

■ STRÖMUNGSSIMULATION

Entwicklung und Verbesserung von Feuerungsanlagen

DAS INSTITUT FÜR FEUERUNGS- UND KRAFTWERKSTECHNIK – IFK, von der Universität Stuttgart ist seit Jahren auf dem Gebiet der Entwicklung und Verbesserung von Feuerungsanlagen aktiv und stellt nun eine Methode vor, um die numerische Strömungssimulation (CFD, engl.: computational fluid dynamics) für die Entwicklung von Einzelraumfeuerstätten einzusetzen, welche im Rahmen der Promotion von Winfried Juschka entwickelt wurde.

Bei dieser Methode soll eine verlässliche Vorhersage der Kohlenmonoxidkonzentration mithilfe von kalibrierten CFD-Simulationsergebnissen erfolgen, ohne dass eine vorherige Vermessung eines Prototyps der Feuerstätte auf dem Prüfstand nötig ist. Dabei kommt die in vielen Bereichen etablierte kommerzielle CFD-Software „ANSYS Fluent“ mit Strömungs- und Reaktionsmodellen zum Einsatz. Die Kalibrierung der Simulationsergebnisse findet in einem nachgeschalteten Prozess statt, die mit einem kommerziellen Tabellenkalkulationsprogramm durchgeführt wird. Diese Methode ersetzt allerdings nicht die Erfahrung des Entwicklers, sondern ermöglicht eine zuverlässige Bewertung und Umsetzung eines neuen Verbrennungskonzeptes.

Bisher kann das Emissionsverhalten bei der Entwicklung von neuen Feuerraumdesigns oder bei Konstruktionsänderungen an einer bestehenden Feuerstätte, auch bei einem noch so hohen Erfahrungswert, oftmals nicht zuverlässig abgeschätzt werden. Die messtechnische Überprüfung, sowie die Optimierung nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“, finden dann aufwendig auf dem Prüfstand mit einem Prototyp statt. Die in anderen Bereichen etablierten Entwicklungswerkzeuge, wie beispielsweise die numerische Strömungssimulation, kommen bei der Entwicklung in den meisten Fällen nicht zum Einsatz. Obwohl sich die CFD-Simulation, mit den implementierten Modellen, vielfach als grundsätzlich geeignet herausgestellt hat. Allerdings wird diese überwiegend in der universitären Forschung angewendet. Dabei werden meist neue Modelle entwickelt, welche dann an bereits existierenden Feuerungsanlagen durch Messwerte validiert werden. Um die generelle Eignung zu beweisen, werden die Modellparameter in der Simulation auf den expliziten Anwendungsfall angepasst.

Eine verlässliche Vorhersage der Kohlenmonoxidkonzentrationen (CO), welche als Leitkomponente zur Bewertung der Vollständigkeit der Verbrennung herangezogen wird, ist bei Biomassefeuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung mit der CFD-Simulation ohne Messwerte bisher nicht möglich. Damit sich der Einsatz der CFD-Simulation nicht nur auf die Visualisierung von Strömungs-, Temperatur- und Konzentrationsverhältnisse in

Feuerräumen beschränkt, wie die Abbildung 1 beispielhaft zeigt, wurde eine Methode zur Kalibrierung der CFD-Simulationsergebnisse entwickelt und soll in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Anschließend soll die Entwicklung einer Brennkammer für einen Stückholzkessel beschrieben werden. Bei dieser Entwicklung erfolgte die Auswahl von sehr unterschiedlichen Brennkammerkonzepten durch die entwickelte Methode zur Kalibrierung der CFD-Simulationsergebnisse.

