

Depositionsmodellierung in Biomasse-befeuerten Kesseln mittels CFD

DI Dr. **Robert Scharler**, Austrian Bioenergy Centre GmbH, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz/Österreich; DI **Markus Jöller**, DI **Georg Hofmeister**, Austrian Bioenergy Centre GmbH; Dr.-Ing. **Markus Braun**, Dipl.-Chem. **Stefan Kleditzsch**, Fluent Deutschland GmbH, Darmstadt; Prof. DI Dr. **Ingwald Obernberger**, Austrian Bioenergy Centre GmbH, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz/Österreich

1 Kurzfassung

Am Austrian Bioenergy Centre wird ein CFD-Modell zur Vorhersage fester Flugaschedepositionen in Biomasse-Festbettfeuerungsanlagen in Abhängigkeit der Brennstoffzusammensetzung und des Anlagenbetriebszustandes entwickelt, um damit verbundene, kostenintensive Probleme bestmöglich vermeiden zu können. Zum derzeitigen Entwicklungsstand ist die zeitabhängige Beschreibung von Depositionsbildungen durch die Ablagerung grober Flugaschepartikel und die Kondensation aschebildender Dämpfe an den Feuerungs- und Kesselwänden (Strahlungsteil) möglich. Die lokale Zusammensetzung der aschebildenden Dämpfe (mit Ausnahme kinetisch limitiert gebildeter Schwefelverbindungen) sowie der Zustand des Wandbelages werden unter der Annahme thermodynamischen Gleichgewichts berechnet. Um die Simulationszeiten für ingenieurmäßige Anwendungen handhabbar zu machen, wurden die Gleichgewichtsberechnungen mit dem ISAT-Algorithmus zur Laufzeit-Tabellierung der Berechnungsergebnisse gekoppelt. Das Depositionsmodell wurde erfolgreich für Testläufe an einer Biomasse-Rostfeuerung (Brennstoff Altholz) getestet und wird derzeit mittels durchgeführten Depositionssonden-Messungen einer umfangreichen Validierung unterzogen.

2 Einleitung und Zielsetzung

Die Autoren entwickelten bereits mehrere Biomasse-Rostfeuerungen erfolgreich mittels CFD im Hinblick auf verbrennungsbedingte Problemstellungen (Optimierung von Rauchgas-Durchmischung und Ausbrand, Absenkung lokaler Temperaturspitzen, etc.) 0. Die Vorhersage von Aschedepositionen in Biomasse-Feuerungen und Kesseln ist aufgrund der Tatsache, dass diese zu einer erheblichen Reduktion der Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen führen, e-

benfalls von großer Relevanz, war jedoch bisher eine ungelöste Problemstellung. Deshalb wurden bereits von verschiedenen Autoren (0,0,0,0) CFD-basierte Depositionsmodelle entwickelt. Die Modelle sind jedoch aufgrund der sehr einfachen Beschreibung der Aschechemie in ihrer Anwendung limitiert oder für ingenieurmäßige Anwendungen zu zeitaufwändig. Um die große Bandbreite an biogenen Brennstoffen mit ihren unterschiedlichen Zusammensetzungen zu berücksichtigen, ist eine detaillierte Beschreibung der Aschechemie sowie der relevanten Transport- und Depositionsbildungsmechanismen notwendig. Am Austrian Bioenergy Centre wird ein für ingenieurmäßige Anwendungen einsetzbares CFD-Modell (flexibel, geringe Berechnungszeiten) zur zeitabhängigen Beschreibung von Aschedepositionen in Biomasse-Kesseln in Abhängigkeit der Betriebsparameter sowie der Brennstoffzusammensetzung erarbeitet. Der Entwicklungsstand sowie erste Ergebnisse der Nachrechnung von Testläufen an einer Biomasse-Rostfeuerung mit einer Kesselnennleistung von 440 kW_{th} werden in dieser Arbeit dargestellt und diskutiert.

