

Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulation des Verbrennungsprozesses auf dem Rost

H. Hunsinger, K. Jay, ITC; B. Peters, IKET

Einleitung

Die Verbrennung von Hausmüll in Rostfeuerungen ist ein seit mehr als 100 Jahren angewandtes Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung [1]. Allein in Deutschland sind heute über 50 Anlagen in Betrieb. In den letzten Jahren wurden durch gesetzliche Vorgaben (17. BImSchV) die Emissionsgrenzwerte für Stäube, Schwermetalle und Schadgase wie CO, org.C, HCl, SO₂, HF und NO_x deutlich verschärft. Zusätzlich wurde für polychlorierte Dibenzop-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F) ein Grenzwert von 0,1ng TEQ/Nm³ vorgeschrieben (TEQ=Toxizitätsäquivalente). Parallel dazu stiegen die Qualitätsanforderungen für die Rostasche mit dem Ziel einer Verwertung z. B. im Straßenbau.

Insbesondere die Abgasgrenzwerte für PCDD/F und NO_x erfordern bei älteren Anlagen eine Ergänzung der Rauchgasreinigung durch adsorptiv und/oder katalytisch wirkende Stufen. Dadurch erhöhen sich drastisch die Kosten für die thermische Abfallbehandlung. Bei neueren Anlagen werden heute meist multifunktionale Rauchgasreinigungsverfahren installiert. So können z. B. durch Eindüsung von Kalk/Kohlenstoffmischungen vor einem Gewebefilter (Trockensorptionverfahren) neben der Staubabscheidung auch die Absorption von sauren Schadgasen und die Adsorption von PCDD/F gleichzeitig in einem Apparat erfolgen. Allerdings wird hierbei die Schadstoffproblematik in die aus dem Filter ausgetragenen Reststoffe verlagert.

Ein bisher nur wenig ausgeschöpftes Potential zur Kostenreduktion bei der Abfallverbrennung liegt in der Optimierung des Verbrennungsprozesses. Falls es gelingt, die Feuerung so zu steuern, dass die Bildung von einzelnen Schadstoffen deutlich minimiert wird, kann der Aufwand für die Abgasreinigung reduziert und eventuell auf einzelne Abgasreinigungsstufen ganz verzichtet werden. Insbesondere für die Schadstoffe NO_x [2], aber auch für organische Schadstoffe wie PCDD/F [6,13], deren Bildung durch die Feuerführung beeinflusst wird, bestehen gute Chancen einer primärseitigen Minderung. Die Reduzierung der NO_x-Konzentration durch feuerungstechnische Maßnahmen ist derzeit Gegenstand eines HGF-Strategiefonds-Forschungsvorhabens.

Voraussetzung für eine primärseitige Schadstoffminderung ist die Kenntnis der Bildungsmechanismen, deren Basis eine detaillierte Beschreibung des gesamten Verbrennungsvorganges sein muss. Allerdings sind bisher nur wenige Daten aus Abbranduntersuchungen bekannt [3-5]. Insbesondere sind systematische Parameterstudien derzeit nicht verfügbar. Die im Forschungszentrum Karlsruhe betriebene halotechnische Versuchsanlage TAMARA (Testanlage zur Müllverbrennung, Abgasreinigung, Rückstandsverwertung und Abwasserbehandlung) bietet ideale Voraussetzungen für experimentelle Untersuchungen des Verbrennungsprozesses unter definierten Betriebszuständen. Von besonderem Interesse sind die Einflüsse von unterschiedlichen

Brennstoffqualitäten (Heizwerte, stoffliche Zusammensetzung, Stückigkeit) und die Wirkung von Verbrennungsparametern auf den Prozess, wie z.B. Brennstoffmassenstrom, Verbrennungsluftmengen und -verteilung, sowie Transport des Brennstoffes auf den Rost. Im Folgenden wird über grundlegende Untersuchungen an TAMARA berichtet.

Der Feuerraum von TAMARA

TAMARA ist für einen Mülldurchsatz von 150-300 kg/h und eine maximale Wärmeleistung von ca. 0,5 MW ausgelegt. Der Rauchgasvolumenstrom beträgt max. 1000Nm³/h. Die Feuerraumgeometrie kann durch Einbau einer variablen Zwischendecke als Gegen-, Mittel- oder Gleichstromfeuerung gestaltet werden. Bei allen nachfolgend beschriebenen Experimenten wird TAMARA als Mittelstromfeuerung betrieben. Der Verbrennungsrost hat eine Gesamtlänge von 3,2 m und eine Breite von 0,8 m. Er ist axial in vier einzelne gleich lange Zonen unterteilt, die jeweils von definierten Primärluftmengen durchströmt werden. Die Verweilzeit des Brennstoffbettes in den Einzelzonen wird durch die individuell einstellbaren Rostparameter Hublänge und -geschwindigkeit geregelt. Zum Ausbrand der Abgase kann zusätzlich weitere Verbrennungsluft über drei verschiedene Sekundärluftbalken im Feuerraum bzw. im ersten Strahlungszug zugeführt werden.

