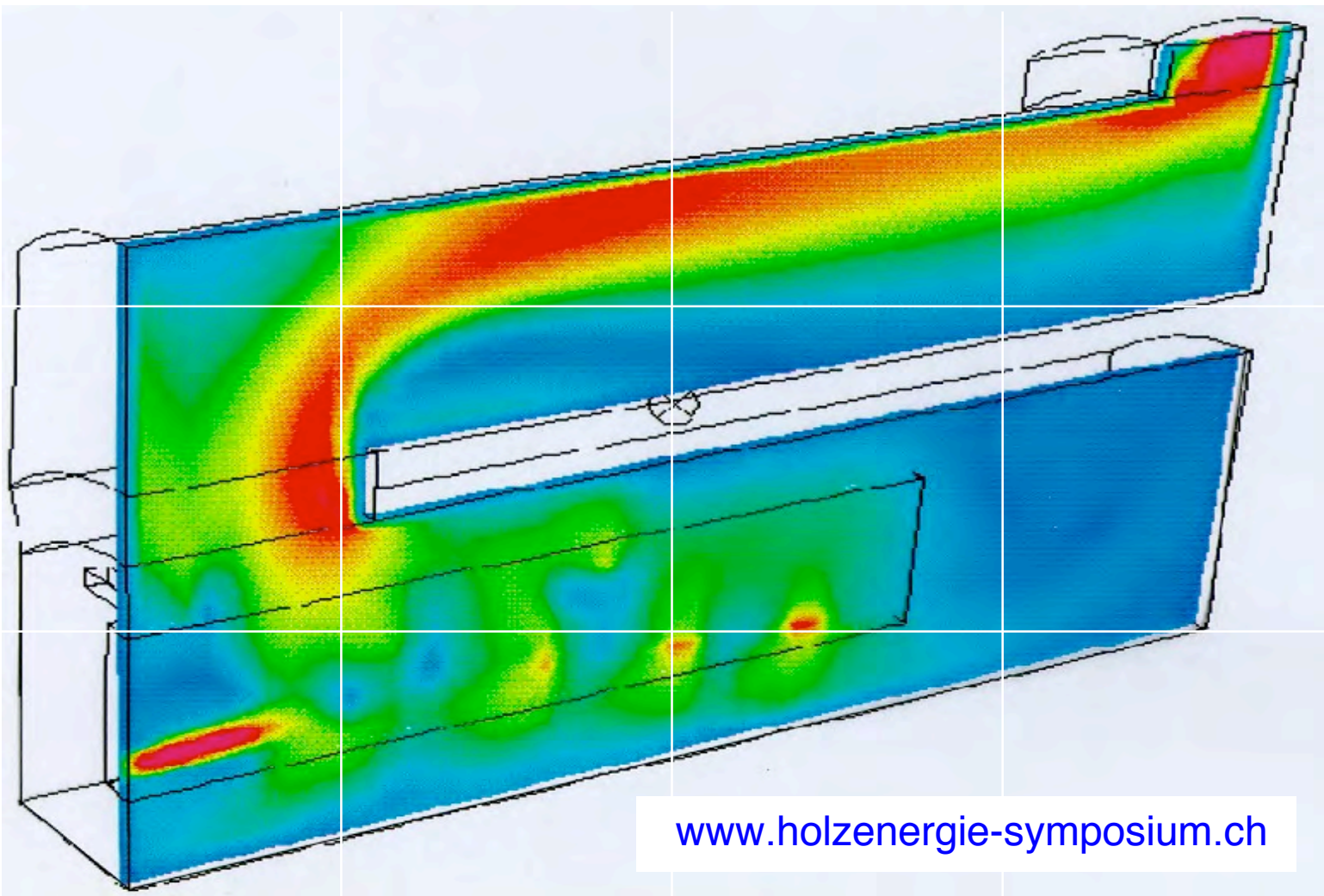


Thomas Nussbaumer (Hrsg.)

12. Holzenergie-Symposium

Holzenergie-Nutzung in der Energiestrategie 2050

14. September 2012, ETH Zürich



Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie

Thomas Nussbaumer (Hrsg.):

12. Holzenergie-Symposium: Holzenergie-Nutzung in der Energiestrategie 2050.
Tagung an der ETH Zürich am 14. September 2012, Verenum Zürich 2012

ISBN 3-908705-24-X

Bezugsquelle Holzenergie-Symposium
 c/o TEMAS AG, Egnacherstrasse 69, CH – 9320 Arbon
 Telefon 071 446 50 30, Fax 071 446 50 82
 Email info@holzenergie-symposium.ch

Infos www.holzenergie-symposium.ch

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	5
1	F. Rutschmann: Energiestrategie 2050 des Bundes und Beitrag der Holzenergie	7
2	L. Bretschger: Energie und Ökonomie: Auswirkungen von politischen Massnahmen	11
3	R. Jenni: Holzheizkraftwerk Aubrugg	19
4	P. Odermatt, T. Nussbaumer Holzofen mit Verbrennungsretorte und zweistufiger Verbrennung	31
5	M. Kiener, T. Nussbaumer: Strömungsoptimierung einer Vorschubrostfeuerung mit CFD und PIV	53
6	A. Lüthi: Bison Powerblock: Pelletheizung mit linear angetriebenem Dampfmotor	71
7	G. Marinitzsch, T. Kamenik-Lingitz: Wärmeerkraftkopplung mit Holzvergaser und Stirlingmotor	81
8	W. Felsberger: Festbettvergasung mit Blockheizkraftwerk für Holz	89
9	D. Vogel, R. Schmid: 100 kW Heissgasturbine zur Wärmeerkraftkopplung mit Holz	95
10	T. Nussbaumer, K. Fong: Gesundheitsauswirkungen von Feinstaub aus Holzfeuerungen	103
11	B. Müller: Klein-Elektroabscheider: BAFU-Tagung und Konsequenzen	119
12	W. Vock, A. Jenni: QS Support für Holzfeuerungen ab 70 kW	129
13	P. Lienemann, R. Zumstein, W. Vock, N. Agorastos: Qualität von Aschen aus Holzfeuerungen	137
14	W. Emhofer, S. Aigenbauer: CO aus Holzpellets: Bildung, Charakterisierung und Massnahmen	147
15	S. Biollaz, P. Jansohn: Biomassevergasung: Stand der Technik und Trends	159
16	J. Kiel: Torrefaction: Fundamentals, Processes and Potential	173
	Autorenverzeichnis	187

Holzofen mit Verbrennungsretorte und zweistufiger Verbrennung

Peter Odermatt

Thomas Nussbaumer

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw

Zusammenfassung

Im Beitrag wird ein zweistufiges Verbrennungskonzept für Stückholz vorgestellt, das eine geringe Leistungsabgabe während einer langen Abbranddauer erzielt und unter anderem für Wohneinheiten mit geringem Energiebedarf geeignet ist. Das Prinzip basiert auf einer durch Nachrutschen betriebenen Verbrennungsretorte mit anschliessender Nachbrennkammer zum Ausbrand der Gase mit Sekundärluft. Durch Auslegung der Vergasungszone mit kleiner Grundfläche und geringer Wärmekapazität sowie anschliessender strömungsoptimierter Sekundärlufteindüsung wird mit einer Holzcharge eine Abbranddauer von über 4 Stunden bei einer Leistungsfreisetzung von 7.4 kW erreicht. Gleichzeitig werden über den Abbrand ab Zündbeginn CO-Emissionen von rund 500 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ und Staubemissionen von rund 15 mg/m³ erzielt. Das Prinzip ist für Naturzug geeignet und schränkt die Verwendung auf Stückholz von 25 cm Länge ein. Durch Vorgabe eines definierten Befüllungs- und Anzündvorgangs wird die Gefahr der Fehlbedienung eingeschränkt und ein Betrieb ohne Eingriff nach Schliessen der Anzündtüre ermöglicht.

Abstract

Wood stove with combustion retort and two-stage combustion

The project presents an innovative combustion concept for log wood implemented in a wood stove. The concept consists of a retort for the gasification of log wood and a subsequent combustion chamber for the gas phase oxidation. The wood logs are gliding from the fuel hopper into the retort by gravity. This enables a combustion at a low heat output rate of app. 7.4 kW during a long combustion period of 4 hours with one fuel batch at high combustion quality. CO emissions of 500 mg/m³ and particle emissions of 15 mg/m³ at 13 Vol.-% O₂ are achieved including the start-up phase from the fuel ignition. The principle can be applied for natural draught and is designed for wood logs of 25 cm in length. The principle enables an operation without intervention from the fuel ignition to the end of the batch. Furthermore, limitations in fuel size and detailed instructions for the start-up procedure reduce the risk of inappropriate operation.

1 Einleitung

Holzöfen dienen in älteren Wohnbauten oft als Zusatzheizung zur Einsparung fossiler Energie während der Übergangszeit. Dank deutlich geringerem Heizbedarf bieten sich in Gebäuden mit verbesserter Energieeffizienz auch neue Einsatzgebiete an:

- In Häusern nach Minergie-Standard kommen häufig Wärmepumpen zum Einsatz. Die Effizienz von Luftwärmepumpen nimmt jedoch mit sinkender Umgebungstemperatur bei gleichzeitig steigendem Heizleistungsbedarf ab (Bild 1). Aus diesem Grund besteht ein Bedarf nach qualitativ hochwertigen Holz-Zusatzheizungen mit Heizleistungen von weniger als 10 kW, die während der kältesten Jahreszeit betrieben werden und dadurch die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe deutlich erhöhen. Gleichzeitig kann die Wärmepumpe kleiner dimensioniert und die Effizienz dadurch zusätzlich verbessert werden.
- Für Minergie-P-Häuser kommt auch die Möglichkeit einer Wärmeverteilung mittels Luft in Frage, was den Einsatz eines Holzofens als monovalente Heizung ermöglicht.

