Beckmann, M.; Davidovic, M.; Gehrmann, H.-J.; Scholz, R.: Prozeßoptimierung der Verbrennung und Vergasung von Abfällen in Rostsystemen. VDI Berichte 1492. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1999, S. 361-368

Prozeßoptimierung der Verbrennung und Vergasung von Abfällen in Rostsystemen

Dr.-Ing. **M. Beckmann,** Dipl.-Ing. **M. Davidovic,** Dipl.-Ing. **H.-J. Gehrmann,** Prof. Dr.-Ing. **R. Scholz,** Clausthal-Zellerfeld

1 Einleitung

Bei der Prozeßführung der Verbrennung und Vergasung von Abfällen in Rostsystemen sind insbesondere seit Beginn der 90er Jahre eine Reihe von Entwicklungen und Verbesserungen im Hinblick auf wesentliche Teilaufgaben wie:

- die Senkung der Abgasströme,
- den Abbau von Schadstoffen und damit
- die Reduzierung der Schadstofffrachten,
- die Verbesserung der Aschequalität sowie
- die Steigerung des Gesamtwirkungsgrades

erreicht worden. Dabei ist das Potential der Primärmaßnahmen noch nicht ausgeschöpft. Künftige Weiterentwicklungen sind insbesondere in der Kombination von Maßnahmen zur umfassenden Optimierung verschiedener Teilaufgaben zu sehen. Das erfordert eine entsprechend sorgfältige Abstimmung der Primärmaßnahmen untereinander.

In dem vorliegenden Beitrag wird auf das Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen zur Prozeßoptimierung eingegangen. Eine wichtige Voraussetzung ist dabei die Möglichkeit zur unabhängigen Optimierung des Feststoffumsatzes auf dem Rost und der Nachverbrennung der Gase. Bei einem unterstöchiometrischen Feststoffumsatz ergeben sich darüber hinaus weitere Vorteile insbesondere im Hinblick auf die Absenkung der Abgasströme und die Umsetzung bekannter Primärmaßnahmen in einer eigenständigen Nachverbrennung. Insgesamt wird deutlich, daß sowohl zur Optimierung einzelner Teilaufgaben wie auch im Hinblick auf das Zusammenwirken verschiedener Primärmaßnahmen zur Optimierung verschiedener Teilaufgaben bei der Verbrennung wie auch bei der Vergasung auf dem Rost noch eine Reihe von wichtigen Fragestellungen gegeben sind.

2 Prozeßführung in Rostsystemen

Über die Prozeßführung in Rostsystemen ist schon mehrfach ausführlich berichtet worden, daher werden hier nur zusammenfassend einige wesentliche Punkte erwähnt. Die "klassische" Restmüllverbrennung kann als ein Verbrennungs-Nachverbrennungskonzept eingeordnet werden. In der ersten Einheit erfolgt eine Verbrennung auf dem Rost. Anschließend werden in der zweiten Einheit die vom Rost kommenden Gase und Flugstäube in der Nachverbrennungszone nachverbrannt. Es kann hier deshalb zusammengefaßt von "Verbrennung auf dem Rost" gesprochen werden, weil der insgesamt dem Rost mit dem Reaktionsgas (in der Regel Luft) zugeführte Sauerstoff, bezogen auf den zugeführten Abfall, zu überstöchiometrischen Verhältnissen (z.B. $\lambda_R \approx 1{,}3$) führt.

Bei Rostsystemen sind sehr vielfältige Möglichkeiten zur Steuerung der maßgeblichen Haupteinflußgrößen und damit zur gezielten Beeinflussung der einzelnen Teilvorgänge entlang des Reaktionsweges vorhanden (Luftstufung, Sauerstoffanreicherung, Rostgeschwindigkeit usw.) [1-5].

Im Zusammenhang mit dem Nachverbrennungsprozeß sei auf folgende Anforderungen hinsichtlich der Haupteinflußgrößen und der zugehörigen Steuerungsmöglichkeiten hingewiesen.

- Vermischung bzw. Reaktorverhalten,
- Verweilzeit,
- Sauerstoffkonzentration und

- Temperaturniveau bei Vermeidung von Quencheffekten an "kalten" Wandoberflächen.