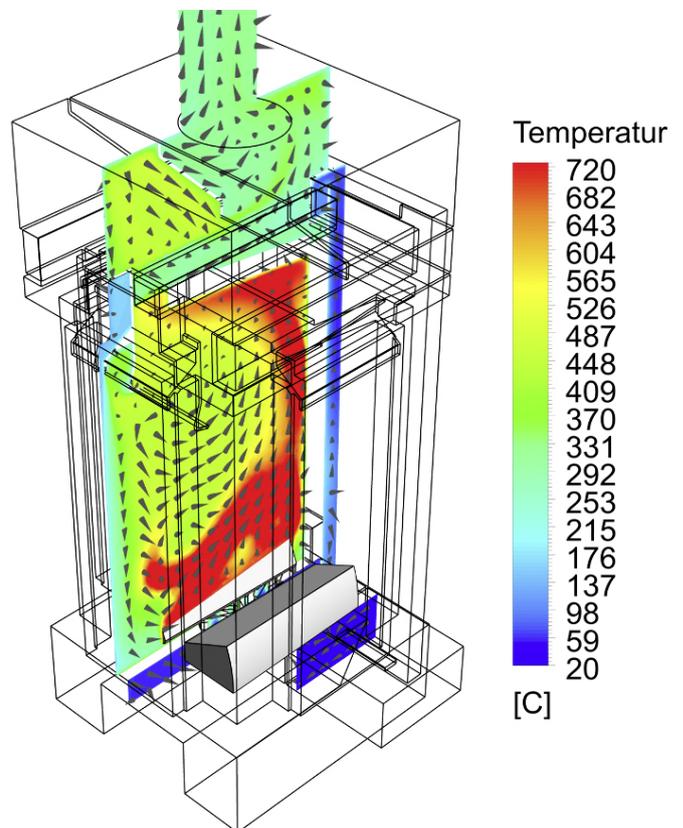


Abbildung 1 – CFD-Simulation zur Unterstützung der Optimierung von z. B. Kaminöfen mittels Visualisierung der Strömungs-, Temperatur- (dargestellt) und Konzentrationsverhältnisse.

Bisheriger Einsatz der CFD-Simulation

Im Beitrag „Einzelfeuerstätten, Strömungssimulation und Strömungsvisualisierung“ im Heft 1/2015 des K&L-Magazins wurde eine Musterfeuerung vorgestellt, welche im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt wurde (Juschka et al. (2012)). Für die Entwicklung kamen Werkzeuge für die Strömungsvisualisierung zum Einsatz, wie z.B. die CFD-Simulation. Zu diesem Zeitpunkt stand die CFD-Simulation für Kleinfeuerungsanlagen noch in den Anfängen und konnte bei der Entwicklung „nur“ für Zwecke der Visualisierung eingesetzt werden. So wurden in Struschka et al. (2013) für verschiedene Einzelraumfeuerstätten CFD-Modelle aufgebaut und mit Reaktionsmodellen versehen, um nicht nur die Strömung, sondern auch die Verteilung von Temperatur, Sauerstoff und Kohlenmonoxid in der Reaktionszone bewerten zu können. Allerdings konnte auch hier noch keine verlässliche Vorhersage über die Auswirkungen von konstruktiven Änderungen auf die CO-Konzentration getroffen werden. In Juschka et al. (2015) wurden die Randbedingungen einer messtechnisch erfassten Reduktion der Stickstoffoxide (NO_x) mithilfe der CFD-Simulation durch Visualisierung der Sauerstoff- und Temperaturverteilung nachträglich verdeutlicht und konnte plausibel begründet werden. Aber eine simulationsgestützte Vorhersage des Emissionsverhaltens der Feuerung war auch in diesem Fall noch nicht möglich.

Der ausschlaggebende Vorteil der CFD-Simulation liegt in der Berechnung und Visualisierung der dreidimensionalen Strömung, sowie der Verteilung der Temperatur und Gaskonzentrationen in der Einzelraumfeerraumstätte. Allerdings hat bisher immer noch eine verlässliche Vorhersage des Emissionsverhaltens der Anlagen gefehlt. Soll die CFD-Simulation bei der Entwicklung von Biomassefeuerungen bereits in der Konzeptionsphase zum Einsatz kommen, müssen auch für unterschiedliche konstruktive Ansätze definierte Qualitätskriterien durch Simulationsrechnungen ermittelt werden können. Um dies zu erreichen, wurde die CFD-Simulation für den Einsatz bei Biomassefeuerungsanlagen am Institut konsequent weiterentwickelt.

