

Einfluss von Feuerraumgeometrie und -wandmaterial auf den Verbrennungsprozess sowie Vorhersage von gefährdeten Gebieten innerhalb einer MVA

- mit Hilfe von CFD-Simulationsrechnungen -

Dipl.-Ing. **Thomas Klasen**, Essen, Prof. Dr.-Ing. **Klaus Görner**, Essen
Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik, Universität Essen
(Leimkugelstr. 10, 45141 Essen, <http://www.ikb.uni-essen.de/luat>)

1. Abstract

Mit dem CFD-Code FLUENT[®] wurde der Einfluss von MVA-Feuerraumgeometrien auf den Verbrennungsvorgang untersucht. Bei diesen grundlegenden Studien wurde eine Modellanlage mit „Gleich-, Gegen- und Mittelstrom“ unter gleichen Randbedingungen, d.h. bei konstantem thermischen Input und gleichem Walzenrost, simuliert. Das Hauptaugenmerk war vor allem auf gleichmäßige Strömungs-, Spezies- und Temperaturverteilungen gerichtet. Zusätzlich sollte die Wirkung eines Verdrängungskörpers am Ende des Feuerraumes untersucht werden.

Die Variation verschiedener Wandmaterialien und die Vorhersage gefährdeter Gebiete im Hinblick auf Korrosion, Verschlackung und Verschmutzung rundeten diese theoretischen Untersuchungen ab. In Wandnähe können z.B. hohe CO-Konzentrationen ein Indiz für Korrosion sein, Partikelbahnen lassen tendenziell erkennen, ob und wo eine Verschmutzungs-, Verschlackungs- oder Erosionsgefahr besteht.

2. Einleitung

Gegenwärtig ist der Betrieb von Müllverbrennungsanlagen durch einen harten Wettbewerb geprägt. Durch hohe Fixkosten sind Auslastung und Verfügbarkeit wichtige Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Betrieb einer solchen Anlage. Verschmutzungen, Verschlackungen, Korrosions- und Erosionserscheinungen, die sowohl in der Brennkammer als auch den Strahlzügen auftreten, beeinflussen allerdings den Anlagenbetrieb in hohem Maße. Ausfallzeiten, Reinigungen und Reparaturkosten können schnell zu einem großem Problem für Anlagenbetreiber werden. In der Regel liegen die Kosten für einen Kessel-Stillstand bei ca. 100.000 DM/Tag. Prozess- und Anlagenoptimierungen können die Instandhaltungsintervalle aber erheblich verlängern und somit die Auslastung steigern, so dass sich ein Umbau schon häufig nach kurzer Zeit amortisiert. Für Neuanlagen sollte zusätzlich überlegt werden, welche Feuerraumgeometrie (Gleich-, Mittel- oder Gegenstromfeuerung), welcher Rosttyp, welche Roststabskühlung und welche Sekundärluftzuführung /1/ am sinnvollsten erscheint.

Die Qualitätsanforderungen an die Endprodukte einer Müllverbrennung sind in den letzten Jahren aufgrund von gesetzlichen Bestimmungen in vielen Ländern /2-3/ stetig angestiegen. Sowohl die vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Grenzwerte als auch die Reduzierung der Verschlackungs-, Verschmutzungs- und Korrosionsgefahr lassen sich im hohem Maße nur durch einen kontrollierten Verbrennungsprozess erreichen. Eine Vielzahl der vorhandenen Müllverbrennungsanlagen war für diese neuen Anforderungen nicht ausgelegt, die Folgen dieser Entwicklung wurden in nahezu allen Anlagen sichtbar :

- großflächige (HCl-CO-)Korrosion an den Membranwänden im Feuerraum und in der Nachbrennkammer
- Hochtemperatur-Korrosionen an den Überhitzerheizflächen und
- reduzierte Anlagenverfügbarkeit durch starke Verschlackungen der Kesselheizflächen.

Obwohl die Beschreibung der Verbrennung des sehr inhomogenen Brennstoffes „Müll“ sehr komplex ist, konnten in den vergangenen 3 Jahren mit Hilfe eines am LUAT entwickelten Modells und dem CFD-Code FLUENT[®] viele Anlagen simuliert und optimiert werden /4-6/.

3. Mathematische Modelle

3.1 Gasphase

Bei einer mathematischen Modellierung werden die Prozesse über ein System von partiellen Differentialgleichungen (Transportgleichungen) abgebildet. Die Gleichungssysteme werden allerdings nicht analytisch, sondern numerisch gelöst.

Die relevanten Teilprozesse bei Feuerungen sind :

- Strömung/Mischung,
- Reaktion und
- Energieaustausch (bei Verbrennungssystemen insbesondere die Strahlung).

Als Ergebnis einer solchen Berechnung erhält man 3-dimensionale Verteilungen folgender Größen:

- Geschwindigkeit/Turbulenz (Mischung),
- Spezies (C_xH_y , CO, CO₂, H₂O und O₂) und
- Temperaturen.

Detaillierte Angaben zu den allgemeinen Ansätzen und Gleichungen sind in /7/ zu finden. Diese Vorgehensweise kann erfolgreich im Feuer- und Strahlraum einer Müllverbrennungsanlage angewendet werden, weil dort praktisch eine kontinuierliche Gasphase vorliegt. Hierfür wurde das Programmpaket FLUENT[®] eingesetzt.

