

# **Verfahrenstechnische Möglichkeiten der Optimierung bei Rostfeuerungen zur Abfallbehandlung**

Reinhard Scholz und Michael Beckmann

1.	Abfallcharakterisierung .....	89
2.	Haupteinflussgrößen .....	91
3.	Apparate .....	93
4.	Systematische Darstellung und Einordnung von Rostsystemen für die thermische Abfallbehandlung .....	95
4.1.	Allgemeine Darstellung .....	96
4.2.	Einordnung von Rostsystemen in eine allgemeine systematische Darstellung der thermischen Abfallbehandlung .....	97
5.	Entwicklungsmöglichkeiten bei Rostsystemen .....	99
5.1.	Verbrennung auf dem Rost (klassisches Verfahren) .....	100
5.2.	Vergasung auf dem Rost .....	112
5.3.	Prozessmodellierung .....	116
6.	Bildung von Bilanz- und Systemgrenzen und zugehörigen Wirkungsgraden .....	121
7.	Zusammenfassung .....	129
8.	Literatur .....	129

Im Bereich der thermischen Abfallbehandlungsanlagen werden Rostsysteme ganz überwiegend zur Behandlung von Restabfällen aus Hausmüll, hausmüllähnlichem Gewerbemüll oder dergleichen eingesetzt. In der Vergangenheit standen Entwicklungen bei Abgasreinigungsanlagen usw. – so genannte Sekundärmaßnahmen – im Vordergrund, so dass heute die gesetzlichen Emissionsanforderungen grundsätzlich – wie auch bei anderen Arten von thermischen Behandlungsanlagen – erfüllt werden. Gegenwärtig liegt ein Entwicklungsschwerpunkt verstärkt auf

der Entwicklung und Optimierung der Prozessführung des thermischen Hauptverfahrens – so genannte Primärmaßnahmen –, d.h. im Bereich des Rostes, der Nachverbrennung usw. (Bild 1), um

- Schadstoffe durch Primärmaßnahmen zu minimieren,
- die Abgasmassenströme (und damit die Schadstofffrachten) und auch die Abgasreinigungsanlagen zu verkleinern,
- die Energienutzung zu verbessern,
- die Reststoffeigenschaften zu beeinflussen.

Im Folgenden soll in diesem Zusammenhang eine Einschätzung zum Stand der Technik und zur künftigen Entwicklung und Optimierung bei Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung gegeben werden. Es zeigt sich, dass bei der Betrachtung und Diskussion eines Prozesses Interpretationen und Vorschläge für Veränderungen immer dann schwierig oder nicht ausreichend sind, wenn nur einzelne Größen – z.B. das anzustrebende Temperatur- oder Verweilzeitniveau usw. – betrachtet werden. Erst wenn alle wesentlichen Haupteinflussgrößen jeweils als Gesamtgruppe diskutiert werden, gelangt man zu einem ausreichenden Prozessverständnis und auch zu Vorschlägen für Weiterentwicklungen usw. Es wird daher zunächst von der Erläuterung der Haupteinflussgrößen ausgegangen und danach die häufig verwendeten Apparate in Verbindung mit ihren jeweiligen Möglichkeiten erläutert, Haupteinflussgrößen zu steuern und zu variieren. Anschließend folgt eine systematische Darstellung von thermischen Abfallbehandlungsverfahren und eine Einordnung von Verfahren mit Rostsystemen

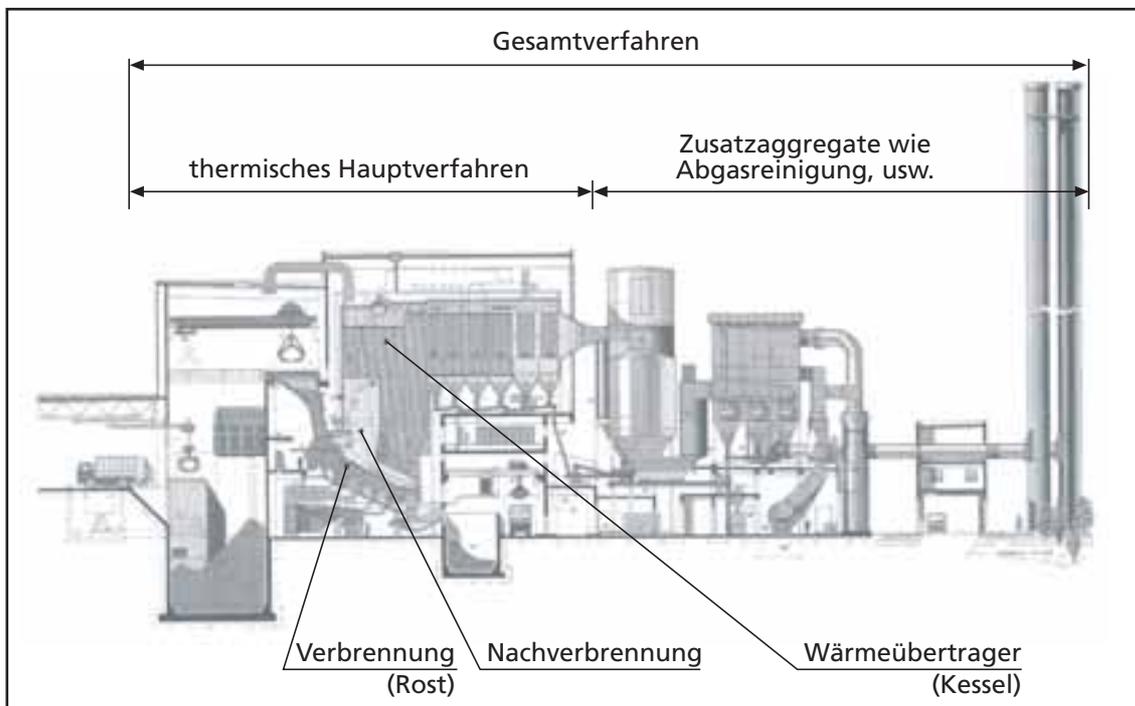


Bild 1: Schematische Darstellung eines klassischen Verfahrens zur thermischen Behandlung von Hausmüll (Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren)

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, 2001

in die abgeleitete Systematik. Vor diesem Hintergrund können dann als Schwerpunkt Entwicklungs- und Optimierungsmöglichkeiten dargestellt werden. Abschließend wird noch einmal auf die Bildung von Bilanz- und Systemgrenzen und die sich mit deren Hilfe ergebenden vielfältigen Wirkungsgrade eingegangen. Letzteres ist vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion wichtig, wie so genannte Energiekennzahlen für thermische Abfallbehandlungsanlagen einheitlich gebildet und festgelegt werden können.

## Kap. 1.

# Abfallcharakterisierung

Rostsysteme sind für überwiegend stückige Restabfälle geeignet. Für diese sind zur Kennzeichnung die

- Elementarzusammensetzung
  - \* brennbare und
  - \* flüchtige Bestandteile,
  - \* feste Inertstoffe <sup>1)</sup> (Asche),
  - \* Wasser usw.
- Spurenanalyse
  - \* Schadstoffkonzentrationen (z.B. Halogene, Schwermetalle, Alkaliverbindungen, halogenierte Kohlenwasserstoffe),
- Konsistenz und
- Heterogenität der Zusammensetzung

wichtig.

Von dem in der Bundesrepublik gegenwärtig anfallenden Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbemüll werden nach wie vor der größte Teil einer Deponie und nur ein kleinerer Teil einer thermischen Behandlung zugeführt. Der Heizwert liegt (üblich) in einem Bereich von  $h_u = 6$  MJ/kg bis 11 MJ/kg. Entsprechend den zu den einzelnen Fraktionen gehörenden Heizwerten kann für die Zusammensetzung ein mittlerer Heizwert (Gesamtheizwert) von etwa  $h_u = 8,5$  MJ/kg angenommen werden. Er wird insbesondere durch Fraktionen, deren Heizwert sehr stark nach oben (z.B. Kunststoffe) oder nach unten (z.B. Komponenten mit hohem Inertanteil) von dem mittleren Wert abweicht, beeinflusst. Vegetabilien haben hingegen weniger Einfluss, da deren Heizwert in der Größe des Gesamtheizwertes liegt.

Aus der Zusammensetzung des Abfalls können erste Aussagen z.B. zu verbrennungstechnischen Eigenschaften abgeleitet werden. So ist der Einfluss der Luftzahl  $\lambda$  auf zu erwartende Verbrennungstemperaturen  $\vartheta_F$  für einen mittleren Heizwert von  $h_u = 8,5$  MJ/kg beispielhaft in Bild 2 ersichtlich. Es ist einerseits für das

---

<sup>1)</sup> Inertstoffe seien hier Stoffe oder Stoffgemische, die keine *brennbaren Bestandteile* haben.

Erreichen ausreichend hoher Temperaturen – unter Beachtung von Wärmeverlusten – und andererseits auch für die Verminderung des Abgasvolumens und somit zur Entlastung nachgeschalteter Aggregate sinnvoll, den Luftüberschuss so gering wie möglich zu halten. Aufgrund des relativ niedrigen Mindestluftbedarfes – hier  $l_{\min} \approx 2,8$  kg Luft/kg Abfall – ist im vorliegenden Fall der Einfluss einer Luftvorwärmung (Temperatur  $\vartheta_v$ ) zur Erhöhung der Reaktionstemperatur relativ gering. Auf die einzelnen Möglichkeiten der Prozessführung wird weiter unten noch näher eingegangen.

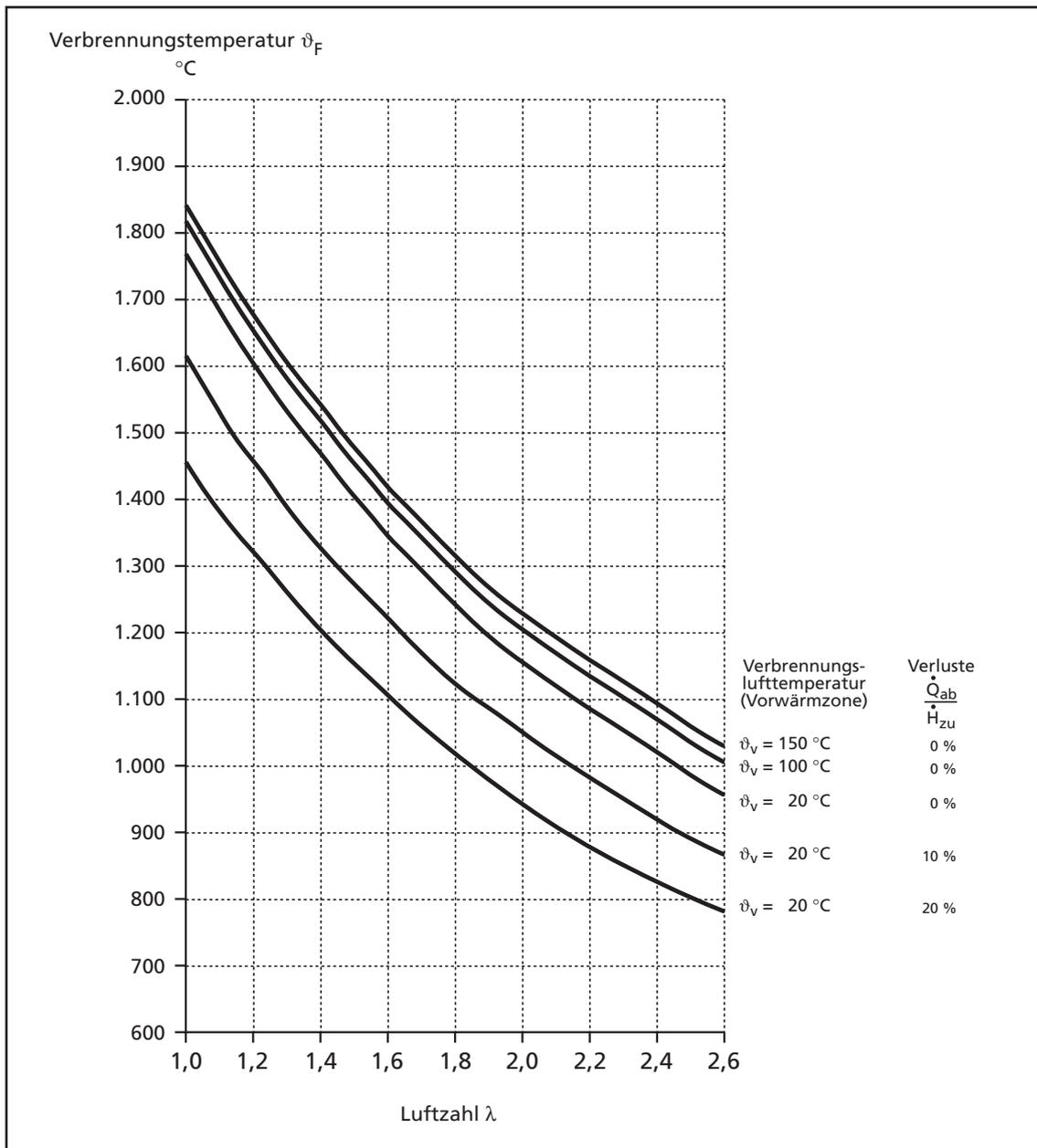


Bild 2: Verbrennungstemperatur  $\vartheta_F$  in Abhängigkeit von der Luftzahl  $\lambda$  für einen Hausmüll mit einem Heizwert  $h_u = 8,5$  MJ/kg bei Vorwärmung der Verbrennungsluft (Temperatur  $\vartheta_v$ ) und Wärmeverlusten ( $\dot{Q}_{ab}/\dot{H}_{zu}$ ) als Parameter

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

Kap. 2.

# Haupteinflussgrößen

Um prozesstechnische Möglichkeiten erörtern zu können, müssen zunächst die Haupteinflussgrößen näher betrachtet werden (Bild 3). Dabei sind nicht nur das jeweilige Niveau, sondern auch die Verteilung der Haupteinflussgrößen längs des Reaktionsweges zu beachten.

- Der **Einsatzstoff** – Input; Abfall, Restabfall – ist in der Regel vorgegeben und im Hinblick auf Konsistenz, Zusammensetzung und anfallende Mengen in Abhängigkeit von der Zeit zu beschreiben.
- Mittels des **Sauerstoffangebots** lassen sich Thermolyse (Pyrolyse), Vergasung und Verbrennung unterscheiden. Bei der Thermolyse liegt kein Sauerstoffangebot vor. Eine Wärmezufuhr bewirkt dann eine Trocknung, Entgasung und Pyrolyse des Abfalls. Bei der Vergasung wird Sauerstoff so zugeführt, dass sich unterstöchiometrische Bedingungen einstellen. Bei der Verbrennung führt die Sauerstoffzufuhr zu stöchiometrischen oder überstöchiometrischen Bedingungen. Längs des Reaktionsweges auf dem Rost sind Bedingungen für Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung zu finden.
- Die Beeinflussung der Prozessführung – Einstellung des Niveaus und der Verteilung der Größen längs des Reaktionsweges – kann je nach Bedarf in

Haupteinflussgrößen	Variationen		
<b>Einsatzstoffe</b>	physikalische Eigenschaften	gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stückig)	
	chemische Eigenschaften	Zusammensetzung ( <i>Problemstoffe</i> )	
<b>Sauerstoffangebot</b>	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
<b>Reaktionsgase</b>	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.)		
<b>Reaktorverhalten</b>	Rührkessel (RK) vollkommene Durchmischung ( $Pe = 0$ )	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) keine Durchmischung ( $Pe \rightarrow \infty$ )
<b>Art der Stoffzufuhr</b>	Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, usw. <small>z.B. für Einsatzstoffe, Reaktionsgase, Zusatzstoffe</small>		
<b>Verweilzeit</b>	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
<b>Temperatur</b>	Nieder- $\vartheta < 800 \text{ °C}$	bis $\vartheta = 800 \text{ °C} - 1.000 \text{ °C}$	Hochtemperatur $\vartheta > 1.000 \text{ °C}$ (ggf. b. 2.000 °C und höher)
<b>Druck</b>	Nieder- $p \ll 0,1 \text{ MPa}$	Umgebungs- $p \approx 0,1 \text{ MPa}$	Hochdruck $p \gg 0,1 \text{ MPa}$
<b>Zusatzstoffe</b>	Additiv (z.B. zur Schadstoffbindung, zur Beeinflussung des Schmelzverhaltens usw.) Zusatzbrennstoff Bettbeeinflussung (z.B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung usw.)		

Bild 3: Haupteinflussgrößen bei thermischen Behandlungsverfahren

Quelle: Scholz, R.; Schulenburg, F; Beckmann, M.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände. VDI Berichte Nr. 1033, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1993

vielfältiger Weise geschehen. So kann z.B. die Sauerstoffkonzentration durch Luft- und Brennstoffstufung, Sauerstoff- und Inertgaszufuhr, Abgasrückführung und Lastzustand variiert werden (Variation der **Reaktionsgase**). Entsprechende Maßnahmen kommen auch zur Steuerung der Temperatur längs des Reaktionsweges, zur Schadstoffbegrenzung (z.B.  $\text{NO}_x$ ) und zur Ausbrandbeeinflussung infrage [z.B. 12, 20, 22, 23, 24, 25, 30, 53, 56].

- Sehr wichtig ist die richtige Wahl des **Reaktorverhaltens** insbesondere in der Nachverbrennungszone. Häufig ist eine Reihenschaltung von Rührkessel, d.h. idealem Vermischer – z.B. für Stoffe, die miteinander reagieren sollen – und nachfolgend einem Kolbenströmer, d.h. einer nicht mischenden Strecke – z.B. Beruhigungsstrecke zur Ausbrandverbesserung des Abgases –, zu wählen.
- Unter **Art der Stoffzuführung** ist z.B. die Gestaltung von Eintragsimpuls, Zerstäubung von flüssigen Einsatzstoffen, Strömungsführung der Reaktionsgase usw. zu verstehen.
- **Verweilzeiten** werden im Wesentlichen durch Apparategröße und Transportgeschwindigkeiten festgelegt. Bei Feststoffen bewegen sie sich im Bereich *Minuten bis Stunden* bei Gasen im Bereich *Sekunden*.
- Bei der Wahl der **Temperatur** ist im Zusammenhang mit den übrigen Haupteinflussgrößen nur ein Mindestniveau zu wählen – zu hohe Temperaturen können teilweise auch nachteilig sein (z.B. thermische  $\text{NO}_x$ -Bildung). Das Temperaturniveau ist im Übrigen auch durch Maßnahmen zur direkten und indirekten Wärmeein- und -auskopplung – z.B. Wassereindüsung, Strahlungsrohre, auch durch Wärmeverluste usw. – zu beeinflussen.
- Der **Druck** bewegt sich in der Regel bei Umgebungsdruckniveau oder aus anlagen- und sicherheitstechnischen Gründen bei geringem Über- oder Unterdruckniveau. In einigen Fällen kommen *hohe* Drücke (z.B. Hochdruckvergasung 40 bar) oder *niedrige* Drücke (z.B. Vorgänge im Teilvakuum) vor. Bei Rostsystemen liegt in der Regel ein geringer Unterdruck gegenüber der Umgebung vor.
- Je nach Zielstellung und Art des Einsatzstoffes (Abfall) können verschiedene **Zusatzstoffe** wie Additive usw. an den verschiedenen Orten zugeführt, Zusatzbrennstoffe verwendet oder auch Maßnahmen zur Beeinflussung des Gutbettes (z.B. Kalkadditiv) ergriffen werden. Weiter sei in diesem Zusammenhang die Rückführung von Aschefractionen zur Qualitätsverbesserung erwähnt.

Eine Vielzahl von Möglichkeiten sind so miteinander kombinierbar. Dabei ist anzustreben, dass die unterschiedlichen Aufgaben der Reihe nach in hintereinandergeschalteten Reaktoren oder Reaktorteilen *abgearbeitet* werden. In einigen Anlagen – insbesondere älterer Bauart – gelingen diese verschiedenen Optimierungsaufgaben weniger gut, da zum Bauzeitpunkt die Anforderungen – auch gesetzliche – noch entsprechend weniger streng waren. Ein wesentlicher Aspekt künftig weiterentwickelter Anlagen liegt daher in der Tat in der bausteinartigen Hintereinanderschaltung von Elementen, in denen jeweils Teilziele getrennt optimiert erreicht werden können.

## Kap. 3.

# Apparate

Bei der Realisierung eines thermischen Behandlungsverfahrens bestimmen einerseits die Einsatzstoffe die infrage kommenden Apparate, andererseits legen diese wiederum das mögliche Niveau der Haupteinflussgrößen und deren Steuerungsmöglichkeiten längs des Apparateweges – Reaktionsweges – zumindest teilweise fest. So kommt z.B. für die thermische Behandlung von stückigen Abfällen häufig ein Rost infrage, weil hier über den Reaktionsweg eine gestufte Prozessführung wirkungsvoll möglich ist; für Gemische aus flüssigen und festen Stoffen muss in der Regel auf ein Drehrohr zurückgegriffen werden. Entsprechend können die Apparate im Hinblick auf die gestellten Anforderungen, die Haupteinflussgrößen, deren Niveau und Steuerung längs des Reaktionsweges, usw. eingeordnet werden. Hauptsächlich handelt es sich dabei um die Typen:

- **Rost** (Tabelle 1): z.B. für den Feststoffumsatz bei Hausmüll,
- **Brennkammer:** z.B. für gasförmige, flüssige und staubförmige  
(Tabelle 2) Einsatzstoffe; insbesondere auch bei Einsatz als Nachverbrennungszone <sup>2)</sup> bei Rostfeuerungs- und Drehrohranlagen,
- **Drehrohr:** z.B. für Feststoffumsatz bei Sondermüll.

Mit der Apparatekombination Rost und Brennkammer (Nachverbrennungszone) wird heute der größte Teil des Restabfalls aus dem Bereich *Hausmüll*, mit der Apparatekombination Drehrohr und Brennkammer (Nachverbrennungszone) der größte Teil aus dem Bereich *Sonderabfall* behandelt.

Weitere Apparatetypen seien in dem vorliegenden Zusammenhang nur erwähnt:

- **Wirbelschichtreaktor:** z.B. für den Feststoffumsatz bei Klärschlamm oder anderen entsprechend aufbereiteten staubförmigen bis stückigen Rückständen mit geeigneter enger Korngrößenverteilung,
- **Etagenofen:** z.B. für den Feststoffumsatz bei Klärschlamm oder stückigen Stoffen mit der Möglichkeit der Energierückgewinnung aus der Asche,
- **Durchlaufofen:** z.B. für den Feststoffumsatz bei Prozessen mit extrem langen Verweilzeiten,
- **Schachtofen:** z.B. Einschmelzen von Klärschlamm [55].

