

Untersuchungsmöglichkeiten zum Korrosions- und Verschlackungsverhalten in Müllverbrennungsanlagen mit Hilfe eines laufzeitgekoppelten Systems aus CFD und thermodynamischer Realphasenmodellierung

T. Klasen, M. Liebetruh, K. Görner, Essen

Kurzfassung

Berechnungen von Partikelflugbahnen zur groben Abschätzung der gefährdeten Gebiete wurden für diverse Müllverbrennungs-Modellanlagen bereits realisiert [1]. Für eine genauere Betrachtungsweise wurde eine weitere Studie mit einer größeren Parametervariation durchgeführt. Die Berücksichtigung des Mineralphasenanteils (Asche) erfolgte bei diesen CFD-Simulationen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Impulsaustausch und Strahlungsverhalten. Am Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT) der Universität Duisburg Essen (Standort Essen) wurde zudem ein Verfahren entwickelt, mit dem die Funktionalität eines kommerziellen CFD-Programms (FLUENT) über ein zur Laufzeit der Simulation aufgerufenes Programm zur thermodynamischen Realphasenmodellierung (ChemApp) deutlich erweitert wird. Hierbei wurden die chemischen Wechselwirkungen der Asche mit dem umgebenden Rauchgas und das Phasenumwandlungsverhalten detailliert modelliert. Das Verfahren wurde zunächst anhand von Braunkohle-Feuerungen validiert. Im Rahmen dieser Studie konnte gezeigt werden, dass sich auch für Müllverbrennungsanlagen realitätsnähere Aussagen zum Verschlackungs- und Korrosionsverhalten ableiten lassen.

1. Einleitung

Für die Betreiber von Feuerungsanlagen stellt die Verschlackung von Brennräumen und Heizflächen ein wirtschaftliches Problem dar, da sowohl die Prozesseffizienz gesenkt als auch die Anlagenverfügbarkeit reduziert wird. Mit Hilfe von CFD können für Müllverbrennungsanlagen quantitative Aussagen über Korrosions-, Verschlackungs- und Verschmutzungsneigungen erzielt werden. Im Rahmen von diversen Forschungsstudien [1, 2] konnten z.B. Gebiete vorhergesagt werden, in denen die Gefahr von Anlagerungen oder Korrosionserscheinungen besteht. Grundsätzlich kann qualitativ gefolgert werden, dass an Stellen mit hohen Partikelkonzentrationen, eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für eine Verschlackung existiert (aerodynamische Wahrscheinlichkeit). Analog hierzu gilt, dass hohe CO-Werte in Wandnähe die Gefahr einer Korrosion deutlich vergrößern können. Um Gefahrenpotenziale eingrenzen zu können, wurde am LUAT erstmalig ein laufzeitgekoppeltes System aus CFD und thermodynamischer Modellierung für Müllverbrennungsanlagen getestet.

2.1 Beschreibung der Gasphase

Zur Beschreibung der homogenen Gasphase dient folgende differentielle Transportgleichung mit der allgemeinen Zustandsgröße ϕ (Euler-Darstellung) [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{r} \mathbf{f}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mathbf{r} u_j \mathbf{f}) = \frac{\partial}{\partial x_j} D_f \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_j} + S_f$$

Term 1 + Term 2 = Term 3 + Term 4

Diese instationäre Transportgleichung berücksichtigt die zeitliche Änderung (Term 1), den konvektiven (Term 2) und diffusiven (Term 3) Transport (mit dem allgemeinen Austauschkoefizienten D_ϕ) sowie lokale Quellen und Senken (S_ϕ).

Die Bilanzgleichungen der drei Hauptverbrennungsvorgänge erhält man durch eine Substitution von ϕ mit der entsprechenden Größe des Teilbereiches:

- Geschwindigkeit u_i ? Impulsbilanzgleichungen (Strömung, Turbulenz & Mischung)
- Enthalpie h ? Enthalpiebilanzgleichungen (Wärmeübertragung & Strahlung)
- Spezies c_i ? Speziesbilanzgleichungen (Stofftransport & chem. Reaktion)

Als Ergebnis einer solchen numerischen Berechnung erhält man 3-dimensionale Geschwindigkeits-, Temperatur- und Spezies- (C_xH_y , CO, CO₂, H₂O und O₂) Verteilungen. Die Modelle für die Gasphase können erfolgreich im Feuer- und Strahlraum angewendet werden. Für die heterogene Verbrennung auf dem Rost gelten diese Ansätze nicht mehr.