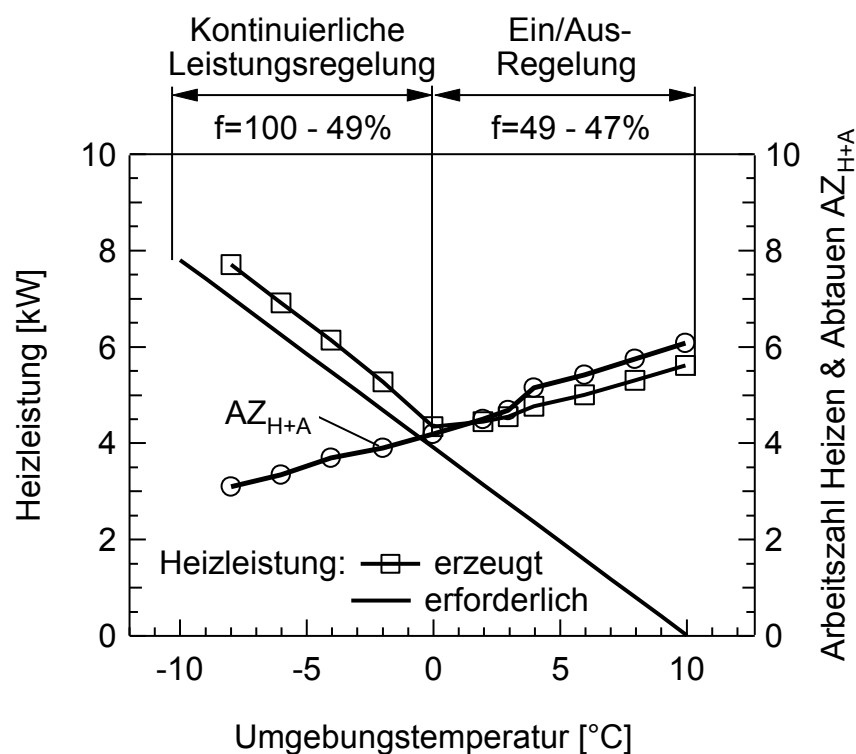


Bild 1 Erforderliche und erzeugte Heizleistung sowie Arbeitszahl Heizen & Abtauen einer leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpe in Funktion der Umgebungstemperatur für ein Minergie-Gebäude (Vorlauf-/Rücklauftemperatur 30/25°C bei -10°C Umgebungstemp.) [1].

Solche Anwendungen stellen hohe Anforderungen an den Bedienungskomfort und an die Luftreinhaltung moderner Holzheizungen. Um einen hohen Bedienungskomfort bei gleichzeitig niedrigen Emissionen zu erzielen, sind lange Abbrandphasen bei kleinen Heizleistungen notwendig. Zudem sollte die Verbrennung ohne manuelle Eingriffe auskommen.

Konventionelle Holzöfen mit einstufigem oberem Abbrand erfüllen diese Anforderungen oft nur bedingt [2]. In Bezug auf die Luftreinhaltung sind dabei vor allem die Emissionen an Russ sowie an flüchtigen und kondensierbaren Kohlenwasserstoffen entscheidend [3–4]. Zur Aufrechterhaltung einer konstanten Heizleistung während mehrerer Stunden wäre ein regelmässiges Nachlegen einer optimalen Holzmenge notwendig. So können sowohl zu grosse als auch zu kleine Holzmenge erhöhte Emissionen an Schadstoffen aus unvollständiger Verbrennung verursachen [5]. Für die Konstruktion und den Betrieb der Holzfeuerungen ist zudem nicht nur das Verhalten während des stationären Betriebs entscheidend, sondern es ist auch auf eine kurze und gute Startphase zu achten, da diese erheblich zu den Gesamtemissionen beitragen kann [6].

Während des Startens und der stationären Phase kann zur Vereinfachung oft auch der Gehalt an Kohlenmonoxid (CO) als Leitgrösse für die Verbrennungsqualität herbeigezogen werden. Methan (CH_4), flüchtige organische Verbindungen (Volatile organic compounds, VOC) und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC) weisen in diesen Phasen in der Regel ein zu Kohlenmonoxid korreliertes Verhalten auf [2].

2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Verbrennungsretorte für Stückholz, die ermöglicht, eine Holzmenge von 6 bis 12 kg über eine Abbranddauer von mindestens 4 Stunden zu verbrennen und die als Basis für einen emissionsarmen Holzofen eingesetzt werden kann.

Durch den kontinuierlichen Abbrand sollen die Emissionen an Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Staub verringert und die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [7] um mindestens 50% unterschritten werden. Folgende Zielwerte sollen dabei als Mittelwert ab Anzünden der Feuerung mit Berücksichtigung der Start- und Abbrandphase sicher eingehalten werden:

- CO < 750 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2
- VOC < 100 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2 .
- Gesamtstaub < 37.5 mg/m_n^3 bei 13 Vol.-% O_2

Weitere Ziele sind eine kurze Startphase sowie ein stabiles Verhalten während des ganzen Abbrands, das nach Möglichkeit ohne manuellen Eingriff nach dem Zündvorgang auskommt. Im Weiteren soll die Feuerung für Naturzugbetrieb geeignet sein und dazu geringe Druckverluste aufweisen. Schliesslich soll das Vorgehen zum Betrieb der Feuerung mit Befüllung und Anzündvorgang eine fehlerhafte Bedienung einschränken.

Um eine lange Abbranddauer bei kleiner Leistung zu erreichen, soll die Feuerung eine konsequente Aufteilung der Verbrennung in eine Primär- und Sekundärzone aufweisen und eine weitgehende Entkopplung zwischen der Wärmefreisetzung aus der Feststoffumwandlung und dem anschliessenden Gasausbrand in der Flamme ermöglichen. Die Feuerung wird dazu in eine Primärzone zur Vergasung des Feststoffs mit Primärluft und eine Nachbrennkammer mit Sekundärluft unterteilt.

3 Funktionsprinzip

3.1 Aufbau des Holzofens mit Verbrennungsretorte

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein aus drei Modulen aufgebauter Holzofen konstruiert (Bild 2). Die Unterteilung erfolgt dabei aufgrund der drei Funktionen:

1. Feststoffvergasung
2. Gasausbrand
3. Wärmeabfuhr

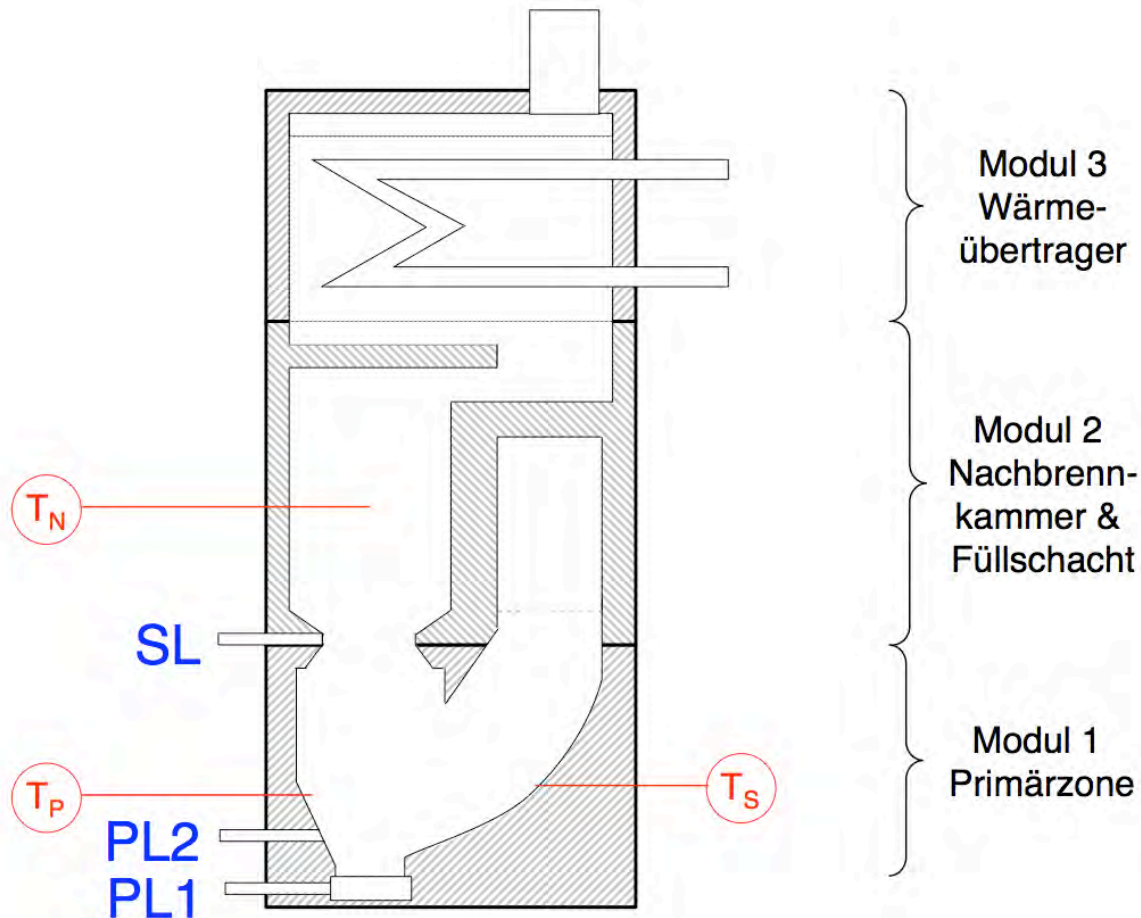


Bild 2 Schema des modular aufgebauten Holzofens mit Verbrennungsretorte und zweistufiger Verbrennung. PL = Primärluft (unterteilt in PL1 und PL 2), SL = Sekundärluft.
T = Temperaturmessungen mit S = Schacht, P = Primärzone, N = Nachbrennkammer.