Messtechnik im Feuerraum

Der Verbrennungsprozess lässt sich in die zwei Teilschritte Feststoffabbrand und Abgasausbrand im Feuerraum untergliedern. Die Trennungslinie zwischen beiden Teilprozessen verläuft entlang der Gutbetttoberfläche. Die Kenntnis der lokalen Gaszusammensetzung und -temperatur und der lokalen Abgasgeschwindigkeit entlang der Rostlänge ermöglicht die Beschreibung der wichtigsten Reaktionen wie Trocknung und Kohlenstoffabbrand im Festbett. Gleichzeitig dienen diese Daten als Eingangsparameter zur numerischen Simulation des Abgasausbrandes. Die Überprüfung der Rechnungen erfolgt durch entsprechende Messungen am Austritt des Feuerraumes im ersten Strahlungszug.

Mit Hilfe von Thermoelementen und speziell entwickelten Heißgasbeprobungstechniken zur Abgasanalyse können alle wesentlichen Daten experimentell ermittelt werden.

Die Messungen werden wenige Zentimeter oberhalb des Gutbettes an fünf Einzelpositionen durchgeführt. Die Probenahme erfolgt über gekühlte Sonden mit nachfolgender Flugstaubfiltration und Kondensation der Rauchgasfeuchte. Die Konzentrationen folgender gasförmiger Rauchgaspezies werden anschließend mittels Online-Gasanalytoren gemessen: O_2 , CO_2 , CO , H_2 , Σ org. C und CH_4 . Die Hauptkomponente von Σ org. C (s. Kapitel 6) ist Methan. Die Bestimmung der Wasserkonzentration erfolgt über die Kondensationsstufe und

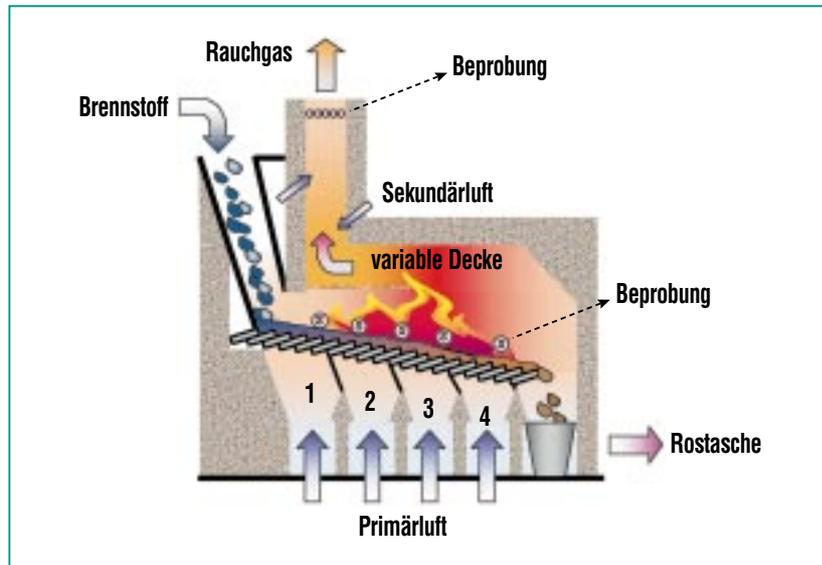


Abb. 1: Feuerraum von TAMARA mit Beprobungsstellen.

die Messung von Kohlenstoffpartikeln (Ruß) über die Analyse des abgeschiedenen Flugstaubes.

Offline-Analysen mittels GC/MS-Kopplung (Gaschromatographie/Massenspektrometrie) von Flugstaub-, Kondensat- und Gasproben ermöglichen zusätzlich die Identifikation und Quantifizierung

einer Vielzahl von primären organischen Verbrennungsprodukten. Über die Bestimmung der Schwermetallkonzentrationen in den Filterproben mittels TRFA (Totalreflexions-Röntgen-Fluoreszenz-Analyse) lässt sich zusätzlich die Mobilisierung einiger Elemente während des Abbrandprozesses beschreiben [10].