3.2 Modelle zur Müllverbrennung

Die in 3.1 beschriebenen Ansätze sind für das Müllbett, also für die heterogene Phase, nicht mehr einsetzbar. Gründe hierfür sind vor allem in der Stückigkeit und in der stark schwankende Zusammensetzung des Hausmülls zu suchen. Am LUAT wurde deshalb für die Müllbahn ein vereinfachtes, eindimensionales Modell entwickelt (integrale Bilanzierung), mit dem sich folgende Profile über dem Müllrost näherungsweise angeben lassen (Randbedingung für eine Gasphasensimulation) /4-6/ :

- Wärmefreisetzung (Bild 1) bzw. Temperatur,
- Spezieskonzentrationen und
- Geschwindigkeit.

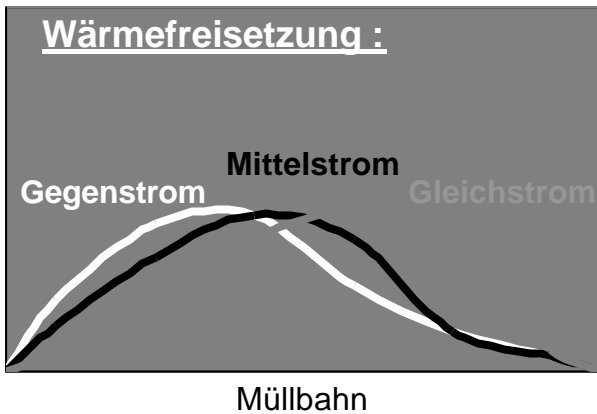


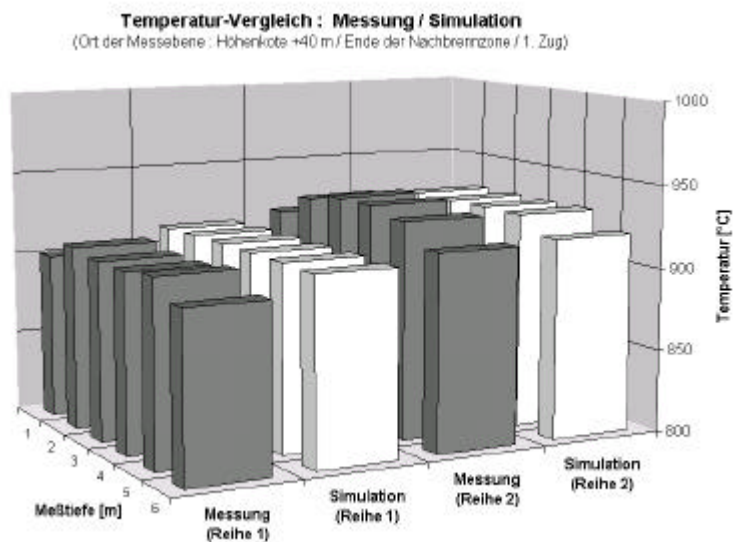
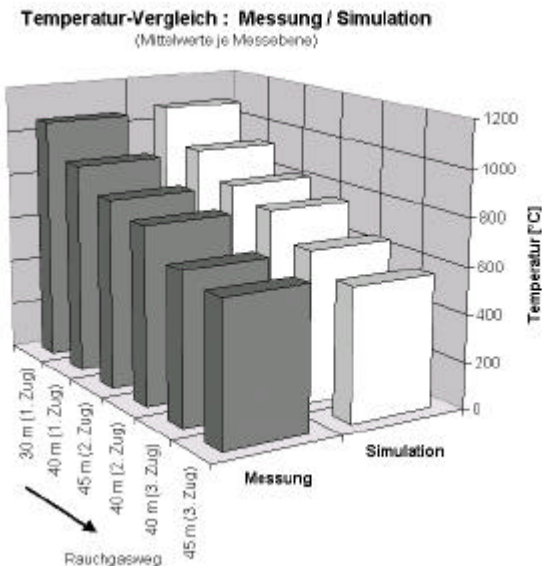
Bild 1
 Typische Wärmefreisetzungsprofile entlang der Müllbahn

Der gesamte thermische Input ist als Integral der Wärmefreisetzungsfunktion über der Müllbahn definiert. Der Anteil der fühlbaren Wärme (Temperaturprofil über der Müllbahn) beträgt etwa 70% der gesamten Wärmemenge. Die latente Wärme wird erst bei der Oxidation von CO und CxHy freigesetzt. Ausgehend von einer Verteilungsannahme für C und H des Mülls zu CO, CO₂, H₂O, O₂ und CH₄ können durch eine integrale Bilanzierung auch Speziesprofile entlang der Müllbahn bestimmt werden.

4. Simulationsergebnisse

4.1. Modellvalidierung

Zur Überprüfung der Güte des mathematischen Modells bzw. der Verteilungsannahmen wurde eine reale Müllverbrennungsanlage simuliert und mit Werten aus Netzmessungen verglichen /4/.



Bilder 2+3 Vergleich von gemessenen und vorhergesagten Temperaturen

Nicht nur das Niveau der Temperatur-Mittelwerte von insgesamt 6 Messebenen wurde "richtig" vorhergesagt (Bild 2), sondern auch Ungleichverteilungen innerhalb einer Ebene konnten gut abgebildet werden (Bild 3).

