entwickelt (Deutsche Patentanmeldung 10 2015 120 801.6).
- Eine optische Analyse der eingesetzten Wärmetauscher wurde nach den Versuchsläufen durchgeführt, um etwaige, mit freiem Auge erkennbare Anzeichen eines großen korrosiven Angriffs zu erkennen.
- Eine FMEA-Analyse zur Bewertung von möglichen Störfällen wurde durchgeführt. Um zB. Schäden am Erhitzerwärmetauscher bei einer Störung der Stirlingmaschine zu vermeiden muss der Wärmetauscher umgehend vor Überhitzung geschützt werden.
- Bei Netzstromausfall muss der Generator der Maschine aus Schutzgründen vom Netz getrennt werden. Die Elemente Saugzuggebläse des Brenners und Umwälzpumpe des Stirlings müssen weiter betrieben werden. Dies wird durch eine unterbrechungssichere Stromversorgung (USV) gewährleistet.

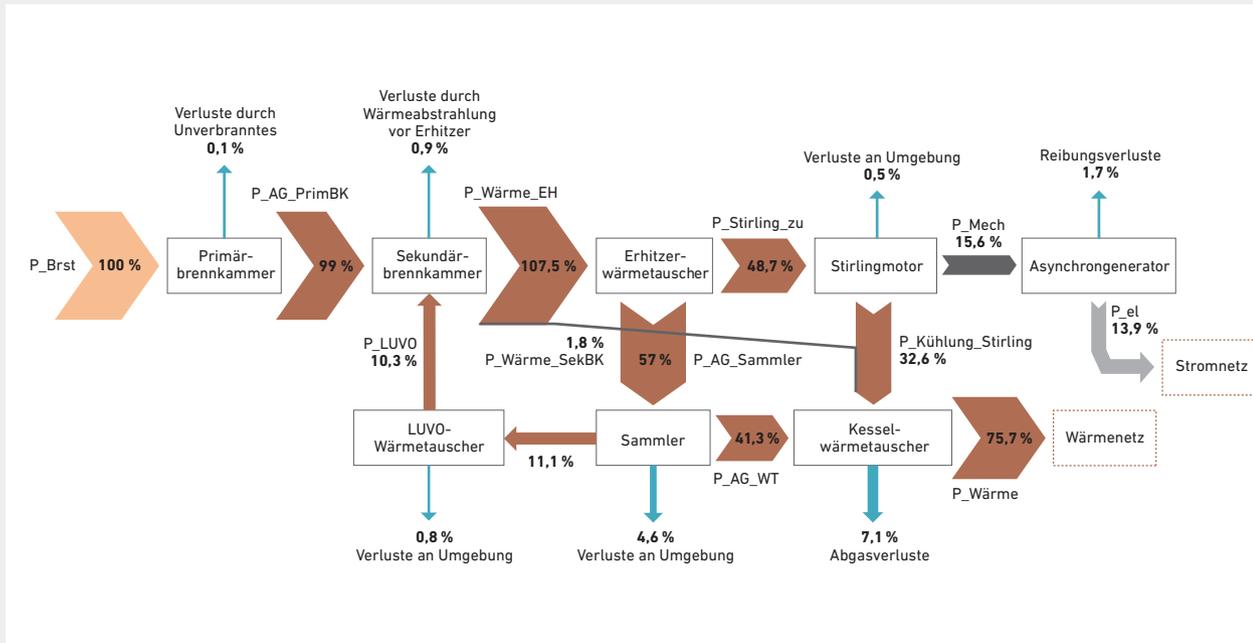
WT-Versuchsanlage A

ABBILDUNG 4



Energieflussdiagramm Versuchsanlage B

ABBILDUNG 5



Ergebnisse

Versuchsanlage A

Bei den Versuchen mit der Versuchsanlage A wurden 2 prinzipiell unterschiedliche Konfigurationen getestet. Die Inbetriebnahme und erste Evaluierung fand ohne Luftvorwärmung (LUVO) statt. Im weiteren Verlauf wurde eine elektrische Luftvorwärmung der Sekundärluft vorgenommen. Mit dieser Maßnahme konnte eine mögliche Sekundärluftvorwärmung durch das Abgas nach dem Stirlingwärmetauscher simuliert werden. Darüber hinaus wurden unter Anderem noch weiterführende Untersuchungen hinsichtlich Dichtigkeit, Konfiguration des Erhitzerwärmetauschers, Optimierung der Sekundärluftzufuhr und der Primärkammer und Entwicklungen am Stirling durchgeführt.

Eckdaten der Versuchsanlage A

Stirlingmotor A600V3

- Typ: Alpha-Stirling
- Verdrängtes Volumen: 600 ccm
- Nennleistung: 5 kWel
- ca. 36% mech. Stirlingwirkungsgrad

Erhitzer-Wärmetauscher

- 15 kW Übertragerleistung bei 1050 - 1100°C (mit LUVO ca. bei 1150°)
- Erwärmung der Prozessgastemperatur auf 650°C

Pelletfeuerung

- 35 kW Brennstoffwärmeleistung
- Rostfeuerung mit seitlichen Einschub
- Hohe Luftstufung Primär/Sekundär
- isolierte Brennkammer

Mit dieser Feuerung konnten mit erhöhter Brennstoffwärmeleistung Spitzenwerte bei der elektrischen Leistung von beinahe 5 kWel erreicht werden. Die mittlere elektrische Effizienz bei Nennleistung lag bei ca. 11,5%. Energieflussdiagramm siehe Abbildung 3.

Beim Betrieb mit elektrischer Luftvorwärmung wurde die Sekundärlufttemperatur von 20° auf 300°C erhöht, wodurch die Prozessgastemperatur um durchschnittlich 40°C gesteigert werden konnte. Da bei der Versuchsanlage A noch ein Wärmeverlust der vorgewärmten Sekundärluft, innerhalb des SL-Kanals zur Brennkammer, an das Kesselwasser stattfand, konnte die Brennkammertemperatur nicht im erhofften Ausmaß gesteigert werden. Die elektrische Leistung erhöhte sich dadurch auf ca. 12%, eine verbesserte Isolierung der Brennkammer steigerte den Wirkungsgrad auf ca. 13%.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus diesen Versuchen ist auch, dass der am Wärmetauscher abgelagerte Partikelstaub einfach abreinigbar ist und nicht anhaftet. Die Problematik der Wärmetauscherverunreinigung und damit einhergehend der Reduktion des Wärmetransports, aber auch die einfache Reinigbarkeit ist in (Abbildung 4) anschaulich dokumentiert.

Weiters zeigte eine optische Kontrolle des Erhitzerwärmetauschers keine erkennbaren Korrosionsangriffe oder Anbackungen. Zusammenfassend konnten folgende Erkenntnisse rund um den Wärmetauscher mit den Versuchen an der Versuchsanlage A gewonnen werden:

POSITIV

- Weniger Staubbelastung durch langsame Steigerung der Brennstoffwärmeleistung beim Start
- Analyse der Asche am Erhitzer-Wärmetauscher ergab einen Anteil organischen Kohlenstoff unter der Nachweisgrenze von 0,1% -> vollständiger Ausbrand
- Keine Probleme mit Schmelzasche
- Staub konnte innerhalb 3 - 5 Minuten mit Druckluft/ Pinsel entfernt werden

maxWG_elWG_T_Prozess

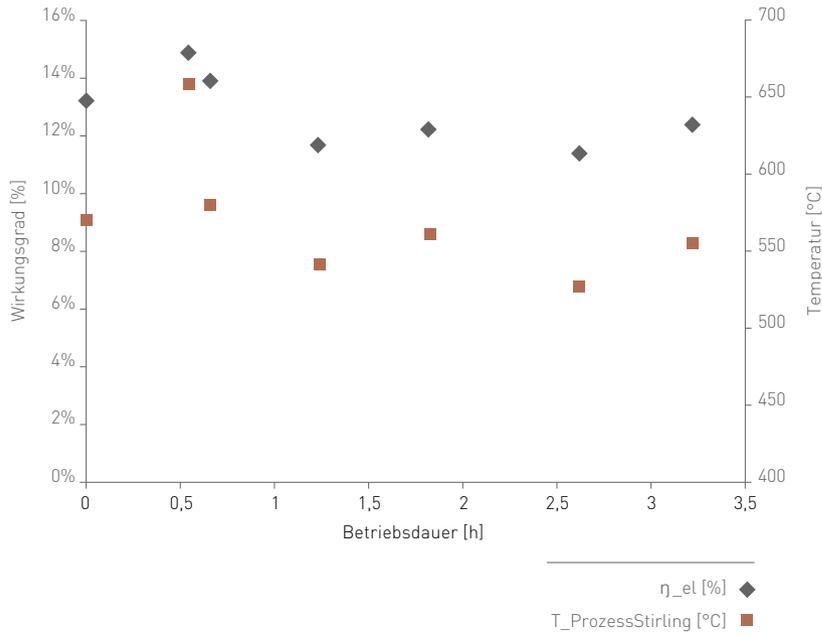


ABBILDUNG 6

Vergleich der Versuchsanlagen A und B

TABELLE 1

	Formel		Anlage A	Anlage B	Zielwerte	Durchgeführte Optimierungen
Wärmeauskopplung Erhitzer-WT	$\frac{P_{\text{Stirling_zu}}}{P_{\text{WärmeEH}}}$	%	39,4	45,3	42	Höhere Temperaturen Anströmung Erhitzer
Generatorwirkungsgrad	$\frac{P_{el}}{P_{mech}}$	%	83	89,1	90	Effizienter Asynchrongenerator
Luftvorwärmungsgrad	$\frac{P_{LUVO}}{P_{Brst}}$	%	0	10,3	10	Einbau einer Luftvorwärmung
Wärmeverluste vor dem Erhitzer Wärmetauscher	$\frac{P_{\text{Verluste BK}}}{P_{Brst}}$	%	4	1,8	3,6	Isolierung der Primärbrennkammer
elektrischer Stirling-Wirkungsgrad	$\frac{P_{el}}{P_{Brst}}$	%	11,5	13,9	15	Resultat der anderen Maßnahmen
Gesamtwirkungsgrad	$\frac{P_{el} + P_{Wärme}}{P_{Brst}}$	%	88	89,6	91	Kesselwärmetauscher optimieren

NEGATIV

- Steigender Druckverlust über den Erhitzerwärmetauscher signalisiert Verschmutzung: ca. 12 Pa/h
- 3 - 4 g Partikelablagerungen bereits nach 4 Betriebsstunden
- Eine ungleichmäßige Staubablagerungen führte zunehmend zu einer ungleichmäßigeren Durchströmung des Wärmetauschers und dadurch auch zu einer Reduzierung der wirksamen Wärmeübertragerfläche

Versuchsanlage B

Bei der Konstruktion der Versuchsanlage B wurden folgende Maßnahmen zur Optimierung in Betracht gezogen und größtenteils umgesetzt:

- Erhöhung des Brennkammerquerschnitts, um den Austrag von Aschepartikel durch geringere Gasgeschwindigkeiten zu reduzieren
- Adaptierung der Wärmetauschergeometrie, um die Partikelabscheidungsrate zu reduzieren, eine gleichmäßigere Anströmung und eine optionale Reinigungseinrichtung zu ermöglichen
- Stärkere Isolierung der Brennkammer, Sekundärluftvorwärmung und eine Reduktion des Luftüberschusses, um eine Erhöhung der Verbrennungs- und somit auch der Prozessgastemperaturen zu erreichen

Die durchgeführten Adaptierungen ermöglichten eine Erhöhung der erreichten elektrischen Effizienz auf beinahe 14%. Der Hauptbeitrag dazu kommt durch die Luftvorwärmung zustande. Weiters wirkten sich die verbesserte Dämmung der Brennkammer positiv auf die erreichbaren Verbrennungstemperaturen aus. Das resultierende Energieflussdiagramm ist in Abbildung 5 dargestellt.

Kurzzeitig konnten am Beginn eines Versuches bei gereinigtem Erhitzerwärmetauscher und einen optimierten Luftüberschuss sogar Werte von ca. 15% erreicht werden (Abbildung 6).

Eine Vergleichende Darstellung einiger wichtiger Ergebnisse der Versuchsanlagen A und B ist in Tabelle 1 gegeben.

100h Dauerversuch

Mit einem 100 Stunden Dauerversuche konnte nachgewiesen werden, dass der Stirlingmotor für einen Dauerbetrieb geeignet ist. Der Prozessgastemperatur- und Effizienzverlauf während dieses Versuchs ist in (Abbildung 7) dargestellt.

Die Temperatur des Prozessgases und damit auch die elektrische Effizienz im Stirling-Modul nimmt aufgrund zweier Effekte während des Versuchs stetig ab. So fällt die elektrische Effizienz des KWK-Systems von 13% am Beginn des Versuchs bei gereinigtem Wärmetauscher auf ca. 3% nach 114 h Betrieb.

1. Ascheschicht: Im Vergleich zur Versuchsanlage A mit dem radial durchströmten Erhitzerwärmetauscher ist der Druckverlustanstieg durch die Ascheschicht bei der axialen Durchströmung des Wärmetauschers deutlich. Anschaulich dargestellt ist dies in Abbildung 8.
2. Bypass am Erhitzerwärmetauscher vorbei: In Abbildung 8 ist weiters zu erkennen, dass nach ca. 70 h ein Knick im zeitlichen Verlauf des Druckverlustes auftritt. Dies deutet auf die Ausbildung eines Bypasses zwischen Erhitzer und Sammler hin. Weiters ist dies durch das Ansteigen der Rauchgastemperaturen im Sammler über das Niveau der Materialtemperatur im letzten Drittel des Versuches indiziert.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen die Notwendigkeit für die Implementierung einer automatischen Wärmetauscherabreinigung und die Überarbeitung der Abdichtungsmaßnahmen abgeleitet werden.

T und Eff Stirling

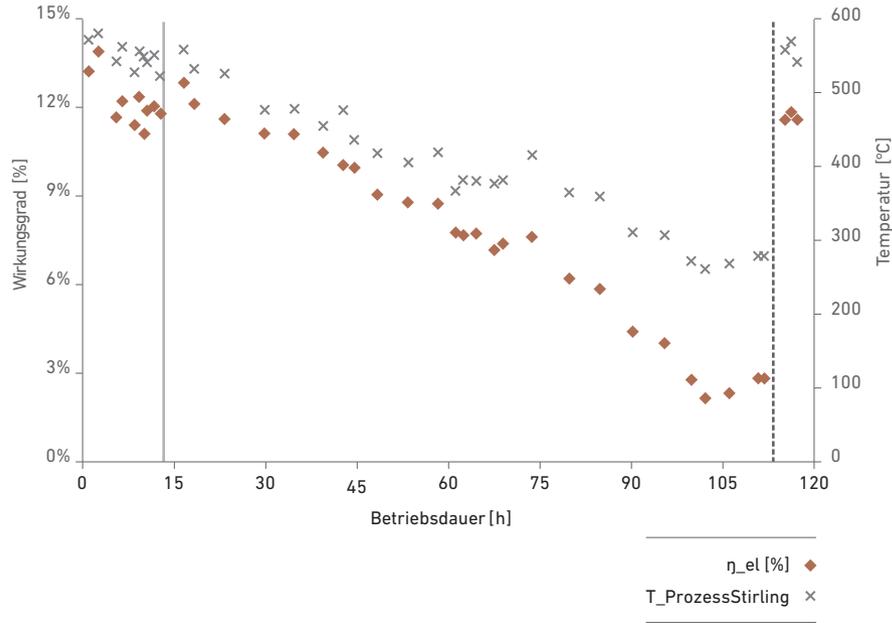


ABBILDUNG 7

Druckverlust und T

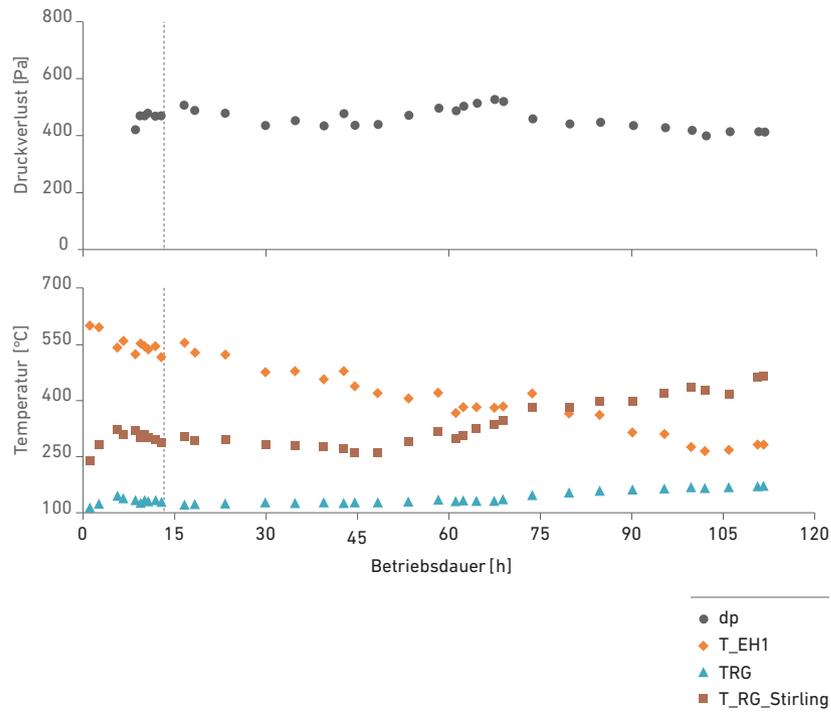


ABBILDUNG 8

Conclusio und Ausblick

Mit den Versuchen an den beiden Versuchsanlagen konnte nachgewiesen werden, dass die gesteckten Ziele einer Stirling-Pellets-KWK-Anlage mit dem gewählten Design erreichbar sind. Für eine kontinuierliche Produktion von elektrischer Energie mit einer Effizienz von ca. 15 % sind aber noch einige Entwicklungsschritte bis zu einer Markttauglichkeit notwendig. An oberster Stelle dazu steht die Entwicklung einer automatischen WT-Abreinigung. Weiters ist es notwendig für die Brennkammer Materialien auszuwählen oder zu entwickeln, die den für eine hohe Effizienz notwendigen Temperaturen bei den gegebenen Gaszusammensetzungen standhalten.

Zusätzlich muss auch noch die sichere dauerhafte Abdichtung der Anlagenkomponenten untereinander aber auch nach außen hin gewährleistet werden. Zu guter Letzt sind auch noch ausgedehntere Versuche notwendig, um eine allfällige Korrosion des Erhitzerwärmetauschers zu erkennen und Gegenmaßnahmen ergreifen zu können.

All diese offenen Probleme sind jedoch mit entsprechendem Mittel- und Personaleinsatz lösbar, weshalb durch dieses Projekt mittelfristig eine Marktpräsenz einer Biomasse-Pellets-KWK-Anlage mit hoher elektrischer Effizienz in greifbare Nähe gerückt ist.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Ein bisher nicht publizierter elektrischer Wirkungsgrad bei μ -KWK-Anlagen auf Basis von fester Biomasse von 15 % konnte erreicht werden
- Der im Projekt eingesetzte Stirling-Motor zeigt einen sehr guten inneren Wirkungsgrad und auch bereits die Tauglichkeit für den Dauerbetrieb
- Es konnte eine Vielzahl an Erfahrungen gesammelt werden, um einen Pellets-Kessel so zu adaptieren, damit eine effiziente Verbrennung in hohen Verbrennungsgastemperaturen für den Betrieb eines Stirling-Motors mündet.



