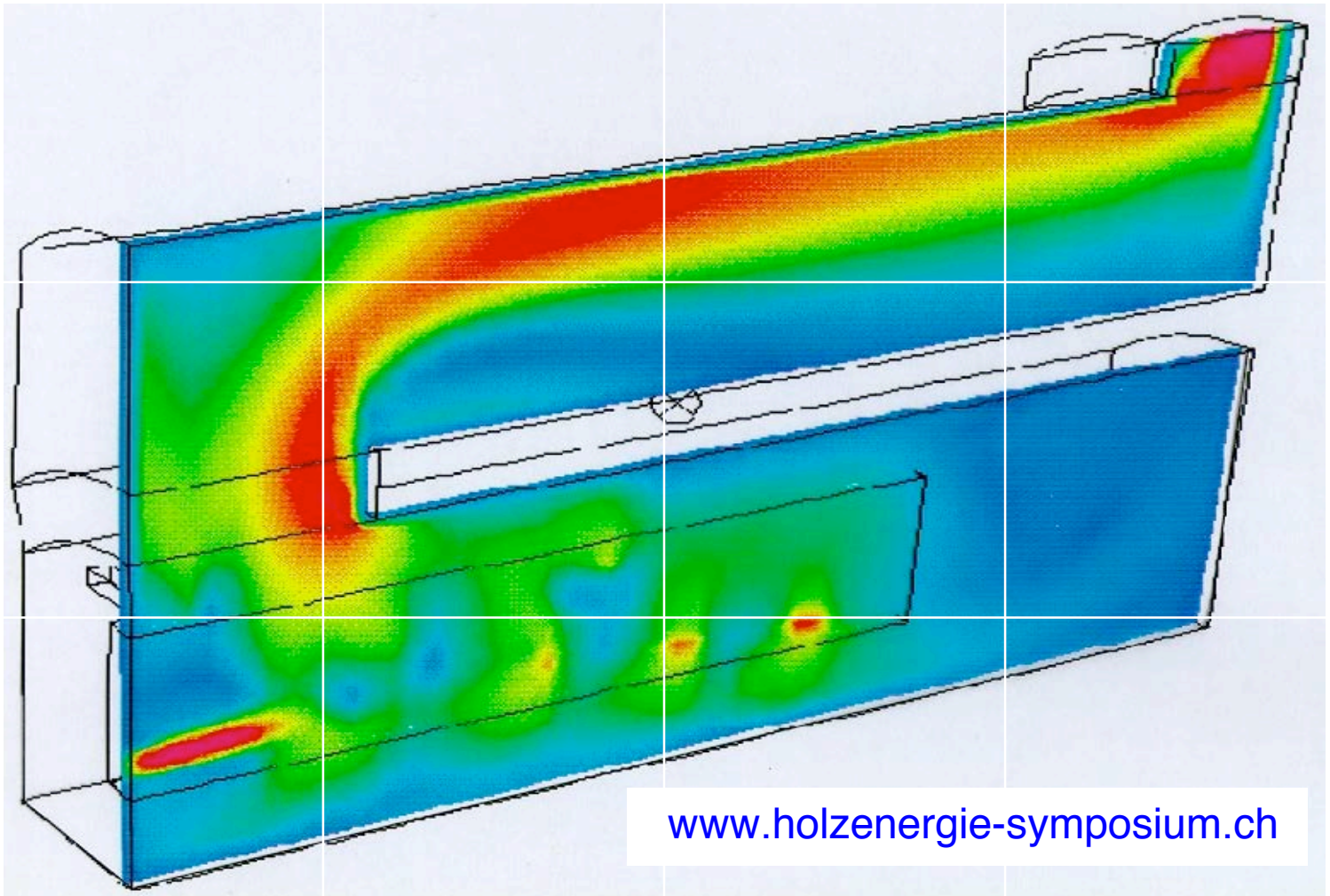


Thomas Nussbaumer (Hrsg.)

12. Holzenergie-Symposium

Holzenergie-Nutzung in der Energiestrategie 2050

14. September 2012, ETH Zürich



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. Marinitsch, T. Kamenik-Lingitz: Wärme­kraftkopplung mit Holzvergaser und Stirlingmotor	81
8	W. Felsberger: Festbettvergasung mit Blockheizkraftwerk für Holz	89
9	D. Vogel, R. Schmid: 100 kW Heissgasturbine zur Wärme­kraftkopplung 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

Strömungsoptimierung einer Vorschubrostfeuerung mit CFD und PIV

Martin Kiener, Thomas Nussbaumer
Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw

Zusammenfassung

Vorschubrostfeuerungen können Brennstoffe mit hohem Asche- und Wassergehalt verbrennen und sind deshalb weit verbreitet zur Nutzung von Energieholz. Da für Heizanwendungen der Teillastbetrieb entscheidend ist, werden in diesem Beitrag Massnahmen zur Strömungsoptimierung einer Vorschubrostfeuerung untersucht, mit denen ein Lastbereich von unter 30% der Nennleistung bis zu Volllast bei tiefen Emissionen erreicht wird. Dazu werden Ansätze zur Optimierung der Sekundärlufteindüsung sowie zum Einsatz von Strömungseinbauten untersucht. Die Auslegung erfolgt mittels numerischer Strömungsberechnungen mit Computational Fluid Dynamics (CFD). Die Strömungsverhältnisse werden mit Modellmessungen mittels Particle Image Velocimetry (PIV) validiert. Die besten Varianten werden auf einer 1.2 MW Vorschubrostfeuerung umgesetzt und experimentell untersucht. Es wird gezeigt, dass durch Optimierung der Sekundärlufteindüsung eine Verbesserung der Ausbrandqualität bei gleichzeitiger Absenkung des optimalen Luftüberschusses erzielt werden kann. Dadurch kann ein stabiler Betrieb ab 30% Last bis zu Volllast erreicht werden. Bei einem Luftüberschuss von 1.8 werden damit bei Volllast und Teillast CO-Emissionen von unter 15 mg/m_n^3 bei 11 Vol.-% O_2 erreicht. Einbauten ermöglichen zwar eine weitere Verbesserung bei Teillast, nicht jedoch bei Volllast. Neben einer guten Strömungsführung ist im Praxisbetrieb jedoch auch die Rostbedeckung entscheidend.

Abstract

Optimisation of Moving Grate Boilers with CFD and PIV

Grate boilers are well suited for biofuels with high ash and water content. In heating applications, part load operation often occurs. The project presents measures to optimise the fluid dynamics in moving grate boilers to improve the part load capability with the target to enable an operation from 30% load to full load at low emissions. For this purpose, the injection of the secondary air and the introduction of obstacles in the combustion chamber are investigated by Computational Fluid Dynamics (CFD) and validated by model experiments with Particle Image Velocimetry (PIV). The most promising concepts are implemented in a 1.2 MW boiler and experimentally validated. The results show, that the combustion quality can be increased by a factor of 4. However, the possibility to operate the boiler at lower excess air ratio is even more important in practical operation, as it enables an increase in efficiency. Beside optimum fluid dynamics in the gas phase, the coverage of the fuel bed on the grate is essential. By implementation of the presented measures, a stable operation from less than 30% load to full load can be achieved with CO emissions below 15 mg/m_n^3 at 11 Vol.-% O_2 at an excess air ratio of 1.8.

1 Einleitung

Vorschubrostfeuerungen sind weit verbreitet zur energetischen Nutzung von biogenen Brennstoffen mit hohem Asche- und Wassergehalt. Typische Anlagengrößen sind zwischen 0.5 MW – 25 MW [1], [2]. Im Vollastbetrieb wird in der Regel eine hohe Ausbrandqualität für die Abgase und die Asche erreicht. Heutige Vorschubrostfeuerungen erlauben zudem eine Betriebsweise mit stationärer Teillast, dies aber oft erst ab 60% der Nominalleistung, während bei tieferen Leistungen ein Takten durch Ein/Aus-Betrieb erfolgt. Dies kann zu kurzfristig erhöhten Emissionen während der Startphase führen. Im Praxisbetrieb nachteilig ist zudem, dass die Feinstaubabscheider während der Startphasen oft ausgeschaltet oder umgangen werden, um Schäden durch Kondensation infolge zu tiefer Temperaturen zu vermeiden [3]. Im Weiteren kann im Teillastbetrieb oder bei sich ändernden Brennstoffeigenschaften (z.B. der Wassergehalt) eine ungleichmässige Brennstoffverteilung auf dem Rost auftreten. Teillast führt oft zu unbedeckten Zonen in der zweiten Rosthälfte. Dies kann zu Falschluff und unkontrollierten Strömungsbedingungen führen und erhöhte CO-Emissionen verursachen [4].