CO-Vergleich : Messung / Simulation
 (Ort der Messebene : Höhenkote +30 m / Beginn der Nachbrennzone / 1. Zug)

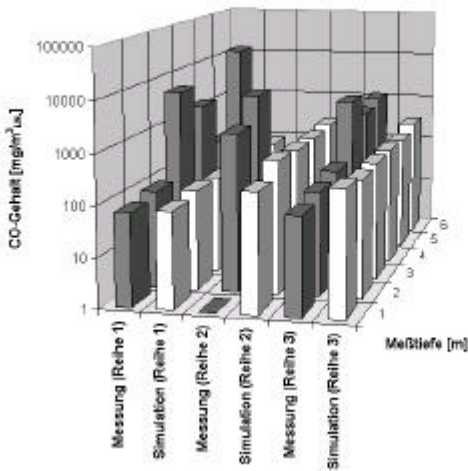


Bild 4 Vergleich von gemessenen und berechneten CO-Konzentrationen

Wesentlich schwieriger ist der Vergleich mit gemessenen CO-Konzentrationen wie Bild 4 zeigt, weil sich bei den Messungen sehr unsymmetrische und schwankungsbehaftete Werte ergaben. Da in der Regel nur eine Hälfte der Anlage numerisch berechnet wird, lassen die vorhergesagten CO-Konzentrationen die enormen unsymmetrischen Schwankungen nicht erkennen, sie liegen aber betragsmäßig mit 50 bis 400 mg/ m³_{i.N.} genau im gemessenen Bereich. Zu beachten ist zusätzlich, dass es sich bei den Messwerten um 10-min-Mittelwerte handelt, die zeitlich nacheinander aufgenommen werden.

Temperatur-Vergleich : Messung / Simulation
 (Ort der Messebene : Höhenkote +13 m / Beginn der Nachbrennzone / 1. Zug)

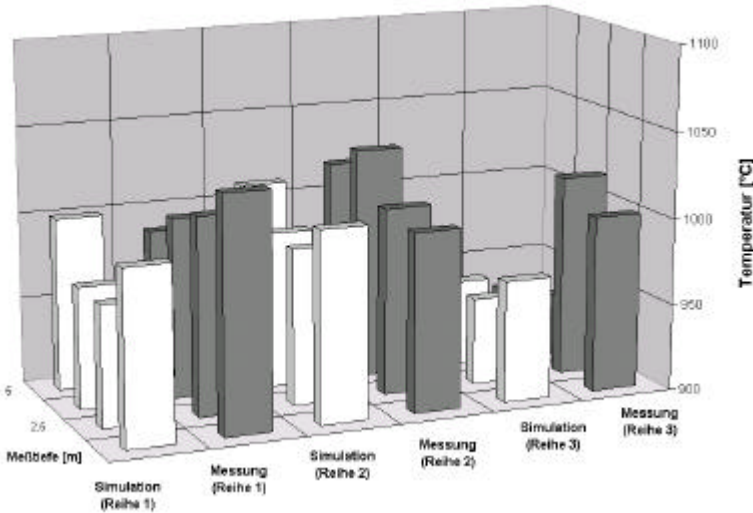


Bild 5 Vergleich von gemessenen und simulierten Temperaturen einer anderen Anlage

Beispielhaft für eine Messebene sind in Bild 5 gemessene und vorhergesagte Temperaturen einer zweiten Anlage /5/ gegenübergestellt. Auch hier zeigte sich, dass in einer Messebene sowohl die Temperaturniveaus als auch die Tendenzen relativ gut abgebildet werden können.

Die Modellparameter wurden daher für alle weiteren Studien bzw. Berechnungen nicht mehr geändert.

Die Güte des Modells war bei beiden Anlage also relativ gut, so dass das am LUAT entwickelte Modell praktisch allgemeingültig auf andere Anlagen anwendbar ist.

4.2 Feuerraumgeometrie

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Einfluss von verschiedenen Feuerraumgeometrien aufgezeigt. Es wurden die drei Konzepte „Gleich-, Gegen- und Mittelstrom“ (mit und ohne zusätzlichen Düsenbalken) untersucht.

4.2.1 Gleich-, Gegen- und Mittelstrom

Bei gleicher thermischer Leistung und gleichem Walzenrost wurden grundlegende Untersuchungen zur Gleich-, Gegen- und Mittelstromfeuerung durchgeführt. Dabei sollten vor allem die von dem Feuerraumkonzept abhängigen Unterschiede aufgezeigt werden. Strömungs-, Spezies- und Temperaturverteilungen wurden insbesondere im Hinblick auf Homogenität miteinander verglichen. Beispielhaft zeigen die Bilder 6+7 typische Ergebnisse.