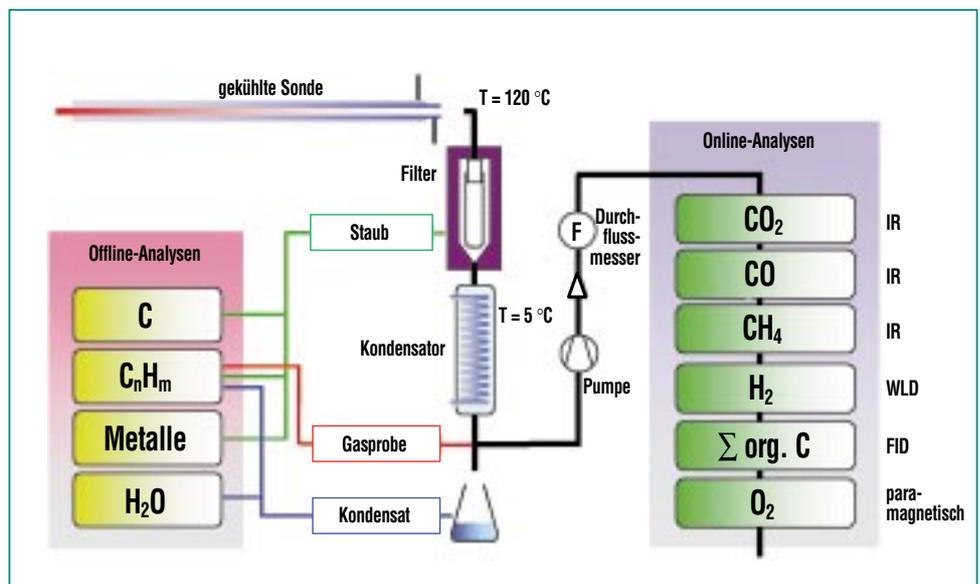


Abb. 2: Beprobungstechnik im Feuerraum.

Brennstoffe

Gegenstand zweier Versuchskampagnen war die Untersuchung des Abbrandprozesses mit verschiedenen Brennstoffmenüs unter konstanten Verbrennungsbedingungen. Die Brennstoffdosierung wurde bei gleichen Rostparametern und konstanter Primärluft so gewählt, dass die Anlage immer mit gleicher thermischer Leistung betrieben wurde. Die zugeführte Primärluftmenge erfolgte überstöchiometrisch mit einer Primärluftzahl $\lambda_{\text{prim}} \approx 1,5$. Die Luftzahl λ beschreibt das Verhältnis von zugeführter zu theoretisch benötigter Mindestsauerstoffmenge für eine vollständige Oxidation von C zu CO_2 und H zu H_2O . Der Basisbrennstoff bestand aus zerkleinertem und homogenisiertem Hausmüll vermisch mit BRAM (**B**rennstoff **a**us **M**üll) im Verhältnis 75:25. Diese Brennstoffmischung entspricht

hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung im Mittel einem deutschen Hausmüll. Zu diesem Brennstoffmix wurden teilweise spezielle Abfallfraktionen wie ASR (**A**utoschredder **R**ückstände), E&E (**E**lektro- und **E**lektronikschrott) und PVC (**P**olyvinylchlorid) zudosiert. Als Vergleich zu den Abfallbrennstoffen wurden zusätzlich zwei Biobrennstoffe (Holzhackschnitzel und Strohpellets) verbrannt. Die Bandbreite der Heizwerte dieser Brennstoffe erstreckte sich zwischen 8 und 12 MJ/kg.

Trocknung und Kohlenstoffabbrand im Brennstoffbett

Anhand der Messdaten von den Messstellen oberhalb des Brennstoffbettes wurden die axialen Konzentrationsprofile für die primären Verbrennungsprodukte über der Bettlänge berechnet.

Für alle eingesetzten Brennstoffe wurden ähnliche charakteristische Konzentrationsprofile ermittelt. Unterschiede ergaben sich nur in der Lage der Minima bzw. Maxima und in der absoluten Konzentration der Verteilungen. Im nachfolgenden Beispiel sind die Ergebnisse des Experimentes mit dem Basisbrennstoff Hausmüll/BRAM exemplarisch erläutert.

In Abb. 4 sind die Konzentrationsprofile der wichtigsten Gaskomponenten über der Rostlänge dargestellt. Das Sauerstoffprofil entlang des Rostes zeigt ein ausgeprägtes Minimum im Bereich der Rostzone 2. Die O_2 -Konzentration geht an dieser Stelle gegen Null. Gleichzeitig liegt hier das Maximum der CO_2 -Konzentration. An dieser Position findet der höchste Kohlenstofftransfer aus dem Brennstoffbett in das Abgas statt. Der Sauerstoff der zugeführten Primärluft wird an dieser Stelle vollständig aufgebraucht und es kommt zu Pyrolyse- und Vergasungsreaktionen. Dieser Sachverhalt wird durch hohe Konzentrationen an Produkten unvollständiger Verbrennung (CO , C_nH_m , H_2 und Ruß) dokumentiert. Der Ausbrand dieser Verbindungen erfolgt anschließend im Feuerraum. Das Sauerstoffprofil zeigt außerdem, dass die Luftverteilung in den einzelnen Luftzonen nicht optimiert ist. Während in der Hauptverbrennungszone O_2 -Mangel herrscht, wird vor bzw. hinter dieser Zone zuviel Primärluft zugeführt.

