

# Strömungstechnische Optimierung von Feuerräumen

Die Fachgruppe Bioenergie und Nachhaltigkeit an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur befasst sich mit der Optimierung von Feuerungsanlagen für biogene Brennstoffe. Ziel der Aktivitäten ist die Erhöhung der Wirkungsgrade, die Verminderung der Schadstoffemissionen sowie die Verbesserung des Betriebsverhaltens.

Autoren: Thomas Nussbaumer\* und Marc-André Baillifard\*\*

Im vorliegenden Beitrag werden die Methodik zur experimentellen Untersuchung kalter Strömungen in Modellversuchen beschrieben und der Einsatz numerischer Strömungsberechnungen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) vorgestellt. Am Beispiel der Feuerräume einer Rostfeuerung und eines Stückholzkessels werden die Bedeutung der Strömungsführung aufgezeigt und Verbesserungsansätze vorgestellt. Zudem werden die CFD-Berechnungen mit Strömungsmessungen am Modell validiert.

## 1 Einleitung

Biomasse ist mit rund 10%-Anteil am Weltenergieverbrauch der wichtigste erneuerbare Energieträger. Die häufigste technische Anwendung ist die Verbrennung von Biomasse in Anlagen von wenigen Kilowatt bis über 100 MW Leistung [1]. In der Schweiz kommen vor allem Holzöfen, Stückholzkessel und Pelletsheizungen im Hausbereich sowie Unterschub- und Rostfeuerungen für Fernwärmenetze und industrielle Anwendungen zum Einsatz. Für grössere Leistungen bietet sich auch die Wirbelschichttechnik an.

Holz weist ein mehrstufiges Verbrennungsverhalten über eine Umwandlung zu Gasen mit nachfolgenden Gasphasenreaktionen auf [2]. Stückholzkessel und automatische Holzfeuerungen verfügen deshalb meist über eine zweistufige Verbrennungsführung mit einer Vergasung des Holzes mit Primärluft und einer anschliessenden Zugabe von Sekundärluft für den Gasausbrand in der Nachbrennzone (Bild 1). Selbst mit dieser Technik ausgeführte Holzfeuerungen können noch unerwünschte Emissionen an Kohlenmonoxid, Russ und organischen Stoffen verursachen. Eine unvollständige Verbrennung dieser Stoffe ist entweder die Folge zu tiefer Verbrennungstemperaturen und/oder einer unzureichenden Vermischung zwischen brennbaren Gasen und Verbrennungsluft. In einem heissen Feuerraum mit Temperaturen über 850 °C laufen die Reaktionen allerdings sehr schnell ab, sodass in der Regel die Mischungsqualität für den Ausbrand der

Gase limitierend ist. Entscheidend ist die Vormischung zwischen brennbaren Gasen und Sekundärluft in der Mischzone und – da die Vormischung erfahrungsgemäss nie vollständig ist – die weitere Vermischung in der Brennkammer. Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb die strömungstechnische Optimierung der Lufteindüsung und der Feuerräume, um damit eine hohe Ausbrandqualität, eine Verbrennung bei tiefem Luftüberschuss sowie ein robustes Verhalten bei Teillast und verändertem Wassergehalt des Brennstoffs zu ermöglichen.

## 2 Methode

Die Optimierung der Brennkammergeometrie und der Strömungsführung kann durch Experimente oder durch Strömungsberechnungen erfolgen. Experimente können auf realen Anlagen oder an Modellen durchgeführt werden, wobei Modellexperimente wesentlich flexibler und kostengünstiger sind. Allerdings muss durch Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen wie der geometrischen, kinematischen und dynamischen Ähnlichkeit sichergestellt werden, dass die Ergebnisse mit der Realität vergleichbar sind [3].