---

<sup>2)</sup> Häufig ist die *Brennkammer* im Anschluss an einen Rost (Bild 1) übergangslos über dem Rost angeordnet. Daher wird dann nicht von einer Brennkammer, sondern von einer Nachverbrennungszone gesprochen.

Übersichten wie in Tabelle 1 und Tabelle 2 für Rost und Brennkammer (Nachverbrennungszone) lassen sich auch für Drehrohr, Etagenofen, Durchlauföfen und Schachtofen angeben.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass zwischen den Begriffen *Verfahren* und *Apparate* sorgfältig unterschieden werden sollte. Ein Apparat kann in ganz unterschiedlichen Verfahren verwendet werden. Beispielsweise wird das Drehrohr nicht nur in der *Sonderabfallverbrennung*, sondern auch bei Entwicklungslinien mit Pyrolyseprozessen oder Produktionslinien der Zementindustrie

Tabelle 1: Charakterisierung von Rostsystemen

Haupteinflussgrößen		Bemerkungen
Einsatzstoffe		stückig, in Verbindung mit einem Feststoffbett auch pastös
Sauerstoffangebot	Niveau	überstöchiometrisch (Verbrennung) üblich; unterstöchiometrisch (Vergasung) möglich; Sauerstoffabschluss (Thermolyse) nicht üblich jedoch auch möglich
	Steuerung längs des Reaktionsweges	getrennt in einzelnen Zonen sehr gut einstellbar (z.B. Luft-/Sauerstoffstufung, Abgasrückführung, usw.); in Verbindung mit Temperatursteuerung sind die Teilschritte Trocknen, Entgasen, Vergasen, Restausbrand des Feststoffes beeinflussbar
Temperatur	Niveau	Bettoberflächentemperatur bis etwa 1.000 °C; mittlere Betttemperaturen niedriger
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einteilung in mehrere Zonen ebenfalls sehr gut möglich, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftvorwärmung, Abgasrückführung, Wasser-/Dampfkühlung)
Druck		bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa Unterdruck
Reaktorverhalten	Staub/Gas	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer Rührkessel-Charakteristik (z.B. Rückschubrost) oder einer Kolbenströmer-Charakteristik (z.B. Walzenrost) angenähert werden; über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angenähert eine Kolbenströmer-Charakteristik
	Gas	a) Oxidationsmittel usw. strömt zwangsweise durch das Bett und wird gleichmäßig über den Rost verteilt; damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich, Nachverbrennung erforderlich
Verweilzeit (Feststoff)	Niveau	im Bereich von Minuten bis Stunden; durch Rostelementgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar; bei Projektierung durch Gesamtlänge und -breite beeinflussbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch getrennte Geschwindigkeitseinstellungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich; falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Ausbrandes am Rostende Steuerung durch Austragswalze
Zusatzstoffe		Additive z.B. zur Schadstoffeinbindung in den Feststoff und Beeinflussung der Eigenschaften der verbleibenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke); Inertbett z.B. Trägermatrix für eventuell leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoff)
Einsatzbereiche (Beispiele)		Feststoffumsatz in der ersten Einheit bei Hausmüllverbrennungsanlagen; Separieren von Metallen aus Verbundstoffen durch Vergasung bei niedrigen Temperaturen

Quelle: Scholz, R.; Schulenburg, F.; Beckmann, M.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände. VDI Berichte Nr. 1033, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1993

Tabelle 2: Charakterisierung von Brennkammersystemen

Haupteinflussgrößen		Bemerkungen
Einsatzstoffe		gasförmig, flüssig, staubförmig
Sauerstoffangebot	Niveau	unter- bis überstöchiometrisch; in weiten Bereichen variabel; falls am Reaktoraustritt Überstöchiometrie: Bezeichnung <i>Brennkammer</i> ; falls am Ende Unterstöchiometrie: Bezeichnung <i>Vergasungsreaktor</i>
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff längs des Verbrennungsweges sehr gut möglich (Einbringen über Rührkessellemente)
Temperatur	Niveau	Verbrennungstemperaturen im Bereich von 1.000 °C bis 2.000 °C, ggf. auch höher; Bereich sehr variabel
	Steuerung längs des Reaktionsweges	neben der Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff über den Reaktionsweg, insbesondere Eingriffe durch Abgasrückführung, Wassereindüsung usw. möglich; indirekte Wärmein- oder -auskopplung durch entsprechende Heiz- oder Kühlsysteme
Druck		bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa Unterdruck; Hochdruckvergasung und Hochdruckverbrennung seltener
Reaktorverhalten	Staub/Gas	strömungstechnisch können sowohl Rührkessel- als auch Kolbenströmer-Charakteristiken für Staub und Gas angenähert werden
Verweilzeit (Gas)	Niveau	im Bereich von Sekunden (bei höherem Druck entsprechend länger); durch Lastzustand einstellbar und bei Projektierung durch geometrische Abmessungen beeinflussbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	nur schwer möglich; Verweilzeitverteilung über Reaktorverhalten steuerbar
Zusatzstoffe		Additive insbesondere über Rührkessellemente einbringen, sowohl zur Schadstoffeinbindung (z.B. Schwefeldioxid, Stickstoffoxide) als auch zur Beeinflussung der Schlackeeigenschaften und Schmelztemperaturen der Stäube (falls flüssiger Abzug gewünscht)
Einsatzbereiche (Beispiele)		Verbrennung von flüssigen Rückständen; Nachverbrennung von Gasen und Stäuben in der letzten thermischen Einheit des Behandlungsverfahrens; Hochtemperatur-Vergasung von Rückständen zur Erzeugung von Prozessgas

Quelle: Scholz, R.; Schulenburg, F; Beckmann, M.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände. VDI Berichte Nr. 1033, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1993

usw. benutzt. Ähnliches gilt für den Apparat *Rost*, der auch in anderen Industriezweigen Anwendung findet. Häufig benutzte Begriffe wie *Drehrohrverfahren* oder *Rostverfahren* sagen daher über das eigentliche Verfahren nur wenig aus und können sogar irreführend sein.

## Kap. 4.

# Systematische Darstellung und Einordnung von Rostsystemen für die thermische Abfallbehandlung

Im Folgenden werden die thermischen Hauptverfahren systematisch dargestellt und die verschiedenen Rostsysteme in diese Systematik eingeordnet.

## 4.1.

### Allgemeine Darstellung

Ein wesentlicher Teil des jeweiligen Gesamtverfahrens (Beispiel Bild 1) ist das so genannte thermische Hauptverfahren. Es lässt sich für praktisch alle Verfahren grob in zwei thermische Einheiten gemäß Tabelle 3 weiter aufteilen:

Die **erste** Einheit dient der Behandlung stückiger, pastöser Abfälle oder auch von Gemischen aus stückigen, pastösen und flüssigen Abfällen mittels Thermolyse, Vergasung oder Verbrennung zum Zwecke der

- Produktion eines inerten Reststoffes mit entsprechend hohem Ausbrand – kleine Werte für Glühverlust und TOC – und/oder der
- Erzeugung recyclingfähiger Stoffe – auch durch anschließende Stofftrennung.

Die **zweite** Einheit dient dazu, mittels Verbrennung oder Vergasung das aus der ersten Stufe stammende

- Gas – Abgas, Pyrolysegas, Vergasungsgas – sowie die darin enthaltenen Flugstäube und
- je nach Absicht den gegebenenfalls in der ersten Einheit erzeugten Pyrolysekoks nach einer Zwischenaufbereitung

umzusetzen.

Ist die zweite Einheit eine Verbrennung – Verfahren A, B, C in Tabelle 3 –, wird in der Regel entweder Prozessdampf oder über eine Dampfturbine und einen Generator elektrische Energie erzeugt. Wird die zweite Einheit als Vergasung – D, E in Tabelle 3 – betrieben, ist eine Prozessgas- (Synthesegas-)erzeugung für

Tabelle 3: Systematische Einordnung von thermischen Hauptverfahren

Kurzbezeichnung	1. Einheit	2. Einheit	Verfahren
A	Verbrennung <sup>3)</sup>	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Bild 5) z.B. klassische Müllverbrennung
B	Thermolyse <sup>1)</sup>	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren [z.B. 9, 17] z.B. Schwel-Brenn-Verfahren
C	Vergasung <sup>2)</sup>	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren z.B. weiterentwickelte klassische Müllverbrennung [47]
D	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren [z.B. 14, 57] z.B. Thermoselect-Verfahren usw.
E	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren [1] z.B. Vergasung mit Gasspaltung

<sup>1)</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge

<sup>2)</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Vergasungsvorgänge

<sup>3)</sup> hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge

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

den Einsatz in der chemischen Industrie beabsichtigt. Es ist jedoch auch mit einer zusätzlich nachgeschalteten Synthesegasverbrennung – auch motorisch – die Erzeugung von elektrischer Energie möglich.

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Verfahren müssen zunächst gleiche Zielvorgaben festgelegt werden. Danach müssen so viele Teilschritte miteinander gekoppelt werden, bis die Zielvorgaben erreicht sind, d.h.,

- bis der gleiche Zweck – z.B. Erzeugung elektrischen Stromes oder Prozessdampfherzeugung – erreicht ist **und**
- bis die einzelnen austretenden Stoffströme (verbleibenden Reststoffe) dabei jeweils gleichen Anforderungen genügen – z.B. Eluierbarkeit der Aschen, Schadstoffkonzentrationen der Abgase – **und**
- bis die einzelnen austretenden Stoffströme jeweils direkt in die Umwelt entlassen oder direkt einer vorgesehenen Verwertung zugeführt werden können.

Dabei erweist es sich als zweckmäßig, die Bilanzgrenzen zunächst nur für das thermische Hauptverfahren festzulegen (Teilbilanz). Danach ist unter gleicher Zielvorgabe (s.o.) und gleicher Vorgabe der Anforderungen an die austretenden Stoffe der Bilanzkreis auf das Gesamtverfahren zu erweitern. Für den Fall einer beabsichtigten Erzeugung von elektrischer Energie, sind z.B.

- bei einem klassischen Verbrennungsverfahren in den Bilanzraum des Gesamtverfahrens die Abgasreinigungsanlage, die Turbinenanlage und der Generator usw. mit einzubeziehen,
- bei einem Verfahren mit Synthesegaserzeugung in den Bilanzraum des Gesamtverfahrens die zusätzliche Verbrennung z.B. mit einem Gasmotor, die Reinigung der zugehörigen Motorabgase, der Generator usw. mit einzuschließen.

Mit Rostsystemen in der ersten Einheit können sowohl die Verbrennung als auch die Vergasung aber auch die Pyrolyse des Abfalls durchgeführt werden.

### 4.2.

## Einordnung von Rostsystemen in eine allgemeine systematische Darstellung der thermischen Abfallbehandlung

Bei der klassischen Behandlung von Restmüll aus Hausmüll wird nach dem dargestellten Schema (Tabelle 3) zunächst eine Verbrennung auf dem Rost (erste Einheit) und anschließend eine Nachverbrennung der aus der ersten Einheit kommenden Gase und Flugstäube in der zweiten Einheit – Nachverbrennungszone, Brennkammer o.ä. – durchgeführt. Es handelt sich somit um ein Verfahren nach A in Tabelle 3. Ausgehend von Bild 1 ist mit Hilfe der vorgenannten

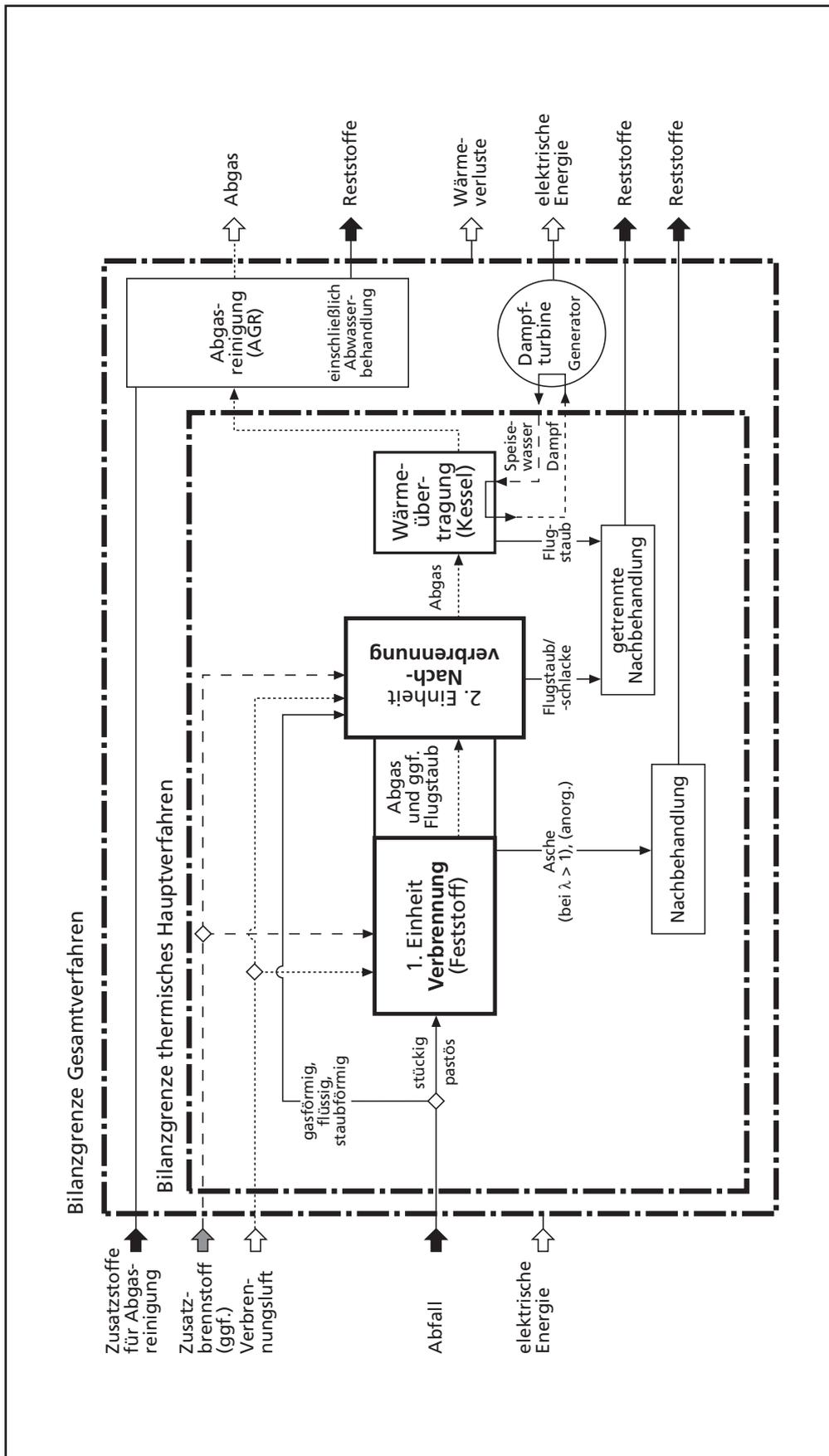


Bild 4: Blockfließbild für ein Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren; Beispiel: klassische Müllverbrennung

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

Einteilung die Prozessführung auf Rostsystemen für die *klassische Müllverbrennung* zunächst in einem vereinfachten Schema nach Bild 4 darstellbar. Bei der Erstellung des Blockfließbildes werden innerhalb der Bilanzgrenzen die wichtigsten Bausteine und deren Kopplung erfasst. Dabei sollten schon hier die zusätzlich erforderlichen Ströme – Betriebshilfsstoffe, elektrische Energie – und auch die austretenden Ströme – Nutzenergie, Wärmeverlust, Abgasströme, Reststoffe – prinzipiell aufgeführt sein. Als Reaktionsgas für die Verbrennungsprozesse wird in den meisten Fällen Luft, gelegentlich auch Zusatzsauerstoff zugeführt. Gegenwärtig werden die Abfälle im Hinblick auf eine Vergleichmäßigung der Verbrennungsbedingungen nur grob vorbehandelt – zerkleinert, aussortiert –, weshalb u.a. zur Erreichung eines niedrigen Glühverlustes der Reststoffe am Ende der ersten Prozesseinheit (Rost) häufig ein hoher Luftüberschuss erforderlich ist. Bei Rostsystemen werden die Reststoffe in der Regel als Asche abgezogen. Vorteilhaft ist dabei ein angesinterter Zustand im Hinblick auf die Verwertung [18, 61]. Wird ein schmelzflüssiger Abzug (Schlacke) der Reststoffe gefordert oder werden aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen thermischen Behandlungsverfahren bei der Asche weitere oder andere Behandlungsstufen (Wäsche o.ä.) erforderlich, so müssen diese selbstverständlich in den Bilanzkreis des thermischen Hauptverfahrens mit aufgenommen werden – in Bild 4 als Nachbehandlung bezeichnet. Bei dieser Betrachtungsweise können dann auch Verfahren, die eine so genannte integrierte Reststoffbehandlung – z.B. mit schmelzflüssigem Abzug – vorsehen, mit Verfahren, bei denen eine zusätzliche Nachbehandlung der Reststoffe erforderlich ist, auf gleicher Basis bewertet werden. Bei dem Verfahrenskonzept A (Bild 4) wird in der Regel zunächst Dampf erzeugt, der für eine energetische Nutzung verwendet oder aber auch wie bereits erwähnt als Prozessdampf einer stofflichen Nutzung zugeführt werden kann.

Zur Darstellung anderer Verfahren in der gleichen Weise wie für die klassische thermische Hausmüllbehandlung in Bild 4 gezeigt, sei auf [47, 48, 49] verwiesen. So werden für das so genannte Schwel-Brennverfahren (Zeile B, Tabelle 3) in der ersten Einheit als Apparat ein indirekt beheiztes Drehrohr und in der zweiten Einheit als Apparat eine Brennkammer verwendet.

### Kap. 5.

## Entwicklungsmöglichkeiten bei Rostsystemen

Die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung von Rostsystemen werden zum einen für die Verbrennung und zum anderen für die Vergasung von Abfällen dargestellt. Anschließend werden mathematische Modelle zur Beschreibung der Feststoffumwandlungsprozesse auf dem Rost entwickelt.

## 5.1.

### **Verbrennung auf dem Rost (klassisches Verfahren, Luftzahl der dem Rost insgesamt zugeführten Luft: $\lambda > 1$ )**

Aufgrund der in den Tabellen 1 und 2 dargestellten grundsätzlichen Beeinflussungsmöglichkeiten der Haupteinflussgrößen bei den Apparaten Rost und Brennkammer kann nun das Bild 4 mittels verfahrenstechnischer Gesichtspunkte zur Prozessführung – auf die klassische Müllverbrennung mit Rostsystemen zugeschnitten – entsprechend detailliert und erweitert werden, wie Bild 5 zeigt.

Zunächst wird der Aufbau des Bildes 5 erläutert und dann an einigen Beispielen gezeigt, wie die verfahrenstechnischen Grundgedanken zur Weiterentwicklung von Rostsystemen in die Praxis umgesetzt werden.

- Um Quenchreaktionen an Wandoberflächen zu vermeiden sind dort hohe Temperaturen erforderlich, was durch entsprechende Feuerfestauskleidung (erste Einheit und zweite Einheit) erreicht wird. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die Wärmeübertragung/Wärmenutzung nur zu einem geringen Teil während des Feststoffumsatzes und der Nachverbrennung stattfindet. Der Hauptteil der Wärmeübertragung findet im nachfolgenden Kessel statt.
- In der ersten Einheit können entlang des Rostweges über die verschiedenen Zonen durch unterschiedliche Zufuhr von Reaktionsgas – in der Regel Luft, aber auch mit Sauerstoff angereicherte Luft, rückgeführtes Abgas, usw., Bild 5 – der Sauerstoffpartialdruck und die Temperatur im Bett so gesteuert werden, dass gemäß Bild 6 und 7 Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge im Gutbett ablaufen können. Es ist in dem vorliegenden Beispiel von *Verbrennung auf dem Rost* die Rede, weil die gesamte dem Rost zugeführte Luft – häufig Primärluft genannt – bezogen auf den zugeführten Abfall überstöchiometrische Verhältnisse (z.B.  $\lambda = 1,3$ ) ergibt.
- Die zweite Einheit ist in Bild 6 geometrisch vollständig getrennt von der ersten gezeichnet. Damit soll verdeutlicht werden, dass man sich, je besser die Entkopplung ist, um so leichter getrennt den unterschiedlichen Teilaufgaben widmen kann, d.h.
  - \* Optimierung des Feststoffumsatzes in der ersten Einheit – Ausbrand, Temperaturverteilung, Asche ggf. angesintert – und
  - \* Optimierung der Nachverbrennung von aus der ersten Einheit stammendem Gas und Flugstaub – Optimierung des Ausbrandes und Minimierung von Schadstoffen (z.B.  $\text{NO}_x$ ).

