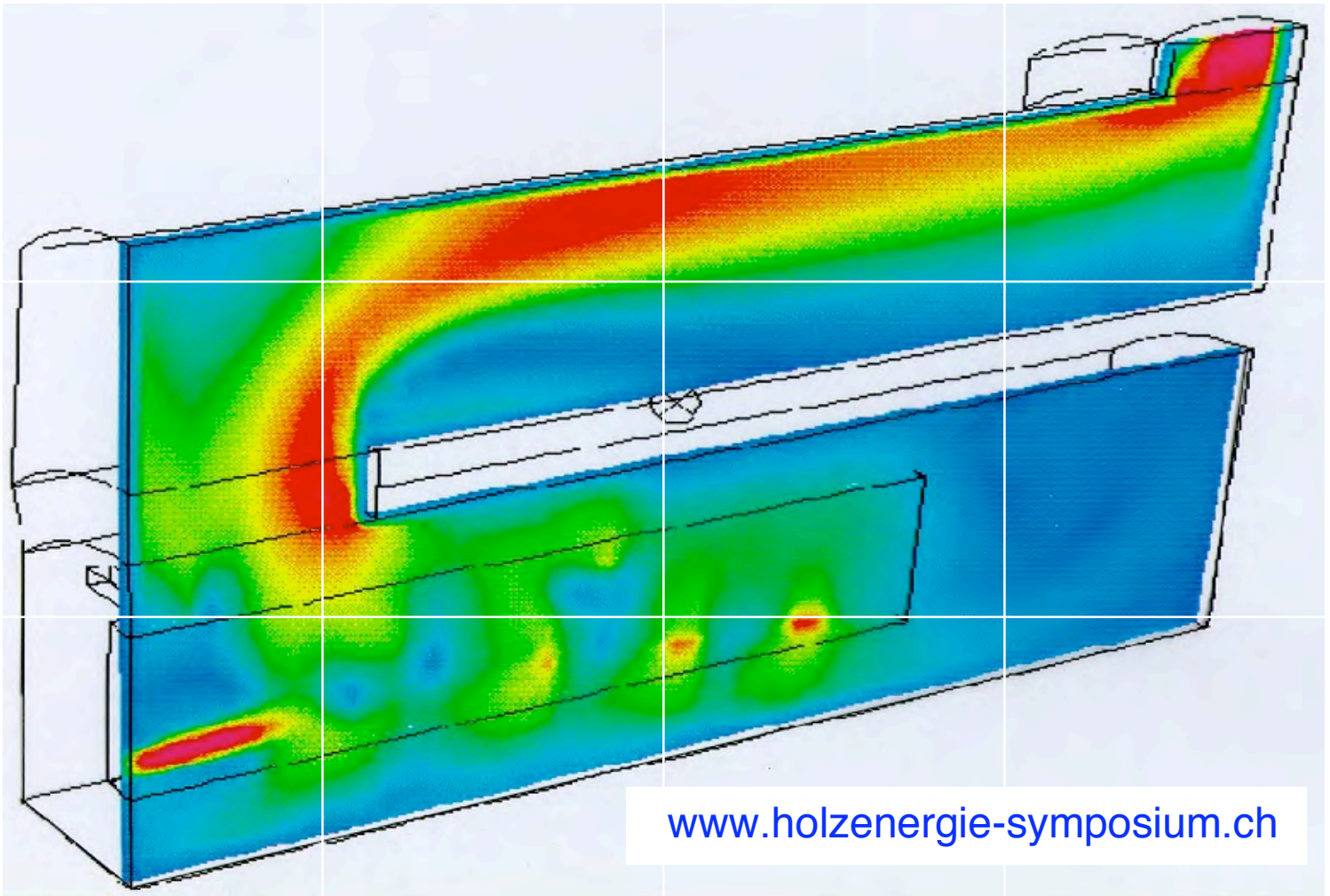


Thomas Nussbaumer (Hrsg.)

10. Holzenergie-Symposium

Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung

12. September 2008, ETH Zürich

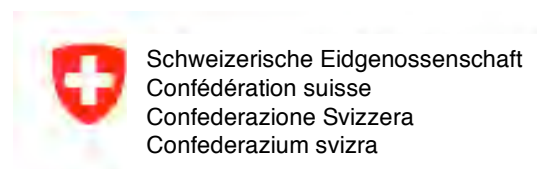


www.holzenergie-symposium.ch



**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur



Bundesamt für Energie

Thomas Nussbaumer (Hrsg.):

Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung. Tagungsband zum 10. Holzenergie-Symposium, 12. September 2008 an der ETH Zürich, Verenum Zürich 2008

ISBN 3-908705-19-3

Bezugsquellen:

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

Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – 8006 Zürich, www.verenum.ch

Weitere Informationen: www.holzenergie-symposium.ch

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
1 M. Kaufmann: Förderung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien durch den Bund: Aktionspläne, KEV und Klimarappen	7
2 Th. Schmid: Holzenergie-Förderung durch die Stiftung Klimarappen: Möglichkeiten und Beitrag der Holzenergie	17
3 E. Jochem, F. Reitze, L. Riffeser: Nachhaltige Energiesysteme durch Effizienz und erneuerbare Energien	31
4 P. Schmid: Holzkraftwerk Basel: Technik, Wirtschaftlichkeit und Holzversorgung	43
5 M. Schaub, H. Gemperle: 1,2 MWe Holzheizkraftwerk Stans mit Festbettvergasung	53
6 M. Schmid: Holzbefeuertes Blockheizkraftwerk mit Heissluftturbine: Demonstrationsanlage in Rümlang mit 450 kWt und 100 kWe	65
7 G. Friedl, W. Moser, S. Griesmayr: Pelletfeuerungen mit thermoelektrischer Stromerzeugung	77
8 M. Baillifard, Th. Nussbaumer: Strömungsoptimierung von Feuerräumen mittels Experiment und Computational Fluid Dynamics (CFD)	93
9 R. Rapp: Eigenschaften und Gesundheitswirkungen von Feinstaub	115
10 Th. Nussbaumer: Feinstaub-Emissionsfaktoren von Holzheizungen: Übersicht aus Ländern der Internationalen Energie Agentur	129
11 V. Schmatloch: Integrierte und nachgeschaltete Elektroabscheider für Holzöfen	157
12 T. Brzović: Oekotube: Elektroabscheider als Kaminaufsatz für kleine Holzheizungen	171
13 Th. Bleul: Elektroabscheider für Biomasse-Heisanlagen von 0 kW bis 150 kW	181
14 R. Bolliger: Elektroabscheider „Spider“ für Holzfeuerungen bis 70 kW	185
15 M. Scheibler, P. Oberforcher: Metallgewebefilter für automatische Anlagen von 100 kW bis 540 kW	191
16 M. Baumgartner: Abgaskondensation zur Wirkungsgraderhöhung und Feinstaubabscheidung ab 100 kW und Kombination mit Nasselektroabscheidung ab 1 MW	205
17 J. Good, Th. Nussbaumer: Überwachung und Vollzug der LRV für Holzheizungen ab 500 kW mit Feinstaubabscheidern im Kanton Zürich	219
Autorenverzeichnis	257

Strömungsoptimierung von Feuerräumen mittels Experiment und Computational Fluid Dynamics (CFD)

Marc-André Baillifard und Thomas Nussbaumer
Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw

Zusammenfassung

Holzfeuerungen werden wegen des mehrstufigen und komplexen Verbrennungsverhaltens der Feststoffumwandlung bei vergleichsweise hohem Luftüberschuss betrieben. Im Weiteren ist der Lastbereich, in dem ein Betrieb ohne Emissionsanstieg möglich ist, begrenzt. Durch Optimierung der Strömungsführung besteht somit noch ein erhebliches Potenzial zur Wirkungsgradverbesserung und zur Erhöhung der Robustheit des Betriebsverhaltens. Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Aufbau eines Arbeitsinstruments zur Strömungsoptimierung von Holzfeuerungen, mit dem konstruktive und regeltechnische Massnahmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen und zur Verbesserung des Teillastverhaltens ausgeführt werden können. Die Optimierung basiert auf zwei sich ergänzenden Methoden, nämlich numerischen Strömungsberechnungen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) und Modellexperimenten. Während mittels CFD Parametervariationen verschiedener Einflussfaktoren untersucht werden, dienen die Modellexperimente zur Validierung und Sicherstellung, dass insbesondere kritische Strömungsphänomene wie Wirbel und Turbulenz erkannt und korrekt modelliert werden. Im Beitrag wird anhand von zwei Beispielen das Vorgehen beschrieben. Am Modell einer Rostfeuerung werden Strömungsuntersuchungen gezeigt, welche die Identifikation von Wirbeln in der Brennkammer erlaubte, die mittels Experiment validiert werden. Im Weiteren wird am Beispiel des Brennraums eines Stückholzkessel aufgezeigt, wie die Strömungsführung durch Bestimmung des Verweilzeitspektrums mittels CFD-Berechnungen verbessert werden kann.

1 Einleitung

Biomasse hat noch ein grosses Potenzial zur Substitution fossiler Brennstoffe und wird in den kommenden Jahrzehnten noch vermehrt genutzt werden. Die wichtigste Anwendung der energetischen Biomassenutzung ist die Verbrennung in Anlagen von wenigen kW bis zu über 100 MW [1]. Ziel der Verbrennung ist eine hohe Energieausnutzung bei geringen Schadstoffemissionen. Obwohl die Anlagentechnik in den vergangenen Jahren stetig verbessert wurde, weisen Biomassefeuerungen geringere Wirkungsgrade und höhere Schadstoffemissionen auf als Öl- und Gasfeuerungen. So werden bereits bei Volllast vergleichsweise hohe Luftüberschusszahlen (meist $> 1,5$) benötigt, um einen vollständigen Ausbrand sicher zu stellen. Bei der in der Praxis wichtigen Teillast wird oft eine zusätzliche Erhöhung des Luftüberschusses (oft > 2) in Kauf genommen, um die Vermischung zwischen brennbaren Gasen und Verbrennungsluft weiterhin aufrecht zu erhalten. Es besteht somit noch ein erhebliches Potenzial zur Wirkungsgradverbesserung, das mit zunehmender Ressourcenknappheit wichtiger wird. Im Weiteren besteht für viele Anwendungen ein Bedarf, den oft stark eingeschränkten Teillastbereich zu vergrössern, was die Möglichkeiten für den Praxiseinsatz verbessert. Nebst dem Wirkungsgrad ist dabei vordringlich, dass eine hohe Ausbrandqualität erhalten bleibt und die Emissionen an gasförmigen organischen Verbindungen sowie kohlenstoffhaltigem Feinstaub auf ein Minimum reduziert werden.