3 Modellierung

Die Simulation des Abbrandes am Brennstoffbett erfolgt mit einem empirischen Modell für Biomassebrennstoffe basierend auf experimentellen Untersuchungen [0]. Mit diesem Modell werden die Profile von Geschwindigkeit, Temperatur und Zusammensetzung des im Brennstoffbett freigesetzten Rauchgases als Randbedingung für die nachfolgende CFD-Simulation errechnet. Dieses Modell wurde für die Depositionsmodellierung um die Freisetzung der gasförmigen aschebildenden Spezies sowie der aufgewirbelten Flugaschepartikel (Unterteilung in Größenklassen und chemische Klassen), basierend auf Flugascheanalysen, Aschebilanzen um Biomasse-Feuerungsanlagen sowie auf Annahmen, erweitert.

Das CFD-Simulationsgebiet umfasst Feuerung und Flammrohr des Kessels (Strahlungsteil) von der Oberfläche des Brennstoffbettes bis zum Eintritt in die Rauchrohre (Konvektionsteil). Zur Simulation der turbulenten, reaktiven Strömung werden das Realizable k-ε Model (Turbulenzmodell), das Discrete Ordinates Model (Strahlungsmodell) sowie das Eddy Dissipation Model (EDM) (Gasphasen-Verbrennung) in Kombination mit einem globalen Methan 3-Schritt Mechanismus (CH₄, CO, CO₂, H₂, H₂O, O₂) eingesetzt.

Die Depositionssimulation erfolgt nach der Verbrennungssimulation in einem entkoppelten Berechnungsschritt. Um den Transport der Aschebildner vom Brennstoffbett an die Wände und deren Deposition zu modellieren, werden mit der Kondensation der gasförmigen Aschebildner und der Impaktion grober Flugaschepartikel zwei relevante Mechanismen berücksichtigt. Ein dritter wesentlicher Mechanismus, die Bildung und Anlagerung von Aerosolen wurde in den Berechnungen noch nicht berücksichtigt. Zur Berechnungszeiterparnis werden

anstatt der relevanten gasförmigen aschebildenden Spezies die entsprechenden Elemente mittels eines Euler'schen Ansatzes durch den Feuerraum transportiert. Die Berechnung der lokalen Gasphasenzusammensetzung erfolgt mit Ausnahme der kinetisch limitierten Sulfate (globale Kinetik, siehe 0) mittels thermodynamischer Gleichgewichtsberechnungen. Zu diesem Zweck wird das Programm Chemapp 0 in Verbindung mit den mit FactSage® standardmäßig ausgelieferten Datenbanken verwendet. Um den Berechnungsaufwand für ingenieurmäßige Anwendungen handhabbar zu machen, sind diese mittels ISAT (In-Situ Adaptive Tabulation) zur Laufzeittabellierung der Berechnungsergebnisse gekoppelt 0.

Die Kondensation der aschebildenden Dämpfe an den Wänden wird mittels Diffusionsansatz berechnet

$$\dot{N}_{cond} = \beta \cdot (c_{\infty} - c_w), \quad \text{Gleichung 1}$$

mit dem Kondensationsfluss \dot{N}_{cond} in [mol/m²s], dem Kondensationskoeffizienten β in [m/s], der Rauchgaskonzentration der Spezies in der freien Strömung c_{∞} [mol/m³] und der Sättigungskonzentration c_w an der Wand in [mol/m³]. Der Kondensationskoeffizient β wird dabei mittels Analogie zum konvektiven Wärmeübergang mit der Lewis-Gleichung ermittelt 0. Zur Berechnung der Deposition grober Flugaschenpartikel werden diese in einer statistisch signifikanten Anzahl repräsentativer Partikel an der Brennstoffbett-Oberfläche injiziert und deren Flugbahnen mittels eines Lagrange'schen Ansatzes berechnet. Turbulenzeffekte auf die Partikelbewegung werden durch eine stochastische Methode berücksichtigt.

