

Modifikation des Magnussen-Parameters des Eddy Dissipation Models für Biomasse-Rostfeuerungen mittels Heißgas-in-situ Absorptionsspektroskopie

Dipl.-Ing. Robert **Scharler**, Dipl.-Ing. Dr. Thomas **Fleckl**,
Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald **Obernberger**, Graz/A

1. EINLEITUNG

Die Verfeuerung von Biomasse ist insbesondere in Ländern mit großen Ressourcen an nachwachsenden Rohstoffen eine interessante Möglichkeit, den regionalen CO₂-Ausstoß zu senken. Die CFD-Modellierung von Biomasse-Rostfeuerungen ist einerseits wegen der Komplexität der Verbrennung fester Biomasse auf Rosten sowie andererseits wegen der turbulenten, brennbaren Strömung im verwinkelten Feuerraum besonders schwierig. Um CFD als kosteneffizientes Werkzeug zur Entwicklung und Optimierung von Biomasse-Rostfeuerungen nutzen zu können, ist eine Überprüfung relevanter Simulationsergebnisse an der Feuerung besonders wichtig. Die vorliegende Arbeit hat neben der Verifikation der Simulationsergebnisse eines „CFD-Rostfeuerungsmodells“ (Kombination von empirischer Abbrandmodellierung und CFD-Modellierung der brennbaren Feuerraumströmung) die Kalibrierung eines empirischen Parameters des in Fluent© implementierten Eddy Dissipation Models (homogene Gasphasenverbrennung in turbulenter Strömung) zum Inhalt. Dazu wurden an einer Biomasse-Rostfeuerungs Konzentrationsmessungen der Spezies CO, CO₂ und H₂O mittels Heißgas-in-situ-FT-IR Absorptionsspektroskopie durchgeführt. Hier nicht detailliert dargestellte ergänzende Temperaturmessungen sind in / 5 / nachzulesen.

2. METHODIK

Die Biomasse-Flachschubrostfeuerungs (siehe Abb. 1) hat eine Kesselnennleistung von 440 kW_{th} und ist in Low-NO_x-Bauweise ausgeführt (Luftstufung). Das heißt, diese ist unterteilt in eine sauerstoffarme Primärverbrennungszone ($\lambda < 1$) zur NO_x-Reduktion durch Primärmaßnahmen und eine Sekundärverbrennungszone, die mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$) für einen möglichst vollständigen Rauchgasausbrand betrieben wird. Ein wichtiges Merkmal ist eine gestufte Rauchgasrezirkulation (Zufuhr von rezirkuliertem Rauchgas unter und über dem Rost) zum Zweck einer optimierter Temperaturkontrolle und Rauchgasdurchmischung.

a) Modellierung des Abbrandes der festen Biomasse am Rost

Eine detaillierte mathematische Betrachtung des Abbrandes der festen Biomasse am Rost ist numerisch sehr aufwändig. Aus diesem Grund wurden die vom Brennstoffbett in das Rauchgas übergehenden Stoff- und Energieströme als Randbedingungen für die nachfolgende CFD-Simulationen mit einem einfachen, empirischen Bilanzierungsmodell berechnet (Details siehe / 5 /). Das Modell besteht im wesentlichen aus drei Teilen. Basis ist die Vorgabe von eindimensionalen Profilen entlang des Rostes, die den Abbau der Brennstoffkomponenten C, H, O sowie die Trocknung

des Brennstoffbettes (Wasserdampffreisetzung) beschreiben (Teil 1). Mit der Definition von Konversionsparametern, welche die Umwandlung der Brennstoffkomponenten C, H, O in die Rauchgaskomponenten CH₄, CO, CO₂, H₂, H₂O, O₂ festlegen (Teil 2), wird die Bilanzierung der in das Rauchgas übergehenden Stoff- und Energieströme entlang des Rostes ermöglicht (Teil 3).