2 Zielsetzung

Ziel des Projekts ist die Entwicklung von strömungstechnischen Massnahmen bei Vorschubrostfeuerungen, die eine Ausdehnung des Teillastbereichs ermöglichen. Damit soll ein stabiler Betrieb ab 30% bis 40% der Nennleistung mit sicherer Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und bei tiefem Luftüberschuss und damit hohem Wirkungsgrad erzielt werden.

3 Rechnerische Strömungsoptimierung mit CFD

3.1 Methode

Die Modellierung der Brennstoffumwandlung auf dem Rost erfolgt mit einem eindimensionalen, transienten Integralmodell in Anlehnung an [5]. Die Umwandlung von feuchtem Holz zu Wasserdampf und Pyrolysegasen, bestehend aus CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, O₂ und N₂, wird dabei in Funktion des Luftüberschusses modelliert.

Für die Modellierung der Gasphase wird ANSYS CFX verwendet und die Verbrennung mit dem Eddy Dissipation Model EDM berechnet [6]. Die Berechnungen werden für einen EDM Faktor $A = 1$ und eine minimale Reaktionstemperatur von $T_{R,min} = 873$ K durchgeführt.

Die Auswertung der Simulationen erfolgt in vier Ebenen nach Bild 1 unter Berücksichtigung von Kohlenmonoxid (CO) als Indikator der Verbrennungsqualität. Die Mischungseffizienz wird als zusätzlicher Parameter untersucht. Zum Vergleich der verschiedenen Fälle dienen in erster Linie die Werte in Ebene E4. Zusätzlich wird der Verbrennungsfortschritt über die vier Auswertungsebenen beobachtet und Varianten mit einem frühen Verbrennungsfortschritt werden in der Regel bevorzugt.

Als Randbedingung für die Berechnung in CFD gelten die Parameter nach Tabelle 1.

Um den Gasausbrand in Feuerraum (FR) und in der Nachbrennkammer (NBK) zu verbessern, werden zwei verschiedene Ansätze untersucht:

1. Einfluss der Anordnungen und Durchmesser der Sekundärluftdüsen.
2. Einfluss von Strömungshindernissen zur Erhöhung der Turbulenz.

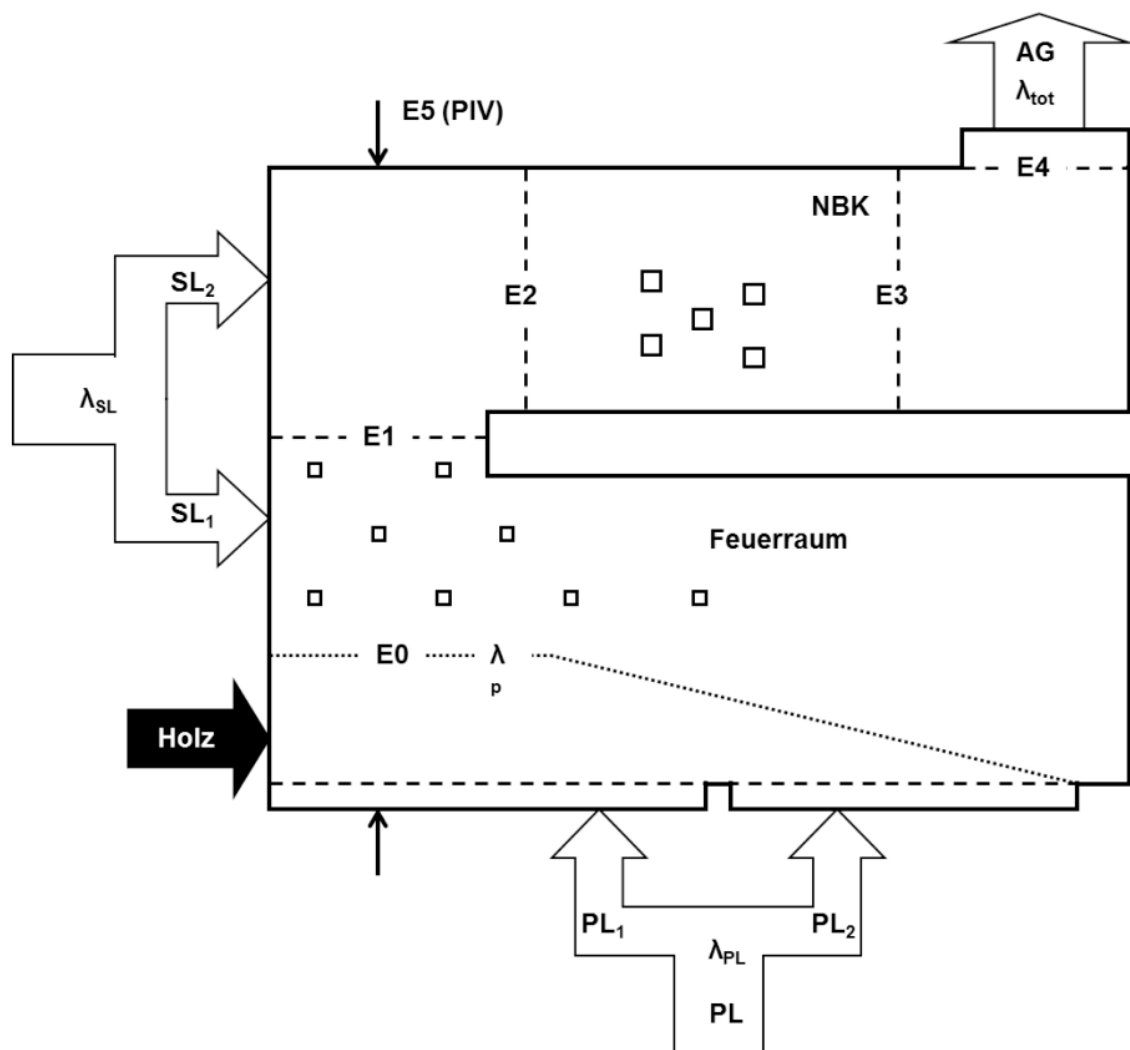


Bild 1 Schema der Vorschubrostfeuerung und Kontrollebenen E0 bis E4 zur Auswertung der CO-Emissionen und Mischungseffizienz. In Ebene E5 erfolgten die PIV-Messungen am Modell.

Tabelle 1 Randbedingungen für die CFD-Berechnungen.

Parameter	Wert	Einheit
Feuerungswärmeleistung	1412	[kW]
Kesselwirkungsgrad	85	[%]
Luftüberschuss der Primärluft λ_{PL}	0.72	[-]
Luftüberschuss der 1. Sekundärluft λ_{SL1}	0.86	[-]
Luftüberschuss der 2. Sekundärluft λ_{SL2}	0.22	[-]
Luftüberschuss $\lambda_{tot} = \lambda_{PL} + \lambda_{SL1} + \lambda_{SL2}$	1.8	[-]
Wassergehalt der Holzsplitzel w	50	[%]
Temperatur Primär- und Sekundärluft	80	[°C]

3.2 Resultate der CFD-Optimierungen

Für die CFD Berechnungen wurden insgesamt rund 30 Varianten berücksichtigt. An dieser Stelle werden die wichtigsten vorgestellt.

3.2.1 Einfluss der Anordnungen und Durchmesser der Sekundärluftdüsen

Tabelle 2 zeigt die Varianten der berechneten Sekundärluftanordnungen SL-1 bis SL-9.

Ausgehend vom Referenzfall wird in der ersten Gruppe die Gesamt-Querschnittsfläche A der Sekundärluftdüsen variiert. Mit reduzierter Fläche steigen das Impulsverhältnis zwischen Sekundärluft und Grundströmung sowie die Turbulenz bei gleichzeitig steigendem Druckverlust.

In der zweiten Gruppe wird die Anzahl N der Sekundärluftdüsen verdoppelt.

Die Resultate zeigen, dass die Ausbrandqualität mit abnehmender Gesamt-Querschnittsfläche der Sekundärluftdüsen verbessert wird, da die Mischungseffizienz mit zunehmender Eindringtiefe verbessert wird. Zu beachten ist allerdings, dass die Eindringtiefe ein Optimum erreicht, oberhalb dessen die Mischungseffizienz wieder abnimmt.

Zudem wird die Ausbrandqualität durch Erhöhung der Düsenanzahl bei gleichem Gesamt-Querschnitt verbessert.