„Mit Biomasse- μ -KWK-Anlagen kann die Speicherung von Sonnenenergie in Form von Holz dazu genutzt werden, im Winter bei geringer Sonneneinstrahlung gleichzeitig Strom und Wärme dezentral zu erzeugen. Die Stirling-Technologie bietet sich für Einsatzgebiete mit hohen Laufzeiten bei maximaler Last an. Durch die Technologie der äußeren Verbrennung eignen sich Stirling-Motoren für den Einsatz von Brennstoffen, die in ihrer Qualität größeren Schwankungen unterliegen bzw. bei denen Asche gebildet wird.“ PROJEKTLEITER ERNST HÖFTBERGER



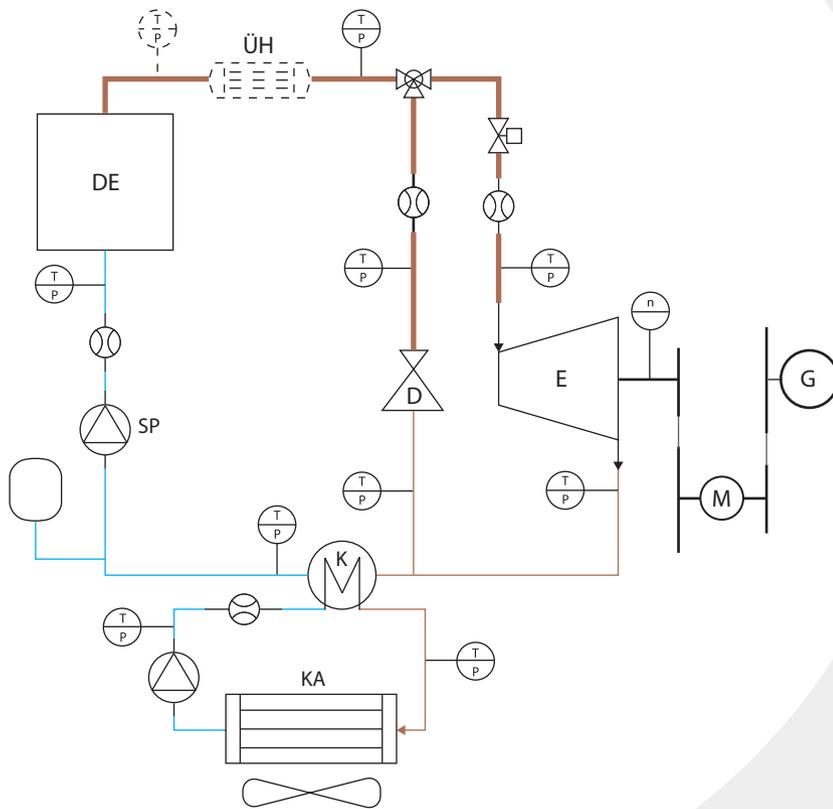


Projektleitung:

JOACHIM KALKGRUBER
SOLARFOCUS GmbH

CRC-Kreislauf für BioPower

ABBILDUNG 1



BioPower

Strom- und Wärmegenerierung aus Biomasse mittels einer neuartigen Pellet-befeuerten Mikro-KWK

Motivation und Innovation

Die Kopplung von Kraft und Wärme bei der energetischen Biomassenutzung eröffnet die – aus exergetischer Sicht – wertvolle Möglichkeit, aus erneuerbaren und in Österreich verfügbaren Festbrennstoffen neben thermischer auch elektrische Energie zu generieren.

Aufbauend auf dem derzeitigen Stand der Forschung und Entwicklung wurde ein innovatives Konzept für die Biomasse-Mikro-KWK mit einem Wasserdampf-Prozess (CRC) und einem neuentwickelten Nassdampf-tauglichen und ölfrei-arbeitenden Rotationskolbenexpander der Fa. EN3 GmbH entwickelt. Dieses Konzept stellt in diesem Leistungsbereich eine Innovation dar. Gegenüber Varianten mit einem ORC können mittels des CRC aufgrund der thermischen Beständigkeit von Wasser höhere Prozesstemperaturen zugelassen und damit eine höhere Effizienz erzielt werden. Des Weiteren benötigt der CRC keinen Thermoöl-Kreislauf und kann daher direkt befeuert werden (Abbildung 1).

Dazu wird ein entsprechendes Funktionsmuster für ca. 10 kW_{el} und bis zu 60 kW_{th} aufgebaut werden. Die Wärme soll dabei bei einem Nutzniveau von ca. 80°C vorliegen. Der CRC wurde so ausgelegt, um ein schnelles Anfahr- und Regelverhalten und eine variable Stromkennzahl zu gewährleisten. Der max. Frischdampfdruck soll 30 bar nicht überschreiten.

Das Projekt umfasst drei Hauptschwerpunkte:

Der erste Schwerpunkt liegt in der Entwicklung eines Pellets-befeuerten Dampfkessels. Dieser liefert die notwendige Dampfmenge in entsprechender Qualität für die nachgeschaltete Expansionsmaschine. Die Expansionsmaschine bildet den zweiten großen Schwerpunkt.

Sie wird parallel zum Dampfkessel entwickelt und erprobt. Dazu wird ein entsprechender CRC-Kreislauf unter den Anforderungspunkten Effizienz, variable Stromkennzahl und Regelbarkeit ‚designed‘. Die ‚Hochzeit‘ des CRC-Kreislaufes mit der Expansionsmaschine in den Dampfkessel stellt den dritten Schwerpunkt dar.

Pellets befeuerter Dampfkessel

Der Pellets befeuerte Dampfkessel stellt bei Volllast ca. 140 kg/h Satttdampf bei 30 bar bereit. Hauptaugenmerk liegt vor allem auf einen geringen Wartungsaufwand, lange Lebensdauer, hohen Wirkungsgrad und niedrige Emissionen. Der Dampfkessel arbeitet in einem Feuerungswärmeleistungsbereich von 30-60 kW modulierend. Aufbauend auf diesen Parametern wurden folgende interne Teilziele definiert:

- Adäquates Kesseldesign entsprechend der Kesselgruppe I für schnelle Anfahrzeit und geringes Füllvolumen (Schnelldampferzeuger)
- Integration einer Reinigungseinrichtung für die Heizflächen zur Vermeidung von Fouling basierend auf realisierten Systemen von Biomasse-Warmwasserheizkesseln
- Minimierung der Schadstoff- und Feinstaubemissionen durch Reduzierung der Glutbetttemperatur mittels Rauchgasrezirkulation
- Neues Teillastregelprinzip mittels modularer Brennstoff- und Luftzufuhr zur Variation des Dampfdrucks und Massenstroms für den CRC-Prozess
- Vermeidung von Nebelströmung in Siederohren

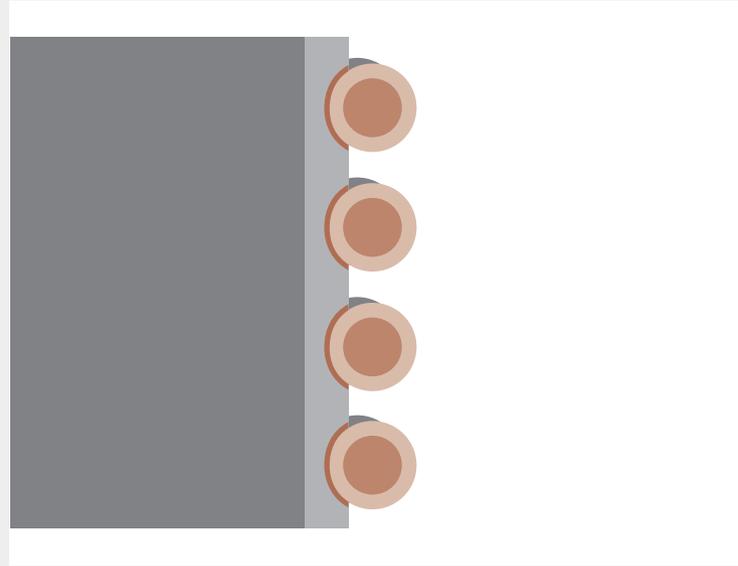
Verdampferturm mit unterschiedlichen Bereichen

ABBILDUNG 2



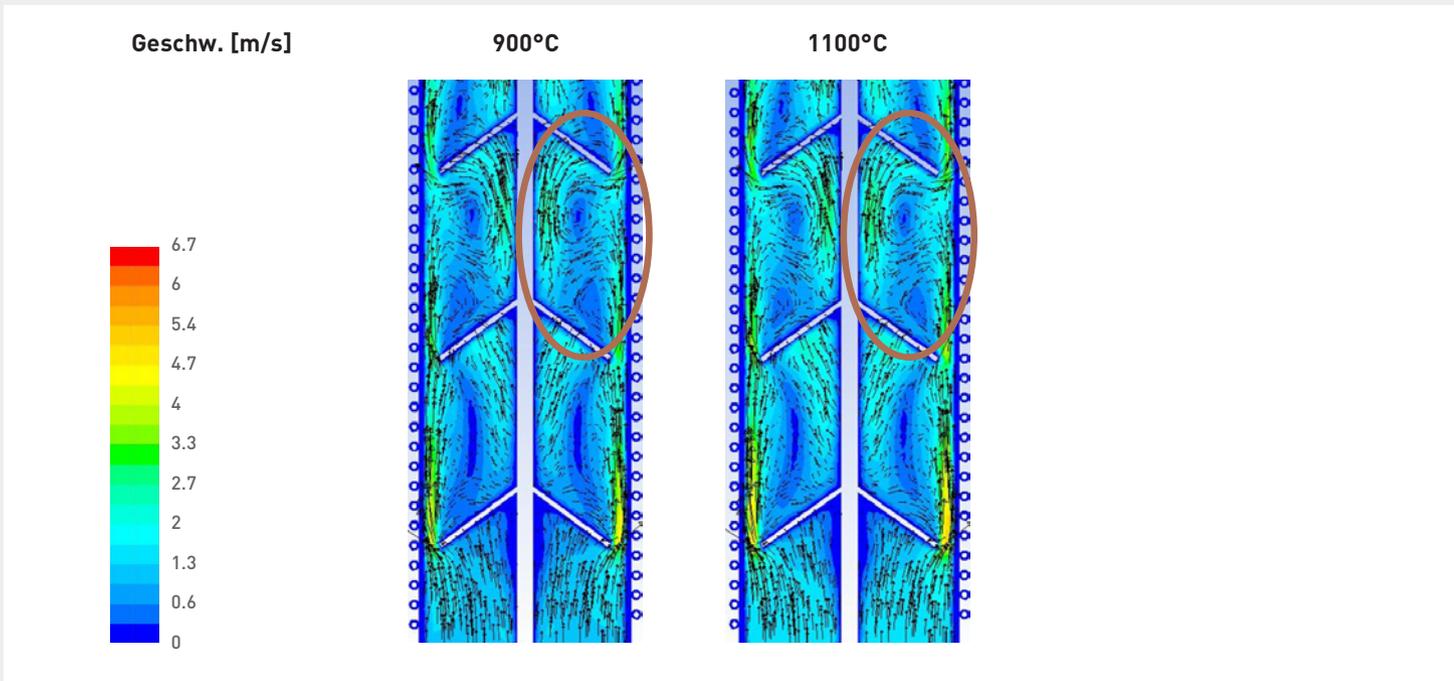
Detail Anbindung Verdampferrohr und Abgasrohr mit Verlotung

ABBILDUNG 3



Strömungsverlauf im Wärmetauscher mit optimierter Heizflächen-Reinigungseinrichtung

ABBILDUNG 4



„Das langfristige Ziel dieses Projektes ist es, eine Biomasse-Mikro-KWK für die dezentrale Anwendung mit großem Einsatzbereich zu entwickeln, die aufgrund der hohen Effizienz bei Voll- und Teillast sowie des schnellen Anfahr- und Regelverhaltens und der variablen Stromkennzahl auch wirtschaftlich darstellbar ist.“ PROJEKTLEITER JOACHIM KALKGRUBER



In Abbildung 2 sind die unterschiedlichen Bereiche des Dampfkessels dargestellt. Die Pellets fallen von oben auf den Brennrast und werden in Sturzbrandtechnik in der adiabaten Brennkammer verbrannt. Zur Auslegung der Heizflächen der notwendigen Wärmeaustauschflächen wurden Simulationsprogramme wie CFD genutzt. Die heißen Rauchgase strömen dann in die Rauchrohre/Verdampfungsröhre. Anschließend wird das Abgas in einem eigenen Niederdruck-Wärmetauscher zusätzlich abgekühlt.

Schnelldampferzeuger

Ein weiterer Aspekt für Wirtschaftlichkeit sind die laufenden Kosten für den Betrieb, die vor allem durch zahlreiche Vorschriften beeinflusst werden. Dazu wurden die DGÜW-V, ABV und KG herangezogen, um die technischen Randbedingungen so zu wählen, sodass möglichst niedrige Auflagen für den Betreiber entstehen. Das Design orientiert sich an einem Schnelldampferzeuger, sodass schnelle Anfahrzeiten und ein geringes Füllvolumen realisiert werden können. Durch den festgesetzten Betriebsdruck kleiner gleich 32 bar und der speziellen Konstruktion durch die das Füllvolumen kleiner gleich 10 l beträgt, zählt der Dampfkessel zur Gruppe 1 und ist daher von den Bestimmungen lt. ABV § 3 bis 12 ausgenommen (Fernüberwachung, Speise- und Kesselwasserbeurteilung, Aufstellungsverbote etc.).

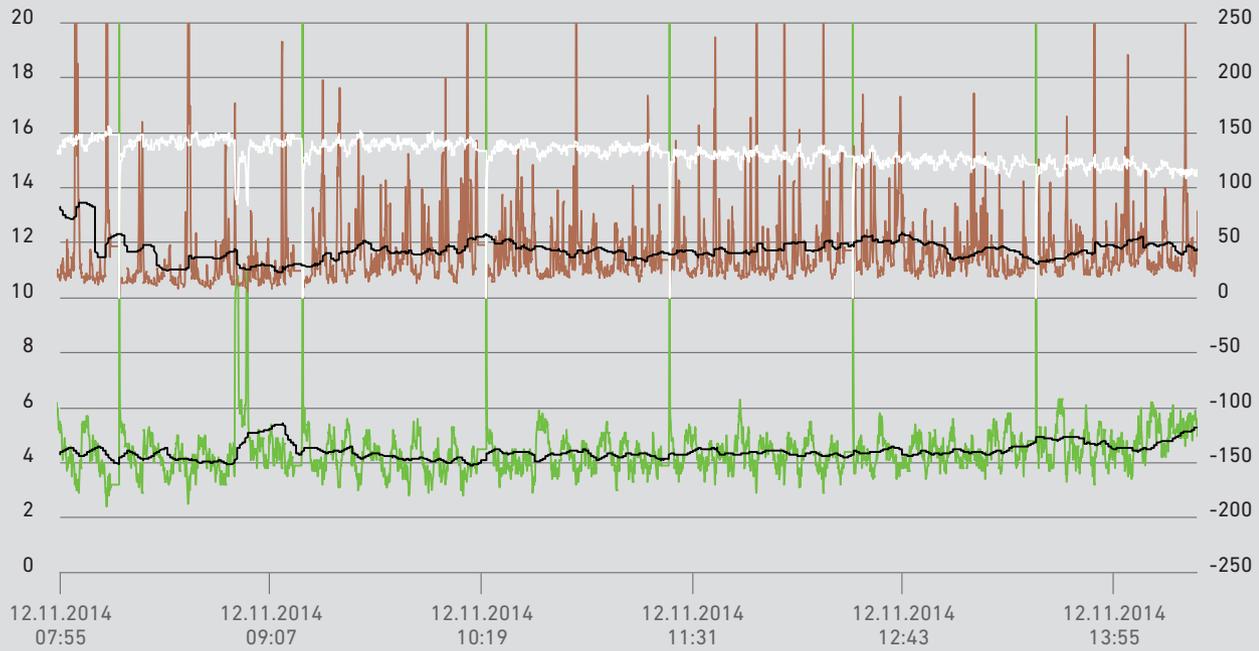
Insgesamt wird in neun parallel angeordneten Verdampfertürmen der notwendige Dampf erzeugt. Der Gesamtinhalt des Verdampfers beträgt rund 8,8 l. Der Verdampfer besteht aus einem großen Rohr, durch das die Abgase der Pellets-Feuerung strömen. Jeder einzelne Turm ist in Segmente mit unterschiedlichen umwickelten Verdampferrohren unterteilt, sodass eine Optimierung an die Dampfparameter erfolgt. Eine Überhitzung wird auf Grund der Auswahl des EN3 Expanders nicht durchgeführt.

1. Wasser tritt mit rund 100°C im obersten Segment des Verdampferturms ein und wird im Gegenstrom auf bis zu 200°C erwärmt.
2. Anschließend erfolgt die Verdampfung im Gleichstrom beginnend im untersten Segment des Verdampferturms.
3. Während der Verdampfung erfolgt bei jedem Segment eine Vergrößerung des Querschnittes des Verdampferrohres von 12 mm² auf bis zu 40 mm²
4. Sattdampf bei 30 bar und rund 230°C tritt aus dem Verdampferturm aus.

Zur Optimierung des Wärmeüberganges zwischen Verdampferrohr und Abgasrohr befinden sich im Abgasrohr auf der Außenfläche Rillen, in dem das Verdampferrohr liegt. Der Übergang zwischen Verdampferrohr und Abgasrohr wird im Vakuumverfahren, gleich wie bei Plattenwärmetauscher verlötet (Abbildung 3).

Emissionsmessung eines Testlaufs mit 20 kW

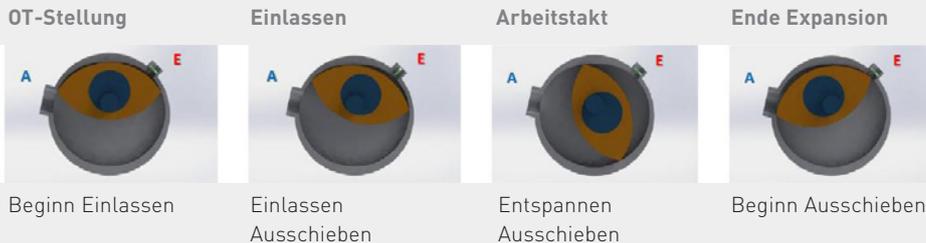
ABBILDUNG 5



-
- CO/ppm:
 - 200 Periode gleit. Mittelw. (O₂):
 - O₂:
 - NO_x/ppm:
 - 200 Periode gleit. Mittelw. (CO/ppm):
-

Arbeitsweise eines Rotationskolbenexpanders (EN3 GmbH, 2014)

ABBILDUNG 6



Optimierte Heizflächen-Reinigungseinrichtung

Die Auslegung des Verdampferrohres wurde mit Hilfe von CFD-Simulationen unterstützt bzw. optimiert. Dabei wurde der Verdampfer auf der Rauchgasseite strömungstechnisch, unter Mitberücksichtigung der Wärmeleitung in den Rohren, untersucht. Aus den Simulationen wurden die Wärmeströme für verschiedene Betriebsbedingungen ermittelt. Dafür wurde die Geometrie des rauchgasführenden Rohres mit der eingebauten Reinigungseinrichtung und des aufgewickelten Rohres der wasserführenden Seite erstellt. Veränderliche Parameter für die Simulation sind dabei die Temperatur des Rauchgases am Eintritt sowie die Rezirkulationsrate im Kessel. Die Reinigungseinrichtung besteht aus mehreren Umlenklechen und einer Schabekante, die durch Rotation die Wärmetauscher auf der Rauchgasseite reinigt. In Abbildung 4 ist der Strömungsverlauf sichtbar. Man erkennt eine sehr gute Ausbildung von Wirbeln, die die Verweilzeit des Rauchgases im Wärmetauscher erhöhen. Weiters sind kaum Totgebiete im Strömungsfeld sichtbar.

Sturzbrand-Konzept mit Rauchgas-Rezirkulation

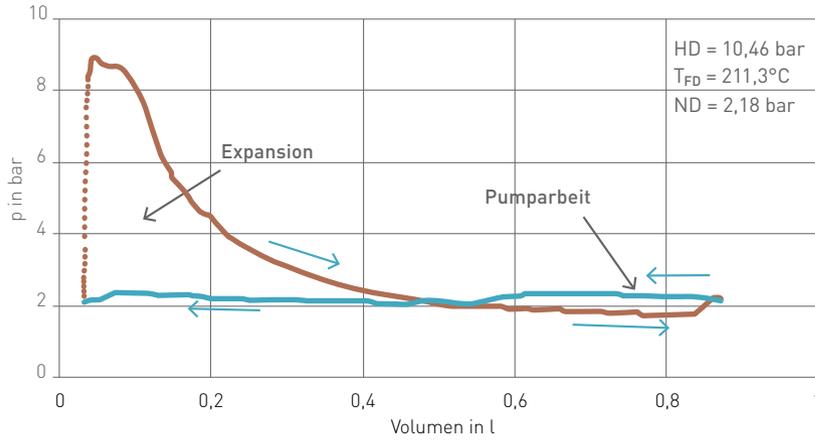
Ein weiterer Schwerpunkt bei der Entwicklung des Dampfkessels ist die Minimierung der Schadstoff- und Feinstaubemissionen durch Reduzierung der Glutbetttemperatur mittels Rauchgasrezirkulation. Dazu wird

die gesamte Brennkammer heiß gehalten und nicht wie üblich mit Wasser gekühlt. Die Einhaltung der Temperaturgrenzen wird über die Rezirkulationsrate des Abgases, eine verstärkte, hitzefeste Dämmung und einer stufenlosen Sekundärluft-Vorwärmung geregelt. Primärluft wird dabei gemeinsam mit den Pellets von oben auf den Rost eingebracht. Die Verbrennung erfolgt im Sturzbrand nach unten. Durch die hohe Turbulenz und die hohen Verbrennungstemperaturen kann im Volllast-Betrieb auf eine Zumischung der Sekundärluft verzichtet werden. Im Teillast-Betrieb erfolgt für den vollständigen Ausbrand die Beimischung der vorgewärmten Sekundärluft. Die Leistung wird über das Saugzuggebläse geregelt. Die Verbrennungsregelung erfolgt mit Hilfe eingebauter Luftschieber und einer Lambdasonde, die ständig den Restsauerstoffgehalt im Abgas misst.