Die einzelnen Module werden miteinander verschraubt und die Kontaktflächen abgedichtet. Durch den modularen Aufbau können die einzelnen Elemente mit geringem Aufwand verändert werden. Daneben ermöglicht eine separat eingelegte Sekundärluftverteilung die Variation von Grösse und Anzahl der Sekundärluftdüsen.

Das Projekt widmet sich der Entwicklung des Verbrennungskonzepts mit Modul 1 und Modul 2, während Modul 3 des Wärmeübertragers je nach Anwendung unterschiedlich ausgeführt werden kann. Für die Versuche wird eine Wasserkühlung integriert, welche für die Gasanalyse geeignete Abgastemperaturen von 160°C bis 180°C sicherstellt.

Zu Modul 1 werden drei Prototypen verglichen und für die Sekundärluftzufuhr verschiedene Varianten durch strömungstechnische Berechnungen untersucht.

3.2 Befüllung und Anzündvorgang

Der Brennstoff und die Anzündmethode haben einen grossen Einfluss auf die Startphase bei Holzöfen [6]. Da ungeeignete Anzündmethoden hohe Emissionen verursachen können, werden die Befüllung und der Anzündvorgang beim neuen Verbrennungskonzept vorgegeben und in den Versuchen wie folgt eingehalten (Bild 3):

- Naturbelassenes Holz
- Holzfeuchtigkeit u (bezogen auf Trockensubstanz) zwischen 10 – 20%
- 1. Schicht Anzündholz: 200 g feingespaltene Fichte
- 2. Schicht Anzündholz: 1.8 kg feingespaltene Buche
- Hauptbrennstoff: 8 kg – 10 kg Buchen-Scheitholz zu je 500 g – 900 g.

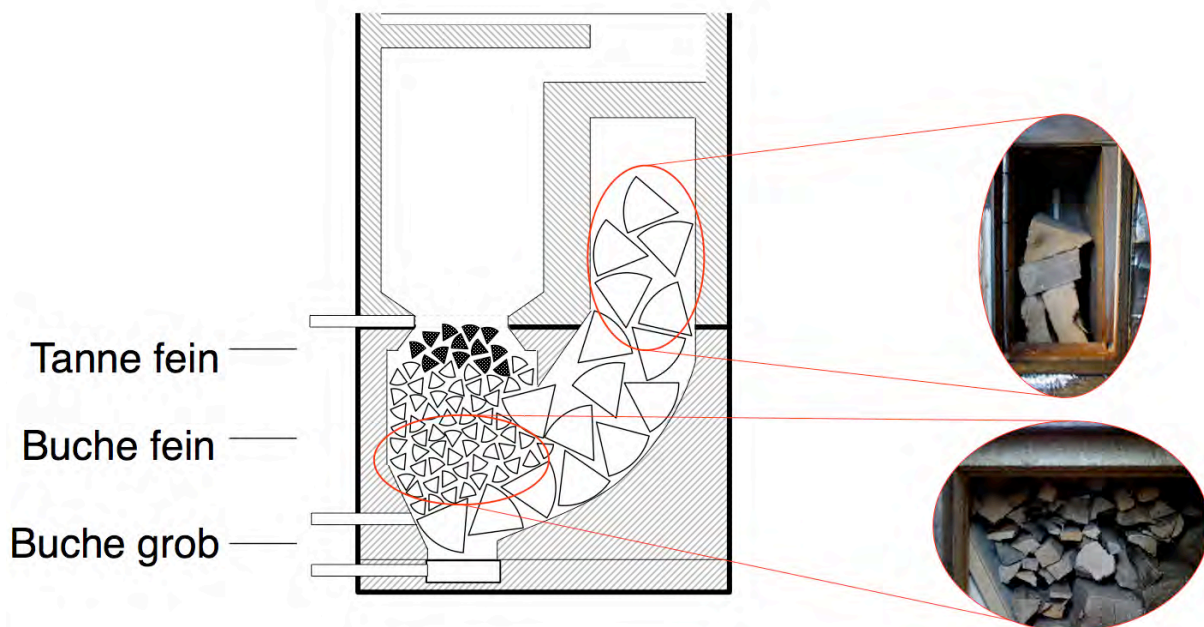


Bild 3 Befüllung des Holzofens mit Verbrennungsretorte. Die Fotos zeigen die Ansicht durch die stirnseitig angebrachten Türen zur Befüllung des Holzofens.

Bild 3 zeigt die Befüllung des Ofens, die durch stirnseitig angebrachte Türen erfolgt. Zuerst werden einige Buchenholzscheiter im Füllschacht eingefüllt, anschliessend in der Verbrennungsretorte das feingespaltene Buchen- und Fichtenholz darauf gelegt und schliesslich der Füllschacht aufgefüllt. Zum Anzünden dienen zwei Anzündhilfen aus wachsextrahierter Holz- wolle, die auf das Anzündmaterial gelegt werden und so zu einem Anzünden von oben führen [8]. Sobald die Anzündhilfen sicher brennen, wird die Türe geschlossen.

4 Numerische Strömungsoptimierung mit CFD

4.1 Methodik der Modellierung

Der Gasphasenausbrand wird durch die Mischungsqualität zwischen Sekundärluft und brennbaren Gasen und durch das Strömungsverhalten der Nachbrennkammer beeinflusst. Um eine strömungstechnisch günstige Lösung sicher zu stellen, wird der Einfluss der Sekundärlufteindüsung auf die Mischung und den Ausbrand der Gase untersucht. Die Verbrennung wird dabei als zweistufiger Prozess mit Feststoffvergasung und anschliessendem Gasphasenausbrand modelliert [9]. Die Modellierung basiert auf Kenngrößen nach Tabelle 1 und beschreibt den stationären Verbrennungszustand.

Tabelle 1 Parameter zur Modellierung.

Parameter	Wert
Feuerungswärmeleistung	12 kW
Verbrennungswirkungsgrad	90%
Primärluftzahl λ_P	0.4
Sekundärluftzahl λ_S	1.1
Luftüberschuss $\lambda = \lambda_P + \lambda_S$	1.5
Holzfeuchtigkeit u	18%
Temperatur Vergasungsprodukte	700°C
Temperatur Sekundärluft	25°C

Die Vergasung wird als idealer Prozess nach Reed [10] mit einer Primärluftzahl von 0.4 angenommen. Die Mischung der Gase aus dem Vergasungsprozess mit der Sekundärluft wird numerisch mit Computational Fluid Dynamics (CFD) modelliert, wobei die Reaktionen in der Nachbrennkammer nach dem Eddy Dissipations Model (EDM) berechnet werden [9].

Bild 4 zeigt die Geometrie für die numerische Strömungsberechnung.
Für die Sekundärluftzuführung werden dabei drei Fälle unterschieden:

1. Rückseite
2. Vorderseite
3. Beidseitig versetzt.

Zudem werden folgende Parameter der Sekundärluft verändert:

- Anzahl Düsen
- Düsendurchmesser
- Anordnung der Eindüsung.