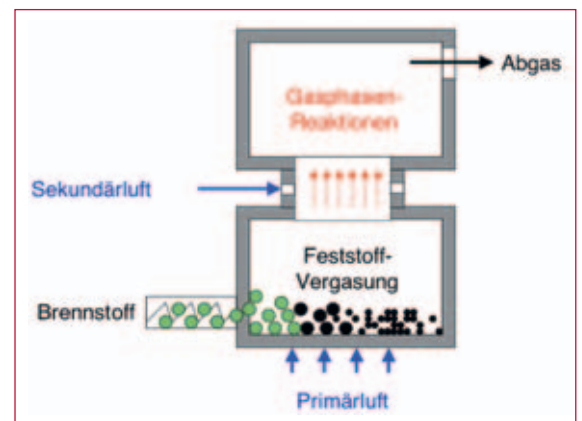
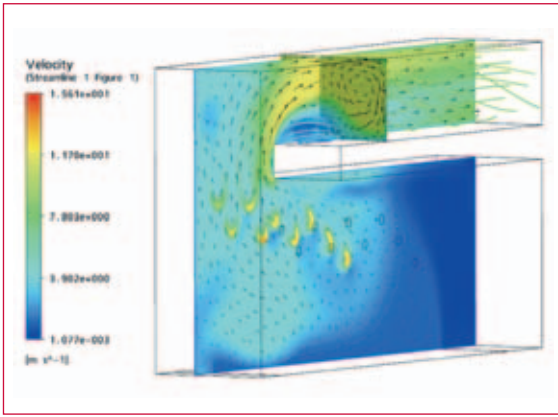
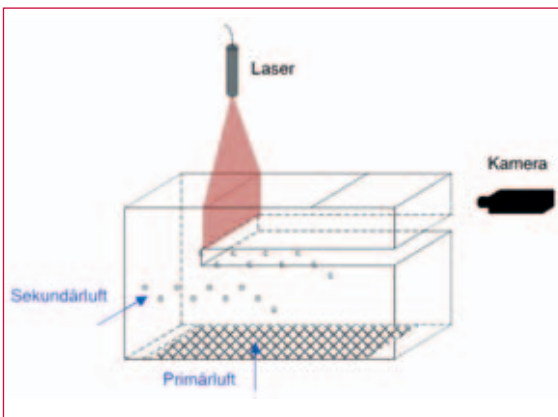


Bild 1: Schematische Beschreibung einer Holzfeuerung mit Primär- und Sekundärluft.



**Bild 2: Beispiel einer Strömungsvisualisierung mittels CFD im Brennraum einer Rostfeuerung. In der Nachbrennkammer (Schnittebene oben) ist die Ausbildung eines Wirbels erkennbar.**