Trifft ein Partikel schließlich auf eine Wand, wird es entweder reflektiert oder bleibt kleben. Die Haftwahrscheinlichkeit eines Partikels bei einem Aufprall p_{auf} errechnet sich aus der Haftwahrscheinlichkeit des Partikels p_{part} und der Haftwahrscheinlichkeit der Wand p_{wa} 0:

$$p_{auf} = p_{wa} \cdot p_{part} + p_{wa} \cdot (1 - p_{part}) + (1 - p_{wa}) \cdot p_{part} \cdot \quad \text{Gleichung 2}$$

Bei der Berechnung der Haftwahrscheinlichkeit (Werte von 0 bis 1) von Wandbelägen und Partikeln wird zwischen Salzen und Silikaten unterschieden, wobei hier angenommen wird, dass (grobe) Flugaschepartikel hauptsächlich aus Silikaten bestehen. Zur Bestimmung der Haftwahrscheinlichkeit von Partikeln p_{part} wird ein Viskositätsansatz verwendet, wobei sich die Haftwahrscheinlichkeit aus dem Verhältnis der Viskosität der Partikel μ_{part} zu einer Referenzviskosität μ_{ref} errechnet. Derzeit wird das Modell von Urbain et al. 0 mit einer Referenzviskosität von 10 Pas verwendet. Die Haftwahrscheinlichkeit von kondensierten Aschendämpfen (Salze) wird mittels thermodynamischer Gleichgewichtsberechnungen 0 und eines Ansatzes von Backman et al. 0 berechnet. Dabei wird angenommen, dass bei einem Schmelzanteil f_{fl} unter 0,15 die Depositionsschicht nicht haftend ist und bei einem Schmelz-

anteil f_{fi} zwischen 0,15 und 0,7 die Haftwahrscheinlichkeit p_{kond} linear von 0 bis 1 ansteigt, darüber bleibt diese bei 1. Die aufgebaute Depositionsschicht an der Wand ist eine Mischung aus kondensierten Dämpfen und abgeschiedenen Partikeln. Zur Bestimmung der effektiven Haftwahrscheinlichkeit der Wand p_{wa} wird diese massengewichtet aus den Haftwahrscheinlichkeiten p_{part} und p_{kond} errechnet.

Der zeitliche Depositionsaufbau wird schließlich mit quasistationären, automatisch bestimmten Zeitschritten berechnet, wobei auch die Änderung von Wärmetransport und Temperatur in der Feuerung berücksichtigt werden (Details siehe 0). Die Erosionswirkung durch Flugaschepartikel beeinflusst den Depositionsaufbau wesentlich, ist aber zum derzeitigen Entwicklungsstand des Modells noch nicht berücksichtigt. Ein entsprechendes Teilmodell befindet sich in Entwicklung.

4 Test des Modells – Simulation einer Biomasse-Rostfeuerung

Erste Simulationen wurden für Testläufe an einer Biomasse-Rostfeuerung in Low-NO_x-Bauweise (sauerstoffarme Primärverbrennungszone zur NO_x-Reduktion, Luftüberschuss in der Sekundärverbrennungszone für einen möglichst vollständigen Rauchgasausbrand) sowie mit einem 3-Zug Rauchrohrkessel (Kesselnennleistung 440 kW_{th}) durchgeführt (siehe Bild 1). Ein weiteres Merkmal der Feuerung ist eine gestufte Rauchgasrezirkulation (Zufuhr von rezirkuliertem Rauchgas unter und über dem Rost) zum Zweck einer optimierter Temperaturkontrolle und Rauchgasdurchmischung.

Parameter	Wert	Einheit
Brennstoffwassergehalt	35,0	Gew% FS
Aschengehalt	1,1	Gew% TS
Brennstoffmassenstrom	148	kg FS/h
Kesselleistung	391	kW _{th}
Primärluftverhältnis	0,71	-
Gesamtluftverhältnis	1,85	-
Rezirkulationsverhältnis	0,22	-
Ad. Rauchgastemperatur	930	°C
Gem. Kühlwassertemperatur	72	°C

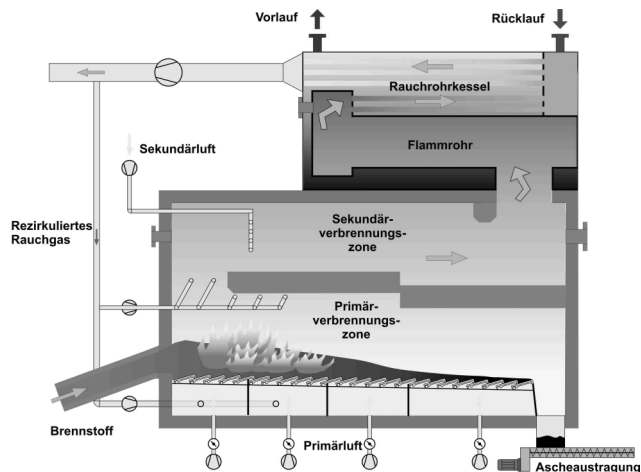


Bild 1: Darstellung der simulierten Biomasse-Feuerungsanlage sowie verwendete Betriebsparameter (FS ... Frischsubstanz, TS ... Trockensubstanz)