Um die Messungen und die daraus abgeleiteten Konzentrationsprofile zu überprüfen, wurden Stoff- und Energiebilanzen um

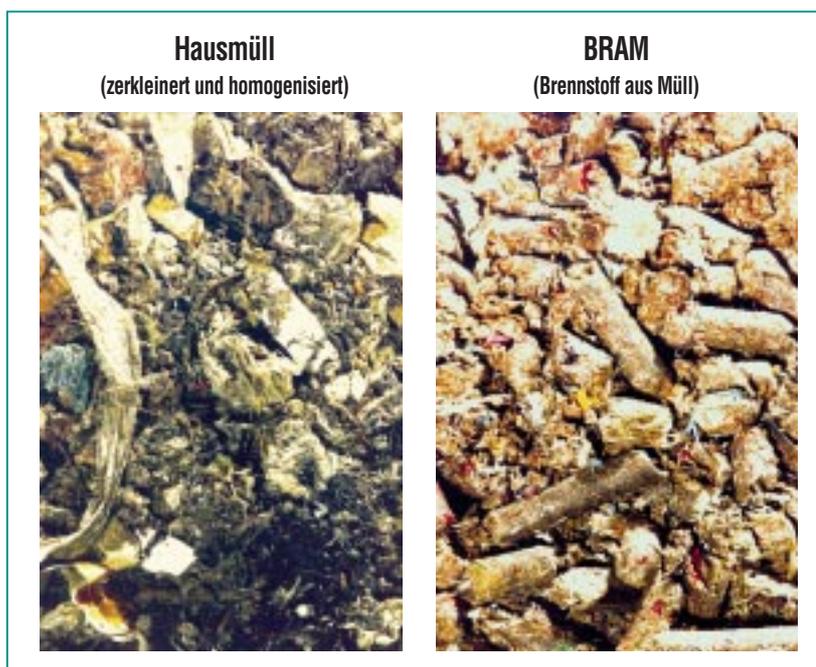


Abb. 3: Abfallbrennstoffmischung (75% Hausmüll + 25% BRAM).

die beiden Reaktionszonen Festbett und Feuerraum berechnet. Im Rahmen der Messgenauigkeit konnten sowohl für die Hauptelemente C, H und O als auch für die Energieströme geschlossene Bilanzen aufgestellt werden [10].

Anhand der vorliegenden Daten lassen sich nun der Trocknungsprozess und der Kohlenstoffabbrand des Brennstoffbettes über der Rostlänge berechnen. Der Kohlenstoffabbrand beschreibt den Transfer von Kohlenstoff aus den Brennstoff ins Abgas und beinhaltet alle kohlenstoffhaltigen Spezies wie CO_2 , CO und C_nH_m . Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt.

Wie aus der Abbildung zu ersehen ist, überlagern sich beide Prozesse stark. Die Trocknungskurve ist im Vergleich zum Kohlenstoffabbrand geringfügig in Richtung Brennstoffeintrag verschoben. Das bedeutet, dass Trocknung und nachfolgend der Kohlenstoffabbrand von der Bettoberfläche nach unten erfolgen müssen. Diesen Sachverhalt stellt man auch bei Vergleich der axialen Temperaturprofile fest. Während die Temperaturen von Rost und Gutbett (50mm oberhalb des Rostes) in Rostzone 1 noch sehr niedrig sind, ist die Gastemperatur oberhalb des Bettes stark angestiegen. Diese Ergebnisse deuten insgesamt auf eine geringe Vertikalvermischung innerhalb des Brennstoffbettes.

Die Vermischung des Festbettes wird hauptsächlich durch den Rosttyp bestimmt. Bei dem an TAMARA installierten Vorschubrost sollte eine Optimierung durch