Weitere Verbesserungen setzen voraus, dass die Einflüsse der Verbrennungsparameter sowie die komplexen physikalischen und chemischen Prozesse der Biomasseverbrennung bekannt sind und als Basis zur Auslegung von Feuerungsanlagen modelliert werden können. Grundlage dazu bildet die Beschreibung der Biomasseverbrennung als zweistufiger Prozess: In einem ersten Schritt wird die feste Biomasse in Gase umgewandelt, die in anschliessenden Gasphasenreaktionen weiter reagieren [2]. Entsprechend kann die Optimierung der Holzverbrennung in zwei Teilgebiete unterteilt werden, nämlich die Optimierung der heterogenen Feststoffumwandlung zu Gasen und die Optimierung der homogenen Gasphasenverbrennung. Die Umwandlung zu Gasen ist zwar ein wichtiger Teilschritt, dessen Modellierung jedoch aufwändig und komplex [3]. Wenn die Feststoffumwandlung unter normalen Bedingungen beherrscht wird, bietet auch die isolierte Optimierung der nachfolgenden Bedingungen zur Gasphasenoxidation ein erhebliches Verbesserungspotenzial in Bezug auf Wirkungsgrad und Schadstoffemissionen, auch wenn dabei zum Beispiel der Ascheausbrand auf dem Rost nicht erfasst ist. Die vorliegende Arbeit befasst sich schwerpunktmässig mit den Möglichkeiten der strömungstechnischen Optimierung von Biomassefeuerungen zur Verbesserung der Gasphasenreaktionen und verfolgt folgende Ziele:

- Optimierung der Ausbrandqualität an brennbaren Gasen und Feststoffen
- Verbrennung bei tiefem Luftüberschuss als Basis für einen hohen Wirkungsgrad
- Erhöhung der Robustheit der Feuerung in Bezug auf Abweichungen vom Normbetrieb, also insbesondere Aufrechterhalten hoher Ausbrandqualität bei Teillast und verändertem Wassergehalt des Brennstoffs.

Wie in [4] gezeigt, laufen die Verbrennungsreaktionen bei Temperaturen über rund 850°C sehr schnell ab, so dass die Verbrennungsqualität nicht mehr von der Kinetik, sondern in erster Linie durch den Stofftransport limitiert ist. Entscheidend ist dabei die Mischung zwischen brennbaren Gasen und Verbrennungsluft in der Mischzone und in der Brennkammer. Da die Mischung hauptsächlich von der Strömung in der Brennkammer beeinflusst wird, kann die Verbrennung bei gegebenen Randbedingungen (also zum Beispiel bei gegebenem Luftüberschuss) durch die Strömungsführung beeinflusst werden. Die Optimierung der Brennkammergeometrie und der Strömungsführung kann durch Experimente oder durch Strömungsberechnungen erfolgen.

Experimente können entweder auf realen Anlage durchgeführt werden, oder es können Modelle eingesetzt werden, wie dies zum Beispiel für Anwendungen in der Aerodynamik (Windkanal) und in der Hydrodynamik (Wasserkanal) üblich ist. Experimente auf realen Anlagen sind oft sehr komplex und aufwändig und das Austesten verschiedener Geometrien in realen meist praktisch unmöglich. Messungen an Modellen sind flexibler und kostengünstiger. Sie müssen allerdings sehr sorgfältig aufgebaut werden, damit die Ergebnisse am Modell mit der Realität vergleichbar sind.

Daneben wurden in den letzten Jahrzehnten dank steigender Computerleistungen die rechnerischen Möglichkeiten drastisch erhöht. Computational Fluid Dynamics (CFD) ist heute in vielen Anwendungsbereichen etabliert und wird zur Untersuchung von Strömungen eingesetzt. Nebst der physikalischen Beschreibung der Strömung können in CFD Programmen auch chemische Reaktionen modelliert werden, um beispielsweise Gasphasenreaktionen der Holzverbrennung zu simulieren (zum Beispiel [5]). Allerdings ist empfehlenswert, die Strömungsberechnungen punktuell durch Experimente zu validieren, da wichtige Strömungsphänomene wie Wirbel oder der Umschlag zur Turbulenz rechnerisch nur bedingt vorhergesagt werden können, die Ergebnisse jedoch drastisch verändern können. Experimente und Rechnungen sollen deshalb in der vorliegenden Arbeit als komplementäre Methoden zur Strömungsoptimierung eingesetzt werden.

2 Systembeschreibung für Strömungsberechnungen

Die Beschreibung einer Anlage setzt die Kenntnis wichtiger Kenngrößen voraus. Von diesen Kenngrößen können die restlichen notwendigen Parameter hergeleitet werden. Diese Parameter sind sowohl für die CFD-Berechnungen als auch für den Aufbau von Modellversuchen erforderlich. In diesem Absatz wird beschrieben, welche Kenngrößen benutzt werden und wie daraus die notwendigen Parameter bestimmt werden können. Bild 1 zeigt schematisch die Funktionsweise einer Holzfeuerung. Die Holzverbrennung ist dabei als zweistufiger Prozess mit Primärluft zur Holzvergasung und Sekundärluft für den Gasphasenausbrand angenommen. Eintrittsgrößen sind Holz und Luft. Tabelle 1 zeigt die Kenngrößen, die im Folgenden für die Strömungsbeschreibung als bekannt vorausgesetzt oder als Parameter angenommen werden.

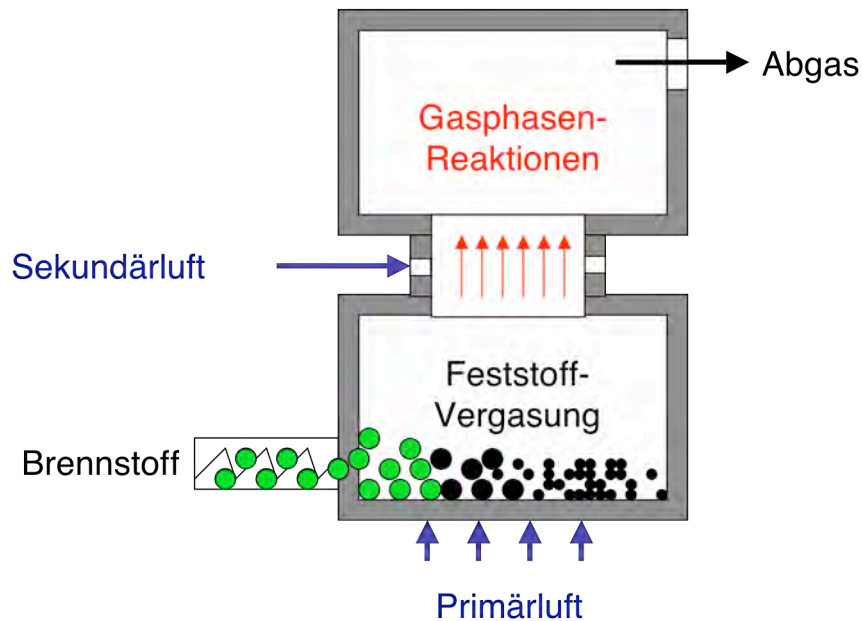


Bild 1 Schematische Beschreibung einer Holzfeuerung

Tabelle 1 Anlagenkenngrößen zur Strömungsbeschreibung.

Parameter		Einheit
Feuerungswärmeleistung	\dot{Q}	(kW)
Verbrennungswirkungsgrad	η	(-)
Primärluftzahl	λ_{prim}	(-)
Sekundärluftzahl	λ_{sec}	(-)
Vergasungsrate	f	(-)
Wassergehalt	w	(-)
Temperatur Primärluft	T_{prim}	(°C)
Temperatur Sekundärluft	T_{sec}	(°C)

Erläuterungen: Für einen gegebenen Brennstoff ist der Wassergehalt w gegeben. Der Massenstrom an Holz bestimmt dann die Leistung \dot{Q} . Die Luftmenge ist abhängig vom Luftüberschuss λ , aus dem sich mit der Abgastemperatur der Verbrennungswirkungsgrad η ableitet. Um den Verbrennungsprozess zu beschreiben, müssen zudem die Bedingungen im Feuerraum beschrieben werden. Wichtig ist die Aufteilung der Luft in Primärluft mit λ_{prim} und Sekundärluft mit λ_{sec} . Da im Brennstoffbett keine ideale Vergasung abläuft, wird zudem vereinfachend der Vergasungsfaktor f angenommen, wobei $f=1$ eine vollständige Vergasung beschreibt und $f=0$ den Fall, dass keine Feststoffumwandlung stattfindet. Um die Volumenströme und Geschwindigkeiten zu bestimmen, werden zudem die Temperaturen der Primärluft T_{prim} und der Sekundärluft T_{sec} benötigt.

Zur Durchführung der Strömungsberechnungen müssen die Volumenströme und die Zusammensetzung der Verbrennungsgase bekannt sein. Die Luftvolumina können aufgrund der Reaktionsgleichung der Holzverbrennung bestimmt werden, wie zum Beispiel in [6] beschrieben. Für die Zusammensetzung des aus der Primärzone austretenden Gases werden zudem folgende Annahmen getroffen:

- Das Vergasungsgas besteht aus H_2 , H_2O , O_2 , CH_4 , CO und CO_2 , wobei für die Zusammensetzung das chemische Gleichgewicht nach [7] angenommen ist.
- Im Weiteren wird angenommen, dass der Anteil f (wobei $0 < f < 1$) der Primärluft eine vollständige Vergasung bis zum Gleichgewichtszustand verursacht, während der Anteil $(1 - f)$ der Primärluft nicht am Vergasungsprozess teilnimmt und direkt in die Brennkammer gelangt. $f = 1$ bedeutet, dass die gesamte Primärluft an der Vergasung teilnimmt, während für $f = 0$ die gesamte Primärluft direkt in die Brennkammer gelangt.

Bild 2 zeigt die berechnete Gaszusammensetzung für den Fall von $f = 0,8$ und $w = 30\%$. Mit Kenntnis der Gaszusammensetzung können der Heizwert der Vergasungsgase sowie die adiabate Gastemperatur bestimmt werden. Mit diesen Informationen können der Gas- und der Sekundärluft-Strom vollständig charakterisiert werden (Zusammensetzung, Volumenstrom, Temperatur usw.). Diese dienen als Basis für den Aufbau von Experimenten sowie für die CFD Berechnungen.