**Bild 3: Experimenteller Aufbau.**

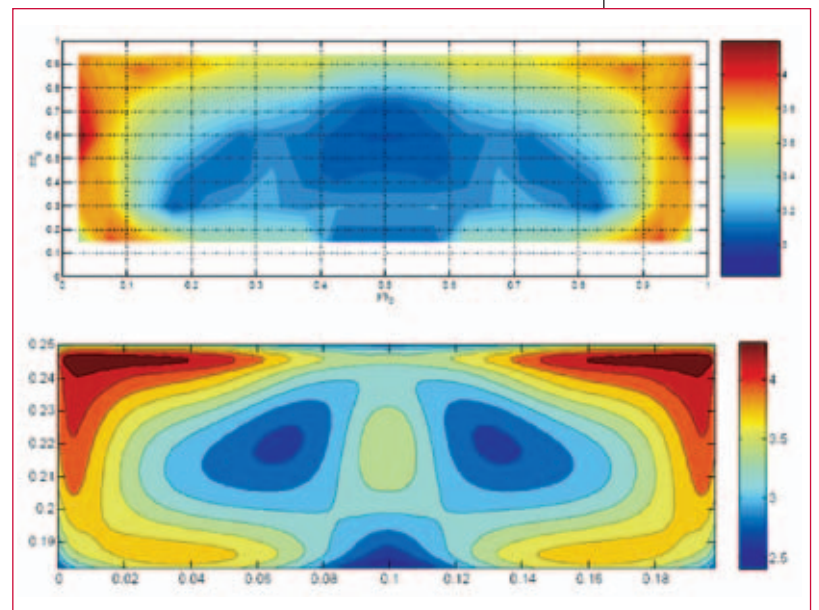
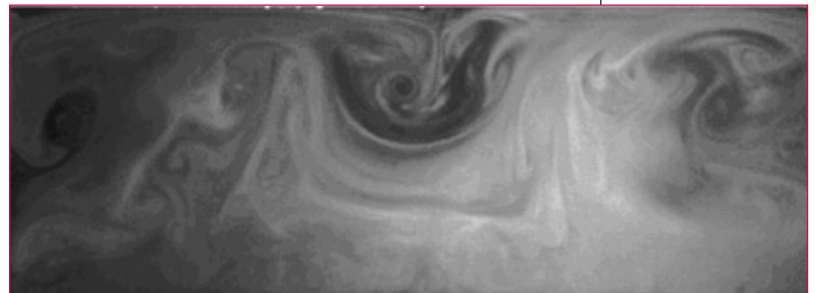
male Ausnutzung des Brennraumvolumens erzielt werden. Allerdings ist je nach Geometrie und Strömungsverhältnissen damit zu rechnen, dass die Wirbel bei Lastreduktion infolge reduzierter Strömungsgeschwindigkeit nicht aufrechterhalten bleiben, sodass bei Unterschreitung eines minimalen Volumenstroms die Schadstoffemissionen deutlich ansteigen können. Mittels strömungstechnischer Optimierung können die Feuerräume so ausgelegt werden, dass die Ausbrandqualität innerhalb eines breiten Bereichs erhalten bleibt und das Potenzial einer vollständigen Verbrennung damit ausgeschöpft wird.

Weil die Wirbelbildung für die Ausbrandqualität entscheidend ist, empfiehlt sich eine Kontrolle in einer realen Strömung. Dazu wurde ein Modell im Massstab 1:5 aufgebaut, in dem eine Luftströmung mit Rauchzugabe visualisiert und fotografisch erfasst wurde (Bild 3). Im gezeigten Versuchsaufbau konnte die in Bild 4 gezeigte Strömungssituation in der Nachbrennkammer erfasst werden. Das Bild zeigt die zwei symmetrischen Wirbel und bestätigt somit das Auftreten der mit CFD berechneten Wirbel. Ergänzend dazu erfolgte eine Validierung der Berechnungen durch eine Messung des Geschwindigkeitsfelds und ein Vergleich mit dem berechneten Geschwindigkeitsfeld (Bild 5).

#### 4 Beispiel Stückholzkessel

Nebst einer vollständigen Vermischung ist bei der Gestaltung der Brennraum sicherzustellen, dass Sträh-

**Bild 4: Visualisierung der Strömung in einem Modellversuch im Massstab 1:5 durch Zugabe von Rauch zur Validierung der Wirbelbildung.**

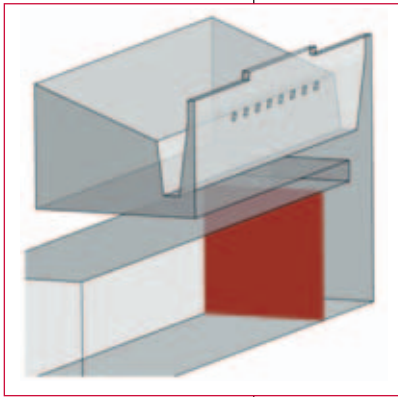


**Bild 5: Mit Hitzdrahtanemometer gemessenes Geschwindigkeitsfeld (oben) und mit CFD berechnetes Geschwindigkeitsfeld in der Nachbrennkammer (unten).**