Qualität einer Feuerung

Aus feuerungstechnischer Sicht können die Kriterien einer qualitativ hochwertigen Biomassefeuerung gut anhand der CO- λ -Charakteristik beschrieben werden. Die Qualität einer Feuerung kann hierbei anhand von drei Kriterien definiert werden. Abbildung 2 zeigt den Wirkungsgrad und die CO-Konzentration über der Luftzahl λ . Mit zunehmender Luftzahl λ sinkt der Wirkungsgrad einer Feuerung, da dem System mehr Verbrennungsluft zugeführt wird, als für die vollständige Umsetzung des Brennstoffes benötigt wird. Dieser zusätzliche Verbrennungsluftstrom muss unnötigerweise erwärmt werden und damit steigt der Abgasverlust mit zunehmender Luftzahl. Somit liegt ein optimaler Betriebspunkt, bezogen auf den Wirkungsgrad, in der Nähe von $\lambda = 1$.

Ein weiteres Kriterium ist die Qualität der Verbrennung, welche über die Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas beschrieben wird. Kohlenmonoxid kann als Leitkomponente zur Bewertung der Vollständigkeit der Verbrennung angesehen werden. In Abbildung 2 ist eine typische wannenförmige CO- λ -Charakteristik dargestellt. Dabei kann ein Minimum der CO-Konzentration gefunden werden, welches den optimalen Betriebspunkt definiert.

Da links vom optimalen Betriebspunkt, aufgrund von Luftmangelsituationen, ein steiler Anstieg der Kohlenmonoxidkonzentration festzustellen ist, werden üblicherweise Biomassefeuerungen mit genügend Abstand rechts vom optimalen Betriebspunkt geführt. Durch Regelvorgänge, Leistungsänderungen oder durch die Inhomogenität des Brennstoffes können Schwankungen des Luftüberschusses auftreten. Dadurch ergibt sich für die Praxisanwendung ein wichtiges Qualitätskriterium, den Betriebsbereich. Dieser ist dadurch definiert, dass bei einem Anstieg der Luftzahl die Kohlenmonoxidkonzentration nicht bzw. nur sehr gering ansteigt. Daher sollte dieser Betriebsbereich bei Biomassefeuerung so groß wie möglich ausfallen.

Die Herausforderung ist nun, eine verlässliche Vorhersage der CO- λ -Charakteristik mithilfe der CFD-Simulation zu erstellen, ohne eine Messung durchführen zu müssen. Danach kann aus verbrennungstechnischer Sicht eine Auswahl berechneter konstruktiver Ansätze für eine qualitativ hochwertige Feuerung nach folgenden Kriterien erfolgen:

- hoher Wirkungsgrad
→ λ nahe eins
- Emissionen minimieren
→ CO nahe null
- großer Betriebsbereich.

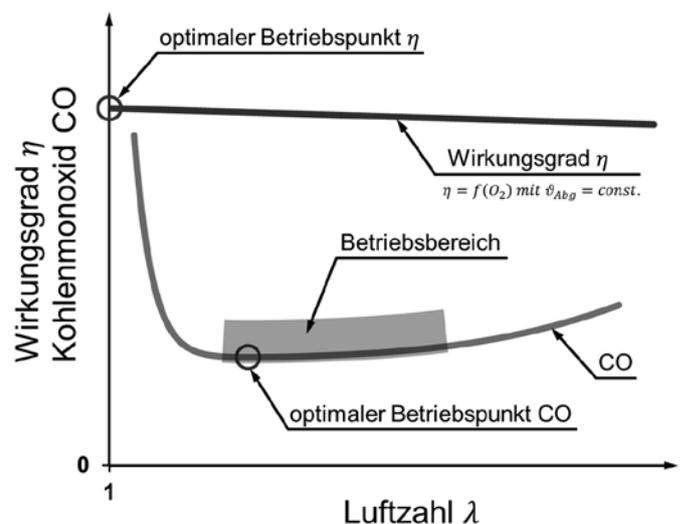


Abbildung 2 – Verbrennungstechnische Qualitätskriterien einer Biomassefeuerung.