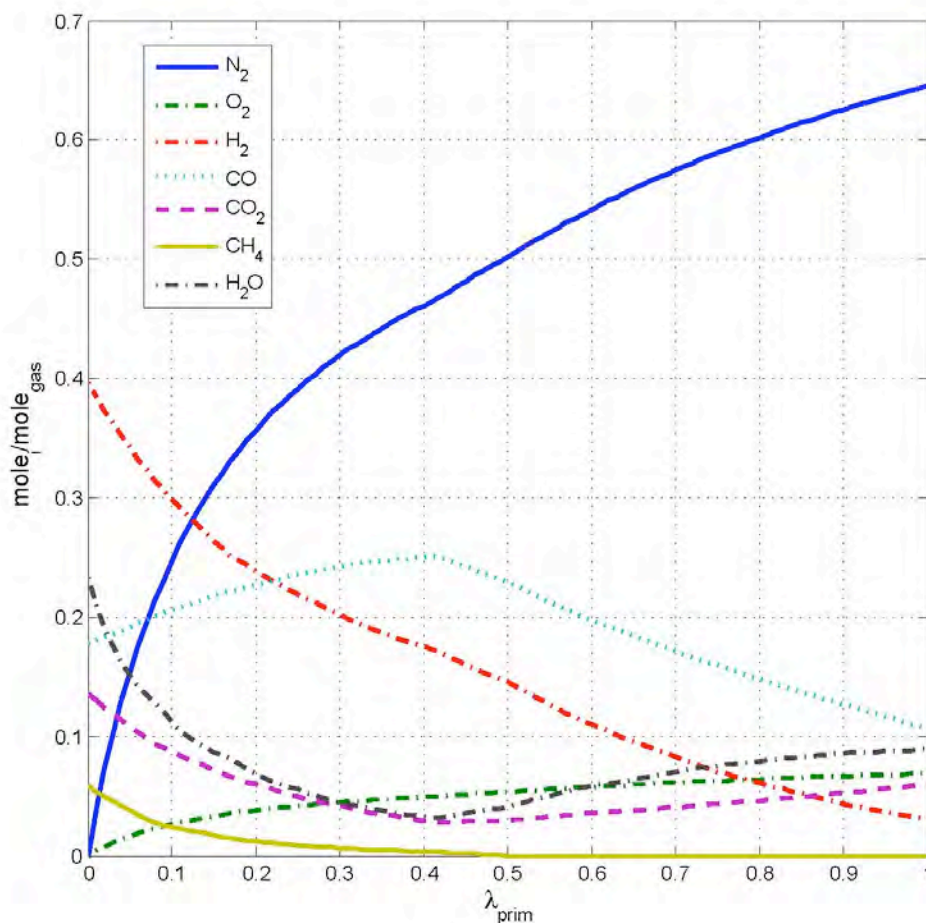


Bild 2 Berechnete Zusammensetzung des Gasgemisches aus der Vergasungszone für $f = 0.8$ und $w = 0.3$ basierend auf Gleichgewichtszusammensetzung nach [7].

3 Strömungsberechnungen

3.1 Strömungsvisualisierung

Nachfolgend werden vorerst reine Strömungsberechnungen mittels CFD vorgestellt. Diese erlauben eine anschauliche Visualisierung der Strömungsverhältnisse. Im Weiteren können daraus Informationen über die Mischungseffizienz verschiedener Geometrien sowie das Verweilzeitverhalten bestimmt werden. Unter der Annahme einer unendlich schnellen Reaktionskinetik für die Gasphasenoxidation (also „mixed = burnt“) beschreibt die Mischungseffizienz die maximal erzielbare Ausbrandqualität.

Bild 3 zeigt eine beispielhafte Visualisierung der Strömung über dem Rost einer Rostfeuerung sowie im anschliessenden Brennkammerzug nach Eindüsung der Sekundärluft. Im Bild sind das Geschwindigkeitsfeld und die Vektoren dargestellt, je nach Zielsetzung können andere Informationen wie Stromlinien oder Temperaturverteilung dargestellt werden.

Im Beispiel ist deutlich erkennbar, dass sich in der Nachbrennkammer Wirbel (im Wesentlichen zwei symmetrische Hauptwirbel) ausbilden. Diese Wirbel können nicht ohne Weiteres vorhergesagt werden und sie sind in einer zweidimensionalen Darstellung nicht erkennbar. Die Existenz der Wirbel verändert aber das Verweilzeitverhalten und die Ausbrandqualität der Feuerung dramatisch und zwar im vorliegenden Fall in positiver Weise. Allerdings ist die Ausbildung dieser Wirbel nur bei spezifischen Randbedingungen in Bezug auf Strömungsgeschwindigkeit und Geometrie zu erwarten. CFD-Berechnungen können also beispielsweise dazu genutzt werden, die Geometrie so zu optimieren, dass die Wirbelbildung auch bei Teillastbetrieb sicher erhalten bleibt, wodurch der zulässige Teillastbereich potenziell vergrößert und verbessert werden könnte.

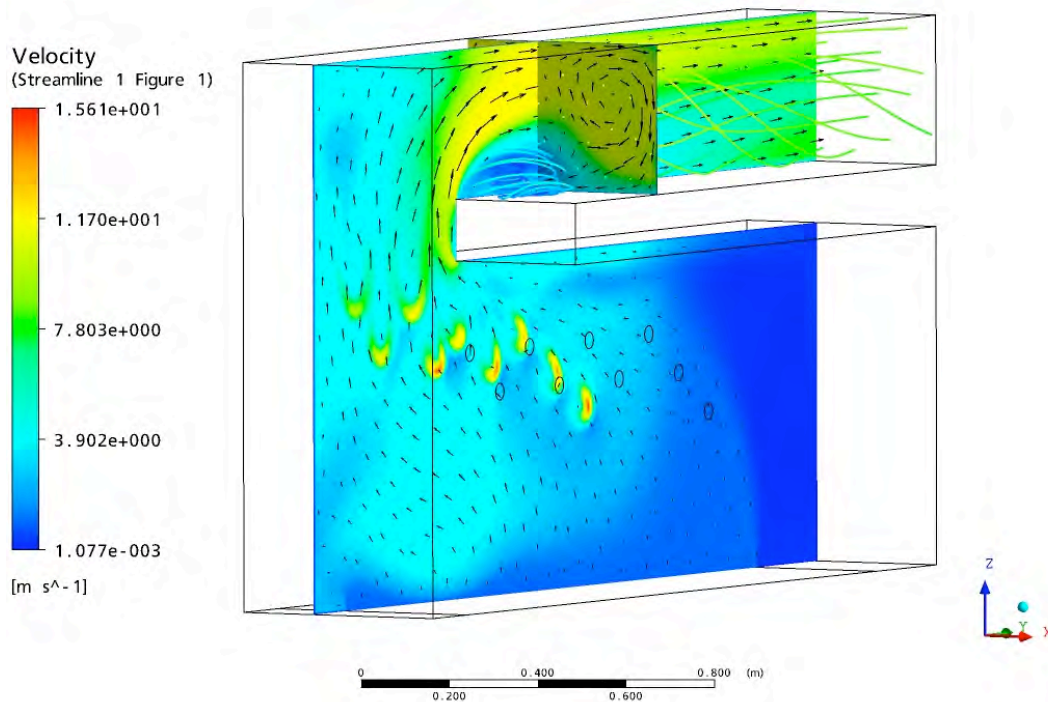


Bild 3 Strömungsvisualisierung mittels Geschwindigkeitsfeld und -vektoren am Beispiel der Brennkammer einer Vorschubrostfeuerung mit Sekundärlufteindüsung und darüber angeordneter Nachbrennkammer.

3.2 Verweilzeitspektrum

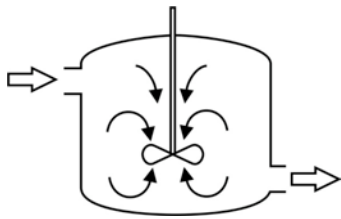
Der Ablauf chemischer Reaktionen in einer Gas- oder Flüssigkeitsströmung wird durch die mittlere Verweilzeit sowie durch das Verweilzeitspektrum beeinflusst. Die Gestaltung des Feuerraums bestimmt dabei das grundsätzliche Verhalten des Verweilzeitspektrums. Bild 4 zeigt die Verweilzeitspektren der idealen Reaktortypen (Idealer Rohrreaktor IDR und Pfropfenströmungsreaktor PSD) und eines realen Reaktors.

Reale Reaktoren, die ohne Strähnenbildung durchströmt werden und keine Rezirkulation aufweisen, weisen ein Verweilzeitspektrum auf, das mit einer asymmetrischen Gauss-Verteilung vergleichbar ist. Ziel der Brennkammerauslegung ist, dass eine minimale Verweilzeit von zum Beispiel 0,2 oder 0,5 Sekunden (bei zum Beispiel 850°C) nicht unterschritten wird. Damit das Brennkammervolumen minimal wird, ist zudem ein möglichst enges Verweilzeitspektrum anzustreben.

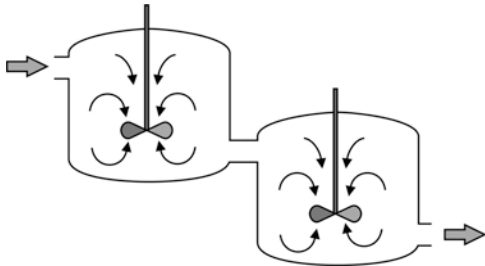
Ein bimodales Verweilzeitspektrum tritt dann auf, wenn der Hauptstrom durch den Reaktor auf zwei Teilströme aufgeteilt wird. Ein solches Verhalten ist unerwünscht, da der Teilstrom mit kurzer Verweilzeit die Ausbrandqualität limitieren kann. Ein bimodales Verhalten ist somit ein klarer Hinweis auf eine nicht-ideale Durchströmung des Reaktors und es kann durch Strömungsoptimierung verhindert werden, wie nachfolgend am Beispiel einer realen Brennraumgeometrie beschrieben wird.

Ein multimodales Verweilzeitspektrum ergibt sich aber auch durch Rezirkulation eines Teilstroms. Dies wird als technische Massnahme bewusst ausgeführt, da damit die Stöchiometrie und Temperatur im Reaktor verändert, d.h. der Sauerstoffgehalt und die Temperatur in der Flamme abgesenkt, wird.