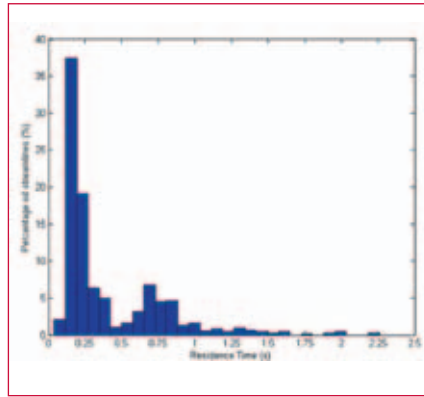
Die Anwendung von Computational Fluid Dynamics (CFD) zur Berechnung von Strömungen ohne chemische Reaktionen ist heute in vielen Bereichen wie etwa dem Flugzeug- und Automobilbau etabliert und sie kommt auch zur Auslegung der Strömungsführung in Gebäuden zur Anwendung. Neben den physikalischen Gesetzen der Strömung kann zur Verbrennungssimulation zusätzlich die Kinetik der chemischen Reaktionen integriert werden. CFD ermöglicht damit detaillierte Berechnungen zum Beispiel für den Vergleich verschiedener Varianten von Feuerräumen. Allerdings ist darauf zu achten, dass wichtige Strömungsphänomene wie die Bildung von Wirbeln und Rückströmungen oder der Umschlag zur Turbulenz korrekt erfasst werden, da diese Effekte die Strömung massgeblich beeinflussen. Dazu ist empfehlenswert, CFD-Berechnungen durch Experimente zu validieren. In der vorliegenden Arbeit werden deshalb Experimente und CFD als komplementäre Methoden zur Strömungsoptimierung eingesetzt, wie in [4] ausführlich beschrieben.

#### 3 Beispiel Rostfeuerung

Bild 2 zeigt CFD-Berechnungen zur Visualisierung der Strömung in einer Vorschubrostfeuerung. Die Darstellung lässt erkennen, dass sich in der Nachbrennkammer aufgrund der Unterdrucksituation nach der Umlenkung Wirbel ausbilden. Wenn diese symmetrisch vorliegenden Wirbel den gesamten Querschnitt erfassen, können dadurch eine hohe Vermischungsqualität sowie eine maxi-



**Bild 6: Geometrie und Verweilzeit-spektrum einer Nachbrennkammer (Basisvariante).**

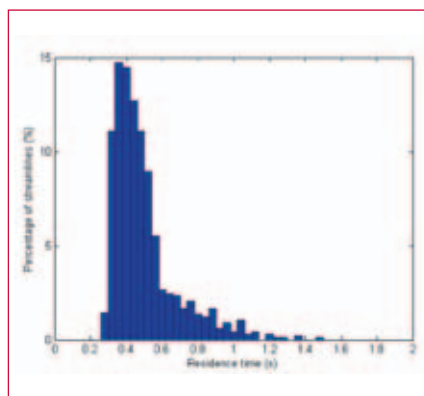
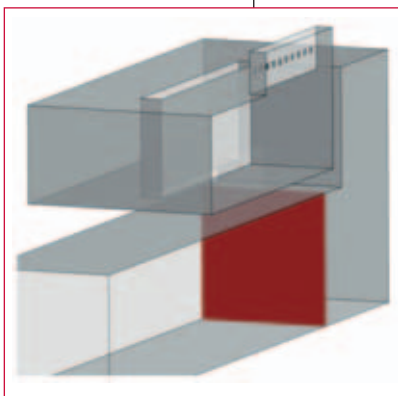


nen mit zu kurzer Verweilzeit in der heissen Zone sicher vermieden werden. Bild 6 zeigt den Brennraum eines Stückholzkessels, in dem eine hohe Einströmgeschwindigkeit der Sekundärluft und dadurch eine gute Vormischung mit den brennbaren Gasen erzielt werden. CFD-Berechnungen zeigen allerdings, dass selbst bei optimaler Gestaltung der Eindüsung keine 100%-Vormischung erzielt werden kann [4]. Die Strömung in der nachfolgenden Verbrennungszone ist deshalb ebenfalls entscheidend. Eine Bestimmung des Verweilzeitspektrums der Gase ab Eindüsung der Sekundärluft gemäss Bild 6 zeigt ausserdem, dass die Nachbrennkammer in der Basisvariante ein bimodales Verweilzeitspektrum aufweist und dass insbesondere eine Strähne von Brenngasen mit zu kurzer Verweilzeit auftritt. Der Brennraum konnte in der Folge so verändert werden, dass die Strähnenbildung sicher vermieden wird. Bild 7 zeigt die Geometrie und das Verweilzeitspektrum einer optimierten Variante, in der zu kurze Verweilzeiten sicher vermieden werden und die Ausbrandqualität dadurch verbessert wird. Die Bestimmung des Verweilzeitspektrums dient somit als anschauliches Instrument zur qualitativen Beurteilung der Strömungsführung und ermöglicht einen raschen Vergleich verschiedener Varianten.