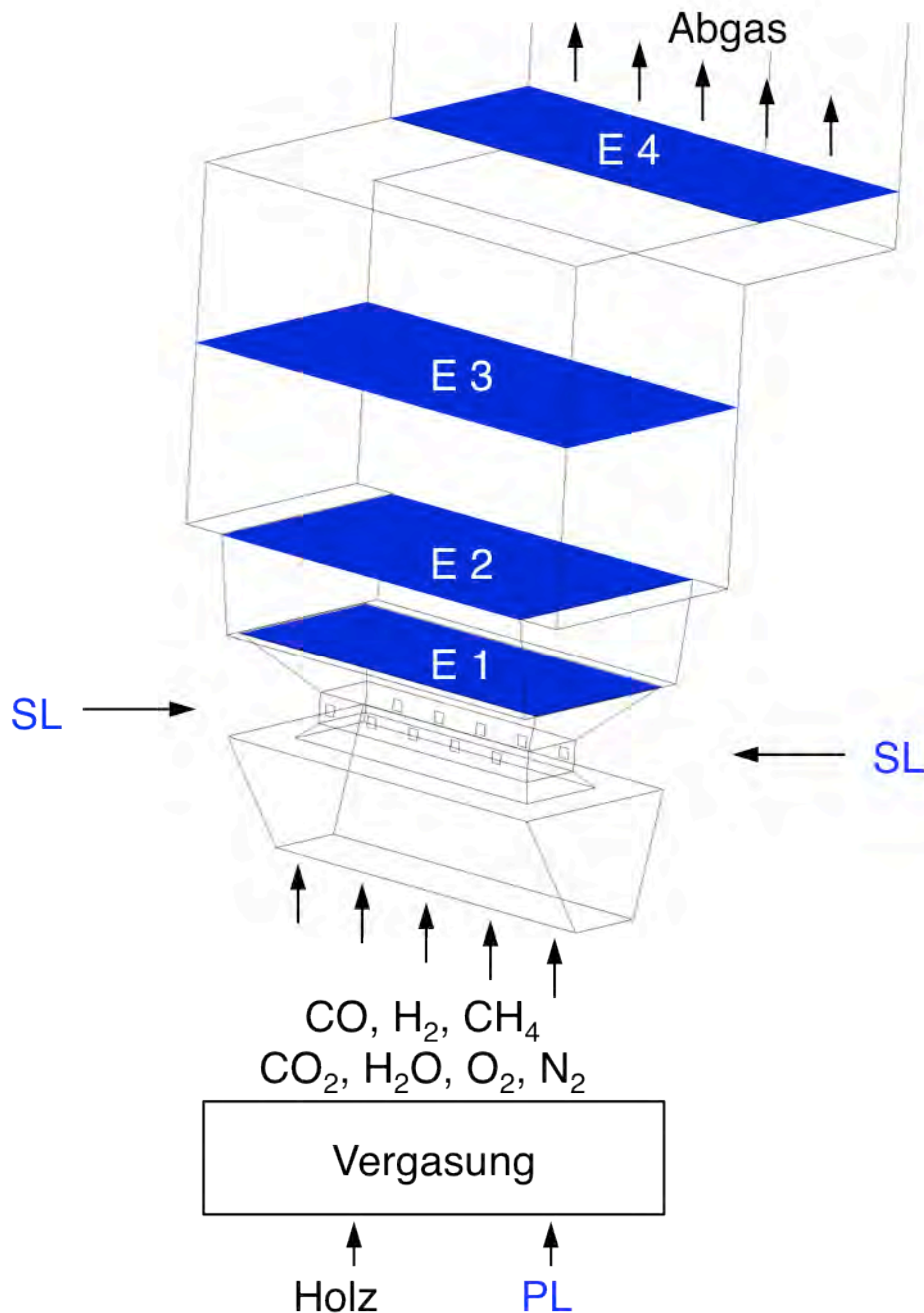


Bild 4 Geometrie für die numerische Strömungsberechnung des Holzofens.
E = Ebene für Auswertung der CFD-Berechnungen, PL = Primärluft, SL = Sekundärluft.

Anhand der Anzahl Düsen und des Düsendurchmessers werden dimensionslose Kennzahlen ermittelt und damit die Strömung charakterisiert. Beim vorliegenden Fall einer querangeströmten Düsenströmung sind dies die Reynolds-Zahl sowie das Impulsverhältnis zwischen Düsenströmung und Grundströmung.

Die Reynolds-Zahl ist das Verhältnis zwischen Trägheitskräften und viskosen Kräften einer Strömung und ein Maß für die Turbulenz:

$$\text{Re} = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (1)$$

mit u charakteristische Geschwindigkeit der Strömung [m/s]
 L charakteristische Länge der Strömung [m]
 ν kinematische Viskosität des Fluides [m²/s]

Das Verhältnis der Impulsstromdichte der Düsenströmung zur Impulsstromdichte der Grundströmung wird Impulsverhältnis IV genannt und ist definiert als:

$$IV_{DG} = \sqrt{\frac{\rho_D \cdot u_D^2}{\rho_G \cdot u_G^2}} \quad (2)$$

mit u_D Geschwindigkeit Düsenströmung [m/s]
 u_G Geschwindigkeit der Grundströmung [m/s]
 ρ_D Dichte der Düsenströmung [kg/m³]
 ρ_G Dichte der Grundströmung [kg/m³]

Zum Vergleich verschiedener Anordnungen der Sekundärluftdüsen wird zudem das auf den Referenzfall normierte Impulsverhältnis IV_{norm} bestimmt:

$$IV_{norm} = \frac{IV_{DG}}{IV_{DG \text{ ref}}} \quad (3)$$

Als Referenzfall dient folgende Variante:

Düsen-Anordnung: Beidseitig versetzt
Düsendurchmesser: 12 mm
Anzahl Düsen: 10

4.2 Resultate und Variantenvergleich

Tabelle 2 zeigt die Reynolds-Zahl und das Impulsverhältnis der untersuchten Varianten von Düsenanzahl und Düsendurchmesser.

Tabelle 2 Kenndaten der Sekundärluftzuführung für die Varianten. Kursiv (blau): Referenz.

	Düsendurchmesser 8 mm			Düsendurchmesser 12 mm		
	Anzahl Düsen	4	8	10	4	8
Impulsverhältnis IV_{DG}	300	150	120	120	62	<i>49</i>
Reynolds-Zahl $Re_{Düse}$	$12 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$

Tabelle 3 zeigt die berechneten Kenngrößen für 12 mm und Tabelle 4 für 8 mm Düsendurchmesser. Die CFD-Berechnungen zeigen folgende Trends:

- Ein hohes Impulsverhältnis als Folge einer reduzierten Sekundärluftfläche ist bei den untersuchten Varianten in der Regel vorteilhaft für die Mischung und den Ausbrand. Die Ausbrandqualität wird durch Verringerung des Gesamtquerschnitts der Düsen in der Regel verbessert. Gleichzeitig steigt jedoch der Druckverlust. Der beschriebene Trend stimmt nicht im Fall der einseitigen Anströmung.
- Eine Verteilung der Düsen auf beide Seiten liefert in allen untersuchten Fällen sehr gute Ausbrandwerte, insbesondere auch bei grossem Gesamtquerschnitt mit entsprechend kleinem Druckverlust.

Da die beidseitig versetzte Anordnung in allen untersuchten Fällen sehr gute Ausbrandwerte liefert, wird diese Anordnung ausgeführt und als Referenz bezeichnet. Um zudem optimale Voraussetzungen für den Betrieb mit Naturzug sicher zu stellen, wird die grösste Querschnittsfläche mit 10 Düsen und einem Düsendurchmesser von 12 mm gewählt. Unter Inkaufnahme höherer Druckverluste kann die Mischeffizienz noch verbessert werden, was vor allem beim Einsatz eines Ventilators von Interesse sein kann.

Tabelle 3 Kenngrößen der Sekundärlufteindüsung für den Düsendurchmesser 12 mm für die drei Anordnungsvarianten (Rückseite, Vorderseite und beidseitig versetzt). Fett (rot): Nicht erfüllt, kursiv (blau): erfüllt.

	Rückseite			Vorderseite			beidseitig versetzt		
Anzahl Düsen [-]	4	8	10	4	8	10	4	8	<i>10</i>
IV _{norm} [-]	2.5	1.25	1	2.5	1.25	1	2.5	1.25	<i>1</i>
Druckverlust [Pa]	47	11	8	47	11	8	47	11	<i>8</i>
Mischung Ebene 3 [%]	84.5	75.5	81.9	87.2	76.9	79.9	-	89.9	<i>87.4</i>
Mischung Ebene 4 [%]	96.4	97.2	96.9	92.4	92.9	92.2	-	96.3	<i>93.0</i>
CO Ebene 3 [ppm]	238	11 000	1690	289	20 000	3020	-	423	<i>980</i>
CO Ebene 4 [ppm]	10	417	36	6	778	220	-	21	<i>63</i>
Bewertung [-]	+	-	+	+	-	+	-	++	++

Tabelle 4 Kenngrößen der Sekundärlufteindüsung für den Düsendurchmesser 8 mm für die drei Anordnungsvarianten (Rückseite, Vorderseite und beidseitig versetzt). Fett (rot): Nicht erfüllt.

	Rückseite			Vorderseite			beidseitig versetzt		
Anzahl Düsen [-]	4	8	10	4	8	10	4	8	10
IV_{norm} [-]	6	3	2.5	6	3	2.5	6	3	2.5
Druckverlust [Pa]	233	57	36	233	57	36	233	57	36
Mischung Ebene 3 [%]	93.7	86.4	77.2	-	86.1	84.6	94.8	92.9	93.3
Mischung Ebene 4 [%]	98.7	95.5	96.5	-	93.2	93.4	96.4	97.1	97.6
CO Ebene 3 [ppm]	27	1 255	9742	-	7 187	14000	20	95	82
CO Ebene 4 [ppm]	1	19	92	-	31	196	1	5	6
Bewertung [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4.3 Variation der Sekundärlufteindüsung

Nachfolgend werden exemplarisch zwei Strömungssituationen verglichen.

Bild 5 zeigt eine Anordnung mit **einseitiger Sekundärlufteindüsung** von der Vorderseite.

Ebene 4 nach Bild 4 stellt die Ausbrandqualität vor Eintritt in den Wärmeübertrager dar. Rote Zonen in der Darstellung links entsprechen CO-Gehalten über 1000 ppm.