b) CFD-Simulation der brennbaren Feuerraumströmung

Das Berechnungsgebiet umfasst die Brennkammer von der Oberfläche des Brennstoffbettes bis zum Eintritt in den Wärmetauscher, wobei zur Lösung des diskretisierten Gleichungssystems der unstrukturierte Solver Fluent 5 verwendet wurde. Zur Modellierung der Brennkammerströmung wurden das Realizable k-ε Model (Turbulenz), das Discrete Ordinates Model (Strahlung) sowie das Eddy Dissipation Model (EDM) von Magnussen und Hjertager / 3 / (Gasphasen-Verbrennung) in Kombination mit einem von Brink vorgeschlagenen globalen Methan 3-Schritt Mechanismus (CH₄, CO, H₂, CO₂, H₂O, O₂) / 1 / eingesetzt. Bei Kombination des EDM mit Reaktionskinetik wird die Rate des Brennstoffverbrauches als limitierender (langsamster) Schritt der Zerfallsraten von Brennstoff-, Sauerstoff- und Produktwirbeln sowie einem Kinetikterm (hier für den CO-Oxidationsschritt) ohne die Berücksichtigung des Einflusses von turbulenten Fluktuationen berechnet:

$$\overline{R_{br}} = MIN \left(\underbrace{A_{mag} \frac{\overline{\tilde{\epsilon}}}{k} \tilde{Y}_{br}}_{\text{Brennstoffwirbelzerfall}}, \underbrace{A_{mag} \rho \frac{\overline{\tilde{\epsilon}}}{k} \frac{\tilde{Y}_{ox}}{r_f}}_{\text{Sauerstoffwirbelzerfall}}, \underbrace{A_{mag} B_{mag} \rho \frac{\overline{\tilde{\epsilon}}}{k} \frac{\tilde{Y}_{prod}}{(1+r_f)}}_{\text{Produktwirbelzerfall}}, \underbrace{\overline{R_{br,kin}}}_{\text{Kinetikterm}} \right) \quad [kg / m^3 s] \quad (1)$$

Der empirische Parameter A_{mag} des EDM ist anwendungsabhängig und wird in der Literatur üblicherweise mit 0,5 - 4,0 angesetzt. Erste Vergleiche mit konventionellen CO-Emissionsmessungen an einer Biomasse-Rostfeuerung in einer vorangegangenen Arbeit haben gezeigt, dass der ursprünglich vorgeschlagene Wert von 4,0 / 3 / für den vorgesehenen Anwendungszweck zu hoch ist (siehe / 4 /). Zum Zweck einer Kalibrierung wurde dieser im Bereich von 0,6 – 2,0 variiert. Die Proportionalitätskonstante B_{mag} (= 0,5) im Term zur Berechnung des Produktwirbelzerfalles wird üblicherweise nicht verändert. Weiters ist die Produktwirbelzerfallsrate in Biomasse-Rostfeuerungen aufgrund hoher Konzentrationen der Reaktionsprodukte (CO₂, H₂O) im Vergleich zu jenen des Brennstoffes (CH₄, CO, H₂) und des Sauerstoffes nahezu im gesamten Feuerraum nicht prozesslimitierend.

c) Heißgas-in-situ-FT-IR-Absorptionsspektroskopie im Feuerraum

Die Bestimmung von in-situ Konzentrationen der Rauchgasspezies CO, CO₂, und H₂O erfolgte mittels FT-IR Absorptionsspektroskopie an drei verschiedenen Stellen der Brennkammer (I, II, III – siehe Abb. 1), wobei über den Messpfad (quer durch den Feuerraum) gemittelte Konzentrationen erhalten wurden. Für eine Erläuterung des Messverfahrens sowie der Anwendung der Heißgas-in-situ Verbrennungsdiagnostik in Feuerräumen sei auf die Arbeit von Fleckl / 2 / verwiesen. Der hohe