### 5 Ausblick

Im Beitrag werden zwei komplementäre Methoden zur Optimierung der Strömungsverhältnisse für Holzfeuerungen vorgestellt. Numerische Strömungsberechnungen mit CFD erlauben eine Visualisierung der Strömung und eine qualitative Beurteilung der Feuerungskonstruktion. Aus der Strömungssimulation können das Verweilzeitspektrum und die Mischungseffizienz bestimmt werden, was einen aussagekräftigen Vergleich verschiedener Geometrien und Konstruktionen ermöglicht. Für weitergehende Feuerungsoptimierungen können im

**Bild 7: Geometrie und Verweilzeit-spektrum einer Nachbrennkammer (optimierte Variante).**



CFD-Modell die chemischen Reaktionen integriert und unter Bestimmung der zu erwartenden Emissionswerte umfangreiche Variationen von Geometrien und Betriebsparametern durchgeführt werden. Da die Vorhersage von Unstetigkeiten wie zum Beispiel der Bildung von Wirbeln und Rückströmungen mit einer Unsicherheit behaftet ist, werden die Strömungsverhältnisse experimentell validiert. Dazu eignen sich Modellversuche unter Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen. Diese erlauben zum Beispiel eine Visualisierung durch Zugabe von Aerosolen und optischer Erfassung der Strömung. Die Aufnahme zweier Bilder in kurzem zeitlichem Abstand ermöglicht zudem eine hoch aufgelöste Bestimmung des Geschwindigkeitsfelds mittels Particle Image Velocimetry (PIV). Zudem können im Modell die Mischungseffizienz durch Rastermessungen von Mischtemperaturen oder Mischkonzentrationen bestimmt werden. Modellversuche können so auch als direkte Optimierungsmethode genutzt werden. Mit dem Einsatz eines 3D-Printers und Rapid Thermal Prototyping (RTP) besteht ausserdem die Möglichkeit, komplexe dreidimensionale Feuerraumgeometrien an Modellen im Labormassstab zu untersuchen und für Optimierungen von Klein- und Grossanlagen zu nutzen.

### Literatur

- [1] Van Loo, S., Koppejan, J. (Eds.), *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Earthscan, London 2008.
- [2] Nussbaumer, T., *Energy & Fuels*, 2003. 17(6): 1510–1521.
- [3] Szirtes, T.: *Applied dimensional analysis and modeling*. 1998, New-York, McGraw Hill.
- [4] Baillifard, M., Nussbaumer, T., *10. Holzenergie-Symposium*, 12. September 2008, ETH Zürich, 2008, Verenum Zürich, ISBN 3-908705-19-3, 93–114.

### Verdankung

Die Arbeiten zu handbeschickten Feuerungen werden von der Kommission für Technische Innovation (KTI) unterstützt und in Zusammenarbeit mit der Firma Liebi LNC AG durchgeführt. Der experimentelle Versuchsaufbau erfolgte im Rahmen der Masterarbeit von Trpimir Brzovic und mit Unterstützung von Prof. Dr. Thomas Rösgen an der ETH Zürich. ■

\* Prof. Dr. Thomas Nussbaumer ist Professor für Bioenergie und Nachhaltigkeit an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw und Inhaber der Firma Verenum in Zürich, [www.verenum.ch](http://www.verenum.ch).

\*\* Dr. Marc-André Baillifard ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw, [www.hslu.ch](http://www.hslu.ch).