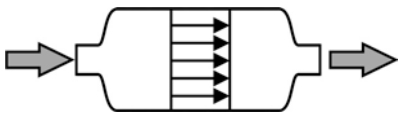
Reaktortyp



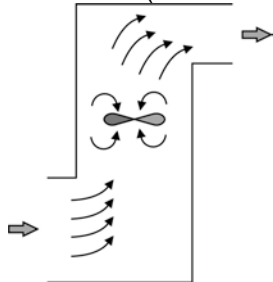
- a) Idealer Rohrreaktor IDR
(Perfectly Stirred Reactor PSR)



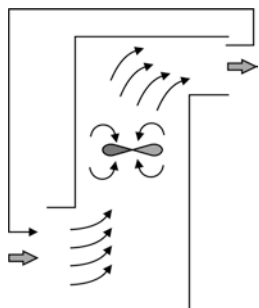
- b) Serieschaltung von 2 IDR



- c) Pfropfenströmungsreaktor PSR
(Plug Flow Reactor PFR) = Serie von
unendlich vielen IDR (Rührkesselkaskade)



- d) Realer Reaktor, näherungsweise IDR für
Mischzone und PSR für Nachbrennkammer



- e) Realer Reaktor mit Rezirkulation

Verweilzeitspektrum $E(t)$

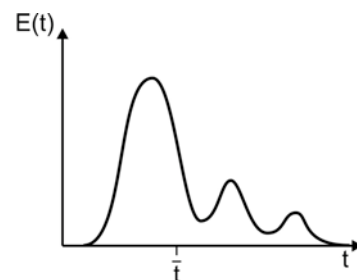
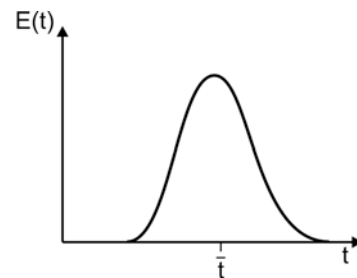
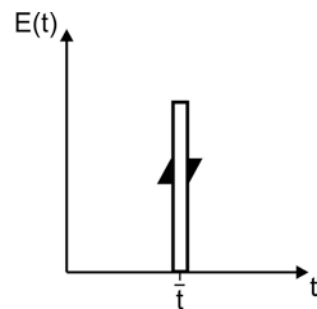
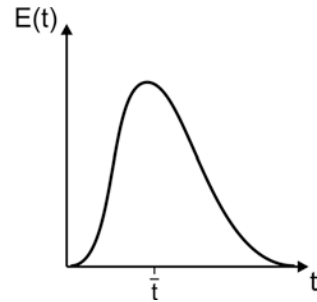
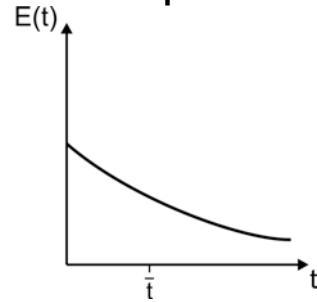


Bild 4 Verweilzeitspektren der wichtigsten Reaktortypen.

3.3 Mischungseffizienz

Durch virtuelle Zugabe von Partikeln in den Gas- oder Luftstrom der CFD-Berechnungen kann die Durchmischungsqualität einer Brennkammer untersucht und visualisiert werden. Dies ermöglicht die Identifikation von Brennkammerregionen, die ungenügend durchgeströmt werden und erlaubt einen quantitativen Vergleich verschiedener Geometrien.

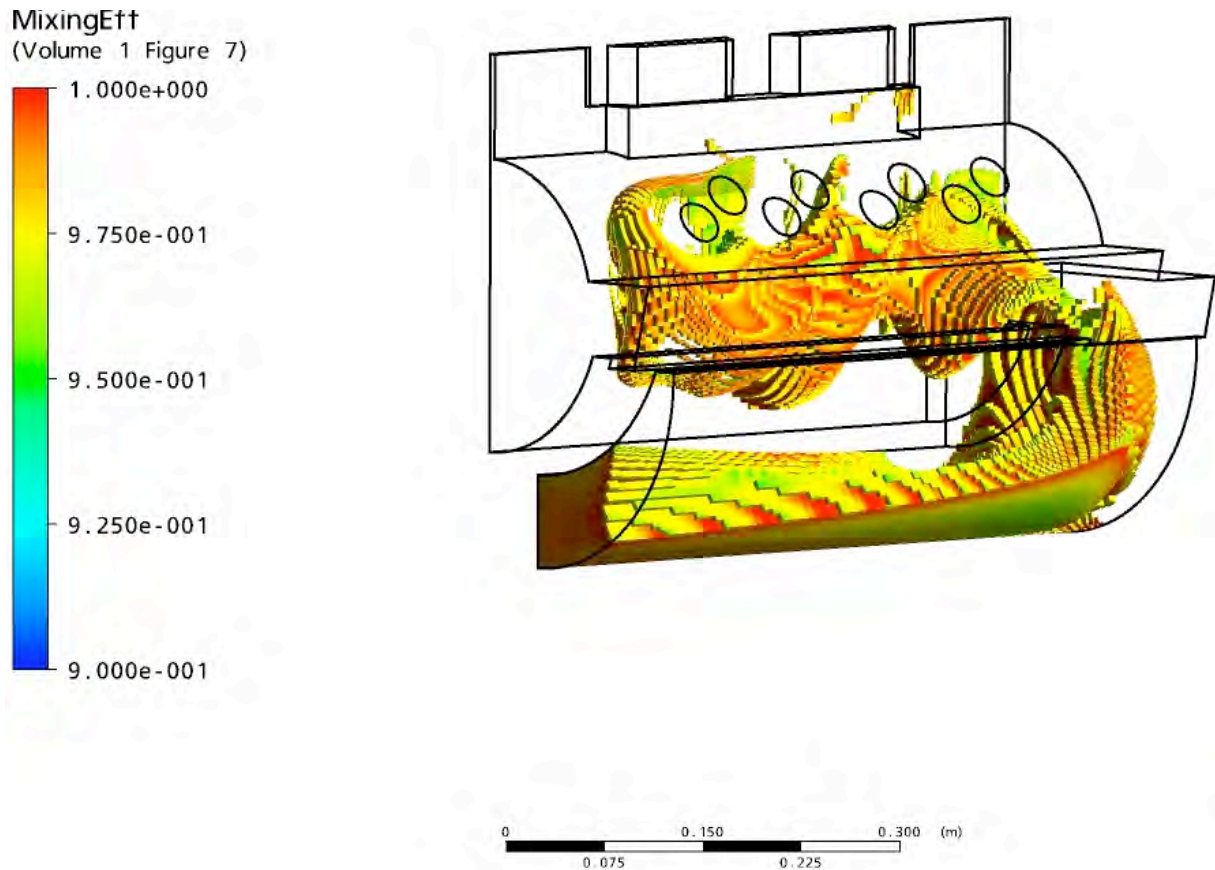
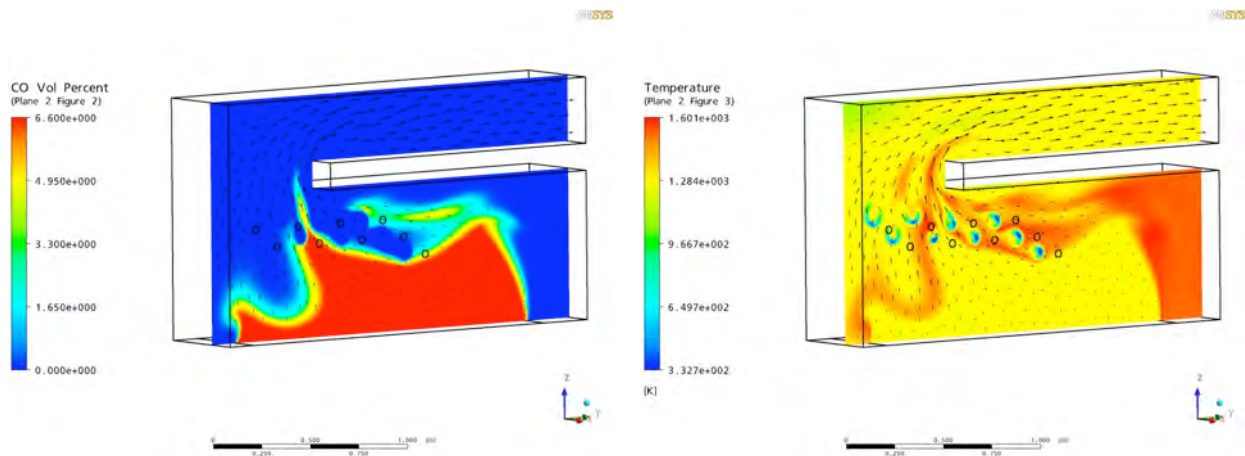


Bild 5 Berechnete Mischungseffizienz. Dargestellt sind die Orte mit einer Mischungseffizienz von mehr als 95%.

3.4 CFD mit chemischen Reaktionen

Die Strömung wird durch die Temperatur- und Konzentrationsänderungen durch die chemischen Reaktionen beeinflusst, weshalb für exakte Berechnungen der Strömung der Ablauf der chemischen Reaktionen erfasst werden muss. Gleichzeitig erlaubt dies die Bestimmung der Gaszusammensetzung an jeder Stelle im Feuerraum sowie am Austritt der Feuerung. Zur Einbindung der chemischen Reaktionen existieren verschiedene Modelle, darunter das Eddy Dissipation Model (EDM), das Eddy Dissipation Concept (EDC), das Flamelet-Modell und zahlreiche weitere. Alle Modelle haben spezifische Vor- und Nachteile und eingeschränkte Gültigkeitsbereiche sowie unterschiedlichen Rechenbedarf. Nachfolgend werden exemplarisch einige Ergebnisse vorgestellt, die mit dem EDM berechnet wurden. Bild 6 zeigt ein Beispiel von den Grössen die Berechnet werden können.



a) CO-Verteilung

b) Temperatur-Verteilung

Bild 6 Berechnungsbeispiel zur Bestimmung der CO-Konzentration und der Temperatur im Feuer-raum einer Vorschubrostfeuerung unter Verwendung des k-epsilon Turbulenzmodells und des EDM Verbrennungsmodells.

4 Experimente

4.1 Methode

Damit Modellergebnisse auf die reale Situation übertragen werden können, müssen Modell und Realität drei Ähnlichkeitsanforderungen erfüllen, nämlich geometrische, kinematische, und dynamische Ähnlichkeit aufweisen.

Die geometrische Ähnlichkeit ist relativ einfach zu erfüllen, während die kinematische und dynamische Ähnlichkeit nicht ohne Weiteres eingehalten werden können. Aus der Dimensionsanalyse ist jedoch bekannt, dass dynamische und kinematische Ähnlichkeit erfüllt ist, wenn die entsprechenden dimensionslosen Kennzahlen für Modell und Realität identisch sind. Wesentlich ist deswegen die Wahl der wichtigsten dimensionslosen Zahlen. Dazu gibt es verschiedene Vorgehensweisen, die in der Literatur beschrieben sind [8]. An dieser Stelle werden nur kurz die ausgewählten dimensionslosen Zahlen vorgestellt.