Die Temperatur kann in der zweiten Einheit ebenfalls durch Luftzufuhr, Sauerstoffanreicherung der Luft und Abgasrückführung (Bild 5) gesteuert werden. Als Voraussetzung für einen optimalen Ausbrand ist in der zweiten Einheit zunächst eine intensive Mischungszone einzusetzen – Rührkessel (Bild 5) –, was

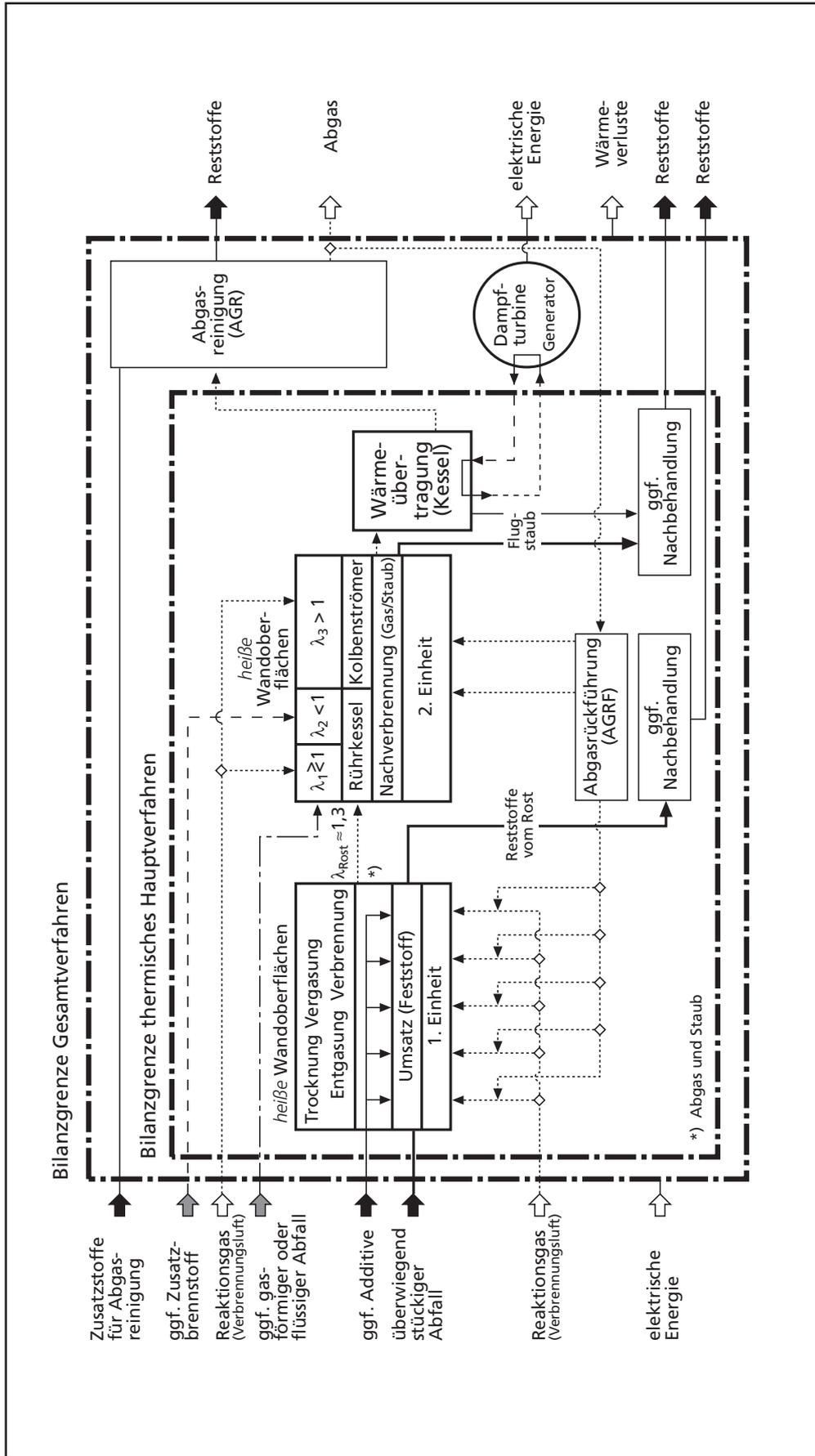


Bild 5: Schematische Darstellung der thermischen Behandlung bei stückigen Abfällen anhand einer klassischen Restabfallbehandlung mittels Rostfeuerungs-system

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

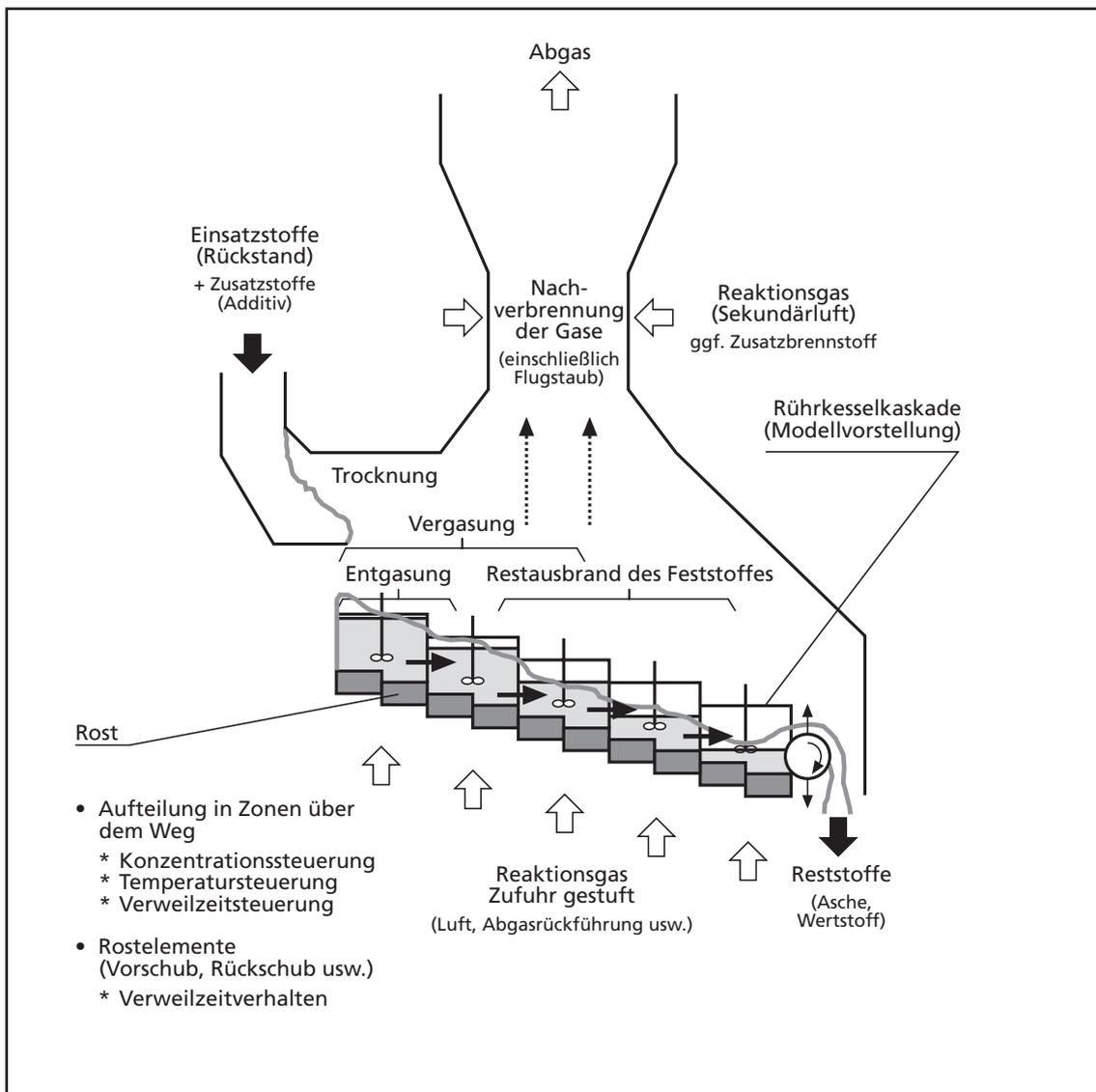


Bild 6: Prozessschritte beim Feststoffumsatz auf einem Rost – Modellvorstellung –  
 Quelle: Beckmann, M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5

z.B. über Injektorfreistrahlen (Art der Stoffzuführung) aus rückgeführtem Abgas möglich ist (siehe unten). An den Rührkessel sollte sich eine beruhigte Strömungsstrecke – Kolbenströmer (Bild 5) – anschließen, in der die Reaktionen so weit wie erforderlich ablaufen können. Darüber hinaus kann zur  $\text{NO}_x$ -Minderung eine *gestufte Verbrennungsführung* vorgesehen werden. Dies ist jeweils im Einzelfall je nach Art der vom Rost kommenden Gase zu prüfen. Anhand des Schaltbildes 5 ist bereits deutlich zu erkennen, dass sich sehr viele Eingriffsmöglichkeiten zur Optimierung und Entwicklung von Rostsystemen ergeben.

Anhand einiger typischer Beispiele für derzeitige Entwicklungsschritte sei einerseits die Einordnung in das Verfahrensschema des Bildes 5 erläutert und andererseits dargestellt, wie theoretische Überlegungen zur Verfahrensführung in der Praxis verwirklicht werden können.

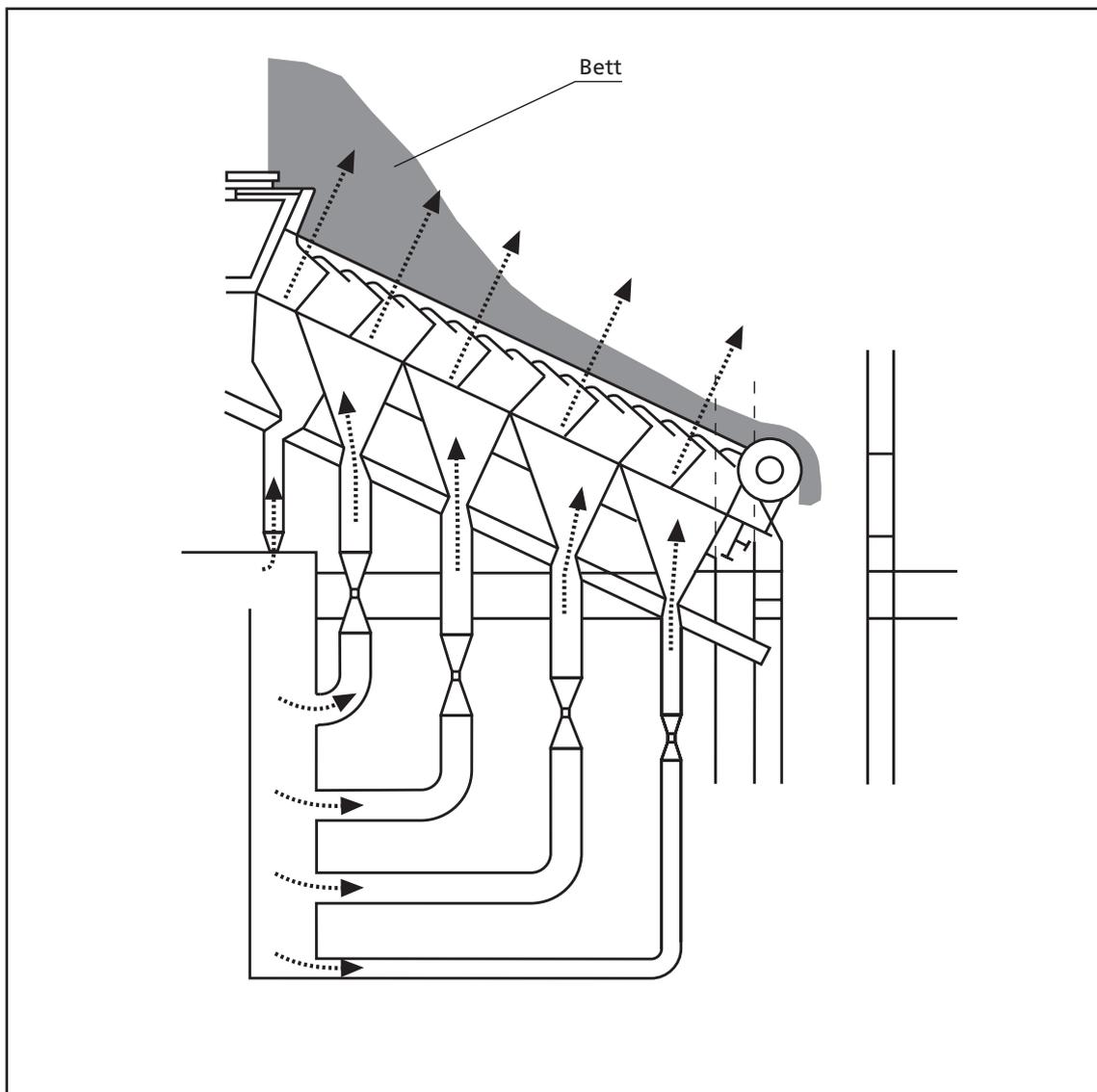


Bild 7: Schematische Darstellung einer Primärluftstufung

Quelle: Martin, J.; Leitmeir, E.; Schetter, G.: Müllverbrennung und Umwelttechnische Realisierung nach dem System Martin. Müllverbrennung 1986, HdT Essen 21./22. Jan. 1986.

Der Feststoffumsatz auf dem Rost kann längs seines Weges durch verschiedene Maßnahmen beeinflusst werden, was wie erwähnt wegen der sich ständig ändernden Zusammensetzung des Mülls und seines Reaktionsverhaltens von großem Vorteil ist. Damit sind entsprechende Anpassungen und Regelungen auch **während des Betriebs** möglich. Zu nennen sind vor allem:

- Änderung der Primärluftverteilung (in Bild 7 fünf Zuführungen). Mit der Variation der Primärluftverteilung wird versucht, einerseits den Ascheausbrand insbesondere bei sich ändernden Heizwerten (Bild 8) und Massenströmen zu optimieren und andererseits Temperaturen und Verweilzeiten im Raum unmittelbar über dem Bett so zu beeinflussen, dass sich die Bedingungen für eine Nachverbrennung verbessern.

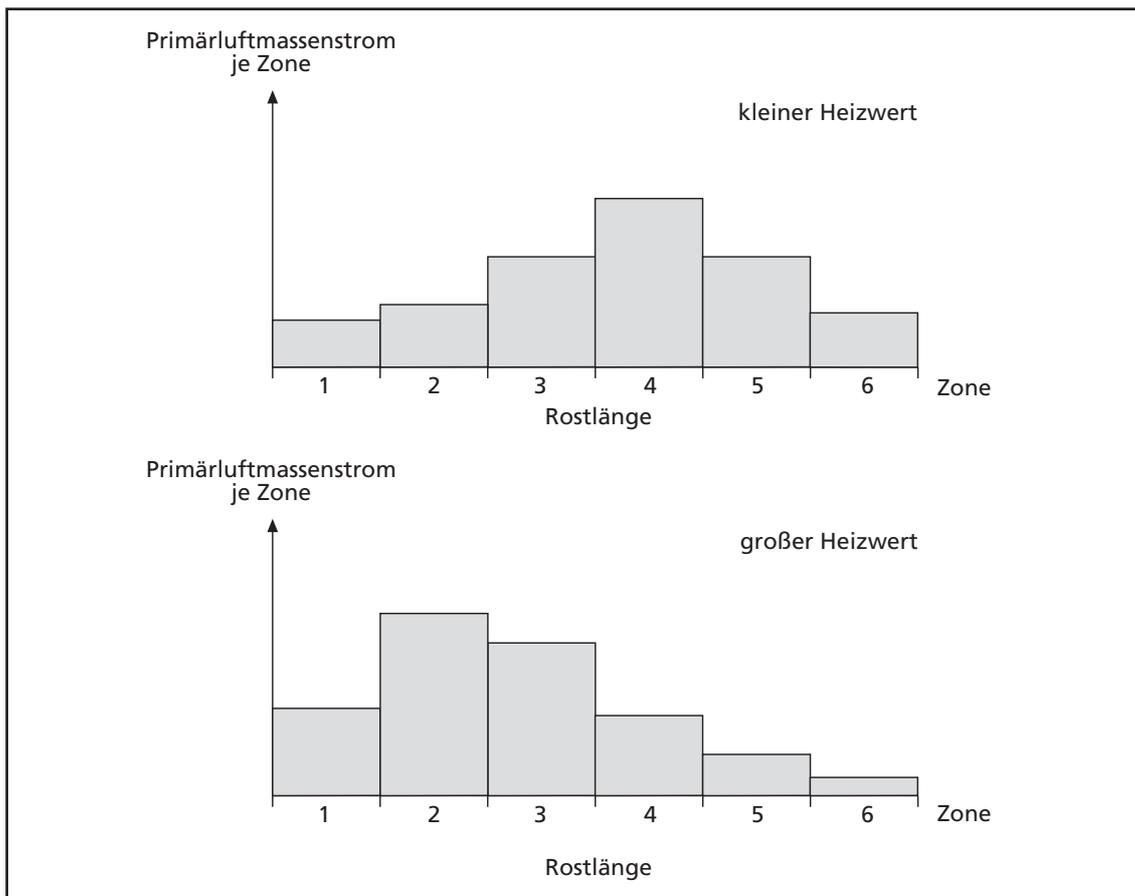


Bild 8: Verteilung des Primärluftmassenstromes über der Rostlänge bei Hausmüll mit unterschiedlichem Heizwert

- Neben der Variation der Primärluftverteilung werden Versuche mit unterschiedlicher Sauerstoffanreicherung in den verschiedenen Zonen des Rostes an industriellen Anlagen durchgeführt – z.B.  $O_2$ -Anreicherung beim so genannten *Syncom*-Verfahren (Bild 9) [21]. Damit wird ein Ausbrand für Depo- nieklasse I sichergestellt und eine Verkleinerung des Abgasstromes erreicht (Bild 10). Darüber hinaus wird der durch das Bett strömende Gasstrom verkleinert, was eine Verringerung der Flugstaubmengen und des Durch- messers der Flugstaubpartikel bewirkt. Die Verkleinerung der Partikel- durchmesser bedingt wieder einen verbesserten Ausbrand bei sonst gleich- bleibenden Verhältnissen.
- Änderung der Rostelementgeschwindigkeit – Transportgeschwindigkeit – zur Änderung von Verweilzeit und Verweilzeitverhalten – z.B. 0,5 h bis 2 h – des Bettes;
- Steuerung der Betthöhe zusätzlich über Geschwindigkeit der Beschickung;
- Zugabe von Zusatzstoffen auf das Bett – Kalkprodukte zur Behandlung von Schadstoffen und Aschebeeinflussung usw. – z.B. [50];
- Rückführung von abgezogener Asche an den Rostanfang, um den Inertanteil auf dem Bett zu ändern (vgl. unten Einfluss des Inertanteils).

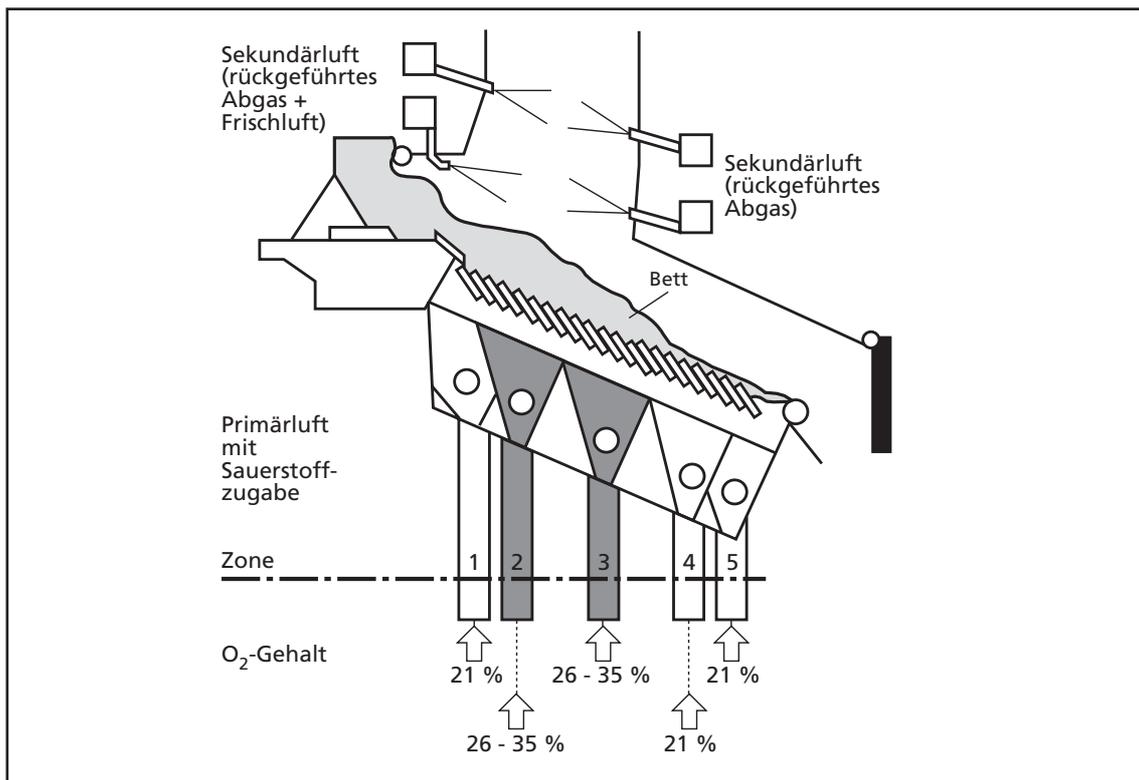


Bild 9: Sauerstoffanreicherung der Primärluft

Quelle: Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Bericht 1192, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995

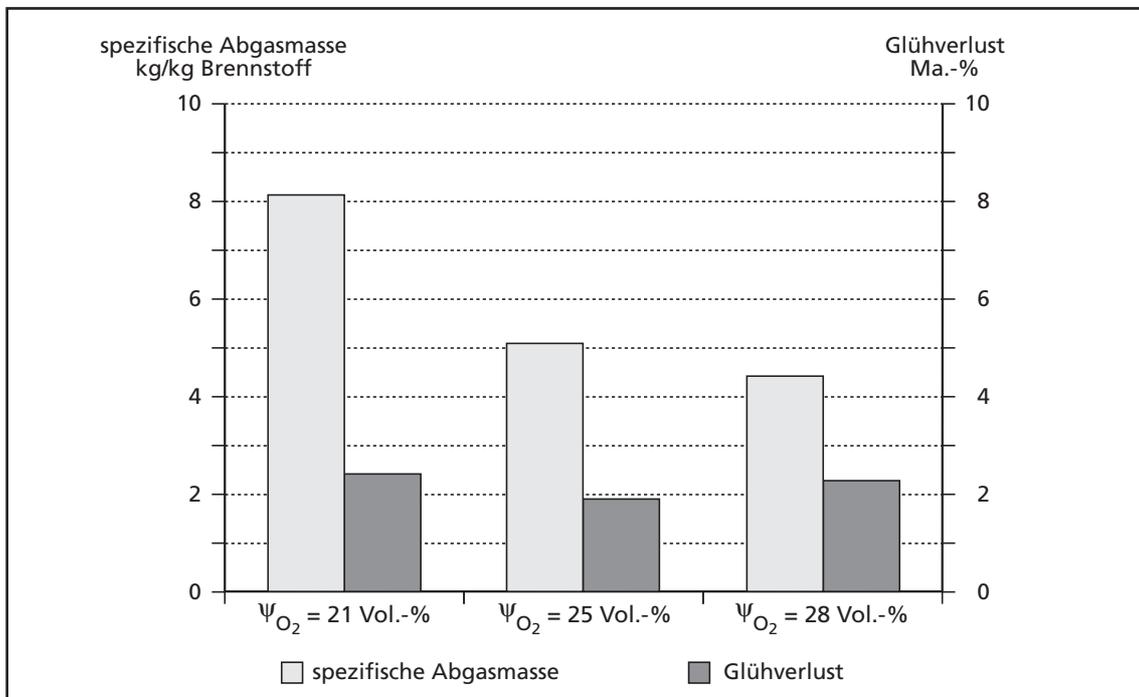


Bild 10: Spezifische Abgasmasse und Glühverlust der Asche bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten der Primärluft

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

Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Ausbrandvorgänge sowie auch Eigenschaften der Aschen können so beeinflusst werden [z.B. 45]. Es ist zu bemerken, dass in der Regel die Primärluft auch die Aufgabe hat, die Rostelemente zu kühlen. Um sie vor Überhitzung zu schützen, ist häufig der Primärluftvolumenstrom so groß zu wählen, dass insgesamt maximale Aschetemperaturen um 850 °C bis 950 °C nicht überschritten werden. Im Hinblick auf das Eluatverhalten zeigt sich, dass 950 °C ausreichend sind [18].