Aus den dargestellten Fällen werden nebst dem Referenzfall die Fälle SL-3 und SL-8 mit halbem Düsenquerschnitt experimentell untersucht. Diese versprechen eine Verbesserung der Verbrennung mit gleichem (SL-8) oder moderat erhöhtem Druckverlust (SL-3).

Zusätzlich wird für die Experimente der Fall SL-10 definiert. Dieser entspricht dem Kompromiss zwischen den zwei ausgewählten Fällen SL-3 und SL-8, bei dem die Anzahl SL-Löcher um 50% vergrößert und die Einströmfläche auf 75% des Referenzfalles verkleinert werden.

3.2.2 Einfluss von Strömungshindernissen zur Erhöhung der Turbulenz

Tabelle 3 beschreibt die berechneten Varianten mit Einbauten. Der Anstieg des Druckverlusts ist bei allen Varianten moderat. Zwei Fälle führen nicht zu einer Verbesserung, während die anderen untersuchten Varianten eine Erhöhung der Ausbrandqualität um rund einen Faktor 2 bis 10 versprechen.

Die Fälle EB-1 und EB-6 mit einer Querschnittsverjüngung in der Umlenkung führen jedoch zu unerwünschten Temperaturspitzen an der Wand, was entsprechende Erfahrungen aus der Praxis mit Verschlackungsproblemen in diesem Bereich bestätigen. Aus diesem Grund werden diese beiden Fälle nicht weiter berücksichtigt.

Für die experimentelle Versuchsreihe werden die Fälle EB-2, EB-4 und EB-8 ausgewählt.

Von den beschriebenen Varianten werden nachfolgend exemplarisch CFD-Berechnungen für den Referenzfall und Fall SL-8 beschrieben.

Tabelle 2 Varianten der Sekundärlufteindüsung. Werte der einzelnen Varianten für CO, Mischungseffizienz (ME) und Druckverlust (Δp) in Kontrollebene 4 bezogen auf den Referenzfall. EXP: Für Experimente ausgewählte Varianten (fett).

N: Anzahl Sekundärluftdüsen

A: Querschnittsfläche der Sekundärluftöffnungen in Zone 1

SL: Sekundärluft, ZL: Zuluft

SL-10: Nur experimentell untersucht.

Fall	EXP	$N_{SL1, norm}$	$A_{SL1, norm}$	CO-E4 [% Ref]	ME-E4 [% Ref]	Δp ZL [% Ref]
SL-1		1	0.125	0.1	99	6630
SL-2			0.25	2	100	1647
SL-3	+		0.5	21	101	405
Ref	+		1	100	100	100
SL-4			2	252	96	23
SL-5		2	0.125	0.1	92	6464
SL-6			0.25	0.1	100	1683
SL-7			0.5	3	98	405
SL-8	+		1	42	97	97
SL-9			2	199	95	23
SL-10	+	1.5	0.75			

Tabelle 3 Varianten der Sekundärlufteindüsung. Werte der einzelnen Varianten für CO, Mischungseffizienz (ME) und Druckverlust (Δp) in Kontrollebene 4 bezogen auf den Referenzfall. EXP: Für Experimente ausgewählte Varianten (fett).

N: Anzahl Sekundärluftdüsen

A: Querschnittsfläche der Sekundärluftöffnungen in Zone 1

NBK: Nachbrennkammer.

Fall	EXP	Variation	CO-E4 [% Ref]	ME-E4 [% Ref]	Δp ZL [% Ref]
Ref	+	keine	100	100	100
EB-1		Schmale Umlenkung	26	105	138
EB-2	+	Einbau Mitte	27	103	132
EB-3		Einbau nach SL_2	106	99	103
EB-4	+	Einbau Seite	20	106	141
EB-5		Asym. Einbau in NBK	57	103	137
EB-6		Einschnürung in E1	38	104	113
EB-7		Nase vor Umlenkung	126	98	97
EB-8	+	Einbau Decke	11	104	222

Der Referenzfall (Bild 2) weist eine grosse Strähne mit hoher CO-Konzentration auf, die bis in die Nachbrennkammer strömt. Auf dem Bild sind zudem die Hauptvergasungszone im Brennstoffbett sowie die Sekundärluftdüse an der Stirnseite erkennbar.

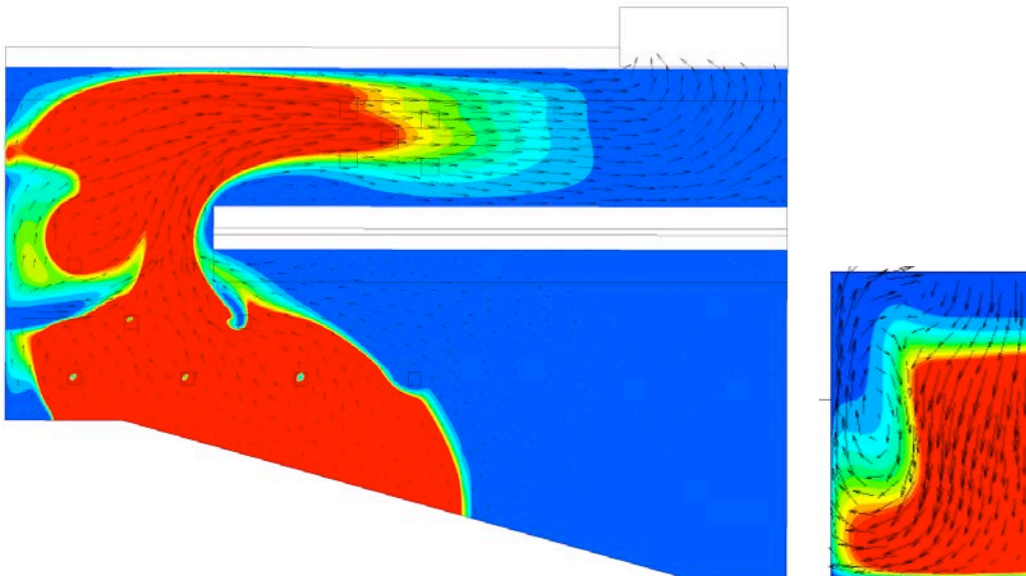


Bild 2 Referenzfall: CO-Werte in Feuerraum und Nachbrennkammer (links) sowie in Ebene E4 (rechts, nur eine Hälfte und in unterschiedlichem Massstab). Rot: CO hoch, blau: CO tief.

Der Fall SL-8 (Bild 3) mit doppelter Anzahl Sekundärluftdüsen bei gleichem Gesamt-Querschnitt zeigt ein ähnliches Bild, jedoch mit deutlich verkleinerter CO-Strähne. Dies führt zu einer Reduktion der CO-Werte in Kontrollebene E4. Eine bessere Verbrennung in der Gasphase wird also allein durch eine optimierte Verteilung der Sekundärluft bei unverändertem Impulsverhältnis von Sekundärluft zur Grundströmung erzielt.

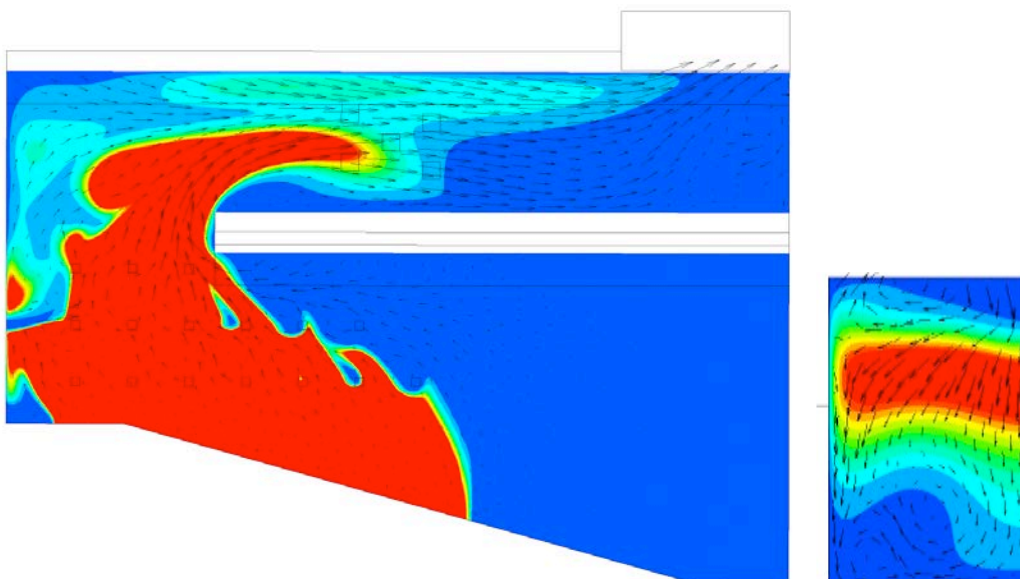


Bild 3 Fall SL-8: CO-Werte in Feuerraum und Nachbrennkammer (links) sowie in Ebene E4 (rechts, nur eine Hälfte und in unterschiedlichem Massstab). Rot: CO hoch, blau: CO tief.