Die bei Rostsystemen vorhandenen Möglichkeiten zur Steuerung der Einflußgrößen können insbesondere dann wirkungsvoll im Sinne von Primärmaßnahmen eingesetzt werden, wenn man im Vergleich zu der derzeit üblichen klassischen Prozeßführung die Verfahrensschritte

- Feststoffumsatz auf dem Rost,
- Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Gase und
- Wärmeauskopplung

deutlicher voneinander trennt (Bild 1). Mit dieser getrennten Prozeßführung kann man in einem nächsten Schritt dazu übergehen, den Feststoffumsatz auf dem Rost stark unterstöchiometrisch im Bereich von $\lambda_R \approx 0{,}4$ bis $\lambda_R \approx 0{,}8$ zu betreiben [6-8]

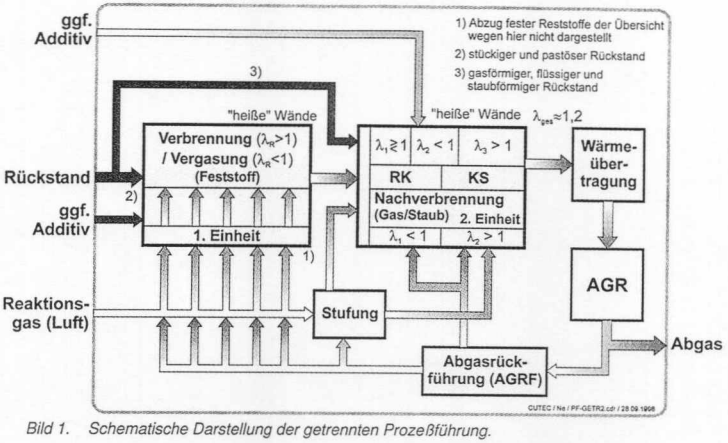

Bild 1. Schematische Darstellung der getrennten Prozeßführung.

3 Möglichkeiten zur Prozeßoptimierung bei Rostsystemen

Im Zusammenhang mit den eingangs erwähnten Teilzielen werden im folgenden zunächst für den Verbrennungs- und danach für den Vergasungsbetrieb auf dem Rost verschiedene spezielle Maßnahmen zur Optimierung diskutiert. Auf allgemeine Gesichtspunkte wie z.B. die Trennung von Feststoffumsatz auf dem Rost und möglichst unabhängige Nachverbrennung mit entsprechend hoher Durchmischung in einem ersten Abschnitt (Rührkessel-Element) und nachgeschalteter Reaktionszone (Kolbenströmer-Element) sowie Vermeidung von Quencheffekten ("kalte" Wände) wird hier nicht weiter eingegangen. Über die Wirksamkeit dieser Maßnahmen ist anhand von Ergebnissen industrieller Anlagen bereits mehrfach berichtet worden [z.B. 1-3].

3.1 Verbrennungs- Nachverbrennungsfahrweise

Für die Verbrennungs-Nachverbrennungsfahrweise sollen hier beispielhaft die Maßnahmen:

- Sauerstoffanreicherung zur Primärluft im Rost,
- Sauerstoffanreicherung im Rost in Verbindung mit Abgasrückführung in der Nachverbrennung und
- Luftstufung entlang des Rostweges

dargestellt werden.

Die Sauerstoffanreicherung bzw. Sauerstoffzufuhr bei gleichbleibender Stöchiometrie, d.h., Verminderung des Stickstoffballastes, führt zu einer Absenkung des Massenstromes des Reaktionsgases. Damit ist eine Anhebung der Temperatur im Bett und eine Absenkung der Strömungsgeschwindigkeit des Gases durch das Bett verbunden, wobei letztere teilweise durch die Anhebung der Temperaturen kompensiert wird. Aus Messungen der Gaszusammensetzung über dem Bett an Chargenrost-Versuchsanlagen [9] und an Pilotanlagen ist bekannt, daß am Rostanfang in der Ent- und Vergasungszone im Bett reduzierende Bedingungen herrschen. Diese sind wiederum in Verbindung mit hohen Bettemperaturen eine günstige Voraussetzung für die Verflüchtigung von Schwermetallen. Laborversuche [10, 11] und Untersuchungen im Pilotmaßstab [12] haben gezeigt, daß insbesondere für Blei und Zink unter reduzierenden Bedingungen bei hohen Temperaturen eine stärkere Verflüchtigung im Vergleich zu oxidierenden Bedingungen eintritt. Insgesamt hat diese Art der Sauerstoffanreicherung somit eine Verbesserung der Schlackequalität zur Folge. Die Absenkung der Strömungsgeschwindigkeit des Gases im Bett führt zu einer entsprechenden Verminderung des Staubaustrages und damit zu einer Reduzierung der Kesselasche und des Flugstaubes.