Die „Holzverbrennung“ in der CFD-Simulation

Die komplexen Vorgänge bei der Holzverbrennung müssen für die CFD-Simulation in ein beherrschbares, vereinfachtes mathematisches Modell überführt werden. Dabei wird die reale Reaktion bei der Holzverbrennung als eine „Zwei-Schritt-Reaktion“ von Methan beschrieben. Hierbei reagiert im ersten Schritt Methan (CH_4) mit Sauerstoff (O_2) zu Kohlenmonoxid (CO) und Wasser (H_2O). Das Kohlenmonoxid reagiert dann im zweiten Schritt mit Sauerstoff zu Kohlendioxid (CO_2). Dafür bieten kommerzielle CFD-Simulationsprogramme entsprechende Reaktionsmodelle zur Auswahl an, wobei hier das Finite-Rate / Eddy-Dissipation Modell (EDM) verwendet wurde. In diesem Reaktionsmodell werden in jeder Rechenzelle zwei Reaktionspfade parallel gerechnet. ▷

Der mathematische Reaktionsmechanismus für den Reaktionspfad 1 ist dabei temperaturkontrolliert, der für Reaktionspfad 2 Mischungskontrolliert. Der temperaturkontrollierte Pfad wird anhand von Faktoren parametrisiert und ist in einschlägiger Literatur gut dokumentiert.

Der Mischungskontrollierte Reaktionspfad 2 kann individuell über einen Faktor A_{Mag} eingestellt werden. Richtwerte für den Faktor A_{Mag} sind für Einzelraumfeuerstätten nicht in der Literatur zu finden. In jeder Rechenzelle findet bei jedem Rechenschritt eine Minimumsabfrage statt und der Reaktionspfad mit der geringsten Reaktionsgeschwindigkeit wird für die weitere Berechnung gewählt. Dies wird für jede Rechenzelle im Modell durchgeführt, bei der hier vorgestellten Einzelraumfeuerstätte wurde diese bei ca. 8,6 Millionen Zellen durchgeführt.

Abbildung 3 zeigt schematisch den Einfluss auf die Verteilung der einzelnen Reaktionsmechanismen über das Strömungsfeld in der Einzelraumfeuerstätte auf. Diese Verteilung der einzelnen Pfade ist abhängig von der Wahl des Faktors A_{Mag} im Mischungskontrollierten Reaktionsmechanismus. Wird ein kleiner Wert für den Faktor A_{Mag} gewählt, findet eine Berechnung in der Simulation überwiegend temperaturkontrolliert statt, und es werden relativ hohe Konzentrationen von Kohlenmonoxid berechnet. Wird hingegen ein großer Wert für den Faktor A_{Mag} gewählt, erfolgt die berechnete Reaktion in der Simulation überwiegend Mischungskontrolliert und es werden geringere Konzentrationen von Kohlenmonoxid errechnet.

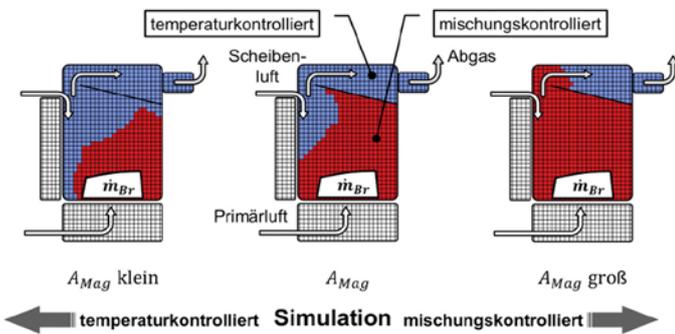


Abbildung 3 – Schematische Darstellung des Einflusses des Mischungskontrollierten Faktors A_{Mag} auf die Verteilung der einzelnen Reaktionspfade in der CFD-Simulation am Beispiel eines Kaminofens.