In Abbildung 5 ist beispielhaft ein Testlauf mit 20 kW und einem Soll-Wert des Rest O_2 von 4,3 % ($\lambda = 1,26$) dargestellt. Dazu wurden alle wichtigen Emissionen und Staubwerte gemessen. Es zeigt sich, dass bei dieser Brennraumgeometrie und sehr niedrigem Restsauerstoffgehalt von durchschnittlich 4,3 % akzeptable CO -Emissionen von unter 50 ppm erreicht werden können. Auch die Staubemissionen lagen unter 15 mg/Nm^3 (13 % an O_2) und bestätigen die vorteilhafte Geometrie.

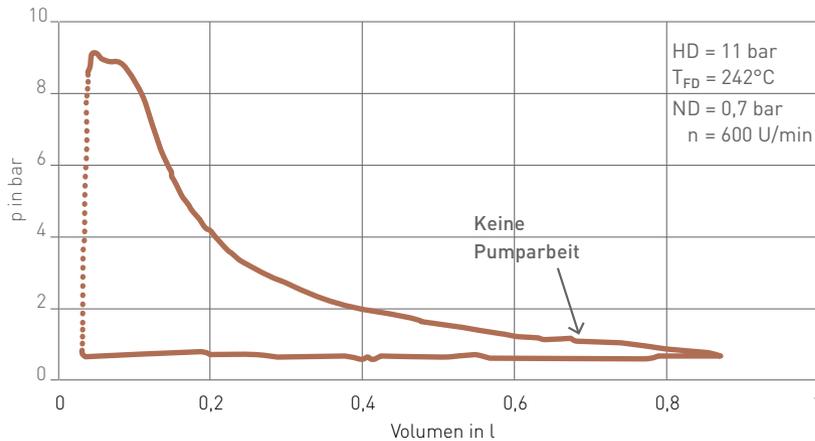
Indikatordiagramm bei einem Frischdampf von 10,46 bar und 211,3°C und einem Abdampfdruck von 2,18 bar @ 700 U/min (Leibesteder, 2015)

ABBILDUNG 7



Indikatordiagramm bei einem Frischdampf von 11 bar und 240 °C und einem Abdampfdruck von 0,7 bar @ 700 U/min (Leibesteder, 2015)

ABBILDUNG 8



Rotationskolben-Expansionsmaschine

Mit dem Rotationskolbenexpander der Fa. EN3 GmbH konnte im Zuge des Projektes eine für die technischen Anforderungen geeignete Maschine gefunden werden, um den erzeugten Dampf zu entspannen. Eine Rotationskolbenmaschine hat gemäß Günter & Gubner (2014) im Vgl. zur Hubkolbenmaschine kinematische und tribologische Vorteile bzgl. Laufruhe und Lebensdauer. Die rotierende Drehbewegung vermeidet die Kraftumkehr in den Totlagen der Hubkolbenmaschine, was die eigentliche Schwachstelle bezüglich Reibung und Verschleiß darstellt. Bei der gewählten Rotationskolbenmaschine handelt es sich um eine ölfreie, diskontinuierlich arbeitenden Expander mit fix-gesteuertem Einlassventil. Die Arbeitsweise lässt sich in vier Schritten beschreiben (Abbildung 6).

1. In der „Oberen Totpunkt-Stellung“ (OT) ist das zwischen Kolben (orange) und Gehäuse (grau) eingeschlossene Volumen am kleinsten (Schadraum).
2. Im zweiten Schritt wird das Einlassventil geöffnet und das Arbeitsmedium auf Hochdruckniveau strömt ein. Nach der Füllung wird das Einlassventil wieder geschlossen und der effektive Schadraum befüllt.
3. Wegen unterschiedlich hohen Drücke am Kolben wird dieser während des Arbeitstaktes in eine Drehbewegung versetzt. Aufgrund der damit einhergehenden Volumenzunahme, entspannt sich das Medium auf einen niedrigeren Druck.
4. Am Ende der Expansion (Unterer Totpunkt, UT) ist das eingeschlossene Volumen zwischen Kolben und Gehäuse am größten (Hubvolumen). Das Fluid sollte im UT auf das Niederdruckniveau entspannt worden sein. Der Kolben dreht sich infolge der Trägheit weiter und gibt die Auslassöffnung frei und das Arbeitsmedium strömt aus dem Expander.

Experimentelle Untersuchung

Es wurden zwei unterschiedliche Funktionsmuster hinsichtlich elektr. Leistung, spezifischem Dampfverbrauch und isentropem Gesamtwirkungsgrad experimentell untersucht. Mit den Messungen der Frischdampf- und Abdampfparameter konnten die relevanten Leistungen und Wirkungsgrade bestimmt werden. Durch die Druckindizierung konnte einerseits der isentrope Wirkungsgrad des Expanders bestimmt werden und andererseits ein Blick in den Arbeitsprozess des Rollkolbenexpanders selbst geworfen werden, um mögliche Optimierungspotenziale zu erheben.

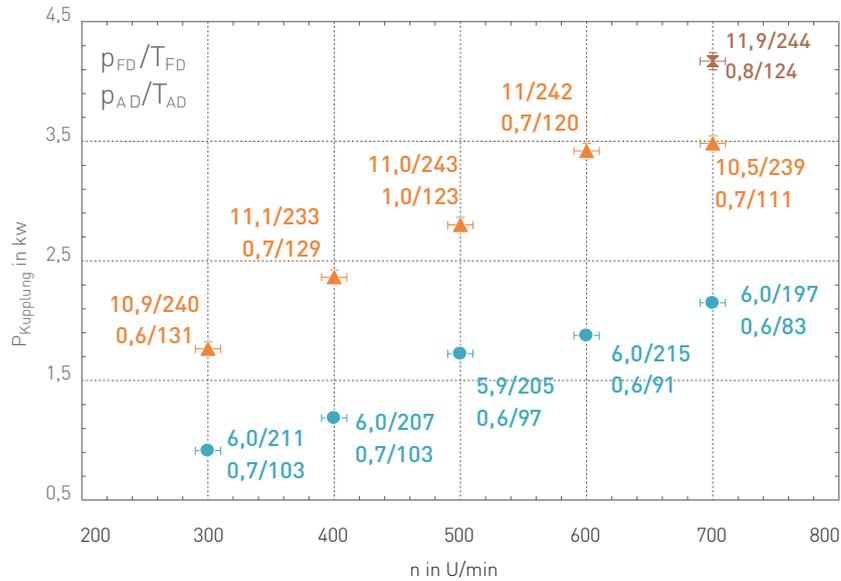
Ursprünglich war geplant, dass der Expander ins Nassdampfgebiet expandiert, um den Flüssigkeitsanteil zur Schmierung heranzuziehen. Bei Drehzahlen größer 700 U/min wurden allerdings Eigenfrequenzen angeregt, welche hinsichtlich der Materialschonung nicht überfahren wurden. Aufgrund der relativ niedrigen Drehzahlen war die Schmierung über die geleitenden Dichtleisten im Expander ausreichend, wodurch es nicht notwendig war in das Nassdampfgebiet zu expandieren. Die Versuche wurden deshalb sowohl mit Satttdampf als auch mit überhitztem Dampf bei Frischdampfdrücken bis zu 20 bar durchgeführt.

Problem Pumpen

Bei den ersten Versuchen lag der Gegendruck am Auslass des Expanders tlw. über dem Kondensatordruck, weshalb der Expander zT. in das sog. „Pumpen“ kam. Dh. dass der Gegendruck während der Expansion in der Maschine unterschritten wird und Dampf aus dem Abdampfschlauch in die Maschine zurückgesaugt und damit die abgegebene Leistung des Expanders minimiert wurde; siehe Abbildung 7: Pumparbeit (eingeschlossene Fläche: Blau über Braun) ist von der Expansionsarbeit (Fläche: Braun über Blau) abzuziehen. Durch entsprechende Adaptierungen konnte der Gegendruck auf den vorgegebenen Druck im Kondensator gesenkt werden, wodurch kein Pumpen während der Expansion mehr feststellbar war (Abbildung 8).

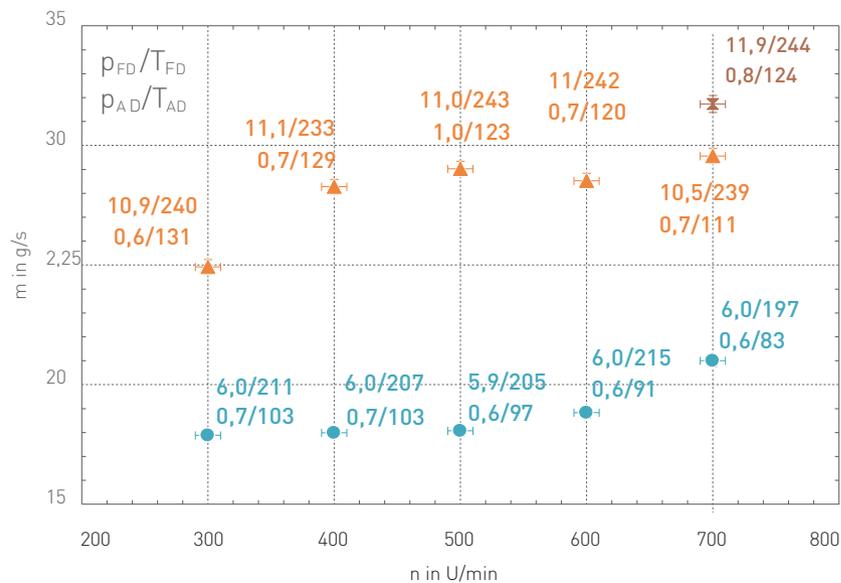
Kupplungsleistung in Abhängigkeit der Drehzahl bei unterschiedlichen Frischdampfparametern (FD) und Abdampfparametern (AD) mit [p]=bar und [T]=°C

ABBILDUNG 9



Benötigter Dampfmassenstrom in Abhängigkeit der Drehzahl bei unterschiedlichen Frischdampfparametern (FD) und Abdampfparametern (AD) mit [p]=bar und [T]=°C

ABBILDUNG 10



Messergebnisse

Nachfolgend sind auszugsweise einige der wichtigsten Messergebnisse dargestellt. Abbildung 9 zeigt die Kupplungsleistung (P_{Kupplung} , gemessen an der Wirbelstrombremse) und Abbildung 10 den benötigten Dampfmassenstrom (\dot{m}) des Expanders in Abhängigkeit der Drehzahl (n) bei unterschiedlichem Frischdampfdruck. Die höchste Leistung von 4,2 kW lag bei einem Frischdampfdruck von ca. 12 bar und bei 700 U/min.

Tendenziell stieg die Leistung des Expanders mit steigender Drehzahl, steigendem Frischdampfdruck und mit steigender Überhitzung des Dampfes. Der Abdampfdruck hat einen geringen Einfluss, sollte allerdings nicht zu hoch werden, da bei Druckverhältnissen (zwischen Frisch- und Abdampf) unter 5 der Expander ins Pumpengerät. Beim Betriebspunkt der höchstgemessenen Leistung hatte der Expander auch den größten Dampfverbrauch.

Allerdings zeigten die Auswertungen, dass der spezifische Dampfverbrauch (kg/kWh) mit steigendem Frischdampfdruck und steigender Drehzahl sinkt und der geringste spezifische Verbrauch günstiger Weise bei jenem Betriebspunkt der höchstgemessenen Leistung liegt. Frischdampfdrücke größer 12 bar konnten

nicht ausgetestet werden, da aufgrund der steigenden Dichte mit steigendem Druck der benötigte Massenstrom für diesen Expander nicht vom Prüfstand bereitgestellt werden konnte. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Optimierung des Expanders bzw. dessen Betriebsweise für den nachfolgenden Schwerpunkt, der Zusammenführung des Pellet-befeuerten Dampfkessels mit der Expansionsmaschine.

Ausblick:

Zusammenführung des Pellet-befeuerten Dampfkessels mit der Expansionsmaschine

Basierend auf den Ergebnissen des Dampfkessels und der Expansionsmaschine werden die Komponenten unter ökonomischen Randbedingungen weiterentwickelt, „verheiratet“, experimentell untersucht und weiter optimiert.

Für das Gesamtkonzept wird ein Frischdampfdruck von 30 bar angestrebt. Dadurch steigt der Bedarf an Dampfmassenstrom aufgrund der höheren Dichte, weshalb ein optimierter Rotationskolbenexpander mit geringerem Schluckvermögen im Gesamtfunktionsmuster untersucht wird. Das gesamte Funktionsmuster wird bezüglich der Teillastregelbarkeit sowie einer maximalen variable Stromkennzahl optimiert.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Hohe Prozesstemperaturen im Rankine-Prozess durch die thermische Beständigkeit von Wasser ermöglicht eine hohe Stromausbeute sowie einen hohen Gesamtwirkungsgrad
- Sehr gute und effiziente Teillastregelbarkeit sowie eine variable Stromkennzahl für einen wärmegeführten Betrieb werden durch die modulare Feuerungsleistung und der Anpassung der Expanderleistung durch Expansion in das Nassdampfgebiet ermöglicht
- Gewährleistung eines langlebigen, zuverlässigen und gefahrlosen Betriebs durch ein ölfreies Schmierkonzept und Verwendung von Wasser (unbrennbar und ungiftig)

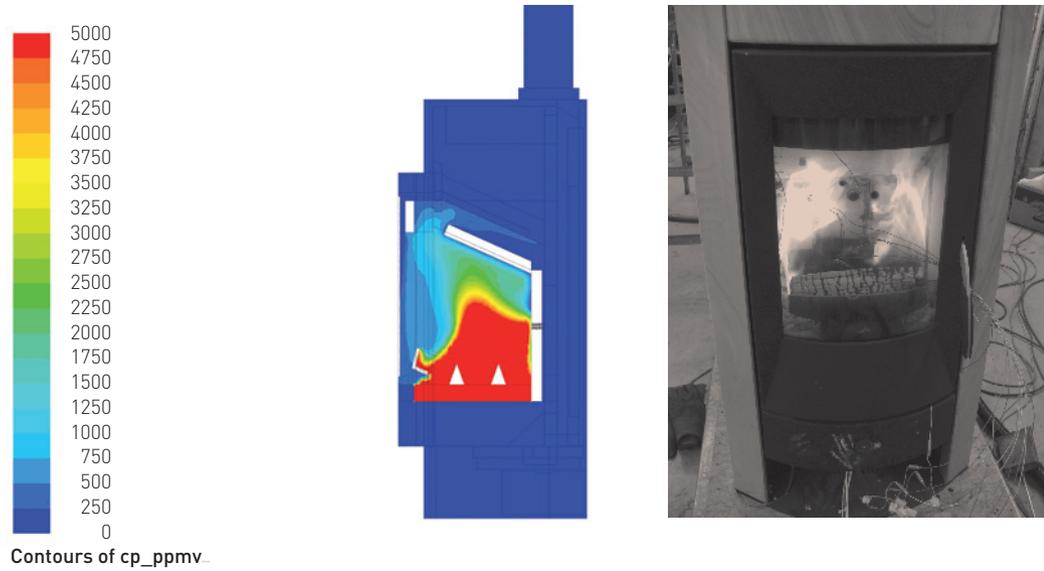




Projektleitung: MANUEL KÖSSL
RIKA Innovative Ofentechnik GmbH

Von der CFD-gestützten Entwicklung bis zur Realisierung

ABBILDUNG 1



Wood Stoves 2020

Entwicklung der nächsten Generation von sauberen Kaminöfen

Ausgangssituation / Problematik

Die Nutzung von Biomasse zur Wärmeerzeugung in Kleinf Feuerungen zählt europaweit zu den wichtigsten Bioenergie-Anwendungen. Angetrieben von EU-weiten und nationalen Maßnahmen, die Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung zu fördern, wird erwartet, dass sich der europäische Markt für Biomasse-Kleinf Feuerungen bis 2020 um ca. 130% (bezogen auf 2009) erhöht. Öfen spielen dabei eine wesentliche Rolle. Aktuelle Daten zufolge (LK Niederösterreich) wurden 2012 in Österreich 28.000 und EU-weit ca. 400.000 Scheitholz-Kaminöfen verkauft.

Es ist aber auch eine anerkannte Tatsache, dass speziell Scheitholz-Kaminöfen zu den am wenigsten ausgereiften Technologien unter den Biomasse-Kleinf Feuerungen zählen und deutlich höhere Emissionen (CO, org.C und Feinstaub) sowie geringere Wirkungsgrade als z.B. moderne Pelletkessel aufweisen. Ihr hoher Beitrag zu den Feinstaubemissionen des Hausbrandes hat in manchen Regionen bereits dazu geführt, dass sogar Holzfeuerungsverbote diskutiert werden.

Projektziele und Projektergebnisse

Das vorliegende Projekt ermöglicht den österreichischen Partnern RIKA Innovative Ofentechnik GmbH und BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH die Teilnahme am internationalen ERA-NET Bioenergy Projekt Wood Stoves 2020. Da insgesamt 8 fachlich hochkompetente Partner aus 4 EU-Ländern am ERA-NET-Projekt teilnehmen, bedeutet die Teilnahme am internationalen Konsortium einen erheblichen Mehrwert für die österreichischen Partner im Vergleich zu einem nationalen Projekt.

Projektpartner im ERA-NET Projekt sind:

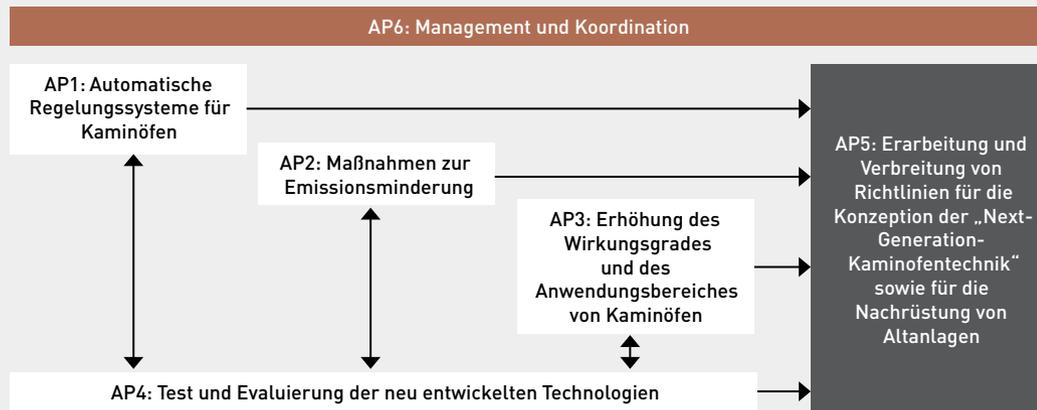
- Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Deutschland – Koordinator des Projektes
- Kutzner + Weber GmbH, Deutschland
- RIKA Innovative Ofentechnik GmbH, Österreich
- BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Österreich
- Technical Research Institute of Sweden, Schweden
- Nibe AB, Schweden
- Technical University of Denmark, Department of Chemical Engineering, Dänemark
- HWAM A/S, Dänemark

Projektziele in Bezug auf Emissionsminderung

- Es sollen automatisierte Regelungskonzepte für Kaminöfen (sowohl als integraler Ofenbestandteil als auch als Nachrüstopion) entwickelt werden, die durch eine weitgehende Vermeidung von Benutzerfehlern sowie eine verbesserte Regelung des Verbrennungsprozesses zu deutlichen Emissionsreduktionen führen. Dazu soll auch der Einsatz neuer Sensorik geprüft werden.
- Emissionsminderung von Kaminöfen durch Umsetzung optimierter Brennkammergeometrien und Luftstufungskonzepte. Die österreichische Beteiligung konzentriert sich dabei auf die CFD-gestützte Entwicklung eines neuen emissionsarmen Kaminofens der nächsten Generation (Schwerpunkte: Verbesserung der Durchmischung, Anheben der Verbrennungstemperatur, ausreichend Verweilzeit der Rauchgase im heißen Feuerraum).