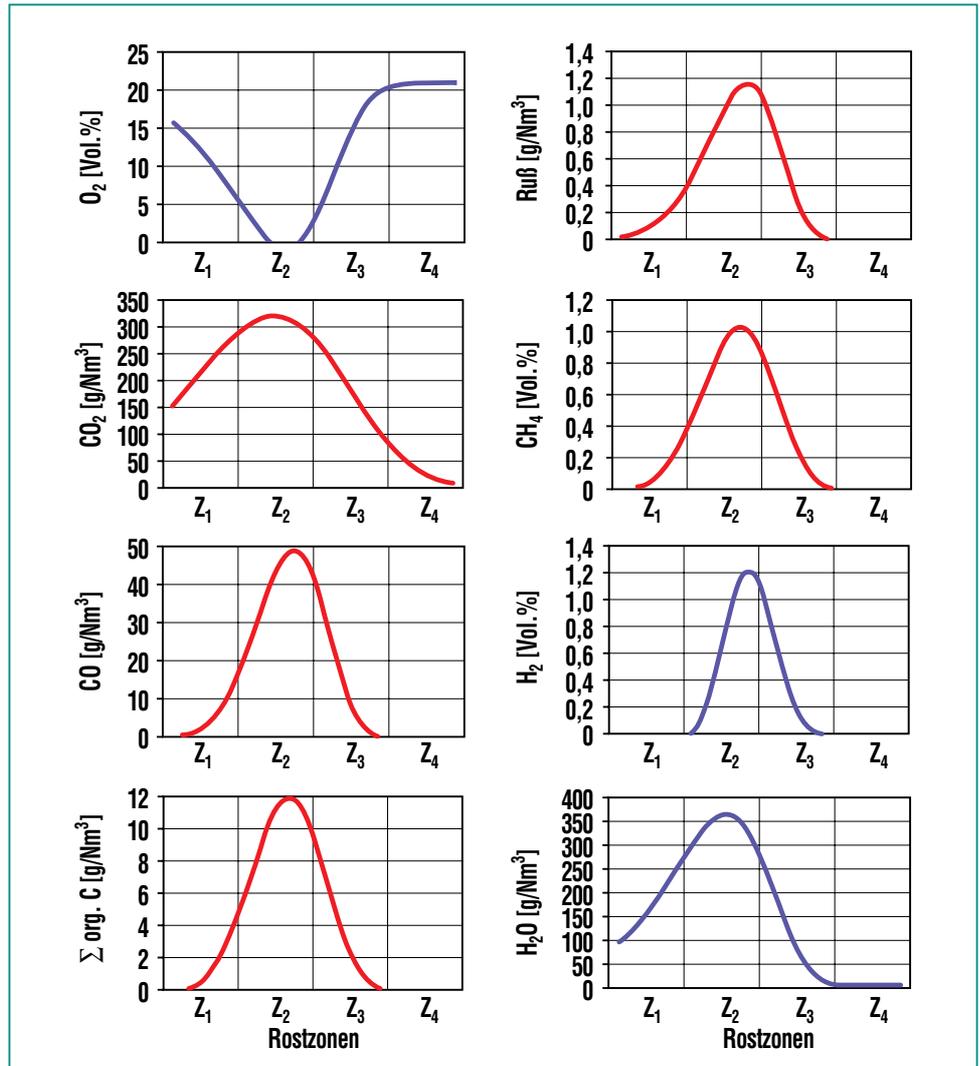


Abb. 4: Axiale Konzentrationsprofile im Rauchgas oberhalb des Gutbettes.

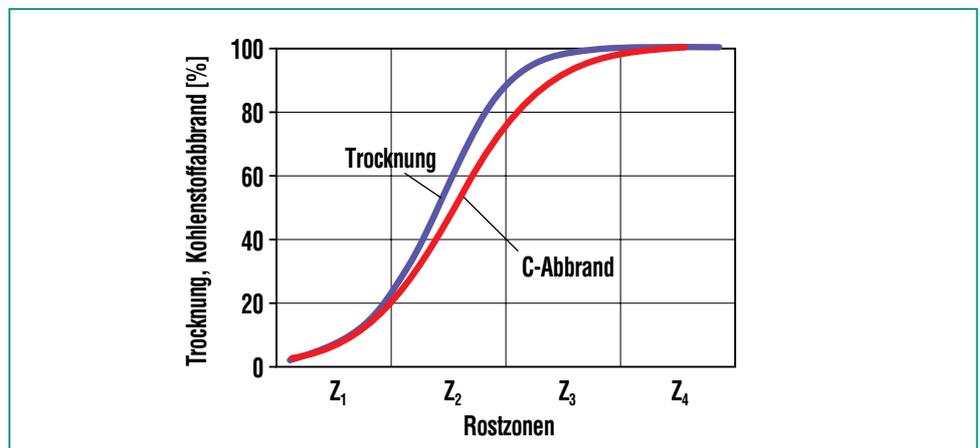


Abb. 5: Trocknung und Kohlenstoffabbrand im Brennstoffbett.

Änderung der Rostparameter (Frequenz und Hub der Roststäbe) möglich sein, so dass die Hauptreaktionen Trocknung und C-Abbrand den einzelnen Rostzonen besser zugeordnet werden können. Dadurch kann eine gezieltere Zuführung von Primärluft (O_2) in die vier Rostzonen erfolgen.

Der Vergleich der einzelnen Brennstoffe ergab, dass bei den heizwertreichen Brennstoffen (niedrige Feuchten) schon sehr früh die Zündung des Festbettes erfolgt und der Kohlenstoffabbrand auf einem kleinen Teilbereich des Rostes stattfindet. Im Gegensatz dazu benötigen niedrigkalorische Brennstoffe deutlich mehr Zeit zum Ausbrand und damit einen wesentlich längeren Rostweg. Brennstoffe mit hohen Heizwerten führen im Feuerraum zu lokal sehr hohen Konzentrationen an CO, Kohlenwasserstoffen und Ruß.