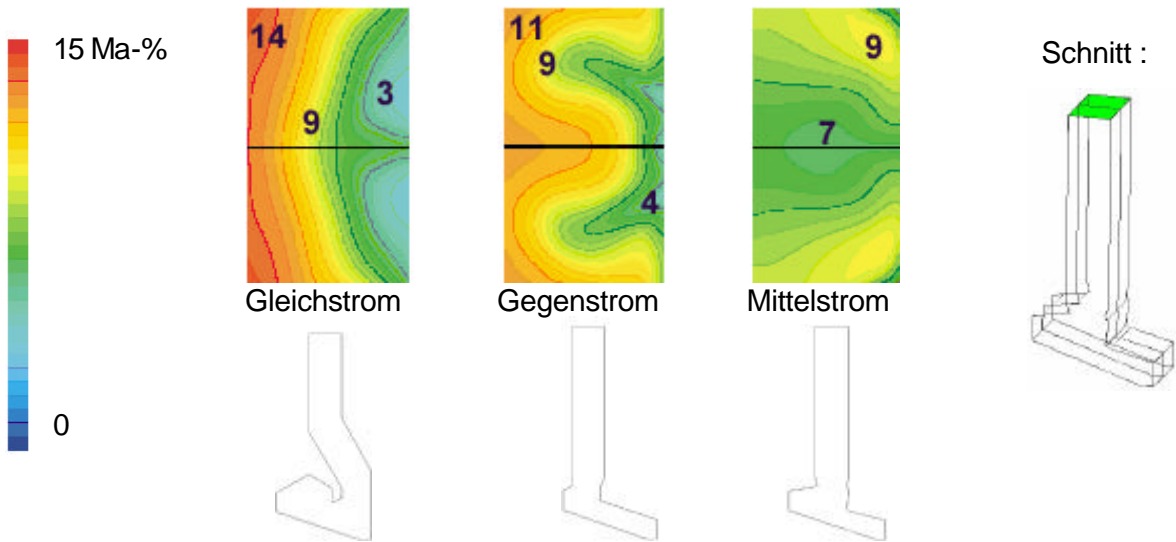


Bild 6 O₂-Konzentrationen am Ende des 1. Zuges bei verschiedenen Feuerraumkonzepten

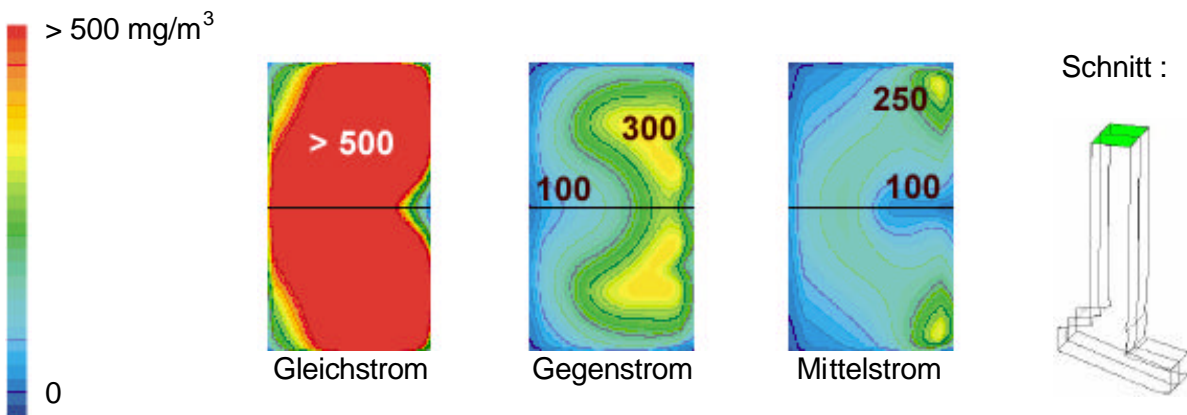


Bild 7 CO-Konzentrationen am Ende des 1. Zuges bei verschiedenen Feuerraumkonzepten

Aufgrund der Geometrie ist die jeweilige Abströmsituation aus dem Feuerraum sehr unterschiedlich. Bei der Gleichstromfeuerung legt sich die Hauptströmung z.B. schnell an die Rückseite des Schrägzuges an, was zu einer Ungleichmäßigkeit im Geschwindigkeitsfeld und somit auch in den Speziesverteilungen führt. Während die O₂-Konzentration bei der Mittelstromfeuerung bei fast konstant 8 Ma-% am Ende des 1.Zuges liegt, variiert der Gehalt bei der Gleichstromfeuerung zwischen etwa 4 und 13 Ma-% (Bild 6).

Bei der CO-Verteilung in Bild 7 wird dieser Effekt noch deutlicher. Der Ausbrand ist bei der Gleichstromfeuerung nicht vollständig, so dass im gesamten Querschnitt CO-Werte von weit über

500 mg/m³ entstehen. Bei den Konzepten „Gegenstrom“ und „Mittelstrom“ sind deutlich geringere Konzentration mit maximal 300 mg/m³ zu erkennen.

4.2.2 Einfluss eines zusätzlichen Düsenbalkens

Die Wirkung eines Verdrängungskörpers mit zusätzlichen Sekundärluftdüsen am Ende des Feuerraumes ist in den nachfolgenden Bildern 8 und 9 sehr gut zu erkennen.

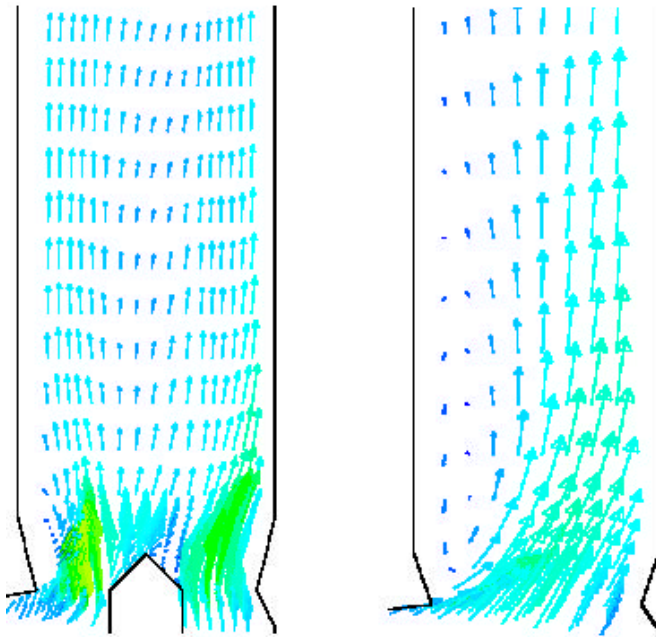


Bild 8 : Geschwindigkeitsfeld in einem Längsschnitt (mit und ohne Düsenbalken)

Ohne Verwendung eines zusätzlichen Düsenbalkens legt sich die Strömung abhängig von der Feuerraumgeometrie mehr oder weniger schnell an eine Seite des 1. Zuges an. Auf der anderen Wandseite entsteht somit eine Rezirkulationszone, wodurch sich Schieflagen in den Temperatur- und Speziesverteilungen ergeben.