Interaktionen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen

ABBILDUNG 2



„In Österreich wie auch in ganz Europa sind Scheitholz-Kaminöfen die bezüglich der Anzahl an Bestandsanlagen sowie der jährlichen Verkaufszahlen relevanteste Biomasse-Kleinfeuer-
 ungstechnologie. Der Großteil der am Markt befindlichen Scheitholz-Kaminöfen weist einen
 veralteten, nicht ausgereiften technischen Standard und im Vergleich zu automatisch
 beschickten und geregelten Pellet-Kaminöfen deutlich höhere Emissionen und schlechtere
 Wirkungsgrade auf. Der Großteil der Scheitholz-Kaminöfen ist nicht für eine längere Betriebs-
 dauer ausgelegt und mit minderwertiger Materialqualität ausgestattet. Ein weiteres Manko
 ist zudem, dass auch qualitativ hochwertigere Scheitholz-Kaminöfen mit ausgereifterer
 Verbrennungstechnik vorwiegend ohne automatische Abbrandregelung ausgeführt sind.
 Die Einstellung der sich während des Betriebs laufend ändernden optimalen Verbrennungs-
 luftzufuhr ist für einen Anwender weder möglich noch zumutbar, daher stellt die technologische
 und regelungstechnische Weiterentwicklung im Zuge dieses Projektes einen wesentlichen Schritt
 in Richtung einer modernen, sauberen und anwenderfreundlichen Scheitholz Heiztechnik – der
 nächsten Scheitholz-Kaminofengeneration – dar.“ PROJEKTLEITER MANUEL KÖSSL

ZITAT

”

- Evaluierung und Test von neuen Hochtemperatur-Katalysatoren für Scheitholz-Kaminöfen zur Reduktion der CO-, org.C- und Staubemissionen
- Bewertung der Umsetzung moderner Kaminzugregler zur Vergleichmäßigung der Abbrandraten.

Projektziele in Bezug auf die Wirkungsgradsteigerung

- Entwicklung einer effizienten und neuartigen Wärmespeichertechnik für Kaminöfen auf Basis von PCM (Phase Change Material) mit hoher Wärmespeicherkapazität, die für die hohen in Kaminöfen auftretenden Temperaturgradienten geeignet sind.
- Untersuchungen und Implementierung unterschiedlicher Nachrüstoptionen zur Wirkungsgradsteigerung bzw. Wärmeverlustminimierung wie Klappen zur Vermeidung von Stillstandsverlusten, Kaminzugregler sowie am Kamin aufsetzbare Saugzugventilatoren.

Das ERA-NET-Projekt zielt darauf ab, die genannten technologischen Konzepte zu entwickeln, in Versuchsanlagen entsprechend zu testen und dabei im Vergleich zum derzeitigen Stand der Technik Emissionsreduktionen von 50-80% sowie deutliche Wirkungsgradsteigerungen auf mehr als 90% zu erzielen. Das finale Ziel des Projektes ist es, auf Basis der durchgeführten F&E-Arbeiten Richtlinien zur Optimierung von Neuanlagen und Bestandsanlagen (Nachrüstung) zu erstellen und zu publizieren, damit sichergestellt ist, dass die Projektergebnisse auch einer breiten Anwendung zugeführt werden. Die beteiligten Ofenhersteller sollen als Technologieführer fungieren und die Markteinführung beschleunigen.

Der österreichische Beitrag (RIKA Innovative Ofentechnik GmbH und BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH) zum ERA-NET-Projekt konzentriert sich auf die Entwicklung einer Next-Generation-Kaminofentechnologie mit neuartiger Sensorik und optimierter automatischer Regelung sowie der möglichen Integration von Heißgas-Katalysatoren.

Projekthalte

Das ERA-NET-Forschungsprojekt ist in 6 Arbeitspakete (APs) unterteilt von denen eines der Projektkoordination (AP6) und eines der Ergebnisverbreitung (AP5) gewidmet ist. AP1, AP2 und AP3 beschäftigen sich mit spezifischen technologischen Entwicklungen, die dann im AP4 an entsprechenden Versuchsanlagen getestet und evaluiert werden sollen. Abbildung 2 zeigt die Zusammenhänge und Interaktionen zwischen den AP.

Innovationsgehalt

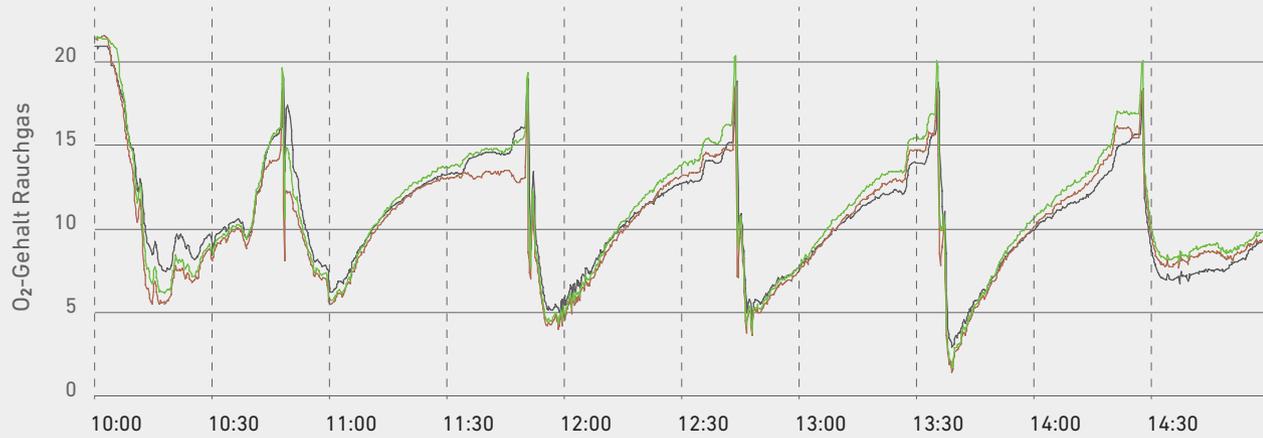
Es ist, wie erwähnt, das ausdrückliche Ziel des Projektes, eine neue Generation von Scheitholz-Kaminöfen zu entwickeln, die um 50-80% geringere CO-, org.C- und Staub-Emissionen und um zumindest 8% (absolut) höhere Wirkungsgrade erreichen als der aktuelle Stand der Technik. Mit dieser neuen Generation von Scheitholz-Kaminöfen soll die derzeit zu automatisch beschickten und geregelten Kesseln (zB. Pelletkessel) klaffende Lücke bzgl. Umweltfreundlichkeit, Effizienz und Bedienungskomfort nahezu geschlossen werden. Diese Zielsetzung und die angeführten Zahlen untermauern deutlich den Technologiesprung, der mit dem beantragten Projekt für Kaminöfen erzielt werden soll.

Um das Ziel zu realisieren, sind mehrere Innovationen im Projekt verankert. Eine Kerninnovation ist dabei sicherlich die Entwicklung und **Implementierung automatischer Regelungssysteme für Kaminöfen**. Diese sollen sicherstellen, dass der Verbrennungsprozess ständig automatisch optimiert wird und Benutzerfehler, die derzeit hauptverantwortlich für hohe Emissionen und schlechte Wirkungsgrade sind, nahezu ausgeschlossen werden. Eine breite Einführung derartiger Regelungskonzepte (auch als Nachrüstlösung) wird eine wichtige Neuheit am Markt darstellen, die auch dazu beiträgt, dass zukünftig im Feldbetrieb eine ähnlich gute Performance wie am Typenprüfstand erreicht werden kann.

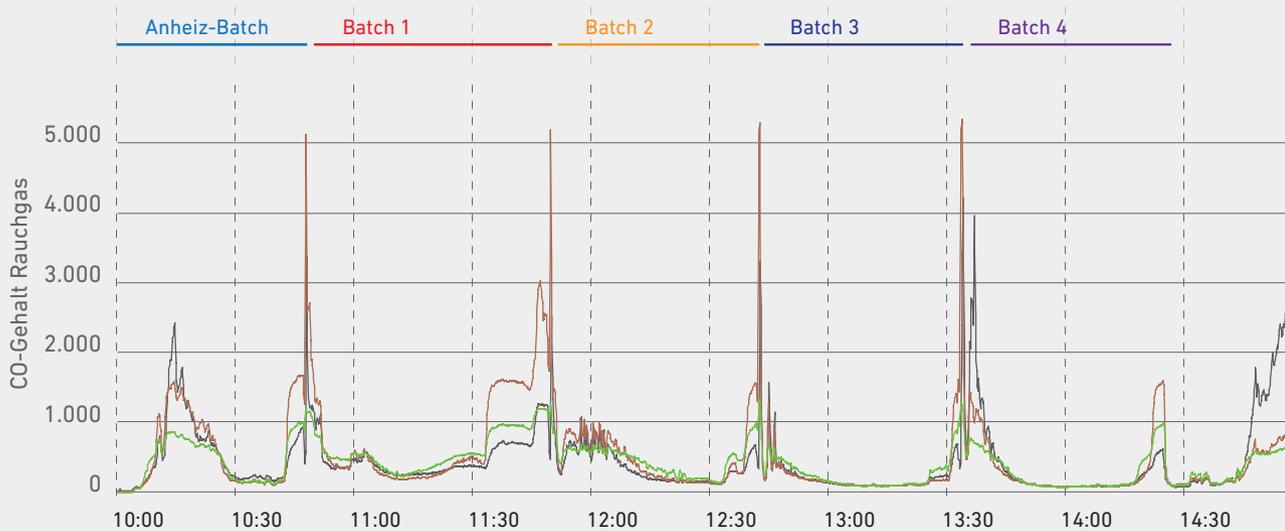
Eine weitere wesentliche Innovation soll die **CFD-gestützte Entwicklung eines neuen Next-Generation-Kaminofenkonzeptes** sein, das sich durch besonders niedrige Emissionen auszeichnet.

Verläufe von O₂-Gehalt und CO-Emissionen bei Sensorentests im Kaminofen

ABBILDUNG 3



O₂ RGA [Vol% tr. RG] —
 O₂ Sensor 1 RGA [Vol% tr. RG] —
 O₂ Sensor 2 RGA [Vol% tr. RG] —



CO RGA [ppmv tr. RG] —
 COe Sensor 1 [ppmv tr. RG] —
 COe Sensor 2 [ppmv tr. RG] —

Die CFD-Simulationen dienen dabei zur Optimierung der Durchmischung, des Einsatzes neuer Materialien zur verbesserten Brennkammerisolation und der richtigen Dimensionierung. Weiters soll zusätzlich zur optimierten Verbrennung die **Integration von Heißgas-Oxidationskatalysatoren** in die Brennkammer zur weiteren Emissionsminimierung geprüft und bewertet werden. Durch diese Kombination von Primär- und Sekundärmaßnahmen sollen Scheitholz-Kaminöfen bzgl. niedriger Emissionen an das Niveau automatische beschickter Biomasse-Kleinfeuerungen (zB. Pelletkessel) herangeführt werden.

Die Entwicklung einer neuen in den Kaminöfen **integrierten PCM-Wärmespeichertechnik** soll nicht nur eine signifikante Wirkungsgradsteigerung (jährliche Brennstoffkostensparnis von ca. 10%) ermöglichen, sondern in Zukunft Scheitholz-Kaminöfen auch als Zentralheizsysteme (zB. für Altbauten und Niedrigenergiehäuser) attraktiv machen.

Erste Ergebnisse

Arbeitspaket 1:

Automatische Regelungssysteme für Kaminöfen

In einem ersten Schritt wurden verschiedene O₂- und Ausbrandsensoren vorevaluiert und darauf aufbauend die bestgeeigneten Sensoren zur detaillierten Bewertung auf Basis von Testläufen mit Kaminöfen ausgewählt. Die Sensoren wurden dabei über einen längeren Zeitraum (einige Wochen) getestet. In bestimmten Intervallen wurden Vergleichsmessungen mit Referenz-Rauchgasanalysegeräten (siehe Abbildung 3) durchgeführt, um die Genauigkeit, die Ausfallsicherheit und das Driftverhalten der Sensoren zu untersuchen. Abschließend wurden die durchgeführten Testläufe im Detail aus- und bewertet und darauf aufbauend

Empfehlungen bezüglich der Implementierung der Sensoren in automatisierte Kaminofenregelungskonzepte erarbeitet.

Im Rahmen von AP1 wurden weiters automatische Regelungskonzepte für Kaminöfen, die auf der kontinuierlichen Messung relevanter Prozessparameter, wie zum Beispiel der Brennkammertemperatur, und der davon abhängigen Regelung der Verbrennungsluftströme durch Klappen beruhen, weiterentwickelt. Die Erkenntnisse bezüglich der Einsetzbarkeit der Sensoren wurden bei der Regelungsentwicklung berücksichtigt. So soll zum Beispiel die Regelung teilweise Sauerstoffgeführt erfolgen, um somit den Verbrennungsprozess über die Verbrennungsluftströme so zu regeln, dass während der Anbrennphase rasch hohe Brennkammertemperaturen und optimale O₂-Gehalte im Rauchgas erreicht werden und diese dann über die gesamte Hauptbrennphase und so lange wie möglich während der Ausbrandphase beibehalten werden können. Das ermöglicht höhere Brennkammertemperaturen und dadurch einen verbesserten Ausbrand wie auch eine Wirkungsgradverbesserung.

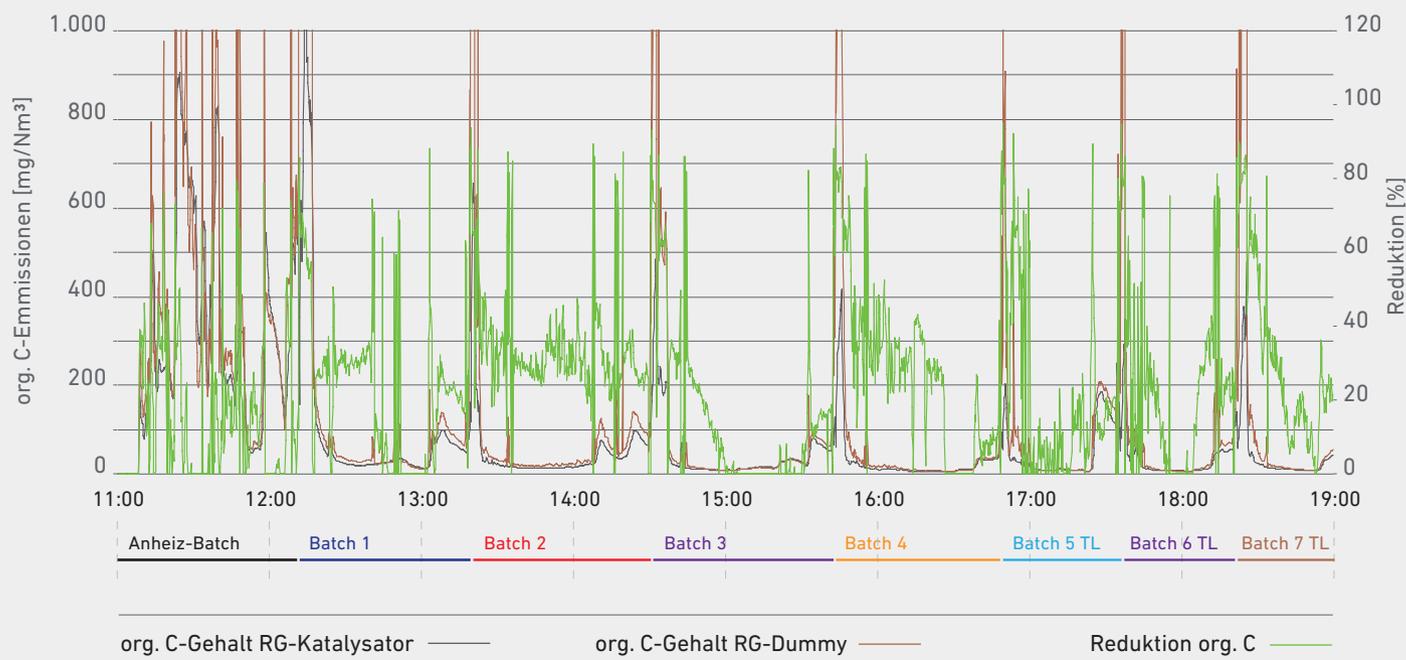
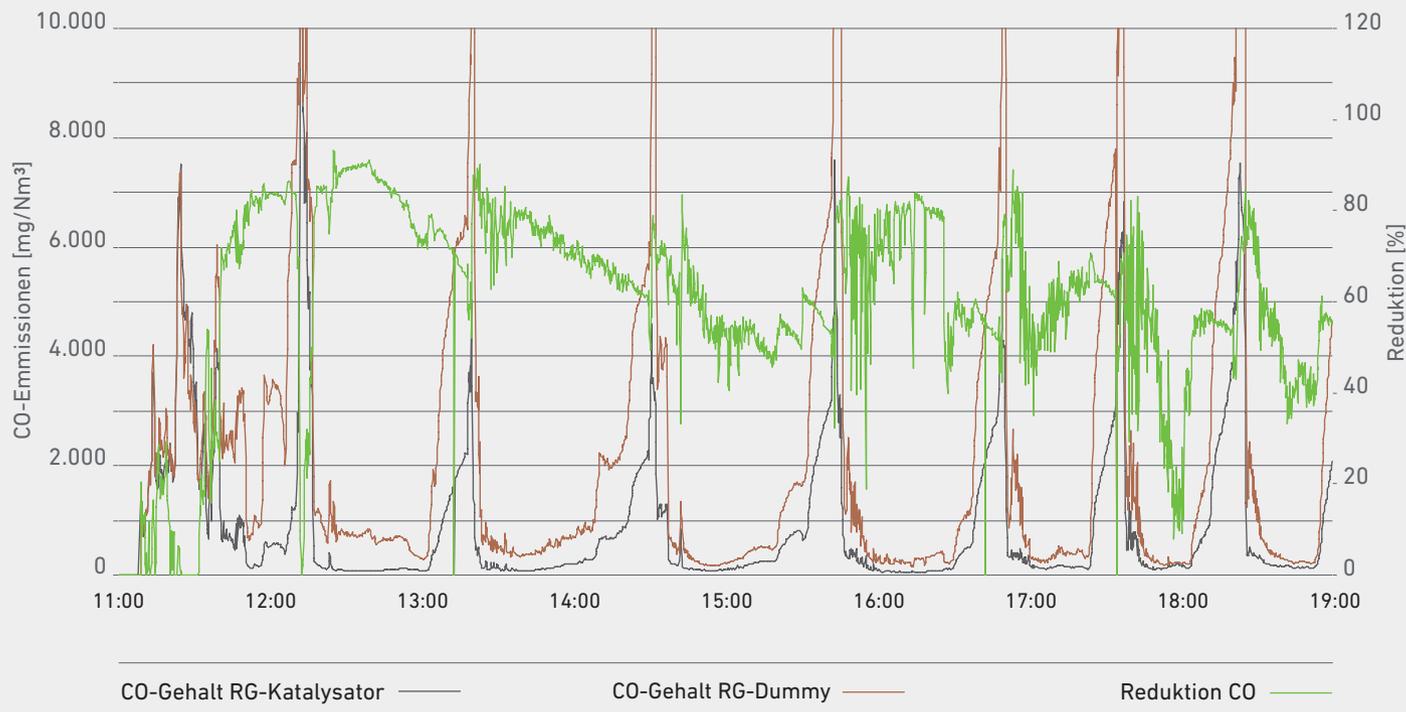
Arbeitspaket 2: Maßnahmen zur Emissionsminderung

Zu Beginn wurde eine Studie von am Markt verfügbaren Hochtemperatur-Katalysatoren für Kaminöfen unter Berücksichtigung von bereits verfügbaren Daten von Testläufen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studie wurden verglichen und verschiedene Optionen für eine Katalysatorintegration in Kaminöfen diskutiert. Darauf aufbauend wurden umfassende Vortests mit verschiedenen Katalysatoren, die für einen Hochtemperatur-Betrieb geeignet sind, an einem speziell adaptierten Kaminofen durchgeführt. In diesem Kaminofen werden die Rauchgase nach der Brennkammer aufgeteilt und ein Teil über den Katalysator geleitet und der

----->	RGA	konventionelle Rauchgasanalytik
	tr. RG	trockenes Rauchgas
	COe Sensor	CO-Äquivalent aller brennbarer Gase im Rauchgas

Verläufe der CO- und org.C - Emissionen sowie der Emissionsreduktion durch einen Katalysator

ABBILDUNG 4



andere Teil über einen nicht beschichteten Dummy gleichen Aufbaus und mit gleichem Druckverlust wie der Katalysator. Dadurch war es möglich, die Reduktionseffizienz des Katalysators bezüglich gasförmiger Emissionen direkt aus Parallelmessungen im laufenden Betrieb zu bestimmen (siehe Abbildung 4). Dies ist von großem Vorteil gegenüber Vergleichsmessungen mit und ohne eingebautem Katalysator, da der Kaminofenbetrieb ein instationärer Batchprozess ist und der Katalysator den Betrieb des Kaminofens durch seinen Druckverlust beeinflusst.

