Beckmann, M.; Davidovic, M.; Scholz, R.; Weichert, C.: Vergasung und Verbrennung von Abfallholz in Rostsystemen. VDI Berichte 1387. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1998, S. 395-405. ISBN 3-18-091387-8

Vergasung und Verbrennung von Abfallholz in Rostsystemen

Dr.-Ing. Michael Beckmann, Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz, Dipl.-Ing. Milan Davidovic, Dipl.-Ing. Christian Weichert, Clausthal-Zellerfeld

1 Einleitung

In Deutschland fallen gegenwärtig jährlich ca. 21 Mio. t Rest- und Gebrauchtholz an, wovon nur ca. 5 Mio. t stofflich verwertet werden [1]. Die verbleibenden 16 Mio. t bilden das Potential für eine energetische Verwertung. Die Anzahl der Holzfeuerungsanlagen mit einer thermischen Leistung von über 1 MW beträgt schätzungsweise 200 [2]. Abhängig vom Grad der Schadstoffbelastung werden an die Verbrennungsanlagen unterschiedliche immissionschutzrechtliche Anforderungen gestellt. Eine Einteilung der Brennstoffe erfolgt in der Regel gegenwärtig anhand des LAGA-Entwurfs „Technische Regeln über die Anforderungen an die Entsorgung von Holzabfällen". Dabei wird zwischen unbehandelten Holzabfällen, behandelten Holzabfällen ohne oder mit halogenorganischen Verbindungen bzw. Holzschutzmitteln sowie Holzabfällen mit schädlichen Verunreinigungen unterschieden und eine Zuordnung zu Feuerungsanlagen, die nach 1., 4. oder 17. BImSchV genehmigt werden müssen, getroffen [3].

Bei der energetischen Verwertung von Abfallholz aber auch von Biomasse kommen, insbesondere für thermische Leistungen oberhalb von 5 MW, Rostsysteme mit klassischer Prozeßführung (Verbrennung/ Nachverbrennung) zum Einsatz. Dabei besteht nach wie vor die Aufgabe, durch geeignete Primärmaßnahmen

- eine Senkung der Abgasströme,
- Reduzierung der Emissionen und der Emissionsfrachten,
- Beeinflussung der Reststoffeigenschaften und
- Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades

zu erreichen. Das Potential einer Prozeßoptimierung unter diesen Gesichtspunkten ist noch nicht ausgeschöpft. Bei Rostsystemen sind hierfür, wie bereits im Zusammenhang mit der Restmüllbehandlung erörtert [z.B. 4 bis 11], eine Reihe von Möglichkeiten zur Steuerung der Prozeßbedingungen gegeben. In dem hier gesteckten Rahmen wird auf diese Möglichkeiten der Prozeßführung daher nur kurz eingegangen.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich insbesondere mit Primärmaßnahmen zur Minderung von Stickstoffoxiden. Hierzu werden zunächst Untersuchungen zur Verbrennung von Spanplatten in einer Pilotanlage vorgestellt. Weitaus mehr Möglichkeiten zur Minderung von NO bei gleichzeitiger weiterer Optimierung der v.g. Zielstellungen ergeben sich bei der Vergasung in Rostsystemen mit unabhängiger Nachverbrennung, worauf in dem Beitrag ebenfalls anhand von Untersuchungen im Pilotmaßstab eingegangen wird.