4 PIV-Messung zur Validierung der CFD-Berechnung

Zur Validierung der CFD-Berechnungen werden Messungen in einem Modell der Vorschubrostfeuerungs im Massstab 1 zu 13 durchgeführt. Bei der Versuchsanordnung wird durch Anwendung der Ähnlichkeitstheorie darauf geachtet, dass die Strömung im Modell die Realität geeignet abbildet [6]. Neben Ähnlichkeit der Geometrie wird dabei auf vergleichbare Turbulenz, ausgedrückt durch die Reynolds-Zahl, sowie auf ähnliche Impulsverhältnisse geachtet.

Durch Zugabe sichtbarer Tracer in Form von Öltröpfchen und Identifikation der lokalen Geschwindigkeit mittels Particle Image Velocimetry (PIV) werden in verschiedenen Ebenen des Modells Geschwindigkeitsfelder erfasst [6]. Der Einsatz einer Kamera erlaubt eine zweidimensionale Auswertung in einer Ebene, bei Einsatz von zwei Kameras aus unterschiedlicher Richtung kann die Strömung dreidimensional erfasst werden. Bild 4 zeigt den Versuchsaufbau mit dem Modell der Vorschubrostfeuerungs.

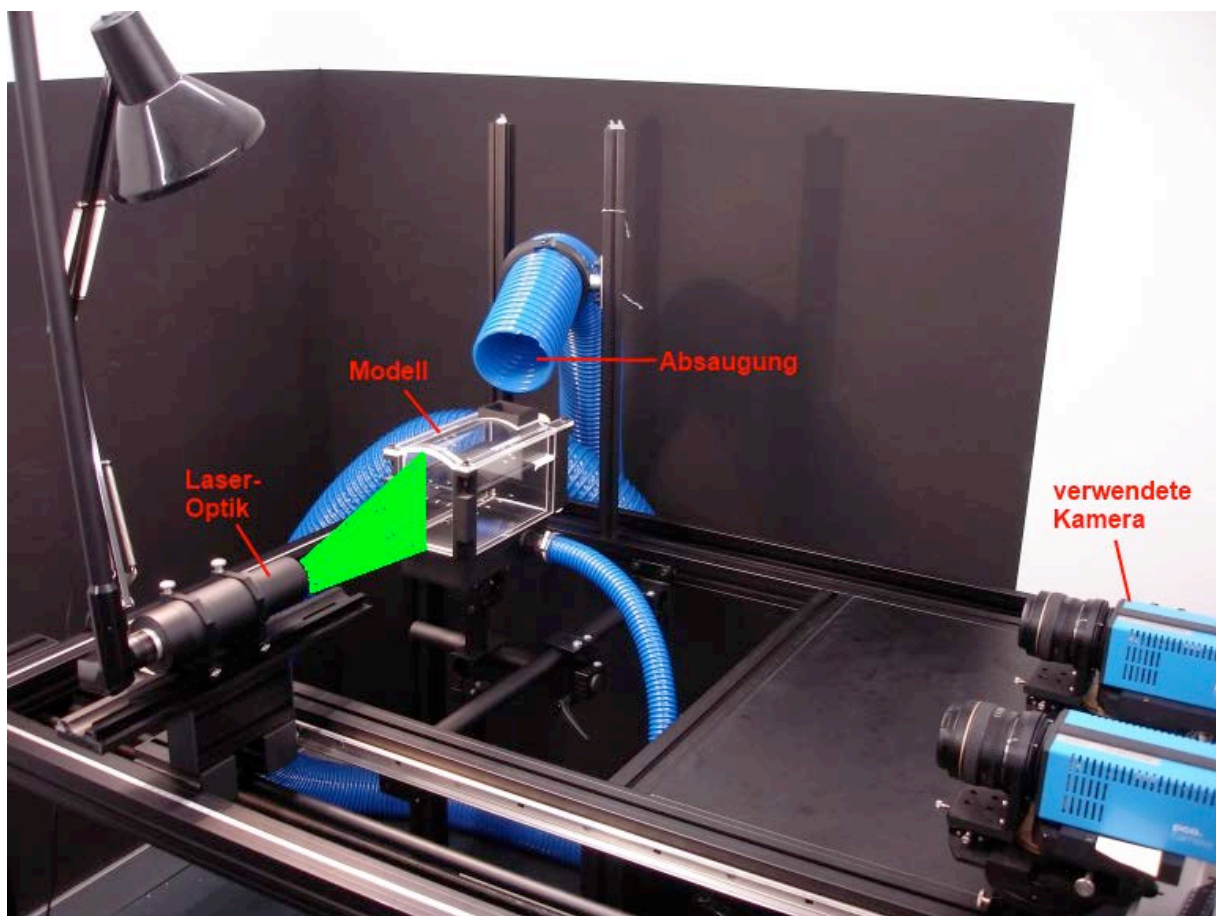


Bild 4 Versuchsaufbau für Strömungsmessungen am Modell mit Particle Image Velocimetry (PIV).

Bild 5 zeigt einen Vergleich von CFD-Berechnungen und PIV-Messungen in Ebene E5 (Bild 1) der Versuchseinrichtung. Daraus sind folgende Trends erkennbar:

- CFD und PIV zeigen eine gute qualitative Übereinstimmung der Strömungssituation.
- Aus dem Vergleich geht aber hervor, dass mit CFD eine etwas grössere Eindringtiefe der Sekundärluft berechnet als mittels PIV am Modell gefunden wird. Dabei ist zu beachten, dass bei den abgebildeten CFD-Berechnungen die Anströmung im Luftkanal nicht modelliert wird. Durch Berücksichtigung des entsprechenden Druckverlusts kann die Aussagekraft der CFD-Berechnungen somit noch erhöht werden.
- Die PIV-Messungen zeigen, dass die Strömung zwar nicht perfekt aber immerhin annähernd symmetrisch ist. Die für die CFD-Berechnungen zu Grunde liegende Annahme einer symmetrischen Strömung wird damit bestätigt.