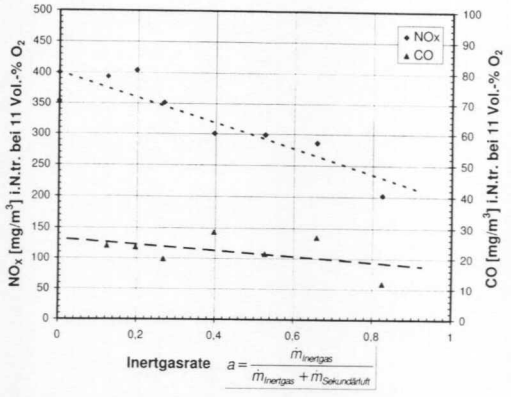

Bild 2. Einfluß der Abgasrückführung auf die Kohlenmonoxid- und Stickoxidkonzentration.

Die o.g. Sauerstoffanreicherung im Rostbereich hat für die Nachverbrennung die positive Auswirkung, daß ein geringerer Gasmassenstrom durch die Injektorstrahlen der Sekundärluft entsprechend besser umgewälzt bzw. eingemischt wird. In Verbindung mit der Rückführung von Abgasen läßt sich dabei neben einer Verbesserung des Ausbrandes (CO, C_XH_Y, usw.) auch die Stickstoffoxidemission vermindern. Beispielhaft ist der Einfluß der Abgasrückführung in den Nachverbrennungsprozeß einer Müllverbrennungsanlage in Bild 2 dargestellt [13]. Dabei wurde die Abgasrückführung durch die Zufuhr von Stickstoff (Inertgas) simuliert. Die Durchmischung der vom Rost kommenden Abgase erfolgt bei einem hohen Inertgasverhältnis mit Injektorstrahlen, die kaum Sauerstoff enthalten. Damit können im Gegensatz zu Injektorstrahlen mit Luft als Reaktionsgas hohe Temperaturspitzen vermieden werden. Insgesamt erhält man so eine Absenkung der NO_X-Konzentration. Die über dem Inertgasverhältnis gleichbleibend niedrige CO-Konzentration zeigt, daß bei einer entsprechend ausgelegten Durchmischungsleistung der CO-Umsatz im vorliegenden Fall nicht unmittelbar von dem Sauerstoffangebot abhängt. Die Absenkung des Gasvolumenstromes vom Rost und die Erhöhung der Temperaturen erscheint auch im Hinblick auf die Zerstörung der organischen Spurenstoffe wirksam. In diesem Zusammenhang sei auf die Untersuchungen zum Einfluß von Verweilzeit und Temperatur auf den Abbau von PCDD/F an einer Rost-Pilotanlage [14] verwiesen. Die Sauerstoffanreicherung im Rost und die Abgasrückführung in der Nachverbrennung wird bereits im industriellen Maßstab durchgeführt [15].

Wird der Rost im Verbrennungsbetrieb mit Luft als Reaktionsgas betrieben, so lassen sich durch die Luftstufung entlang des Rostweges auch eine Reihe von Teilzielen positiv beeinflussen. Zunächst sei auf die Minderung von Stickoxiden eingegangen. Bereits am Rostanfang treten flüchtige Brennstoffstickstoffverbindungen (NH_i, $N_{org.}$) aus dem Brennstoffbett aus, die bei entsprechendem Sauerstoffangebot zu NO umgesetzt werden können. Mit zunehmender Freisetzung flüchtiger Bestandteile