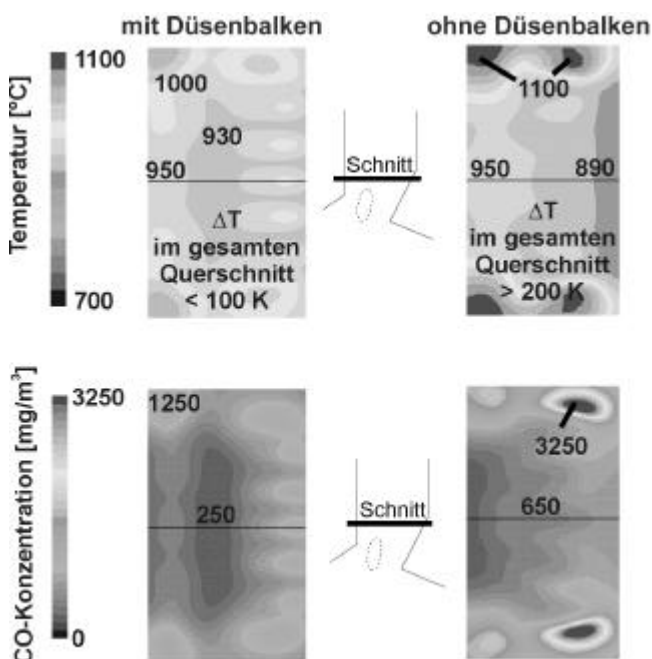


Bild 9 Temperatur- und CO-Werte in einer horizontalen Ebene (mit und ohne Düsenbalken)

Die erwähnten Schieflagen sind beispielhaft für eine horizontale Ebene oberhalb des Düsenbalkens dargestellt. Temperatur- und CO-Felder sehen ohne Verdrängungskörper wesentlich inhomogener aus. Der max. Temperaturgradient konnte im gewählten Schnitt von über 200 auf unter 100 K gesenkt werden. Der Ausbrand von CO ist mit zusätzlichen Sekundärluftdüsen wesentlich besser, so dass der maximale CO-Wert von 3250 auf 1250 mg/m³ reduziert werden konnte.

Erklärbar sind diese Ergebnisse wie folgt :

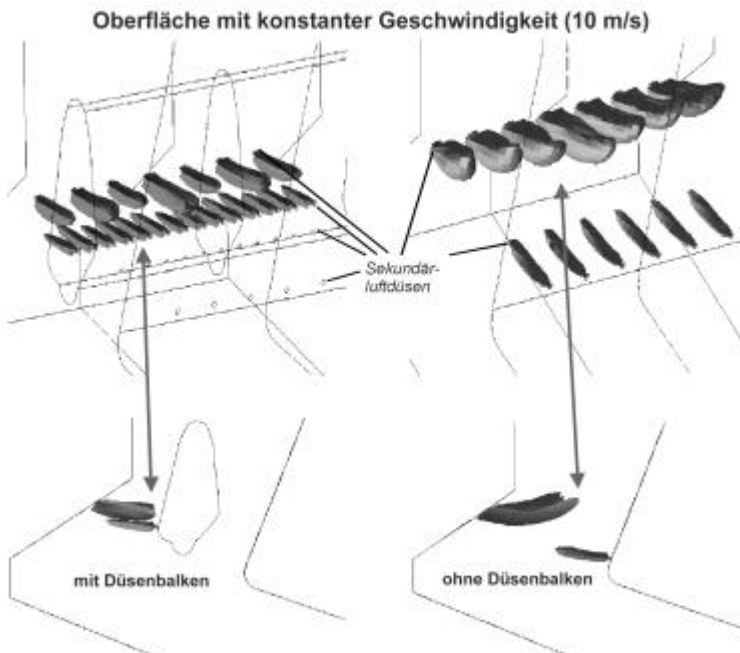


Bild 10 Einfluss des Düsenbalkens auf das Geschwindigkeitsfeld

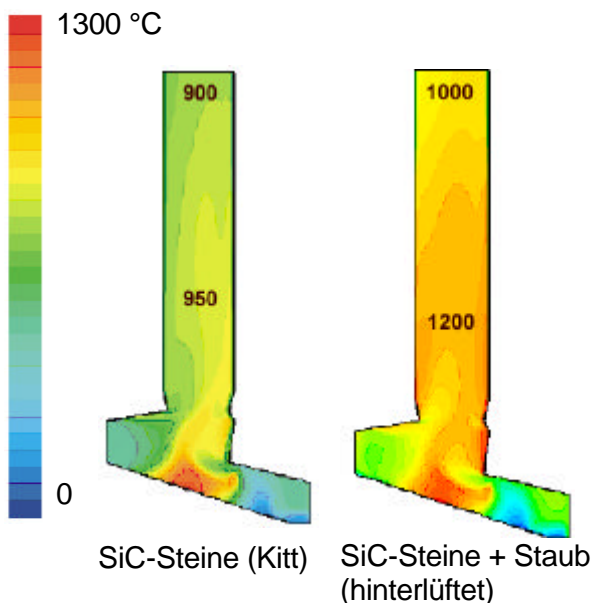
Aufgrund des Verdrängungskörpers wird der gesamte Querschnitt am Ende des Feuerraumes in 2 kleinere Querschnitte unterteilt wie Bild 10 zeigt.

