

Fluiddynamische Optimierung mit CFD und PIV

ROSTFEUERUNG | 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 Maßnahmen zur Erweiterung des Leistungsbereichs durch Optimierung der Sekundärlufteindüsung sowie durch Strömungseinbauten untersucht. Die Auslegung erfolgt durch Simulation mit Computational Fluid Dynamics (CFD) und Validierung an Kaltmodellen mittels Particle Image Velocimetry (PIV). Die besten Varianten werden auf einer 1,2-MW-Vorschubrostfeuerung umgesetzt und experimentell untersucht. Es wird gezeigt, dass die Ausbrandqualität durch Optimierung der Sekundärlufteindüsung um rund einen Faktor 4 verbessert und ein stabiler Betrieb von unter 30 % Leistung bis zu Nennleistung erreicht werden kann. Gleichzeitig wird der optimale Luftüberschuss abgesenkt, wodurch der Wirkungsgrad erhöht werden kann. Bei einem Luftüberschuss von 1,8 werden im ganzen Lastbereich CO-Emissionen von unter 15 mg/m³ (i.N.) bei 11 Vol.-% O₂ erzielt. Einbauten ermöglichen eine weitere Verbesserung bei Teillastbetrieb, nicht jedoch bei Nennleistung. Neben einer guten Strömungsführung ist im Praxisbetrieb auch die Rostbedeckung entscheidend für gute Ausbrandbedingungen.

Autoren

Prof. Dr. sc. techn. **Thomas Nussbaumer**, Jahrgang 1960. Studium als Dipl.-Masch.-Ing. ETH in Verfahrenstechnik an der ETH Zürich (1984), Promotion über Schadstoffbildung an der ETH (1989), Inhaber des Ingenieurbüros Verenum (seit 1990), Habilitation an der ETH Zürich (1997), seit 2007 Professor für erneuerbare Energien an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw.

www.hslu.ch, www.verenum.ch

Dipl.-Ing. **Martin Kiener**, Jahrgang 1982. Ausbildung an der Berner Fachhochschule (2007), Assistent an der BFH, seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fachgruppe Bioenergie an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur.

Die Entwicklung wird in Zusammenarbeit mit der Firma Schmid AG energy solutions, Eschlikon/CH, durchgeführt und von der Kommission für Innovation und Technologie (KTI) unterstützt.



Heizzentrale mit 2,4-MW-Vorschubrostfeuerung und Elektroabscheider.

Bild: Schmid AG energy solutions

Vorschubrostfeuerungen wie in **Bild 1** gezeigt sind geeignet zur Nutzung verschiedenartiger biogener Brennstoffe und kommen auch für hohe Asche- und Wassergehalte zum Einsatz. Typische Anlagengrößen betragen zwischen 0,5 MW bis 25 MW [1; 2]. Bei Nennleistung wird eine hohe Ausbrandqualität der Abgase und der Asche erreicht. Heutige Rostfeuerungen erlauben zudem auch einen kontinuierlichen Teillastbetrieb, dies allerdings oft erst ab rund 50 % der Nennleistung. Bei niedrigeren Leistungen erfolgt ein getakteter Ein/Aus-Betrieb. Die Folge sind erhöhte Emissionen. Kritisch ist dabei, dass Elektroabscheider oder Gewebefilter während der Startphasen oft ausgeschaltet oder umgangen werden, um Schäden durch Kondensation zu vermeiden [3]. Im Weiteren kann bei Teillastbetrieb oder sich ändernden Brennstoffeigenschaften (z. B. des Wassergehalts oder der Schüttdichte) eine ungleichmäßige Brennstoffverteilung auf dem Rost auftreten. Teillastbetrieb führt oft zu unbedeckten Zonen in der zweiten Rost-

hälfte. Dies kann Falschlufft und unkontrollierte Strömungsbedingungen sowie in der Folge erhöhte CO-Emissionen verursachen [4].

Ziel

Ziel ist die Entwicklung von strömungstechnischen Maßnahmen, die eine Ausdehnung des Teillastbereichs bei Vorschubrostfeuerungen ermöglichen. Damit soll ein stabiler Betrieb von unter 30 % bis zu 100 % der Nennleistung mit sicherer Einhaltung der Grenzwerte und bei tiefem Luftüberschuss und hohem Wirkungsgrad erzielt werden.