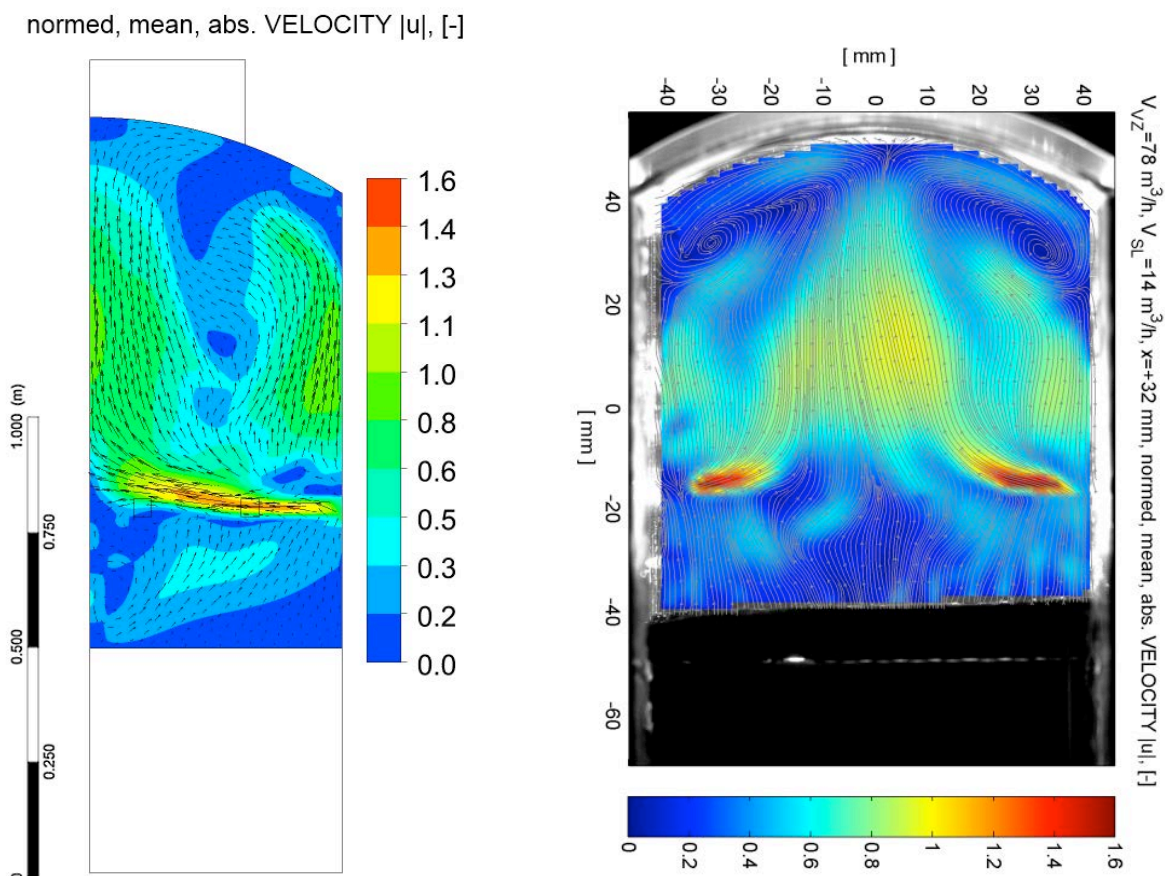


Bild 5 Vergleich von CFD-Berechnungen (links) mit PIV-Messungen am Modell (rechts). Die Bilder zeigen die normierte Geschwindigkeitsverteilung in der Ebene E5 nach Bild 1 für den Referenzfall. Bei den CFD-Berechnungen ist nur die rechte Feuerraumhälfte dargestellt, da für die Berechnungen eine symmetrische Strömung angenommen wird.

5 Experimente an einer 1.2 MW-Prototypanlage

5.1 Messgrößen und Datenauswertung

Für die Bewertung der Fälle werden folgende Messgrößen erfasst:

- Kontinuierliche Analyse der Abgaszusammensetzung:
 - O₂ (paramagnetisch)
 - CO₂ (ND-IR)
 - CO (ND-IR)
- Abgasvolumenstrom (Δp -Messung mittels Staurohr)
- Zuluftvolumenströme PL₁, PL₂, SL₁ und SL₂ (Hitzdrahtanemometer)
- Temperaturen:
 - Abgas (Thermoelement)
 - Nachbrennkammer (PT100 in Keramikrohr)
- Staub gravimetrisch mit Planfilter.

Folgende Größen werden daraus abgeleitet:

- Luftüberschuss λ_{tot}
- Feuerungswärmeleistung
- Feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_F .

Zusätzlich werden die wichtigsten Anlagendaten der Steuerung kontinuierlich erfasst:

- Rostbewegung
- Mauerungstemperatur T_M
- Unterrostentaschung
- Sollwert der Kesselleistung.

Pro Fall werden während mindestens 30 Minuten bei stationärem Betrieb kontinuierliche Messdaten erfasst. Die Messdaten werden mit dem Abgasmassenstrom gewichtet und daraus ein gewichteter Mittelwert bestimmt.

Tabelle 4 zeigt die Betriebsparameter während der Messungen. Die im Betrieb erzielten Daten stimmen nicht in allen Fällen mit den Annahmen der CFD-Berechnungen überein. Dies betrifft insbesondere das Verhältnis von SL_1 zu SL_2 sowie die während der Messungen aufgrund unterschiedlicher Betriebszustände schwankenden Mauerungstemperaturen. Ein Einfluss auf den Ausbrand konnte bei Mauerungstemperaturen oberhalb von 600°C zwar nicht festgestellt werden, dennoch können die Unterschiede zwischen den Annahmen für die Berechnungen und den effektiven Betriebsparametern zu abweichenden Resultaten führen.

Die Auswertung der einzelnen Fälle ist in Bild 6 für einen Fall mit optimierter Sekundärluft und mit Einbauten dargestellt. Das Vorgehen für die Auswertung ist dazu wie folgt:

- Zuerst werden für die einzelnen Versuche Abschnitte mit stationärem Verhalten bei konstanter Leistungsvorgabe ausgewählt.
- Danach werden für jeden Fall die Messungen mit ähnlichen Betriebsbedingungen in Bezug auf die Verhältnisse von $\lambda_{PL}/\lambda_{PL,Ref}$, $\lambda_{PL}/\lambda_{SL1}$ und $\lambda_{SL1}/\lambda_{SL2}$ ausgewählt.
- Die CO/Lambda-Diagramme werden anschliessend pro Fall für je eine Messung bei Teillast und Vollast approximiert.
- Die so bestimmten CO/Lambda-Kurven werden schliesslich miteinander verglichen um die Einflüsse der verschiedenen Sekundärlufteindüsung und der Strömungshindernisse zu beurteilen. Als Basis dient dazu in erster Linie der CO-Wert bei einer Luftüberschusszahl von $\lambda_{tot}=1.8$.

Tabelle 4 Bereiche der Betriebsparameter während der Messungen (ohne zwei Ausreisser).

Betriebsparameter	Vollast	Teillast	Einheit
Last L	77–98	29–47	[%]
Holzwassergehalt w	30–42	30–42	[%]
Nachbrennkammer-T. T_{NBK}	718–791	652–721	[°C]
Mauerungs-T. T_M	765–948	827–945	[°C]
Primärluftzahl λ_{PL}	0.73–0.87	0.68–0.83	[-]
Sekundärluftzahl 1 λ_{SL1}	0.68–0.81	0.62–0.80	[-]
Sekundärluftzahl 2 λ_{SL2}	0.31–0.39	0.50–0.57	[-]
Luftüberschuss	1.83–2.06	1.81–2.12	[-]
$\lambda_{tot} = \lambda_{PL} + \lambda_{SL1} + \lambda_{SL2}$			

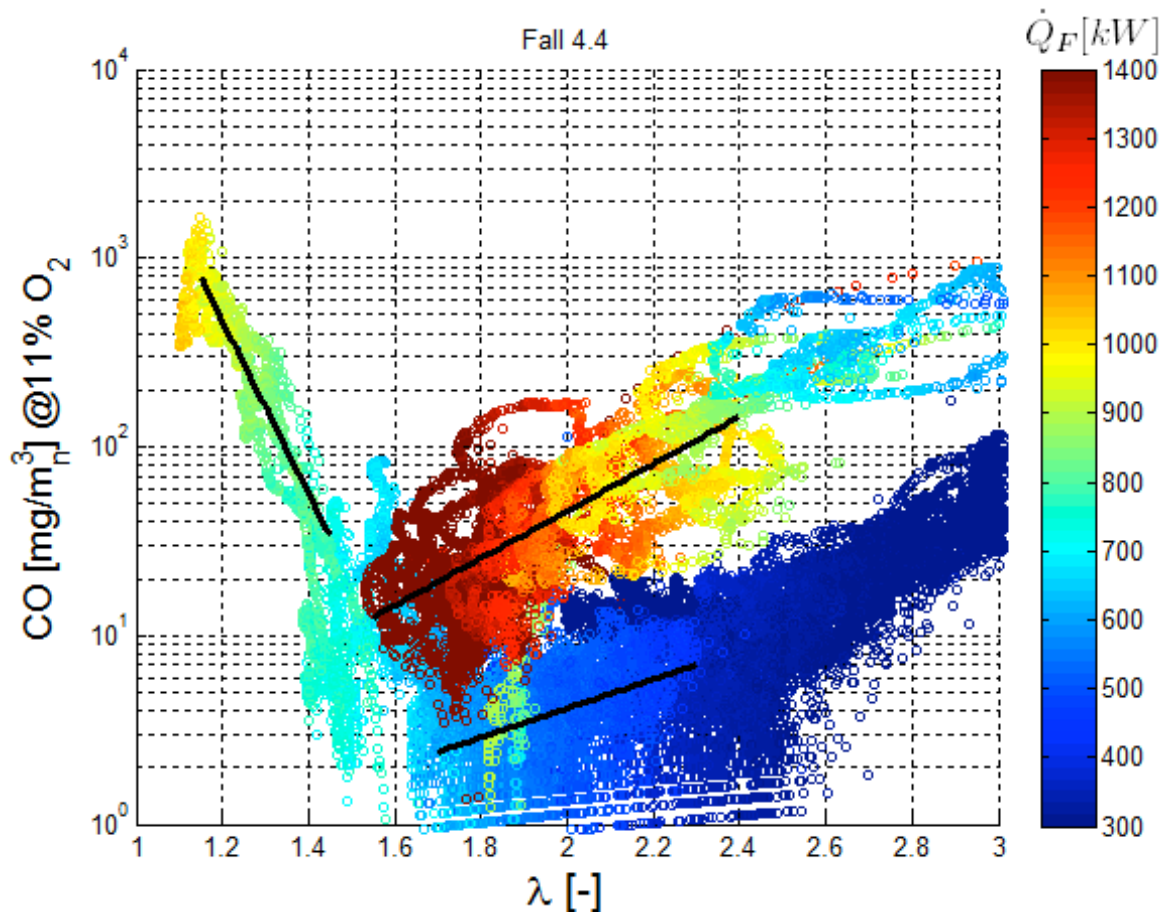


Bild 6 CO/Lambda-Diagramm für den Fall mit optimierter Sekundärluft nach SL-10 und mit Strömungseinbau nach EB-4. Die eingezeichneten Linien entsprechen der Approximation für Vollast (oben) und Teillast (unten).