Aus den durchgeführten Testläufen wurde ein repräsentativer Betriebsfall mit dem Brennstoff Altholz ausgewählt, wobei der Aschegehalt und die Mengen an Cl, Pb und Zn im Brennstoff die Werte von unbehandeltem Holz beträchtlich überschreiten. Um den totalen Massenfluss der freigesetzten aschebildenden Elemente zu bestimmen, wurde eine Bilanz über die Feuerungs- und Kesselanlage inklusive der Entstaubung durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass der Ascheanteil, welcher nicht mit der Rostasche ausgetragen wird, vom Brennstoffbett freigesetzt wird. Fester und gasförmiger Anteil wurden basierend auf thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen abgeschätzt. Die so bestimmten Mengen der gasförmigen freigesetzten Elemente sowie die als Aschedämpfe berücksichtigten Spezies sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt (Gesamtmenge der gasförmigen vom Brennstoffbett freigesetzten Asche = 0,196 kg/h). Die groben Flugaschepartikel wurden für den Berechnungsfall in 4 verschiedene chemische Klassen nach Thy et al. 0 und in unterschiedliche Größenklassen eingeteilt (Tabelle 3).

Tabelle 1: Elementkonzentrationen im Brennstoff und jeweilige gasförmig freigesetzte Menge [Gew.% Brst. TS]

Element	Anteil im Brennstoff	Anteil gasförmig freigesetzt
Al	0,50e-3	-
Ca	4,32e-3	-
Cl	0,56e-3	0,55e-3
K	1,01e-3	0,58e-3
Mg	0,77e-3	-
Na	0,60e-3	0,28e-3
Pb	0,11e-3	0,10e-3
S	0,55e-3	0,36e-3
Si	1,64e-3	-
Zn	0,18e-3	0,15e-3

Tabelle 2: Für die Gleichgewichtsrechnungen berücksichtigte aschebildende, kondensierende Verbindungen

K	Na	Pb	Zn
KCl	NaCl	PbCl ₂	ZnCl ₂
(KCl) ₂	(NaCl) ₂	PbO	ZnO
K ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄		
K ₂ CO ₃			

Tabelle 3: Massenprozentanteil der vom Brennstoffbett freigesetzten Flugaschefractionen gegliedert nach Zusammensetzung (chemische Klassen) und Größenklassen (mit dem jeweiligen Durchmesser)

[µm] Zusammensetzung	Durchmesser							
	1,0	5,0	10	20	30	40	50	
3CaO+2SiO ₂	0,0	0,0	1,0	3,9	9,7	3,9	1,0	
K ₂ O+4SiO ₂	0,0	0,0	0,6	2,6	6,4	2,6	0,6	
2CaO+MgO+2SiO ₂	2,5	10,3	25,8	10,3	2,6	0,0	0,0	
Na ₂ O+2CaO+Al ₂ O ₃ +4SiO ₂	0,8	3,3	8,1	3,2	0,8	0,0	0,0	

Die Mengen der Partikel in den einzelnen chemischen Klassen wurden den Bilanzdaten angepasst. Die Größenklassen wurden basierend auf gemessenen Korngrößenverteilungen aus Biomasse-Rostfeuerungsanlagen von Flugaschen gewählt. Aus der Bilanz ergibt sich weiters die gesamte Menge der vom Brennstoffbett freigesetzten groben Flugaschepartikel, welche rund 1,62 kg/h beträgt.

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Einbindung der thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen in die CFD-Simulationen mit dem ISAT-Algorithmus führt zu einer deutlichen Reduktion der Berechnungszeit um bis zu einem Faktor 60 pro Iterationsschritt und macht dieses Modell trotz hoher Brennstoffflexibilität (detaillierte Berücksichtigung der Aschechemie) für ingenieurmäßige Anwendungen praktikabel.