Die Katalysatoren wurden dabei über einen längeren Zeitraum (jeweils 2 Wochen) getestet. In bestimmten Intervallen wurden Vergleichsmessungen mit Referenz-Rauchgasanalysegeräten (paramagnetische Sensoren für O₂; FID für org.C und ND-IR für CO) durchgeführt, um die Emissionsreduktionseffizienz

der Katalysatoren zu bestimmen und um auch das Langzeitverhalten der Katalysatoren zu untersuchen.

Erste Ergebnisse zeigen zwar eine gute Emissionsreduktionseffizienz der Katalysatoren, jedoch nimmt diese mit der Betriebsdauer ab. Der bestgeeignete Katalysator soll, im Falle einer positiven Evaluierung, in die neu entwickelte Kaminofentechnologie implementiert werden, wobei sicherzustellen ist, dass eine in Bezug auf die Betriebsbedingungen (Temperatur, Strömungsverteilung über den Einströmquerschnitt) und Zugänglichkeit für die Reinigung optimierte Position vorgesehen wird sowie die Lebensdauer des Katalysators und dessen Preis für eine Anwendung in Kaminöfen akzeptabel ist. Die Auswahl der bestgeeigneten Position soll auf Basis von CFD-Simulationen erfolgen.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Scheitholz-Kaminöfen weisen im Vergleich zu automatisch beschickten und geregelten Kesseln (Pelletkessel) deutlich höhere Emissionen und schlechtere Wirkungsgrade sowie ein hohes Optimierungspotenzial auf. Aus diesem Grund strebt das Projekt an, durch Entwicklung gezielter Primär- und Sekundärmaßnahmen die Emissionen von Kaminöfen im Vergleich zum Stand der Technik deutlich zu verringern (Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität) und zugleich deren Wirkungsgrade signifikant anzuheben, was die jährlichen Brennstoffkosten um ca. 10% senken soll (Reduktion der CO₂-Emissionen).
- Das Projekt ermöglicht die Teilnahme am internationalen ERA-NET Bioenergy Projekt Wood Stoves 2020. Da insgesamt 8 fachlich hochkompetente Partner aus 4 EU-Ländern am ERA-NET-Projekt teilnehmen, bedeutet die Teilnahme am internationalen Konsortium einen erheblichen Mehrwert (added value) und Synergienutzen für die österreichischen Projektpartner.
- Das Projekt soll neben dem direkten Nutzen für die Projektwerber auch anderen heimischen Ofenbauern zu Gute kommen. Diese können die erzielten Ergebnisse und entwickelten Richtlinien für moderne Kaminofenkonzepte als Grundlage für die Weiterentwicklung ihrer Produkte nutzen und somit ebenfalls profitieren.



Emissionen bezogen auf 13% O₂ und trockenes Rauchgas

CO-Reduktion = $(1 - \text{CO}_{\text{Katalysator}} / \text{CO}_{\text{Dummy}}) * 100$ in %

org.C-Reduktion = $(1 - \text{org.C}_{\text{Katalysator}} / \text{org.C}_{\text{Dummy}}) * 100$ in %

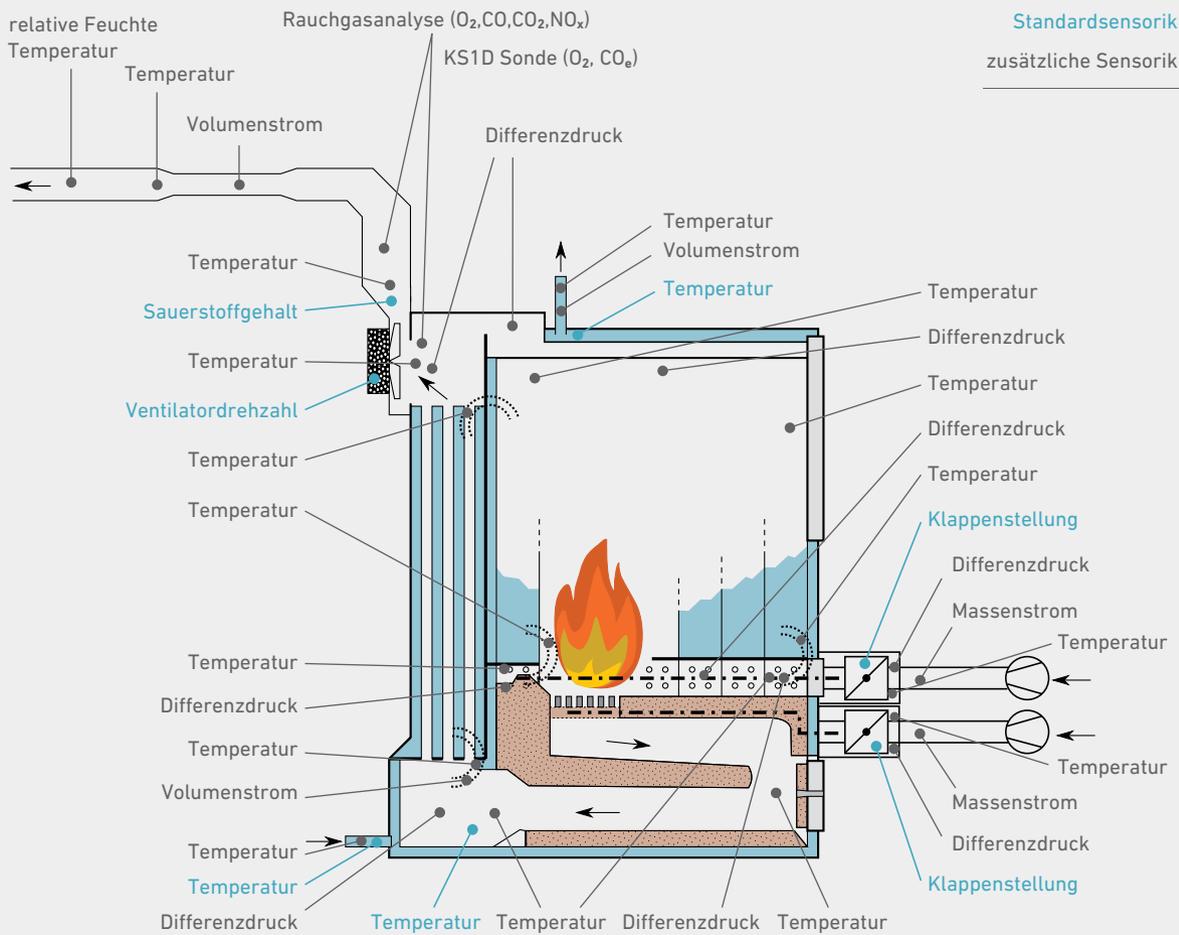
TL = Teillastbetrieb (halbe Holzmenge)



→ **Projektleitung:** MARKUS GÖLLES, BIOENERGY 2020+

Überblick über die am Scheitholzkessel eingebaute Sensorik

ABBILDUNG 1



Smart Logwood Boiler

Modellbasierte Regelung von Scheitholzkesseln mit Pufferspeichern

Ausgangssituation

Die Verwendung von Biomasse-basierten Systemen zur Wärmeversorgung von Gebäuden nimmt seit mehr als zwei Dekaden stetig zu. Neben den komfortablen vollautomatisierten Hackgut- und Pellet-Feuerungen kommen dabei häufig Scheitholzkessel zum Einsatz, die in Europa noch immer die am stärksten verbreitete Form von Holz-basierten Zentralheizungssystemen sind und in der Regel mit einem Pufferspeicher und häufig auch einer Solaranlage kombiniert werden.

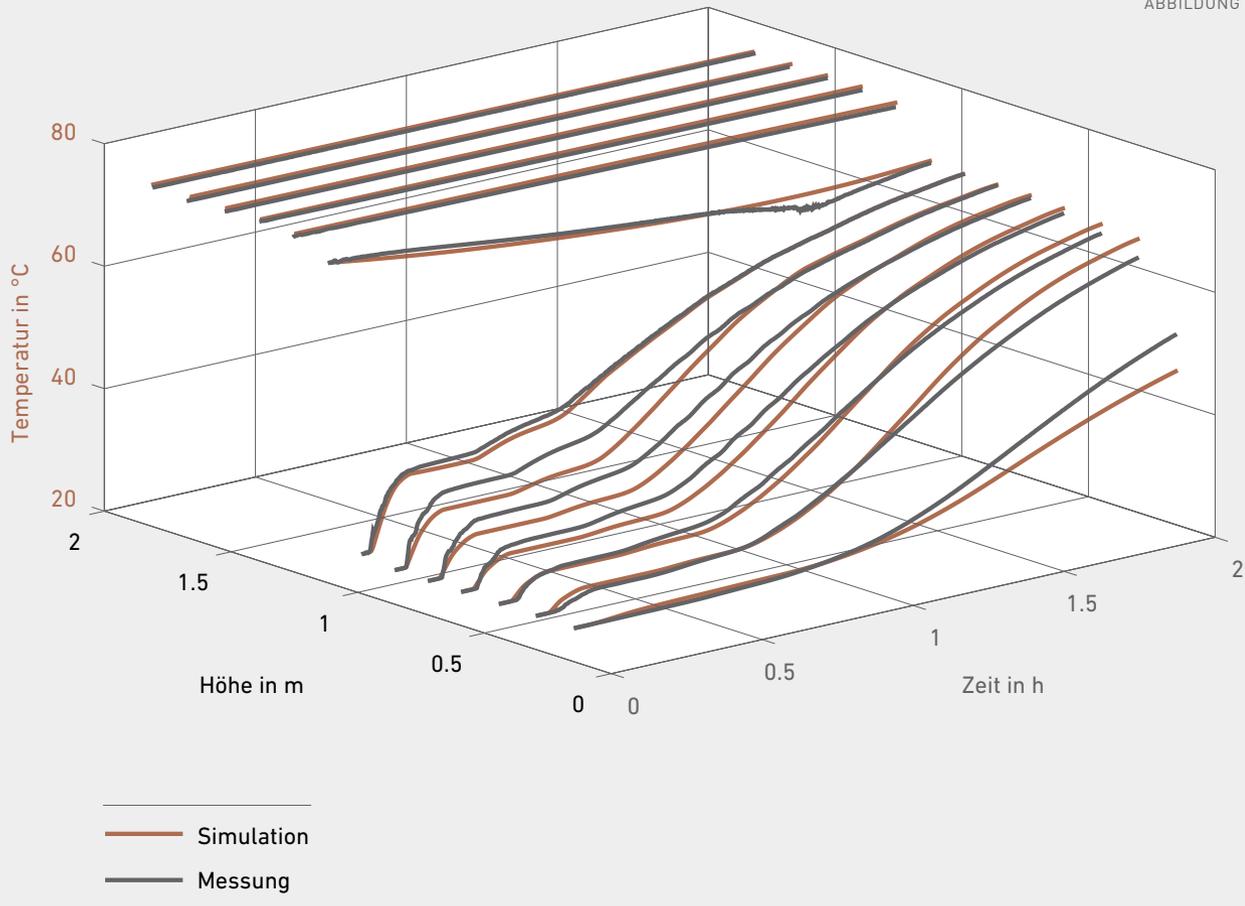
Scheitholzkessel haben die wesentliche Einschränkung, dass sie selbst keinen Einfluss auf die zugeführte Brennstoffmenge sowie auch den Zeitpunkt des Nachlegens vom Brennstoff haben. Dadurch kommt es immer wieder zu Situationen in denen dem System mehr Energie durch das Nachlegen zugeführt wird als verbraucht wird bzw. noch in den Pufferspeicher übertragen werden kann. Die dadurch erforderliche extreme Drosselung des Abbrandes geht in der Regelung mit großen Effizienzeinbußen, stärkerer Kesselbeanspruchung und erhöhten Schadstoffemissionen einher. Außerdem führt das mangelhafte Zusammenspiel der einzelnen Komponenten auch häufig dazu, dass ein eventuell verfügbarer Solarertrag nicht vollständig genutzt werden kann, da der Pufferspeicher bereits zu einem ungünstigen Zeitpunkt vom Scheitholzkessel geladen wurde. Zusätzlich dazu wird die Qualität der Verbrennung stark durch die Brennstoffeigenschaften sowie die Art der Füllraumbelegung beeinflusst, womit

Fehlbedienungen des Benutzers nicht ausgeschlossen werden können. Somit stellt die Regelung von Scheitholzkesseln mit Pufferspeichern und ggf. einer Solaranlage eine große Herausforderung dar. Trotz verstärkter Bemühungen im Laufe der letzten Jahre, sind dem Stand der Technik entsprechende Regelungen nicht in der Lage das volle Potenzial hinsichtlich Effizienzmaximierung, Emissionsminimierung und Benutzerkomfort zu gewährleisten, da sie die stark verkoppelten und zum Teil veränderlichen Zusammenhänge der einzelnen Prozessgrößen und Anlagenteile nur teilweise oder häufig gar nicht berücksichtigen können.

Ziel des Projekts

Das übergeordnete Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung modellbasierter Regelungsstrategien für Heizsysteme bestehend aus Scheitholzkessel, Pufferspeicher und ggf. auch einer Solaranlage. Dazu sollen sowohl eine übergeordnete prädiktive Systemregelung für das Zusammenspiel von Scheitholzkessel, Pufferspeicher und Solaranlage unter Einbeziehung von Wärmebedarfs- und Solarertragsprognosen als auch unterlagerte modellbasierte Regelungen für den eigentlichen Abbrand des Holzes im Scheitholzkessel sowie die zielgerichtete Übertragung der Wärme vom Kessel zum Pufferspeicher bzw. den Verbrauchern anhand eines Versuchssystems entwickelt und experimentell validiert werden.

ABBILDUNG 2



Gegenüberstellung von gemessener (schwarz) und simulierter (braun) vertikaler Temperaturverteilung in einem zunächst nur im oberen Drittel geladenen Pufferspeicher bei Wärmeübertragung über ein Solarregister im unteren Drittel des Pufferspeichers

Die übergeordnete Systemregelung soll neben der Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten und Prognosemethoden für Lastabnahme und Solareintrag eine gezielte Interaktion mit dem Benutzer beinhalten.

Die Regelung des Scheitholzkessels soll sich neben den grundsätzlichen Vorteilen modellbasierter Regelungen insbesondere durch eine CO- λ -Regelung auszeichnen. Dazu soll die CO- λ -Charakteristik unter Verwendung des kombinierten Sensors zur Sauerstoffmessung und Detektion unverbrannter Komponenten (KS1D des Projektpartners LAMTEC) kontinuierlich geschätzt und zur Vorgabe eines für den aktuellen Betriebszustand optimalen Sollwertes für den Sauerstoffgehalt verwendet werden.

Die neue Regelung soll schlussendlich zu einer Steigerung der Effizienz, Reduktion der Schadstoffemissionen und Erhöhung des Benutzerkomforts führen.

Methodische Vorgehensweise

Die geplanten Ziele sollen grundsätzlich durch ein enges Zusammenspiel von experimentellen Arbeiten an einem im Technikum von BIOENERGY 2020+ installierten Versuchssystem und theoretischen regelungs-, feuerungs- und wärmetechnischen Arbeiten erreicht werden.

Um eine detaillierte und umfassende Untersuchung der feuerungs- und wärmetechnischen Zusammenhänge zu ermöglichen wurde eine typische Systemkonfiguration bestehend aus einem Scheitholzkessel (Nennleistung 28 kW), zwei Pufferspeichern (jeweils 1.500l) und der zugehörigen hydraulischen Verschaltung mit zahlreichen zusätzlichen Sensoren sowie einer Möglichkeit zur Simulation beliebiger Solarerträge bzw. Lastabnahmen ausgestattet. Beispielhaft dafür zeigt Abbildung 1 alle am Scheitholzkessel erfassten Messgrößen.

Da für die spätere Entwicklung einer modellbasierten Regelung insbesondere das dynamische Verhalten und dessen Modellierung relevant ist, muss bei der Datenerfassung auf eine ausreichend hohe zeitliche

Auflösung geachtet werden – konkret werden alle Stellgrößen, Messgrößen sowie wesentlichen internen Größen der Standardregelung mit einer äquidistanten Schrittweite von einer Sekunde erfasst, aufgezeichnet und auch visualisiert.

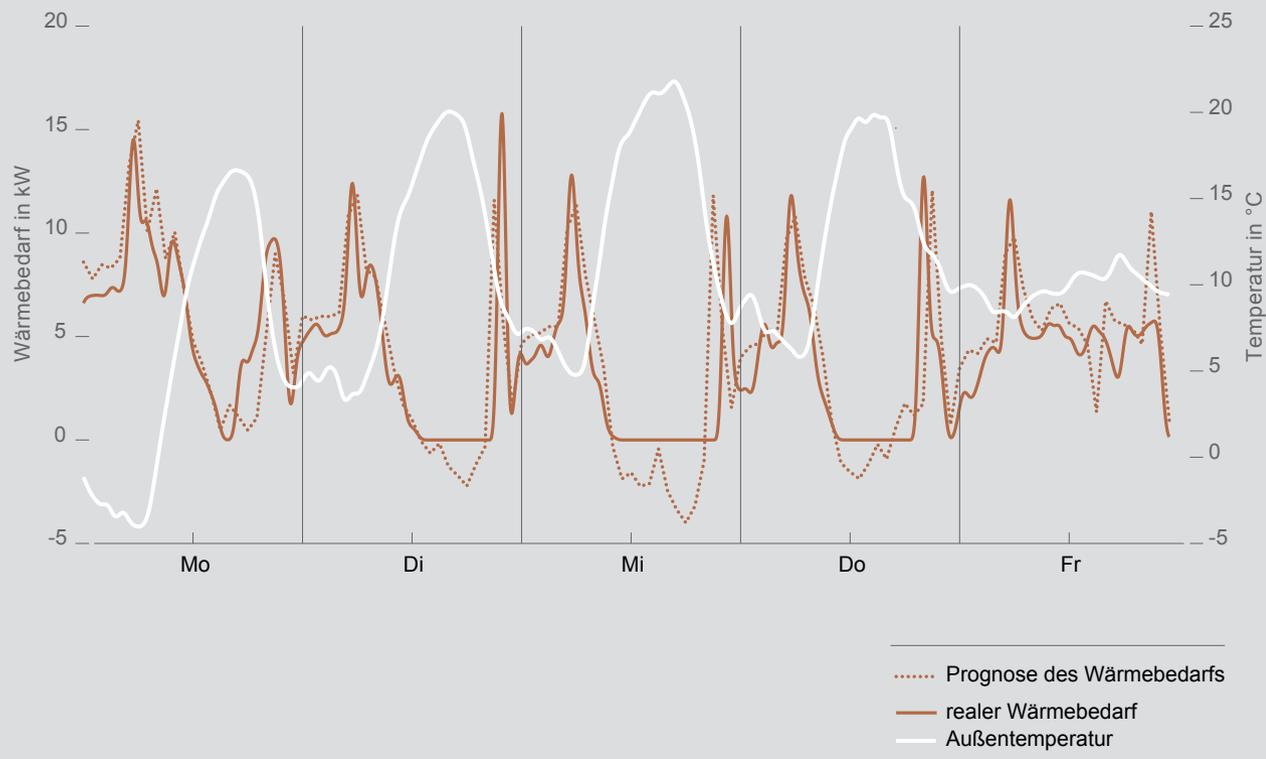
Zusätzlich zur geeigneten Auflösung wurde auch besonderes Augenmerk darauf gelegt, dass die Messungen das eigentliche Betriebsverhalten nicht beeinflussen. So werden beispielsweise die zugeführten Luftströme jeweils so gemessen, dass die Messung keine zusätzlichen Druckabfälle verursacht, da diese jeweils durch einen zusätzlichen Ventilator kompensiert werden, in dem der Druck vor der eigentlichen Luftansaugung auf Umgebungsdruck geregelt wird.