Produkte unvollständiger Verbrennung

Beim Verbrennungsprozess soll ein möglichst vollständiger Umsatz der im Brennstoff enthaltenen Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff zu Kohlendioxid und Wasser erfolgen. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, sind in den Rauchgasen, die das Brennstoffbett verlassen, sehr hohe Konzentrationen von nicht vollständig oxidierten primären Verbrennungsprodukten vorhanden. Neben CO und Ruß ist vor allem die Kenntnis über Art und Konzentrationen der organischen Verbindungen, die sich hinter

dem Summenparameter Σ org. C verbergen, von Interesse.

Die Offline-Analysen mittels GC/MS-Kopplung zur Identifikation und Quantifizierung der primär gebildeten Kohlenwasserstoffe aus den Probefractionen Flugasche, Kondensat und Rauchgas ergeben eine sehr große Anzahl einzelner Verbindungen. Der Anteil der leicht flüchtigen Verbindungen beträgt mehr als 90%. Die Hauptkomponente der Kohlenwasserstoffe ist für alle Brennstoffe Methan. Bei Holz beträgt der Methananteil ca. 65%, bei allen anderen Brennstoffen ca. 45% der Gesamtkonzentration an Σ org. C. Die parallel durchgeführten Online-Messungen mittels IR (Infrarotabsorption) ergeben eine sehr gute Übereinstimmung.

Neben Methan konnten Ethin (bis 12 g/Nm^3), Ethen (bis 12 g/Nm^3) und Benzol (bis 15 g/Nm^3) als weitere Hauptkomponenten identifiziert werden. Die Analysen der Kondensat- und Feststoffproben ergaben eine Reihe von polyzyklischen Aromaten. Die Hauptkomponenten dieser Verbindungsklasse sind Naphthalin (bis 1 g/Nm^3) und Phenanthren (bis $0,5 \text{ g/Nm}^3$). Die angegebenen Maximalkonzentrationen wurden bei den Coverbrennungsexperimenten mit Elektro-/Elektronikschrott gefunden.

Signifikante Unterschiede in der Spezieszusammensetzung der organischen Hauptverbindungen beim Einsatz der unterschiedlichen Brennstoffe konnten nicht nachgewiesen werden. Für alle untersuchten Brennstoffe (auch

die Biobrennstoffe) wurde eine vergleichbare Produktverteilung der oben erwähnten organischen Hauptverbindungen festgestellt. Unterschiede ergeben sich nur in der absoluten Konzentration an Σ org. C.

Viele der identifizierten organischen Verbindungen, insbesondere die aromatischen Kohlenwasserstoffe, sind toxisch. Ein effizienter Ausbrand der Abgase ist daher zwingend notwendig.

Es ist seit langem bekannt, dass für die Bildung von polychlorierten Dibenzo-p-Dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/F) neben den Cl- und Cu-Konzentrationen im Brennstoff die Güte des Abgasausbrandes eine entscheidende Rolle spielt [6, 13]. Bei den in der Abfallverbrennung möglichen Bildungsreaktionen:

- Bildung aus partikulärem Kohlenstoff
- heterogene Gas/Feststoffreaktionen
- homogene Gasphasenreaktionen

sind immer Produkte unvollständiger Verbrennung beteiligt [7].

Beim wichtigsten Mechanismus, der De-Novo-Synthese [6], erfolgt die Bildung von PCDD/F proportional dem Kohlenstoffgehalt der Flugaschen bei Temperaturen oberhalb von 200°C . Insbesondere feindisperse Kohlenstoffpartikel (Ruß) spielen eine entscheidende Rolle [8]. Die Bildung von Ruß erfolgt in komplexen Reaktionen aus kleineren organischen Vorläuferverbindungen (z.B. Ethin, Ethen, Benzol usw.) in der Flamme bei hohen

Temperaturen und unter Sauerstoffmangel.

Um die Bildung von PCDD/F zu minimieren, muss daher der Verbrennungsprozess so geführt werden, dass die Bildung von Kohlenwasserstoffen vermindert bzw. gebildete Rußpartikel möglichst vollständig im Feuerraum oxidiert werden.

Numerische Simulation des Gasausbrandes

Neben experimentellen Untersuchungen stellen Simulationsprogramme zur Berechnung der Verbrennungsprozesse in technischen Anwendungen ein wertvolles Hilfsmittel dar. Mit diesen Methoden können die zwei- oder dreidimensionalen turbulenten Verteilungen der Strömung, Temperatur und Konzentrationen in einem Brennraum berechnet werden. Dazu werden die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie auf einem Rechengitter diskretisiert, und das daraus resultierende System von linearen Gleichungen wird in der Regel iterativ gelöst.