Numerische Strömungsoptimierung

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 Berechnung der Gasphasenreaktionen 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 und Annahme einer symmetrischen Strömung durchgeführt [7]. Als Randbedingung für die Berechnungen dienen die Parameter nach **Tabelle 1**. Eine wichtige Kenngröße der Strömung ist die Turbulenz, die durch das als Reynolds-Zahl definierte Verhältnis zwischen Trägheitskräften und viskosen Kräften beschrieben wird:

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \tag{1}$$

u = Geschwindigkeit [m / s]
 L = Länge [m]
 ν = kinematische Viskosität [m² / s]

Für die Mischung von Fluidströmen ist zudem das Impulsverhältnis zwischen den Strömen entscheidend, das für die Sekundärlufteindüsung als Verhältnis der Impulsstromdichte der Düsenströmung zu derjenigen der Grundströmung definiert wird:

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

Index D = Düsenströmung
 Index G = Grundströmung [m / s]

Tabelle 1

Randbedingungen für die CFD-Berechnungen.

Parameter	Wert
Feuerungswärmeleistung	1,4 MW
Kesselwirkungsgrad	85 %
Wassergehalt der Holzschnitzel	50 %
Temperatur Primär- und Sekundärluft	80 °C
Luftüberschuss Primärluft λ _{PL}	0,72
Sekundärluft 1 λ _{SL1}	0,86
Sekundärluft 2 λ _{SL2}	0,22
Total: λ _{tot} = λ _{PL} + λ _{SL1} + λ _{SL2}	1,80

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

1. Variation der Anordnungen und Durchmesser der Sekundärluftdüsen zur Veränderung des Impulsverhältnisses und
2. Einsatz von Strömungshindernissen zur Erhöhung der Turbulenz.

Die Auswertung der Simulationen erfolgt in vier Ebenen nach **Bild 2** unter Berücksichtigung von Kohlenmonoxid (CO) als Indikator der Verbrennungsqualität. Die Mischungseffizienz wird als zusätzlicher Parameter untersucht. Für den Variantenvergleich dienen die Emissionswerte am Austritt der Nachbrennkammer (Ebene E4). Zusätzlich wird der Reaktionsfortschritt über die Auswertungsebenen beobachtet. Für die Berechnungen wurden 30 Varianten berücksichtigt, von denen einzelne exemplarisch beschrieben werden.



Bild 1

Aufbau einer Vorschubrostfeuerung.

Bild: Schmid AG energy solutions

Fall	EXP	N	A	CO/CO _{ref} [%]	ME [%]	Δp [%]
SL-1		1	0,125	0,1	99	6 630
SL-2			0,25	2	100	1 647
SL-3	+		0,5	21	101	405
Ref	+		1	100	100	100
SL-4		2	2	252	96	23
SL-5			0,125	0,1	92	6 464
SL-6			0,25	0,1	100	1 683
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	-	-	-

EXP: Für Experimente ausgewählte Varianten
 SL-10: Optimum (nur experimentell untersucht)
 N: Anzahl Sekundärluftdüsen
 A: Querschnittsfläche der Sekundärluftöffnungen in Zone 1
 SL: Sekundärluft.

Einfluss der Sekundärlufteindüsung

Tabelle 2 zeigt die Resultate der CFD-Berechnungen für die Sekundärluftanordnungen SL-1 bis SL-9. Die berechneten Werte beschreiben den CO-Gehalt und die Mischungseffizienz in Ebene 4 sowie den Druckverlust der Verbrennungsluft zwischen Eintritt und Ebene 4.

Tabelle 2

Mit CFD berechnete Werte für CO-Gehalt, Mischungseffizienz (ME) und Druckverlust (Δp) in Kontrollebene 4 im Vergleich zum Referenzfall (= 100 %) für die Varianten der Sekundärlufteindüsung.