Die Darstellung der Stromlinien der Sekundärluft (rechts) zeigt, dass die einseitige Luftzuführung eine Segregation zwischen Abgasstrom auf der Vorderseite und Sekundärluft auf der Rückseite der Nachbrennkammer zur Folge hat. Anhand der CO-Gehalte ist dies durch eine sich vergrößernde Zone mit geringem CO-Gehalt auf der Rückseite zu erkennen.

Die einseitige Strömung führt somit zu Strähnen mit CO-Gehalten von über 1000 ppm bis zum Austritt der Nachbrennkammer und damit zu einer Überschreitung des Zielwerts.

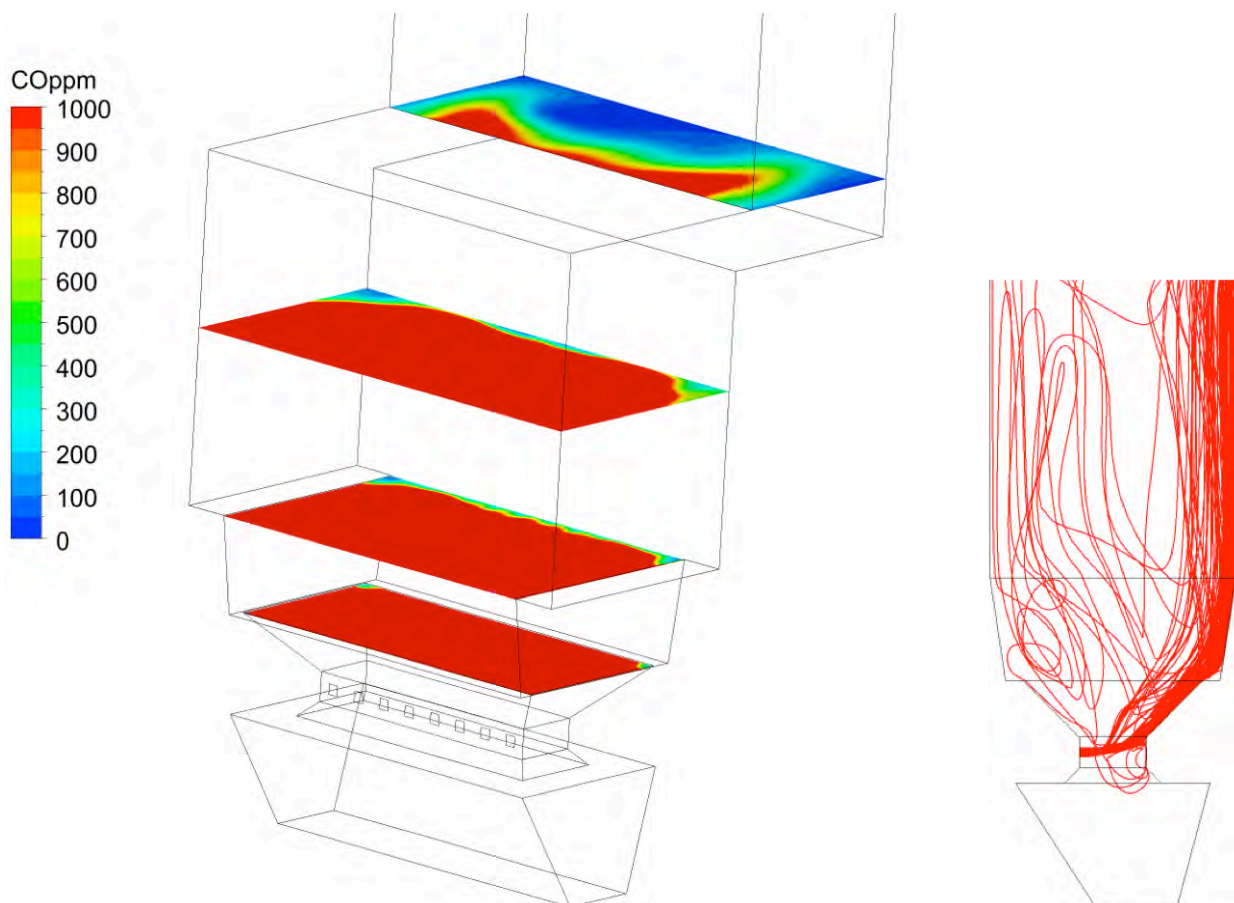


Bild 5 Links: CO-Gehalte in den Ebenen 1 bis 4 für folgende Variante für einseitige Düsen-Anordnung auf der Vorderseite mit 8 Düsen mit einem Düsendurchmesser von 12 mm. Rechts: Stromlinien der Sekundärluft.

Bild 6 zeigt den Ausbrand für eine **beidseitig versetzte Sekundärlufteindüsung**, wie sie für die Umsetzung in der Referenz-Variante gewählt wurde.

Dank der beidseitigen Verteilung der Sekundärluft wird die Segregation über die Nachbrennkammer deutlich reduziert. Infolge der gleichmässigeren Einmischung der Sekundärluft in den Flammenbereich verbleibt vor Eintritt in den Wärmeübertrager lediglich eine kleine Abgassträhne mit CO-Gehalten von unter 200 ppm.

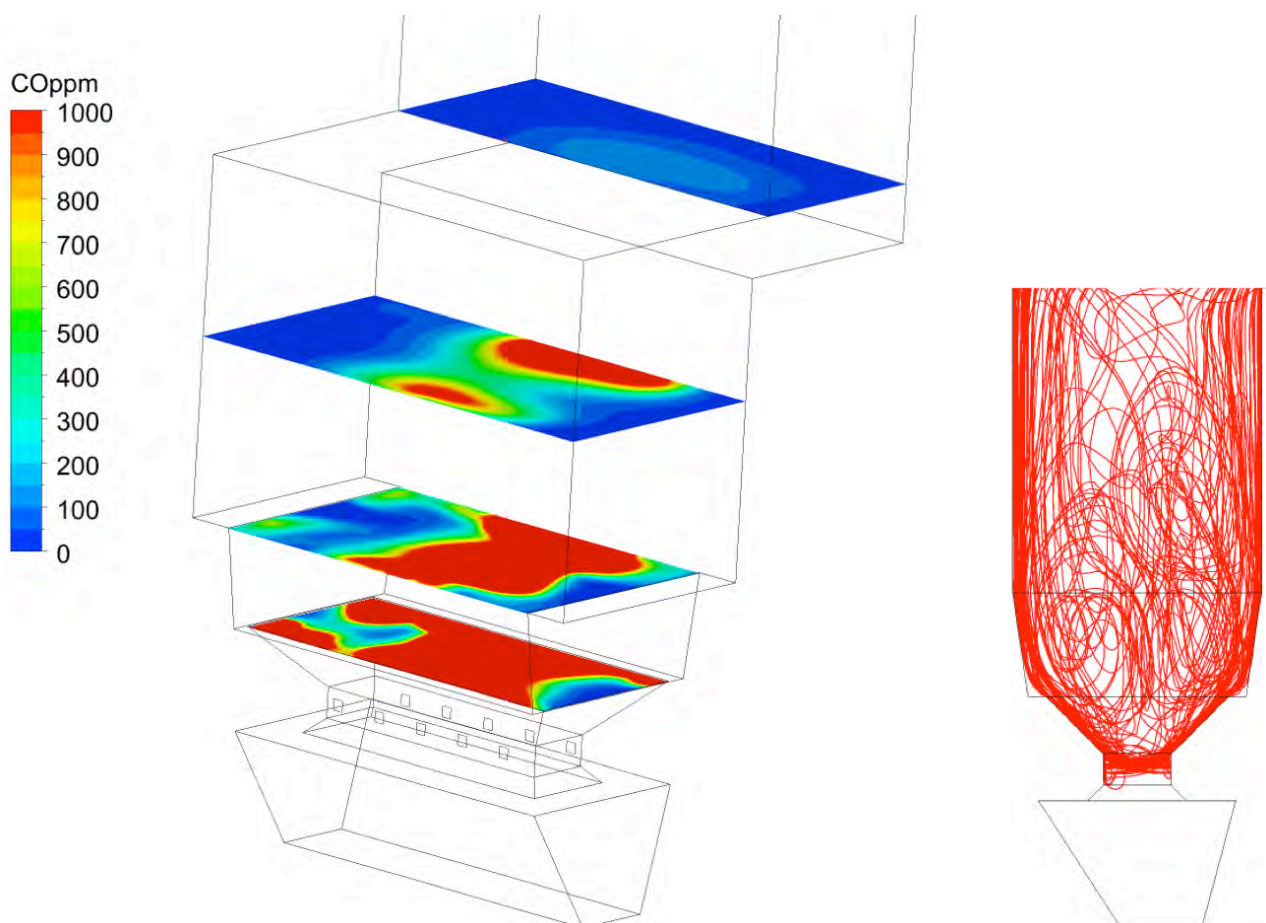


Bild 6 Links: CO-Gehalte in den Ebenen 1 bis 4 für den Referenzfall für beidseitig versetzte Düsen-Anordnung mit 10 Düsen und Düsendurchmesser 12 mm. Rechts: Stromlinien der Sekundärluft.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Versuchsaufbau und Messtechnik

Bild 7 zeigt die Versuchsanordnung und die Messtechnik.