Kalibrierung der CFD-Simulationsergebnisse

Für eine verlässliche Vorhersage des Emissionsverhaltens muss die richtige Gewichtung der einzelnen Reaktionspfade in der Simulation gefunden werden. In der Vergangenheit erfolgte dies anhand von Messwerten bei einem Bezugspunkt, z. B. bei einem Restsauerstoffgehalt im Abgas von 10 Prozent. Die Erfahrung hat gezeigt, dass der Faktor A_{Mag} nicht allgemeingültig ist und für jeden Anwendungsfall, d. h., für jede einzelne Konstruktion und jeden Sauerstoffbereich, neu bestimmt werden muss. Daher kann die Gewichtung nicht direkt über den Faktor A_{Mag} im Mischungskontrollierten Reaktionspfad erfolgen.

Es konnte jedoch durch eine Normierung der Simulationsergebnisse auf einen Bezugszustand eine Funktion entwickelt werden, die diese Gewichtung der einzelnen Reaktionspfade beschreibt. Wird die Gewichtungsfunktion für jede Sauerstoffklasse individuell erstellt, können nachträglich die Ergebnisse der mittels CFD-

Simulation berechneten Kohlenmonoxidkonzentrationen korrigiert werden. Abbildung 4 zeigt schematisch die nachträgliche Kalibrierung der CFD-Simulationsergebnisse. Da aufbauend auf den Simulationsergebnissen die Gewichtung zwischen temperatur- und Mischungskontrolliertem Reaktionspfad durch einen Kalibrierfaktor neu eingestellt werden kann, sind für die Kalibrierung keine neuen Simulationsrechnungen notwendig. Durch eine Sensitivitätsanalyse konnte gezeigt werden, dass diese Methode auch bei einer Änderung der Leistung anwendbar ist. Die Leistungsänderung wird durch einen anderen Wert für den Kalibrierfaktor abgebildet.

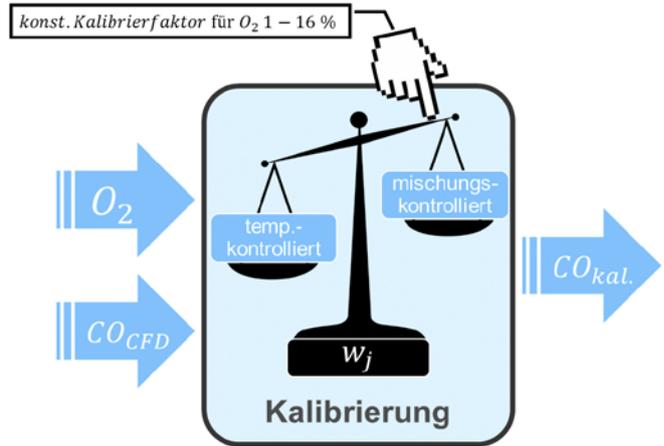


Abbildung 4 – Schematische Darstellung zur nachträglichen Kalibrierung der Simulationsergebnisse mit konstantem Kalibrierfaktor (Sauerstoffklasse 1%–16%) mittels Gewichtungsfunktion w_j .

Wird die Methode zur Kalibrierung der CFD-Simulationsergebnisse auf eine beispielhafte Einzelraumfeuerstätte angewendet, ergibt sich für die Nennwärmeleistung ein Verlauf der Kohlenmonoxidkonzentration über den Restsauerstoffgehalt im Abgas, wie in Abbildung 5 zu sehen ist (bezeichnet als „Simulation kalibriert – hohe Leistung“). Durch Änderung des Kalibrierfaktors und Anwendung nach Abbildung 4 kann ein Verlauf der CO-Konzentration über den Restsauerstoffgehalt im Abgas für eine geringere Leistung angegeben werden (bezeichnet in Abbildung 5 als „Simulation kalibriert – geringe Leistung“). Dadurch wird das