Ausgehend vom Referenzfall wird zuerst die Gesamtquerschnittsfläche der Sekundärluftdüsen variiert. Mit reduzierter Fläche steigen das Impulsverhältnis sowie die Turbulenz bei gleich-

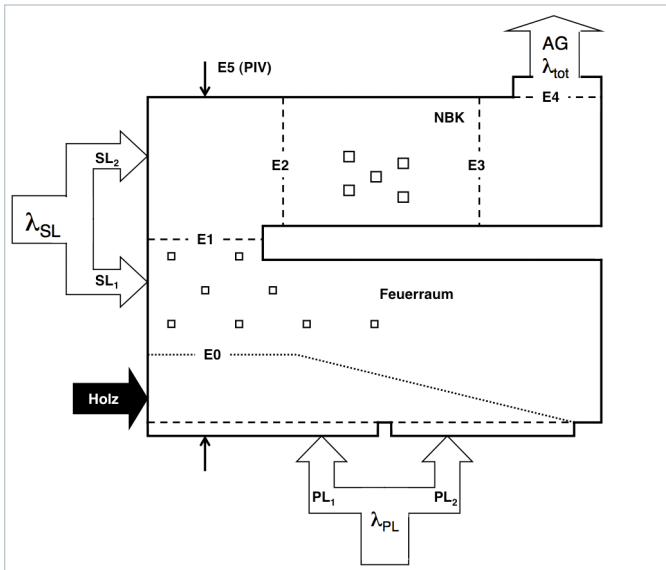


Bild 2
Schema der Vorschubrostfeuerung und Kontrollebenen E0 bis E4 zur Auswertung der CO-Emissionen und der Mischungseffizienz. In Ebene E5 erfolgten die PIV-Messungen am Modell.

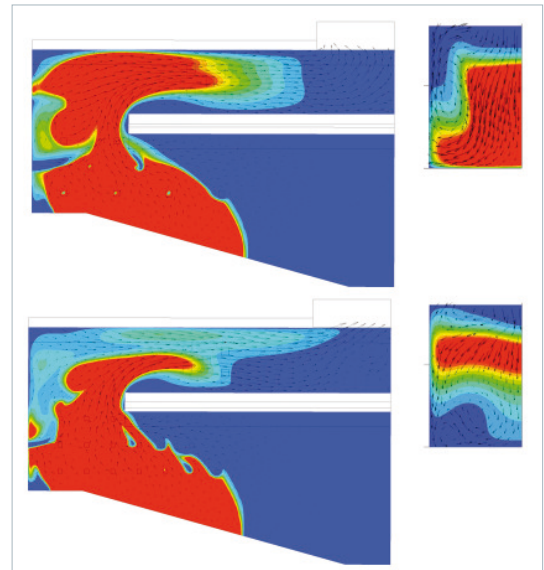


Bild 3
Vergleich von Referenzfall (oben) und Fall SL-8 mit verbesserter Sekundärlufteindüsung (unten) anhand der mit CFD berechneten CO-Gehalte (rot = hohe Konzentration). Links: Feuerraum und Nachbrennkammer. Rechts: Hälfte der Ebene 4 in höher empfindlichem Maßstab.

zeitig steigendem Druckverlust. In einem zweiten Schritt wird die Anzahl der Sekundärluftdüsen verdoppelt.

Die Resultate zeigen, dass die Ausbrandqualität mit abnehmender Gesamtquerschnittsfläche der Luftdüsen durch die Zunahme von Einströmgeschwindigkeit und Impulsverhältnis erhöht wird. Gleichzeitig steigt jedoch der Druckverlust an. Die Ausbrandqualität kann aber auch durch Erhöhung der Düsenanzahl bei gleichem Gesamtquerschnitt verbessert werden, was bei praktisch unverändertem Druckverlust möglich ist.

Bild 3 zeigt exemplarisch den Einfluss auf den CO-Abbau in der Brennkammer für den Referenzfall und Fall SL-8. Der Referenzfall weist eine große Strähne mit hoher CO-Konzentration auf, die bis in die Nachbrennkammer strömt. Der Fall SL-8 mit doppelter Anzahl Sekundärluftdüsen bei gleichem Gesamtquerschnitt zeigt ein ähnliches Bild, jedoch mit verkleinerter CO-Strähne. Dies führt zu einer Reduktion der CO-Werte in der

Kontrollebene E4. Eine bessere Verbrennung in der Gasphase wird also allein durch eine optimierte Verteilung der Sekundärluft bei unverändertem Impulsverhältnis erzielt.