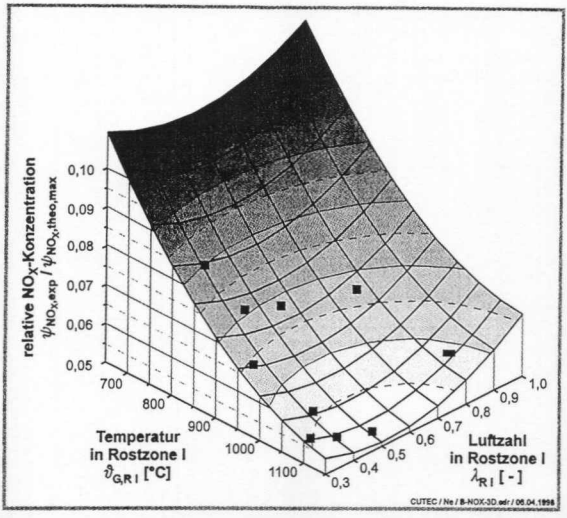

Bild 3. NO_X-Konzentration bei Verbrennung auf dem Rost in Abhängigkeit von der Temperatur $\vartheta_{G,RI}$ und der Luftzahl λ_{RI}

und der Bildung von CH_4 erfolgt die Umsetzung von NH_i-Radikalen zu HCN. Diese Reaktionsverläufe sind u.a. aus Chargenrostversuchen bekannt [16] und lassen in Bezug auf die NO-Minderung bereits in der Rosteinheit die folgenden Annahmen zu. Gebildetes NO wird mit NH_i zu N_2 abgebaut. Bei diesem sogenannten internen Exxon-Prozeß im Feuerraum des Rostes ist jedoch im Vergleich zu dem SNCR-Verfahren ein höheres Temperaturniveau anzustreben. Um eine Umsetzung von NH_i-Radikalen mit CH_4 zu HCN zu unterdrükken, sind Temperaturen oberhalb von 1000 °C, die zu einem Zerfall von CH_4 führen, erforderlich. Aus diesen Überlegungen läßt sich ableiten, daß im Hinblick auf die Freisetzung der Flüchtigen und die Zersetzung von CH_4 am Rostanfang zunächst die Temperatur $\vartheta_{G,RI}$ eine wichtige Einflußgröße ist. Weiter nimmt die Sauerstoffzufuhr bzw. Luftzahl λ_{RI} in der ersten Rostzone auf die Einstellung eines günstigen NO/NH_i-Verhältnisses entscheidend Einfluß.

Die beschriebene Wirkung der Haupteinflußgrößen $\vartheta_{G,RI}$ und λ_{RI} läßt sich durch Untersuchungen an der Pilotanlage im Rahmen erster Tastversuche bestätigen. Als Brennstoff wurden UF-Spanplatten ($\xi_{B,N,waf} \approx 1{,}8$ Ma.-%) eingesetzt. Um das Temperaturniveau zunächst unabhängig von der Luftzahl λ_{RI} untersuchen zu können, wurde eine Variation des Wassergehaltes und des Inertgehaltes des eingesetzten Brennstoffes bei gleichbleibender thermischer Last vorgenommen. Die Luftzahl in der ersten Rostzone λ_{RI} ist durch Umverteilung der Primärluft bei konstanter Gesamtluftzahl λ_{ges} eingestellt worden. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden die im Rohgas gemessenen NO-Konzentrationen auf die jeweils entsprechend des Brennstoffinputs theoretisch maximalen NO-Konzentrationen bezogen. Diese relativen NO-Werte sind in Bild 3 in Abhängigkeit von der Temperatur $\vartheta_{G,RI}$ und der Luftzahl λ_{RI} dargestellt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß die Ergebnisse aus Versuchen mit unterschiedlichen Strömungsführungen (Gleichstrom, Mittelstrom, Gegenstrom) resultieren. Die hierbei durchgeführten Parametervariationen reichen jedoch für eine Bewertung noch nicht aus, weshalb auf eine weitere Diskussion der Strömungsführung an dieser Stelle verzichtet wird. Zunächst zeigt sich erwartungsgemäß, daß mit zunehmender Temperatur $\vartheta_{G,RI}$ die NO-Werte sinken. Darüber hinaus ergeben sich für jeweils konstante Temperaturen lokale Minima in einem Bereich von $0{,}4 < \lambda_{RI} < 0{,}6$. Anhaltspunkte zur Unterstützung dieser Ergebnisse lassen sich u.a. aus Untersuchungen im Zusammenhang mit der NO-Minderung an einem Festbettvergaser mit getrennter Nachverbrennung [17] ableiten.

Aus Sicht der NO-Minderung sind hohe Temperaturen und reduzierende Bedingungen am Rostanfang durch eine entsprechende Luftverteilung von Vorteil. Das wirkt sich darüber hinaus, wie bereits vorangehend im Zusammenhang mit der Sauerstoffanreicherung diskutiert, ebenfalls im Hinblick auf die Verbesserung der Aschequalität tendenziell günstig aus.