5.2 Resultate

5.2.1 Einfluss der Sekundärlufteindüsung

Bild 7 zeigt den Einfluss der Sekundärlufteindüsung im CO/Lambda-Diagramm bei Vollast. Die zugehörigen Resultate sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Dabei wird jeweils der CO-Mittelwert bei einer Luftüberschusszahl von $\lambda_{tot} = 1.8$ verglichen. Dies zeigt:

- Eine Halbierung der Gesamt-Querschnittsfläche (A) mit Verdopplung der Einströmgeschwindigkeit bewirkt eine Reduktion der CO-Emissionen um rund 34%. Als zusätzlicher Vorteil wird das Optimum des Wertes der Luftüberschusszahl abgesenkt.
- Eine Verdopplung der Anzahl Sekundärluftdüsen (N) bei gleicher Gesamt-Querschnittsfläche bewirkt eine Verbesserung um 62% ohne den Druckverlust zu erhöhen.
- Werden beide Massnahmen kombiniert (die Anzahl Sekundärluftdüsen um 50% erhöht und die Eindüsungfläche um 25% reduziert), sinken die CO-Emissionen um 74%.

Bild 8 zeigt den Einfluss bei Teillast. Daraus geht ein qualitativ ähnliches Verhalten wie bei Vollast hervor. Die bei Vollast gefundenen Verbesserungen können somit auch auf den Teillast-Fall übertragen werden.

In Bild 7 und Bild 8 ist nicht ersichtlich, bei welcher Last die tiefsten CO-Werte erreicht werden. In Bild 9 ist deshalb der Verlauf des CO bei verschiedenen Lasten dargestellt. Die tiefsten Werte für die Fälle SL-3 und SL-8 werden bei 50% Last erreicht. Es gibt also eine optimale Last, bei welcher die CO-Werte ein Minimum erreichen. Fall SL-10 mit 50% mehr Sekundärluftdüsen und 25% reduzierter Eindüsungfläche weist bei allen Lasten CO-Werte unter 15 mg/m_n^3 auf. Das Minimum wird ebenfalls bei 50% Last erreicht.

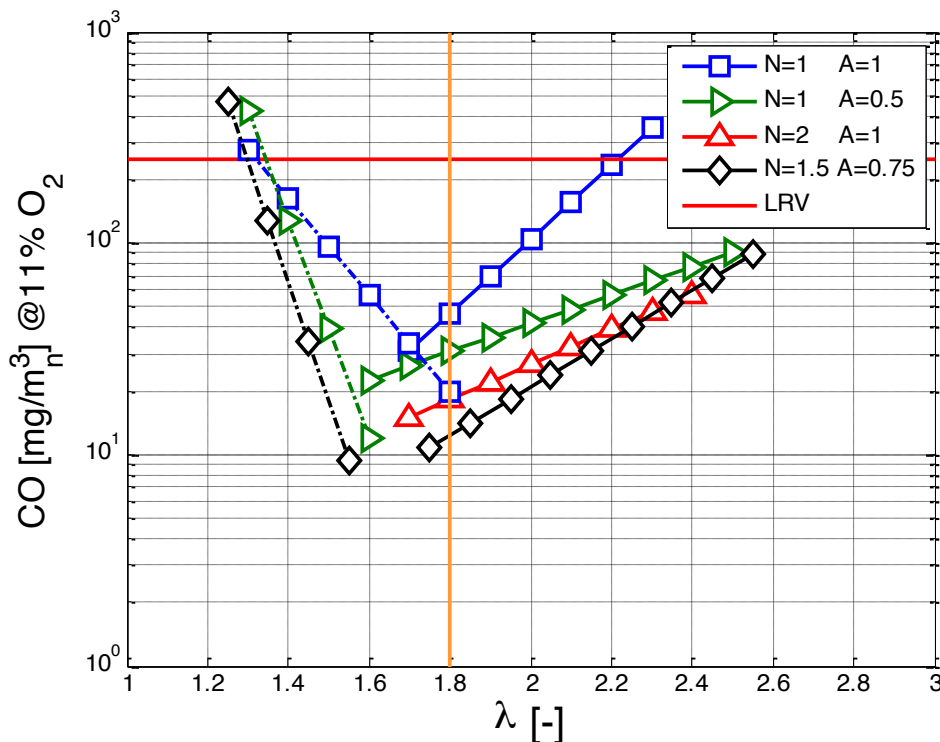


Bild 7 CO/Lambda-Diagramm bei Vollast für den Referenzfall (blau), Fall SL-3 (grün, halbe Fläche), Fall SL-8 (rot, doppelte Anzahl SL-Löcher) und Fall SL-10 (schwarz, 50% mehr Sekundärluftdüsen, 25% weniger Fläche = opt. Basis).

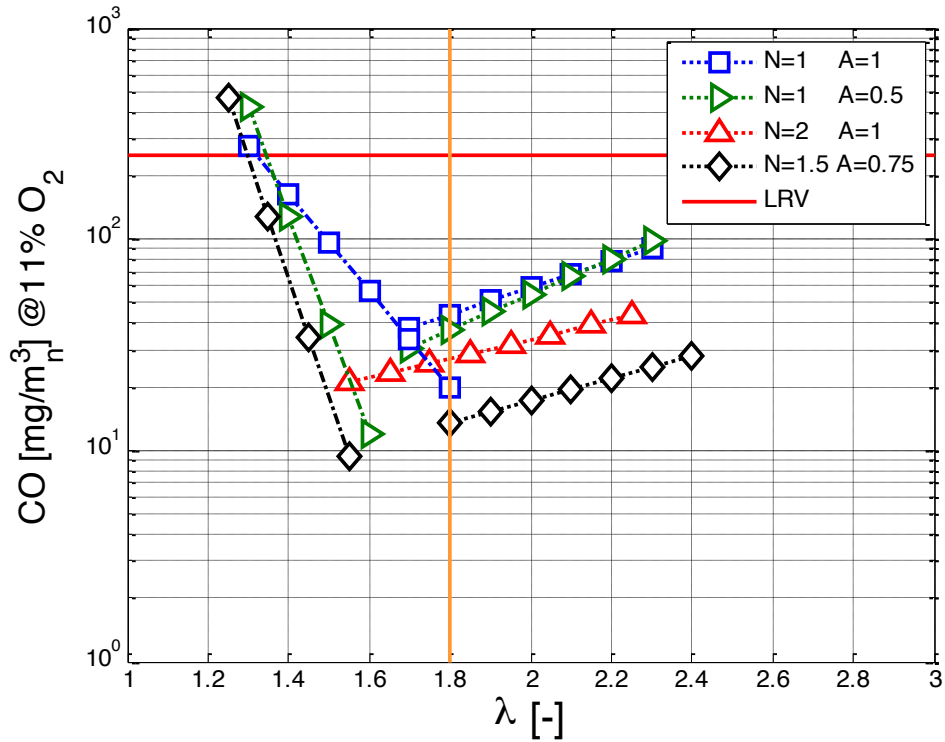


Bild 8 CO/Lambda-Diagramm bei Teillast für den Referenzfall (blau), Fall SL-3 (grün, halbe Fläche), Fall SL-8 (rot, doppelte Anzahl Sekundärluftdüsen) und Fall SL-10 (schwarz, 50% mehr Sekundärluftdüsen, 25% weniger Fläche = opt. Basis).