Die Eindringtiefe ist wegen der Umverteilung der gesamten Sekundärluftmenge zwar kleiner, im Vergleich zum Fall „ohne Düsenbalken“ wird aber nun der gesamte Querschnitt von den Luftstrahlen völlig abgedeckt.

4.3 Feuerraumauskleidung

Korrosionsschutz und thermische Isolation sind die Aufgaben der Feuerraumauskleidung. In diesem Kapitel wird allerdings nur die Auswirkung des Wandmaterials auf das Temperaturfeld erörtert. Es wurden 2 Feuerfestmaterialien untersucht :

- Gekittete SiC-Steine, bei denen aufgrund der höheren Wärmeleitung ein relativ niedriges Gasphasentemperaturniveau erwartet wurde und
- hinterlüftete SiC-Steine, bei denen zusätzlich ein Staubbelaag angenommen wurde.
(Staub = verringerte Wärmeextraktion)



Wie Bild 11 zeigt, ergeben sich je nach Auskleidung deutliche Temperaturunterschiede im Feuer- und Strahlraum, was eine erhebliche Beeinflussung auf die Reaktionskinetik der C_xH_y - und CO-Umsetzung hat. Auch die Partikeltemperatur wird sich erheblich verändern, so dass damit auch das Verschmutzungs- und Verschlackungsverhalten der Wände deutlich verändert ist. Bei bekannter Partikelzusammensetzung kann aus thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen eine Wahrscheinlichkeit abgeleitet werden, ob bei einer vorliegenden Temperatur das Teilchen klebrig ist und bei Wandberührung an dieser haften bleibt.

Bild 11 Temperaturverteilung in einem Längsschnitt bei unterschiedlichem Wandaufbau

4.4 Vorhersage von kritischen Bereichen

Relativ schwierig gestaltet sich die Vorhersage, an welchen exakten Orten während des Betriebes Probleme auftreten. Zumindest können mit dem aktuellen, unmodifizierten CFD-Code FLUENT® aber Tendenzen ermittelt werden, welche Bereiche kritischer oder unkritischer erscheinen.

4.4.1 Verschmutzung, Verschlackung und Erosion

Als Ursache für die Verschmutzung/Verschlackung kann der Flugstaub angesehen werden, der aus reaktionsfähigen und klebrigen Partikeln besteht. Entscheidend ist hierbei das Erweichungsverhalten, das von der Zusammensetzung und der Temperatur abhängig ist. Weil die Anströmung der Feuerraumwände durch die Gas- und Partikelphase ebenfalls eine wichtige Rolle spielt, lassen Partikelbahnen z.B. tendenziell erkennen, ob und wo eine Verschmutzungs-, Verschlackungs- oder Erosionsgefahr besteht. Qualitativ kann gefolgert werden, dass an Stellen, an denen viele Partikel mit hoher Temperatur auftreffen, eine erhöhte Gefahr vorliegt. Solche mittleren wurden nach der Gasphasensimulation mit Hilfe der Lagrange-Methode und einem inerten Erwärmungsmodell /8/ auch für die verschiedenen Feuerraumkonzepte berechnet. Die Resultate in Form von Partikeltemperaturen sind im Bild 12 dargestellt. Der Erweichungspunkt der Partikel wurde für diese Studien mit 1000°C definiert, was eher den „Best Case“ abdeckt, da der Schmelzpunkt einiger Eutektika deutlich unter 1000°C liegt.