liegen bis auf die CO₂-Messwerte an der Öffnung I sowie an der Öffnung III für Spanplatten innerhalb der Fehlergrenzen. Die Abweichung für Öffnung III (Spanplatten) resultiert aus einer Überschreitung der oberen Messgrenze der Heißgas-FT-IR-Messtechnologie für CO₂ von etwa 12 Vol%. Die Abweichungen für Öffnung I sind auf Fehler in der Abbrandmodellierung und die bereits diskutierten Schwierigkeiten beim praktischen Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen zurückzuführen (hier treten die größten räumlichen Gradienten verbunden mit zeitlichen Schwankungen auf). Die Übereinstimmung von Messwerten und Simulationsergebnissen hinsichtlich der Verbrennungs-Endprodukte CO₂ und H₂O ist unter Berücksichtigung der Schwierigkeiten beim Vergleich der Ergebnisse als sehr gut zu beurteilen. Besonders wichtig für die Entwicklung und Optimierung von Biomasse-Rostfeuerungen ist die Vorhersage der CO-Konzentration im Rauchgas. Einerseits ist die Einhaltung vorgegebener CO-Grenzwerte sehr wichtig, andererseits ist Kohlenmonoxid die brennbare Hauptkomponente / 5 /, deren Umsatz im wesentlichen die Temperaturprofile in der Feuerung bestimmt. Brennbar Zwischenprodukte der Verbrennung wie CO sind aber wesentlich schwieriger vorherzusagen als die Endprodukte H₂O und CO₂. Wird der Magnussen-Parameter variiert, führen niedrigere Werte tendenziell zu kleineren Reaktionsraten (Wirbelzerfallsraten), was sich in niedrigeren Rauchgastemperaturen und höheren lokalen CO-Konzentrationen äußert. Für die Öffnungen I und II führt ein eher niedriger Parameter im Bereich 0,6 – 0,8 zu einer besseren Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Für Öffnung III sind die mit einem Magnussen-Parameter von 0,6 vorhergesagten CO-Konzentrationen zu hoch, die Werte 0,8 – 1,0 führen zu einer besseren Übereinstimmung mit den Messwerten. Größere Abweichungen von Mess- und Simulationsergebnissen über dem Rost (Öffnung I) deuten wieder auf Schwachstellen bei der Abbrandmodellierung bzw. auf einen schwierigen Resultatvergleich aufgrund von großen CO-Gradienten an der Messposition I hin. Ein ergänzender Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen an den Messpositionen I – III ergab für $A_{mag} = 0,6 - 1,0$ die besten Übereinstimmungen / 5 /.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mittels in-situ Messung der Rauchgaskomponenten CO, CO₂ und H₂O (sowie der Rauchgastemperatur) an einer Biomasse-Rostfeuerungen wurden ein CFD-Rostfeuerungsmodell überprüft und die Magnussen-Konstante A_{mag} des EDM kalibriert. Die in-situ Bestimmung der Rauchgaszusammensetzung ist einer extraktiven Messung deutlich überlegen und besonders gut für die Verifikation der CFD-Simulationsergebnisse von Feuerraumströmungen geeignet, da mögliche chemische Reaktionen im beprobten Rauchgas durch das nicht notwendige Abkühlen und Filtern entfallen. Durch schwankende Strömungszustände verbunden mit Gradienten und nichtlinearen physikalisch/chemischen Zusammenhängen ist ein überdies punktueller Vergleich der gemittelten Messwerte mit den Simulationsergebnissen stationärer Lastfälle schwierig und nur bedingt möglich.