Für die Umsetzung auf einer 1,2-MW-Rostfeuerung werden neben dem Referenzfall die Fälle SL-3 und SL-8 mit halbem Düsenquerschnitt ausgewählt, wobei bei SL-3 die Anzahl der Düsen unverändert bleibt und bei SL-8 die Düsenzahl verdoppelt wird. Diese Varianten 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, bei dem die Düsenzahl um 50 % erhöht wird.

Einfluss von Strömungshindernissen

Tabelle 3 beschreibt die Resultate der CFD-Berechnungen für die Varianten mit Einbauten zur Erhöhung der Turbulenz. Der Einfluss auf den Druckverlust ist bei allen Varianten moderat. Zwei

Fälle bewirken eine geringe Verschlechterung, die anderen Varianten ergeben eine Erhöhung der Ausbrandqualität um einen Faktor 2 bis 10. Allerdings verursachen die Fälle EB-1 und EB-6 mit einer Querschnittsverjüngung in der Umlenkung unerwünschte Temperaturspitzen an der Wand. Dies bestätigen praktische Erfahrungen mit Verschlackungsproblemen in diesem Bereich, weshalb diese Fälle nicht umgesetzt und für die Experimente die Fälle EB-2, EB-4 und EB-8 ausgewählt werden.

PIV-Messungen am Modell

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

Durch Zugabe sichtbarer Tracer in Form von Öltröpfchen und Identifikation der lokalen Geschwindigkeit mittels Particle Image Velocimetry (PIV) werden die Tracer mit Laserlicht sichtbar gemacht und deren Geschwindigkeit er-

Tabelle 3

Mit CFD berechnete Werte der Varianten mit Einbauten ausgehend vom Referenzfall.

Fall	EXP	Variation	CO/CO _{ref} [%]	ME [%]	Δp [%]
Ref	+	keine	100	100	100
EB-1		Schmale Umlenkung	26	105	138
EB-2	+	Einbau Mitte	27	103	132
EB-3		Einbau nach SL2	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

SL: Sekundärluft
 NBK: Nachbrennkammer

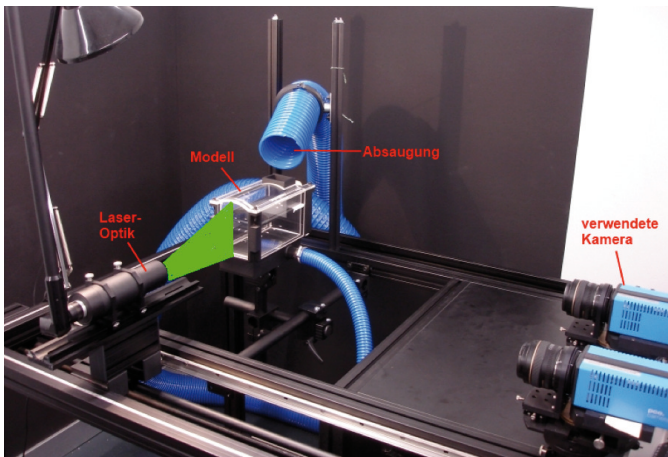


Bild 4

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

fasst [6]. Mit Einsatz einer Kamera erfolgt eine zweidimensionale Auswertung, bei Einsatz von zwei Kameras kann die Strömung dreidimensional erfasst werden. **Bild 4** zeigt den Versuchsaufbau. **Bild 5** zeigt einen Vergleich von CFD-Berechnungen und PIV-Messungen. Die Auswertung erfolgt für die in Bild 2 definierte Ebene E5. Daraus sind folgende Trends erkennbar [7]:

- Mit CFD wird eine etwas größere Eindringtiefe der Sekundärluft berechnet, als mittels PIV am Modell gefunden wird. Dennoch weisen CFD und PIV ansonsten eine gute qualitative Übereinstimmung der Strömungssituation auf.
- Zudem zeigen die PIV-Messungen, dass die Strömung nicht perfekt, aber annähernd symmetrisch ist. Die für die CFD-Berechnungen zugrunde liegende Annahme einer symmetrischen Strömung wird damit bestätigt.