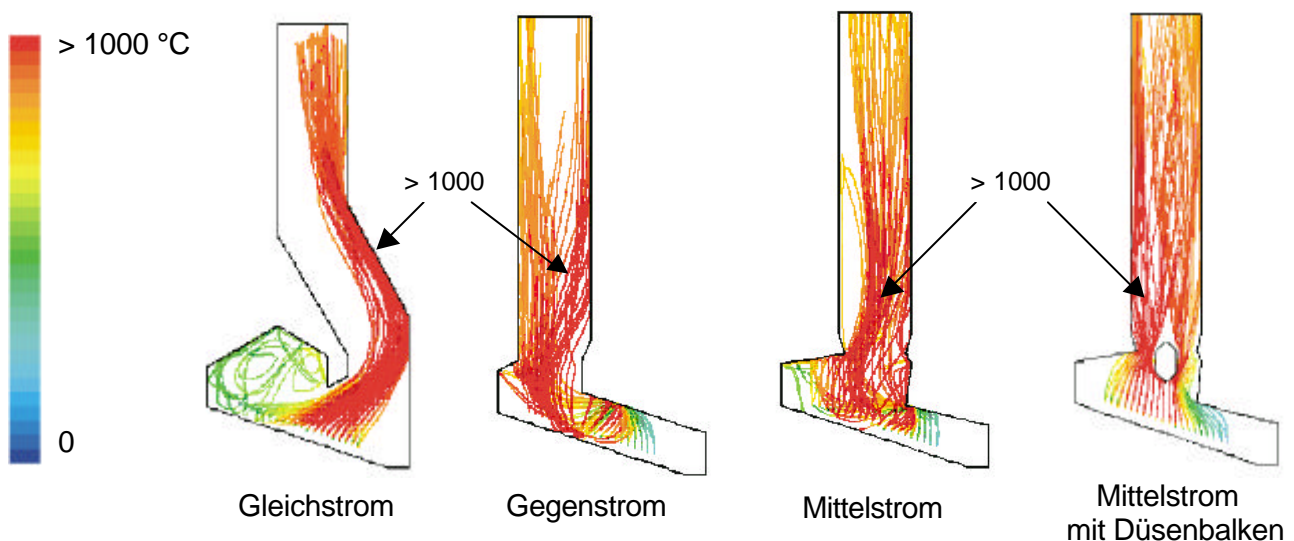


Bild 12 Partikeltrajektorien und -temperaturen ($d_p = 0,1 - 1 \text{ mm}$)

Am ungünstigsten sehen die Partikelbahnen für die Gleichstromfeuerung aus. Insbesondere an der rechten Schrägwand sind sehr viele Partikel mit Temperaturen, die deutlich größer als 1000°C sind, zu erkennen. Die Wahrscheinlichkeit einer Verschlackung ist für die beiden anderen Konzepte tendenziell niedriger. Aber auch bei diesen Feuerungssystemen können einerseits Partikeltemperaturen über 1000°C beobachtet werden und andererseits können Totzonen entstehen, in denen sich vor allem kleine Partikel anlagern und zu Verschmutzungen führen. Besonderes Augenmerk sollte auch auf die Partikelkonzentration und -temperatur nahe den Sekundärluftdüsen gerichtet sein. Sollten einzelne Düsen „verschlacken“ wären ungleichmäßige Geschwindigkeits-, Temperatur und Speziesverteilungen die Folge. Auch an diesem Beispiel kann der Einfluss eines Verdrängungskörpers aufgezeigt werden. Die Partikelphase ist gleichmäßiger verteilt und die Partikel treffen - wenn überhaupt - mit einem sehr geringen Winkel auf die Wände auf.

4.4.2 Korrosion

Im Wesentlichen gibt es die beiden folgenden Korrosionsursachen :

- Korrosion durch Cl / HCl bei $T > 475 \text{ °C}$ und
- Korrosion durch inhomogene RG-Zusammensetzung / reduzierende Zone mit CO und H_2S (die Gase reagieren mit der schützenden Oxidschicht und weiten die Poren auf)
 z.B. bei $400\text{-}650\text{ °C}$:
 $2 \text{ CO (g)} \rightarrow \text{C(s)} + \text{CO}_2 \text{ (g)}$
 CO-Diffusion in Poren, C(s) führt zu Aufweitungen von Poren in der Wand

Ein direkter CO-Angriff ist aufgrund des relativ niedrigen CO-Niveaus eher unwahrscheinlich. Jedoch erfolgt unter reduzierenden Bedingungen (Sauerstoffmangel und CO-Strähnen) eine Verschiebung der Aschezusammensetzung von Sulfaten zu Chloriden, und damit ergibt sich eine ähnliche Wirkung wie beim Alkalichloridangriff /8-12/.

In diesen Studien wurde die 2. Ursache (CO-Korrosion) näher untersucht. Die Berechnung der rauchgasseitigen CO-Konzentration in Wandnähe ist hier von besonderem Interesse. Qualitativ kann gefolgert werden, dass sehr hohe CO-Konzentrationen bzw. CO-Strähnen die Gefahr einer Korrosion vergrößern lassen. Wiederum für die verschiedenen Feuerraumgeometrien sind die Ergebnisse in Bild 13 abgebildet.

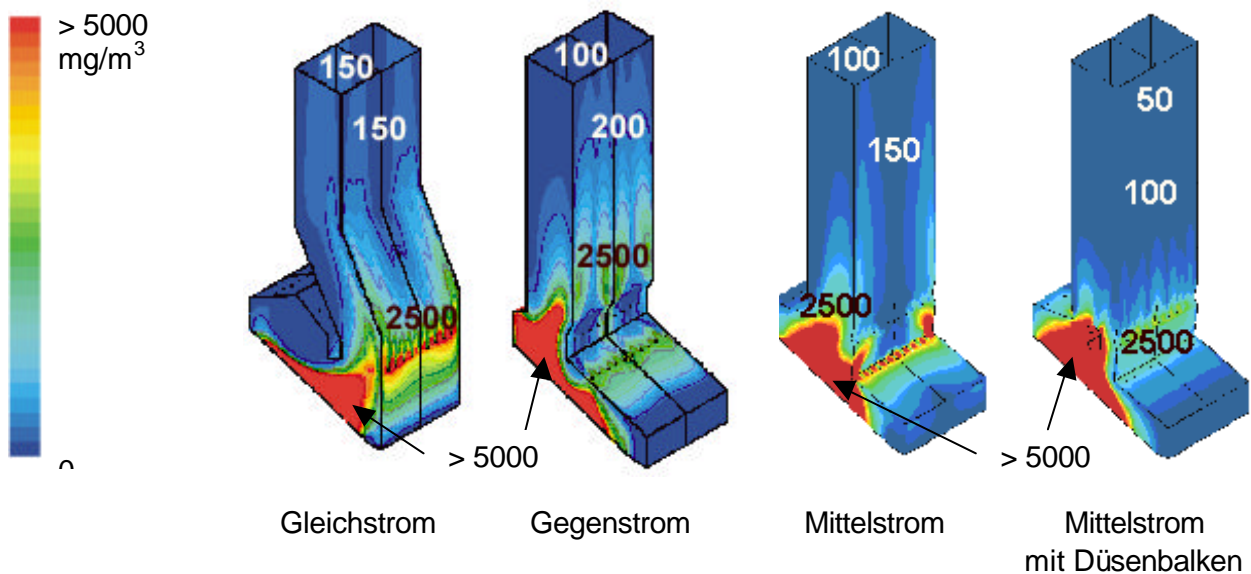


Bild 13 Wandnahe CO-Konzentrationen bei der Gleich-, Gegen- und Mittelstromfeuerung