3.2 Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise

Mit der Vergasung auf dem Rost (erste Prozeßstufe) wird zunächst ebenso wie bei der Verbrennung ein

- möglichst niedriger Restkohlenstoffgehalt der verbleibenden Reststoffe

und darüber hinaus die

- Einstellung einer zur eigenständigen Nachverbrennung geeigneten Brenngaszusammensetzung

angestrebt [6-8].

Bei Vergasungsverhältnissen lassen sich ebenso wie bei einer Verbrennung Restkohlenstoffgehalte kleiner 1 Ma.-% erreichen; koksartige Rückstände werden damit vermieden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, daß bei einer insgesamt unterstöchiometrischen Betriebsweise des Rostprozesses (Vergasung), im Bereich der Ausbrandzone, falls erforderlich, durchaus lokal überstöchiometrische Bedingungen bezogen auf den Restkohlenstoff eingestellt werden können.

Ausgeprägte Unterschiede zwischen der Vergasungs- und Verbrennungsfahrweise ergeben sich hinsichtlich der Flugstaubbildung. Die im Vergleich zu der überstöchiometrischen Fahrweise bei Vergasungsbetrieb deutlich niedrigeren Luft- bzw. Reaktionsgasmassenströme haben entsprechend abgesenkte Durchströmungsgeschwindigkeiten durch das Brennbett zur Folge. Mit abnehmenden Stöchiometrieverhältnissen wird daher auch die Flugstaubbildung vermindert [8].

Die Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Brenngase erfolgt in einer eigenständigen Feuerung. Die Brenngase weisen einen Heizwert von ca. 2000 kJ/kg auf und werden dem Nachverbrennungsprozeß mit Temperaturen von 750 °C bis 850 °C zugeführt. Die getrennte Prozeßführung mit Vergasung auf dem Rost (Bild 1) gestattet im Gegensatz zur klassischen Verbrennungs-Nachverbrennungs-Prozeßführung eine unabhängige Optimierung des Nachverbrennungsprozesses im Hinblick auf die Reduzierung von Schadstoffen, wie z.B. Kohlenmonoxid, organische Verbindungen und Stickoxide. Die dabei in Frage kommenden Primärmaßnahmen sind im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Prozeßführung von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Brennstoffen bereits sehr umfangreich untersucht worden [z.B. 18-21]. Wichtig für die Optimierung der Nachverbrennung ist die Abstimmung von Temperatur, Stöchiometrie (Sauerstoffkonzentration), Verweilzeit und Verweilzeitverhalten.

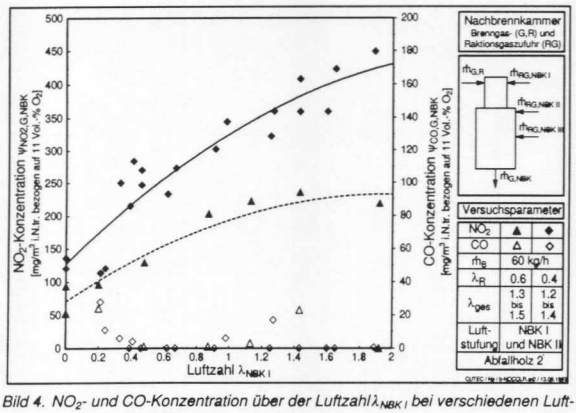

Bild 4. NO_2- und CO-Konzentration über der Luftzahl $\lambda_{NBK\,I}$ bei verschiedenen Luftzahlen im Rost [8].

Das Bild 4 zeigt als Beispiel NO-Konzentrationen im Rohgas (Ende Nachbrennkammer, angegeben als NO_2) in Abhängigkeit von der Luftzahl in der ersten Stufe der Nachbrennkammer $\vartheta_{NBK\,I}$ für zwei unterschiedliche Stöchiometrieverhältnisse in der Roststufe ($\lambda_R \approx 0{,}4$ und $\lambda_R \approx 0{,}6$). Zunächst ergibt sich in beiden Fällen der bekannte Zusammenhang zwischen der Stöchiometriezahl $\lambda_{NBK\,I}$ in der ersten Stufe der Brennkammer und der NO–Konzentration ψ_{NO2}