Von der **Projektierung** her bestehen weitere Beeinflussungsmöglichkeiten:

- Durch den Rosttyp (Wander-, Walzen-, Vorschub-, Rückschubrost usw.), d.h. durch die Art der Gutdurchmischung selbst kann auf die Prozessführung und auf den Feststoffumsatz Einfluss genommen werden. Zum Beispiel können Rückschubroste im Hinblick auf die Gutbettbewegung näherungsweise als Hintereinanderschaltung von Rührkessелеlementen (Bild 6) aufgefasst werden [4]). Die Gutbettbewegung bei den verschiedenen Rosttypen ist einerseits ein wichtiger Parameter, andererseits kann im Zusammenhang mit den vielen Möglichkeiten des Eingriffs auf Rosten keinem bestimmten Rosttyp der Vorzug gegeben werden.
- Die prinzipielle Anordnung der Strömungsführung über dem Gutbett ist als Gleichstrom-, Mittelstrom- oder Gegenstromprinzip möglich (Bild 11). Beim Gleichstromprinzip wird eine erste Nachverbrennung der vom Rostanfang kommenden Gase angestrebt, beim Gegenstromprinzip sollen die heißen Gase vom Rostende der Trocknungs- und Entgasungszone am Rostanfang Wärme zuführen. Diese Überlegungen können nun wiederum ganz erheblich durch so genannte Sekundärheizflächeneffekte, d.h. durch Strahlungsaustausch zwischen den umliegenden feuerfest ausgekleideten Wänden und der Gutoberfläche, beeinflusst werden, so dass auch hier nicht einem bestimmten

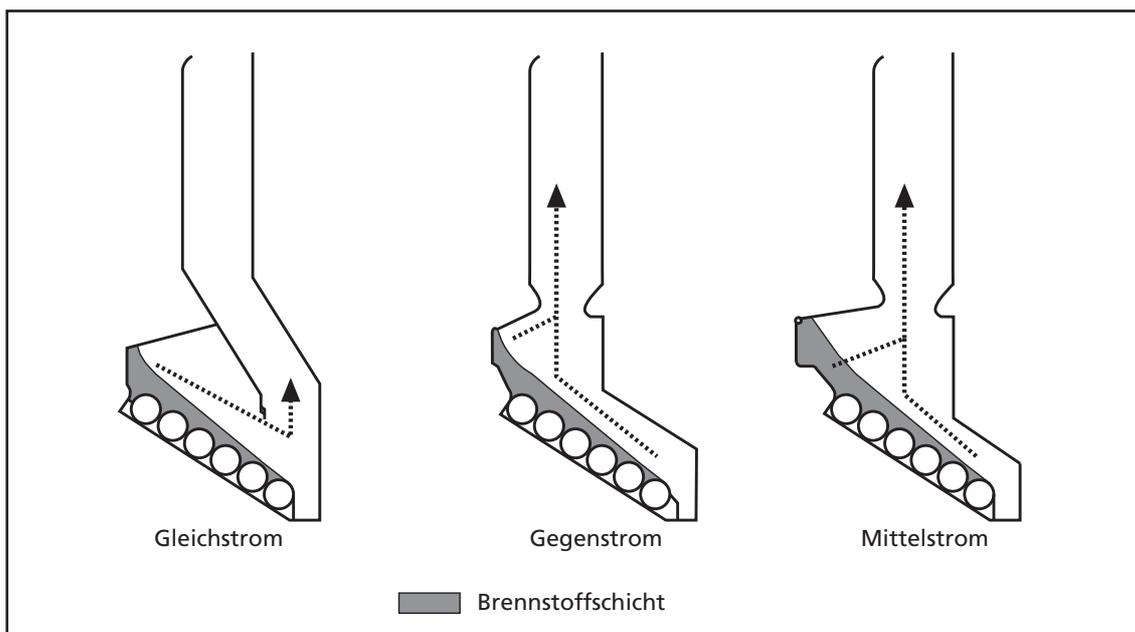


Bild 11: Schematische Darstellung verschiedener Möglichkeiten der Gasführung über dem Gutbett

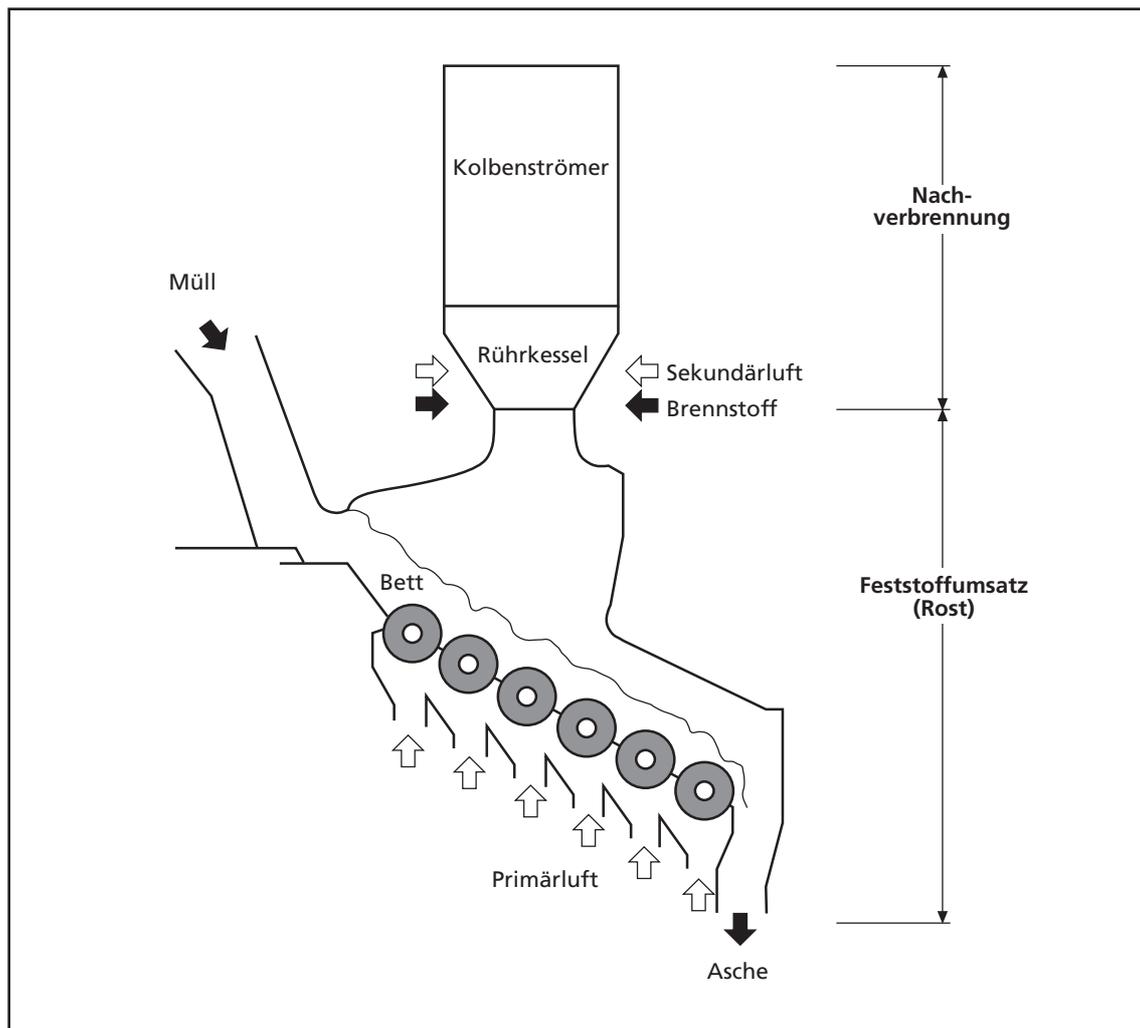


Bild 12: Schematische Darstellung der strömungstechnischen Trennung von Rost und Nachverbrennung

Prinzip der Vorzug gegeben werden kann. Bei entsprechender Trennung der Nachverbrennungszone (zweite Einheit) von der Rostzone (erste Einheit) können im Übrigen die im Gleich- oder Gegenstrom geführten Gase unabhängig von ihrem Zustand am Eintritt in die Nachverbrennung in dieser optimiert nachverbrannt werden.

Auf die **Trennung der Nachverbrennung von dem Rost** wird aus den dargelegten Gründen zunehmend Wert gelegt.

- Die Trennung muss nicht geometrisch sein, sie kann auch strömungstechnisch erfolgen. Eine geometrische Trennung lässt sich aus praktischen Gründen in der Regel nicht durchführen. Eine strömungstechnische Trennung (Bilder 12, 13, 14) ist ebenfalls sehr wirksam wenn z.B. entsprechend der Freistrahlttheorie durch Dimensionierung von Düsengeometrie und Eintrittsimpuls eine gute *Überdeckung des Querschnitts*, ausreichendes Ansaugen des zu vermischenden Grundstromes und hinreichende *Eindringtiefe* der Injektorstrahlen erreicht werden. In der Regel führt dies zu Düsenfeldern in

mehreren Ebenen (Bild 13). Nach Möglichkeit sollten zwecks guter Überdeckung (Bild 14) an allen Kanalseiten Düsenfelder angeordnet sein. Unterstützend wirkt, wenn die Eindüsung an einem *eingezogenen* Strömungsquerschnitt der Nachverbrennungszone angeordnet ist (Bilder 12 und 13).

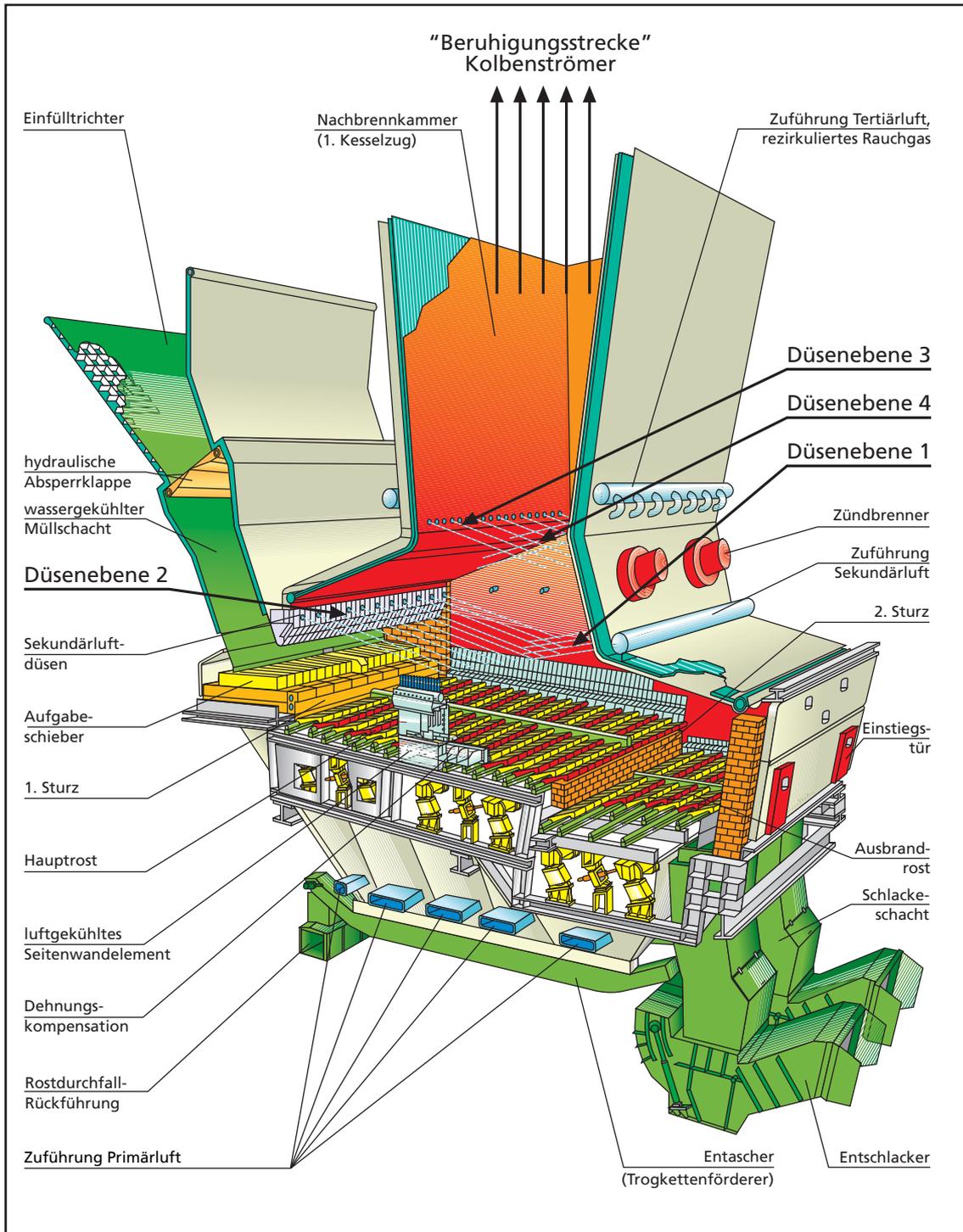


Bild 13: Schematische Darstellung eines Vorschubrostes mit anschließender Nachverbrennung

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

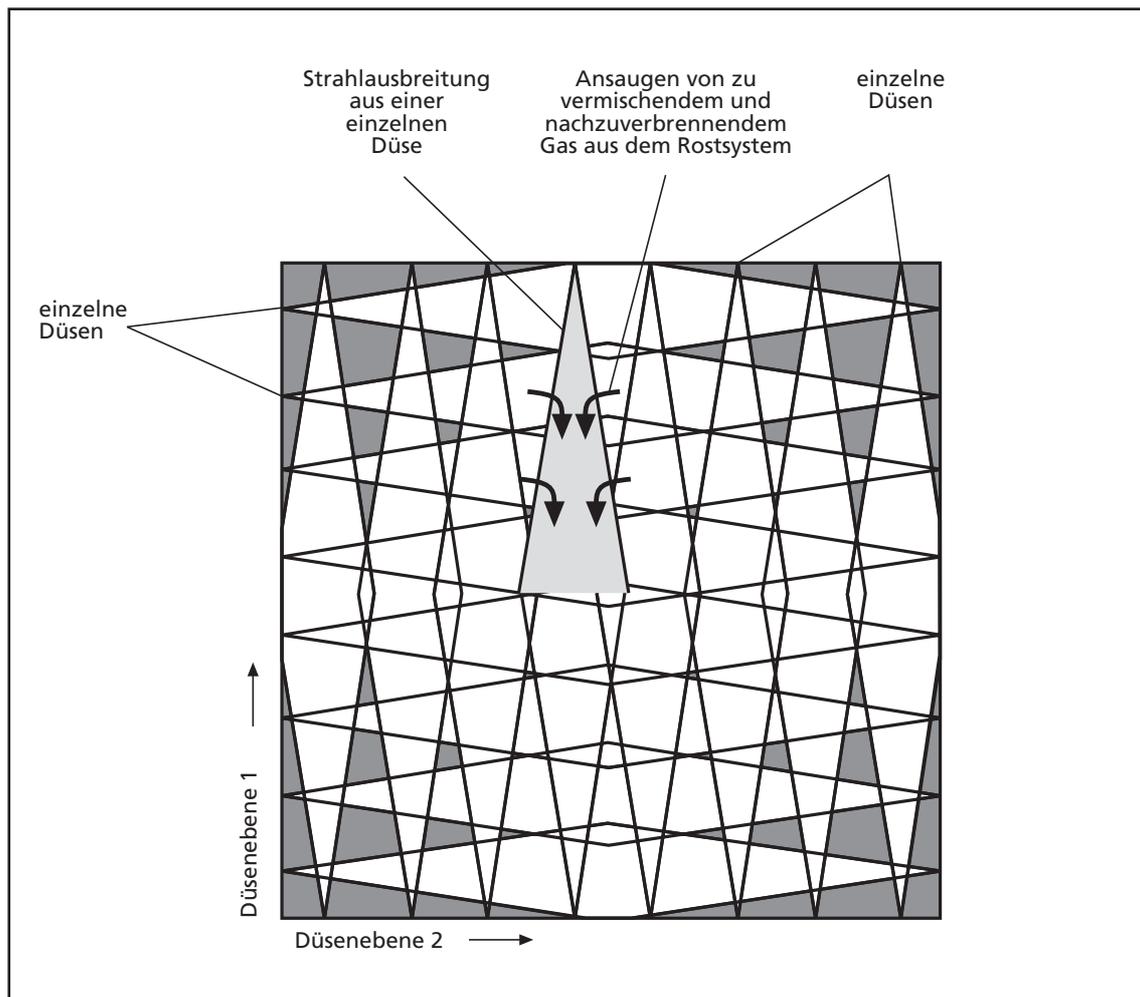


Bild 14: Möglichkeiten der Anordnung von Düsenfeldern in zwei Ebenen über einem Strömungsquerschnitt zur Herstellung eines *Rührkessel*-Elements

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

Diese strömungstechnische Trennung führt gleichzeitig zur Bildung des in Bild 5 dargestellten Rührkessелеlements. Oberhalb der Düsenfelder (Bilder 13 und 14) ist dann die Beruhigungsstrecke angeordnet (Kolbenströmerzone). Die Realisierung der Vermischung muss nicht durch Eindüsung von Sekundärluft erfolgen. Der Ersatz der Sekundärluft durch rückgeführtes Abgas verringert einerseits den Abgasmassenstrom (am Kamin) und vermeidet andererseits bei *richtiger* Auslegung der Injektorstrahlen durch intensive Vermischung gleichzeitig Temperaturspitzen in der Nachverbrennung, was zu einer verminderten thermischen NO-Bildung führt [45].

- Eine andere als im Bild 5 dargestellte Trennung zwischen Rost- und Nachverbrennung zeigt Bild 15. Hier ist das Rührkessелеlement für die Nachverbrennung der vom Rost stammenden Gase bereits über der ersten Hälfte eines Walzenrostes angeordnet, die Nachverbrennungszone beinhaltet *nur noch die beruhigte Ausbrandstrecke* (Kolbenströmerzone).

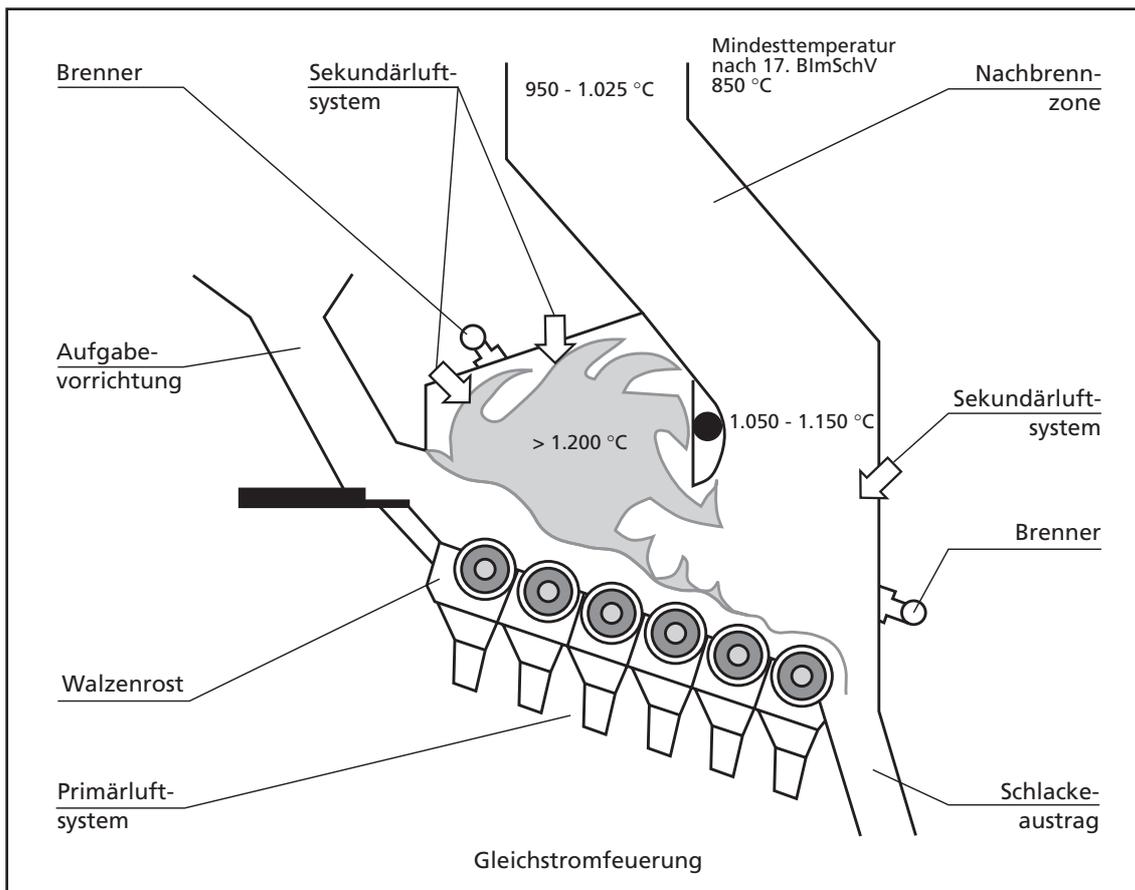


Bild 15: Trennung zwischen Rost- und Nachverbrennung durch Anordnung des Rührkessellements für die Nachverbrennung über der ersten Hälfte des Walzenrosts

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

Schließlich sei noch erwähnt, dass ein Rost auch **wassergekühlt** sein kann.

- Dies stellt einen größeren konstruktiven Aufwand dar im Vergleich zu dem Fall, dass nur durch die Primärluft gekühlt wird. Es ergibt sich jedoch der Vorteil, dass im Gegensatz zu dem nur durch Primärluft gekühlten Rost nunmehr die Primärluftverteilung ohne Rücksicht auf die Konstruktion (Kühlung) verändert werden kann [27]. Die vorgenannten Maßnahmen und zugehörigen Vorteile kommen dann noch deutlicher zum Tragen. Die Luftzahl, die Abgas- und Flugstaubströme können weiter gesenkt werden, die Betttemperaturen können soweit angehoben werden, dass die Aschen angesintert oder angeschmolzen sind, was z.B. ein ausreichendes Eluatverhalten bewirkt [61].
- Darüber hinaus hat eine Wasserkühlung den Vorteil [27], dass
  - \* der Verschleiß durch thermische Einflüsse geringer wird und auch bei **hohen Heizwerten** keine thermische Überlastung einzutreten droht und
  - \* der Rostdurchfall verringert wird – geringere Dehnungen gestatten engere Schlitze zwischen den Rostelementen.