Vergasung und Verbrennung von Abfallholz in Rostsystemen

Dr.-Ing. Michael Beckmann, Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz, Dipl.-Ing. Milan Davidovic, Dipl.-Ing. Christian Weichert, Clausthal-Zellerfeld

1 Einleitung

In Deutschland fallen gegenwärtig jährlich ca. 21 Mio. t Rest- und Gebrauchtholz an, wovon nur ca. 5 Mio. t stofflich verwertet werden [1]. Die verbleibenden 16 Mio. t bilden das Potential für eine energetische Verwertung. Die Anzahl der Holzfeuerungsanlagen mit einer thermischen Leistung von über 1 MW beträgt schätzungsweise 200 [2]. Abhängig vom Grad der Schadstoffbelastung werden an die Verbrennungsanlagen unterschiedliche immissionschutzrechtliche Anforderungen gestellt. Eine Einteilung der Brennstoffe erfolgt in der Regel gegenwärtig anhand des LAGA-Entwurfs „Technische Regeln über die Anforderungen an die Entsorgung von Holzabfällen". Dabei wird zwischen unbehandelten Holzabfällen, behandelten Holzabfällen ohne oder mit halogenorganischen Verbindungen bzw. Holzschutzmitteln sowie Holzabfällen mit schädlichen Verunreinigungen unterschieden und eine Zuordnung zu Feuerungsanlagen, die nach 1., 4. oder 17. BImSchV genehmigt werden müssen, getroffen [3].

Bei der energetischen Verwertung von Abfallholz aber auch von Biomasse kommen, insbesondere für thermische Leistungen oberhalb von 5 MW, Rostsysteme mit klassischer Prozeßführung (Verbrennung/ Nachverbrennung) zum Einsatz. Dabei besteht nach wie vor die Aufgabe, durch geeignete Primärmaßnahmen

- eine Senkung der Abgasströme,
- Reduzierung der Emissionen und der Emissionsfrachten,
- Beeinflussung der Reststoffeigenschaften und
- Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades

zu erreichen. Das Potential einer Prozeßoptimierung unter diesen Gesichtspunkten ist noch nicht ausgeschöpft. Bei Rostsystemen sind hierfür, wie bereits im Zusammenhang mit der Restmüllbehandlung erörtert [z.B. 4 bis 11], eine Reihe von Möglichkeiten zur Steuerung der Prozeßbedingungen gegeben. In dem hier gesteckten Rahmen wird auf diese Möglichkeiten der Prozeßführung daher nur kurz eingegangen.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich insbesondere mit Primärmaßnahmen zur Minderung von Stickstoffoxiden. Hierzu werden zunächst Untersuchungen zur Verbrennung von Spanplatten in einer Pilotanlage vorgestellt. Weitaus mehr Möglichkeiten zur Minderung von NO bei gleichzeitiger weiterer Optimierung der v.g. Zielstellungen ergeben sich bei der Vergasung in Rostsystemen mit unabhängiger Nachverbrennung, worauf in dem Beitrag ebenfalls anhand von Untersuchungen im Pilotmaßstab eingegangen wird.

2 Prozeßführung in Rostsystemen

Bei der thermischen Behandlung von stückigen Abfällen hat man zunächst prinzipiell zwischen Teilaufgaben, die den Feststoffumsatz und solchen, die den Umsatz in der Gasphase betreffen zu unterscheiden. Für die Optimierung der einzelnen Teilaufgaben sind jeweils unterschiedliche Prozeßbedingungen, die durch das Niveau der wesentlichen Haupteinflußgrößen Sauerstoffkonzentration, Temperatur, Verweilzeit und Verweilzeitverhalten eingestellt werden, erforderlich. Es ist deshalb naheliegend, je nach Erfordernis, einzelne Teilprozesse in getrennten Prozeßstufen unabhängig voneinander zu optimieren. Weiter sollten in den einzelnen Stufen ausreichend Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen entlang des Reaktionsweges vorhanden sein. Diese Steuerungsmöglichkeiten sind eng mit der jeweils eingesetzten Apparatetechnik verbunden [12].