im Rohgas bei der Reduzierung von Brennstoff–NO. Darüber hinaus ist zu erkennen, daß die NO-Werte bei einer Primärluftzahl von $\lambda_R \approx 0{,}6$ deutlich niedriger sind als bei $\lambda_R \approx 0{,}4$. Das höhere Primärluftverhältnis in der Rostanlage bedeutet neben der Erhöhung des Sauerstoffangebotes im vorliegenden Fall einen Anstieg im Temperaturniveau von $\vartheta_R \approx 700$ °C auf $\vartheta_R \approx 1000$ °C. Damit ist bereits in der Roststufe eine höhere Abbaurate von flüchtigen Brennstoff-N-Komponenten wie HCN und NH_i über NO und eine Reduktion von NO zu N_2 verbunden. Im vorliegenden Fall (Bild 4) ergibt sich, – ausgehend von NO-Konzentrationen $\vartheta_{NO2} \approx 450$ mg/m^3 (i.N.tr. bei 11 Vol.-% O_2) bei $\lambda_R \approx 0{,}4$ und bei einer ungestuften Nachverbrennung mit $\lambda_{NBK\,I} \approx 1{,}8$ –, für eine annähernd gleiche Gesamtluftzahl $\lambda_{ges} \approx 1{,}3$ bei einer Fahrweise mit $\lambda_R \approx 0{,}6$ und einer gestuften Nachverbrennung mit $\lambda_{NBK\,I} \approx 0{,}4$ eine NO-Minderung auf $\psi_{NO2} \approx 100$ mg/m^3. Wie aus anderen Untersuchungen bekannt ist, ist eine hohe Verweilzeit im unterstöchiometrischen Bereich in Verbindung mit einer Kolbenströmer-Charakteristik für niedrige NO-Emissionen anzustreben [22]. Im Hinblick auf die Einstellung einheitlicher Reaktionsbedingungen ist jedoch eine intensive Durchmischung (Rührkessel-Element) vor der Reaktionsstrecke erforderlich [23]. Bei einer solchen Aufteilung des Verweilzeitverhaltens mit einem Rührkessel-Element zu Beginn und einem nachgeschaltetem Kolbenströmer-Element wird bei entsprechender Luftstufung über die NO-Minderung hinaus ein hoher Ausbrand erzielt. Das Bild 3 zeigt, daß die zugehörigen CO-Konzentrationen unterhalb eines Niveaus von 10 mg/m^3 liegen. Wie in [24] dargestellt werden bei einer in dieser Weise optimierten Nachverbrennung, d.h., bei Abstimmung von Temperatur, Verweilzeit und Verweilzeitverhalten auch bei Temperaturen im Bereich um 850 °C ausreichend hohe Abbaugrade organischer Spurenstoffe (PCDD/F, Chlorbenzole usw.) erreicht.

Die im Hinblick auf die NO-Minderung günstige Fahrweise mit $\lambda_R \approx 0{,}6$ erscheint jedoch wegen der damit verbundenen hohen Temperaturen von Vorteil. Wie bereits erwähnt wirken sich hohe Temperaturen in Verbindung mit reduzierenden Bedingungen günstig aus. Die Übertragung dieser aus Gleichgewichtsrechnungen und aus Laborversuchen gewonnenen Erkenntnis in den Pilotmaßstab ist jedoch noch nicht abgeschlossen [12].

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden für die Prozeßoptimierung der Verbrennung Einflüsse von Sauerstoffanreicherung und Luftstufung entlang des Rostes sowie von Abgasrückführung in der Nachverbrennung dargestellt. Für die Optimierung der Vergasung auf dem Rost ist der Einfluß des Stöchiometrieverhältnisses auf dem Rost und der Luftstufung in der eigenständigen Nachverbrennung betrachtet worden.

Zusammenfassend kann in Bezug auf die Sauerstoffanreicherung festgestellt werden, daß die erwähnten Teilziele Verminderung des Abgasvolumenstromes, der Schadstofffrachten und Verbesserung der Aschequalität [15] positiv beeinflußt werden. Inwieweit sich auch eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades ergibt muß anhand der jeweils gegebenen Randbedingungen geprüft werden, da u.a. auch die Herstellung des Sauerstoffes als Aufwand in die Bilanz mit einzubeziehen ist [z.B. 15, 25].