Experimente an einer 1,2-MW-Prototypanlage

Methoden

Für die Versuche dient eine 1,2-MW-Vorschubrostfeuerung nach Bild 1, die mit den Vari-

Tabelle 4

Messresultate der CO-Emissionen der experimentell untersuchten Fälle.

Fall	N/N _{Ref}	A/A _{Ref}	Last	CO		
				Mittelwert	$\lambda = 1,8$	CO/CO _{ref}
	[–]	[–]	[%]	[mg/m ³ (i.N.)]	[mg/m ³ (i.N.)]	[%]
Ref	1	1	37	55	44	100
Ref + EB-2 (Mitte)			90	120	47	100
Ref + EB-4 (Seite)			33	103	46	105
			85	84	38	81
SL-4	0,5	0,5	–	–	–	–
SL-10			98	45	51	109
			39	56	37	84
94			42	31	66	
SL-10 + EB-2 (Mitte)	1,5	0,75	40	17	14	32
SL-10 + EB-4 (Seite)			85	30	12	26
			31	39	9	20
83			70	37	79	
SL-10 + EB-8 (Decke)	2	1	39	4	3	7
SL-8			77	33	26	55
			29	4	3	7
80			20	25	53	
47	37	27	61			
88	32	18	38			

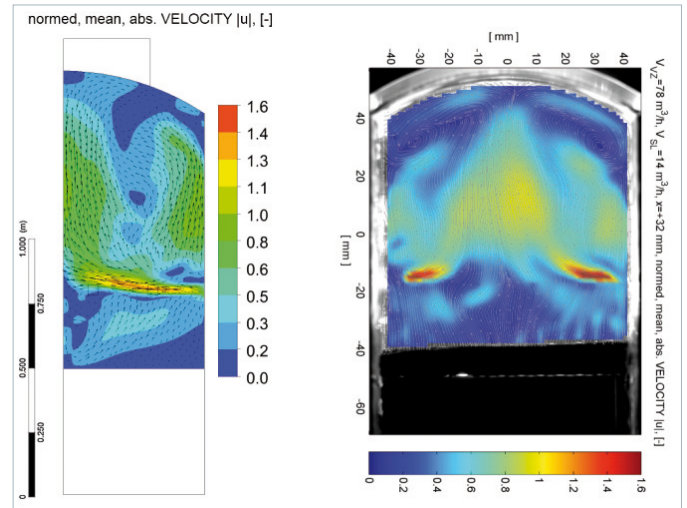


Bild 5

Vergleich von CFD-Berechnungen (links) mit PIV-Messungen am Modell (rechts). Die Bilder zeigen die normierte Geschwindigkeitsverteilung in der Ebene E5 nach Bild 2 für den Referenzfall. Bei den CFD-Berechnungen ist nur die rechte Feuerraumhälfte dargestellt, da für die Berechnungen eine symmetrische Strömung angenommen wird.

anten der Sekundärluftdüsen und Einbauten betrieben werden kann. Für die Erfolgskontrolle dienen folgende Messgrößen und Kennwerte:

- O₂ (paramagnetisch), CO₂ und CO (ND-IR),
- Luftüberschuss λ_{tot} ,
- Staub gravimetrisch mit Planfilter,
- Temperaturen in Abgas, Nachbrennkammer und Mauerung,
- Feuerungswärmeleistung,
- feuerungstechnischer Wirkungsgrad,
- Abgasvolumenstrom (Δp mit Staurohr),
- Zuluftvolumenströme PL₁, PL₂, SL₁ und SL₂ (Hitzdrahtanemometer),

- Rostbewegung und Entaschung,
- Sollwert der Kesselleistung.

Für jede Variante wird jeweils ein mit dem Abgasvolumenstrom gewichteter Mittelwert über eine stationäre Betriebsphase von 30 Minuten bei ähnlichen Bedingungen bestimmt und anhand der CO-Emissionen bei einer Luftüberschusszahl von $\lambda_{tot} = 1,8$ verglichen [7].