2.2 Beschreibung der heterogenen Verbrennung auf dem Rost

Probleme bereiten die in 3.1 beschriebenen Ansätze für die heterogene Phase, nämlich das Festbett, da die chemischen und physikalischen Vorgänge, die auf dem Müllrost ablaufen, sehr komplex sind. Die wesentlichen Ursachen sind in der breiten und meist kaum zu definierenden Partikelgrößenverteilung (Stückigkeit) des Mülls und seiner chemischen Zusammensetzung zu suchen. Infolgedessen stellt die Kopplung zwischen Müllbett und Feuer- raum, insbesondere der Strahlungsaustausch sowie die Beschreibung der Transport- und Reaktionsvorgänge, ein großes Problem bei der Modellierung dar.

Bei der heterogenen Verbrennung auf dem Rost (Bild 1) laufen die folgenden Prozesse ab: Erwärmung durch Strahlungswärmeaustausch, Wärmeleitung sowie Konvektion, Trocknung (Freisetzung des "physikalischen Wassers"), Pyrolyse (Entgasung von brennbaren Kohlenwasserstoffen) und Abbrand des festen Kohlenstoffes.

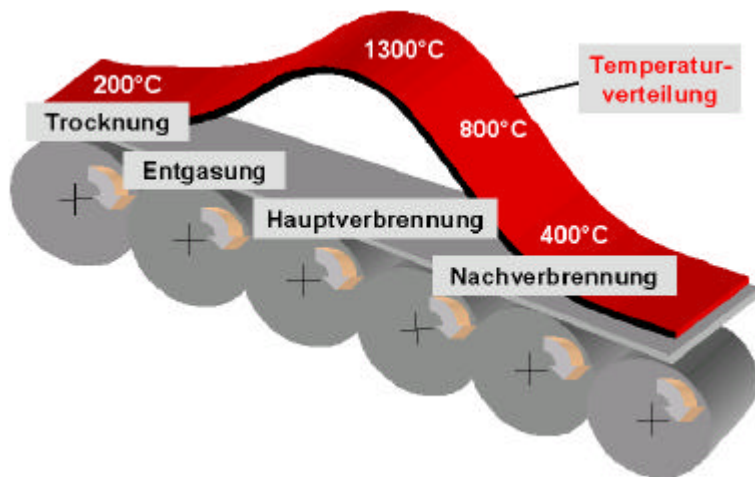


Bild 1: Verbrennungszonen und daraus resultierende Temperaturverteilung über dem Rost

Prinzipiell würde eine dreidimensionale Modellierung alle chemischen und physikalischen Vorgänge sowie die Wechselwirkung zwischen Müllbett und Gasphase berücksichtigen können. Die sich ständig ändernde Zusammensetzung des Mülls und die Stückigkeit erschweren aber die Beschreibung in hohem Maße, sodass oft 2-dimensionale oder sogar nur 1-dimensionale Modelle zum Einsatz kommen. Die wesentlichen Alternativen sind:

- 1-dimensionales Modell: Wärme- und Speziesfreisetzung entlang der Müllbahn
- 2-dimensionales Modell: Freisetzungverteilung auch über die Rostbreite
- 2-dimensionales Modell: Abbrandvorgänge innerhalb der Schüttschicht (vertikal)
- 3-dimensionales Modell: gesamte Abbrandvorgänge in alle Richtungen

Am LUAT wurde für die Müllbahn ein 1-dimensionales Modell entwickelt, mit dem sich Temperatur-, Konzentrations- und Geschwindigkeits-Profile oberhalb des Rostes näherungsweise angeben lassen. Der gesamte thermische Input ist als Integral der Wärmefreisetzungs-funktion über der Müllbahn definiert. Der Anteil der fühlbaren Wärme (Temperaturprofil) beträgt je nach Luftaufteilung zwischen 50 und 80 % der gesamten Wärmemenge. Die latente Wärme wird erst bei der Oxidation von CO und C_xH_y frei. Ausgehend von einer Reaktionsannahme für C und H des Mülls mit dem Luft- und Müll-Sauerstoff zu CO, CO₂, H₂O, O₂ und CH₄, können durch eine integrale Bilanzierung die „Müllbahnprofile“ approximiert werden.