Schließlich sind Entwicklungsarbeiten zur verbesserten **Regelung** mittels Infrarotkameras (Bild 16) zu nennen, die auf das Rostbett gerichtet sind und über die Ausmessung von Temperaturfeldern erkennen, wo sich die Hauptreaktionszone befindet. Diese kann dann durch Umverteilung der Primärluft je nach Erfordernis mehr zum Rosteintritt oder Rostende geregelt verschoben werden [33, 42]. Durch gezielte Veränderung der Primärluft (Reaktionsgaszugabe) ist eine schnelle Anpassung an Schwankungen der Restmülls – Heizwert, Feuchtigkeit, Dichte, usw. –, eine Vermeidung von Durchbläsern und von Strahlenbildungen, eine Verbesserung des Reststoffausbrands, eine Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Wärmeentbindung, der Vermeidung von Emissionsspitzen usw. zu erwarten. Die Tabelle 4 gibt einen Überblick nach [54]. Auch der zusätzliche Einbau eines IR-Pyrometers zur Temperaturmessung in einem Kesselzug wird unterstützend vorgesehen [36].

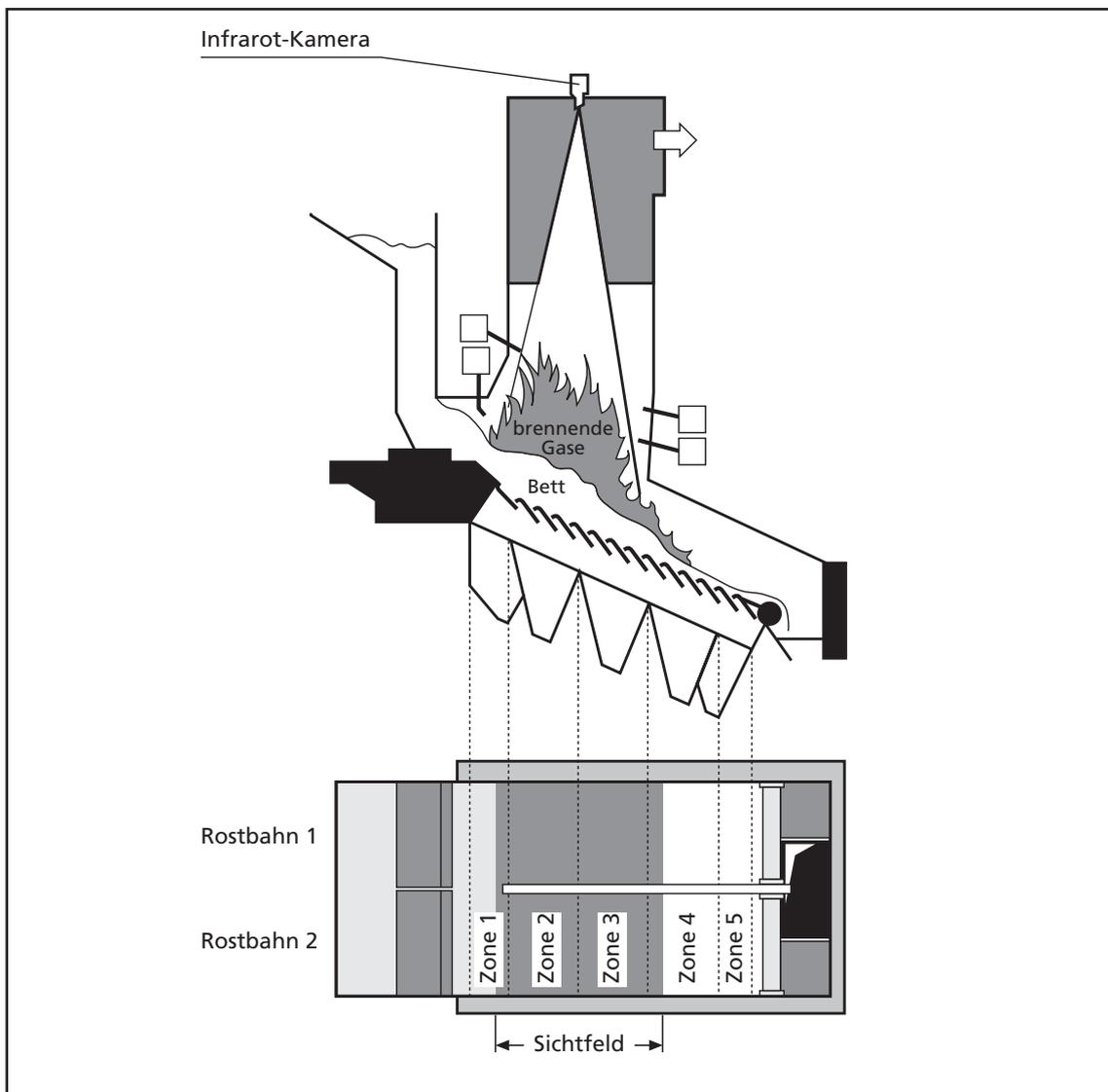


Bild 16: Regelung eines Rostes mit Infrarot-Kamera

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

Tabelle 4: Beispiel für eine Prozessverbesserung durch eine verbesserte Verknüpfung von Haupteinflussgrößen über eine Regelung

Nr.	Beeinflusste Größe	Qualität bzw. Quantität der Änderung
01	Brennbetttemperatur	50 °C bis 200 °C höher
02	Absoluter Schlackenausbrand	um 0,5 % (TOC) besser
03	Feuerraumtemperaturen	gleichmäßiger
04	Schwankungsbreite der Dampferzeugung	10 % bis 30 % gleichmäßiger
05	Schwankungsbreite des O <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas	2 % bis 5 % gleichmäßiger
06	O <sub>2</sub> -Gehalt im Abgas	niedriger
07	Abgasmassenströme	gleichmäßiger
08	Extremwerte (Peaks) der CO-Konzentration im Abgas	bis 80 % weniger
09	Absoluter CO-Gehalt im Abgas	bis 50 % niedriger
10	Dioxinbildung durch besseren Gasausbrand	weniger
11	Eingriffsmöglichkeiten	frühzeitiger
12	Gesamtbetrieb wegen der Punkte 1 bis 11	stabiler bzw. gleichmäßiger
13	Dampfleistung bzw. Mülldurchsatzleistung durch gleichmäßigeren Betrieb (Punkt 12)	höher
14	wegen gleichmäßigerem Betrieb (Punkt 12) Energie für Stützfeuerung	geringer
15	Kesselwirkungsgrad (Dampferzeugung)	bis 2 % höher

Quellen: Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Bericht 1192, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995; und Schreiner, R.; Busch, M.: Ergänzung der Feuerungsregelung von MVAs mit Signalen aus einer flächenhaften Brennbett-Temperaturerfassung mittels Infrarotkamera. VDI Berichte 1629. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2001; und Papa, G.; Lenz, B.: Ertüchtigung der Feuerungsregelung gemäß dem aktuellen Stand der Technik im MHKW Coburg. 13. DVV-Kolloquium, 23./24.09.2002, Weimar. ISBN 3-86068-176-1

Weiter werden zunehmend mathematische Modelle zum Feststoffumsatz auf dem Rost [z.B. 4, 5, 8, 38, 43] im Hinblick auf die Beschreibung des dynamischen Verhaltens online in die Prozessregelung integriert, um den Betrieb bei Veränderungen der Randbedingungen – z.B. Schwankungen des Müllheizwertes – mit Rücksicht auf die thermische Trägheit des Prozesses weiter zu verbessern. Prozessmodelle werden darüber hinaus für Projektierungen und Simulationen unterschiedlicher Betriebsweisen zunehmend eingesetzt (siehe auch Abschnitt 5.3.).

## 5.2.

### Vergasung auf dem Rost (Luftzahl der dem Rost insgesamt zugeführten Luft: $\lambda < 1$ )

Entsprechende Untersuchungen haben gezeigt [3, 46, 51], dass es wegen der guten Steuerbarkeit der Haupteinflussgrößen längs des Weges auch möglich ist, einen Rost als Vergaser – Vergasungsmittel ist Luft oder mit Sauerstoff angereicherte Luft – zu betreiben. Bei einer Vergasung (z.B. Stöchiometriezahl  $\lambda_R = 0,5$ ) kann ebenso wie bei einer Verbrennung ein nahezu vollständiger Umsatz des

Feststoffes mit einem entsprechend kleinen Glühverlust (z.B. um 1 %) der Reststoffe erreicht werden; Pyrolysekoks wird somit vermieden. Das Vergasungsgas und der Flugstaub werden in einer Nachbrennkammer nachverbrannt. Es handelt sich somit um ein so genanntes Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (Verfahren C nach Tabelle 3).

Die Verfahrensmerkmale lassen sich wie folgt beschreiben:

- Das Verfahrensfliessbild bzw. das Schaltbild ist das gleiche wie in Bild 5, jedoch mit dem Unterschied, dass nun die gesamte dem Rost zugeführte Luft (Primärluft) bezogen auf den zugeführten Abfall einer Luftzahl z.B.  $\lambda_R = 0,5$  entspricht (in Bild 5  $\lambda_R = 1,3$ ). In der ersten Einheit in Bild 5 laufen die Vorgänge somit von der Trocknung und Entgasung bis zur Vergasung ab. Falls erforderlich, ist es auch möglich, in der letzten Roststufe leicht überstöchiometrische Bedingungen – bei Einhaltung einer Gesamtluftzahl  $\lambda_R = 0,5$  – herzustellen. Durch die Möglichkeit, die Haupteinflussgrößen in vielfältiger Weise – wie in Abschnitt 5.1. bereits beschrieben – längs des Reaktionsweges gut steuern zu können, wird das Ziel eines möglichst hohen Umsatzes, d.h. Restkohlenstoffgehalt in den Reststoffen kleiner 1 % (Bild 17), erreicht.

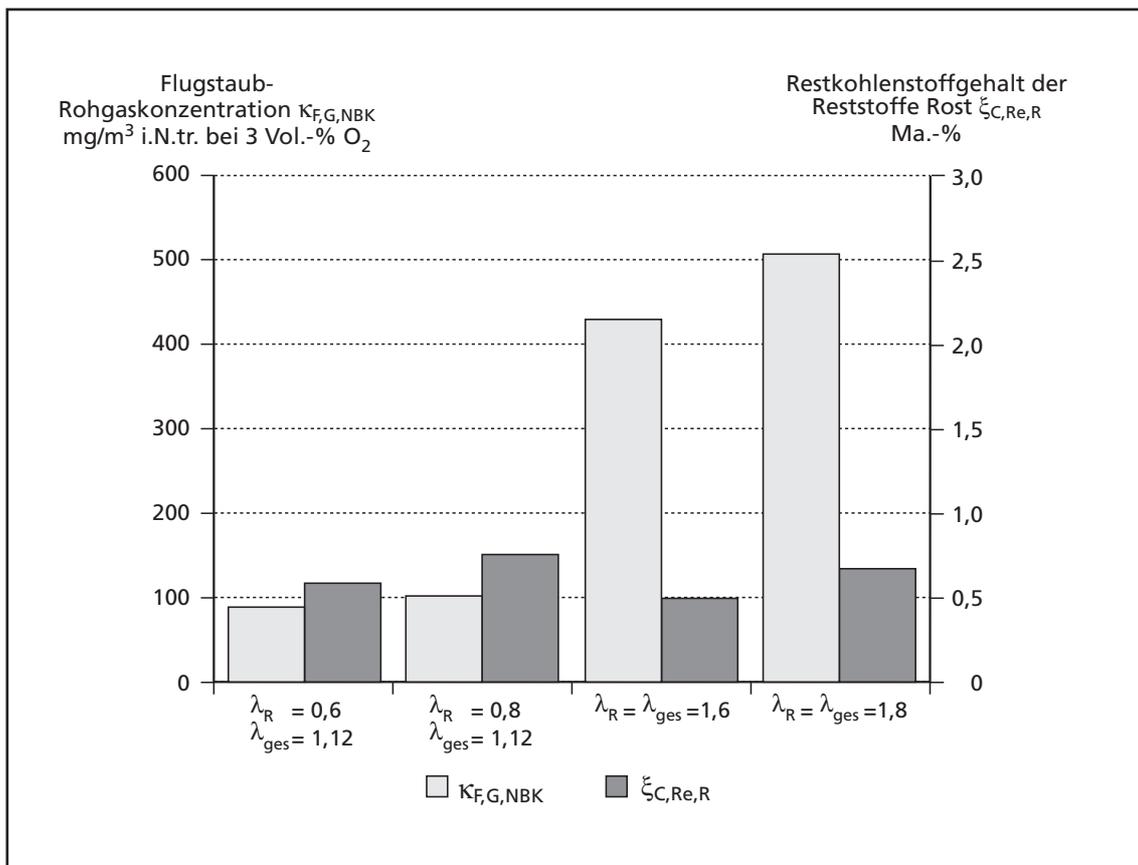


Bild 17: Staubkonzentrationen im Rohgas  $\kappa_{F,G,NBK}$  und Glühverlust der Reststoffe  $\xi_{C,Re,R}$  bei verschiedenen Stöchiometrieverhältnissen auf dem Rost

Quelle: Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe Nr. 21, 1995

- Die geringe Primärluftzahl hat weiter eine Senkung der Durchströmungsgeschwindigkeit des Bettes und damit eine erhebliche Reduzierung des Flugstaubes zur Folge, der in der Nachbrennkammer noch zu verbrennen ist.
- Wird die Vergasung von Restmüll üblichen Heizwertes auf dem Rost mit über seine Länge verteilter Primärluft so durchgeführt, dass sich eine Primärluftzahl um  $\lambda_R = 0,5$  ergibt, stellen sich Betttemperaturen um 850 °C bis 900 °C ein. Eine Wasserkühlung ist dann nicht erforderlich.
- Wird von einer Primärluftzahl von  $\lambda_R \approx 0,4$  bis 0,5 ausgegangen, erhält man beispielsweise für ein Abfallholz ein Vergasungsgas mit einer Zusammensetzung aus Kohlenmonoxid 8 bis 12 Vol.-%, Kohlendioxid 12 bis 16 Vol.-%, Methan 1 bis 3 Vol.-%, Wasserstoff 2 bis 4 Vol.-%, Sauerstoff 1 bis 2 Vol.-% und Stickstoff 63 bis 76 Vol.-%, was einem Vergasungsgasheizwert von  $h_u \approx 2.500$  kJ/kg entspricht. Dieser Heizwert reicht aus, um in Verbindung mit den mit 600 °C bis 700 °C in die Nachverbrennung eintretenden Gasen dort eine eigenständige Verbrennung (Sekundär- und Tertiärluft) (Bild 5, zweite

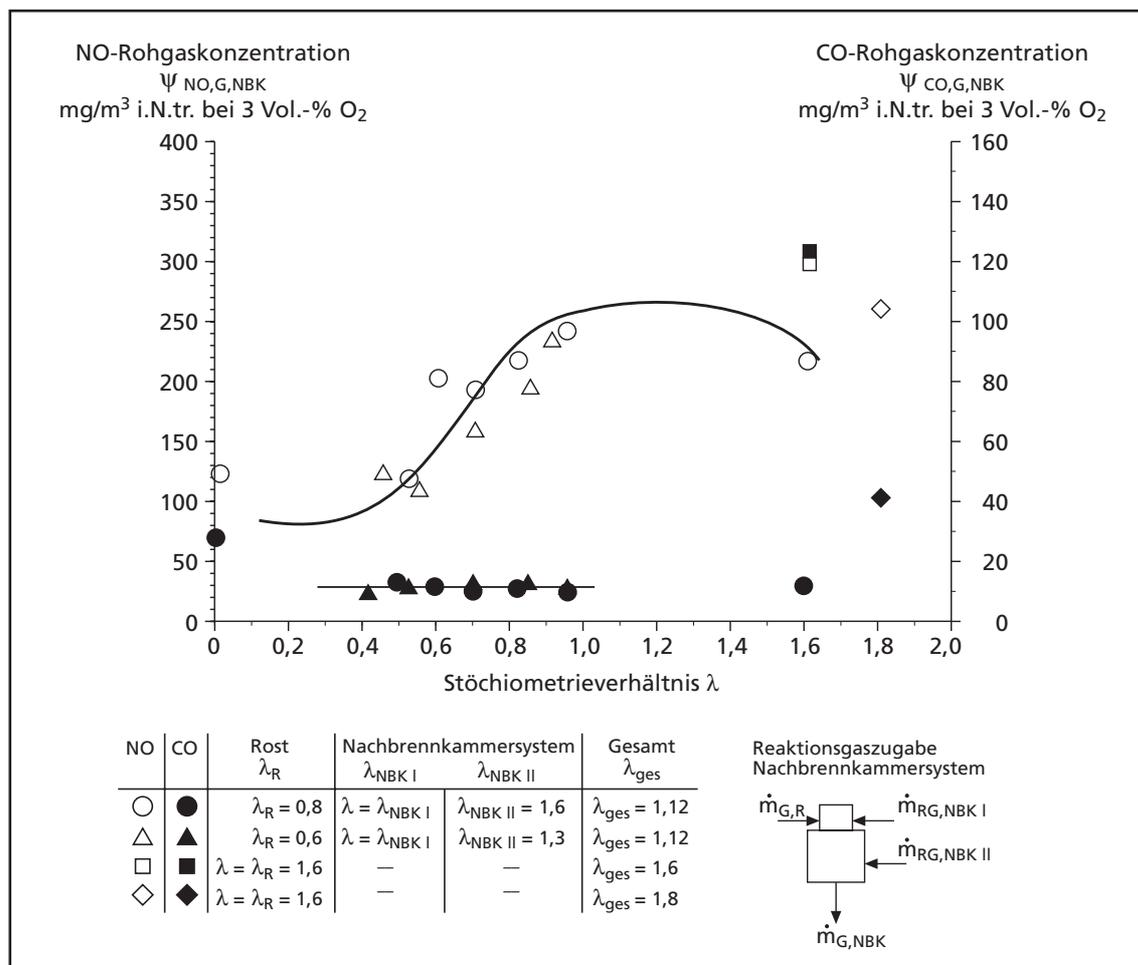


Bild 18: Gemessene NO- und CO-Rohgaskonzentration in Abhängigkeit von dem Stöchiometrie-verhältnis bei über- und unterstöchiometrischer Betriebsweise der Rostanlage

Quelle: Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe Nr. 21, 1995

Einheit) gegebenenfalls mit Stufung und Abgasrückführung zur Reduzierung von  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$  und  $\text{NO}_x$  durchzuführen (vgl. Ergebnisse in Bild 18). Die Nachverbrennung sollte vollständig von der Vergasung auf dem Rost getrennt sein, um beide Einheiten unabhängig voneinander optimieren zu können. Mit den oben genannten Bedingungen sind in der Nachbrennkammer Temperaturen erreichbar, die über denen bei klassischer Fahrweise – Rost überstöchiometrisch – liegen. Dies sei erwähnt, falls zwingend erhöhte Temperaturen (z.B.  $1.200\text{ °C}$ ) gefordert werden. Derzeit ist die vor einigen Jahren noch wichtige Fragestellung nicht mehr akut.

- Bei einer Primärluftzahl von  $\lambda_R = 0,3$  bis  $0,5$  lassen sich weiter Gesamtluftzahlen – einschließlich Sekundär- und ggf. Tertiärluft – um  $\lambda_{\text{ges}} = 1,2$  erreichen (Bild 19), was im Vergleich zu den in Abschnitt 5.1. erläuterten Luftzahlen eine erhebliche Reduzierung von Abgasströmen und damit auch Reduzierung von Schadstofffrachten bedeutet.
- Wegen der geringeren Luftzahl und damit geringeren Abgasverluste sind die Wirkungsgrade (siehe unten Abschnitt 6) bei der Vergasung auf dem Rost im Vergleich zu klassischen Verfahren der thermischen Behandlung eher noch etwas höher.
- Welche Aufbereitung der Reststoffe am Rostaustritt sinnvoll ist, muss noch geprüft werden.

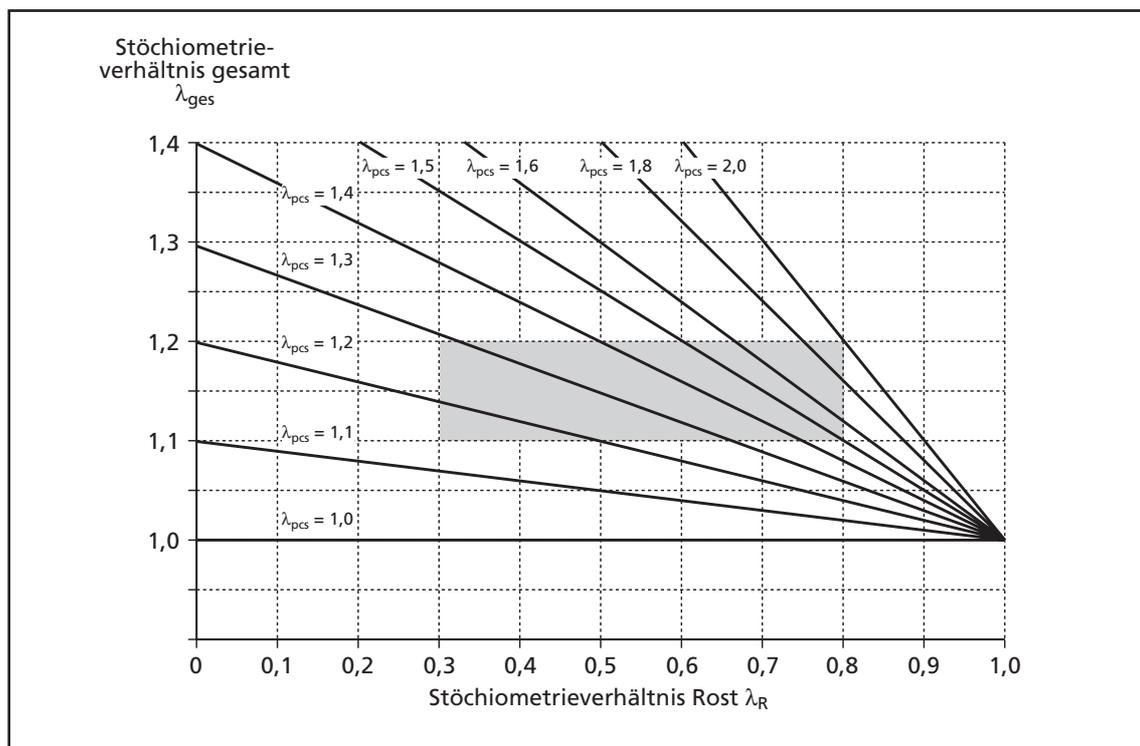


Bild 19: Abhängigkeit des Gesamtstöchiometrieverhältnisses im Rost- und im Nachbrennkammersystem

Quelle: Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe Nr. 21, 1995

Da grundsätzlich die Apparate Rost und Nachbrennkammer verwendet werden und die Vergasung mit Luft durchgeführt wird, erhält man dieses Verfahren vom Prinzip her auch aus der klassischen Müllverbrennung, wobei bei dieser *lediglich* die Luftverteilungen stark verändert werden. Aus dieser Sicht kann das Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren auch als *Weiterentwicklung der klassischen Müllverbrennung* angesehen werden. Der derzeitige Stand des Verfahrens ist als *in der Entwicklung befindlich* zu bezeichnen. Es geht jedoch in seinen Anfängen bis in die 20er Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurück und wird im Übrigen vom Prinzip her seit langem zur Trennung von Verbundwerkstoffen im Zuge des Recyclings verwendet, z.B. bei kunststoffbeschichteten Metallen, bei denen der Kunststoff vergast wird und somit der metallische Grundkörper zur Wiederverwertung erhalten bleibt.