Einfluss der Sekundärlufteindüsung

Tabelle 4 fasst die Resultate zusammen. Der Grenzwert der Luftreinhalteverordnung von 250 mg/m³ (i.N.) bei 11 Vol.-% O₂ wird in allen Fällen, also be-

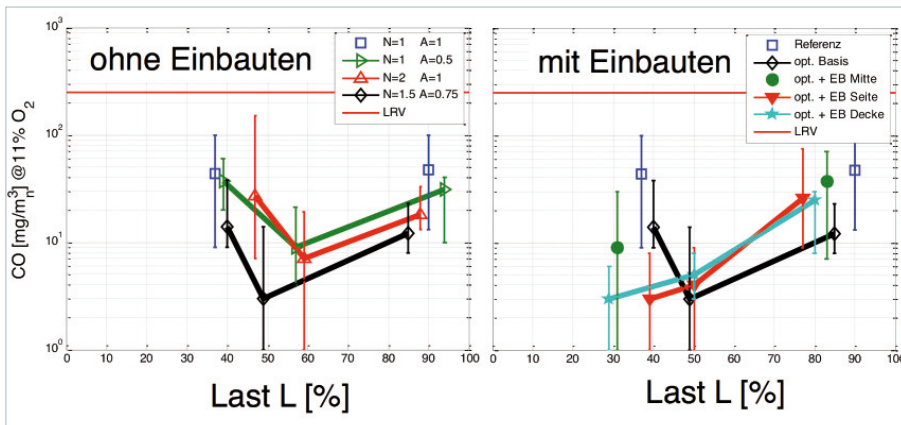


Bild 6

CO-Mittelwerte bei $\lambda_{tot} = 1,8$ in Abhängigkeit der Last L. Links: Vergleich der Sekundärluft-Varianten: Referenzfall (N=A=1), SL-3 (A=0,5), SL-8 (N=2) und SL-10 (N=1,5, A=0,75). Rechts: Vergleich der Varianten mit Einbauten. SL-10 dient als optimierte Basis, die zusätzlich mit den Einbauten Mitte, Seite und Decke ausgeführt ist.

reits für den Referenzfall, deutlich unterschritten. Die untersuchten Maßnahmen zeigen für Volllast- und Teillastbetrieb das gleiche Verhalten mit folgenden Trends [7], die die Resultate der CFD-Simulation bestätigen:

- Eine Halbierung der Gesamtquerschnittsfläche mit Erhöhung des Impulsverhältnisses bewirkt eine Reduktion der CO-Emissionen um rund 34 %. Gleichzeitig wird das Optimum des Luftüberschusses abgesenkt.
- Eine Verdopplung der Sekundärluftdüsen-Anzahl bei gleicher Gesamtquerschnittsfläche bewirkt eine Verbesserung um 62 % ohne Erhöhung des Druckverlusts.
- Werden beide Maßnahmen kombiniert, indem die Anzahl Sekundärluftdüsen um 50 % erhöht und die Eindüsenfläche um 25 % reduziert werden (Fall SL-10), sinken die CO-Emissionen um 74 %.

Bild 6 zeigt die erzielten CO-Mittelwerte bei einem Luftüberschuss von $\lambda_{tot} = 1,8$ in Funktion der Last. Die tiefsten Werte für die optimierten Varianten werden bei einer mittleren Leistung von rund 50 bis 60 % erreicht. Die Sekundärluft-Variante SL-10 erzielt die besten Resultate mit CO-Werten unter 15 mg/m³ (i.N.) im ganzen Lastbereich (linke Grafik). Dieser Fall wird als optimierte Basis bezeichnet und dient als Ausgangslage für die Untersuchung der Einbauten (rechte Grafik).

Einfluss von Strömungshindernissen

Ausgehend von der optimierten Sekundärlufteindüsung führen alle Strömungseinbauten bei Teillastbetrieb zu einer Verbesserung, bei Nennleistung dagegen zu einer Verschlechterung der Ausbrandqualität (Bild 6, rechte Grafik).

Schlussfolgerungen

- Der Referenzfall der untersuchten Vorschubrostfeuerung kann den CO-

Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung bei Nennleistung bereits sicher einhalten.