2.3 Gekoppeltes System aus CFD und thermodynamischer Realphasenmodellierung

Die Ablaufsteuerung erfolgt über ein Subsystem aus Routinen, das gleichzeitig den bidirektionalen Austausch von Informationen und resultierenden Quelltermen realisiert. Mit dem entwickelten System ist es möglich, detailliert den Zustand der Mineralphase eines Partikels bei Wandkontakt zu berechnen, wobei der Einfluss der Partikelhistorie vom Eintritt in die Brennkammer an erfasst wird. Gleichzeitig wird über thermodynamische Berechnungen die Pha-

senlage und die Zusammensetzung eventuell vorhandener Ablagerungen auf dem betreffenden Wandbereich ermittelt. Mit den erhaltenen Daten erfolgt die Ableitung einer Haftwahrscheinlichkeit, mit der die Ansatzneigung des aktuellen Partikelstrahls quantifiziert wird. Durch die Quelltermkopplung werden die während der Verbrennung freigesetzten Komponenten in die berechnete Gasphase von FLUENT eingebunden, sodass gleichzeitig erweiterte Informationen über Gefährdungspotenziale zur Verfügung stehen [4].

3 Anlagenbeschreibung (Technikumsanlage MARS)

Bei der MARS-Anlage (**M**odulare **A**nlage zur **R**ückstandsoptimierten **S**toffbehandlung) handelt es sich um eine zweiteilige Anlage bestehend aus: Verbrennungseinheit (Verbrennungsgrost, Nachbrennkammer und Abgaskühler) sowie Gasreinigungseinheit (betrieben im Hoch- und Niedertemperaturbereich). Bild 2 gibt einen Überblick über die Feuerraumgeometrie.

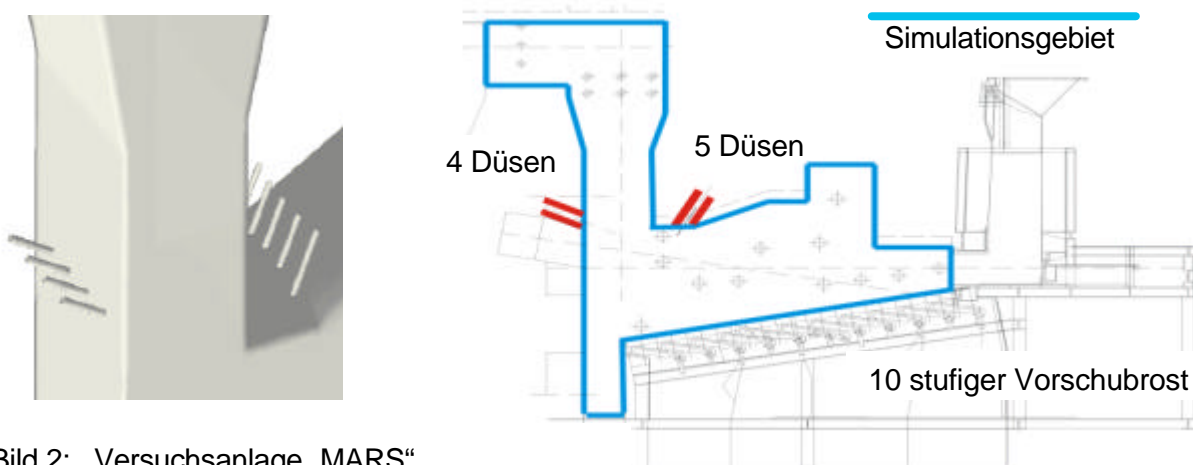


Bild 2: Versuchsanlage „MARS“

„MARS“ wurde an der Universität Duisburg Essen (Standort Essen) in Zusammenarbeit mit Fraunhofer UMSICHT aufgebaut. Die wassergekühlte Rostfeuerung (Rost: $L \times B = 4,3 \times 1,2 \text{ m}$) ist für eine thermische Leistung von ca. 1 MW ausgelegt. Der Heizwert der verwendeten Brennstoffe (Hausmüll, Biomasse, BRAM, ...) kann zwischen 4 und 24 MJ/kg betragen. Die bei Vollastbetrieb zugeführte Verbrennungsluftmenge beträgt ca. $1600 \text{ m}^3_{i,N./h}$. Das Rauchgas wird im Gleichstrom mit dem Brennstoff geführt und am Ende des Feuerraumes nach oben in die Nachbrennkammer geleitet. Nach Zugabe von Sekundärluft erreicht das Abgas in der ausgemauerten Nachbrennkammer eine Verweilzeit von über 2 s bei $T_{\min} = 850^\circ\text{C}$.

4 Simulationsergebnisse

Für einen Vollastfall (1 MW) mit typischer Müllzusammensetzung wurde die in Kapitel 3 beschriebene Anlage simuliert. Die Aufteilung von Primär- zur Sekundärluft betrug 70 / 30. Die Sekundärluft wurde wie folgt verteilt: Fall 1: 40 (hinten) / 60 (vorn), Fall 2: 50 / 50 und Fall 3: 60 / 40. Die berechneten O_2 -Gehalte sind in Bild 3 dargestellt.