Die vor mehr als zehn Jahren im Bereich der Abfallbehandlung begonnenen Überlegungen zur Optimierung der Prozessführung [44, 51] und die Mitte der 90er Jahre an einer Pilotanlage erreichten Ergebnisse [3, 46] werden durch Ergebnisse im industriellen Maßstab bestätigt [58].

### 5.3.

## Prozessmodellierung

Im Zusammenhang mit einer gezielten Untersuchung des Einflusses der vorstehend beschriebenen Einflussgrößen, wie Sauerstoffpartialdruck, Temperatur und Verweilzeit sowie der zugehörigen Steuerungsmöglichkeiten werden gegenwärtig zunehmend auch **mathematische Modelle** zur Beschreibung des Feststoffumsatzes durch Verbrennung und Vergasung auf einem Rost entwickelt und die Integration in die Prozessregelung (online) im Hinblick auf die Beschreibung des dynamischen Anlagenverhaltens bei Veränderung der Randbedingungen (z.B. Heizwertschwankungen, usw.) angestrebt. Neben den Aufgaben bei der Optimierung und der Online-Regelung werden Prozessmodelle auch im Zusammenhang mit der Projektierung von Anlagen, der Simulation und der Bewertung bei Verfahrensvergleichen usw. verwendet.

Eine Übersicht bezüglich wichtiger experimenteller und theoretischer Grundlagen zum Feststoffumsatz durch Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen ist z.B. in [3] enthalten. Es sei an dieser Stelle deshalb nur zusammenfassend bemerkt, dass ein großer Teil der Arbeiten an kohlebefeuernden Anlagen bereits in den Jahren vor 1940, insbesondere unter den Fragestellungen einer stabilen Zündung und Verbrennung, einer Erhöhung der spezifischen Rost- und Feuer-raumbelastung usw. durchgeführt wurden [2, 29, 31, 32, 35, 39, 40, 59, 60, 63]. Erst im Zusammenhang mit der thermischen Abfallbehandlung besteht erneut ein Interesse, die einzelnen Feststoffumwandlungsprozesse auf einem Rost für diesen Anwendungsfall detaillierter zu untersuchen und mit mathematischen Modellen zu beschreiben [z.B. 4, 5, 8, 16, 19, 37, 38, 43].

Abfälle sind in der Regel heterogen zusammengesetzt. Eine Beschreibung des Verbrennungsprozesses mit Hilfe eines mathematischen Modells ist deshalb

dadurch erschwert, dass die Basisdaten für die komplex ineinandergreifenden Stofftransport-, Wärmeübertragungs- und Reaktionsmechanismen häufig nicht verfügbar sind und über empirische Ansätze angenähert werden müssen. Damit können die komplexen Zusammenhänge des realen Prozesses häufig nur mit so genannten vereinfachten Modellansätzen – z.B. über summenkinetische Daten – beschrieben werden [siehe auch 4, 5].

Entsprechend der Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung – einschließlich chemischer Reaktionen – kann auch bei Abfallgemischen wieder auf die wesentlichen Einflussgrößen Art des Umsatzes in Form eines effektiven Reaktionskoeffizienten  $k_{\text{eff}} \cdot A$ , die Potentialdifferenz (z.B. Sauerstoffpartialdruck  $p_{O_2}$ ) und die Kapazität (z.B. zugeführter Reaktionsgasmassenstrom  $\dot{m}_{\text{RG}}$ ) zurückgegriffen werden. Diese Vorgehensweise sei anhand des Feststoffumsatzes in Rostsystemen kurz erläutert, sie lässt sich in ähnlicher Weise auf andere Prozesse wie den Abbrand (s. [41]) und die Pyrolyse in Drehrohr-Systemen (s. [13]) entsprechend übertragen. Zunächst wird das Verweilzeitverhalten in einem Rostsystem durch eine Hintereinanderschaltung von Rührkessel-Elementen (Bild 6) abgebildet. Für ein einzelnes Rührkessel-Element wird in einem ersten Schritt im Sinne eines Batch-Prozesses die Massen- und Energiebilanz aufgestellt (*Zellenmodell*) (Bild 20).

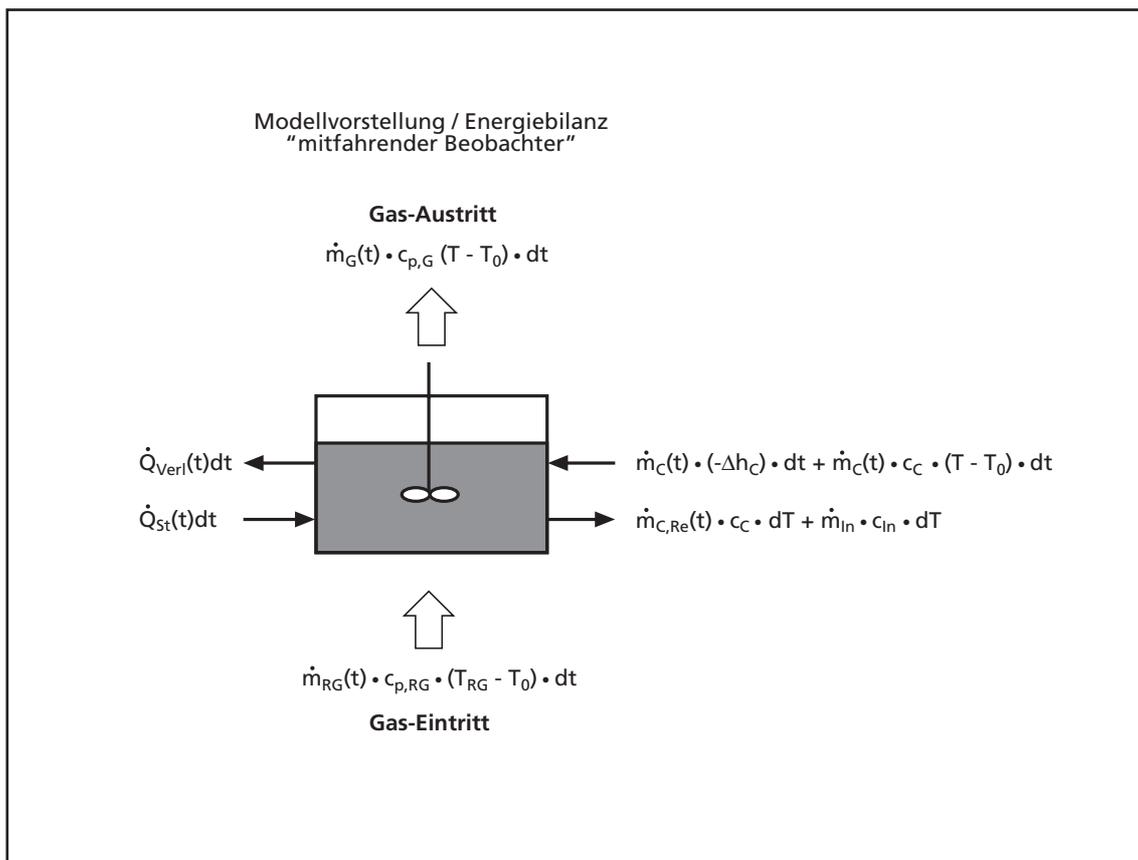


Bild 20: Energiebilanz an einem Rührkessel-Element

Quelle: Beckmann, M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5

Für den Feststoffumsatz wird ein vereinfachter Ansatz für den Kohlenstoffumsatz angenommen:

$$\dot{m}_c(t) = M_c \cdot A_{Ku,a}(t) \cdot k_{eff,a}(t) \cdot \frac{[p_{O_2,RG} + p_{O_2}(t)]}{2 \cdot R \cdot T(t)} \quad \text{Gl. 1.}$$

Mit den Beziehungen für die umsatzabhängige reaktive Oberfläche in der Schüttung und aus den Stoffbilanzen lässt sich für den umgesetzten Kohlenstoffmassenstrom die Beziehung

$$\dot{m}_c(t) = m_{c,0} \cdot \left[ \frac{1}{k_{eff,a}(t)} \cdot \frac{d_{aq,0} \cdot \rho_c}{6} \cdot \left( \frac{m_{c,0}}{m_{c,Re}(t)} \right)^{2/3} \cdot \frac{R \cdot T(t)}{M_c \cdot p_{ges}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_c} \cdot \frac{\rho_{RG,n}}{\rho_{O_2,n}} \cdot \frac{m_{c,0}}{\dot{m}_{RG}} \right]^{-1} \cdot \frac{p_{O_2,RG}}{p_{ges}} \quad \text{Gl. 2}$$

herleiten. In dieser Beziehung sind die v.g. Einflussgrößen  $k_{eff} \cdot A$ ,  $p_{O_2}$  und  $\dot{m}_{RG}$  enthalten. Die Art des Feststoffumsatzes ( $k_{eff} \cdot A$ ) kann weiter in den Einfluss der Stoffübertragung und der chemischen Reaktion entsprechend der Beziehung

$$k_{eff,a}(t) = \frac{1}{\frac{1}{\beta(t)} + \frac{1}{2 \cdot k_{c,a}(t)}} \quad \text{Gl. 3}$$

aufgeteilt werden. Der Stoffübertragungskoeffizient  $\beta$  lässt sich aus einer entsprechenden Sherwoodfunktion und der auf die äußere Oberfläche bezogene Reaktionskoeffizient  $k_{c,a}$  über einen Arrhenius-Ansatz:

$$k_{c,a}(t) = k_{max,a} \cdot \exp \left[ - \frac{E_{Ak,a}}{R \cdot T(t)} \right] \quad \text{Gl. 4}$$

ermitteln. Der effektive Reaktionskoeffizient für ein bestimmtes Abfallgemisch kann so experimentell in einem ein Rührkessel-Element nachbildenden Batch-Prozess (Batch-Reaktor, Bild 21) ermittelt werden.

Durch die Hintereinanderschaltung der einzelnen Zellen gelangt man zu dem Modell für den kontinuierlichen Rost – *kontinuierliches Modell*. Dabei wird der Feststoffaustausch zwischen den Zellen ähnlich der Penetrationstheorie bei der Stoffübertragung (Gas/Flüssigkeit) als ein diskontinuierlicher Vorgang angenommen. Zu einem Zeitpunkt  $t^*$  findet abhängig von der Rostbewegung ein Austausch von Feststoff zwischen den benachbarten Zellen statt. Mit dem Prozessmodell können sowohl der Umsatzverlauf über dem Rostweg als auch zusammengefasst mittlere Bilanztemperaturen und Abgaskonzentrationen berechnet werden. Ein Vergleich der Modellrechnungen mit Messergebnissen an einer Pilotanlage 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 22). Damit besteht 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. Es können die Einflüsse der Art des Feststoffumsatzes, des Potentials und

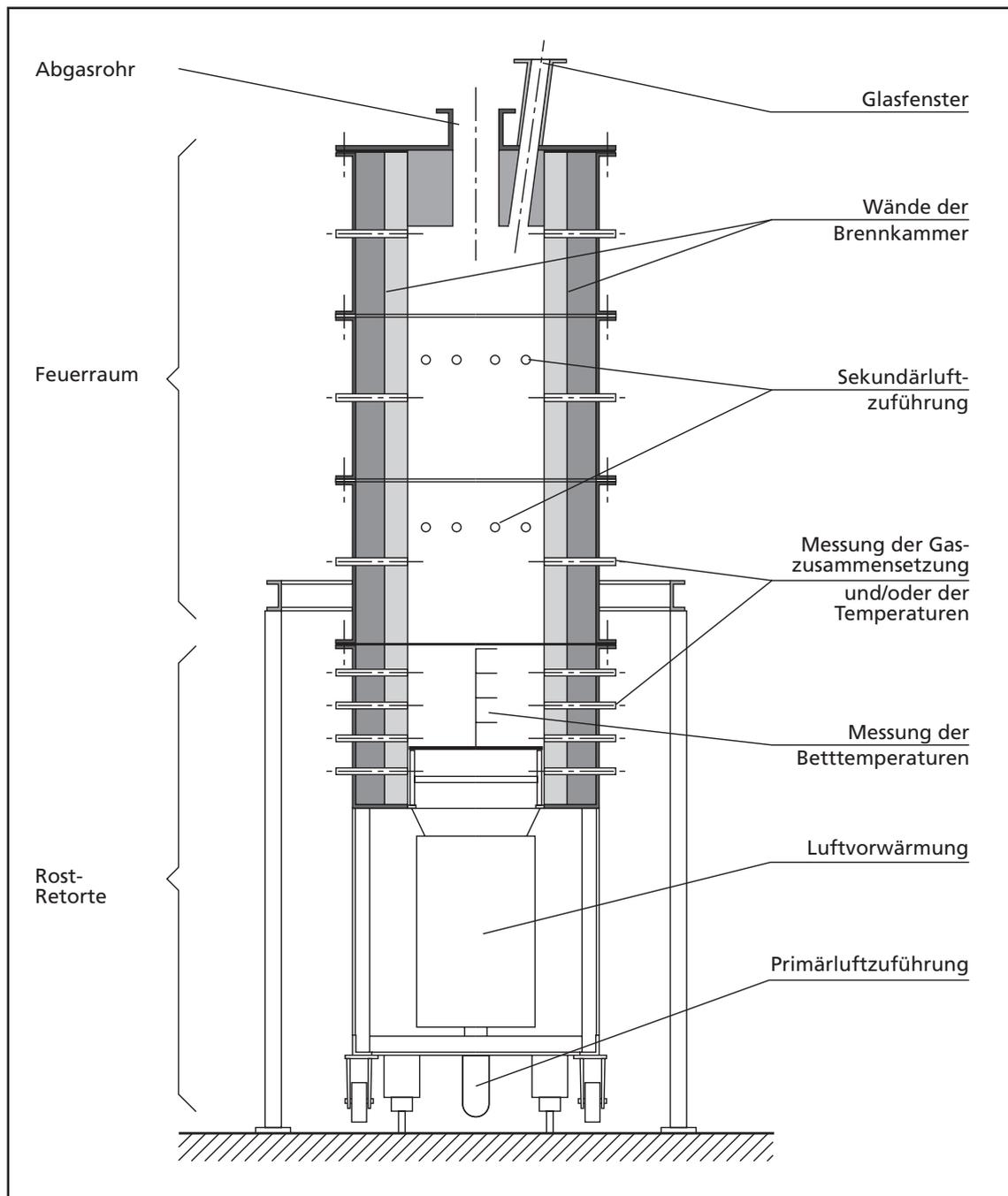


Bild 21: Schematische Darstellung eines Chargenrost-Reaktors zur Untersuchung des Feststoffumsatzes

Quelle: Beckmann, M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5

der Kapazität getrennt untersucht werden. Hierüber werden Erkenntnisse gewonnen, wo und wie in dem Prozess wesentlich Einfluss genommen werden kann. Die Modellierung der Vorgänge in dem sich bewegenden Müllbett auf dem Rost (Rostmodell) kann mit den heute zur Verfügung stehenden Computerkapazitäten natürlich stetig von ein- über mehrdimensionale Zonenmodelle (wie vorangehend beschrieben) bis zu diskreten Partikelmodellen erweitert werden,

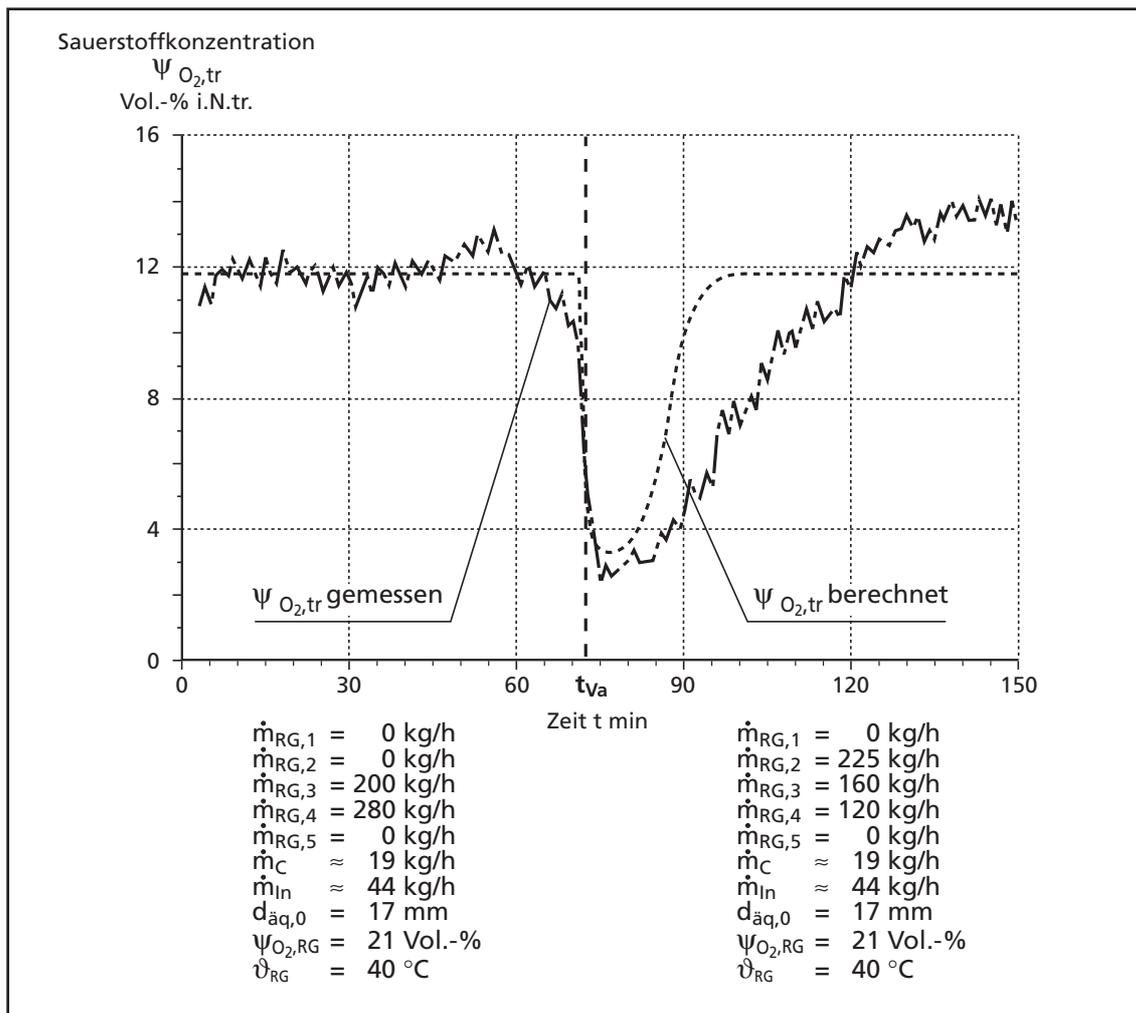


Bild 22: Feststoffumsatz auf dem Rost – gemessene und berechnete Sauerstoffkonzentration  $\Psi_{O_2, tr}$  mit Umverteilung des Luftmassenstromes (Modellbrennstoff Braunkohle)

Quelle: Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe Nr. 21, 1995

bei denen das Müllbett bis in einzelne Müllpartikel *aufgelöst* wird, die einzeln durch die Roststabbewegungen initiiert sich gegenseitig beeinflussend unterschiedliche Wege mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und entsprechend sich ändernde Reaktionsbedingungen durchlaufen. Auch solche Modelle liefern tragfähige Ergebnisse, wenn sie über empirisch ermittelte Randbedingungen *validiert* sind. Da in jedem Fall bei allen Modellen Randbedingungen experimentell zu ermitteln sind, ist die Diskussion um den zu führenden Modellierungsaufwand müßig. Entscheidend ist der Nachweis der Tragfähigkeit des Modells im Betrieb.

Für die Beschreibung des Gesamtprozesses – erste Einheit Rost, zweite Einheit Nachverbrennung – ist es nun weiter wichtig, die in der Nachbrennkammer bzw. in der Nachverbrennungszone ablaufenden Vorgänge (Strömung und Reaktion) ebenfalls über geeignete Modelle zu beschreiben (CFD-unterstützt) [15, 26, 28] und dann mit der durch die Bettoberfläche des Rostes tretenden Strömung

– Randbedingungen aus dem Rostmodell – zu koppeln. Die Nachbildung der Geometrie unmittelbar über dem Rost sowie der Nachverbrennungsgeometrie bis in den Kessel, der Injektorverhältnisse beim Einblasen von Sekundärluft, von rückgeführten Abgasen usw. an unterschiedlichen Orten ermöglicht es, dann weitere Untersuchungen über die räumliche Verteilung von Sauerstoff und Kohlenmonoxid (Ausbrand) usw. in der Nachverbrennungszone anzustellen, um z.B. zur Vermeidung von Strähnen die beste Anordnung zu finden. Die Ermittlung von Konzentrationen, Temperaturen und Geschwindigkeiten in der Nachverbrennungszone ist darüber hinaus auch zur Untersuchung von Anbackungsproblemen und damit auch Korrosionsproblemen wichtig [10, 62].

## Kap. 6.

# Bildung von Bilanz- und Systemgrenzen und zugehörigen Wirkungsgraden

Maßnahmen zur Prozessverbesserung und -optimierung – Einsparen von Zusatzenergie, Erhöhung des Nutzens (z.B. Prozessdampf), usw. –, können nur dann quantitativ beurteilt werden, insbesondere wenn nicht nur Maßnahmen an einer, sondern an verschiedenen Anlagen miteinander verglichen werden sollen, wenn vergleichbare Systemgrenzen und eine einheitliche Bildung von Kennzahlen (z.B. Wirkungsgrade usw.) gegeben sind.