4.1.1 Reynolds

Der Reynolds-Zahl ist definiert als:

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

Wobei u und L jeweils eine charakteristische Geschwindigkeit und Länge der Strömung sind und ν die kinematische Viskosität der Flüssigkeit bezeichnet. Die Reynolds-Zahl ist ein Mass für die Turbulenz einer Strömung. In einem Rohr ist der Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung als Richtwert bei $\text{Re} = 2300$. Die Reynolds-Ähnlichkeit ist wichtig, weil die Turbulenz die Strömungsverhältnisse und die Mischungseffizienz beeinflusst. Mischung kann beschrieben werden als Prozess, durch welchen die Segregation von zwei Fluiden reduziert wird. Dabei gibt es zwei Arten von Segregation, nämlich die Skala- und die Intensitäts-Segregation. Die Skala-Segregation kann reduziert werden, indem die grossen Skalen in kleinere aufgebrochen werden. Im Gegensatz dazu wird die Intensitäts-Segregation durch Diffusion reduziert. Bild 7 zeigt die Visualisierung dieser zwei Mechanismen.

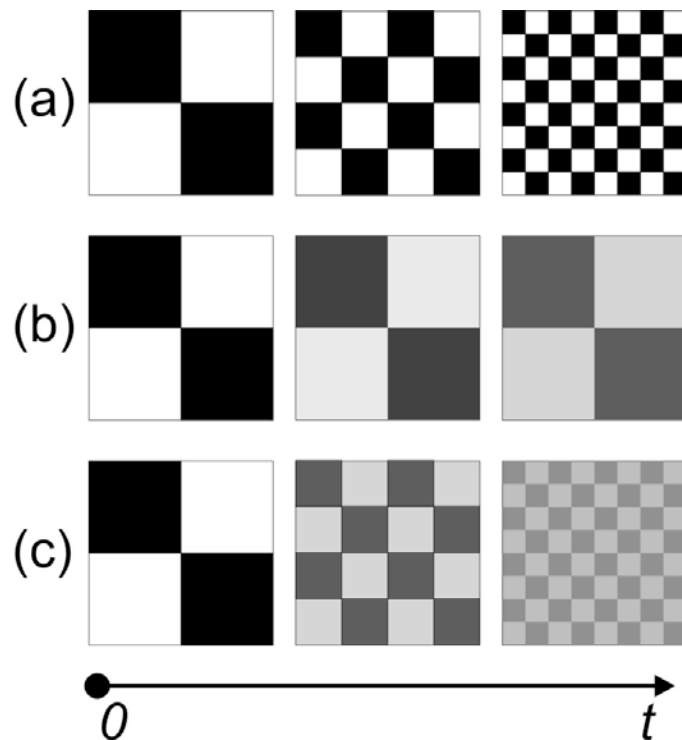


Bild 7 Beschreibung der zwei Prozesse zur Segregationsabnahme durch Skala- und Intensitäts-Segregation.

Im Fall (a) wird nur die Skala-Segregation berücksichtigt. In diesem Fall werden die zwei Fluide nicht gemischt.

Im Fall (b) wird nur die Intensitäts-Segregation betrachtet. Da werden die zwei Fluide gemischt, aber der Mischungsprozess ist sehr langsam.

Im Fall (c) sind beide Segregationsprozesse berücksichtigt. Die Skala-Segregationsabnahme macht die Intensitäts-Segregationsabnahme viel effizienter. Dadurch ist die Mischung deutlich schneller als im Fall (b).

Da die Skala-Segregation durch Turbulenz vereinfacht wird, ist die Ähnlichkeit der Reynolds-Zahl wichtig zur Untersuchung von Mischungsprozessen.

4.1.2 Damköhler-Zahl

Der Damköhler-Zahl ist definiert als:

$$Da = \frac{\tau_t}{\tau_c}, \quad (2)$$

wobei τ_t eine für die Strömung repräsentative Zeitskala und τ_c die chemische Zeitskala ist. Im vorliegenden Fall sind die mittlere Verweilzeit als Zeitskala der Strömung und die Zeit für die CO-Oxidation als chemische Zeitskala ausschlaggebend. Die Bestimmung dieser Zeitskalen ist in [9] beschrieben und zeigt, dass eine grosse Damköhler-Zahl resultiert. Dies bedeutet, dass die chemischen Reaktionen viel schneller als die Strömungseffekte sind und die Verbrennungsqualität also hauptsächlich durch die Mischungsqualität bestimmt wird, was vereinfacht durch den Ansatz „mixed = brennt“ beschrieben werden kann. Für kleine Damköhler-Zahlen wäre dieser Ansatz nicht mehr gültig.

4.1.3 Schmidt-Zahl

Die Schmidt-Zahl ist definiert als:

$$Sc = \frac{v}{D}, \quad (3)$$

Wobei D die für die Strömung repräsentative Diffusionskonstante beschreibt. Hier wurde die Diffusionskonstante von CO in einer Gasmischung betrachtet, wie in [9] ausgeführt. Wie im Absatz 4.1.1 erläutert, erfolgt die Mischung auf molekularer Ebene durch Diffusion, weshalb die Schmidt-Zahl für den hier betrachteten Fall entscheidend ist.

4.1.4 Richardson-Zahl

Der Richardson-Zahl ist definiert als:

$$Ri = \frac{g' \cdot H}{u^2}, \quad (4)$$

Wobei H eine repräsentative Höhe und g' die mit der Boussinesq-Approximation berechnete reduzierte Gravitation beschreibt:

$$g' = g \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_{1 \text{ or } 2}}, \quad (5)$$

Wobei g die Erdbeschleunigung ist und ρ_1 und ρ_2 die zwei unterschiedlich Dichten der zu mischenden Fluide beschreiben. Eine kleine Richardson-Zahl bedeutet, dass die Auftriebs-effekte vernachlässigbar sind.

4.1.5 Mach-Zahl

Die Mach-Zahl ist der Quotient zwischen der Referenz-Geschwindigkeit und der Schallgeschwindigkeit:

$$Ma = \frac{u}{a}, \quad (6)$$

Eine Mach-Zahl kleiner als 0,3 bedeutet, dass Kompressionseffekte vernachlässigbar sind. Dies ist in realen Holzfeuerungen immer der Fall. Da aber durch das Skalieren die Geschwindigkeiten im Modell oft grösser werden, muss abgeklärt werden, ob im Modell Kompressionseffekte auftreten.

4.1.6 Durchfluss-Verhältnis

Schliesslich ist wichtig, dass die Durchfluss-Verhältnisse der jeweils zu mischenden Fluide ähnlich sind, wozu das Durchfluss-Verhältnis bestimmt wird:

$$\chi = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}, \quad (7)$$

Mit diesen sechs dimensionslosen Zahlen ist es möglich, ein Modell zu erstellen, das nicht kinematisch und dynamisch ähnlich zur Realität ist.

4.2 Modell

Der Aufbau des Modells wird am Beispiel der untersuchten Rostfeuerung erläutert, das in Bild 8 dargestellt ist. Die Eckdaten dieser Rostfeuerung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

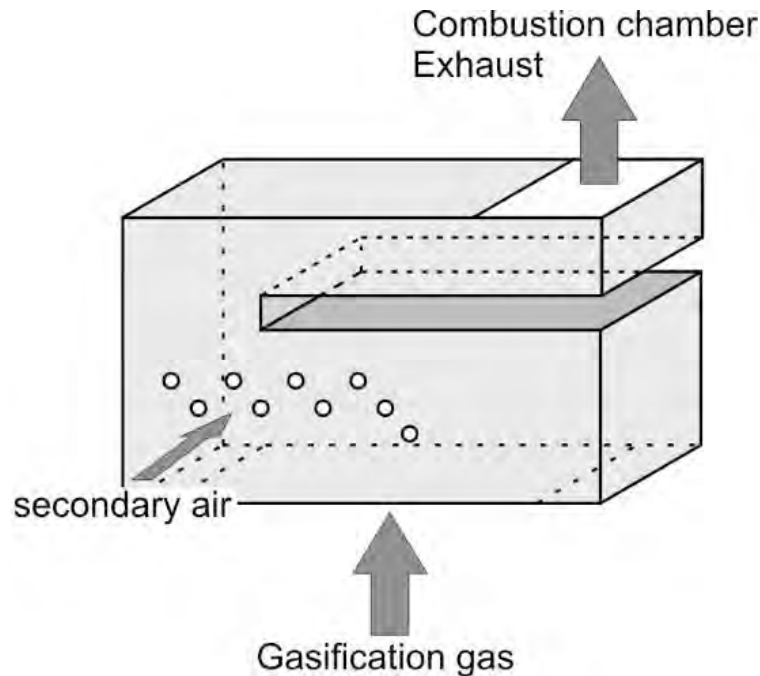


Bild 8 Schema des Modells der untersuchten Brennkammer.

Tabelle 2 Eckdaten der Untersuchte Rostfeuerung

Parameter		Einheit
Feuerungswärmeleistung	$\dot{Q} = 1000$	(kW)
Verbrennungswirkungsgrad	$\eta = 0.9$	(-)
Primärluftzahl	$\lambda_{prim} = 0.8$	(-)
Sekundärluftzahl	$\lambda_{sec} = 1.0$	(-)
Vergasungsrate	$f = 0.9$	(-)
Wassergehalt	$w = 0.3$	(-)
Temperatur Primärluft	$T_{prim} = 200$	(°C)
Temperatur Sekundärluft	$T_{sec} = 60$	(°C)

Aus diesen Daten können die Strömungsgrößen wie in Absatz 2 beschrieben hergeleitet und daraus die im Absatz 4.1 vorgestellten dimensionslosen Zahlen berechnet werden. Um den Modell-Aufbau zu vervollständigen, müssen noch die Skalierung und das Arbeitsfluid im Modell gewählt werden. Im vorliegenden Fall wurde Luft als Arbeitsfluid und ein Massstab des Modells von 1:5 gewählt. Mit dieser Information können alle Parameter des Modells gewählt werden. Tabelle 3 zeigt den Vergleich zwischen den dimensionslosen Zahlen von der Realität und Modell.

Tabelle 3 Vergleich der dimensionslosen Zahlen von Realität und Modell

	Realität	Modell
Re_{gasif}	6'279	4'100
Re_{sec}	29'886	10'829
Re_{comb}	14'213	14'213
Sc_{comb}	0.79	0.73
Ma_{sec}	0.0414	0.0282
Da_{comb}	2977	∞
Ri_{comb}	0.0743	0
χ	1.04	1.04

4.3 Messmethoden

4.3.1 Experimenteller Aufbau

Bild 9 zeigt den experimentellen Aufbau. Zwei Ventilatoren generieren den Sekundärluft- und den Vergasungsstrom. Die Durchflüsse werden mit Hilfe von Differenzdrucksensoren geregelt.