Zur Berechnung des Gasphasenumsatzes in der Anlage TAMARA wurde das kommerzielle Programm FLUENT [9] eingesetzt. Die gemessenen Daten der lokalen Gaszusammensetzung, Gastemperaturen und lokalen Primärluftflüsse über der Rostlänge wurden ähnlich der Vorgehensweise von Nasserzahdeh [4] und Dos Santos [3] als Eingangsparameter für die Rechnung verwendet. Die Ausbrandrechnungen beinhalten die Umsetzung von CO, C_nH_m, H₂ und kohlen-

stoffhaltigen Partikeln (Ruß) [11], wobei die Bildung von Ruß im Bereich der Flammen vernachlässigt wurde.

Die Ergebnisse der Rechnung sind in Abb. 6a exemplarisch für

das Konzentrationsfeld von CO des Experiments mit dem Basisbrennstoff Müll/BRAM dargestellt. Der Ausbrand erfolgt bei überstöchiometrischer Primärluftmenge ($\lambda_{\text{prim}} \approx 1,5$) mit dem Restsauerstoff der Luftzonen vor bzw.

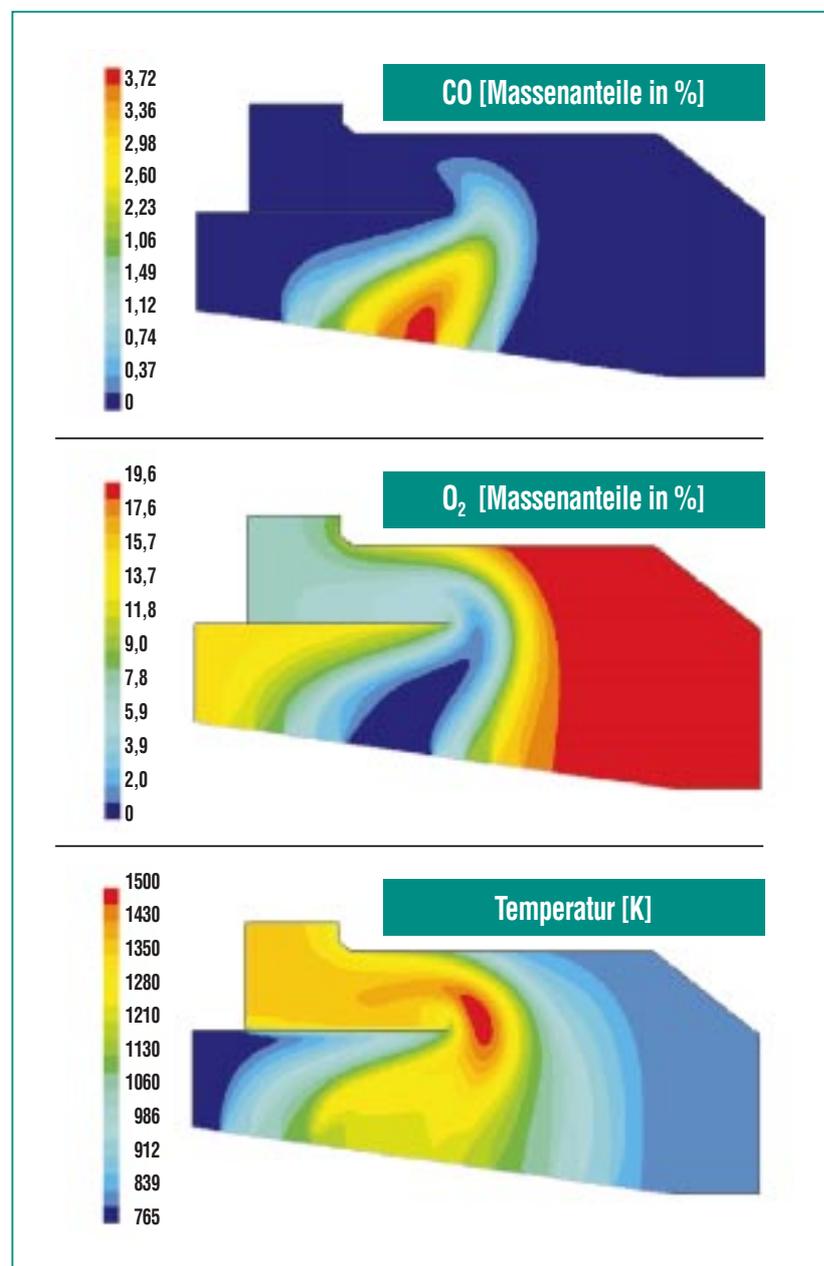


Abb. 6: Abgasausbrand im Feuerraum von TAMARA (FLUENT-Modellrechnungen) – a) Kohlenmonoxidkonzentrationen, b) Sauerstoffkonzentrationen, c) Abgastemperaturen.

nach der Hauptverbrennungszone nahezu vollständig innerhalb des Feuerraums. Deshalb ist eine Zugabe von Sekundärluft im ersten Strahlungszug bei diesen hohen Primärluftzahlen nicht erforderlich. Das Ausbrandverhalten der Kohlenwasserstoffe und des Wasserstoffs ähnelt dem CO-Abbrand, da die turbulente Vermischung der brennbaren Gase mit dem Restsauerstoff aus benachbarten Luftzonen die Ausbrandreaktionen im wesentlichen bestimmt.