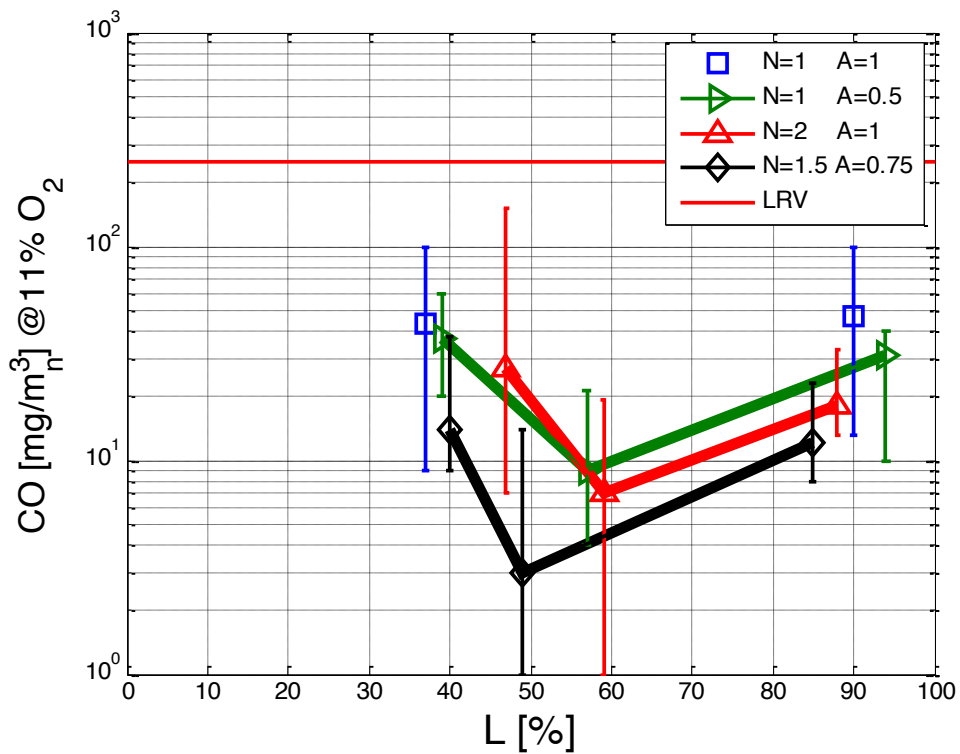


Bild 9 CO-Mittelwerte bei $\lambda_{tot} = 1.8$ in Abhängigkeit der Last L. Referenzfall (blau), Fall SL-3 (grün, halbe Fläche), Fall SL-8 (rot, doppelte Anzahl Sekundärluftdüsen) und Fall SL-10 (schwarz, 50% mehr Sekundärluftdüsen, 25% weniger Fläche = opt. Basis).

5.2.2 Einfluss von Strömungseinbauten bei optimierter Sekundärluft

Bild 10 zeigt den Einfluss der Strömungseinbauten (EB) in Kombination mit der optimierten Sekundärlufteindüsung bei Vollast, Bild 11 zeigt diesen Einfluss bei Teillast.

Ausgehend von der optimierten Sekundärlufteindüsung bringen alle Strömungseinbauten bei Vollast eine Verschlechterung der Ausbrandqualität. Gegenüber dem Referenzfall sind sie aber immer noch besser.

Bei Teillast wird für Einbauten an der Decke und an der Seite eine Reduktion der CO-Werte von einer halben bis einer Größenordnung erzielt und gleichzeitig der Wert des optimalen Luftüberschusses gesenkt. Für diese Fälle wird bei einer Luftüberschusszahl von $\lambda_{\text{tot}} = 1.8$ ein CO-Gehalt im Abgas von 3 mg/m_n^3 (bei 11 Vol.-% O_2) erzielt.

Bild 12 zeigt die CO-Mittelwerte bei einem Luftüberschuss von $\lambda_{\text{tot}} = 1.8$ in Abhängigkeit der Last und lässt die geschilderten Trends ebenfalls erkennen. Im Vergleich zu Bild 9 geht daraus ebenfalls hervor, dass die Einbauten eine Verbesserung des Teillastbetriebs um rund eine Größenordnung ermöglichen.

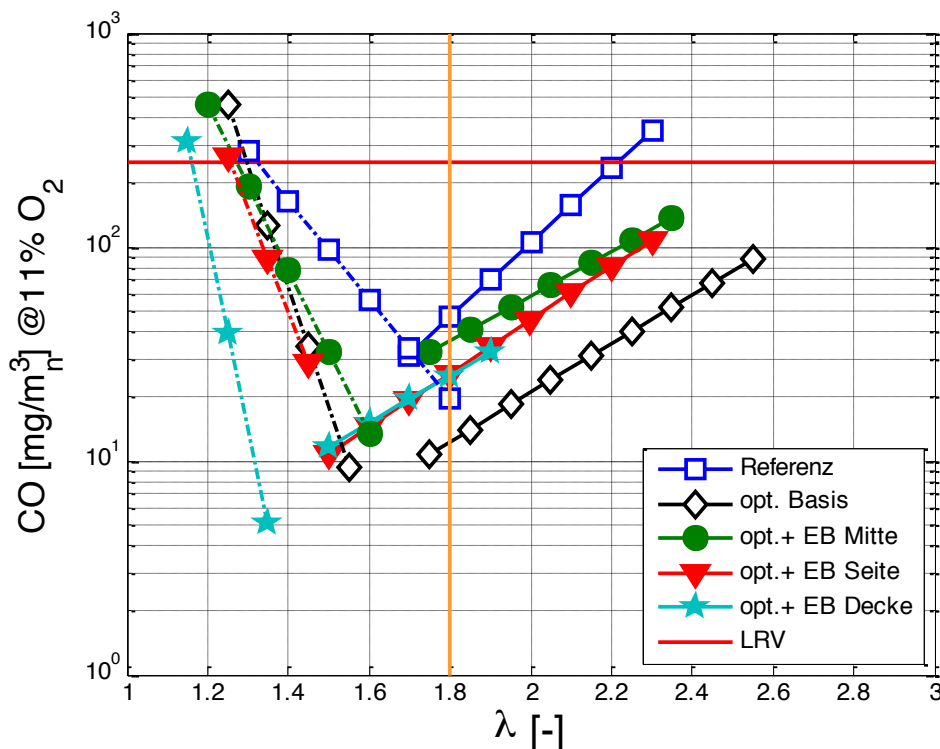


Bild 10 CO/Lambda-Diagramm für den Referenzfall, den mit Sekundärluft optimierten Fall SL-10 (opt. Basis) und die Fälle mit optimierter Sekundärluft und eingebauten Hindernissen bei Vollast. EB: Strömungseinbauten.

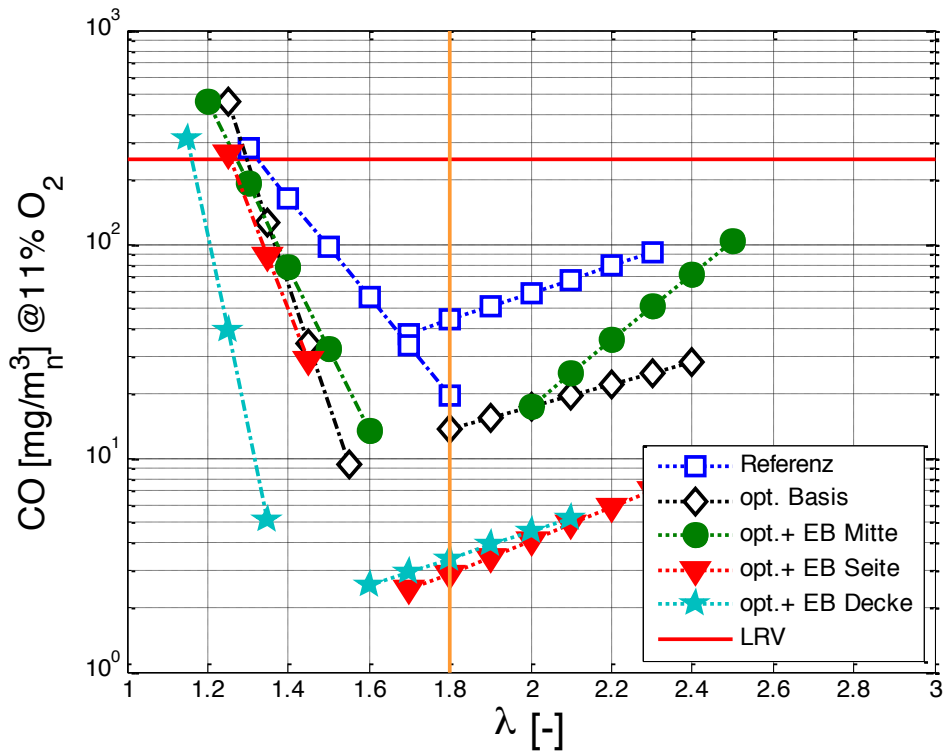


Bild 11 CO/Lambda-Diagramm für den Referenzfall, den mit Sekundärluft optimierten Fall SL-10 (opt. Basis) und die Fälle mit optimierter Sekundärluft und eingebauten Hindernissen bei Teillast. EB: Strömungseinbauten.