Für die Erfolgskontrolle wurden folgende Messgrößen erfasst:

- Kontinuierliche Analyse der Abgaszusammensetzung:
O₂, CO₂, CO, VOC, CH₄, und NMVOC (berechnet aus VOC und CH₄)
- Abgasvolumenstrom
- Zuluftvolumenströme unterteilt in:
 - Volumenstrom PL 1
 - Volumenstrom PL 2
 - Volumenstrom SL
- Temperaturen:
 - Abgas T_A
 - Nachbrennkammer T_N
 - Primärzone T_P
 - Schacht T_S
- Luftüberschuss λ (berechnet aus O₂)
- Feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_f (berechnet)
- Gesamtstaub gravimetrisch nach VDI 2066 mit Probenahme auf Planfilter.

5.2 Versuchsablauf und Datenauswertung

Für die Datenerfassung und Datenauswertung erfolgte der Messbeginn t_0 unmittelbar nach dem Anfeuern und Schliessen der Türe. Als Abbruchkriterium für die Messungen diente die Erreichung des ersten der zwei folgenden Kriterien:

$$\text{CO}_2/\text{CO} < 10 \text{ oder } \text{O}_2 > 17 \text{ Vol.-%.}$$

Für die Mittelwertbildung der Emissionsdaten erfolgte eine Gewichtung anhand des Abgasvolumenstroms [11].

Für die Versuchsdurchführung wurde der Einfluss des Kaminzugs für ausgewählte Konfigurationen untersucht. Dazu wurde ein realitätsnaher Betrieb mit in Funktion der Abgastemperatur ansteigendem Kaminzug verglichen mit einem Betrieb bei einem konstanten Förderdruck von 12 Pa nach EN 13240 [12]. Der realitätsnahe Betrieb führte in einzelnen Fällen zu Luftmangel, in anderen Fällen zu erhöhtem Luftüberschuss. Um für den Variantenvergleich reproduzierbare Bedingungen sicher zu stellen, erfolgten die nachfolgend beschriebenen Versuche mit konstantem Förderdruck.

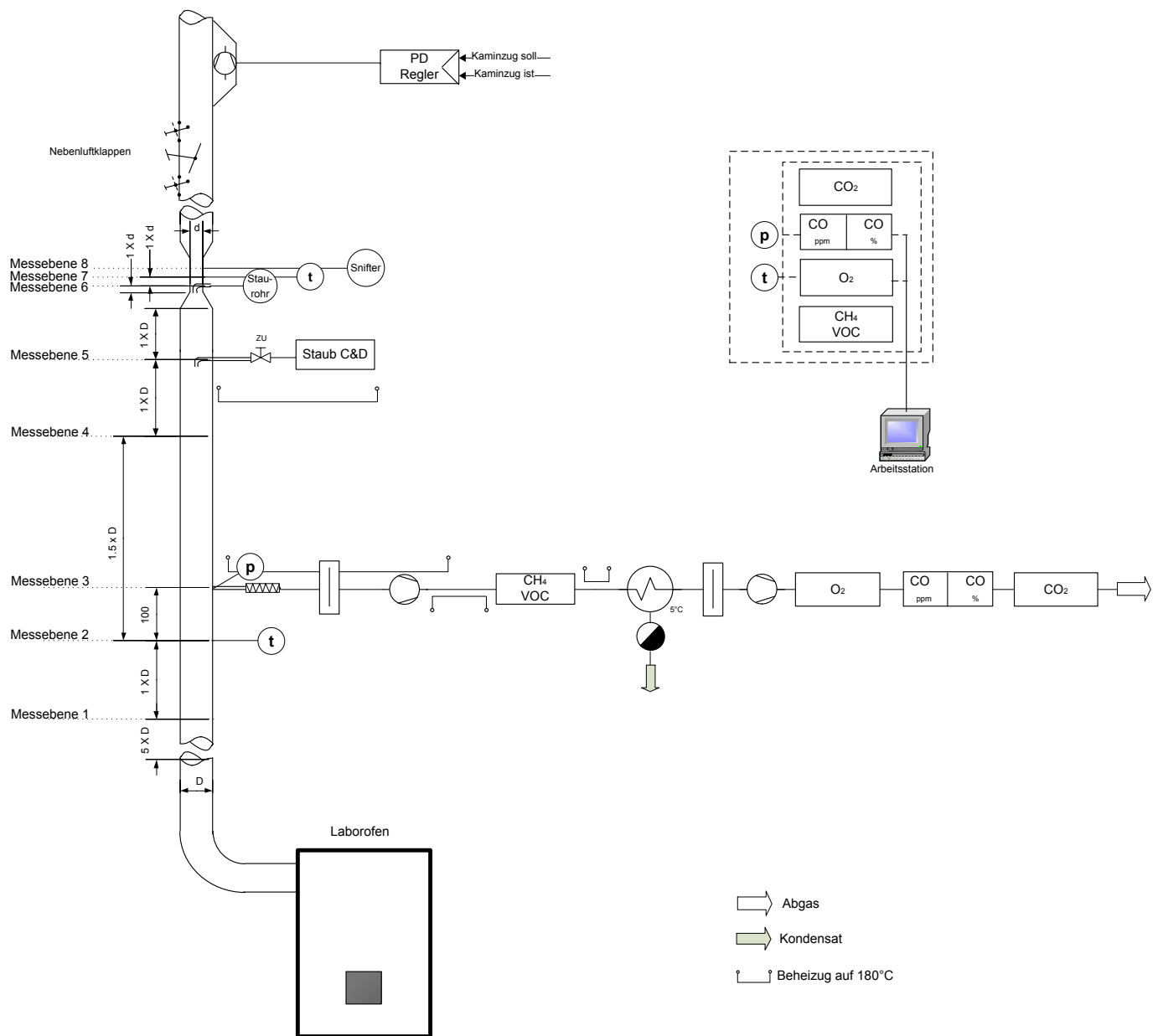


Bild 7 Messaufbau an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur.

6 Resultate

6.1 Variantenvergleich verschiedener Prototypen

In Tabelle 5 sind die Resultate der drei untersuchten Prototypen aufgelistet und mit den Projektzielen verglichen. Die Projektziele umfassen Emissionswerte und Anforderungen bezüglich Handhabung, Betrieb und Leistung.

Das Betriebsverhalten beschreibt die Anfälligkeit auf kritische Betriebssituationen, insbesondere Luftmagel mit hohen Emissionen. Ziel ist ein stabiles Betriebsverhalten bei einem Luftüberschuss über dem optimalen oder kritischen Wert, der im CO/Lambda-Diagramm erkennbar ist [2].

Das Ziel eines Betriebs ohne Eingriff beschreibt, ob zur Aufrechterhaltung der Leistung und der Ausbrandqualität ein manueller Eingriff erforderlich ist. Angestrebt wird, dass nach dem Anzünden kein Eingriff mehr notwendig ist.

Tabelle 5 Vergleich der Resultate von Prototyp 1, 2 und 3 mit Zielwerten (ohne Staub und VOC).

Nicht erfüllte Werte: fett (rot). Erfüllte Werte: Normal (blau).

Emissionswerte bei 13 Vol.-% O₂.

Der Zielwert für CO entspricht 50% des LRV-Grenzwertes.

Messbeginn t₀: Direkt nach Anzünden wird Fülltüre geschlossen und Messung gestartet.

*Wärmekapazität der Primärzone im Betrieb = Masse x spezifische Wärmekapazität x ΔT.

Der Basiswert von 100% entspricht einem konventionellen Aufbau.

**Abbruchkriterium für Messungen: CO₂/CO < 10 oder O₂ > 17 Vol.-%.

Kriterium	Unterkriterium	Dim.	Ziel	Prototyp		
				1	2	3
Bauart Primärzone	Wärmekapazität	kWh		100%	< 50%	< 50%
	Scheitlänge	cm		33	33	25
	Füllmenge	kg	6 – 12	12	12	10
Abbranddauer Δt _A	t ₀ bis Abbruch**	h	> 4	5.6	4.7	5.4
Feuerungsleistung	während Δt _A	kW	5 – 10	8.0	10.2	7.4
Abgastemperatur		°C		< 180°C	< 180°C	< 180°C
Feuerungs-Wirkungsgrad		–	> 80%	> 85%	> 85%	> 85%
Luftüberschuss	Abbrand	–		2.2	1.7	2.12
CO	Abbrand	mg/m _n ³	< 750	> 4000	1500	525
	Beste 15 Minuten	mg/m _n ³		100	25	15
Betriebsverhalten		–	stabil	stabil	instabil	stabil
Betrieb ohne Eingriff		–	ja	nein	nein	ja
Dauer Startphase		Minuten		> 45	15	15

Die Resultate in Tabelle 5 illustrieren die Entwicklung wie folgt:

- **Prototyp 1** erfüllt die Vorgaben an Füllmenge, Abbranddauer und Feuerungsleistung. Die während der besten Phasen erzielten CO-Emissionen von unter 100 mg/m^3 zeigen, dass das Verbrennungskonzept die Anforderungen an Mischung und Ausbrandqualität erfüllen kann. Allerdings weist das konventionelle Bauprinzip eine grosse Wärmekapazität auf. Dies bewirkt eine lange Startphase. Im Anschluss daran steigt die Vergasungsleistung zu stark an. Bei Einhaltung der maximalen Leistung von 10 kW tritt dabei Luftmangel ein. Bei höherer Leistung kann zwar ein emissionsarmer Betrieb, nicht jedoch die Zielvorgabe des Projekts erreicht werden.
- **Prototyp 2** verfügt über konstruktive und materialtechnische Massnahmen zur Reduktion der Wärmekapazität. Dadurch wird die Startphase auf einen Drittel verkürzt und die Vergasungsleistung reduziert. Da die Leistung noch knapp über den geforderten 10 kW liegt, treten kurzfristige Luftmangelsituationen auf, welche den mittleren CO-Wert trotz tiefer Bestwerte unzulässig erhöhen.
- **Prototyp 3** verfügt über eine reduzierte Grundfläche, wodurch die Vergasungsleistung auf deutlich unter 10 kW reduziert wird. Damit werden nach einer kurzen Startphase mit CO-Emissionen von bereits unter 1000 mg/m^3 bei 13 Vol.-% O_2 ein stabiler, stationärer Abbrand ohne Luftmangel bei CO-Emissionen von anschliessend unter 100 mg/m^3 erreicht. Die Zielwerte werden damit sicher erfüllt. Zur Erzielung der geringeren Feuerungsleistung wurde die Scheitlänge von 33 cm auf 25 cm reduziert, was eine kompaktere Bauweise des Holzofens ermöglicht.