Die Berechnungsergebnisse stimmen qualitativ mit Erfahrungswerten bzw. mit Beobachtungen an Biomasse-befeuerten Kesseln überein und zeigen für Primärverbrennungszone (PV), Sekundärverbrennungszone (SV) und Flammrohr (FR) aufgrund der verschiedenen Bedingungen unterschiedlichen Depositionsaufbau. Es zeigt sich, dass das Anhaften grober Flugaschepartikel in PV und SV den dominierenden Effekt darstellt, während die Kondensation aschebildender Dämpfe sowie das Anhaften grober Flugaschepartikel im gekühlten FR gleichermaßen bedeutsam sind. Dabei sei angemerkt, dass die lokale Abscheiderate durch Wandkondensation in vorliegender Berechnung tendenziell zu hoch berechnet wird, da die Bildung von Aerosolen aus den Aschedämpfen zum derzeitigen Entwicklungsstand des Modells nicht abgebildet werden kann. Da auch Erosion noch nicht berücksichtigt wird, werden vor allem die Wandstärken von Langzeit-Depositionen zu groß vorhergesagt. Im vorliegenden Fall, bei einer Anlagenlaufzeit von einer Stunde, spielt dieser Effekt jedoch eine untergeordnete Rolle.

In der PV zeigt die Simulation speziell rund um die Rezirkulationsdüsen und im Übergangsbereich zwischen erstem und zweitem Zug (Stirnseite und Decke des zweiten Zuges) einen starken Depositionsaufbau (Bild 3), während an der Decke des ersten Zuges weniger Depositionen gebildet werden. Der erhöhte Depositionsaufbau rund um die Rezirkulationsdüsen steht mit der Bildung von Wirbeln um die Düsenöffnungen, wodurch erhöhte Mengen an Dämpfen und Aschepartikeln an die Wand gefördert werden, in Zusammenhang. Eine hohe Aufprallrate von groben Flugaschepartikeln aufgrund einer starken Strömungsumlenkung verbunden mit hohen lokalen Rauchgastemperaturen ($1.150 - 1.350^{\circ}\text{C}$), d.h. einer hohen Haftwahrscheinlichkeit der Aschepartikel, verursacht die Depositionen im Übergangsbereich zwischen erstem und zweitem Zug der Anlage (vergl. Bild 5). Die Menge der kondensierten Aschedämpfe hängt von den jeweiligen Verbindungen und der Konzentration im Rauchgas ab. Für die Bildung von Sulfaten (vorzugsweise K_2SO_4 und Na_2SO_4) und ZnO ist oxidierende Rauchgasatmosphäre nötig, die in der PV lokal vorliegen kann (siehe z.B. K_2SO_4 in Bild 6). Trotzdem ist der Einfluss der kondensierten Sulfate und des ZnO auf die lokale Haftwahrscheinlichkeit in der PV gering, da der entsprechende Massenfluss zur Wand verglichen mit dem der groben Flugaschepartikel sehr klein ist (Bild 5). Kondensation von Chloriden und

Schwermetallverbindungen (mit Ausnahme von ZnO) tritt in der PV praktisch nicht auf, da deren Sättigungsdampfdrücke an der Wand die Partialdrücke im Rauchgas überschreiten (vergl. Bild 7).

Im Nahfeld der Sekundärluftdüsen (SV) kann eine ähnliche Depositionsbildung wie bei den Rezirkulationsdüsen in der PV festgestellt werden. Zudem beträgt die Rauchgastemperatur in diesem Bereich etwa 1.300 °C, wodurch entsprechender Depositionsaufbau aufgrund haftender Partikel an der Decke der SV stattfindet. Nach der Sekundärlufteindüsung tritt durch die dort auftretende oxidierende Atmosphäre vermehrt Bildung und Abscheidung von Sulfaten (Bild 6) sowie von ZnO auf. Wie bereits in der PV sind die Oberflächentemperaturen für Kondensation von Chloriden (Bild 7) und Schwermetallverbindungen (mit Ausnahme von ZnO) an den meisten Stellen zu hoch (vergl. Bild 2).