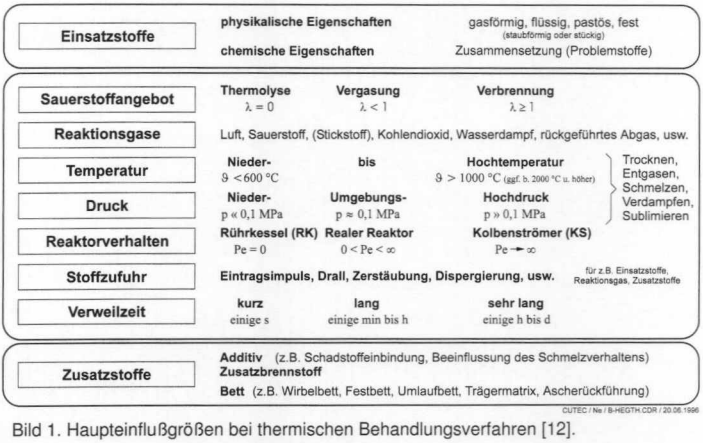

Bild 1. Haupteinflußgrößen bei thermischen Behandlungsverfahren [12].

Die bei Rostsystemen vorhandenen Möglichkeiten zur Steuerung der Einflußgrößen (Bild 1) 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 [6]. Mit dieser in Bild 2 schematisch dargestellten 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. Dieses gegenwärtig zunächst im Pilotmaßstab untersuchte Vergasungs-Nachverbrennungskonzept mit Rostsystemen erscheint deshalb sehr aussichtsreich, weil über die Vorteile einer getrennten Prozeßführung hinaus zusätzlich u.a.

- Abgasmassenströme deutlich reduziert werden,
- Brenngase erzeugt werden, die einen eigenständigen Nachverbrennungsprozeß ermöglichen,
- der Nachverbrennungsprozeß selbst mit bekannten Primärmaßnahmen im Hinblick auf NO-Minderung bei gleichzeitig hohem Ausbrand, **unabhängig** vom Rostprozeß, optimiert werden kann,
- Emissionsfrachten erheblich herabgesetzt werden
- usw.

Im vorliegenden Beitrag wird besonders auf die NO-Minderung in der Nachverbrennung näher eingegangen. Bezüglich weiterer Gesichtspunkte sei z.B. auf [13, 14] verwiesen.

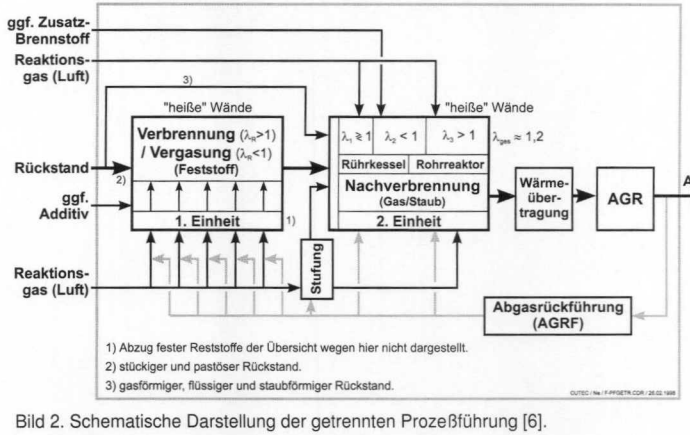

Bild 2. Schematische Darstellung der getrennten Prozeßführung [6].

3 Pilotanlage

Der Aufbau der Rost-Pilotanlage mit getrenntem Nachbrennkammersystem entspricht der in Bild 2 schematisch dargestellten Prozeßführung. Die Anlage setzt sich aus den Hauptkomponenten