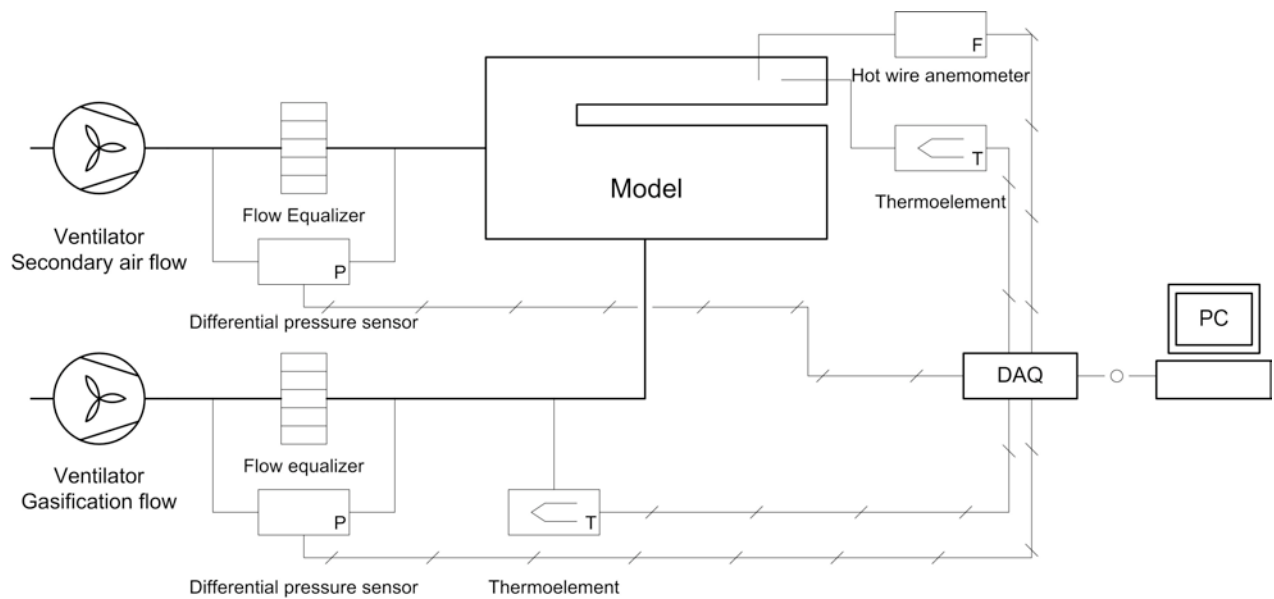


Bild 9 Experimenteller Aufbau.

Die Messungen werden in den zwei Ebenen CS1 und CS2 in der Nachbrennkammer gemäss Bild 10 durchgeführt.

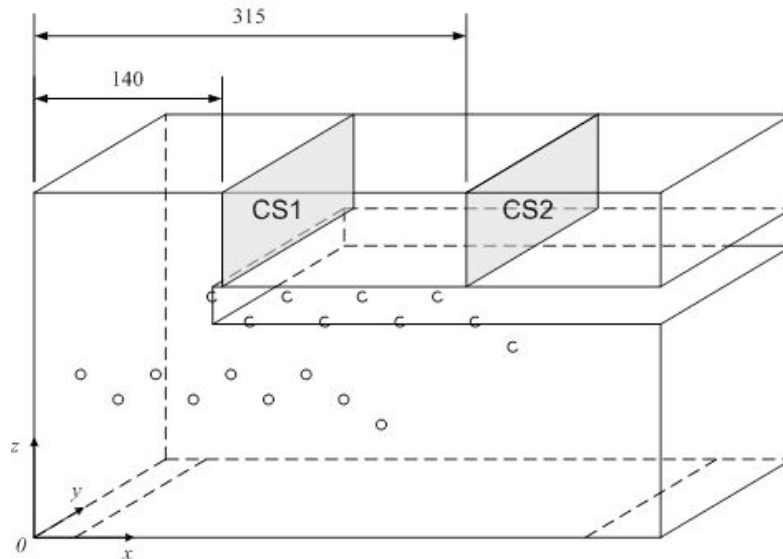


Bild 10 Position der zwei Messebenen in der Nachbrennkammer.

4.3.2 Geschwindigkeitsmessung

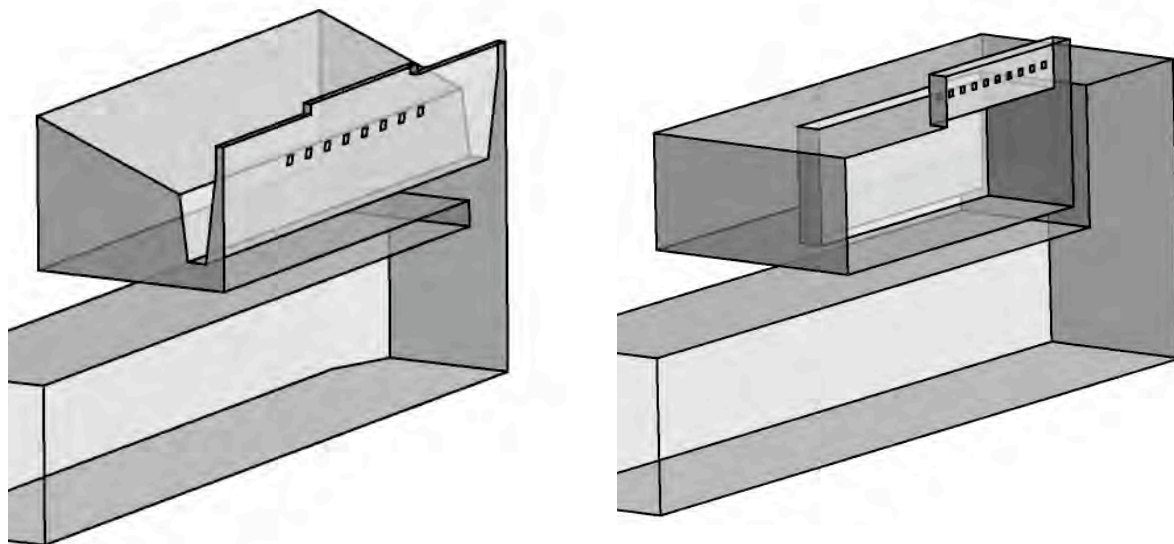
Die Geschwindigkeiten werden mit einem Hitzdrahtanemometer gemessen. Ein Geschwindigkeitsfeld wurde in der Ebene CS2 mit einem Abstand von 10 mm zwischen zwei Messpunkten aufgenommen. Diese Methode gibt gute Ergebnisse, ist aber aufwändig. In einem nächsten Schritt wird Particle Image Velocimetry (PIV) eingesetzt, um Geschwindigkeitsfelder schneller erfassen zu können.

4.3.3 Mischungsqualität

Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der Mischungsqualität, wie zum Beispiel Planar Induced Fluorescence (PLIF). Für die Methode hier benutzt werden kleine Partikel in einer den beiden Strömen eingesetzt. Dann wird mit Hilfe eines Lasers eine gewisse Ebene beleuchtet. Da das reflektierte Licht direkt von der Partikel-Konzentration abhängig ist, kann der Mischungsgrad durch Aufnahme der reflektierten Lichtintensität mittels einer Kamera bestimmt werden, wie in [10] beschrieben ist.

5 Resultate der Berechnungen am Beispiel von Verweilzeitspektrum und Mischungseffizienz

Bild 11 zeigt zwei berechnete Brennraumgeometrien. In beiden Fällen kommen das Vergasungsgas von oben in den Brennraum, werden mit Sekundärluft gemischt und treten dann in die darunter angeordnete Nachbrennkammer ein.



(a) Geometrie Variante 1

(b) Geometrie Variante 2

Bild 11 Geometrie-Varianten einer Nachbrennkammer. Links: Basis, rechts: Optimierte Variante.

Bild 12 und Bild 13 zeigen die berechneten Verweilzeitspektren der zwei Geometrien. Das Verweilzeitspektrum der Variante 1 ist bimodal, was auf parallele Pfade hinweist, wie in Bild 4 illustriert. Durch bessere Verteilung des Volumens im Brennraum und Vermeidung von zwei Durchströmungsmöglichkeiten kann das Verweilzeitspektrum deutlich verbessert werden. Bild 13 zeigt dazu das Verhalten von Variante 2, bei der eine direkte Durchströmung der Brennkammer verhindert wird. Das Strömungsverhalten wird so an eine Pfropfenströmung angenähert, so dass bei gleichem Bauvolumen eine viel bessere Ausbrandqualität erwartet werden kann. Der Vergleich der zwei Spektren zeigt, dass bei existierenden Feuerräumen oft grosse Verbesserungen durch reine Strömungsbetrachtungen erzielt werden können. Der Einbezug der Reaktionskinetik ist bei Vorliegen von grundlegendem Optimierungspotenzial bezüglich Strömungsverhalten nicht erforderlich, sondern erst sinnvoll für weitere Optimierungsschritte.

Als Basis für einen Variantenvergleich kann im Weiteren auch die Mischungseffizienz bestimmt werden. Variante V1 weist in der Ebene zwischen oberem und unterem Teil der Brennkammer eine Mischungseffizienz von 0,91 auf, während für Variante 2 bereits eine Mischungseffizienz von 0,99 bestimmt wird und dabei zu beachten ist, dass der rechnerische Wert nie 1 erreicht. Zur weiteren Optimierung der Feuerungstechnik wurde im vorliegenden Fall die Bestimmung der Mischungseffizienz auch verwendet, um die Position und Anzahl der Düsen zur Sekundärluftzufuhr zu optimieren.

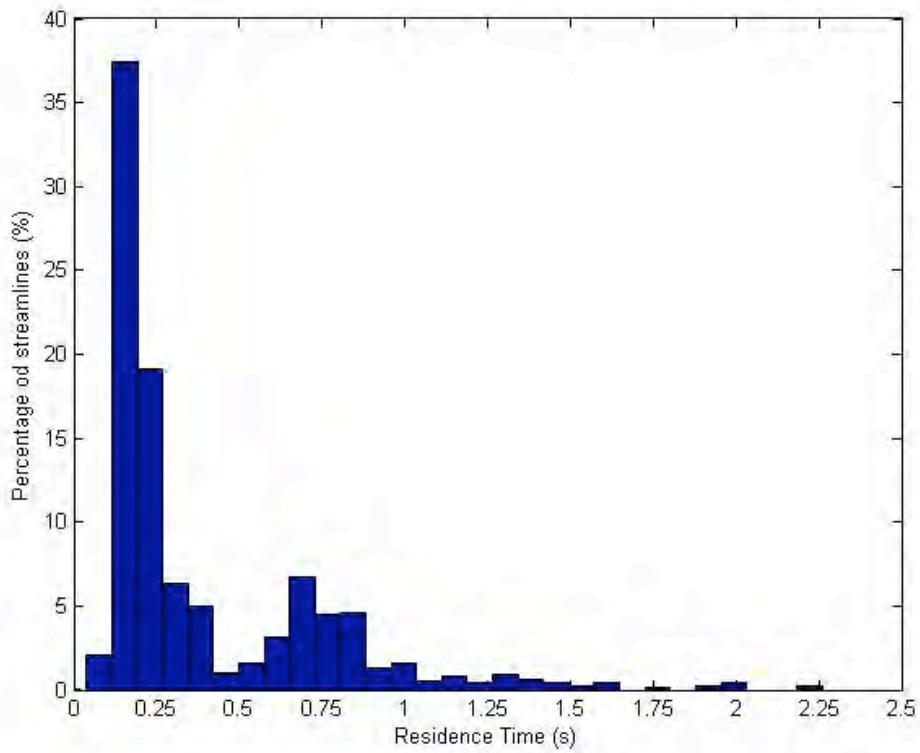


Bild 12 Verweilzeitspektrum von Brennkammereintritt bis zur Umlenkung für Variante 1.