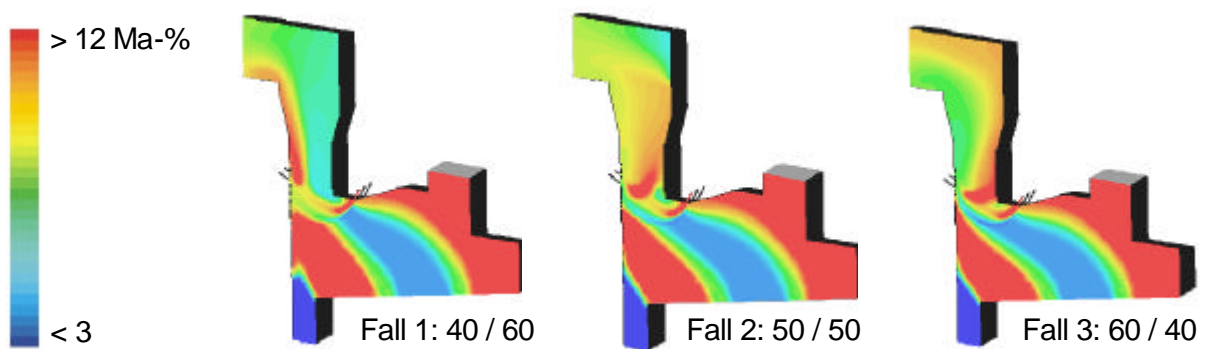


Bild 3: O₂-Verteilung in der Symmetrieebene bei unterschiedlicher Sekundärluftverteilung

Die Ergebnisse sind vor allem für Fall 2 (50/50) positiv zu beurteilen. Verlagert man lediglich 10% Sekundärluft auf die vorderen bzw. hinteren Düsen, wird das Strömungs- und somit auch das Sauerstofffeld schon recht inhomogen, was sich infolgedessen z.B. auch negativ auf die Temperaturverteilung oder an manchen Stellen auf das Korrosionsverhalten auswirkt.

Partikelbahnen lassen tendenziell erkennen, wo eine Verschlackungs- oder Erosionsgefahr besteht. Bei der Technikumsanlage „MARS“ sind für den Fall 2 (50/50) in Bild 4 drei gefährdete Stellen (a, b und c) eingezeichnet, die allerdings nur durch eine große Anzahl an Partikelstartpunkten (entlang des Rostes) offenbart werden.

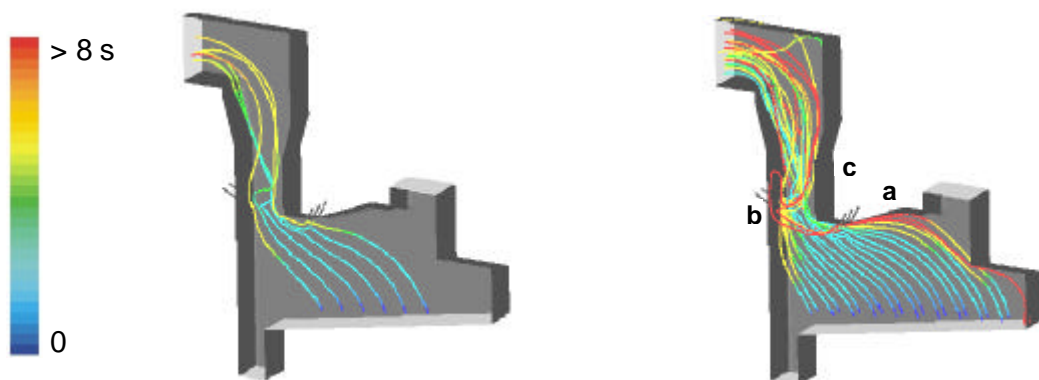


Bild 4: Partikelbahnen mit wenigen und vielen Startpunkten (Zusatzinformation: Verweilzeit)

Partikel, die im vorderen Bereich des Rostes initiiert werden, strömen entlang der Zünddecke und zwischen den Sekundärluftdüsen (Stelle „a“). Anlagerungen im Bereich der Sekundärluftdüsen sind besonders kritisch, weil sich somit der Eindüsungswinkel und infolgedessen der gesamte Verbrennungsprozess verändern kann. Die Stelle „b“ kennzeichnet ein Gebiet, in dem Partikel aus dem hinteren Rostbereich durch die Hauptströmung so eingeeengt werden, dass sie auf die Rückwand auftreffen. Basis für die Gefahrenstelle „c“ ist die gewählte Aufteilung der Sekundärluftmenge. Nach der letzten Lufteindüsung bilden sich Strömungsverhältnisse aus, die dafür verantwortlich sind, dass Partikel oberhalb der Umlenkung zur Vorderwand und nach außen zu den Seitenwänden abgelenkt werden. Wichtig für diese