Die mathematische Modellierung wird soweit möglich getrennt für die verschiedenen Anlagenteile durchgeführt um die Komplexität der einzelnen Modelle überschaubar zu halten. Neben der Luftzufuhr, der Speicherwirkung des Schamotts, dem Wärmeübertrager, aller hydraulischer Komponenten sowie auch den Pufferspeichern gilt es insbesondere das eigentliche Abbrandverhalten zu modellieren.

Aus verschiedenen Vorarbeiten zur modellbasierten Regelung automatisch beschickter Systeme stehen Modelle für den Großteil der einzelnen Anlagenteile zur Verfügung. Deren mathematische Struktur kann in der Regel beibehalten oder lediglich leicht modifiziert werden, wodurch nur eine Anpassung der Modellparameter an das betrachtete System erforderlich ist.

Die für einen Reglerentwurf geeignete dynamische Modellierung des Abbrandverhaltens stellt aber eine gänzliche Neuheit dar, wozu nicht auf Ergebnisse aus Vorprojekten und auch nur sehr eingeschränkt auf Literatur zurückgegriffen werden kann. Die Basis dazu bildet ein umfassendes Versuchsprogramm zur gezielten Variation verschiedener Einflussparameter wie Holzart, Wassergehalt, Füllraumbelegung oder den Startbedingungen mit ausreichend vielen Wiederholungen um auch die stochastischen Schwankungen bei vermeintlich gleichen Bedingungen bewerten zu können.

ABBILDUNG 3



Beispielhaftes Prognoseergebnis für den Wärmebedarf eines Gebäudes mit einer Anschlussleistung von 35 kW im Vergleich zum tatsächlich abgenommenen Wärmestrom

„Modellbasierte Regelungen ermöglichen eine Steigerung der Effizienz, Reduktion der Schadstoffemissionen und Erhöhung des Benutzerkomforts ohne hardwaretechnische Änderungen.“ PROJEKTLEITER MARKUS GÖLLES



Neben den dynamischen Eigenschaften der Brennstoffumsetzung soll dabei auch die Abhängigkeit der CO- λ -Charakteristik von den verschiedenen Einflussparametern sowie deren stochastische Schwankungen gezielt untersucht werden.

Wenn für alle Anlagenteile sowie Prozesse geeignete mathematische Modelle vorliegen, werden diese zu einem Gesamtmodell für das komplette System zusammengefügt, das in weiterer Folge die Basis für die Entwicklung einer modellbasierten Regelung für die betrachtete Systemkonfiguration bestehend aus einem Scheitholzkessel, einem Pufferspeicher, einer Solaranlage sowie deren hydraulischer Verbindungen darstellt.

Die zunächst analytischen Arbeiten im Rahmen des Reglerentwurfs werden durch entsprechende Simulationsstudien begleitet, sodass für die erste Implementierung am Versuchssystem eine bereits in Simulationsstudien verifizierte Regelungsstrategie zur Verfügung steht.

Schließlich soll die entwickelte Regelungsstrategie am Versuchssystem implementiert und durch umfassende Testläufe validiert werden. Dazu sollen alle relevanten Betriebsvariationen sowohl mit der Standardregelung als auch mit der neuen modellbasierten Regelung untersucht und insbesondere hinsichtlich Komponenten- und Systemeffizienz, Schadstoffemissionen und Robustheit (dh. Erhöhung des Benutzerkomforts) gegenübergestellt werden.

Optimales Zusammenspiel der einzelnen Teilsysteme durch eine übergeordnete prädiktive Systemregelung

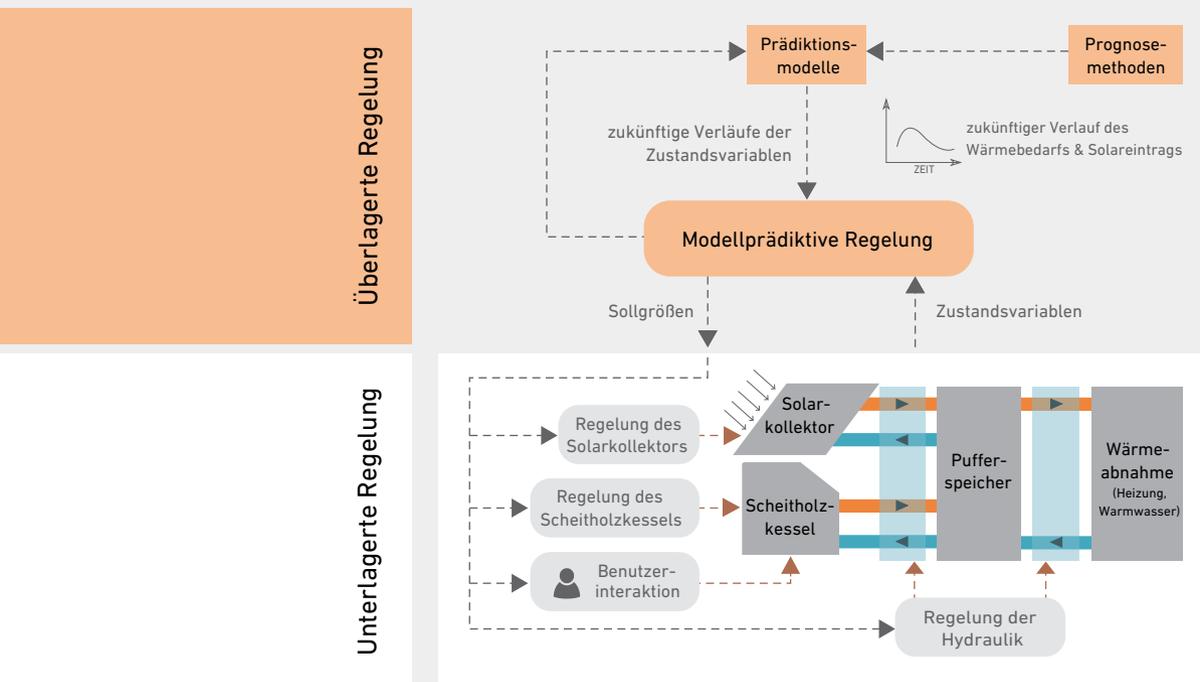
Die zu entwickelnde übergeordnete Systemregelung soll im Wesentlichen auf einer gezielten Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten (insbesondere des Pufferspeichers), der Verwendung geeigneter Prognosen für die zu erwartende Lastabnahme sowie den zu erwartenden Solarertrag und einer gezielten Interaktion mit dem Benutzer zur indirekten Beeinflussung der Brennstoffzufuhr basieren.

Zur Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten kommen mathematische Modelle zum Einsatz, die ein Abschätzen der im jeweiligen System gespeicherten Energie in Folge einer bestimmten Betriebsweise ermöglichen. Beispielhaft dafür zeigt *Abbildung 2* die Gegenüberstellung von gemessener und simulierter vertikaler Temperaturverteilung beim Beladen eines zunächst nur im oberen Drittel erwärmten Pufferspeichers des Versuchssystems über ein sich im unteren Drittel befindliches Solarregister.

Die Prognosen für die Lastabnahme sowie den Solarertrag sollen Wetterprognosedaten sowie auch die Art des jeweiligen Tages (Wochentag vs. Wochenende bzw. Feiertag) berücksichtigen und das Ergebnis darüber hinaus laufend an sich ändernde Bedingungen anpassen.

Grundlegende Struktur der zu entwickelnden Regelung

ABBILDUNG 4



Beispielhaft dafür zeigt Abbildung 3 die Gegenüberstellung von prognostiziertem und tatsächlich abgenommenem Wärmestrom samt der zugehörigen Außentemperatur für ein Gebäude mit einer Anschlussleistung von 35 kW.

Die Benutzerinteraktion basiert dabei auf konkreten Vorgaben zu Zeitraum und Menge der Brennstoffnachfüllungen um eine angemessene Wärmebereitstellung im Pufferspeicher sicherzustellen.

Die Systemregelung verwendet die verfügbaren Prognosen sowie mathematischen Modelle schlussendlich dazu um laufend das zukünftige Verhalten für verschiedene Betriebsweisen zu simulieren und die im Sinne einer bestimmten Kostenfunktion optimale Betriebsweise zu ermitteln und in weiterer Folge vorzugeben. Diese Betriebsweise kann zum Teil durch gezielte Vorgaben an die unterlagerten Regelungen der Solaranlage, der Hydraulik und auch des Scheitholzkessels (konkrete Leistungsanforderung) umgesetzt werden. Einen wesentlichen Teil dazu muss aber der Benutzer beitragen – der von der Systemregelung dazu aufgefordert wird zu einem bestimmten Zeitpunkt eine bestimmte Menge an Brennstoff nachzulegen. Das grundsätzliche Zusammenspiel der einzelnen Teile der Regelung ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Schadstoffarme und effiziente Verbrennung durch modellbasierte Regelung

Der grundsätzliche Ansatz zur Regelung der Verbrennung liegt in einer gemeinsamen und ganzheitlichen Betrachtung aller Regel- und Stellgrößen im Sinne einer Mehrgrößenregelung, wohingegen Standardregelungen immer auf entkoppelten Regelkreisen basieren. Dadurch können die verkoppelten Vorgänge explizit berücksichtigt werden was letztendlich eine zielgerichtete Beeinflussung der verschiedenen Betriebsparameter wie beispielsweise der Luftstufung oder der aktuell umgesetzten Brennstoffmenge und somit grundsätzlich einen effizienten und schadstoff-

armen Betrieb ermöglicht. Die endgültig zum Einsatz kommende Methode zum Entwurf der modellbasierten Regelung lässt sich aber zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht abschätzen, da die letztendliche Struktur der mathematischen Modelle für das Abbrandverhalten entscheidenden Einfluss darauf haben wird.

Wesentliche Bedeutung neben der eigentlichen Regelung wird der Schätzung des großteils nicht messtechnisch erfassten aktuellen Systemzustandes, wie zB. der Temperatur des Schamotts, und insbesondere unbekannter Störgrößen, wie zB. die Brennstoffeigenschaften, zukommen, da diese entscheidenden Einfluss auf das Abbrandverhalten haben.

Die Schätzung der verschiedenen ansonsten unbekanntenen Prozessgrößen ermöglicht ein deutlich effizienteres Zusammenspiel von übergeordneter Systemregelung und der Regelung des Scheitholzkessels selbst. So ist es beispielsweise nicht sinnvoll bei jedem Brennstoff exakt die gleiche Leistung zu fordern. Aufgrund der stark unterschiedlichen Energiedichte zeigt sich bei verschiedenen Brennstoffen ein deutlich unterschiedlicher Primärluftbedarf für eine bestimmte Leistung. Die Forderung konstanter Brennstoffumsetzung bewirkt somit eine drastische Änderung der Luftstufung, die sehr häufig mit negativen Auswirkungen auf die Ausbrandqualität bzw. grundsätzlich auf die Schadstoffemissionen einhergeht.

Es ist somit wichtig, dass die übergeordnete Systemregelung den tatsächlichen Zustand der Verbrennung dahingehend mitberücksichtigt, dass der geforderte Wärmestrom in einem Bereich liegt, der unter sinnvollen Verbrennungsbedingungen umgesetzt werden kann.

Diese Strategie soll zusätzlich durch eine CO- λ -Regelung unterstützt werden, die basierend auf einer kontinuierlichen Schätzung der aktuellen CO- λ -Charakteristik den in ihrem Sinne optimalen Sollwert für den Restsauerstoffgehalt vorgibt und somit für minimale CO-Emissionen bei bestmöglichem Wirkungsgrad sorgt.

Abschätzung der Verbesserungspotenziale durch eine modellbasierte Regelung

TABELLE 1

	Ausgangswerte	Zielwerte
Jahresnutzungsgrad [% $H_{u,Brst}$]	75	80 - 83
CO-Emissionen [mg/MJ $H_{u,Brst}$] (Volllastzyklus – inkl. Aufheizen und Auskühlen)	345	170-200
Gesamtstaubemissionen [mg/MJ $H_{u,Brst}$] (Prüfstandsbedingungen, mittlere Leistung)	14	10 - 12

Abschätzung des Verbesserungspotenzial

Ausgehend von Abschätzungen für den Jahresnutzungsgrad moderner, marktverfügbarer Scheitholzkessel (mit Saugzugventilator) von 75 % bezogen auf $H_{u,Brst}$ und einem Steigerungspotenzial bis 81 % $H_{u,Brst}$ durch Verwendung der besten Einzelkomponenten sowie einem Steigerungspotenzial von 6,5 % $H_{u,Brst}$ nur durch die modellbasierte Regelung der Feuerung bei automatisch beschickten Systemen (ohne Systemregelung) im Rahmen von Vorprojekten wird von einer Steigerung des Jahresnutzungsgrades von 5 - 8 % $H_{u,Brst}$ auf 80 - 83 % $H_{u,Brst}$ ausgegangen.

In Anlehnung an die in Vorprojekten ermittelten typischen Emissionen von modernen, marktverfügbaren Scheitholzkesseln (mit Saugzugventilator) sowie den erzielten Emissionsreduktionen durch die modellbasierte Regelung von automatisch beschickten Emissionen wird eine Reduktion der CO-Emissionen um 40 - 50 % und der Gesamtstaubemissionen von 15 - 30 % angestrebt. Reale Gesamtjahresemissionen hinsichtlich Staub und CO könnten durch eine Reduktion der Fehlbedienungen noch deutlicher ausfallen, können aber mangels Felddaten nicht quantifiziert werden.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Erhöhung des Jahresnutzungsgrades durch effizientes Zusammenspiel von Scheitholzkessel, Pufferspeicher und Solaranlage
- Steigerung des Benutzerkomforts durch gezielte Interaktion der Regelung mit dem Benutzer
- Effiziente und schadstoffarme Verbrennung durch gesamtheitliche, modellbasierte Regelung und zusätzliche CO- λ -Regelung zur Vorgabe des optimalen Sollwertes für den Restsauerstoffgehalt





Projektleitung: CHRISTIAN MAIER
BIOENERGY 2020+ GmbH



„Der Betrieb von Scheitholzöfen bietet eine beliebte Möglichkeit, Raumwärme mit erneuerbaren Brennstoffen bereitzustellen. Solche Öfen stehen aber immer wieder im Verdacht, signifikant zu anthropogenen Schadstoffemissionen in die Atmosphäre beizutragen. Die Aussagekraft aktueller Prüfmethode für Scheitholzfeuerungen stößt hinsichtlich der Praxisrelevanz an ihre Grenzen, weil thermische Effizienz und Emissionswerte bei optimalen Betriebsbedingungen ermittelt werden. Diese Betriebsbedingungen werden im häuslichen Betrieb nicht immer erreicht. Sowohl Ofenhersteller als auch Lufthygieniker fordern strenge, aber faire und praxisnahe Bewertungsmethoden zur signifikanten Reduktion der Emissionen im praktischen Betrieb. Mit einem neuen Prüfverfahren reagiert man auf die hohen Anforderungen, mit denen die Ofenbranche konfrontiert ist und liefert ein zentrales Steuerungselement für technologische Entwicklungen und Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität.“ PROJEKTL EITER CHRISTIAN MAIER

Ofenprüfung 2020

Entwicklung eines heiztechnischen Prüfverfahrens für Scheitholzöfen mit hoher Praxisrelevanz

Aktuelle Prüfmethoden für Scheitholzfeuerungen haben jahrelang einen wertvollen Dienst zur technologischen Weiterentwicklung geleistet, mittlerweile stoßen sie aber an ihre Grenzen. Sie ermöglichen nicht mehr die Unterscheidung guter von sehr guten und den besten Geräten, weil die Effizienz und Emissionswerte unter optimalen Betriebsbedingungen ermittelt werden. Im alltäglichen praktischen Betrieb beim Endkunden auftretende Bedingungen werden dabei nicht ausreichend berücksichtigt. Alle positiv geprüften und am österreichischen Markt erhältlichen Geräte sind laut aktueller Prüfung gleichwertig. Umgekehrt sind Aussagen über den praktischen Betrieb anhand von Prüfstandsergebnissen nicht möglich. Verbesserungen der Prüfstandswerte können mit schlechteren Werten in der Praxis einhergehen und technologische Entwicklungen werden in die falsche Richtung gelenkt. Beispielsweise werden entsprechend der aktuellen Norm die Verbrennungsbedingungen von späteren, „heißen“ Abbränden verbessert – mitunter zulasten des ersten Abbrandes aus dem kalten Zustand, der in der Praxis tagtäglich auftritt und aktuell nicht bewertet wird.

Der Betrieb von Scheitholzöfen verursacht signifikante Beiträge zur Emission organischer und elementarer Kohlenstoffverunreinigungen in die Atmosphäre. Sowohl Ofenhersteller als auch Lufthygieniker fordern deshalb eine strenge aber faire und praxisnahe Bewertungsmethode zur Reduktion der Emissionen im praktischen Betrieb.

Im Projekt „Ofenprüfung 2020“ wurde ein neues Prüfverfahren entwickelt und evaluiert, ob damit eine

praxisrelevantere und trotzdem reproduzierbare Bewertung von Scheitholzöfen möglich ist. Mit diesem Verfahren soll ein Technologiesprung bei Scheitholzöfen eingeleitet und die Technologieführerschaft der österreichischen Ofenhersteller abgesichert werden. Im Mittelpunkt standen die Themen Praxisrelevanz, Reproduzierbarkeit, Qualitätssicherung und Differenzierbarkeit. Der Fokus wurde dabei nicht darauf gelegt, neue Messtechniken zu entwickeln, sondern eine Kombination von vorhandenen bzw. in Entwicklung befindlichen Messmethoden vorzunehmen. Die Umfeldanalyse und Anforderungen für eine neue Ofenprüfung wurden gemeinsam mit relevanten Ofenherstellern, Prüfinstituten und Lufthygienikern erarbeitet. Mit der neuen Methode wird erstmals eine Produktdifferenzierung bezüglich des Praxisbetriebs erreicht.