Die Übereinstimmung von Messung und Rechnung hinsichtlich Spezieskonzentrationen (und Temperatur) ist unter diesen Gesichtspunkten für den Anwendungszweck der Entwicklung und Optimierung von Biomasse-Rostfeuerungen durch Trendanalysen als ausreichend zu bezeichnen. Durch die Modifikation des ursprünglich vorgeschlagenen Wertes von $A_{\text{mag}} = 4,0$ konnte darüber hinaus eine quantitative Verbesserung der simulierten Temperatur- und Speziesprofile erzielt werden. Für Biomasse-Rostfeuerungen wird ein Wert im Bereich von 0,6 – 1,0 vorgeschlagen. Mit einem Wert von 0,6 werden die CO-Konzentrationen im Ausbrandbereich etwas zu hoch vorhergesagt, bieten aber eine ausreichende Sicherheit bei der Entwicklung von Biomasse-Rostfeuerungen im Hinblick auf eine Einhaltung von CO-Emissionsgrenzwerten. Eine Feinabstimmung ist aufgrund von Schwierigkeiten im Vergleich mit Messungen im realen Betriebsfall sowie aufgrund von möglichen Fehlern bei der Modellierung (Abbrand- und CFD-Modellierung) nicht sinnvoll. Fehler aller Teilmodelle gehen bei der Kalibrierung des Magnussen-Parameters mit ein. Beim Vergleich mit Messungen haben sich vor allem Fehler bei der empirischen Abbrandmodellierung gezeigt. Die Abweichungen der Simulationsergebnisse von den gemittelten Messwerten sind über dem Brennstoffbett am größten, stromabwärts nehmen diese ab.

Das verifizierte Rostfeuerungsmodell wird derzeit erfolgreich für die Entwicklung und Optimierung von Biomasse-Rostfeuerungen eingesetzt. Da dabei die gesicherte Einhaltung von vorgeschriebenen CO-Emissionsgrenzwerten von großer Bedeutung ist, wird ein Magnussen-Parameter von 0,6 des EDM verwendet. Eine fundamentalere Beschreibung des Abbrandes am Rost sowie der Wechselwirkung von Turbulenz und Verbrennungschemie zur genaueren Berechnung der Spezies- und Temperaturprofile in der Brennkammer hat beträchtlich erhöhte Rechnerzeiten zur Folge. Implementierungen von verbesserten Teilmodellen für anwendungsorientierte Parameterstudien werden unter diesem Aspekt durchgeführt. Derzeit wird ein Eddy Dissipation Concept (turbulente Gasphasenverbrennung) in Kombination mit einem unter Bedingungen in einer Biomasse-Rostfeuerung entwickelten und validierten globalen Methan 3-Schritt Mechanismus implementiert.

LITERATUR

- / 1 / BRINK, Anders, 1998: Eddy Break-Up based models for industrial diffusion flames with complex gas phase chemistry. Dissertation an der ABO Akademi University, Finnland, ISBN 952-12-0302-1
- / 2 / FLECKL, Thomas, 2001: Verbrennungsdiagnostik an Biomasserostfeuerungen mittels FT-IR in-situ Absorptionsspektroskopie, Dissertation an der Technischen Universität Graz, Österreich
- / 3 / MAGNUSSEN, B. F., HJERTAGER, B. H., 1976: On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In: Proceedings of the 16th Symp. (Int.) on Combustion, pp. 719-729, The Combustion Institute (Ed.), Pittsburgh, USA
- / 4 / SCHARLER R., OBERNBERGER I., 2000: Numerical optimisation of biomass grate furnaces. In: Proceedings of the 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, April 2000, Porto, Portugal, INFUB (Ed.), Rio Tinto, Portugal, ISBN-972-8034-04-0
- / 5 / SCHARLER, Robert, 2001: Entwicklung und Optimierung von Biomasse-Rostfeuerungen durch CFD-Analyse, Dissertation an der Technischen Universität Graz, Österreich