Im FR ist ein Maximum der Depositionsbildung an zwei Stellen erkennbar (Bild 4), nämlich über der Eintrittsöffnung für das Rauchgas und in der Mitte der Wendekammer zwischen FR und erstem Kesselzug. An beiden Stellen sind sowohl Aschedämpfe als auch grobe Flugaschepartikel an der Depositionsbildung beteiligt. Da die Wandtemperatur des FR im Vergleich zum Feuerraum niedrig ist (zw. 75°C und 95°C bei nahezu sauberen Wänden; vergl. Bild 2), ist die entstehende Depositionsschicht fest und daher nicht haftend. Die Haftwahrscheinlichkeit der Partikel ist zwar gegenüber jener im Feuerraum zwar gesunken (aufgrund niedrigerer Partikeltemperaturen, aber noch immer hoch genug, um zusammen mit der vorliegenden hohen lokalen Aufprallrate der groben Flugaschepartikel zum Depositionsaufbau entscheidend beizutragen (Bild 4). Die niedrige Wandtemperatur führt neben Kondensation von Sulfaten (Bild 6) zur Abscheidung von Chloriden und Schwermetallverbindungen. Der Massenfluss von KCl (repräsentativ für Chloride) ist in Bild 7 dargestellt.

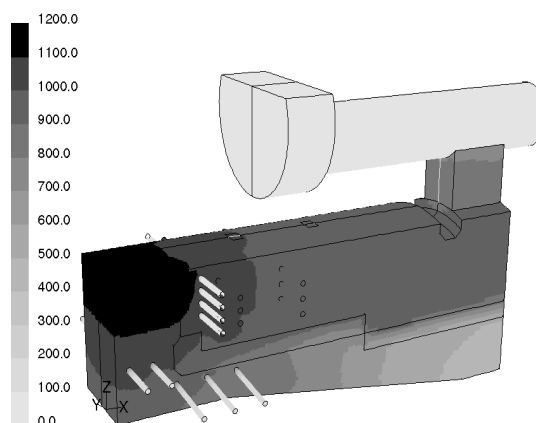


Bild 2: Berechnete Wandtemperaturverteilung [°C] in Feuerung und Flammrohr

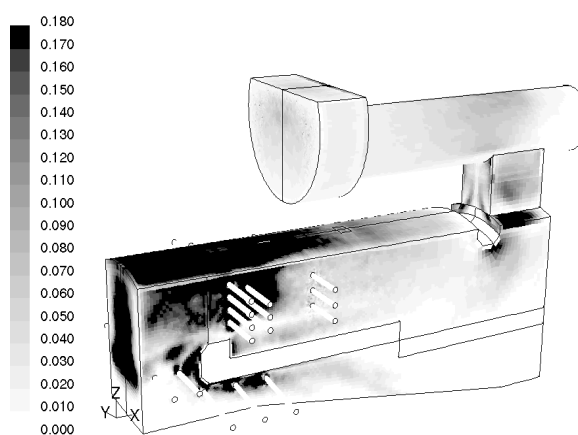


Bild 3: Berechnete Depositionsschichtdicke [mm] (Betriebszeit: 1 h)

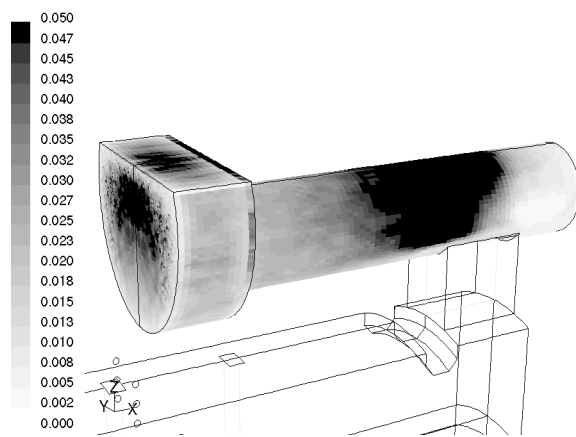


Bild 4: Berechnete Depositionsschichtdicke im Flammrohr [mm] (Betriebszeit: 1 h)