Die ausgewiesenen Werte von 2.12 für den Luftüberschuss und von 525 mg/m^3 für CO über den ganzen Abbrand sind erheblich durch den in der Messung enthaltenen Beginn der Ausbrandphase bestimmt. Entsprechend einer Typenprüfung nach EN 13240 [12] ermittelte Werte während des stationären Betriebs ergeben deutlich tiefere Werte.

Dank des stabilen Abbrandverhaltens kann der Prototyp 3 nach dem Anzünden ohne manuelle Eingriffe betrieben werden. Zur Illustration des Abbrandverhaltens zeigt Bild 8 einen typischen Abbrand von Prototyp 2. Darin ist eine Phase mit Luftmangel erkennbar. Im Vergleich dazu illustriert Bild 9 einen typischen Abbrand von Prototyp 3. Luftmangel während des Abbrands ist dabei vermieden. Aus dem CO/Lambda-Diagramm beider Bauarten geht hervor, dass zur sicheren Vermeidung von Luftmangel ein Betrieb bei einem Luftüberschuss über dem optimalen oder kritischen Wert von 1.5 anzustreben ist.

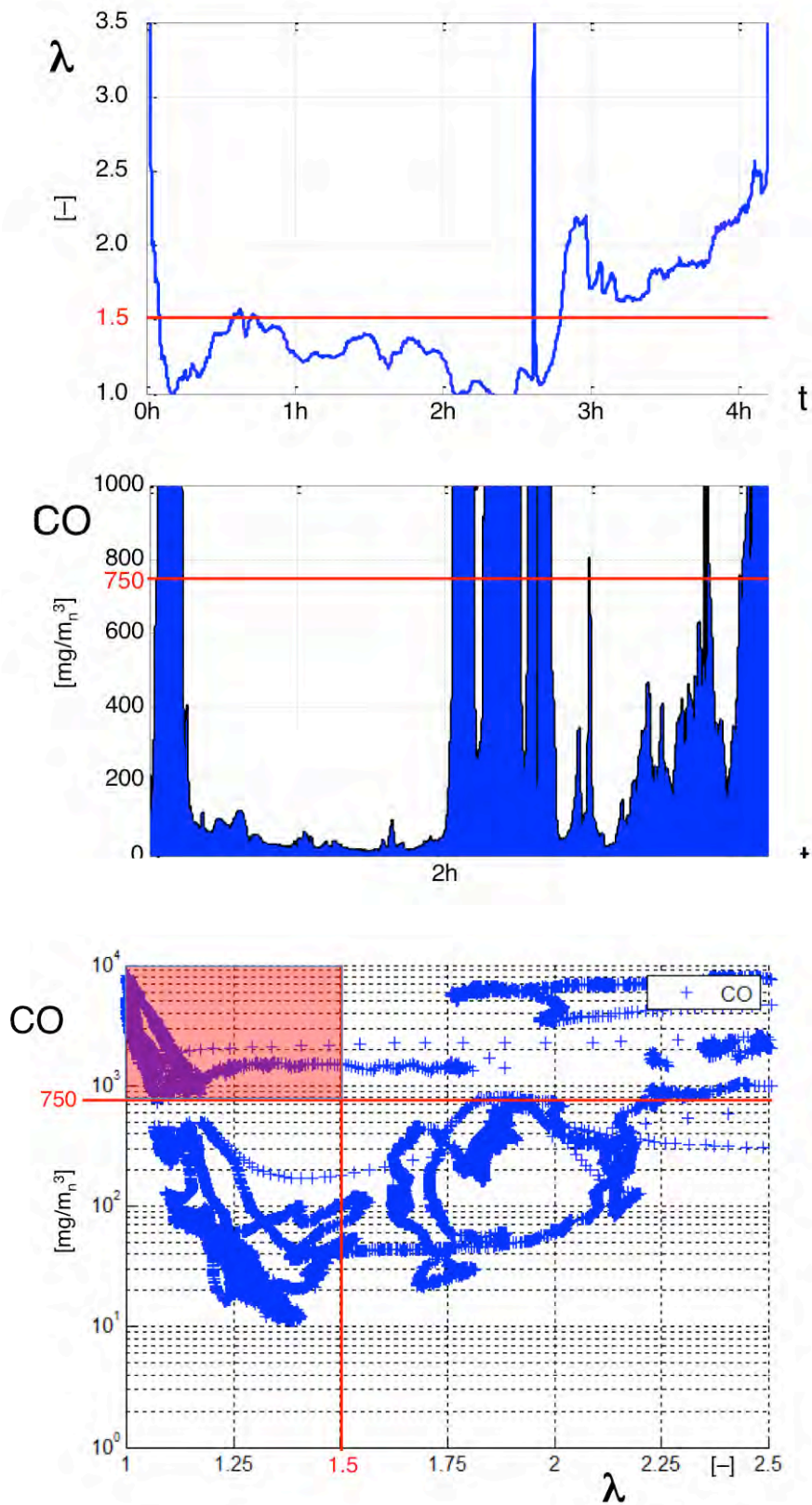


Bild 8 Abbrandverhalten von Prototyp 2.
 Oben: Luftüberschuss in Funktion der Abbrandzeit.
 Mitte: CO im Abgas in Funktion der Abbrandzeit
 Unten: CO in Funktion der Luftüberschusszahl (CO/Lambda-Diagramm).

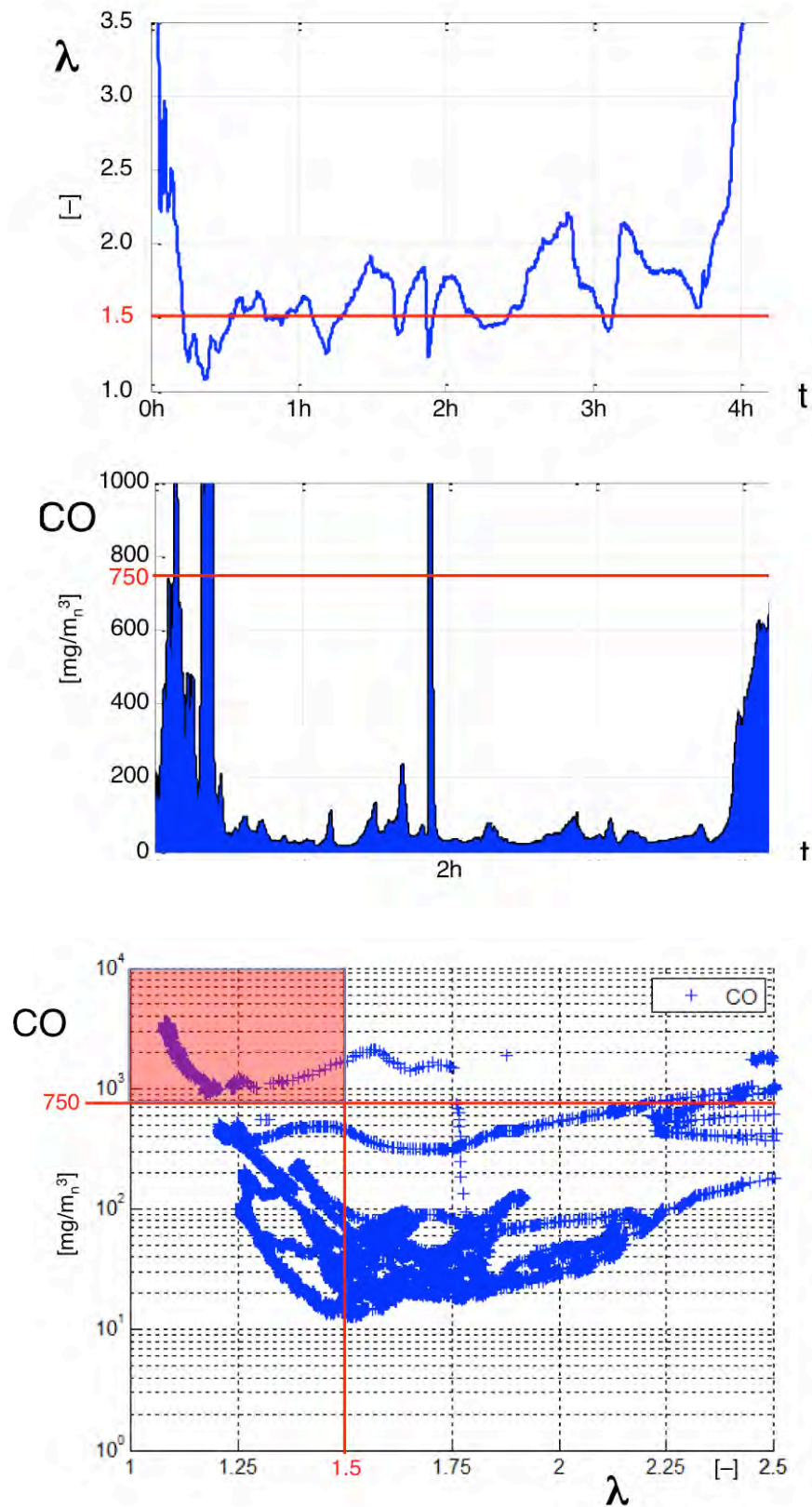


Bild 9 Abbrandverhalten von Prototyp 3.
 Oben: Luftüberschuss in Funktion der Abbrandzeit.
 Mitte: CO im Abgas in Funktion der Abbrandzeit
 Unten: CO in Funktion der Luftüberschusszahl (CO/Lambda-Diagramm).