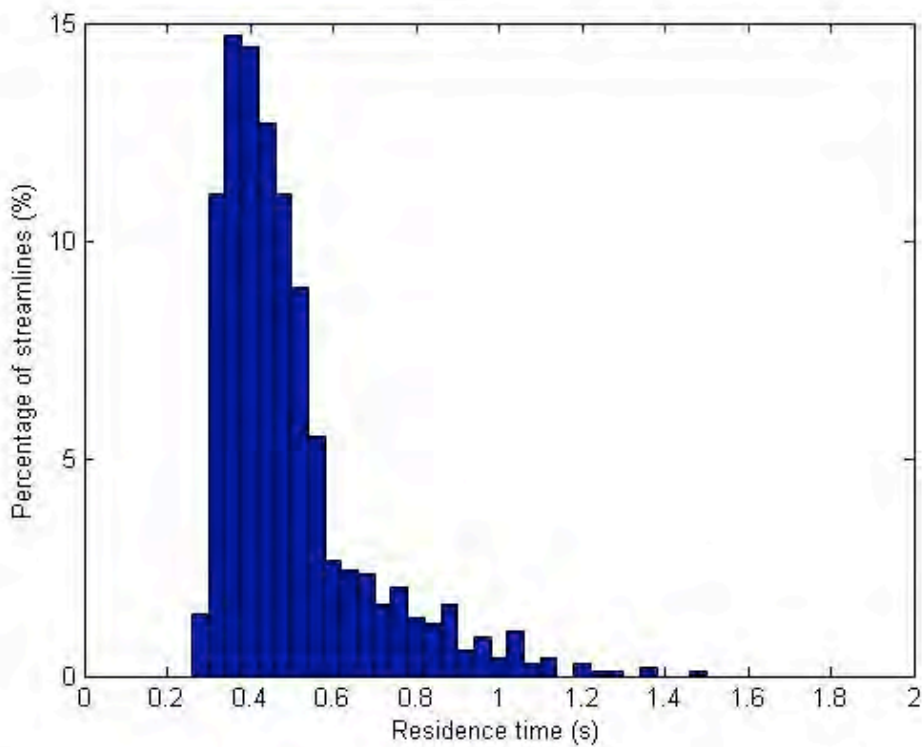


Bild 13 Verweilzeitspektrum von Brennkammereintritt bis zur Umlenkung für Variante 2.

6 Vergleich von Experiment und Berechnungen

6.1 Strömungsvisualisierung

Die Zugabe eines Aerosols in einen der zwei Luftströme und Beleuchtung einer Querschnitts in der Brennkammer ermöglicht eine Visualisierung der Strömung. Bild 14 zeigt ein Bild der Strömung in der Ebene CS1. Darin sind deutlich zwei symmetrische Wirbel zu erkennen. Diese werden auch Dean-Wirbel genannt und sind typisch für Strömungen in einem gekrümmten Rohr oder nach einer Umlenkung.

Bild 15 zeigt die CFD-Berechnung der Strömung in derselben Ebene. Die Strömungsberechnung zeigt ebenfalls die zwei symmetrische Wirbel. Obwohl kein direkter quantitativer Vergleich möglich ist, da das experimentelle Bild durch transiente Zugabe von Aerosolen entstanden ist, kann mit diesem Vergleich validiert werden, dass die Bildung der für die Strömungsführung entscheidenden Wirbel durch die Modellierung korrekt wiedergegeben wird.

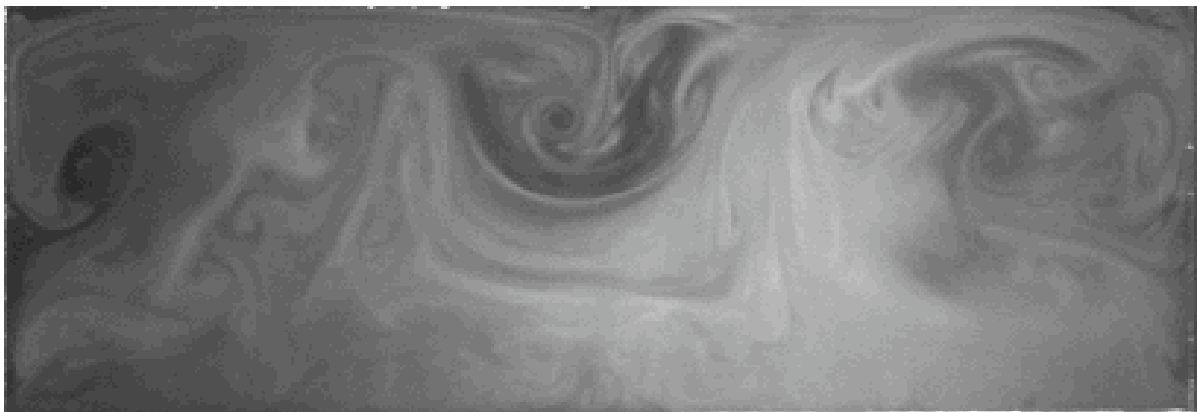


Bild 14 Experimentelle Visualisierung der Strömung mittels Partikeln in der Ebene CS1

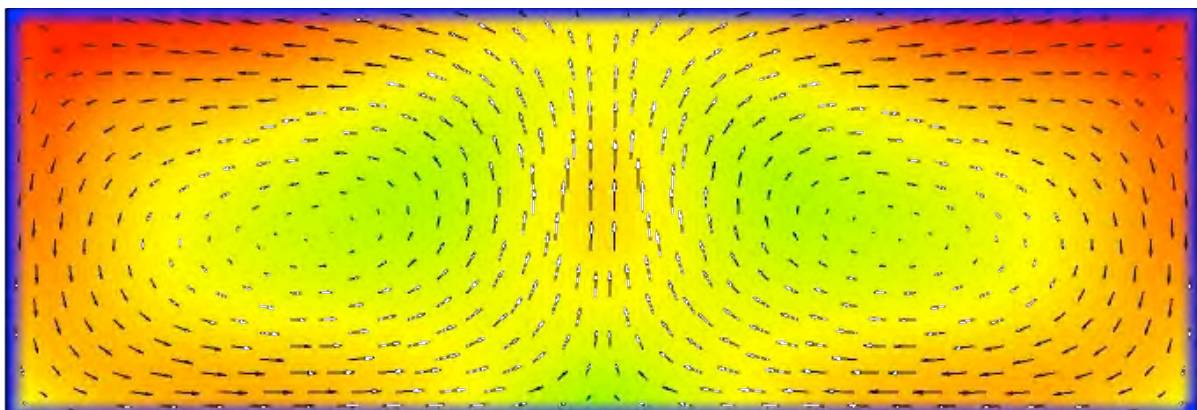


Bild 15 CFD-Berechnungen der Strömung in der Ebene CS1 mit Visualisierung der Stromlinien und des Geschwindigkeitsfelds.

6.2 Geschwindigkeitsmessungen

Bild 16 zeigt das in der Ebene CS2 gemessene Geschwindigkeitsfeld. Es zeigt, dass die Geschwindigkeit in Richtung der Brennkammerachse am Rand höher ist als in der Mitte. Dies kann erklärt werden durch die Präsenz der zwei oben beschriebenen Dean-Wirbel. Bild 17 zeigt das mittels CFD berechnete Geschwindigkeitsfeld, wobei das SST Turbulenz-Modell benutzt wurde. Experimente und CFD zeigen eine gute qualitative Übereinstimmung. Durch die experimentelle Validierung der für die Strömung entscheidenden Wirbelbildung kann die CFD-Modellierung mit erhöhter Sicherheit eingesetzt werden.

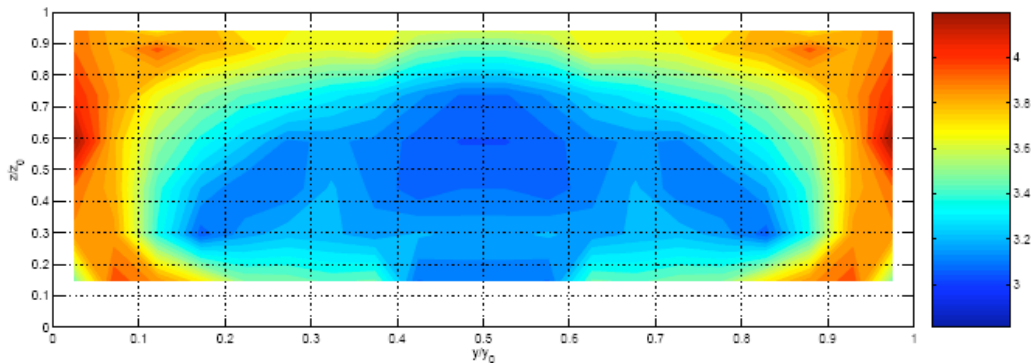


Bild 16 Geschwindigkeitsfeld in der Ebene CS2 mit Hitzdrahtanemometer gemessen

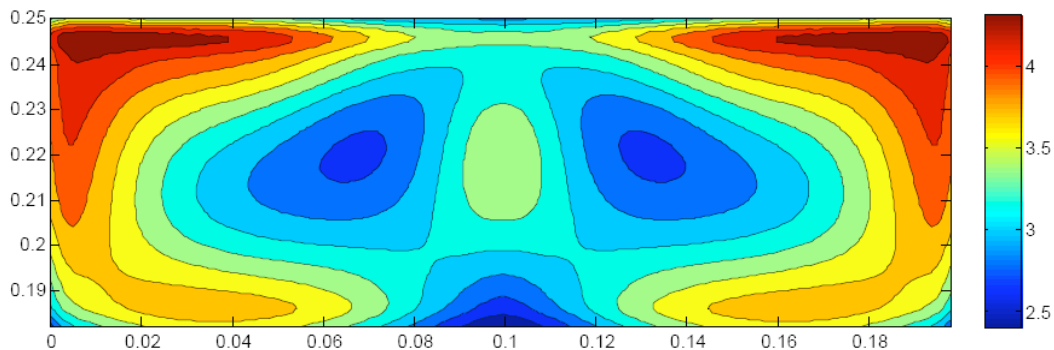


Bild 17 Geschwindigkeitsfeld berechnet in der Ebene CS2

6.3 Mischungsqualität

Um die Messmethode der Mischungsqualität zu überprüfen, wurden zwei Varianten der Brennkammer untersucht (Bild 18). In die erste Variante wird die Sekundärluft durch 18 Löcher in die Brennkammer eingedüst, 9 je Brennkammerseite. Bild 18 (a) zeigt die Verteilung der Löcher entsprechend einer typischen Rostfeuerung. In der zweiten Variante wird die Sekundärluft durch zwei grosse Löcher je Brennkammerseite eingedüst, was in Bezug auf die Einmischung als schlechter Fall zur Visualisierung des Unterschieds dient (Bild 18 (b)). Bild 19 zeigt für die Variante 2 ein typisches Bild der Partikel-Konzentration in der Nachbrennkammer direkt nach der Erfassung. Hier wurden die Partikel in dem Gasstrom aus der Vergasung zugefügt. Aus diesem Bild ist kann das Mischungsverhältnis ξ berechnet werden. Bild 20 zeigt das aus Bild 19 berechnete Mischungsverhältnis. $\xi=1$ bedeutet eine perfekte Mischung, Regionen mit $\xi>1$ sind partikelreiche Regionen, Regionen mit $\xi<1$ sind Regionen