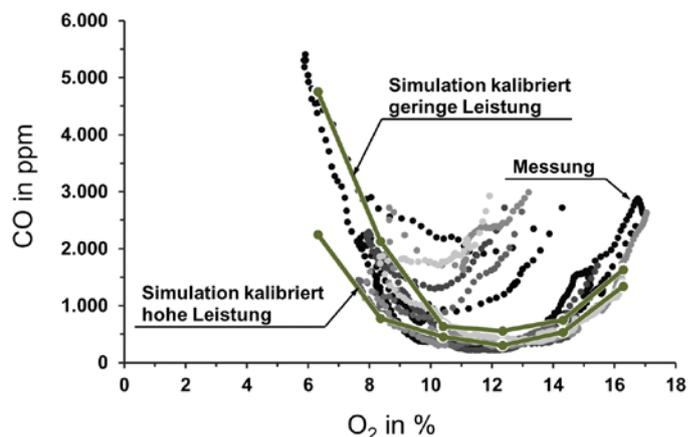


Abbildung 5 – Einzelraumfeuerstätte – mit der Gewichtungsfunktion w_j kalibrierte Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Leistungen im Vergleich zu Prüfstandsmessungen.

Betriebsverhalten der Einzelraumfeuerstätte in Abhängigkeit der Wärmeleistung und des Restsauerstoffgehaltes im Abgas deutlich. Werden die kalibrierten Simulationsergebnisse mit den Messwerten von sechs Abbränden verglichen, ist eine sehr gute Übereinstimmung der typischen Charakteristik dieser beispielhaften Einzelraumfeuerstätte festzustellen.

Es konnte eine Methode entwickelt werden, die eine Kalibrierung der Simulationsergebnisse mithilfe der Gewichtungsfunktion w_j zulässt und zu realitätsnahen Ergebnissen für die CO- λ -Charakteristik führt, wodurch eine Bewertung unterschiedlicher konstruktiver Lösungen in der Konzeptionsphase möglich wird. Somit steht jetzt die CFD-Simulation als verlässliche Methode für die Entwicklung von Biomassefeuerung kleiner und mittlerer Leistung zur Verfügung.

Modellgestützte Entwicklung einer Brennkammer

Diese an Einzelraumfeuerstätten entwickelte Methode zur Kalibrierung von Simulationsergebnissen wurde erstmals für die Bewertung von Brennkammern für einen Stückholzkessel angewendet. Auch hier war eine Beurteilung des Emissionsverhaltens bisher nur anhand von Abbrandversuchen mit einem Prototyp möglich. Durch die neue Methode ist eine Beurteilung des Emissionsverhaltens für jedes Brennkammerkonzept mithilfe der CO- λ -Charakteristik bzw. CO-O₂-Charakteristik ohne Prototypenbau möglich. Abbildung 6 zeigt die CO-O₂-Charakteristiken unterschiedlicher Brennkammerdesigns für Stückholzkessel, die durch die Kalibrierung von Simulationsergebnissen nach Abbildung 4 berechnet wurden. Hierbei wurde für alle Brennkammervarianten ein konstanter Kalibrierfaktor verwendet.

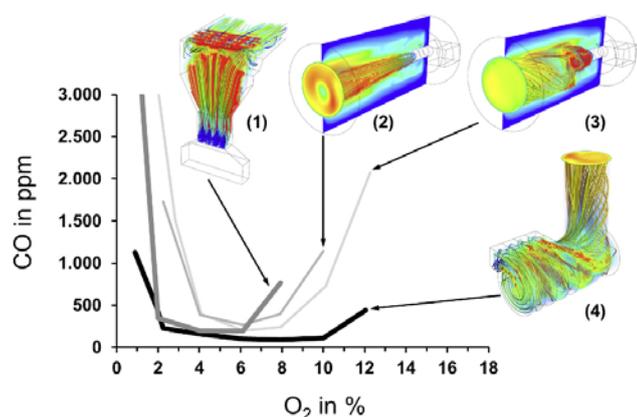


Abbildung 6 – CO-O₂-Charakteristik unterschiedlicher Brennkammerdesigns für einen Stückholzkessel. Berechnung mithilfe kalibrierter Simulationsergebnisse (1: Linearbrennkammer, 2: Tangentialbrennkammer mit Sekundärluft, 3: Tangentialbrennkammer mit optimierter Sekundärluft, 4: Rotationsbrennkammer).