6.2 Resultate von Prototyp 3

Tabelle 6 zeigt die umfassende Erfolgskontrolle am ausgeführten Prototyp 3. Die Resultate illustrieren, dass auch die Zielwerte an VOC und Staub sicher eingehalten werden. Mit einer Feuerungsleistung von 7.4 kW wird auch der Zielwert von unter 10 kW sicher erreicht.

Tabelle 6 Resultate von Prototyp 3 (Mittelwerte aus 5 Messungen) im Vergleich mit den Zielwerten. Emissionswerte bei 13 Vol.-% O₂. Die Zielwerte für CO und Staub entsprechen 50% des LRV-Grenzwertes. Messbeginn t₀: Direkt nach Anzünden wird Fülltüre geschlossen und Messung gestartet. Abbruchkriterium für Messungen: CO₂/CO < 10 oder O₂ > 17 Vol.-%.

Kriterium	Unterkriterium	Dim.	Ziel	Prototyp 3	Ziel- erreichung
Scheitlänge		cm		25	
Füllmenge		kg	6 – 12	10	+
Abbranddauer Δt _A	t ₀ bis Abbruch*	h	> 4	5.4	+
Feuerungsleistung	während Δt _A	kW	5 – 10	7.4	+
Abgastemperatur		°C		< 180°C	
Feuerungs- Wirkungsgrad		–	> 80%	> 85%	+
Luftüberschuss	Abbrand	–		2.12	
	Start 15 Minuten	–		2.10	
	Staubmessung 1	–		1.67	
	Staubmessung 2	–		1.75	
CO	Start	mg/m _n ³		675	
	Abbrand	mg/m _n ³	< 750	525	+
	Beste 15 Minuten	mg/m _n ³		20	
VOC	Abbrand	mg/m _n ³	< 100	18	+
NMVOC	Abbrand	mg/m _n ³		12	
CH ₄	Abbrand	mg/m _n ³		6	
Staub	Start 15 Minuten	mg/m _n ³		50	
	Staubmessung 1	mg/m _n ³	< 37.5	12	+
	Staubmessung 2	mg/m _n ³	< 37.5	14	+
Betriebsverhalten		–	stabil	stabil	+
Betrieb ohne Eingriff		–	ja	ja	+
Dauer Startphase		Minuten		15	

7 Schlussfolgerungen

- Der Aufbau eines zweistufigen Holzofens mit einer durch Nachrutschen von Stückholz in eine Verbrennungsretorte betriebenen Vergasungszone und daran anschliessender Nachbrennkammer wird als funktionsfähiges Konzept bestätigt.
- Zur Erzielung einer hohen Ausbrandqualität ist eine gute Vermischung zwischen Sekundärluft und brennbaren Gasen erforderlich. Die Optimierung der Sekundärlufteindüsung und der Nachbrennkammer-Geometrie kann durch numerische Strömungsberechnungen mit CFD effizient unterstützt werden.
- Die CFD-Berechnungen zeigen, dass ein hohes Impulsverhältnis zwischen Lufteindüsung und Grundströmung sowie generell eine Erhöhung der Turbulenz zur Mischung beitragen. Da beides zu erhöhtem Druckverlust führt, sind die Möglichkeiten für Naturzug begrenzt. Aus diesem Grund ist auch eine gleichmässige Verteilung der Sekundärluft über den Querschnitt erforderlich. Damit können gute Mischungsresultate bei geringem Druckverlust erzielt werden, während eine einseitige Luftzuführung zu einer ungleichmässigen Strömung mit Strähnen und erhöhten Emissionen an unverbrannten Gasen führt.
- Gute Strömungsverhältnisse sind notwendig aber hinreichend für eine hohe Ausbrandqualität. Für den chargenweisen Abbrand ist daneben eine kontrollierte Leistungsfreisetzung während der Start- und der anschliessenden Verbrennungsphase entscheidend. Anzustreben ist eine kurze Startphase mit langsam steigender Leistung sowie eine Begrenzung der Vergasungsleistung während des stationären Betriebs.
- Um einen Betrieb mit kleiner Leistung zu erzielen, sind folgende Faktoren zu limitieren:
 - die Dimensionen der Vergasungszone und dadurch auch Grundfläche und Brennstoff
 - die Primärluftmenge
 - der Wärmestrom aus der Flammenzone in die Vergasungszone, wozu eine örtliche Trennung der Zonen vorteilhaft ist
 - die Wärmekapazität der Vergasungszone für kurze Startphasen und zur Vermeidung unkontrollierbarer Leistung durch instationären Wärmestrom im heissen Zustand.
- Mit dem vorgestellten zweistufigen Verbrennungskonzept wird dank kleiner Grundfläche und geringer Wärmekapazität der Primärzone eine Abbranddauer von über 4 Stunden mit einer Leistungsfreisetzung von 7.4 kW erreicht. Mit der strömungsoptimierten Ausbrandzone werden über den Abbrand ab Zündbeginn gemessene Emissionen an CO von rund 500 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ sowie an Staub von rund 15 mg/m³ erzielt.
- Das Verbrennungskonzept schränkt die Verwendung der Brennstoffe auf Stückholz von 25 cm Länge ein und gibt ein definiertes Vorgehen zu Befüllung und Anzündvorgang vor. Damit wird der Betreibereinfluss im Vergleich zu Holzöfen ohne konsequente räumliche Trennung von Füllraum und Brennraum reduziert. In Bezug auf Komfort und Betrieb ist dabei vorteilhaft, dass während des Betriebs ab Schliessen der Anzündtüre ein manueller Eingriff weder vorgesehen noch notwendig ist.
- Ein Betrieb mit Naturzug führt zu einer reduzierten Reproduzierbarkeit des Abbrands.

8 Literatur

- [1] Gasser, L.; Wellig, B.: Effiziente Heizsysteme mit leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen, *18. Wärmepumpentagung*, BFE-Forschungsprogramm «Wärmepumpen und Kälte», Burgdorf, 27. Juni 2012
- [2] Nussbaumer, T.: Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction, *Energy & Fuels*, Vol. 17, No 6, 2003, 1510–1521
- [3] Johansson, L.; Leckner, B.; Gustavsson, L.; Cooper, D.; Tullin, C.; Potter, A.: Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25, 2003, 435 – 446
- [4] Nussbaumer, T.: Russ und Methan relativieren Klimaneutralität von Holz, *Holz-Zentralblatt*, 136. Jg., Nr. 44 (2010), 1110–1112
- [5] Schön, C.; Hartmann, H.: Combustion of wood briquettes in stoves, *20th European Biomass Conference*, 18-22 June 2012, Milano (I)
- [6] Good, J.; Obermayr, D.; Nussbaumer, T.: Einfluss von Kaltstart und Teillast auf die Schadstoffemissionen von Stückholz- und Pelletheizungen, *11. Holzenergie-Symposium*, 17. September 2010, ETH Zürich, 2010, ISBN 3-908705-21-5, 145–172
- [7] Der Schweizerische Bundesrat: *Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985*, Stand am 15. Juli 2010, Artikel 814.318.142.1
- [8] *Richtig Anfeuern Holzfeuerungen mit oberem Abbrand*. 2007, Holzenergie Schweiz: Zürich
- [9] Baillifard, M.; Nussbaumer, T.: Strömungsoptimierung von Feuerräumen mittels Experiment und CFD, *10. Holzenergie-Symposium*, Verenum, Zürich, S. 93ff; 2008
- [10] Reed, T. B.: *Biomass Gasification: Principles and Technology*. Energy Technology Review. Vol. 67. 1981: Noyes Data Corporation
- [11] Nussbaumer, T.; Wagner, D.: A New Method to measure the integrated Amount of Pollutants from nonstationary Wood Combustion Processes. Advances in Thermochemical Biomass Conversion, *Blackie Academic & Professional*, London 1994, ISBN 0 7514 0171 4
- [12] EN 13240: *Raumheizer für feste Brennstoffe – Anforderungen und Prüfungen*; Deutsche Fassung EN 13240: 2001 + A2:2004; 2005

Verdankung

Die vorliegende Arbeit wird in Zusammenarbeit mit der Firma TIBA AG durchgeführt und von der Kommission für Innovation und Technologie (KTI) unterstützt.