- 5-Zonen Rückschubrost bzw. 3-Zonen Vorschubrost (wahlweise),
- Brennkammersystem,
- Wärmetauscher und
- Abgasreinigung

zusammen [15]. Bei einer unterstöchiometrischen Betriebsweise des Rostprozesses (Vergasung) wird ein Brenngas erzeugt, welches zusammen mit dem nicht vermeidbaren Flugstaub aus der Rostanlage einem Brennkammersystem zur eigenständigen, mehrstufigen Verbrennung zugeführt wird. Abhängig von den zu untersuchenden Primärmaßnahmen im Bereich der Brennkammeranlage kann man zur Einstellung gewünschter Temperatur-, Kon-

zentrations- und Verweilzeitverhältnisse entlang des Reaktionsweges eine Luft- und, falls erforderlich, eine Brennstoffstufung sowie eine Abgasrückführung vorsehen. Die Zuführung der Verbrennungsluft bzw. des rückgeführten Abgases erfolgt radial und/oder tangential. Die thermische Leistung bis zu ca. 0,5 MW gestattet eine Übertragung der ermittelten Versuchsergebnisse auf die Verhältnisse industrieller Systeme.

Hinsichtlich des Betriebes und der Bilanzierung werden die für den Betrieb und die Bilanzierung wichtigen Meßgrößen erfaßt [15].

- **Rost:** Massenstrom Einsatzstoff; Temperaturen im Feuerraum, im Brennbett und der Roststäbe
- **Brenngas** (Vergasung)**:** Temperatur; Gaskonzentrationen: CO_2, O_2, CO, H_2, CH_4, NO, SO_2; Massenstrom Gas
- **Brennkammersystem:** Temperaturen im Feuerraum; Gaskonzentrationen: CO_2, O_2, CO, NO, SO_2, HCl.)

4 Verbrennung/ Nachverbrennung

Im Bereich der energetischen Nutzung von Abfallhölzern und auch von Biomasse (Holz, Stroh usw.) werden gegenwärtig überwiegend Anlagen mit Rostsystemen und sog. klassischer Prozeßführung (Verbrennung/Nachverbrennung) betrieben. Die Möglichkeiten der Prozeßsteuerung bei Rost- und Nachverbrennungssystemen (Brennkammer), wie z.B. Sauerstoffanreicherung, wassergekühlter Rost, Luftstufung oder Abgasrückführung, sind bereits mehrfach dargestellt worden [z.B. 6, 12]. In dem hier gesteckten Rahmen sei daher auf weitere Überlegungen und Untersuchungen zu Primärmaßnahmen zur NO-Minderung bei der Verbrennungsführung in Rostsystemen 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 und der Bildung insbesondere 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 folgende 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 unterdrücken, 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 zu 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 Wasser-

gehaltes 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

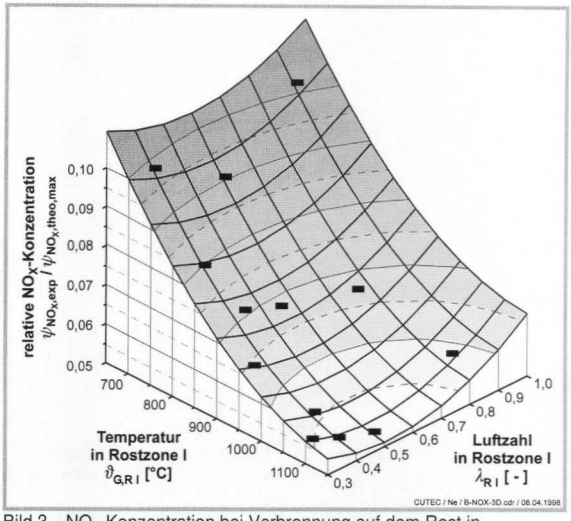

Bild 3. NO_X-Konzentration bei Verbrennung auf dem Rost in Abhängigkeit von der Temperatur $\vartheta_{G,R\,I}$ und der Luftzahl $\lambda_{R\,I}$.

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.

Die Anwendung dieser Primärmaßnahme zur NO-Minderung bei der Verbrennung in Rostsystemen ist jedoch insbesondere bei Einsatz von Abfallhölzern und Biomassen mit niedrigen Ascheerweichungspunkten eingeschränkt. Darüber hinaus läßt sich die NO-Minderung hier **nicht unabhängig** von dem Feststoffumsatz beeinflussen, weil die Betriebsverhältnisse auf dem Rost (Luftverteilung, Sauerstoffangebot, Last usw.) vorrangig auf die Teilaufgaben des Feststoffumsatzes (Ausbrand, Eluat) abgestimmt werden müssen.

Wie bereits eingangs erwähnt, erreicht man eine solche **unabhängige** Optimierung der NO-Minderung, über die Optimierung des Feststoffumsatzes hinaus, zusammen mit weiteren Vorteilen, wenn man die Prozeßführung der Nachverbrennung deutlich von der Prozeßführung auf dem Rost trennt. Durch die Vergasung auf dem Rost und die Erzeugung eines

Brenngases ergibt sich ein zusätzlicher Freiheitsgrad für eine eigenständige Nachverbrennung, worauf im folgenden näher eingegangen wird.

5 Vergasung/ Nachverbrennung

5.1 Vergasung auf dem Rost

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.

Zur Steuerung dieser Aufgaben kann man dabei z.B. auf die Maßnahmen:

- Einstellung des absoluten (integralen) Stöchiometrieverhältnisses λ_R über den insgesamt zugeführten Luftmassenstrom bzw. in Verbindung mit entsprechend veränderten Sauerstoffkonzentrationen über den Reaktionsgasmassenstrom,
- Einstellung der lokalen Stöchiometrieverhältnisse durch entsprechende Luft- bzw. Reaktionsgasstufung entlang des Rostweges,
- Beeinflussung der Verweilzeit und des Verweilzeitverhaltens durch die Bewegung der Rostelemente

zurückgreifen [6, 12].

Bei Vergasungsverhältnissen lassen sich ebenso wie bei einer Verbrennung Restkohlenstoffgehalte um $\xi_{C,Re,R} \approx 1$ Ma.-% und niedriger 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 [14].

5.2 Eigenständige, getrennte Nachverbrennung der Brenngase

Die Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Brenngase erfolgt in einer eigenständigen Feuerung. Die Brenngase weisen einen Heizwert von $h_{u,G,R} \approx 2000$ kJ/kg auf und werden dem Nachverbrennungsprozeß mit Temperaturen von $\vartheta_{G,R} \approx 750$ °C bis $\vartheta_{G,R} \approx 850$ °C zuge-

führt. Die getrennte Prozeßführung (Bild 2) 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, daher sei hier auf das entsprechende Schrifttum [z.B. 18 bis 22] verwiesen.

Im folgenden sei auf die Möglichkeit zur Minimierung von Stickstoffoxiden bei gleichzeitig hohem Ausbrand (CO) einschließlich einem hohen Abbaugrad organischer Spurenschadstoffe eingegangen. Dabei stammen die vorgestellten Ergebnisse wiederum aus Untersuchungen mit kontaminierten Abfallhölzern.

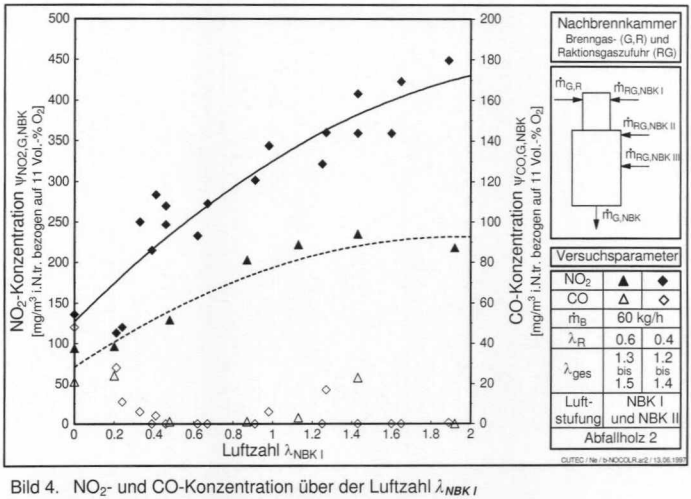

Bild 4. NO_2- und CO-Konzentration über der Luftzahl $\lambda_{NBK\,I}$ bei verschiedenen Luftzahlen im Rost [14].

Das Bild 4 zeigt NO-Konzentrationen im Rohgas (Ende Nachbrennkammer, angegeben als NO_2) in Abhängigkeit von der Luftzahl in der ersten Stufe der Nachbrennkammer $\lambda_{NBK\,I}$ 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 λ_{NBKI} 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 $\psi_{NO2} \approx 450$ mg/m³ (i.N.tr. bei

11 Vol.-% O_2) bei $\lambda_R \approx 0{,}4$ und bei einer ungestuften Nachverbrennung mit $\lambda_{NBKI} \approx 1{,}8$ –, für eine annähernd gleiche Gesamtluftzahl $\lambda_{ges} \approx 1{,}3$ bei einer Fahrweise mit $\lambda_R \approx 0{,}6$ und einer gestuften Nachverbrennung mit $\lambda_{NBKI} \approx 0{,}4$ eine NO-Minderung auf $\psi_{NO2} \approx 100$ mg/m³. Wie die zugehörigen *CO*-Konzentrationen in Bild 4 zeigen, wird dabei ein gleichbleibend niedriges Niveau von $\psi_{CO} < 10$ mg/m³ erreicht.

Ein weiterer Einfluß auf die NO-Konzentration ist mit dem Ort der Luftstufung in der Nachbrennkammer verbunden. Durch die Zugabe der Luft an den Stellen NBKI und NBKIII (Bild 5) wird eine weitere NO-Minderung auf $\psi_{NO2} < 100$ mg/m³ erreicht.

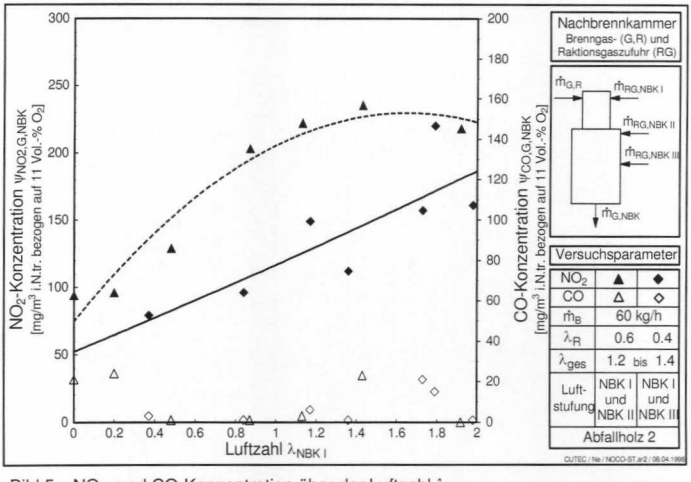

Bild 5. NO_2- und CO-Konzentration über der Luftzahl $\lambda_{NBK\,I}$ bei verschiedenen Luftstufungen [14].

Die Verschiebung der Restausbrandluft in den unteren Bereich des Brennkammersystems (Zugabeort NBK III) führt zum einen zu einer Verlängerung der Verweilzeit im unterstöchiometrischen Bereich. Darüber hinaus ergeben sich veränderte Bedingungen in Bezug auf das Verweilzeitverhalten in der unterstöchiometrischen Zone. Im Fall Stufung NBKI und NBKII ist die unterstöchiometrische Zone nur im oberen Teil der Brennkammer, in der aufgrund der intensiven Durchmischung näherungsweise eine Rührkessel-Charakteristik vorliegt. In der folgenden Anschlußgeometrie (Zugabestelle NBKII) geht die Strömung in eine Kolbenströmer-Charakteristik über [15, 23]. Wie aus anderen Untersuchungen bekannt ist [24], ist eine hohe Verweilzeit im unterstöchiometrischen Bereich in Verbindung mit einer Kolbenströmer-Charakteristik für niedrige NO-Emissionen anzustreben.

Als letztes Beispiel im Zusammenhang mit der NO-Minderung sei an dieser Stelle auf den Einfluß des Lastverhältnisses eingegangen. Das Bild 6 zeigt die Ergebnisse für drei Lastfälle bei $\lambda_R \approx 0{,}4$ in Abhängigkeit von λ_{NBKI} und bei nahezu gleichen Gesamtluftzahlen $\lambda_{ges} \approx 1{,}3$. Erwartungsgemäß ergeben sich bei höherer Last und ungestufter Fahrweise höhere NO-Konzentrationen. Durch eine Luftstufung (hier bei NBKI und NBKII) lassen sich aber auch in

diesen Fällen die NO-Konzentrationen auf das Niveau der Normallast zurückführen wobei auch hier gleichbleibend niedrige CO- Konzentrationen mit $\psi_{CO} < 10$ mg/m^3 erreicht werden.

Im Hinblick auf die Senkung der Abgasströme sei darauf hingewiesen, daß sich bei einer Primärluftzahl von $\lambda_R = 0{,}4$ bis $\lambda_R = 0{,}8$ Gesamtluftzahlen (einschließlich Sekundär- und ggf. Tertiärluft in dem Nachbrennkammersystem) von $\lambda_{ges} < 1{,}2$ erreichen lassen, 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.

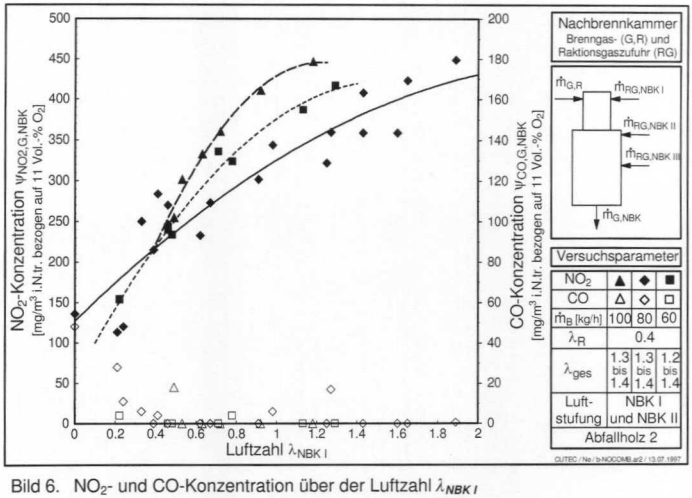

Bild 6. NO_2- und CO-Konzentration über der Luftzahl $\lambda_{NBK\,I}$ bei verschiedenen Brennstoffmassenströmen [14].

6 Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag werden zunächst für die klassische Prozeßführung in Rostsystemen Ergebnisse aus Untersuchungen an einer Pilotanlage zur NO-Minderung vorgestellt. Dabei zeigt sich, daß insbesondere die Temperatur und die Sauerstoffzufuhr bzw. Luftzahl in der ersten Roststufe einen erheblichen Einfluß auf den NO-Abbau im Feuerraum ausüben. Der Abbau erfolgt im Feuerraum im wesentlichen über den sogenannten internen EXXON-Prozeß. Im Hinblick auf die Freisetzung flüchtiger Bestandteile und die Zersetzung von CH_4 am Rostanfang sollte die Temperatur $\vartheta_{G,R\,I}$ möglichst oberhalb von $\vartheta_{G,R\,I} \approx 1000$ °C liegen, wie oben erläutert. Die Temperatur $\vartheta_{G,R\,I}$ selbst wiederum wird durch die Prozeßführung im Brennstoffbett und darüber hinaus durch unterschiedliche Feuerraumbedingungen (Wärmeauskopplung, Strömungsführung über dem Bett [25], Strahlungsaustausch mit den

Wänden (Feuerraumgeometrie) usw.) beeinflußt. Zu diesem Sachverhalt sind eine Reihe weiterer Untersuchungen erforderlich. Dabei kann die Vielzahl der Parameterkombinationen an einer einzigen Versuchsanlage allein nicht untersucht werden. Deshalb erscheint ein übergeordnetes, abgestimmtes Versuchsprogramm an verschiedenen Anlagen sinnvoll.