Verfahren oder Verfahrensketten in der Abfallbehandlung unterscheiden sich im Ergebnis durch unterschiedliche Abgasmengen (und damit Schadstofffrachten), durch Wirkungsgrade zur Energieumsetzung – z.B. Heizwärme, elektrischer Strom –, durch die Eigenschaften der erzeugten Reststoffe usw. Wichtig ist es daher, dass Bilanzgrenzen mit gleichen Zielstellungen und Randbedingungen gewählt werden. Erst dann sind Energie-, Massen- und Stoffbilanzen mit Wirkungsgraden hinsichtlich Energie,  $\text{CO}_2$ -Umsatz usw. vergleichend aussagefähig. Je nach dem, was als *Nutzen* und als *Aufwand* zugrunde gelegt wird, ergeben sich ganz unterschiedliche Wirkungsgrade, d.h. Verhältnisse von Nutzen zu Aufwand ( $\eta = \text{Nutzen}/\text{Aufwand}$ ) (Bilder 23 und 24).

- Anlagenwirkungsgrad  $\eta_a$ :  
Der betrachteten Anlage (Bilanzgrenze *Gesamtverfahren* GV) werden die Abfallenergie  $H_{\text{AF}}$  und die benötigten Zusatzenergien  $\Sigma E_{\text{zus}}$  zugeführt. Abgeführt werden die Nutzenergie  $H_{\text{Nutz}}$  und die Verluste  $\Sigma E_{\text{verl.GV}}$ . Der so genannte Anlagenwirkungsgrad  $\eta_a$  ist dann entsprechend Bild 23 definiert.
- Primärwirkungsgrad  $\eta_p$ :  
Für den so genannten Primärwirkungsgrad wird zunächst die Bilanzgrenze um das jeweils betrachtete Verfahren so lange erweitert, bis alle Hilfsbilanzen für den Aufwand zur Erzeugung von Hilfsstoffen und Hilfsenergie (Bilanzgrenze UP) erfasst und mit eingeschlossen sind, d.h., dass jeweils der Weg und der Aufwand zurück bis zu den Primärenergieressourcen verfolgt

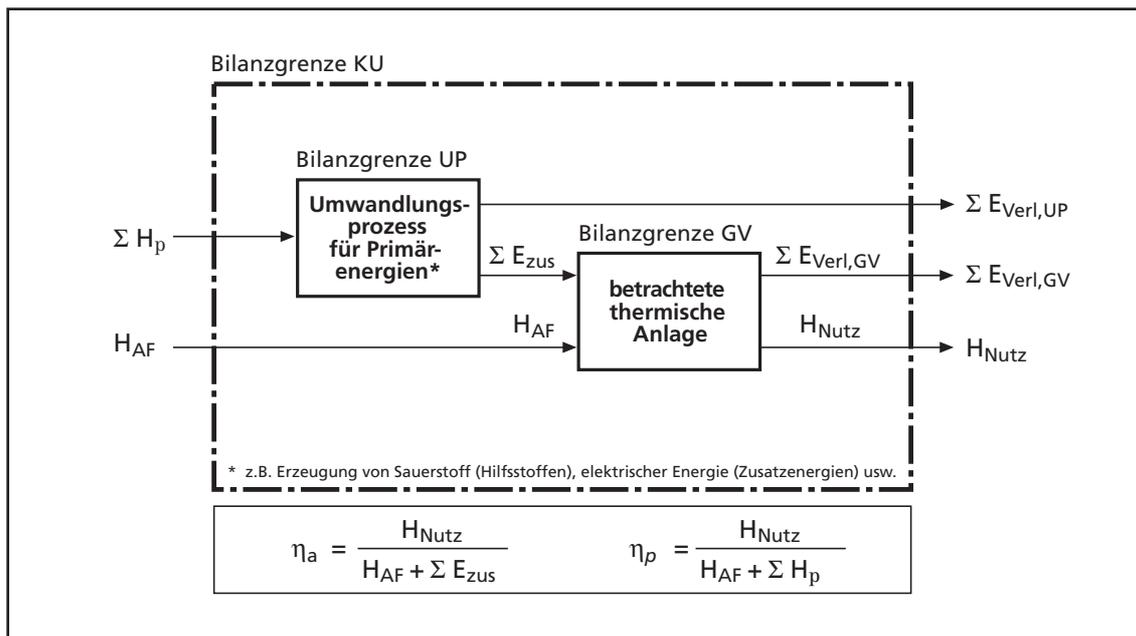


Bild 23: Vereinfachte Energiebilanz zur Bildung des Anlagenwirkungsgrades  $\eta_a$  und des Primärwirkungsgrades  $\eta_p$

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, 2001

werden können (Bilanzgrenze *kumulierte Darstellung* KU in Bild 23). Dies erscheint selbstverständlich, kann aber im Einzelfall sehr schwierig sein, wenn z.B. bei biologischen Abfallbehandlungsanlagen ohne Einhausung die Abluft/Abgase erfasst werden sollen. Nur bei geschlossenen Bilanzen kann etwas über die insgesamt umgesetzte Energie und den erzeugten Nutzen sowie in Relation dazu über die erzeugte  $\text{CO}_2$ -Menge gesagt werden. Wird der Nutzen  $H_{\text{Nutz}}$  auf die Summe aller zugeführten Energien einschließlich der erforderlichen Primärenergien ( $H_{\text{AF}}$  und  $\sum H_p$ ) bezogen (Bilanzgrenze KU in Bild 23), erhält man den so genannten *Primärwirkungsgrad*  $\eta_p$ .

- **Nettoprimärwirkungsgrad  $\eta_n$ :**

Der zur Behandlung erforderliche Primärenergieaufwand  $\sum H_p$  könnte als Ressource geschont werden, wenn es den zu behandelnden Abfall nicht gäbe. Folglich kann ein *Abfallnutzen*  $H_{\text{netto}}$  gebildet werden, indem von der Nutzenergie  $H_{\text{Nutz}}$  die benötigten Primärenergien  $\sum H_p$  abgezogen werden. Es würde also die Primärressource dann durch *eigene erzeugte* Nutzenergie ersetzt oder substituiert oder im Prozess gedanklich rückgeführt<sup>3)</sup>, wie in Bild 24

<sup>3)</sup> Es ist zu erwähnen, dass die Substitution von einer Energieart (z.B. Erdgasenthalpie als Primärressource) durch eine andere (z.B. erzeugte Dampfenthalpie) in der Regel nicht im gleichen Verhältnis (1:1) erfolgen kann, d.h. dass in der Regel die zu substituierende Energiemenge (z.B. an Erdgas gebunden) nicht durch eine gleich hohe, sondern durch eine höhere Ersatzenergiemenge (z.B. an Dampf gebunden) zu ersetzen ist. Dieser Sachverhalt wird durch das so genannte Energieaustauschverhältnis EA als Verhältnis von Substitutionsenergie zu der zu substituierenden Energie ausgedrückt. Gewöhnlich ist  $EA > 1$  und hängt von vielen Faktoren ab. Der Übersichtlichkeit wegen wird hier  $EA = 1$  gesetzt, um das Prinzip der Substitution oder der Energierückführung so einfach, wie in Bild 24 dargestellt, zu veranschaulichen. Was die Ermittlung von EA betrifft sei auf [6, 7] verwiesen.

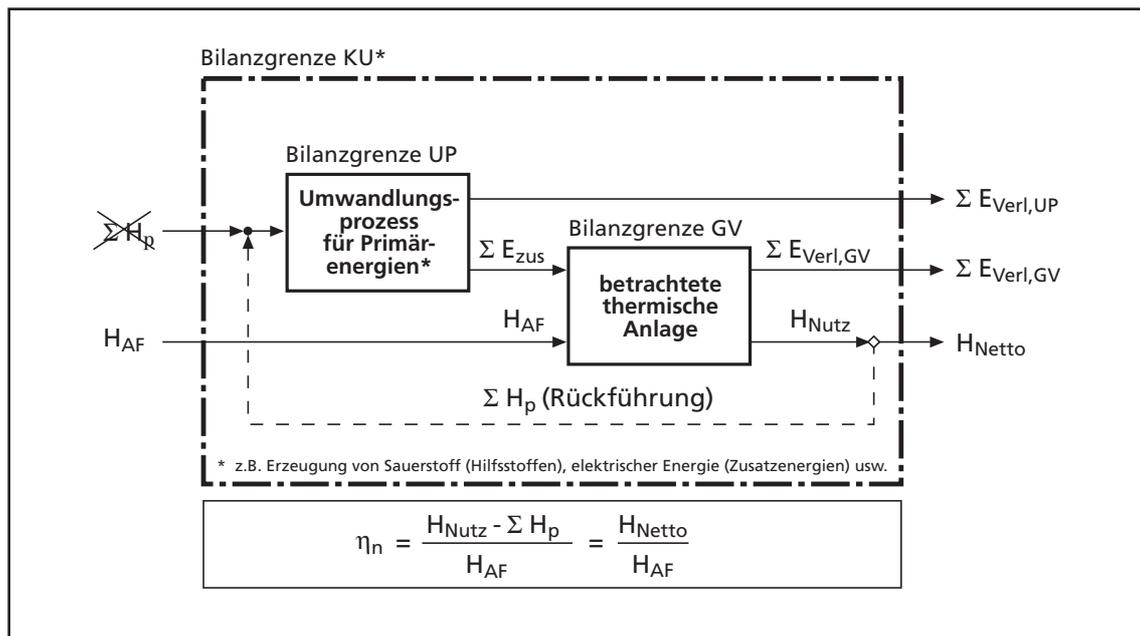


Bild 24: Vereinfachte Energiebilanz zur Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades  $\eta_n$

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, 2001

gestrichelt dargestellt. Es verbleibt damit als Aufwand nur noch die zugeführte Abfallenergie  $H_{\text{AF}}$  und als Nutzen die so genannte Nettoenergie  $H_{\text{Netto}}$ , d.h. der Nutzen **allein** durch den Abfall<sup>4)</sup>. Auf diese Weise erhält man den so genannten Nettoprimärwirkungsgrad  $\eta_n$  (Bild 24).

In Bild 25 wird deutlich, dass der Anlagen- und Primärwirkungsgrad  $\eta_{t,a}$  und  $\eta_{t,p}$  – hier Index  $t$  zusätzlich für *thermische Nutzenergie* – erwartungsgemäß durch zusätzliche Primärenergie steigen. Vor dem Hintergrund des Zweckes einer Abfallbehandlung ist dies jedoch nicht das Ziel. Es könnte der Anreiz bestehen,  $\eta_a$  und  $\eta_p$  durch Zusatzenergie zu steigern. Hier wird der Sinn der Einführung eines Nettoprimärwirkungsgrades deutlich, der bei Einsatz von Primärenergie im Gegensatz zum Anlagen- und Primärwirkungsgrad (Bild 25) sinkt. Ein möglichst großer Nettoprimärwirkungsgrad zeigt damit auch eine entsprechende Schonung von Primärenergieressourcen an. Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion um die Schaffung so genannter charakteristischer Energiekennzahlen für thermische Abfallbehandlungsanlagen wäre der Nettoprimärwirkungsgrad neben anderen eine wichtige Kennzahl.

<sup>4)</sup> Das Prinzip der Energierückführung ist bei gleichen Energiearten üblich; beispielsweise wird bei einem Kraftwerk selbstverständlich der benötigte elektrische Eigenstrom von dem erzeugten abgezogen, um den Nettonutzen zu erhalten. Bei unterschiedlichen Energiearten (wie im Beispiel von Fußnote 3: Dampfenthalpie substituiert Erdgasenergie) geschieht das dagegen sehr selten. Wird keine Energierückführung durchgeführt, kann man den Nutzen nur auf den *Energiemix* der zugeführten Energien beziehen. Einen Nutzen bezogen auf eine bestimmte Energie (z.B. Abfallenthalpie  $H_{\text{AF}}$ ) anzugeben ist dann nicht möglich. Daher ist die Bildung eines Nettoprimärwirkungsgrades hier nötig.

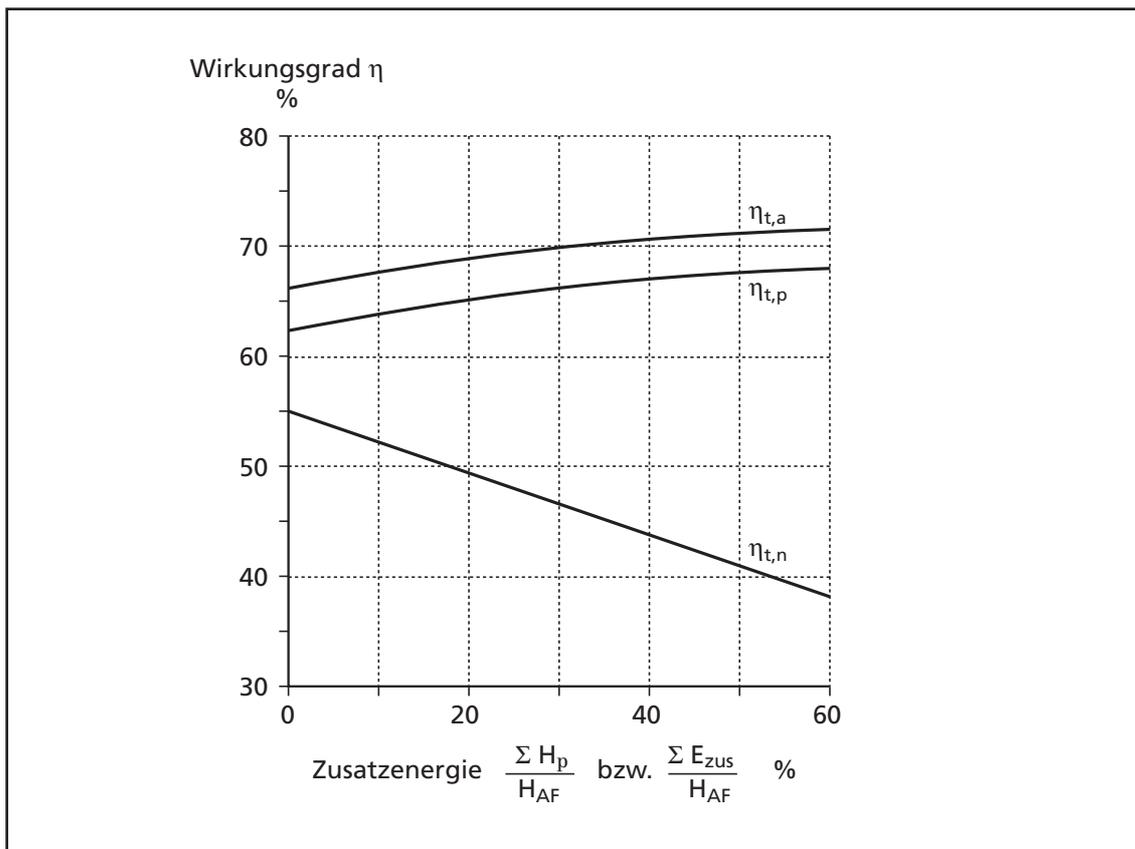


Bild 25: Beispiel für die Abhängigkeit des thermischen Anlagen- ( $\eta_{t,a}$ ), Primär- ( $\eta_{t,p}$ ) und Nettoprimärwirkungsgrades ( $\eta_{t,n}$ ) von zusätzlich zur Abfallenergie  $H_{AF}$  erforderlichen Energien  $\Sigma H_p$  bzw.  $\Sigma E_{zus}$

Die Bilder 26, 27 und 28 stellen eine bereits etwas ausführlichere Darstellung zur Bildung der Wirkungsgrade  $\eta_a$ ,  $\eta_p$  und  $\eta_n$  an realen Anlagen dar. Hier ist ausschließlich elektrische Nutzung (Index e) vorgesehen; zur Verdeutlichung ist an das Symbol für den Wirkungsgrad jeweils noch das Symbol für die betrachtete Bilanzgrenze als Index gehängt. Zu detaillierteren Darstellungen sei auf [48] verwiesen. Um die möglichen großen Unterschiede der verschiedenen Wirkungsgrade zu verdeutlichen, ist das Beispiel für eine Müllverbrennung in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Beispiel für die Bildung verschiedener Wirkungsgrade an einer Müllverbrennungsanlage

Bilanzraum	Einheit	Symbol	Wert
Anlagenwirkungsgrad, thermisches HV	%	$\eta_{t,a}$ (HV)	81,0
Anlagenwirkungsgrad, thermisches GV	%	$\eta_{t,a}$ (GV)	74,1
Primärwirkungsgrad, thermisches GV	%	$\eta_{t,p}$	70,7
Nettoprimärwirkungsgrad, thermisches GV	%	$\eta_{t,n}$	67,7
Anlagenwirkungsgrad, elektrisches GV	%	$\eta_{e,a}$	22,2
Primärwirkungsgrad, elektrisches GV	%	$\eta_{e,p}$	21,2
Nettoprimärwirkungsgrad, elektrisches GV	%	$\eta_{e,n}$	20,3

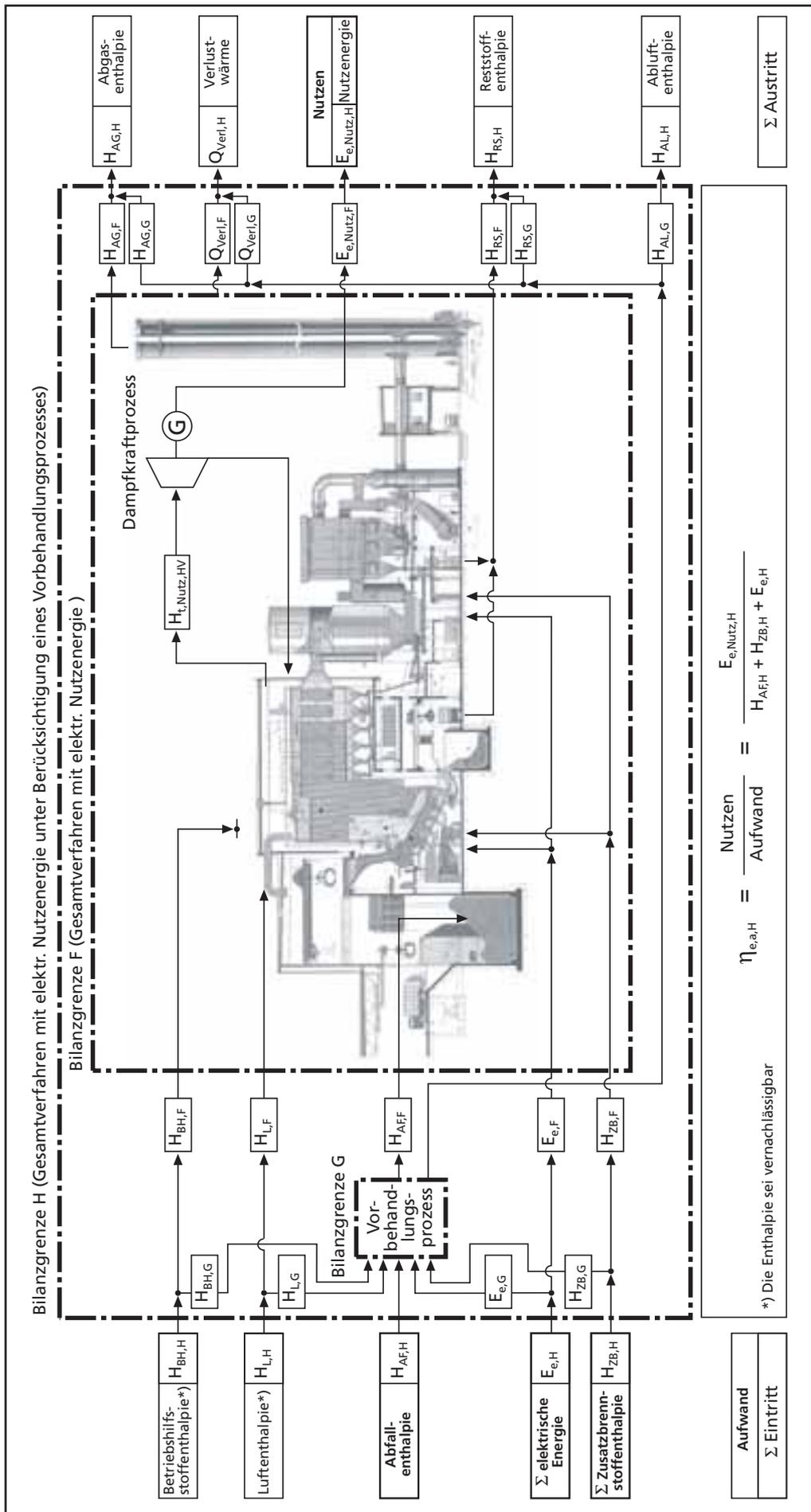


Bild 26: Elektrischer Anlagenwirkungsgrad  $\eta_{e,a}$  am Beispiel einer vereinfachten Energiebilanz einer Verfahrenskette aus Vorbehandlungsprozess und klassischem Müllkraftwerk

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, 2001

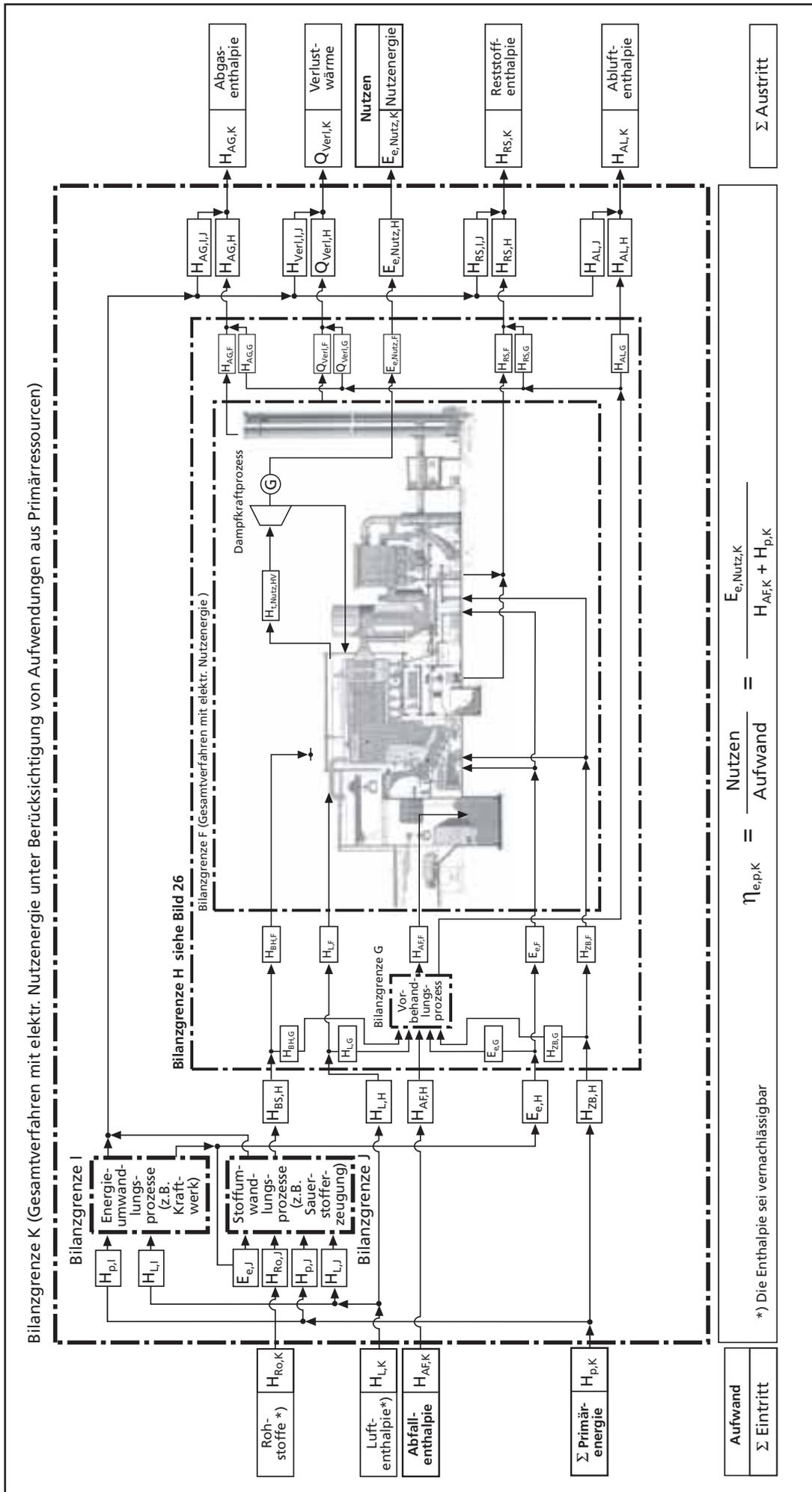


Bild 27: Elektrischer Primärwirkungsgrad  $\eta_{e,p}$  am Beispiel einer vereinfachten Energiebilanz einer Verfahrenskette aus Vorbehandlungsprozess und klassischem Müllkraftwerk