Die Brennkammerdesigns unterscheiden sich deutlich, sowohl hinsichtlich der Geometrie als auch der Strömungsführung. Anhand der beschriebenen drei Qualitätskriterien (λ nahe eins, CO nahe null und großer Betriebsbereich) und der berechneten CO-O₂-Charakteristik kann eine Auswahl des optimalen Brennkammerkonzeptes erfolgen. Die Linearbrennkammer (1) zeichnet sich durch geringe CO-Konzentrationen bei einem Restsauerstoffgehalt im Abgas von ca. 2–6 Prozent bei einem relativ einfachen konstruktiven Auf- ▷

- ▶ Sanitär
- ▶ Klempnerei
- ▶ Heizung
- ▶ Lüftung, Klima, Kälte, Kachelöfen
- ▶ Sonnenenergie, Biogas und Umwelt
- ▶ Gas- u. Flüssiggasversorgung
- ▶ Küchen
- ▶ Fachrechnen
- ▶ Fachzeichnen
- ▶ Meister- und Gesellenprüfung
- ▶ Kalkulation und Betriebsführung
- ▶ Normen, Gesetze und Vorschriften
- ▶ Messekataloge
- ▶ Fachzeitschriften



Jetzt versandkostenfrei bestellen unter:
www.stobbel-verlag.de/shop



STROBEL VERLAG GmbH & Co KG
 Zur Feldmühle 9–11
 59821 Arnsberg
 Tel. 02931 8900 0
 Fax 02931 8900 38
www.stobbel-verlag.de

bau aus. Die Rotationsbrennkammer (4) zeichnet sich durch geringe Restsauerstoffgehalt im Abgas von ca. 2–10 Prozent aus, allerdings mit einem höheren konstruktiven Aufwand. Alle Brennkammern wurden als Prototypen in Stückholzkesseln aufgebaut und auf dem Prüfstand vermessen. In Abbildung 7 ist beispielhaft der Verlauf der aus kalibrierten Simulationsergebnissen berechneten CO-O₂-Charakteristik im Vergleich zu Messergebnissen für die Linearbrennkammer gezeigt. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung von berechneter und gemessener CO-O₂-Charakteristik zu erkennen.

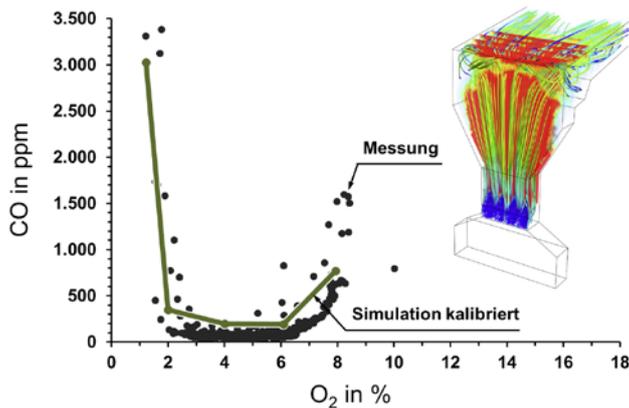


Abbildung 7 – Stückholzkessel mit Linearbrennkammer – mit der Gewichtungsfunktion w_j kalibrierten Simulationsergebnisse bei Nennwärmeleistung im Vergleich zu nachträglich durchgeführten Prüfstandsmessungen.

Den Verlauf der aus Simulationsergebnissen berechneten CO-O₂-Charakteristik für die Rotationsbrennkammer zeigt die Abbildung 8. Bei der Rotationsbrennkammer fand zuerst eine Kalibrierung der Simulationsergebnisse für Nennwärmeleistung statt (bezeichnet mit „Simulation kalibriert hohe Leistung“). Danach wurde für einen Betriebspunkt der Teillast eine weitere CFD-Simulation durchgeführt (roter Punkt, bezeichnet mit „Simulation Teillast“). Anschließend wurde der Kalibrierfaktor nach der Methode aus Abbildung 4 dahingehend geändert, dass der Kurvenverlauf der kalibrierten Simulationsergebnisse für eine hohe Leistung durch den roten