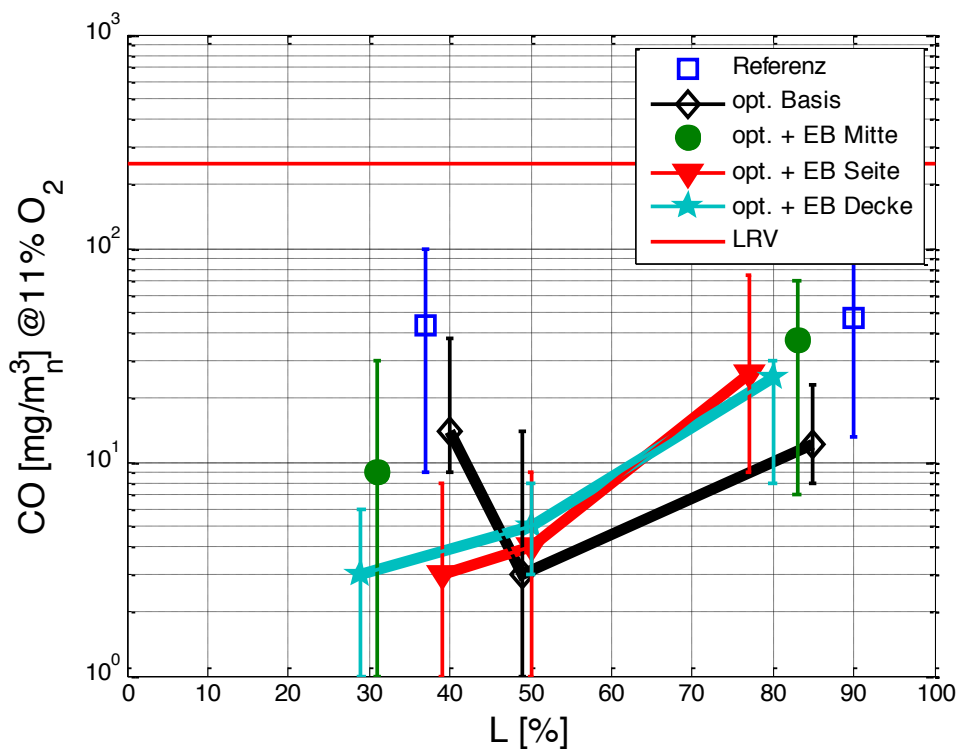


Bild 12 CO Mittelwerte bei $\lambda_{tot} = 1.8$ in Abhängigkeit der Last L. Referenzfall (blau) und Fall SL-10 (schwarz) mit optimierter SL-Zuführung, ohne Strömungshindernisse. Die Fälle EB-Mitte, EB-Seite und EB-Decke weisen ebenfalls die optimierte SL-Zuführung auf und sind zudem mit den entsprechenden Strömungshindernissen ausgestattet. EB: Strömungseinbauten.

5.2.3 Zusammenfassung der untersuchten Fälle

Tabelle 5 fasst die Resultate der untersuchten Fälle zusammen. Der Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung von 250 mg/m_n^3 bei 11 Vol.-% O_2 wird in allen Fällen unterschritten.

Tabelle 5 CO-Emissionen bei 11 Vol.-% O_2 .

N: Anzahl Sekundärluftdüsen

A: Gesamt-Querschnittsfläche der Sekundärlufteindüsung.

Fall	N/N _{Ref} [-]	A/A _{Ref} [-]	Last [%]	CO	CO	CO	
				Mittelwert [mg/m _n ³]	@λ=1.8 [mg/m _n ³]	@λ=1.8 [% Ref]	
Referenz	1	1	37	55	44	100	
			90	120	47	100	
EB Mitte			33	103	46	105	
			85	84	38	81	
EB Seite			-	-	-	-	
			98	45	51	109	
SL-4		0.5	39	56	37	84	
			94	42	31	66	
SL-10 (=opt.)			0.75	40	17	14	32
				85	30	12	26
opt. + EB Mitte				31	39	9	20
				83	70	37	79
Opt. + EB Seite	39	4		3	7		
	77	33		26	55		
Opt. + EB Decke	29	4		3	7		
	80	20		25	53		
SL-8	2	1		47	37	27	61
				88	32	18	38

6 Schlussfolgerungen

- Der Referenzfall der untersuchten Vorschubrostfeuerung kann den CO-Grenzwert der LRV bei Vollast sicher einhalten.
- In der Praxis wird bei Teillast unter einer Mindestleistung oft ein Anstieg der Emissionen beobachtet. Dieser wird durch CFD-Berechnungen unter Annahme eines vollständig bedeckten Rostes nicht vorausgesagt. Die Messungen auf der Versuchsanlage bestätigen, dass bereits im Referenzfall ein Teillastbetrieb bis zu unter 40% der Nennleistung ohne Anstieg der CO-Emissionen möglich ist. Dies setzt jedoch eine vollständige Bedeckung des Rostes durch geeignete Rostbewegung und Luftzufuhr voraus. Unbedeckte Rostzonen führen dagegen zu einem Anstieg der CO-Emissionen [4].
- Eine Verbesserung der Eindüsung der Sekundärluft kann entweder durch ein erhöhtes Impulsverhältnis zwischen Sekundärluft und Grundströmung (bei erhöhtem Druckverlust) oder durch gleichmässigerer Verteilung der Luftdüsen erzielt werden. Eine Kombination beider Ansätze ergibt die beste der untersuchten Lösungen.
- Durch Optimierung der Sekundärlufteindüsung können mit geringem Aufwand und ohne wesentliche Erhöhung des Druckverlusts deutliche Verbesserungen erzielt werden, die sich auf den Betrieb bei Vollast und bei Teillast positiv auswirken. Die Reduktion der CO-Emissionen beträgt ausgehend von einem bereits tiefen Wert rund einen Faktor 4.
- Durch Optimierung der Sekundärlufteindüsung kann ein stabiler Betrieb ab 30% Last bis zu Vollast erreicht werden. Bei einem Luftüberschuss von $\lambda_{\text{tot}} = 1.8$ werden CO-Emissionen bei Vollast und bei Teillast von unter 15 mg/m_n^3 bei 11 Vol.-% O_2 erreicht.
- Gleichzeitig wird der optimale Luftüberschuss um einen Wert von jeweils rund 0.2 abgesenkt, also zum Beispiel von $\lambda = 1.7$ auf 1.5. Dies ermöglicht einen höheren Wirkungsgrad. Zudem wird ein tendenziell stabileres Verhalten bei Teillast und bei hohem Wassergehalt des Brennstoffs erwartet.
- Die Einbauten allein haben keinen relevanten Effekt auf die Ausbrandqualität. Als zusätzliche Massnahme nach optimierter Sekundärlufteindüsung wird damit der Teillastbetrieb durch die Einbauten weiter verbessert, bei Vollast ist der Effekt dagegen negativ.
- Die CFD-Berechnungen werden als geeignetes Instrument zur Strömungsoptimierung von Holzfeuerungen bestätigt. Gleichzeitig zeigen die Untersuchungen, dass die Bedingungen der Gasfreisetzung auf dem Rost die Verbrennung entscheidend beeinflussen, was für die Auslegung und den Betrieb berücksichtigt werden muss.

7 Literatur

- [1] Van Loo, S., Koppejan, J.: *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Earthscan, London, 2008
- [2] Nussbaumer, T.: Combustion and Co-combustion of Biomass, *Energy & Fuels*, Vol. 17, No 6, 2003, 1510–1521
- [3] Good, J.; Nussbaumer, Th.: Überwachung und Vollzug der LRV für Holzheizungen ab 500 kW mit Feinstaubabscheidern im Kanton Zürich, *10. Holzenergie-Symposium*, 12. September 2008, ETH Zürich, 2008, ISBN 3-908705-19-3, 219–256
- [4] Kiener, M., Nussbaumer, T.: Influence of Uneven Fuel Distribution on a Grate on Gas Flow and Combustion Quality, *20th European Biomass Conference and Exhibition*, Maastricht, 2012
- [5] Klasen, T., Görner K.: Numerical Calculation and Optimisation of a large Municipal Solid Waste Incinerator Plant, *2nd Int. Symposium on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, University of Sheffield, UK, 4-6 Juli, 1999
- [6] Baillifard, M.; Nussbaumer, Th.: Strömungsoptimierung von Feuerräumen mittels Experiment und Computational Fluid Dynamics (CFD), *10. Holzenergie-Symposium*, 12. September 2008, ETH Zürich, 2008, ISBN 3-908705-19-3, 93–114

Verdankung

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