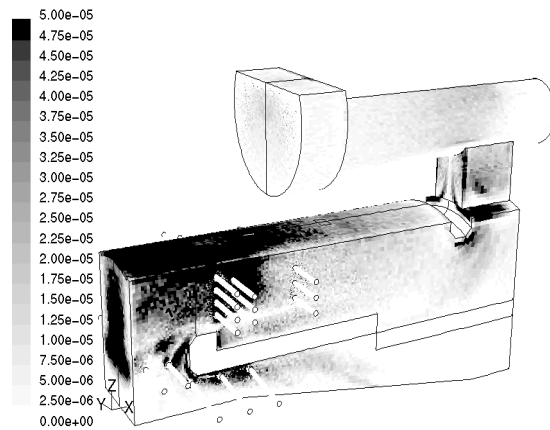


Bild 5: Berechneter Massenfluss der groben Flugaschepartikel [kg/m²s]

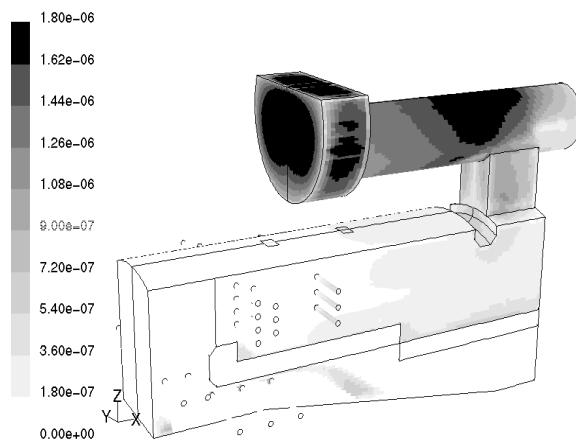


Bild 6: Berechneter Kondensationsmassenfluss von K_2SO_4 [kg/m²s]

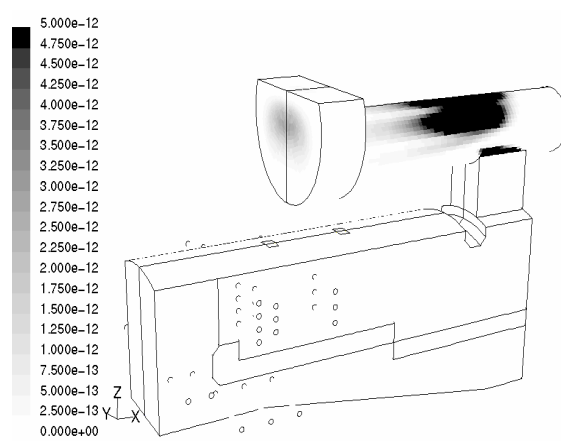


Bild 7: Berechneter Kondensationsmassenfluss von KCl [kg/m²s]

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ein CFD-Modell zur Berechnung des Depositionsaufbaus in Biomasse-Feuerungen in Abhängigkeit von Brennstoff und Betriebsbedingungen wird entwickelt und in das CFD-Programm Fluent® implementiert. Dieses Modell berücksichtigt im gegenwärtigen Entwicklungszustand die Kondensation von Aschedämpfen sowie das Anhaften grober Flugaschepartikel. Die lokale Gaszusammensetzung wird mittels thermodynamischer Gleichgewichtsberechnungen berechnet und mit ISAT-Tabellierung gekoppelt, um den Berechnungsaufwand gering zu halten. Im Rahmen einer ersten Berechnung wurde die Depositionsbildung in einer Biomassefeuerung mit Rauchrohrkessel bei der Verbrennung von Altholz simuliert. Eingabedaten für die Berechnung (Freisetzung von Aschedämpfen und Partikeln) wurden aus Messungen und darauf aufbauenden Stoffbilanzen an einer realen Anlage ermittelt.