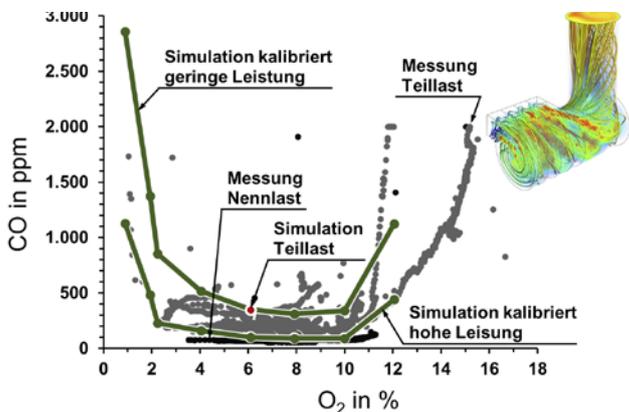


Abbildung 8 – Stückholzkessel mit Rotationsbrennkammer – mit der Gewichtungsfunktion w_j kalibrierten Simulationsergebnisse bei Nennwärmeleistung und Teillast im Vergleich zu nachträglich durchgeführten Prüfstandsmessungen.

Punkt der Teillast verläuft. Diese parallel verlaufende Kurve repräsentiert das Emissionsverhalten der Rotationsbrennkammer bei Teillast (bezeichnet als „Simulation kalibriert geringe Leistung“).

Auch bei der Rotationsbrennkammer kann eine sehr gute Übereinstimmung der kalibrierten Simulationsergebnisse mit den auf dem Prüfstand ermittelten Messwerten für die CO- und O₂-Konzentrationen, sowohl für die Nennwärmeleistung als auch für den Teillastbetrieb, festgestellt werden.

Schlussfolgerung

Durch die neu entwickelte Methode zur Kalibrierung von CFD-Simulationsergebnissen kann eine verlässliche Vorhersage des Emissionsverhaltens von Biomassefeuerung erstellt werden. Hierdurch können jetzt die Vorteile der CFD-Simulation bei der Konstruktion neuer Biomassefeuerungen bereits in der Konzeptionsphase und ohne die Anfertigung von Prototypen genutzt werden. Zum einen ergibt sich durch die Visualisierung der dreidimensionalen Strömung, sowie der Verteilung der Temperatur und Gaskonzentrationen in den Reaktionszonen als Ergebnis der Simulationsberechnungen, ein wesentlicher Vorteil im Verständnis der Funktionsweise einer Feuerung. Zum anderen bietet die verlässliche Vorhersage der CO-λ-Charakteristik der Brennraumkonzepte eine fundierte Auswahlmöglichkeit der optimalen Konzeptvariante, ohne Anfertigung von Prototypen und ohne aufwendige Vermessung auf dem Prüfstand. □

INFO

LITERATUR

Juschka, W., Struschka, M. (2012)

Untersuchungen zur Feinstaubentstehung und CO-Bildung beim Verbrennungsprozess in chargenweise betriebenen Hausbrandfeuerstätten und Entwicklung emissions- und partikelarmer Feuerungsanlagen. Endbericht zum AiF/FDBI Vorhaben Nr. 16207 N. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Bezug unter: <http://www.ifk.uni-stuttgart.de/forschung/rdl/forschungsberichte.html>

Struschka, M.; Juschka, W.; Diez Kathrin (2013)

Entwicklung von emissionsarmen häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe. Endbericht zum Verbundvorhaben FKZ-Nr. 03KB055B. Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Bezug unter: <http://www.ifk.uni-stuttgart.de/forschung/rdl/forschungsberichte.html>

Juschka, W., Struschka, M. (2015)

Neue Wege der Stickstoffoxidminderung bei der energetischen Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen. In: LANDTECHNIK - Agricultural Engineering; Band 70, Nr. 5 (2015). <http://dx.doi.org/10.1515/lt.2015.2674>

AUTOR

DIPL.-ING. (BA), M.SC.
WINFRIED JUSCHKA

Universität Stuttgart,
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik
Co-Autor: Dr.-Ing. Michael Struschka