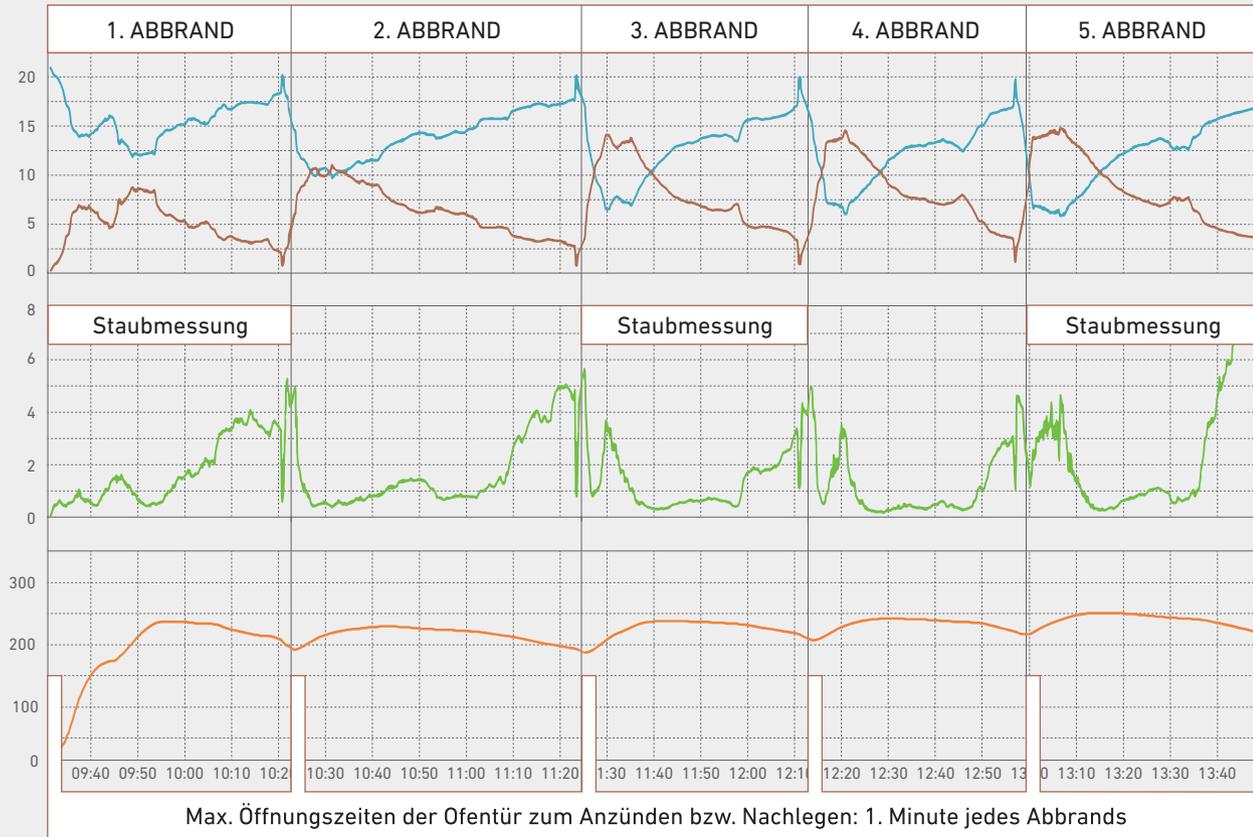
Erhebung bestehender Prüfmethoden

Am Beginn der eigentlichen Verfahrensentwicklung stand die Analyse der Vorteile, Nachteile, Ziele und Wirkungen aktueller internationaler Prüfmethoden für Scheitholzöfen (zB. der europäischen EN13240, amerikanische EPA method 28, etc.), die in Form einer Recherche zu bestehenden Prüfnormen und -methoden, Messmethoden, Qualitätslabels und Anforderungen in gesetzlichen Regelwerken durchgeführt wurde. Aufbauend auf diese Studie wurde eine erste Methodik zur Ofenprüfung 2020 entwickelt. Über geltende Prüfvorschriften und Anforderungen hinaus war es für die Definition der Ofenprüfung 2020 wichtig, den Prüf-ablauf sowie die Prüf-, Mess- und Auswertverfahren

Exemplarischer Verlauf von Messwerten nach der Ofenprüfung 2020

ABBILDUNG 1

DATENAUFZEICHNUNG FÜR EMISSIONEN UND WIRKUNGSGRAD



- O₂ [vol.-%]
- CO₂ [vol.-%]
- CO [kppm]
- t [°C]

vor allem im Hinblick auf die Praxisrelevanz und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse möglichst eindeutig festzulegen.

Entwicklung der Prüfmethode

Eine zentrale Rolle für die Entwicklung der neuen Methode spielte die Definition von praxisrelevanten Prüfbedingungen. In einer ersten Testreihe mit Öfen am Stand der Technik erfolgte die Evaluierung des neuen Prüfungsablaufs, der Betriebsbedingungen, der angewandten Messmethoden und der Auswertung – sowohl am Prüfstand als auch in Feldmessungen. Parallel dazu wurden vom Konsortium unter Einbeziehung relevanter Stakeholder Strategien für die Umsetzung im praktischen Prüfbetrieb ausgearbeitet.

Zur Erhebung des üblichen Nutzungsverhaltens von Scheitholz-Raumheizgeräten wurden Endkunden und Experten mittels Fragebogen befragt¹. An drei Feldmessgeräten wurden dazu auch Dauermessungen des Kaminzuges und der Abgastemperatur durchgeführt, um die Nutzungsfrequenz und praktischen Abbrandbedingungen zu ermitteln. Weitere Versuchsreihen im Labor lieferten Daten, um zB. Kriterien zur reproduzierbaren Ofenbedienung am Prüfstand auszuarbeiten²:

- Versuchsreihe zur Ermittlung eines Nachlegekriteriums, um das in der Umfrage verwendete qualitative Kriterium „Flamme aus“ bzw. „kleine Flamme“ durch ein quantitativ messbares Kriterium zu ersetzen.
- Versuchsreihe zur Bestimmung eines quantitativen Kriteriums für die Abbrandphase „oberste Lage brennt“ zur Bestimmung des Zeitpunkts, an dem die Luftklappenstellung von Anzündbetrieb auf Heizbetrieb zu ändern ist.
- Zugvariationen entsprechend der Dauermessungen bei verschiedenen konstanten Zugniveaus und Vergleich der Auswertergebnisse zu einem Zug abhängig von der Abgastemperatur zur Bestimmung eines geeigneten Zugverlaufes.

Methode Ofenprüfung 2020

Die Erhebung der praktischen Betriebsweise mittels Feldmessungen und Umfragen bildeten fundierte Grundlagen für die neue Prüfmethode. Besonderes Augenmerk wurde auch auf den Aufwand für die neue Prüfmethode gelegt, ein massiver Mehraufwand würde von vielen Seiten nicht akzeptiert werden. Die Ofenprüfung 2020 sollte im Optimalfall mit einem Mindestaufwand von zwei Tagen auskommen, wobei nach dem fünften Abbrand die klassische Prüfung und/oder die sicherheitstechnische Prüfung folgen können. Die Bestimmungen der bestehenden Prüfnorm EN13240 wurden soweit wie möglich beibehalten (zB. Prüfaufbau und Messstellen) und nur wo unbedingt notwendig geändert und geschärft³:

- Geprüft werden 5 Abbrände hintereinander aus dem kalten Zustand anstatt eines beliebigen Abbrandes nach den ersten beiden (Anzünden und Vorprüfung in EN13240).
- Aufzeichnung der Abgastemperatur und Gasanalyse (CO, CO₂, O₂, OGC, NO_x) über alle 5 Abbrände in Intervallen von 10 Sekunden.
- Die Staubmessung erfolgt in 3 vollständigen Abbränden.
- Es wurde ein quantitatives, praxisrelevantes Nachlegekriterium definiert: Das Ende des aktuellen und damit der Anfang des nächsten Abbrandes ist erreicht, wenn über 30 Sekunden hinweg der Vergleichswert für den CO₂-Gehalt im Abgas unterschritten wird. Der Vergleichswert ist der kleinere der folgenden beiden Werte: 25 % des maximalen CO₂-Gehalts des aktuellen Abbrandes oder 4,0 % CO₂-Gehalt im Abgas.
- Als Brennstoff wird der Prüfbrennstoff nach EN13240 verwendet, jedoch mit einem Wassergehalt im Bereich 12±4 % festgelegt⁴.
- Der mittlere Kaminzug über jeden einzelnen Abbrand muss 12±1 Pa betragen.

Mittlere Praxisfaktoren für Ofenprüfung 2020 (OP2020) und EN13240

TABELLE 1

Mittelwerte 3 Öfen	Vergleich OP2020	Vergleich EN13240
CO	1,2	2,3
OGC	1,5	2,4
NO _x	0,9	1,0
Staub	2,0	2,8
Wirkungsgrad	0,90	0,81



Im Vergleich zur gültigen Typenprüfung nach EN13240 schafft die neu entwickelte Ofenprüfung 2020 Praxisfaktoren näher dem Idealwert 1 und dadurch einen deutlich besseren Praxisbezug.

In der Abbildung 1 ist der exemplarische Verlauf von Messwerten dargestellt. Der erste Abbrand beginnt mit dem Start der Staubmessung vor dem Anzünden und endet, sobald der erste Nachlegezeitpunkt erreicht ist. Gleichzeitig beginnt der zweite Abbrand usw. für den 2. bis 5. Abbrand. Am Beginn bzw. Ende des 1., 3. und 5. Abbrandes beginnt bzw. endet jeweils die Staubmessung. Innerhalb der ersten Minute erfolgt das Anzünden beim ersten Abbrand und das Nachlegen bei den folgenden Abbränden.

Zur standardisierten Auswertung der aufgezeichneten Messdaten wurde ein webbasiertes Auswertetool entwickelt. Die Ergebnisse des Rechenprogramms umfassen den Sauerstoffgehalt, die Emissionen an CO, NO_x, OGC und Staub im Abgas, den indirekten thermischen Wirkungsgrad und die maximale Wärmeleistung des Raumheizgeräts. Spezielles Augenmerk wurde hier auch auf die Bestimmung der Wärmeleistung gelegt. Es wurde ein Praxiswärmeleistungsbereich definiert, der es erlaubt, die Wirkung der Wärmespeicherung des Ofens zu berücksichtigen. Die zugeführte Wärmemenge wird dabei in Anlehnung an die EN15250 für Speicheröfen auf die Betriebsdauer und Speicherdauer bezogen. Dadurch kann letztlich eine praxisrelevante Aussage über die Leistung der Wärmeabgabe des Ofens an den Aufstellungsraum getroffen werden.

Ringversuche und Feldmessungen zur Methodevaluierung

Der sogenannte Ringversuch ist ein Test, der zur Validierung von Vorschriften zu Messverfahren eingesetzt wird. Dabei werden im Allgemeinen zB. identische Proben in verschiedenen Prüflaboratorien untersucht und anschließend die Ergebnisse verglichen, um Aussagen zur Messgenauigkeit zu treffen. Diese Art der Evaluierung stellt eine wichtige Form der externen Qualitätssicherung dar.

An dem Ringversuch zur Evaluierung der Ofenprüfung 2020 nahmen drei Institute teil. Die Messergebnisse wurden statistisch ausgewertet um die Reproduzierbarkeit der Prüfvorschrift zu bewerten. Die Ziele dieses Ringversuchs waren insbesondere auch folgende Punkte:

- Evaluierung der Methodenbeschreibung im Bezug auf Eindeutigkeit, Praxisrelevanz und Prüftauglichkeit
- Nachweis der Reproduzierbarkeit der Methode
- Nachweis der Praxisrelevanz durch Vergleich zwischen Prüfstandmessungen und Feldmessungen mit baugleichen Öfen von Endkunden

Die relevanten Tagesmittelwerte als Prüfungsergebnis der neuen Methode schwanken etwa um $\pm 20\%$, einem für Scheitholzöfen sehr guten Wert. Generell treten meist größere Standardabweichungen bei Auswertung der Gesamtheit der Messdaten über alle Prüfinstitute und geringere Standardabweichungen der Messreihen innerhalb einzelner Institute auf. Das konkret verwendete Holz und der jeweilige Benutzer/Prüfer des Ofens haben nach den derzeitigen Erfahrungen den größten Einfluss auf die Variabilität von Messergebnissen.

Für die Evaluierung der Praxisrelevanz dienten die Messdaten der Feldversuche. Als Kennzahl für die Praxisrelevanz einer Prüfmethode wurde das Verhältnis der mittleren Tageswerte im Feld zum mittleren Tageswert bei Prüfung im Technikum gebildet. Dieser „Praxisfaktor“ ist bei den Emissionen meist größer als 1 und beim Wirkungsgrad kleiner 1. Zum Vergleich mit der klassischen Prüfung wurde auch ein Praxisfaktor für das Prüfstandsergebnis nach EN13240 gesetzt. Die entsprechenden Praxisfaktoren für die Ofenprüfung 2020 und die klassische Prüfung sind in Tabelle 1 angeführt.



Referenzen

- ¹ G. Reichert, C. Schmidl, W. Haslinger, W. Moser, S. Aigenbauer, F. Figl, M. Wöhler: "Investigation of user behavior and operating conditions of residential wood combustion (RWC) appliances and their impact on emissions and efficiency", Mitteleuropäische Biomassekonferenz in Graz, Jänner 2014.
- ² C. Schmidl, W. Haslinger, S. Aigenbauer, F. Figl, J.M. Kirchhof, W. Moser, G. Reichert, M. Schwabl, V. Verma, M. Wöhler: „Improvement of real life operation performance of residential wood combustion appliances“, Europäische Biomassekonferenz in Kopenhagen, Juni 2013.
- ³ G. Reichert, C. Schmidl, S. Aigenbauer, F. Figl, W. Moser, H. Stressler, W. Haslinger: „Development of a new type test method for residential wood combustion (RWC) appliances focusing on real life operation“, Europäische Biomassekonferenz in Hamburg, Juni 2014.
- ⁴ J. Spitzer, P. Enzinger, G. Fankhauser, W. Fritz, F. Golja, R. Stiglbrunner: „Emissionsfaktoren für feste Brennstoffe“, Techreport, Johanneum Research, Institut für Energieforschung; Institut für angewandte Statistik und Systemanalyse; Nr.: IEF-B-07/98, Graz, Dezember 1998.
- ⁵ www.bereal-project.eu

Fazit

Ziel des Projekts „Ofenprüfung 2020“ war die Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens zur praxisrelevanten Bewertung von Scheitholzöfen auf dem Prüfstand. Das neue Prüfverfahren soll einen Technologiesprung bei Scheitholzöfen einleiten, damit strenge Anforderungen in Zukunft auch im Praxisbetrieb eingehalten werden können. Wichtig für die neue Prüfmethode ist die Definition von praxisrelevanten Prüfbedingungen, die durch Umfragen und Feldmessungen erhoben wurden.

Zweckmäßig ist, dass viele in den bestehenden Normen verwendete Rahmenbedingungen auch weiterhin aufrechterhalten werden können. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Akzeptanz im europäischen Normungsgremium entscheidend.

Parallel zur technischen Entwicklung erarbeitete das Konsortium – unter Einbeziehung relevanter Stakeholder – Strategien für die Umsetzung und Verbreitung auf europäischer Ebene. Aus den Arbeiten entstand das Projekt „BeReal“: *Advanced testing methods for better real life performance of biomass heating appliances*.

In diesem Verbandsprojekt, gefördert im 7. Rahmenprogramm der EU, wird die Idee der Ofenprüfung zusätzlich auf Heizeinsätze und Pelletsöfen auf europäischer Ebene übertragen⁵.

Die Information sowie der Austausch mit Umweltschützern und politischen Entscheidungsträgern fanden bereits während der Projektlaufzeit statt. Als praxisnahe Bewertungsmethode der Zukunft ist die Ofenprüfung 2020 ein zentrales Steuerungselement für technologische Entwicklungen und Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Prüfergebnisse mit der neuen Methode sind zwischen verschiedenen Prüfstellen besser reproduzierbar als mit der bestehenden Norm.
- Die Abweichungen zu Feldmessungen werden auf ein Minimum reduziert.
- Die Kaltstartemissionen von Raumheizgeräten und eine praxisnahe Wärmeleistung werden erstmals berücksichtigt.

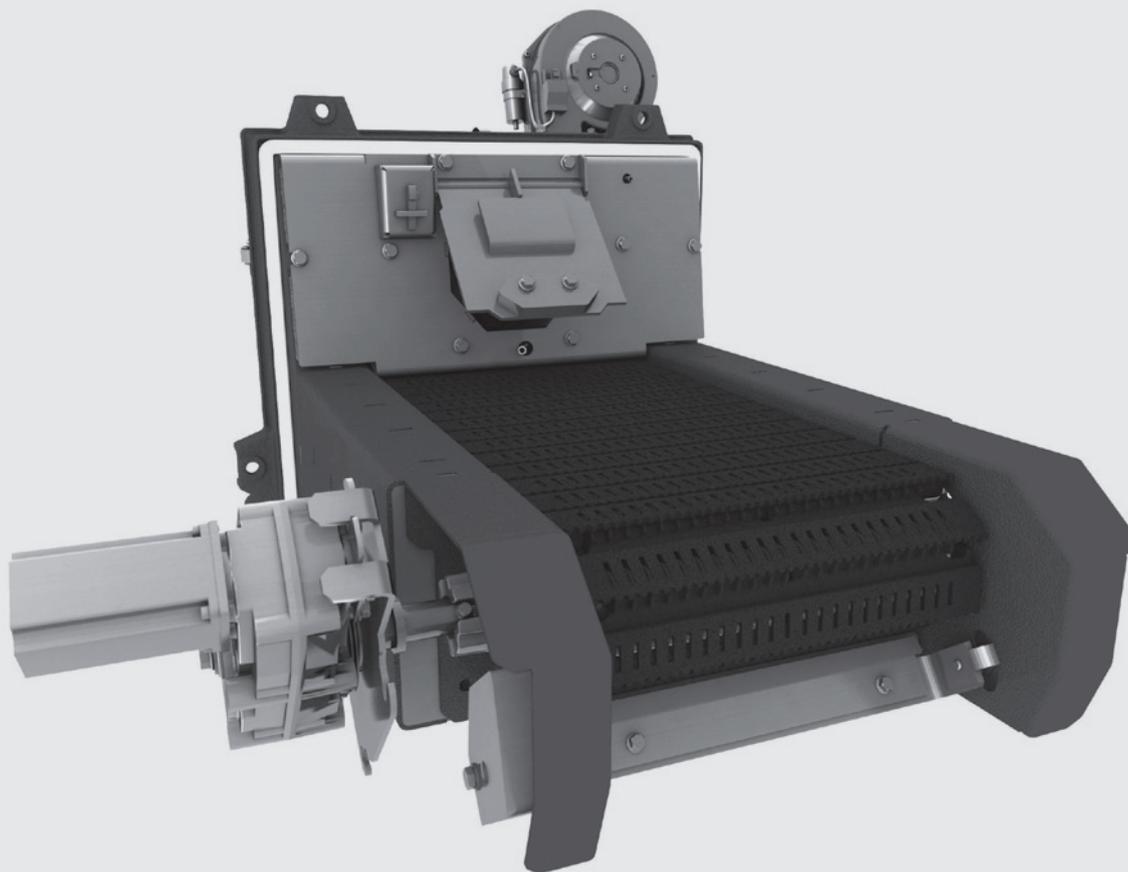




Projektleitung: GEORG HOFMEISTER (KWB)
MARKUS GÖLLES (BIOENERGY 2020+)

Für die Verbrennung alternativer Brennstoffe entwickelter Raupenbrenner

ABBILDUNG 1



Modellbasierte Regelung und Elektrofilterintegration zur schadstoffarmen Verbrennung alternativer Biomassebrennstoffe

Ausgangssituation und Projektziele

Biomasse-Feuerungen sind heute in einem weiten Leistungsbereich verfügbar und es existieren einige Feuerungskonzepte die nicht nur holzartige sondern auch zahlreiche alternative Brennstoffe verbrennen können. Alternative Brennstoffe wie halmgutartige Brennstoffe (zB. Stroh), Altholz, Energiegräser oder Reste aus der landwirtschaftlichen Industrie (Kerne, Schalen etc.) bleiben aber nach wie vor meist ungenutzt. Deren Verbrennung ist mit größerem technologischen Aufwand verbunden wodurch sich die reale Nutzung derzeit auf wenige Anwendungen im mittleren und größeren Leistungsbereich begrenzt. Eine deutliche Erhöhung der Nutzung von alternativen Brennstoffen (wie zB. Maisspindeln, Stroh, Olivenkernschrot) könnte durch eine verstärkte Nutzung in einem geringeren Leistungsbereich von ca. 50-300 kW erreicht werden, die gleichzeitig auch mit neuen ökonomischen Perspektiven und erhöhten Marktanteilen für die jeweiligen Feuerungshersteller einhergehen würde.

Die Verbrennung alternativer Brennstoffe gestaltet sich aufgrund ihrer von holzartigen Brennstoffen abweichenden chemischen Zusammensetzung sowie einer meist deutlich größeren Schwankungsbreite in der Brennstoffqualität um einiges schwieriger. Dabei gilt es insbesondere den oft sehr niedrigen Ascheschmelztemperaturen und dem damit verbundenem erhöhten Risiko für Betriebsausfälle durch Verschlackungen im Brennstoffbett sowie den in der Regel deutlich höheren Feinstaubemissionen in Folge der höheren Ascheanteile und auch deren

ungünstigeren chemischen Zusammensetzung besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Um auch bei der Verbrennung alternativer Brennstoffe alle Anforderungen an eine moderne Biomasse-Feuerung in gleichem Maße wie bei Feuerungen für holzartige Brennstoffe ohne wesentliche Mehrkosten zu erfüllen, soll in diesem Projekt eine effiziente Kombination von zwei Primär- und einer Sekundärmaßnahme erarbeitet werden. Dabei handelt es sich um:

- die Verwendung einer grundsätzlich sehr brennstoffflexiblen Feuerungstechnologie,
- die Ermöglichung eines zielgerichteten Betriebs bei optimalen Verbrennungsbedingungen durch eine modellbasierte Regelung und
- die Integration eines elektrostatischen Abscheiders direkt in die Feuerungsanlage.