Zu der Optimierung der Luftverteilung ist zu bemerken, daß die Teilziele der Minderung von NO Emissionen, der Verbesserung der Aschequalität einschließlich des Ausbrandes positiv beeinflußt werden. Eine Verminderung des Abgasmassenstromes läßt sich nur dann erreichen, wenn mit der Anpassung der Luftverteilung gleichzeitig eine Absenkung der insgesamt zugeführten Primärluftmenge verbunden ist. Die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades ist ebenso wie im Fall der Sauerstoffanreicherung im Einzelfall zu prüfen. Wichtig für künftige Entwicklungen erscheint die weitere Untersuchung von Haupteinflußgrößen für die NO-Minderung bei dem Verbrennungsbetrieb. Der Abbau erfolgt im Feuerraum im wesentlichen über die Reaktion von gleichzeitig vorhandenem NO und NH_i. Einflußgrößen dafür sind über die Strömungsführung hinaus insbesondere die Freisetzung der flüchtigen Bestandteile am Rostanfang, die Temperatur- und die Sauerstoffverteilung im Feuerraum. Die Temperatur wird durch die Prozeßführung im Brennstoffbett und darüber hinaus durch unterschiedliche Feuer-

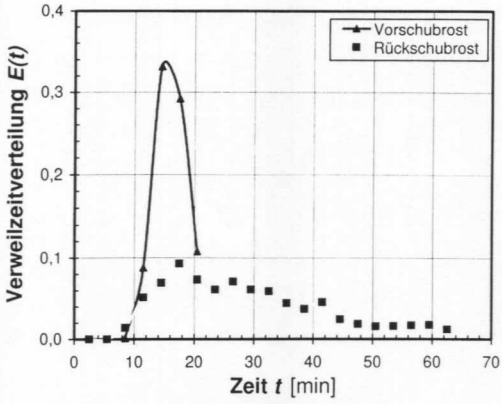

Bild 5. Vergleich der Verweilzeitverteilungen von verschiedenen Rostsystemen bei Einsatz von Blähton.

raumbedingungen (Wärmeauskopplung, Strömungsführung über dem Bett, Strahlungsaustausch mit den Wänden (Feuerraumgeometrie) usw.) beeinflußt. Der Feststoffumsatz im Bett und damit auch die Freisetzung der flüchtigen Bestandteile ist weiter auch abhängig vom Rosttyp. Aus Untersuchungen an einem Kaltmodell zeigt sich entsprechend Bild 5, daß Rückschubroste eine hohe Durchmischung und eine große mittlere Verweilzeit mit entsprechend hohen Betthöhen aufweisen und bei Vorschubrosten die geringere Rückvermischung zu niedrigeren mittleren Verweilzeiten und entsprechend kleinen Betthöhen führt.

Für die Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise kann an dieser Stelle zusammengefaßt werden, daß die erwähnten Teilziele Reduzierung von Schadstoffen und Verbesserung der Aschequalität [10, 12] positiv beeinflußt werden. Im Hinblick auf die Senkung der Abgasströme sei darauf hingewiesen, daß sich bei einer Primärluftzahl von $\lambda = 0{,}4$ bis 0,8 Gesamtluftzahlen (einschließlich Sekundär- und ggf. Tertiärluft in dem Nachbrennkammersystem) von $\lambda_{ges} < 1{,}2$ erreichen lassen [7], was im Vergleich zu den Verhältnissen konventioneller Anlagen eine erhebliche Reduzierung der Abgasströme und damit auch eine Reduzierung von Schadstofffrachten bedeutet. In Verbindung mit der Verminderung von Emissionen durch Primärmaßnahmen läßt sich damit u.a. der Aufwand in der Abgasreinigung senken, was dann wiederum zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades führt. Es gilt jedoch auch hier, daß der Gesamtwirkungsgrad im Einzelfall zu prüfen ist.