Die Simulationsergebnisse für Feuerraum und Flammrohr der untersuchten Biomasse-Rostfeuerung stimmen qualitativ mit Erfahrungswerten bzw. Beobachtungen für verschiedene Biomasse-befeuerte Kessel im Hinblick auf die Depositionsbildung (Ort, Aufbaurate und Zusammensetzung des Wandbelages) überein. Die detaillierte Simulation des Ascheaufbaues an einer Depositionssonde in der Feuerung als Teil des Validierungsprozesses ist in Arbeit. Da die Erosion durch Flugaschepartikel das Depositionswachstum wesentlich beeinflusst, wird derzeit ein entsprechendes Modell in die Simulationsroutinen implementiert. Um die Depositionsbildung im gesamten Kessel inklusive des Konvektionsteiles vorhersagen zu können, sollen in weiterer Folge Kopplungen mit einem bereits bestehenden Modell für Wärmetauscherbündel sowie mit einem Aerosolbildungsmodell erfolgen. Damit wird ein wichtiges Simulationswerkzeug geschaffen, das den Einfluss des Brennstoffes und des Anlagenbetriebes auf das Depositionsverhalten bereits in der Konzeptionsphase der Anlage bewertbar macht und es dadurch ermöglicht, entsprechende verfahrenstechnische und feuerungstechnische Maßnahmen zu setzen, um Depositionsbildung zu reduzieren bzw. Anlagensicherheit und Reisezeit zu verlängern.

Backman, R., Hupa, M., Skrifvars, B.-J., (1997), 'Predicting superheater deposit formation in boilers burning biomass', Gupta, R.P., Wall, T.F., Baxter, L., (Eds.), Proceedings of the conference on Impact of mineral impurities in solid fuel combustion, pp. 405-416.

Eriksson, G., Hack, K., Petersen, S., (1997), 'Chemapp – a programmable thermodynamic calculation interface', Werkstoffwoche '96, <http://gtserv.lth.rwth-aachen.de/~cg/Company/DynaFrame.htm?/~cg/Company/Applications/eri97.htm>.

Kleditzsch, S., Braun, M., Scharler, R., Obernberger, I., Forstner, M., Jöller, M., Hofmeister, G., (2005), 'Effiziente Laufzeitkopplung von Gleichgewichtsprogrammen mit CFD-Werkzeugen für Anwendungen in Kraftwerkstechnik und Feuerungstechnik, Tagungsband 22. Deutscher Flammentag, September 2005, Braunschweig, Deutschland.

Forstner, M., Jöller, M., Dahl, J., Kleditzsch, S., Hofmeister, G., Scharler, R., Obernberger, I., (2005) 'CFD-Simulation of ash deposit formation in fixed bed biomass furnaces and boilers', Progress in Computational Fluid Dynamics, accepted for publication.

Isdale, J.D., Jenkins, A.M., Semião, V., Carvalho, M.G., Welbourne, M.C., (1997), 'Fouling of combustion chambers and high-temperature filters', Applied Thermal Engineering, Vol. 17, pp. 763-775.

Kær, S.K., (2001), Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers, Ph.D. thesis, Aalborg University, Aalborg, Denmark.

Mueller, C., Skrifvars, B.J., Backman, R., Hupa, M., (2003), 'Ash deposition prediction in biomass fired fluidised bed boilers – combination of CFD and advanced fuel analysis', *Progress in Computational Fluid Dynamics*, Vol. 3, pp. 112-120.

Pyykönen, J., Jokiniemi, J., (2003), 'Modelling alkali chloride superheater deposition and its implications', *Fuel Processing Technology*, Vol. 80, pp. 225-262.

Scharler, R., (2001), *Entwicklung und Optimierung von Biomasse-Rostfeuerungen durch CFD-Analyse*, Dissertation, Technische Universität Graz.

Thy, P., Jenkins, B.M., Leshner, C. E., (1999), 'High-temperature melting behavior of urban wood fuel ash', *Energy & Fuels*, Vol. 13, pp. 839-850.

Urbain, G., Cambier, F., Deletter, M., Anseau, M.R., (1981), 'Viscosity of silicate melts', *Transactions and Journal of the British Ceramic Society*, Vol. 80, pp.139-141.

Walsh, P.M., Sayre, A.N., Loehden, D.O., Monroe, L.S., Beer, J.M., Sarofim, A.F., (1990), 'Deposition of bituminous coal ash on an isolated heat exchanger tube: effects of coal properties on deposit growth', *Progress in Energy Combustion Science*, Vol. 16, pp. 327 – 346.