Bei dem Vergleich der drei unterschiedlichen Geometrien ist die Wahrscheinlichkeit einer CO-Korrosion bei der Mittelstromfeuerung wohl am niedrigsten, da bereits am engsten Querschnitt (Ende Feuerraum) ein sehr geringes, wandnahes CO-Niveau existiert. Es ziehen sich praktisch keine CO-Strähnen entlang der Feuerraumwand in Richtung Querzug.

Das CO-Niveau kann zudem durch einen Sekundärluftbalken noch weiter verringert werden wie die rechte Darstellung in Bild 13 zeigt. Hieraus ergibt sich insbesondere ein Handlungsbedarf hinsichtlich der Sekundärlufteindüsung.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren konnte das „Werkzeug“ CFD (computational fluid dynamics) erfolgreich bei Müllverbrennungsanlagen angewendet werden. Es konnten die verschiedenen Teilprozesse und ihr komplexes Zusammenwirken im Feuerraum und dem nachgeschalteten Dampferzeuger ausreichend genau abgebildet werden. Dies wurde an Vergleichen mit gut vermessenen Anlagen deutlich. Auf Basis eines solchen validierten Modells wurden dann theoretische Studien zum Einfluss der Feuerraumgeometrie (Gleich-, Gegen- und Mittelstrom) und eines zusätzlichen Sekundärluftdüsenbalkens durchgeführt.

Grundsätzlich sahen die Verteilungen bei der Gleichstrom-Modellanlage am ungünstigsten aus. Für ein besseres Ausbrandverhalten in der Nachbrennzone (gekennzeichnet durch niedrige CO-Konzentrationen) und damit zur Reduzierung der Verschmutzungs-/Verschlackungsgefahr konnte der Einsatz eines Düsenbalkens als sehr vorteilhaft nachgewiesen werden. Weiterer Schwerpunkt der Studie war die Vorhersage der Verschmutzungs- / Verschlackungs- und Korrosionsneigung. Hierbei kann insbesondere eine Minimierung der CO-Konzentration in Wandnähe zu einer deutlichen Minderung der Korrosionsneigung und auch der Ansatzbildung führen. Je nach Feuerraumauskleidung können sich Gasphasen- und Partikeltemperaturen erheblich verändern, was zu einer kompletten Wandlung des Verschmutzungs- und Verschlackungsverhalten der Wände führt. Gerade im Bereich der Wandverschmutzung wird eine Modellierung der Materialeigenschaften der Staubphase zu einer deutlichen Verbesserung der Vorhersagegüte führen. Daher ist z.B. die Kopplung eines CFD-Codes mit einem thermodynamischen Simulationsprogramm sehr sinnvoll und soll auch in zukünftigen Studien angegangen werden.

6. Literatur

- /1/ Görner, K., Klasen, Th. : Sekundärluftprisma zur Optimierung der Sekundärlufteindüsung VDI-Seminar: „BAT- und preisorientierte Dioxin-/Gesamtemissionsminderungstechniken 2000“, München, 14./15.9.2000
- /2/ Schindler, P.J., Nelson, L.P., 1989, USA EPA-600/8-89-063
- /3/ 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV), Deutschland, 1990
- /4/ Klasen, Th., Görner, K. : Simulation und Optimierung einer Müllverbrennungsanlage, VDI-GET Fachtagung „Modellierung und Simulation von Dampferzeugern und Feuerungen“, Braunschweig, 1998
- /5/ Klasen, T., Görner, K., Kümmel, J., Numerische Berechnung und Optimierung der MVA Bonn, VDI-Berichte 1492, 19. Deutscher Flammentag, Dresden, 1999
- /6/ Klasen, T., Görner, K., Numerical calculation and optimization of a large municipal waste incinerator plant, 2nd Int. Symposium on incineration and flue gas treatment technologies, Sheffield University, U.K., 1999
- /7/ Görner, K., Technische Verbrennungssysteme, Springer Verlag, New York, Berlin, 1991
- /8/ Fluent User's Guide, Juli 1998
- /9/ Reichel, H.-H., Schirmer, U., Waste incinerator plants in the FRG : Construction, materials, investigation on cases of corrosion, Werkstoffe und Korrosion, 40/1989, 135-141
- /10/ Reichel, H.-H., Fireside corrosion in German fossil-fuel fired power plants. Appearance, mechanism and causes, Werkstoffe und Korrosion, 39/1988, 54-63
- /11/ Schumacher, F., Korrosionen in Abfallverbrennungsanlagen, BWK, 48/1998, Nr.11/12, 74-80
- /12/ Born, M.; Seifert, P.: Thermodynamik der rauchgasseitigen Chlorkorrosion bei der Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen. Vortrag "Fuzzy Meeting", TU Bergakademie Freiberg, 27./28.4.2000