Die Rauchgasverweilzeiten innerhalb des Feuerraumes von TAMARA liegen unter den beschriebenen Versuchsbedingungen im Bereich von 3 bis 11 Sekunden. Diese Zeit ist für eine gute Vermischung der Rauchgase bis zum Eintritt in den ersten Strahlungszug ausreichend, was

durch das berechnete Sauerstoffkonzentrationsfeld im Feuerraum belegt wird (Abb. 6b).

Das Temperaturfeld innerhalb des Feuerraumes (Abb. 6c) zeigt ein ausgeprägtes Maximum im Bereich des Ausbrandes von CO und der Kohlenwasserstoffe. Die maximalen Temperaturen betragen bis zu 1230°C. Unter diesen Bedingungen sollten auch thermisch stabile organische Verbindungen weitestgehend zerstört werden. Hierzu sind allerdings detailliertere Untersuchungen notwendig.

Der Vergleich von CO- und O₂-Konzentrationen und von Abgas-temperaturen aus den Simulationsrechnungen mit den experimentellen Daten am Feuerraumaustritt ergeben gute Übereinstimmungen.

Ausblick

Die vorgestellte Arbeit zeigt, dass durch Kombination von experimentellen Untersuchungen mit numerischen Simulationsrechnungen der Verbrennungsprozess detailliert untersucht werden kann. Zukünftig sollen Modellrechnungen zum Ausbrand des Festbettes auf dem Rost [12] die vorgestellten Arbeiten ergänzen. Hinsichtlich der Minderung von organischen Schadstoffen wie PCDD/F wurden inzwischen Methoden zur experimentellen Bestimmung von halogenierten organischen Verbindungen in Hochtemperaturzonen entwickelt. Damit ist die Basis für zukünftige Parameterstudien an der TAMARA-Anlage zur Optimierung des Verbrennungsprozesses mit dem Ziel einer primärseitigen Schadstoffminderung vorhanden.

Literatur

- [1] H. Zwahr
VGB Kraftwerkstechnik 76,
(1996) Heft 2, S. 126-133
- [2] H. Vogg, A. Merz, H. Hunsinger,
W. Walter,
Chemie Ingenieur Technik, 68,
(1996), S. 147-149
- [3] A.M. Dos Santos, R. Collin,
*Proceedings of the
fifteenth Biennial
Conference*, (1992),
Detroit Michigan,
May 17-20,
S. 133-143
- [4] V. Nasserzadeh,
J. Swithenbank, C. Schofield,
D. W. Scott, A. Loader,;
A. Leonard; R. Russel,
D. Winn,
Trans. IChemE, 71, (1993),
S. 269-279
- [5] J. Swithenbank, V. Nasserzadeh,
D. Scott, B. Jones,
Waste Management, 11, (1991),
S. 240-261
- [6] H. Vogg, M. Metzger,
L. Stieglitz,
*Waste Management and
Research*, 5, (1987), S. 285-294
- [7] KH. Ballschmiter, R. Bacher,
Dioxine, VCH-Verlag
ISBN 3-527-28768-X (1996),
S. 92-113
- [8] H. Hunsinger, S. Kreis,;
H. Vogg,
Chemosphere, Vol.34, (1997),
S.1033-1043
- [9] *FLUENT Manual* (1999),
FLUENT Incorporated, Centerra
Resource Park, 10 Cavendish
Court, Lebanon, NH 03766
- [10] H. Hunsinger, K. Jay,
J. Vehlow, H. Seifert,
7th Waste to Energy Con-
ference, (1999), May 17-19,
Tampa, Florida,
Proc. S. 199-212
- [11] H.H. Frey, B. Peters,
H. Hunsinger, J. Vehlow,
*5th Internat. Conf. on
Technologies and Combustion
for a Clean Environment*,
Lisboa, P., (1999), July 12-15,
Proc. Vol.1, S. 323-328
- [12] B. Peters,; L. Krebs,
E. Schröder,
in diesem Heft
- [13] H. Vogg, H. Hunsinger,
A. Merz, L. Stieglitz, J. Vehlow,
VDI-Berichte 895, (1991),
S. 193-210