Aussagen ist die Partikelanzahl. Wie man auf der linken Darstellung in Bild 4 erkennen kann, reichen wenige Startpunkte für eine Bewertung nicht aus. Es muss eine relativ hohe Anzahl gewählt werden, auch wenn somit eine enorme Rechenzeit benötigt wird. Für detaillierte Beurteilungen wurden mathematische und thermodynamische Modelle gekoppelt (Bild 5).

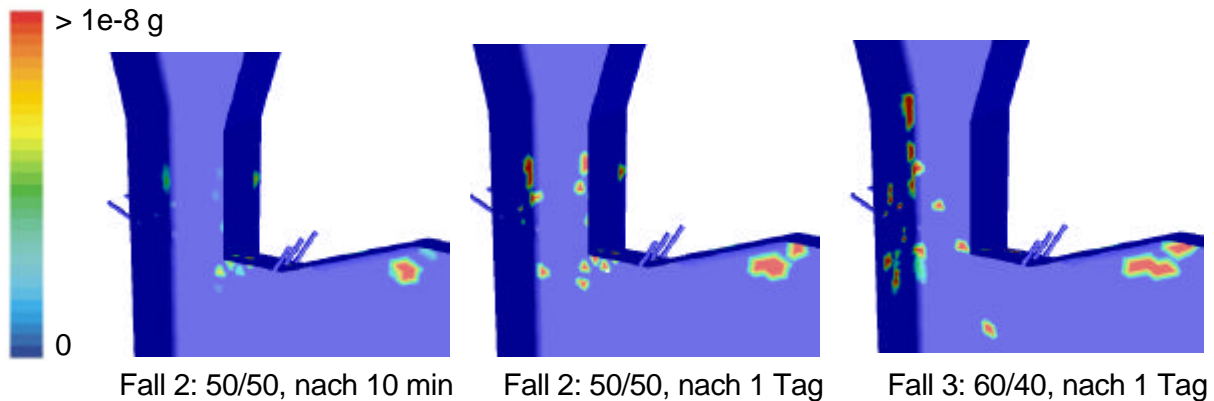


Bild 5: Berechnete Ablagerungsmassen (verschiedene Betriebszustände/Zeiten)

Anhand der thermodynamischen Berechnungen kann bestätigt werden, dass die Stellen „a“ und „c“ für den Fall 2 kritisch im Hinblick auf mögliche Verschlackungen zu beurteilen sind. Betriebsfall 3 lässt nach der Umlenkung teilweise andere gefährdete Bereiche erkennen.

5 Zusammenfassung

Mit reinen CFD-Simulationen können bei ausreichender Anzahl an Partikelbahnen Aussagen über gefährdete Gebiete getroffen werden. Zur Eingrenzung sind thermodynamische Berechnungen sehr sinnvoll. Offenbaren z.B. vergleichsweise hohe Partikelkonzentrationen an einer bestimmten Stelle einen kritischen Bereich, so kann diese Stelle bei gleichzeitiger thermodynamischer Beurteilung durchaus als nicht gefährdet eingestuft werden. Neben den Strömungsverhältnissen sind nämlich besonders die chemischen Wechselwirkungen der Asche mit dem Rauchgas und das Phasenumwandlungsverhalten zu berücksichtigen.

6 Literatur

- [1] Klasen, T., Görner, K.: Einfluss von Feuerraumgeometrie und -wandmaterial auf den Verbrennungsprozess sowie Vorhersage von gefährdeten Gebieten innerhalb einer MVA, VGB-Konferenz: „Thermische Abfallverwertung 2000“, 20.-21.11.2000, Essen
- [2] Klasen, T., Görner, K.: Einfluss diverser Sekundärlufteindüsungskonzepte auf die Müllverbrennung - mittels CFD -, VDI-Tagung "Flammentag", 04.-05.09.2001, Essen
- [3] Görner, K.: Technische Verbrennungssysteme. Springer Verlag, Berlin, 1991
- [4] Liebetruh, M.: Mathematische Modellierung des Mineralansatzverhaltens disperser Brennstoffe, 2002, Essen, Diss. eingereicht