Brennstoffflexible Feuerungstechnologie

Die wesentliche Anforderung an eine brennstoffflexible Feuerungstechnologie ist eine hohe Flexibilität bei den Größen, die unmittelbaren Einfluss auf das Abbrandverhalten und dabei vor allem auf das Brennstoffbett haben. Dadurch soll die feuerungstechnische Basis für eine gezielte Anpassung der Betriebsbedingungen an das jeweilige Ascheschmelzverhalten sowie auch das Freisetzungsverhalten der Feinstaubbildenden Elemente gelegt werden. Zusätzlich dazu muss die Feuerung auch die Rahmenbedingungen für einen guten Gasphasenausbrand bieten, um die Basis für eine Minimierung der organischen Feinstaubanteile bereitzustellen.

Staubemissionen einer Hackgut-Feuerung mit konventioneller und modellbasierter Regelung

TABELLE 1

Leistung	Emissionen [mg/Nm ³ 13% O ₂ tr.RG]	Konventionelle Regelung	Modellbasierte Regelung
Volllast 30 KW	Gesamtstaub +	33,88	26,97
	PM1 *	25,20	19,92
Teillast 9 KW	Gesamtstaub +	108,80	39,07
	PM1 *	94,74	22,94

[+ Gesamtstaubmessung: VDI 2066-1, * PM1-Messung mit Berner-Niederdruck-Kaskadenimpaktor]

Beispielhafter Vergleich des Aerosolbildungspotenzial verschiedener Biomassebrennstoffe

TABELLE 2

Brennstoff	K	Summe von K, Na, Zn, Pb	Ascheanteil	Aerosolbildungs- potenzial
	Gew.% TS	Gew.% TS	Gew.% TS	mg/Nm ³ [13% O ₂]
Holzpellets	0,05	0,06	0,3	15
Hackgut (G30 W30)	0,08	0,1	1,2	25
Kurzumtriebshölzer	0,1 – 0,3	0,15 – 0,30	1,6	60 – 130
Miscanthus	0,2	0,5	2,5	140
Stroh	0,3 – 0,7	0,7 – 2,0	4,5	230 – 430

[Ergebnisse aus den im Rahmen des COMET-Programmes durchgeführten Projekten New Biomass Fuels I und II]

„Zukünftige Biomasse-Kleinfeuerungen sollen selbstständig und zielgerichtet auf Brennstoffänderungen reagieren, sodass sie auch alternative Brennstoffe schadstoffarm und störungsfrei verbrennen können.“ DIE PROJEKTLEITER



Zielgerichteter Betrieb bei optimalen Verbrennungsbedingungen durch modellbasierte Regelung

Jegliche feuerungstechnisch gesetzte Primärmaßnahme wird in der Praxis erst dadurch wirksam, dass die für den Anlagenbetrieb sorgende Regelung in der Lage ist die Anlage bei den geforderten Betriebsparametern zu betreiben. Neben den grundsätzlichen Forderungen bestmöglicher Lastmodulationsfähigkeit und hoher Effizienz wird dabei insbesondere dem Betrieb bei einer bestimmten Luftstufung (einem bestimmten Luftverhältnis im Brennstoffbett) sowie einem im Sinne der CO- λ -Charakteristik optimalen Gesamtluftverhältnis zukommen. Diese Anforderungen stellen eine große regelungstechnische Herausforderung dar, die mit konventionellen regelungstechnischen Methoden prinzipbedingt nur teilweise erfüllt werden können, da sie nicht in der Lage sind alle komplexen Zusammenhänge geeignet zu berücksichtigen.

Die sinnvollste Alternative stellen modellbasierte Regelungen dar, die auf mathematischen Modellen für das dynamische Verhalten der einzelnen Anlagenteile basieren. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass immer alle Vorgänge und Interaktionen gemeinsam betrachtet werden.

Aber auch bei Verwendung einer modellbasierten Regelung kommt es in Abhängigkeit vom verwendeten Brennstoff und Betriebszustandes zu Veränderungen der optimalen Verbrennungsbedingungen – im Wesentlichen der Luftstufung und des Gesamtluftverhältnisses. Um auf diese Änderungen durch Variation der Sollwerte für den Restsauerstoffgehalt sowie das Luftverhältnis im Brennstoffbett (die Luftstufung) geeignet zu reagieren, sollen die CO- λ -Charakteristik

sowie auch die dynamische Charakteristik der Brennstoffbettes während des Betriebes laufend mitgeschätzt werden um so eine entsprechende Anpassung der Sollwerte vornehmen zu können.

Beispielhaft für das grundsätzlich durch die Verwendung einer modellbasierten Regelung erzielbare Verbesserungspotenzial ist in Tabelle 1 die in einer kommerziell verfügbaren Hackgut-Kleinfeuerung erzielte Reduktion der Staubemissionen dargestellt.

Integration eines elektrostatischen Abscheiders

Die beiden Primärmaßnahmen (brennstoffflexible Feuerungstechnologie, modellbasierte Regelung) werden bei vielen alternativen Brennstoffen alleine dennoch nicht ausreichen um die immer strengeren Grenzwerte für die Staubemissionen einzuhalten. Tabelle 2 fasst eine entsprechende Abschätzung des Aerosolbildungspotenzial für verschiedene Brennstoffe beispielhaft zusammen. Aus diesem Grund werden zusätzlich dazu auch entsprechende Sekundärtechnologien zum Einsatz kommen müssen. Das Projekt konzentriert sich auf einen Leistungsbereich bis 300 kW, in dem realistisch nur Elektrofilter mit automatischer Abreinigung in Frage kommen, da andere Technologien mit zu hohen spezifischen Kosten einhergehen würden bzw. die Erreichung der marktkonformen Lebensdauer unsicher wäre. Hierzu könnten grundsätzlich marktverfügbare Nachrüstlösungen angedacht werden, diese wurden aber in erster Linie für holzartige Brennstoffe entworfen und wären mit höheren Kosten sowie erhöhtem Platzbedarf verbunden.

Der vielversprechendere Ansatz ist den Elektrofilter direkt in die Anlage im Bereich des Wärmeübertragers

ABBILDUNG 2



1



2



- 1 Verbrennung von Miscanthus-Pellets auf einem Raupenbrenner
2 und einem Vorschubrost: Brennstoffbeschickung in beiden Fällen von rechts
*Rostbelastung im Fall des Vorschubrostes aufgrund von Verschlackungsproblemen
nur bei 60% von jener des Raupenbrenners*
-

zu integrieren. Dadurch kann die Einbausituation des Elektrofilters optimal an die Biomassefeuerung angepasst werden, womit sowohl die Kosten als auch der erforderliche Platzbedarf minimiert werden. Insbesondere im Bereich der Abreinigung sowie der Entaschung mit dem Wärmeübertrager sind entsprechende Synergieeffekte und folglich signifikante ökonomische Vorteile zu erwarten.

Methodische Vorgehensweise

Die methodische Vorgehensweise beruht grundsätzlich auf einem engen Zusammenspiel aus konzeptionellen, feuerungs- wie auch regelungstechnischen Überlegungen und experimentellen Arbeiten an einer eigens dafür mit umfassender Sensorik und Messtechnik sowie einem Versuchselektrofilter ausgestatteten brennstoffflexiblen Versuchsanlage.

Verwendung einer brennstoffflexiblen Feuerungstechnologie als Versuchsanlage

Die Basis der Versuchsanlage ist eine *KWB Multifire 2* die grundsätzlich auf hohe Brennstoffflexibilität abzielt. Ihr Herzstück ist ein eigens für die Verbrennung alternativer Brennstoffe entwickelter *Raupenbrenner*, der den in der Müllverbrennung häufig eingesetzten Wanderrosten ähnlich ist (Abbildung 1).

Dessen großer Vorteil ist die Möglichkeit, das Förderverhalten des Brennstoffes und der Asche zu kontrollieren. Diese Kontrolle ermöglicht die Beeinflussung der Höhe des Brennstoffbettes und auch der Ascheschicht sowie der Länge der Ausbrandzone und auch der Verweilzeit der Asche am Rost.

Dadurch ist es möglich die Asche gezielt aus der heißen Zone zu befördern und die Bildung größerer Schlackeklumpen zu verhindern. Anstatt dieser Klumpen bildet sich eine hinreichend dünne Schlackeschicht, welche am Ende des Brenners zerbricht, vom Rost fällt und von einer Schnecke mühelos in den Aschebehälter transportiert werden kann. Dies ermöglicht bei Brennstoffen mit einem sehr niedrigen Ascheerweichungspunkt – wie z.B. Miscanthus – im Vergleich zu

Treppen- oder Vorschubrosten eine um zwei Drittel höhere Flächenbelastung. Beispielfhaft dafür zeigt Abbildung 2 einen Vergleich der Rostbelegung bei der Verbrennung von Miscanthus-Pellets auf einem Raupenbrenner und einem Vorschubrost. Obwohl der Vorschubrost nur mit 60% der Flächenbelastung des Raupenbrenners betrieben wurde, zeigt sich schon eine deutliche Verklumpung des Brennstoffbettes, wohingegen der Raupenbrenner keine Verschlackungsprobleme zeigte.

Zusätzlich erweist sich der kontinuierliche Brennstoff- und Aschetransportes des Raupenbrenners auch als vorteilhaft hinsichtlich der Staubemissionen, da einerseits weniger Partikel aufgewirbelt werden und die Asche andererseits für kürzere Zeit hohen Temperaturen ausgesetzt ist, wodurch es zu einer Reduktion der Freisetzung aerosolbildender Elemente kommt.

Ausstattung der Versuchsanlage mit umfassender Messtechnik und Sensorik

Zur umfassenden Untersuchung des Versuchselektrofilters sowie des Abbrandverhaltens verschiedener alternativer Brennstoffe wurde die Versuchsanlage mit umfassender Messtechnik und Sensorik ausgestattet. Neben allen Stellgrößen werden alle relevanten Drücke, Temperaturen und Massenströme sowie die Konzentration der wesentlichen Rauchgaskomponenten (O_2 , CO , CO_2 , NO_x , H_2O , org.C) mit ausreichend hoher zeitlicher Auflösung (Periodendauer: 1 s) kontinuierlich erfasst und durch gezielte Staubmessungen (Fein- und Gesamtstaub) begleitet.

Untersuchung und mathematische Modellierung des Abbrandverhaltens der zu untersuchenden alternativen Brennstoffe

Zur gezielten Untersuchung des Abbrandverhaltens alternativer Brennstoffe wird ein umfassendes Versuchsprogramm mit Pellets aus Kurzumtrieb, Stroh, Maisspindeln und als Referenz gewöhnlichen Holzpellets in der exakt gleichen Art und Weise durchgeführt. Das je Brennstoff etwas über 100 Stunden dauernde

Positionierung des integrierten Elektrofilters unterstützt modulare Bauweise

ABBILDUNG 3



ohne integrierten Elektrofilter



mit integrierten Elektrofilter

Versuchsprogramm beinhaltet Gesamtstaub- und Feinstaubmessungen in mehreren Wiederholungen sowie eine jeweilige Vermessung der CO- λ -Charakteristik bei drei verschiedenen Leistungen und hier jeweils bei drei verschiedenen Luftverhältnissen im Brennstoffbett – Charakterisierung der Staubemissionen und der CO- λ -Charakteristik für jeden Brennstoff in 9 verschiedenen Betriebspunkten. Die Untersuchung des für die Regelung essentiellen dynamischen Verhaltens erfolgt durch gezielte (möglichst sprungförmige) Variationen des zugeführten Brennstoff- bzw. Primärluftmassenstromes bei verschiedenen Rostgeschwindigkeiten sowie bei getakteter und kontinuierlicher (drehzahlvariabler) Ansteuerung der Brennstoffzufuhr. Alle gewonnenen Messergebnisse sollen anschließend zur mathematischen Modellierung des Abbrandverhaltens herangezogen werden, wobei nach Möglichkeit eine für alle Brennstoffe geeignete Modellstruktur gefunden werden soll, sodass für die verschiedenen Brennstoffe lediglich eine Parameteranpassung erforderlich ist.

Zielgerichteter Betrieb bei optimalen Verbrennungsbedingungen durch modellbasierte Regelung

Aufbauend auf dem mathematischen Modell für das Abbrandverhalten und aus Vorarbeiten verfügbaren Modellen für die anderen relevanten Anlagenteile soll ein nichtlinearer Mehrgrößenregler für die gleichzeitige Regelung von Vorlauftemperatur, Sauerstoffgehalt und Luftverhältnis im Brennstoffbett entworfen werden. Dieser Mehrgrößenregler wird durch ein überlagertes Modul ergänzt, das basierend auf einer kontinuierlichen Schätzung der CO- λ -Charakteristik – unter Verwendung eines kombinierten Sensors zur Sauerstoffmessung und Detektion unverbrannter Komponenten (KS1D des Projektpartners LAMTEC) – sowie ausgewählter Modellparameter des Brennstoffbettmodells an den aktuellen Betrieb der Feuerung angepasste Sollwerte für den Restsauerstoffgehalt aber auch das Luftverhältnis im Brennstoffbett vorgibt.

Integration eines elektrostatischen Abscheiders

Im Zuge der Konzeption zeigte sich, dass die sinnvollste Position für die Integration eines elektrostatischen Abscheiders nach dem Wärmeübertrager ist, da die Rauchgastemperaturen zwischen gekühlter Sekundärverbrennungszone und den Rauchrohrbündeln mit rund 750°C noch sehr hoch sind und eine Positionierung zwischen zwei Rauchrohrbündeln mit erhöhtem Aufwand und somit erhöhten Kosten verbunden wäre. Dies begünstigt darüber hinaus auch eine modulare Bauweise der Anlage je nach Bedarf mit oder ohne Elektrofilter (Abbildung 3).

Durch die beiden Primärmaßnahmen (brennstoffflexible Feuerungstechnologie und zielgerichteter Betrieb durch modellbasierte Regelung) ist davon auszugehen, dass der verbleibende Feinstaub größtenteils aus den aus dem Brennstoffbett freigesetzten anorganischen Komponenten bestehen wird. Um hierauf gezielt eingehen zu können, wurden gezielte Untersuchungen mit verschiedenen Teilkomponenten – wie zB. Draht- und Plattenelektroden, Nass- und Trockenabreinigung usw. – bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und Brennstoffen durchgeführt.

Basierend auf diesen Ergebnissen und weiteren Untersuchungen soll schlussendlich ein Versuchselektrofilter konzipiert und konstruiert werden.

Experimentelle Validierung des Emissionsreduktionspotenzial

Schließlich sollen die entwickelte Regelung und der Elektrofilter am Versuchssystem implementiert und durch umfassende Testläufe mit verschiedenen alternativen Brennstoffen validiert werden. Die Testläufe sollen insbesondere typische Tageszyklen beinhalten, die durch Emissionsmessungen begleitet werden. Letztendlich soll eine Bewertung des Potenzial zur Schadstoffreduktion durch Kombination von modellbasierter Regelung und Elektrofilterintegration erfolgen.

Angestrebte Verbesserungen

- Anhebung des im Realbetrieb erzielbaren Nutzungsgrades (Brennstoffeinsparung) durch die effizientere Verbrennung aufgrund der modellbasierten Regelung.
- Beträchtliche Reduktion der Schadstoffemissionen (CO, org. C, Feinstaub) durch die verbesserte Feuerungsregelung in Kombination mit der neu entwickelten CO- λ -Regelung.
- Erhöhung der Betriebsstabilität, weniger Verschlackungen beim Verbrennen von alternativen, aschehaltigen Brennstoffen und dadurch eine Verringerung des Wartungsaufwands und von Betriebsausfällen.
- Wesentlich höhere Abscheidung von Feinstaub, durch den neu entwickelten und speziell für alternative Brennstoffe abgestimmten Elektrofilter.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Die verstärkte Nutzung alternativer Biomasse-Brennstoffe kann einen wesentlichen Beitrag zum Ausbau der erneuerbaren und nachhaltigen Energieversorgung leisten.
- Die Verwendung einer modellbasierten Regelung begünstigt auch bei schwierigen Brennstoffen einen schadstoffarmen und robusten (erhöhter Kundenkomfort) Feuerungsbetrieb.
- Bei Brennstoffen mit sehr hohem Feinstaubemissionspotenzial wird erst durch die Integration eines elektrostatischen Elektrofilters die Einhaltung der immer strenger werdenden gesetzlichen Grenzwerte für Staubemissionen auch in Biomass-Kleinfeuerungen mit vertretbarem finanziellem Aufwand möglich.





StirBio: Entwicklung einer Versuchsfeuerung mit optimiertem Wärmetauscher zur Integration eines Stirling-Moduls

Projektnummer	838709
Koordinator	BIOENERGY 2020+ GmbH
Projektleitung	Ernst Höftberger: ernst.hoeftberger@bioenergy2020.eu
Partner	Frauscher Thermal Motors GmbH, Hargassner GesmbH, TU Wien - Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften
Förderprogramm	e!MISSION.at – 5. Ausschreibung
Dauer	01.04.2013 - 31.03.2016
Budget	1.034.761 €



BioPower: Strom- und Wärmegenerierung aus Biomasse mittels einer neuartigen Pellet-befeuerten Mikro-KWK

Projektnummer	843873
Koordinator	SOLARFOCUS GmbH
Projektleitung	Joachim Kalkgruber, jo.kalkgruber@solarfocus.at
Partner	TU Graz, Institut für Wärmetechnik (IWT)
Förderprogramm	e!MISSION.at – 4. Ausschreibung, Industrielle Forschung
Dauer	01.05.2014 - 30.04.2017
Budget	521.153 €



Wood Stoves 2020: Entwicklung der nächsten Generation von sauberen Kaminöfen

Projektnummer	B466076
Koordinator	RIKA Innovative Ofentechnik GmbH
Projektleitung	Manuel Kössl: koessler@rika.at
Partner	BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Förderprogramm	Allgemeine klimarelevante Projekte
Dauer	01.08.2014 - 31.07.2017
Budget	608.117 €



Smart Logwood Boiler: Modellbasierte Regelung von Scheitholzkesseln mit Pufferspeichern

Projektnummer	848797
Koordinator	BIOENERGY 2020+ GmbH
Projektleitung	Markus Göllles: markus.goelles@bioenergy2020.eu
Partner	KWB - KRAFT UND WÄRME AUS BIOMASSE GmbH, LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG
Förderprogramm	Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung
Dauer	01.07.2015 - 30.06.2018
Budget	659.221 €



Ofenprüfung 2020: Entwicklung eines heiztechnischen Prüfverfahrens für Scheitholzöfen mit hoher Praxisrelevanz

Projektnummer	834639
Koordinator	BIOENERGY 2020+ GmbH
Projektleitung	Christian Maier: christian.maier@bioenergy2020.eu
Partner	Österreichischer Kachelofenverband, TU-Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Austroflamm GmbH, HARK GmbH & Co. KG, RIKA Innovative Ofentechnik GmbH
Förderprogramm	5. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020
Dauer	01.04.2012 - 31.03.2014
Budget	430.000 €



MoREIntergrALBiomass: Modellbasierte Regelung und Elektrofilterintegration zur schadstoffarmen Verbrennung alternativer Biomassebrennstoffe

Projektnummer	848877
Koordinator	KWB - KRAFT UND WÄRME AUS BIOMASSE GmbH
Projektleitung	Georg Hofmeister (KWB) und Markus Göllles (BIOENERGY 2020+)
Partner	BIOENERGY 2020+ GmbH, LAMTEC Meß- u. Regeltechnik f. Feuerungen GmbH & Co KG
Förderprogramm	Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung
Dauer	01.06.2015 - 31.05.2018
Budget	851.478 €



Lined writing area for notes.

Medieninhaber

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22, 1060 Wien

Tel: (+43 1) 585 03 90, Fax: (+43 1) 585 03 90-11

office@klimafonds.gv.at

www.klimafonds.gv.at

Für den Inhalt verantwortlich

Die AutorInnen tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Broschüre. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider. Weder der Klima- und Energiefonds noch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) oder die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiter-nutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung

www.angieneering.net

Druck

Druckerei Janetschek GmbH. Bei der mit Ökostrom durchgeführten Produktion wurden die Anforderungen des Österreichischen Umweltzeichens erfüllt. Sämtliche während des Herstellungsprozesses anfallenden Emissionen wurden im Sinne einer klimaneutralen Druckproduktion neutralisiert.

Verlags- und Herstellungsort: Wien

Wir haben diese Broschüre mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt und die Daten überprüft. Rundungs-, Satz- oder Druckfehler können wir dennoch nicht ausschließen.

www.klimafonds.gv.at



In Kooperation mit:

