

MODELLIERUNG UND VERGLEICH VERSCHIEDENER FEUERUNGSFÜHRUNGEN IN ROSTSYSTEMEN

PROF. DR.-ING. R. SCHOLZ, DR.-ING. M. BECKMANN, DIPL.-ING. F. SCHULENBURG,
CLAUSTHAL-ZELLERFELD, GERMANY

Für die thermische Behandlung von Restmüll aus Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen werden derzeit verschiedene Verfahren mit Pyrolyse-, Vergasungs- und Verbrennungsgrundbausteinen diskutiert.

Die thermischen Hauptverfahren lassen sich jeweils in eine

- erste Einheit zur Umwandlung der festen und pastösen Abfälle und in eine
- zweite Einheit zur Behandlung der aus der ersten Einheit stammenden Gase, Flugstäube oder Pyrolysekoks (Bild 1) aufteilen.

Rostsysteme werden bei den „klassischen“ Verfahren überwiegend eingesetzt und stellen eine lang erprobte und bewährte Technik dar.

In den letzten Jahren wurde bei den „klassischen“ Verfahren insbesondere die Abgasreinigungstechnik (sog. Sekundärmaßnahmen) weiterentwickelt und damit der Aufwand der thermischen Abfallbehandlung wesentlich erhöht.

Kurzbezeichnung	1. Einheit	2. Einheit	Verfahren
A.	Verbrennung ***)	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. klassische Multiverbrennung) [1 bis 6]
B.	Thermolyse *)	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Schmelz-Brenn-Verfahren nach Siemens KWU) [9]
C.	Vergasung **)	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. weiterentwickelte klassische Multiverbrennung) [10]
D.	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Konversionsverfahren nach NOELL [11], Thermoselect-Verfahren [12] usw.)
E.	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach LURGI) [13]

*) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs und Pyrolysevorgänge

**) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs und Vergasungsvorgänge

***) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs Vergasungsvorgänge und Verbrennungsvorgänge

Bild 1: Systematische Einordnung von thermischen Hauptverfahren.

Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung, Modellierung und Optimierung der Prozeßführung (sog. Primärmaßnahmen) des thermischen Kernverfahrens. Hier zeigt sich, daß noch ein erhebliches Entwicklungspotential im Bereich des Rostes, der Nachverbrennung usw. vorhanden ist, um beispielsweise

- die Abgasmassenströme (Abgasreinigungsanlagen) zu verkleinern,
- die Energienutzung zu verbessern und
- die Reststoffeigenschaften zu beeinflussen.

Diesbezüglich sind bei den „klassischen“ Verfahren mit Rostsystemen,- u.a. auch durch die „neuen“ Verfahren mit ausgelöst-, bereits erhebliche Entwicklungsschritte durchgeführt worden [z.B. 1 bis 8]. Darüber hinaus ist mit der Vergasung in Rostsystemen auch ein neues Verfahren im Pilotmaßstab entwickelt und erprobt worden (Bild 1, Weiterentwicklung des „klassischen“ Verfahrens) [10]. Die genannten Verbesserungen treten dabei noch deutlicher hervor.

Wesentliche Voraussetzung für die Optimierung der Teilaufgaben sind zunächst die Trennung der Prozeßschritte

- Feststoffumsatz auf dem Rost,
- Nachverbrennung der Gase und
- Wärmeauskopplung (Bild 2).

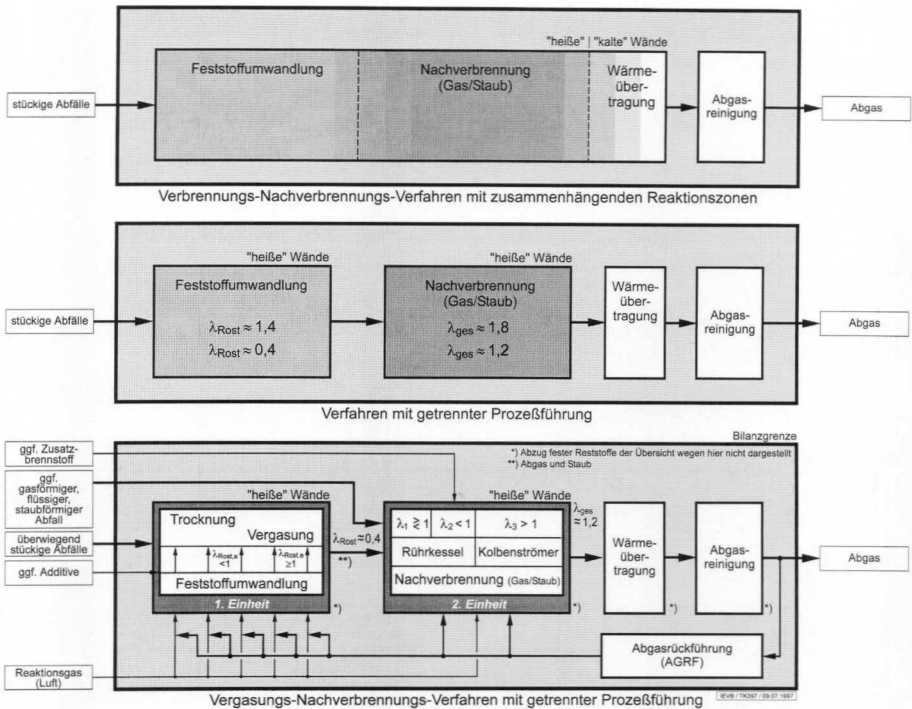


Bild 2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Prozeßführungen für die thermische Behandlung von stückigen Abfällen in einem Rostsystem.

Bei dieser getrennten Prozeßführung können die Haupteinflußgrößen [14] Sauerstoff, Reaktionsgase, Reaktorverhalten bzw. Durchmischung, Art der Stoffzufuhr, Verweilzeit, Temperatur und Zusatzstoffe getrennt für den Feststoffumsatz (Glühverlust, Eluateigenschaften) und den Umsatz der Gase (CO , C_xH_y , PCDD/F , NO_x) eingestellt werden. Wie das Bild 2 weiter zeigt, sind bei einer solchen Kombination aus Rost und Brennkammersystem durch Luftstufung, Abgasrückführung, Sauerstoffzufuhr usw. zahlreiche Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen vorhanden [15]. Zur Vermeidung von Quencheffekten sollte die Wärmeübertragung separat erfolgen. Die Kühlung einzelner Bereiche, wie z.B. durch einen wassergekühlten Rostbelag [2], kann hingegen im Hinblick auf die unabhängige Einstellung der Temperatur- von den Stöchiometrieverhältnissen (niedrige Luftzahl), insbesondere bei heizwertreichen Abfällen, von Vorteil sein.

Bei der in Bild 2 dargestellten getrennten Prozeßführung kann der Feststoff auf dem Rost auch stark unterstöchiometrisch durch Vergasung umgesetzt werden. Wie die Ergebnisse in Bild 3 zeigen, kann durch eine entsprechende Luftstufung und Verweilzeitsteuerung über der Rostlänge, bei der Vergasung ebenso wie bei der Verbrennung, ein sehr niedriger Glühverlust der Reststoffe erreicht werden. Dieses gegenwärtig im Pilotmaßstab [15] untersuchte Vergasungs- Nachverbrennungskonzept mit Rostsystemen erscheint insbesondere deshalb sehr aussichtsreich, weil über die Vorteile einer getrennten Prozeßführung hinaus zusätzlich u.a.:

- Flugstaubkonzentrationen (Bild 3) [15],
- Abgasströme (Reduzierung von $\lambda_{\text{ges}}=1,8$ auf $\lambda_{\text{ges}}=1,2$) [15] und damit
- Emissionsfrachten deutlich reduziert werden,
- Brenngase erzeugt werden, die einen eigenständigen Nachverbrennungsprozeß ohne Zusatzbrennstoff ermöglichen [15],
- der Nachverbrennungsprozeß selbst, mit bekannten Primärmaßnahmen, im Hinblick auf NO_x - Minderung bei gleichzeitig hohem Ausbrand (CO , C_xH_y , PCDD/F optimiert werden kann (Bild 4) [15],
- der Gesamtwirkungsgrad insgesamt verbessert wird [16].

Die Optimierung der Prozeßführung in Rostsystemen für Abfälle, sowohl der konventionellen wie auch der Vergasungsfahrweise, erfolgt bislang weitgehend empirisch an Praxis- oder Pilotanlagen. Zum weiteren Verständnis des Feststoffumsatzes in Rostsystemen werden aufbauend auf den Erfahrungen und mathematischen Modellen im Zusammenhang mit fossilen Brennstoffen [z.B. 17 bis 21] zunehmend auch mathematische Modelle für den Umsatz von Abfällen

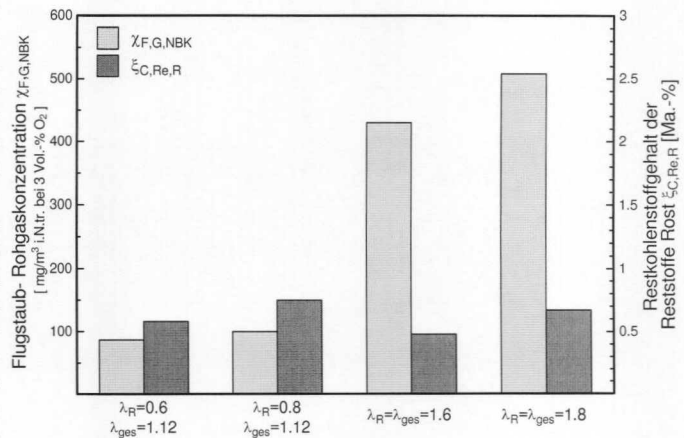


Bild 3: Staubkonzentrationen im Rohgas $\chi_{F,G,NBK}$ und Glühverlust $\xi_{C,Re,R}$ bei verschiedenen Stöchiometrieverhältnissen λ auf dem Rost.

entwickelt und gezielt in die Optimierung mit einbezogen [z.B. 22 bis 26]. Die in [25] näher beschriebene Modellvorstellung nimmt für die Beschreibung des Verweilzeitverhaltens als Reaktoraufteilung für den Rost eine Rührkesselskaskade an. Die Beschreibung des Umsatzes erfolgt zunächst für ein einzelnes Rührkessелеlement (Zelle) mit Hilfe von Massen-, Stoff- und Energiebilanzen („Zellenmodell“). Insbesondere aufgrund der häufig heterogenen Zusammensetzung und fehlender Basisdaten werden die allgemein bekannten Teilvorgänge des Feststoffumsatzes durch einen vereinfachten Ansatz mit einem „effektiven“ Gesamtreaktionskoeffizienten zusammenfassend betrachtet. Dieser wird durch Versuche an einer, eine Zelle nachbildenden, nicht bewegten Roststufe (Batch-Prozeß) [27] in Verbindung mit dem

Zellenmodell bestimmt. Durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Zellen zu der o.g. Rührkesselskaskade läßt sich dann der Feststoffumsatz für einen entlang des Rostweges bewegten Abfall beschreiben ("Kontinuierliches Modell").

Ein Vergleich der Modellrechnungen mit Meßergebnissen an einer Pilotanlage [27] zeigt, daß mit diesem Modell sowohl stationäre Zustände als auch die nach einem sprunghaften Prozeßeingriff folgenden instationären Übergänge in einen neuen stationären Zustand tragfähig wiedergegeben werden können (Bild 5).

Damit besteht nun die Möglichkeit, für Abfälle mit zunächst noch unbekanntem Verbrennungsverhalten, durch Versuche an einem Batch-Rost zusammen mit dem „Zellenmodell“ Gesamtreaktionskoeffizienten zu ermitteln und danach mit dem „Kontinuierlichen Modell“ erste Aussagen bezüglich einer geeigneten Prozeßführung abzuleiten. Bei Projektierungen und Betriebsoptimierungen ist man somit nicht mehr allein auf ein empirisches Vorgehen angewiesen.

Mathematische Modelle von Teilvorgängen wie des Feststoffumsatzes, des Nachverbrennungs- und Wärmeübertragungsprozesses werden in der Regel im Hinblick auf deren Optimierung in Abhängigkeit von bestimmten Haupteinflußgrößen entwickelt und benötigt. Darüber hinaus wird zur Beurteilung und zum Vergleich verschiedener Prozeßführungen auch die mathematische Beschreibung von einzelnen Verfahrensbausteinen bis hin zum Gesamtverfahren erforderlich. Dabei stehen besonders die Bilanzierung und die Bewertung von Abgas- und Schadstoffmassenströmen (Frachten), des Energieeinsatzes und der Energieumwandlung im Vordergrund [28].

Die Bilanzierung eines thermischen Verfahrens bildet die Grundlage für die Bewertung mit Hilfe von Wirkungsgraden. Dabei können zunächst das „Thermische Hauptverfahren“ (Erste und zweite Einheit entsprechend Bild 1) und das Gesamtverfahren unter

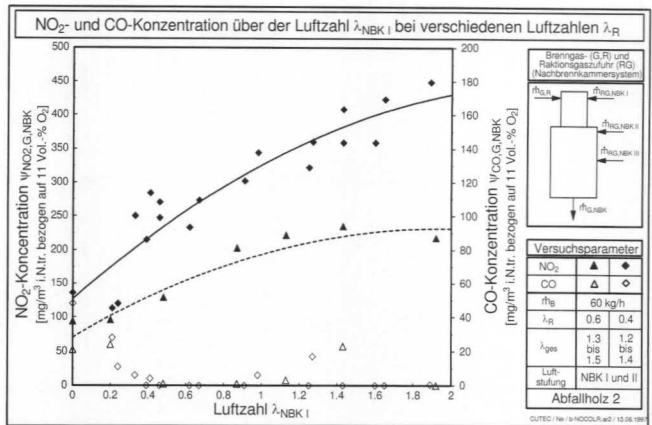


Bild 4: NO₂- und CO-Konzentration in Abhängigkeit von der Luftzahl $\lambda_{NBK I}$ bei verschiedenen Luftzahlen λ_{Rost} .

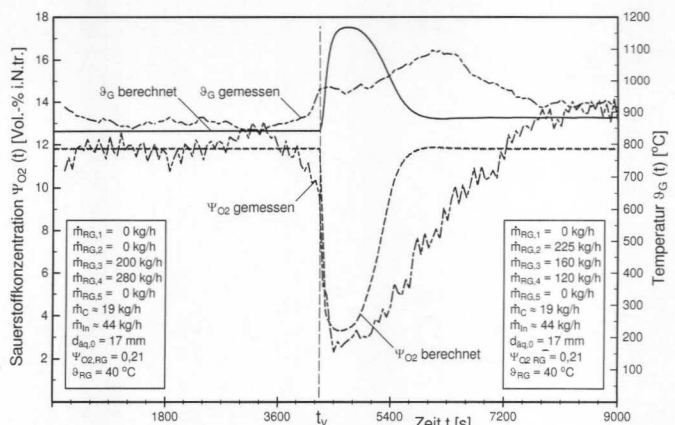


Bild 5: Gemessene und berechnete Sauerstoffkonzentration und Temperatur (Modellbrennstoff Braunkohle) (Umverteilung des Luftmassenstromes).

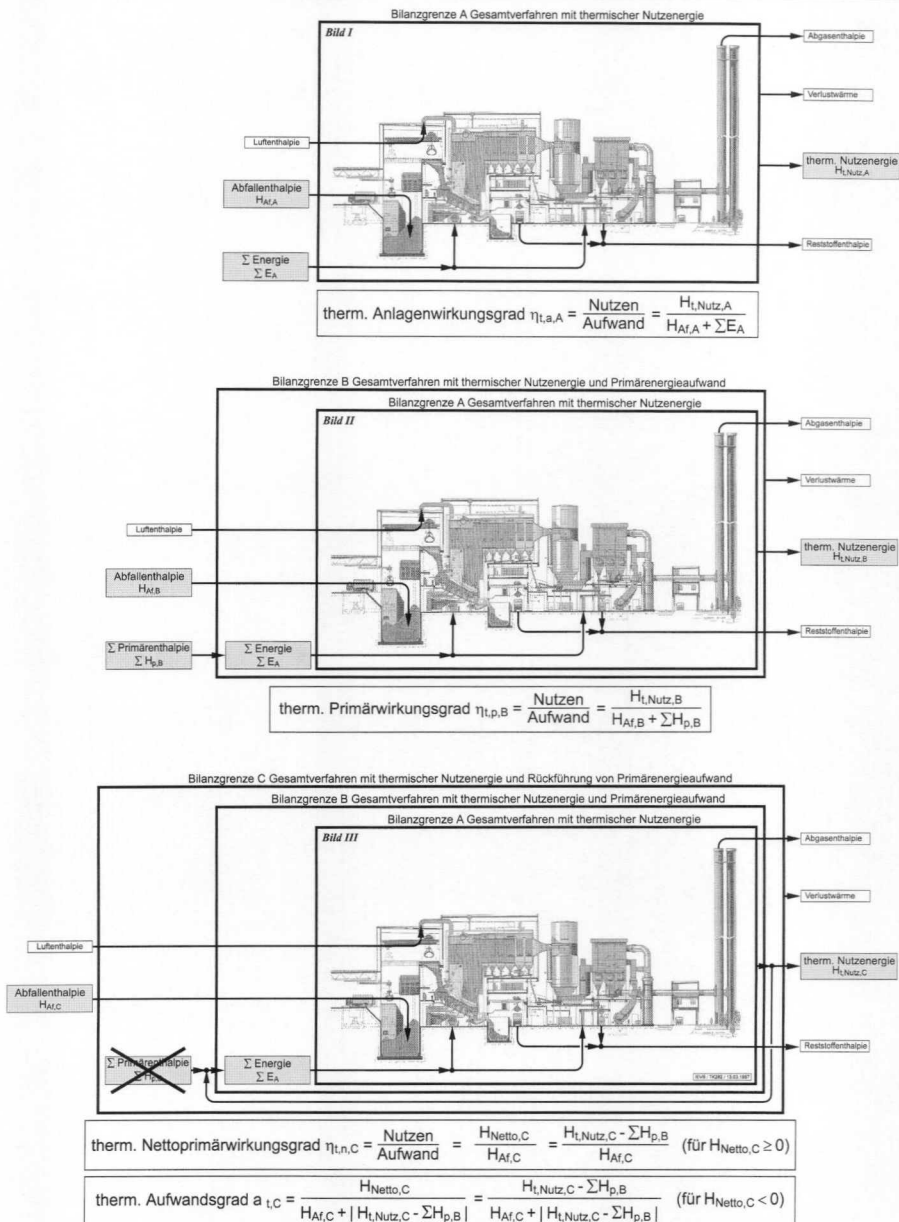


Bild 6: Wirkungsgradbildung einer thermischen Abfallbehandlungsanlage (Bild I) unter Berücksichtigung des Primärenergieaufwandes (Bild II) und mit Rückführung des Primärenergieaufwandes (Bild III).

Hinzunahme aller zusätzlichen Einrichtungen (Abgasreinigung, Aschenachbehandlung, etc.) getrennt betrachtet werden. Darüber hinaus ist eine kumulierte Betrachtung mit der weiteren Hinzunahme einer äußeren Energieumwandlung sinnvoll. Für die Bilanzräume ergeben sich weiter, je nach dem was als „Nutzen“ und als „Aufwand“ angesehen wird, unterschiedliche Wirkungsgrade. Beispielhaft in Bild 6 erfolgt zunächst die Bewertung der gesamten Anlage mit Hilfe des thermischen Wirkungsgrades. In einem zweiten Schritt wird der Primärenergieaufwand der vorgeschalteten Energieumwandlung berücksichtigt und es ergibt sich der thermische Primärwirkungsgrad. Schließlich kann durch Rückführungen die gesamte eingesetzte Primärenergie ersetzt werden, wodurch sich ein Aufwandsgrad bilden läßt [16,28].

Mit diesen Bewertungsgrundlagen können nun z.B. verschiedene Prozeßführungen für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren miteinander verglichen werden (Bild 7). In Abhängigkeit vom Abfallheizwert erfolgt in Bild 7, zur Einhaltung einer Mindesttemperatur, die Prozeßführung entweder mit Zusatzbrennstoff (Erdgas; Δ = Erdgasenthalpie / Abfallenthalpie), mit Sauerstoffanreicherung (ψ_{O_2} -Variation) der Verbrennungsluft oder durch das Senken der Luftzahl (λ -Variation). Die Ergebnisse bestätigen den Sachverhalt, daß bei einer kumulativen Betrachtung mit einem Nettoprimärwirkungsgrad und entsprechend zugehörigen spezifischen Abgasmassen die Minimierung der Luftüberschußzahl zu wesentlich günstigeren Werten führt im Vergleich zu den anderen hier gewählten Varianten. Eine zusätzliche Verbesserung läßt sich bei den oben beschriebenen Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren erreichen.

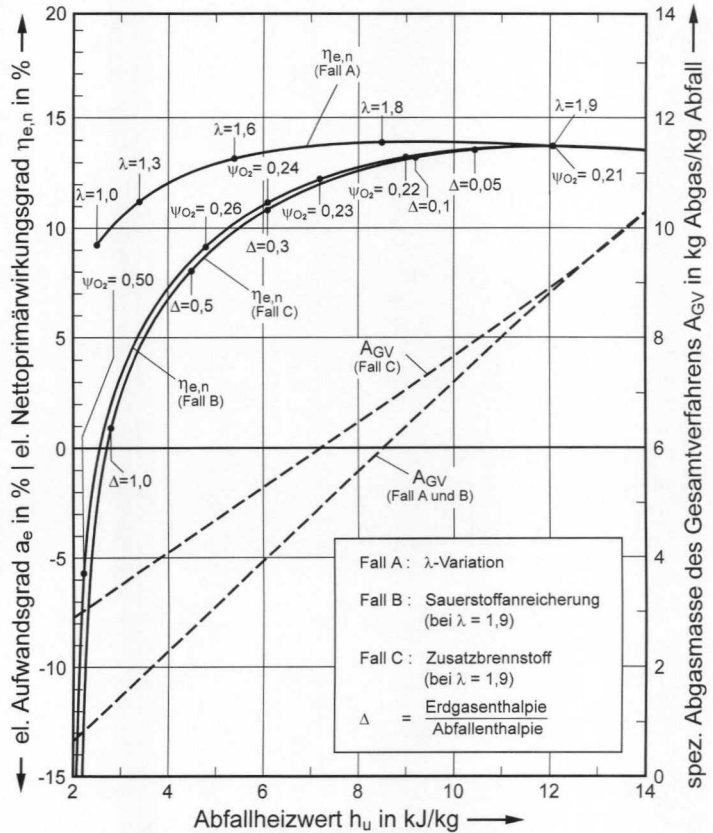


Bild 7: Abhängigkeit des elektrischen Nettoprimärwirkungsgrades $\eta_{e,n}$, des elektrischen Aufwandsgrades und der spez. Abgasmasse A_{GV} vom Abfallheizwert h_u bei einem Wirkungsgrad der elektrischen Energieumwandlung von $\eta_{e,EKW}=25\%$ (Mindesttemperatur $\vartheta_{min}=1200^\circ\text{C}$).

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] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17. - 19. Oktober 1994, Würzburg.
- [3] Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [4] Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [5] 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.
- [6] Reimann, D.O.: Die Entwicklung der Rostfeuerungstechnik für die Abfallverbrennung - Vom Zellenofen zur vollautomatischen, emissions- und leistungsgeregelten Rostfeuerung. In: Reimann, D. O. (Hrsg.): Rostfeuerungen zur Abfallverbrennung. EF-Verlag für Energie und Umwelt GmbH, Berlin, 1991.
- [7] Hunsinger, H.; Merz, A.; Vogg, H.: Beeinflussung der Schlackequalität bei der Rostverbrennung von Hausmüll. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994 in Würzburg, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Düsseldorf, 1994.
- [8] 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.
- [9] Berwein, H.-J.: Siemens Schwel-Brenn-Verfahren - Thermische Reaktionsabläufe. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.
- [10] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Experimental research on gasification of coarse waste on a stocker system and separate after burning as well as optimization with the aid of a process model. The 1994 Incineration Conference, May 9-13, Houston, Texas.
- [11] Göhler, P.; Schingnitz, M.: Stoff- und Wärmebilanzen bei der Abfallverwertung nach dem NOELL-Konversionsverfahren. In: Energie und Umwelt '95 mit Energieverbrauchsminderung bei Gebäuden, TU Bergakademie Freiberg, 22.- 23. März 1995.
- [12] Stahlberg, R.; Feuerrigel, U.: Thermoselect - Energie und Rohstoffgewinnung. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.
- [13] Albrecht, J.; Loeffler, J.; Reimert, R.: Restabfallvergasung mit integrierter Ascheverschlackung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994, in Würzburg, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Düsseldorf, 1994.
- [14] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Waste Incineration Systems, Current Technology and Future Developments in Germany. 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 18.-21. April 1995, Lisbon, Portugal.

- [15] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Busch, M.; Peppler, E.:
Gasification of waste materials in grate systems.
4 th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 1.-4. April 1997.
- [16] Schulenburg, F.: Modellierung von Verfahrensbausteinen zur Bewertung von thermischen Abfall-
behandlungsanlagen, Veröffentlichung demnächst
- [17] Marcard, W.: Rostfeuerungen. VDI-Verlag GmbH, Berlin, 1934.
- [18] Nusselt, W.: Die Vergasung und Verbrennung auf einem Rost.
Zeitschrift des VDI, Bd.60, Nr.6, 5.Februar 1916.
- [19] Traustel, S.: Verbrennung, Vergasung und Verschlackung. Dissertation TH Berlin, 1939.
- [20] Rosin, P.; Rammner, E.: Die Durchzündung beim Wanderrost.
Archiv für Wärmewirtschaft, 1932, H.5.
- [21] Werkmeister, H.: Versuche über den Verbrennungsverlauf bei Steinkohlen mittlerer Korngrößen.
Dissertation TH Hannover, 1932.
- [22] Behrendt, T.: Thermodynamische Modellierung des Betriebsverhaltens von Hausmüllverbrennungs-
anlagen am Beispiel TAMARA.
Fortschrittsberichte VDI, Reihe 25, Nr.99, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992.
- [23] Gruber, T.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: Modell zur Verbrennung auf dem Rost.
Abfallwirtschafts Journal 5 (1993) 10.
- [24] Raupenstrauch, H.: Ein Beitrag zur Computersimulation reagierender Schütttschichten.
Dissertation TU Graz, 1991.
- [25] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung
und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung,
CUTEC-Schriftenreihe, 1995.
- [26] Kessel, van, L.B.M.; Brem, G.: A dynamic model of a municipal solid waste incinerator as a tool
for process optimization and operator training.
VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [27] Beckmann, M.; Scholz, R.: Simplified mathematical model of the combustion instoker systems;
3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 18.-21., April 1995, Lisbon, Portugal
und Modellvorstellung zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostfeuerungen.
GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994, Würzburg.
- [28] 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.