mit weniger Partikeln. Aus dem Mischungsverhältnis kann eine integrale Mischeffizienz bestimmt werden, das für Variante 2 einen Wert von $\bar{\eta} = 0.954$ ergibt. Bild 21 zeigt das Mischungsverhältnis für die Variante 1. In diesem Fall ist die Mischungseffizienz mit $\bar{\eta} = 0.989$ deutlich besser als in der Variante 2.

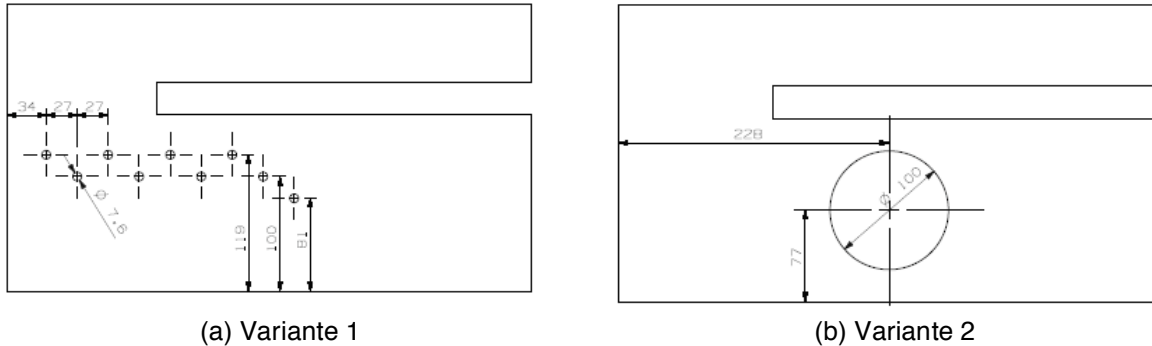


Bild 18 Varianten der Sekundärlufteindüsung in der Vorschubrostfeuerung.



Bild 19 Partikel-Konzentration in der Ebene CS2 für Variante 2.

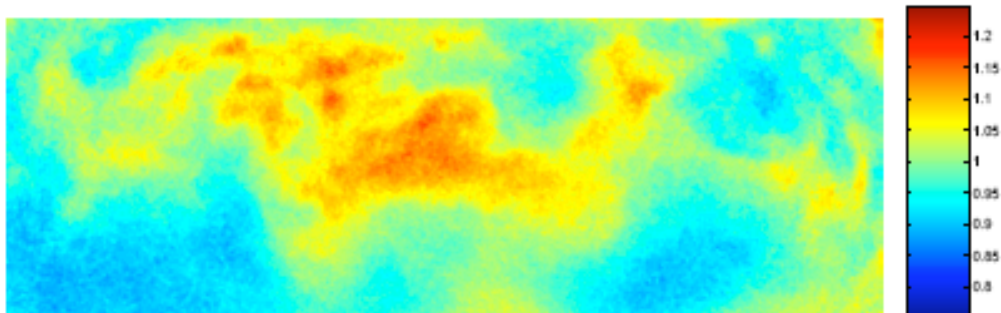


Bild 20 Berechnetes Mischungsverhältnis in der Ebene CS2, Variante 2:

$$\xi_{\min} = 0.75, \xi_{\max} = 1.25 \quad \bar{\eta} = 0.954.$$

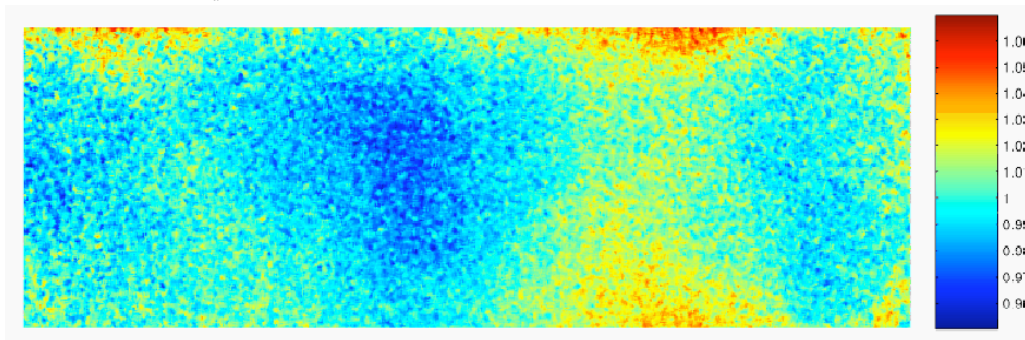


Bild 21 Berechnetes Mischungsverhältnis in der Ebene CS2, Variante 1:

$$\xi_{\min} = 0.95, \xi_{\max} = 1.07 \quad \bar{\eta} = 0.989$$

7 Schlussfolgerungen

Im Beitrag werden zwei komplementäre Methoden zur Optimierung der Strömungsverhältnisse für Holzfeuerungen vorgestellt. Numerische Strömungsberechnungen mit CFD erlauben eine anschauliche Visualisierung der Strömung und unter Einbezug praktischer Erfahrungen eine qualitative Beurteilung der Feuerungskonstruktion. Aus der Strömungssimulation können das Verweilzeitspektrum und die Mischungseffizienz bestimmt werden, was einen Vergleich verschiedener Geometrien und Konstruktionen ermöglicht. Da die Vorhersage von Unstetigkeiten wie zum Beispiel die Bildung von Wirbeln und Rückströmungen mit einer Unsicherheit behaftet ist, werden die grundlegenden Strömungsverhältnisse punktuell validiert. Es wird gezeigt, dass dazu Modellversuche unter Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen zwischen Realität und Modell eingesetzt werden können. Eine experimentelle Erfassung der Strömungsverhältnisse erlaubt einerseits eine Visualisierung zum Beispiel durch Zugabe von Aerosolen und optischer Erfassung der Strömung. Eine weitergehende Auswertung zweier kurz aufeinander folgender Aufnahmen kann mittels Particle Image Velocimetry (PIV) erfolgen, was eine hoch aufgelöste Bestimmung des Geschwindigkeitsfelds ermöglicht. Im Weiteren bieten sich Möglichkeiten zur Bestimmung der Mischungseffizienz durch Rastermessungen von Mischtemperaturen oder Mischkonzentrationen im Modell. Damit können die experimentellen Untersuchungen auch als direkte Optimierungsmethode genutzt werden, da Messungen an skalierten Modellen einfacher und effizienter als an realen Anlagen ausgeführt werden können.

Im Rahmen des vorgestellten Projekts ist die Einbindung von PIV zur detaillierten experimentellen Erfassung der Strömungsverhältnisse im Modellmassstab geplant. Zusätzlich bietet der geplante Einsatz von Rapid Thermal Prototyping (RTP) die Möglichkeit, komplexe dreidimensionale Feuerraumgeometrien von Klein- und Grossanlagen durch Modelle im Labormassstab zu untersuchen und für weitere Optimierungen zu nutzen. Für weitergehende numerische Feuerungsoptimierungen werden im CFD zudem die chemischen Reaktionen integriert und unter Bestimmung der zu erwartenden Emissionswerte umfangreiche Variationen von Geometrien und Betriebsparametern ermöglicht.

8 Literatur

- [1] Van Loo, S. and J. Koppejan (Eds.): *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Earthscan, London 2008
- [2] Nussbaumer, T.: Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy & Fuels*, 2003. **17**(6): p. 1510–1521
- [3] Bruch, C., Peters, B. und Nussbaumer Th.: Modelling wood combustion under fixed bed conditions. *Fuel*, 2003. **82**: p. 729-738
- [4] Biollaz, S., Nussbaumer, T., and Onders, C.: Measuring and modelling the gas residence time. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, 2001. I: p. 573-684
- [5] Miltner, M., et al.: Process simulation and CFD calculations for the development of an innovative baled biomass-fired combustion chamber. *Applied Thermal Engineering*, 2007. **27**(7): p. 1138-1143
- [6] Nussbaumer, T., Good, J.: *Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeurungen*. Schweizer Ingenieur und Architekt (11) März 1994, sowie Good, J., Nussbaumer, T.: *Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeurungen*. Bundesamt für Energie, Bern 1993
- [7] Reed, T. B.: Biomass Gasification: Principles and Technology. *Energy Technology Review*. Vol. 67. 1981: Noyes Data Corporation
- [8] Szirtes, T.: *Applied dimensional analysis and modeling*. 1998, New-York: McGraw Hill.
- [9] Baillifard, M., Casartelli, E., Nussbaumer, Th.: Experimental Investigation of the Fluid Dynamics in Wood Combustion Processes, *16th European Biomass Conference and Exhibition*, Valencia (Spain), 2–6 June 2008
- [10] Brzovic, T., *Methodik zur Visualisierung und Bewertung der Gasströmung in Holzfeurungen*. Masterarbeit 2007, ETH Zürich

Verdankung

- Kommission für Technische Innovation (KTI) für die finanzielle Unterstützung
- Liebi LNC AG, Oey-Diemtigen für die Zusammenarbeit bei der Umsetzung
- Trpimir Brzovic, vormals Verenum für den Aufbau der Modellmessungen
- Prof. Dr. Thomas Rösgen, ETH Zürich, für die Begleitung der Modellmessungen.