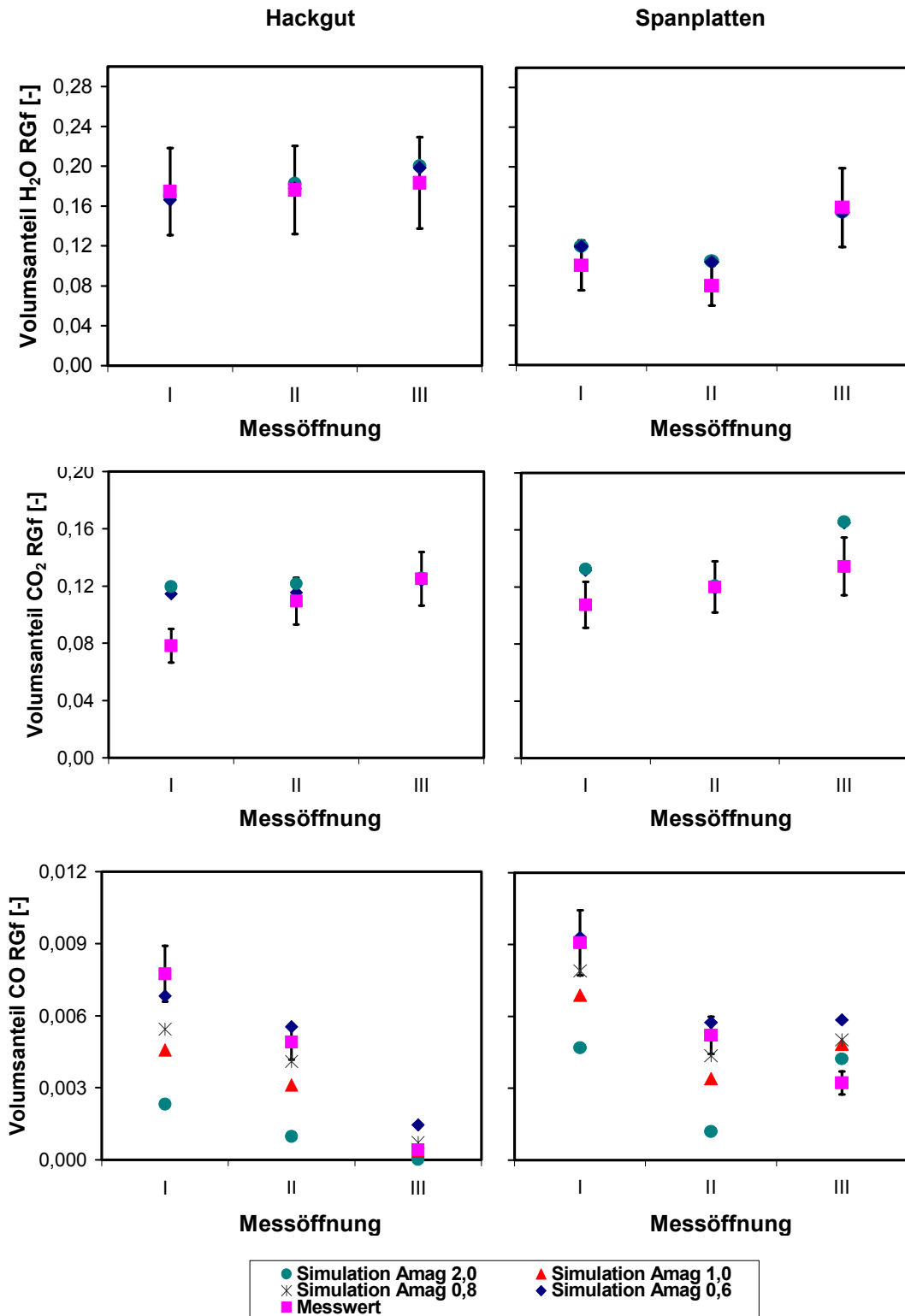


Abbildung 2: Lokale Spezieskonzentrationen in Biomasse-Rostfeuerungen – Vergleich von gemittelten Heißgas-in-situ-FTIR-Messwerten und Simulationsergebnissen für die Brennstoffe Hackgut und Spanplatten

Erläuterungen: verwendete Magnussen-Parameter: Amag = 0,6, 0,8, 1,0, 2,0; RGf....auf das feuchte Rauchgas bezogene Konzentrationen