Weiter ergeben sich Optimierungsmöglichkeiten durch die getrennte Prozeßführung mit Vergasung auf dem Rost und unabhängiger Nachverbrennung in einem Brennkammersystem. Diese gegenwärtig zunächst im Pilotmaßstab untersuchte Prozeßführung erscheint deshalb sehr aussichtsreich, weil über die Vorteile der getrennten Prozeßführung hinaus zusätzlich u.a. Abgasmassenströme deutlich reduziert werden, Brenngase erzeugt werden, die einen eigenständigen Nachverbrennungsprozeß ermöglichen, der Nachverbrennungsprozeß selbst mit bekannten Primärmaßnahmen im Hinblick auf NO- Minderung bei gleichzeitig hohem Ausbrand, **unabhängig** vom Rostprozeß, optimiert werden kann und Emissionsfrachten erheblich herabgesetzt werden.

7 Symbolverzeichnis

Symbole

h	spezifische Enthalpie
ϑ	Temperatur [°C]
λ	Stöchiometrieverhältnis, Luftzahl
ξ	Konzentration (auf Masse bezogen)
ψ	Konzentration (auf Volumen bezogen)

Indices

B	Brennstoff
C	Kohlenstoff
G	Brenngas/Abgas
ges	gesamt
i.N.tr.	im Normzustand, trocken
NBK	Nachbrennkammer
org.	organisch gebunden
R	Rost
Re	Reststoffe
RG	Reaktionsgas
u	unterer (Heizwert)
waf	wasser- und aschefrei
I,II,III	Zonen für Reaktionsgaszufuhr Rost und Nachbrennkammer

8 SCHRIFTTUM

[1] Tippkötter, R.; Fraenkler, K.: Energie statt Deponie. Müllmagazin 3/97.

[2] Buermann, H.; Harbeke, Th.; Affüpper, M.: Altholzrecycling: Technologien und Markt. Entsorgungspraxis 4/97.

[3] LAGA -Entwurf: Technische Regeln über die Anforderungen an die Entsorgung von Holzabfällen.

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

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

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

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

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

[9] Martin, J.; Busch, M.; Horn, J.; Rampp, F.: Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen Schadstoffreduzierung.
VDI-Berichte 1033, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.

[10] Schäfers, W.; Limper, K.: Fortschrittliche Feuerungsleistungsregelung durch Einbeziehung der Fuzzy-Logik und der IR Thermografie. In: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1993.

[11] Hunsinger, H.; Merz, A.; Vogg, H.: Beeinflussung der Schlackequalität bei der Rostverbrennung von Hausmüll. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.

[12] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Waste incineration systems; current technology and future developments in Germany. 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB), Lisbon, Portugal, 18.-21. 04. 1995.

[13] 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.

[14] 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. May, 1997.

[15] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe, 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] Domschke, T.; Seifert, H.; Eigenberger, G.; Wünning, J.G.: Thermal Use of Off-Gases with High Ammonia Content – A Combination of Catalytic-Cracking and Combustion. 4th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB), Lisbon, Portugal, 01.-04. 04. 1997.

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

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

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

[22] 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.

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

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

[25] Vogg, H.; Merz, A.; Hunsinger, H.; Walter, R.: Primäre NO_X-Minderung- Der Schlüssel für eine kostengünstige Abfallverbrennungstechnologie. Chemie Ingenieur Technik, 66 (1996)1/2.