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, 2001

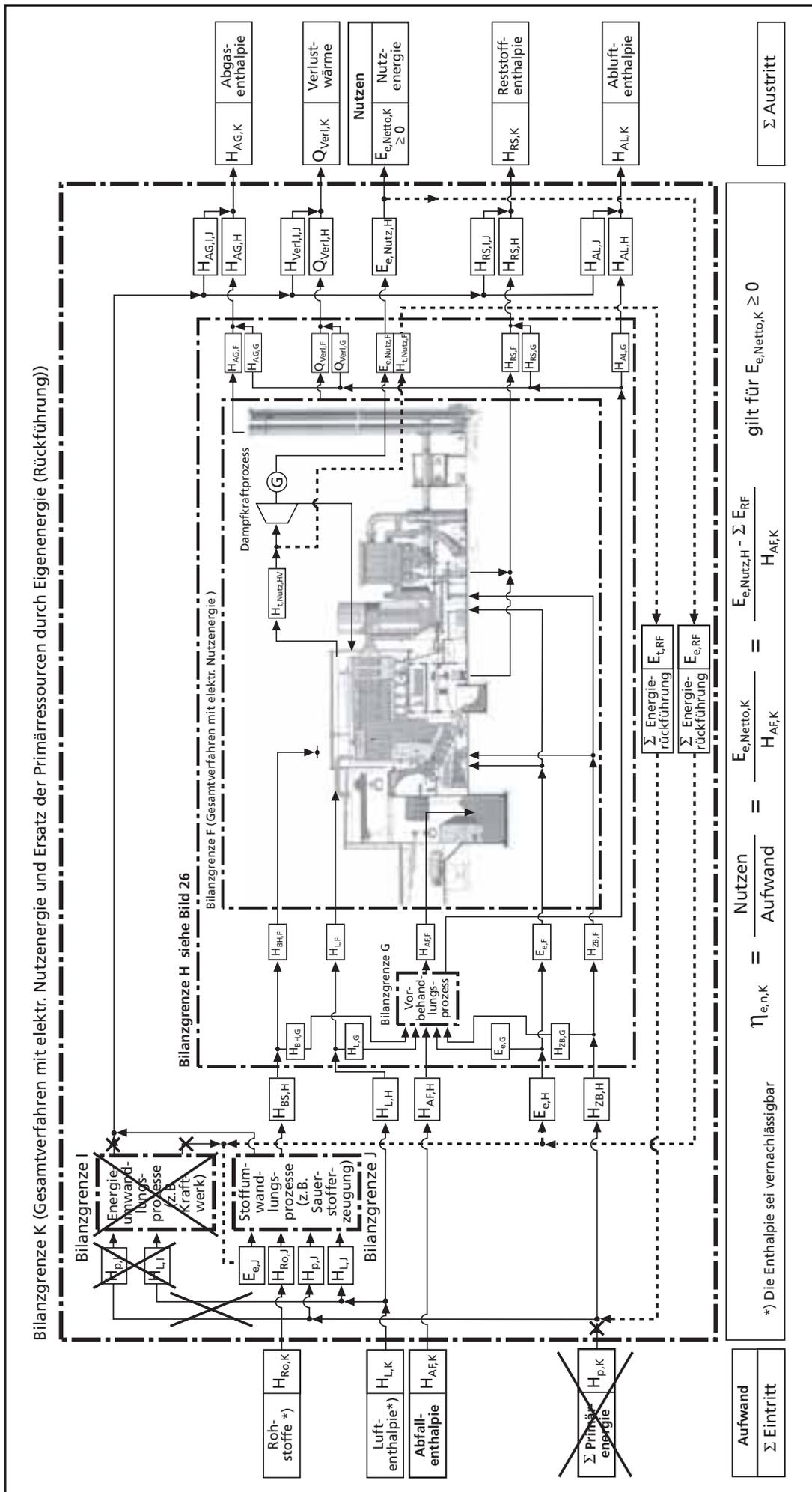


Bild 28: Elektrischer Nettoprimärwirkungsgrad  $\eta_{e,n}$  am Beispiel einer vereinfachten Energiebilanz einer Verfahrenskette aus Vorbehandlungsprozess und klassischem Müllkraftwerk

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, 2001

Bild 29 zeigt den elektrischen Nettoprimärwirkungsgrad insbesondere in Abhängigkeit vom Heizwert bei unterschiedlichen thermischen Abfallbehandlungsverfahren [48]. Die Kurven 1 bis 3 stellen ein klassisches Müllkraftwerk – Verbrennung auf dem Rost – und Kurven 4 und 5 ein weiterentwickeltes Müllkraftwerk dar – Vergasung auf dem Rost mit unmittelbar sich anschließender Verbrennung. Kurve 6 stellt ein Vergasungsverfahren dar, bei dem das erzeugte Gas zunächst abgekühlt (gequencht) und dann einer motorischen Verbrennung zugeführt wird (die geringeren Wirkungsgrade sind auf das Quenchen zurückzuführen). Das vorgenannte Beispiel der Tabelle 5 ist in Bild 29 bei dem Abszissenwert *Abfallheizwert 8 MJ/kg* und dem zugehörigen Punkt auf der Kurve 4 zu finden (vgl.  $\eta_{e,n} = 20,3 \%$ ).

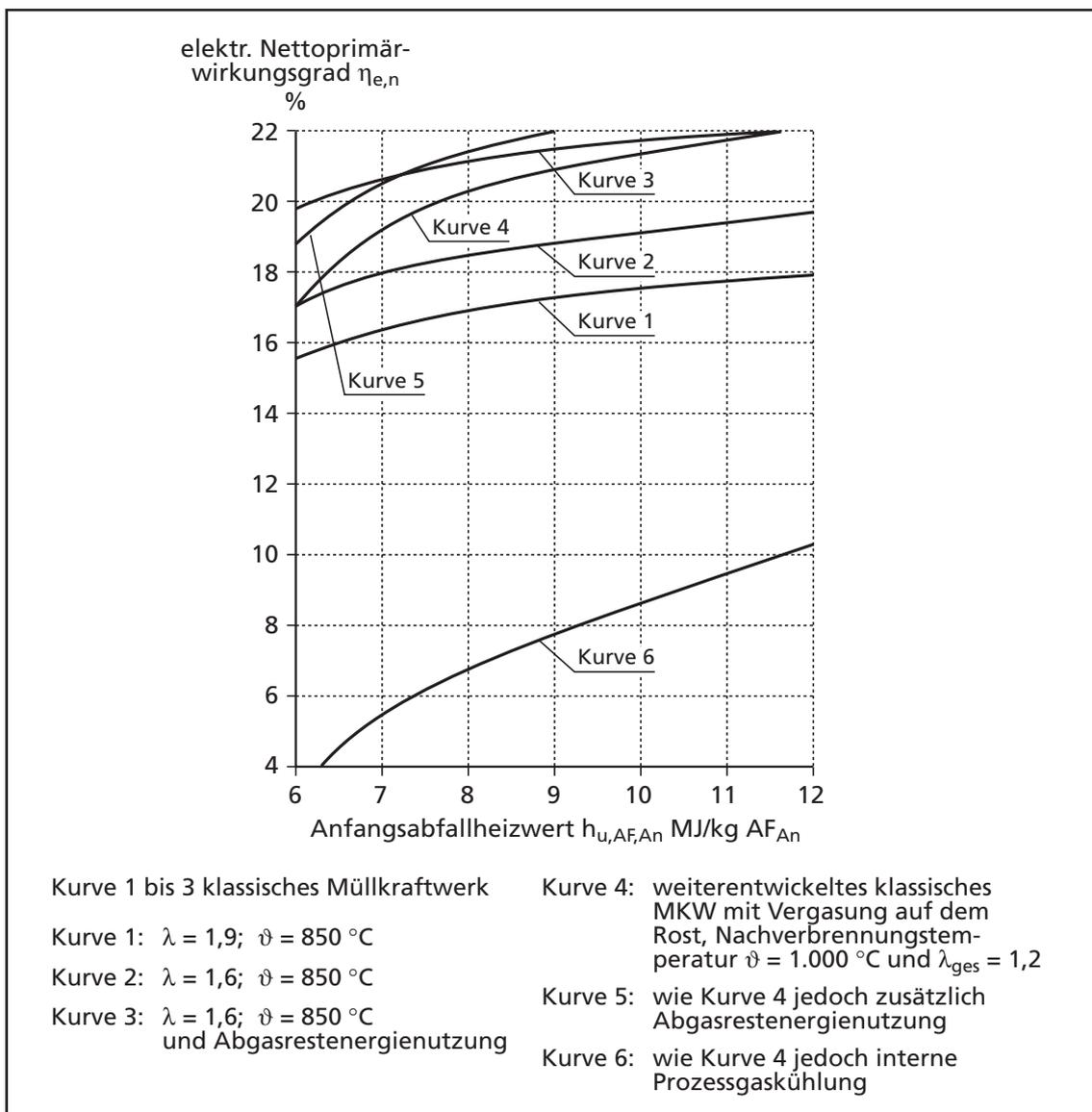


Bild 29: Elektrischer Nettoprimärwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Abfallheizwert für verschiedene thermische Abfallbehandlungsverfahren

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, 2001

## Kap. 7.

# Zusammenfassung

Zusammenfassend kann für das thermische Gesamtverfahren von Hausmüllbehandlungsanlagen, die mit Rostsystemen ausgerüstet sind, folgendes festgestellt werden:

- Thermische Abfallbehandlungsanlagen mit Rostsystemen entsprechen dem Stand der Technik. Auf ihnen lassen sich ganz unterschiedliche Verfahren von der Verbrennung über die Vergasung bis zur Pyrolyse durchführen. Die Prozessführung wird nach modernen Gesichtspunkten der Verfahrenstechnik gestaltet und hat noch erhebliche Entwicklungs- und Optimierungspotentiale in der Zukunft.
- Es handelt sich um langjährig erprobte, sichere und ausgereifte Technik mit großer Betriebserfahrung an etwa 60 Anlagen in Deutschland.
- Es gibt keine Einschränkungen der Flexibilität hinsichtlich des Durchsatzes, der Abfallzusammensetzung und des Heizwertes für typischen Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfall.
- Die Anlagen arbeiten mit einer Verfügbarkeit von über 7.500 Stunden im Jahr und sind im Betrieb sehr flexibel.
- In den letzten Jahren wurden erhebliche Entwicklungsschritte – z.T. auch durch den Druck von so genannten neuen Verfahren ausgelöst – vollzogen.
- Von Ablösung klassischer Verfahren durch so genannte neue Verfahren kann derzeit nicht gesprochen werden. Es ist jedoch sinnvoll, kein Verfahren auszuschließen, da es wichtig ist, die Leistungsfähigkeit durch künftig zu erbringende Betriebsergebnisse an industriell ausgeführten Anlagen jeweils nachzuweisen.

## Kap. 8.

# Literatur

- [1] Albrecht, J.; Loeffler, J.; Reimert, R.: Restabfallvergasung mit integrierter Ascheverschlackung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994 in Würzburg, Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1994
- [2] Arend, W.: Untersuchungen über das aerodynamische Verhalten nichtbackender Kohle auf Wanderrosten. Dissertation TH Hannover, 1933
- [3] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozessführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung. CUTEC-Schriftenreihe Nr. 21, 1995

- [4] Beckmann, M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5
- [5] Beckmann, M.; Scholz, R.: Simplified mathematical model of the combustion in stoker 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
- [6] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung – Teil 1. In: ZKG International 52 (1999) Nr. 6
- [7] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung – Teil 2. In: ZKG International 52 (1999), Nr. 8
- [8] Behrendt, T.: Thermodynamische Modellierung des Betriebsverhaltens von Hausmüllverbrennungsanlagen am Beispiel TAMARA. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 25, Nr.99, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1992
- [9] Berwein, H.-J.: Siemens Schwel-Brenn-Verfahren – Thermische Reaktionsabläufe. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95. Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1995
- [10] Born, M.; Seifert, P.: Thermodynamik der rauchgasseitigen Chlorkorrosion bei der Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen. Vortrag *Fuzzy Meeting*, 27./28.04.2000, TU Bergakademie Freiberg
- [11] Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI Berichte 1192, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995
- [12] Fenimore, C. P.: Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. 13th Int. Symp. on Combustion, Comb. Inst. Pittsburgh, 1971
- [13] Gehrman, H.-J.; Warnecke, R.; Beckmann, M.: Verweilzeitverhalten von Abfällen in Drehrohrsystemen – Experimentelle Untersuchungen und mathematische Modellierung. VDI Berichte 1629
- [14] Göhler, P.; Schingnitz, M.: Stoff- und Wärmebilanzen bei der Abfallverwertung nach dem NOELL-Konversionsverfahren. In: Energie und Umwelt '95 mit Energieverbrauchs-minderung bei Gebäuden, TU Bergakademie Freiberg, 22.-23. März 1995
- [15] Görner, K.; Klasen, T.: Betriebsoptimierung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen durch CFD-Simulation – Modelle und Anwendungsbeispiele. 13. DVV-Kolloquium, 23./24.09.2002, Weimar
- [16] Gruber, T.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: Modell zur Verbrennung auf dem Rost. In: AbfallwirtschaftsJournal 5 (1993), Nr. 10
- [17] Höller, H.K.: PlasmoX – Das Plasma-Ultrahochtemperaturverfahren. Symposium Sonderabfalltechnik '93, Darmstadt, 31. März 1993
- [18] 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, Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1994
- [19] 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, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995
- [20] Klöppner, G.: Zur Kinetik der NO-Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991

- [21] Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Bericht 1192, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995
- [22] Kolb, T.; Leuckel, W.: NO<sub>x</sub>-Minderung durch 3-stufige Verbrennung - Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM- Seminar, Stuttgart, 1988
- [23] Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Bildung aus Brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. TECFLAM- Seminar, Heidelberg, Oktober 1990
- [24] Kremer, H.: Grundlagen der NO<sub>x</sub>-Entstehung und Minderung. In: Erdöl und Kohle - Erdgas 40 (1982)
- [25] Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI Berichte Nr. 574, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1985
- [26] Krüll, F.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Goetz, V.; Hausmann, G.: Die Auswirkung unterschiedlicher Sekundärluftverteilungen auf den Verbrennungsablauf in einer Müllrostfeuerung. VDI Berichte Nr. 1629, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001
- [27] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17. - 19. Oktober 1994, Würzburg
- [28] Leibold, H.; Hunsinger, H.; Seifert, H.; Rückert, F. U.; Schnell, U.; Hein, K. R. G.; Peters, B.; Krebs, L.: Neugestaltung des Feuerraums einer halbtechnischen Hausmüllverbrennungsanlage zur primärseitigen Schadstoffminderung. VDI Berichte Nr. 1629, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001
- [29] Leye, A.R.: Die Verbrennung auf dem Rost. Dissertation TH Berlin, 1933
- [30] Malek, C.; Scholz, R.; Jeschar, R.: Vereinfachte Modellierung der Stickstoffoxidbildung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Ausbrandes bei einer Staubfeuerung. VDI Berichte Nr. 1090, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1993
- [31] Marcard, W.: Die Verbrennung als Strömungsvorgang. In: Die Wärme, Zeitschrift für Dampfkessel und Maschinenbetrieb 60. (1937), Nr. 17 vom 24. April 1937
- [32] Martin, J.: Der Martin-Rückschubrost. Produktbeschreibung, 1933
- [33] Martin, J.; Busch, M.; Horn, J.; Rampp, F.: Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen Schadstoffreduzierung. VDI Berichte 1033, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1993
- [34] Martin, J.; Leitmeir, E.; Schetter, G.: Müllverbrennung und Umwelttechnische Realisierung nach dem System Martin. Müllverbrennung 1986, HdT Essen 21./22. Januar 1986
- [35] Nusselt, W.: Die Vergasung und Verbrennung auf einem Rost. In: Zeitschrift des VDI, Bd. 60, Nr. 6, 5. Februar 1916
- [36] Papa, G.; Lenz, B.: Ertüchtigung der Feuerungsregelung gemäß dem aktuellen Stand der Technik im MHKW Coburg. 13. DVV-Kolloquium, 23./24.09.2002, Weimar. ISBN 3-86068-176-1
- [37] Raupenstrauch, H.: Ein Beitrag zur Computersimulation reagierender Schüttschichten. Dissertation TU Graz, 1991
- [38] 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. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelt GmbH, 1991
- [39] Rosin, P.; Kayser, H.-G.; Fehling, R.: I Die Zündung fester Brennstoffe auf dem Rost. II Untersuchungen über das Zündverhalten. Berichte der Technisch-Wirtschaftlichen Sachverständigenausschüsse des Reichskohlenrates. Berlin, 1935

- [40] Rosin, P.; Rammler, E.: Die Durchzündung beim Wanderrost. *Archiv für Wärmewirtschaft*, 1932, H. 5
- [41] Ruppert, H.: Untersuchungen zum Abbrandverhalten heizwertarmer fester Abfälle in Drehrohrverbrennungsanlagen. Dissertation Universität Stuttgart, 2002
- [42] 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*. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, 1993
- [43] Schetter, G.: Simulation von Feuerräumen in Müllverbrennungsanlagen. In: *Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK)* 37 (1985), Nr. 11
- [44] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI Berichte Nr. 895, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1991
- [45] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen – Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. In: *Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK)/TÜ/Umwelt-Special* 44 (1992), Nr. 10
- [46] 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
- [47] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Thermische Verfahren zur Abfallbehandlung – Prozeßführung, Bausteine und Bewertung. VDI Berichte Nr. 1192, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995
- [48] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: *Abfallbehandlung in thermischen Verfahren*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner, 2001
- [49] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Brinker, W.: Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren – Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung. In: *Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK)* 46 (1994), Nr. 11/12
- [50] Scholz, R.; Jeschar, R.; Malek, C.; Faatz, O.: Betriebserfahrungen zur Schwefeleinbindung auf dem Rost eines Müllheizkraftwerkes. In: *Forum Städte-Hygiene*, Bd. 41, 1990
- [51] Scholz, R.; Schopf, N.: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and some Test Results of Pilot Plants. *Proceedings of The 1989 Incineration Conference*, Knoxville, USA, 1989
- [52] Scholz, R.; Schulenburg, F.; Beckmann, M.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände. VDI Berichte Nr. 1033, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1993
- [53] Schopf, N.: Berechnungen und Versuche zur Heißeinschwefelung mit Kalkadditiven unter Berücksichtigung der Verbrennungsführung. *Fortschrittsberichte VDI*, Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 78, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1990
- [54] Schreiner, R.; Busch, M.: Ergänzung der Feuerungsregelung von MVAs mit Signalen aus einer flächenhaften Brennbett-Temperaturerfassung mittels Infrarotkamera. VDI Berichte 1629. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2001
- [55] Schwieger, B.; Knopf, U.: Herstellung und Eigenschaften von Schlacken aus Restmüllfraktionen nach einem Schachtofenverfahren. In: *Müll und Abfall* (2002), Nr. 3, S. 116-128
- [56] Soete, G. de: Physikalisch-chemische Mechanismen der Stickstoffoxidbildung in industriellen Flammen. In: *Gas-Wärme-International* 30 (1981), Nr. 15
- [57] Stahlberg, R.; Feuerrigel, U.: *Thermoselect – Energie und Rohstoffgewinnung*. In: *Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95*. Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1995

- [58] Strasdat, Ch.: Dezentrale Heiz(kraft)werke für den Einsatz von aufbereiteten Abfällen und Ersatzbrennstoffen durch Vergasung auf Rostsystemen – Erste Erfahrungen aus dem Betrieb der 15 MW<sub>th</sub>-Anlage Minden. 13. DVV-Kolloquium, 23./24.09.2002, Weimar, ISBN 3-86068-176-1
- [59] Tanner, E.: Der Temperaturverlauf im Brennstoffbett und im Rost bei der Verbrennung von Steinkohle. Dissertation TU Darmstadt, 1933
- [60] Traustel, S.: Verbrennung, Vergasung und Verschlackung. Dissertation TH Berlin, 1939
- [61] Vehlow, J.; Pfrang-Stotz, G.; Schneider, J.: Untersuchungen über verbesserte Umweltverträglichkeit von Müllverbrennungsschlacken. GVC-Abfallbehandlung; Vortrag 8./9. Nov. 1993, Eltville
- [62] Warnecke, R.; Kautz, K.; Spiegel, M.: Abfall- und anlagenbedingte Änderungen von Belägen und die Wirkung auf Korrosion in MVA-Kesseln. VDI Berichte 1708, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2002
- [63] Werkmeister, H.: Versuche über den Verbrennungsverlauf bei Steinkohlen mittlerer Korngrößen. Dissertation TH Hannover, 1932
- [64] N. N.: Emissionsminderung bei Müllverbrennungsanlagen. Endbericht eines Verbundvorhabens zwischen Firma MARTIN GmbH, München, NOELL GmbH, Würzburg, L. & C. Steinmüller GmbH, Gummersbach, Projektträger UBA-Berlin, 1994