5 Symbolverzeichnis

Symbole

h	Spezifische Enthalpie (Heizwert)
ϑ	Temperatur [°C]
λ	Stöchiometrieverhältnis
ξ	Konzentration (Masse)
ψ	Konzentration (Volumen)
τ	Verweilzeit

Indices

B	Brennstoff
exp	experimentell
F	Flugstaub
G	Brenngas/Abgas
ges	gesamt
i.N.tr.	im Normzustand, trocken
max	maximal
NBK	Nachbrennkammer
R	Rost
Re	Reststoffe
RG	Reaktionsgas
theo	*theoretisch*
u	unterer (Heizwert)
waf	wasser- und aschefrei
I,II,III	Zone/Stufe I, II, III

6 Schrifttum

[1] Emissionsminderung bei Müllverbrennungsanlagen. Endbericht eines Verbundvorhabens zwischen Firma MARTIN GmbH, München, NOELL GmbH, Würzburg, L. & C. Steinmüller GmbH, Gummersbach, Projektträger UBA-Berlin, 1994.

[2] Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.

[3] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium "Abfallwirtschaft – Herausforderung und Chance", Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.

[4] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI-Berichte Nr. 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.

[5] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Entwicklungsmöglichkeiten der Prozeßführung bei Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung. FDBR-Symposium, 3. Februar 1996, Rostock. Vortragsband: "Fakten! Die Thermische Abfallverwertung der Zukunft"; S.144-198.

[6] Scholz, R.; Schopf, N.: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and Some Test Results of Pilot Plants. 1989 Incineration Conference, Knoxville, USA, 1989.

[7] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 1995.

[8] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Davidovic, M.: Optimization of Gasification of Waste Materials in Grate Systems. 1997 International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, San Fransisco-Oakland Bay, California, 12.-16. Mai, 1997.

[9] Schumacher, F.; Meichelböck, H.; Merz, A.; Vogg, H.: Entwickung und Inbetriebnahme eines Laborofens zum Studium der Verbrennung von Reststoffen auf Rostsystemen. GVC-Symposium "Abfallwirtschaft – Herausforderung und Chance", Würzburg, 17.-19. Oktober 1994. S. 563-567.

[10] Wochele, J.; Ludwig, Chr.; Stucki, S.: Model Experiments on the Metal Evaporation in MSW Incineration Plants for Environmentally Sound Bottom Ash. R´99 Recovery, Recycling, Re-integration, February 2-5, 1999, Geneva, Switzeland.

[11] Braekman-Danheux, C.; D´haeyere, A.; Fontana, A.; Laurent, P.: Upgrading of Waste Derived Solid Fuel by Steam Gasification. Fuel 1998, Volume 77 No. 1/ 2, p. 55-59.

[12] Biollaz, S.; Beckmann, M.; Davidovic, M.; Jentsch, T.: Improvement of Municipal Solid Waste Bottom Ash Quality by Process Integrated Measures at Grate Systems. Demnächst.

[13] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen - Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. BWK/ TÜ/ Umwelt-Special 44 (1992) Nr. 10.

[14] Merz, A.; Seifert, H.: Process Control of Solid Waste Incineration Plants. VGB-Report No.173, 1999.

[15] Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.

[16] Starley, G. P.; Bradshaw, F. W.; Carrel, C. S.; Pershing, D. W.; Martin, G. B.: The Influence of Bed-Region Stoichiometry on Nitric Oxide Formation in Fixed-Bed Coal Combustion. Combustion and Flame 59: 197-211 (1985).

[17] Keller, R.: Primärseitige NO_X-Minderung mittels Luftstufung bei der Holzverbrennung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46(1994) 11/12.

[18] Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der NO_X- Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. TECFLAM- Seminar, Oktober 1990, Heidelberg, 1990.

[19] Kolb, T.; Leuckel, W.: NO_X- Minderung durch 3-stufige Verbrennung – Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM- Seminar, Stuttgart, 1988.

[20] Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der NO_X- Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985.

[21] Malek, C.; Scholz, R.; Jeschar, R.: Vereinfachte Modellierung der Stickstoffoxidbildung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Ausbrandes bei einer Staubfeuerung. VDI-Berichte Nr. 1090, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.

[22] Klöppner, G.: Zur Kinetik der NO-Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991.

[23] Carlowitz, O.; Jeschar, R.: Entwicklung eines variablen Drallbrennkammersystems zur Erzeugung hoher Energieumsetzungsdichten. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 32 (1980).

[24] Beckmann, M.; Scholz, R.; Griebel, H.: Einfluß von Temperatur, Durchmischung und Verweilzeit auf den Abbau organischer Spurenschadstoffe bei der thermischen Behandlung von Abfallholz. DGMK-Tagungsbericht 9802, ISBN 3-931850-40-4, S. 327-334.

[25] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Brinker, W.: Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren – Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994) 11/12.