- In der Praxis wird bei Teillast oft ein Anstieg der Emissionen beobachtet. Dieser wird durch CFD-Berechnungen bei Annahme eines bedeckten Rostes nicht vorausgesagt. Messungen auf der Versuchsanlage bestätigen, dass bereits im Referenzfall ein Teillastbetrieb bis unter 40 % 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]. Es wird deshalb vermutet, dass die Teillast-Problematik in der Praxis oft eine Folge ungenügender Rostbedeckung ist.
- Ausgehend von einer guten Rostbedeckung kann der Teillastbetrieb durch fluiddynamische Maßnahmen noch weiter verbessert werden. Als erste Maßnahme dient eine Optimierung der Sekundärlufteindüsung, zusätzlich sind Einbauten möglich.

- Eine Verbesserung der Sekundärlufteindüsung kann entweder durch ein erhöhtes Impulsverhältnis zwischen Sekundärluft und Grundströmung (bei erhöhtem Druckverlust) oder durch gleichmäßigere Verteilung der Luftdüsen (bei unverändertem Druckverlust) erzielt werden. Eine Kombination beider Ansätze ergibt die beste Lösung.
- Die Optimierung der Sekundärluft ermöglicht deutliche Verbesserungen bei Volllast und bei Teillast ohne wesentliche Erhöhung des Druckverlusts. Die Reduktion der CO-Emissionen beträgt von einem bereits tiefen Wert ausgehend rund einen Faktor 4. Damit kann ein stabiler Betrieb ab 30 % bis zu 100 % der Nennleistung erreicht werden. Bei einem Luftüberschuss von $\lambda_{tot} = 1,8$ werden über den gesamten Leistungsbereich CO-Emissionen unter 15 mg/m³ (i.N.) bei 11 Vol.-% O₂ erreicht. Gleichzeitig wird der optimale Luftüberschuss

um einen Wert von jeweils rund 0,2 abgesenkt, also zum Beispiel von 1,7 auf 1,5. Dies ermöglicht einen höheren Wirkungsgrad sowie ein stabileres Verhalten bei Teillast und bei hohem Wassergehalt.

- Die Einbauten allein haben keinen relevanten Effekt auf die Ausbrandqualität. Als zusätzliche Maßnahme nach optimierter Sekundärlufteindüsung wird damit der Teillastbetrieb weiter verbessert, bei Nennleistung ist der Effekt dagegen negativ.

- Der Einsatz von CFD ist ein geeignetes Instrument zur Strömungsoptimierung, das durch Modellversuche mit PIV ergänzt und validiert werden kann. Daneben hat die Gasfreisetzung auf dem Rost einen wesentlichen Einfluss auf die Verbrennung, weshalb die Feststoffumwandlung auf dem Rost ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Literatur

- [1] Nussbaumer, T.: *Combustion and Co-combustion of Biomass. Energy & Fuels* 17 (2003), no. 6, pp. 1510–1521.
- [2] Van Loo, S., Koppejan, J.: *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. Earthscan, London, 2008.*
- [3] Good, J.; Nussbaumer, T.: *Überwachung und Vollzug der LRV für Holzheizungen ab 500 kW. 10. Holzenergie-Symposium, 12.9.2008, ETH Zürich, S. 219–256.*
- [4] Kiener, M.; Nussbaumer, T.: *Influence of uneven fuel distribution on a grate on gas flow conditions and combustion quality. 20th European Biomass Conference, 18.–22.6.2012, Milano, 2BO.10.2.*
- [5] Klasen, T.; Görner K.: *Numerical Calculation and Optimisation of a large Municipal Solid Waste Incinerator Plant. 2nd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, University of Sheffield, UK, 4.–6.7.1999.*
- [6] Baillifard, M.; Nussbaumer, T.: *Strömungsoptimierung von Feuerräumen mittels Experiment und Computational Fluid Dynamics (CFD). 10. Holzenergie-Symposium, 12.9.2008, ETH Zürich, S. 93–114.*
- [7] Kiener, M.; Nussbaumer, T.: *Strömungsoptimierung einer Vorschubrostfeuerung mit CFD und PIV. 12. Holzenergie-Symposium, 14.9.2012, ETH Zürich, S. 53–70.*