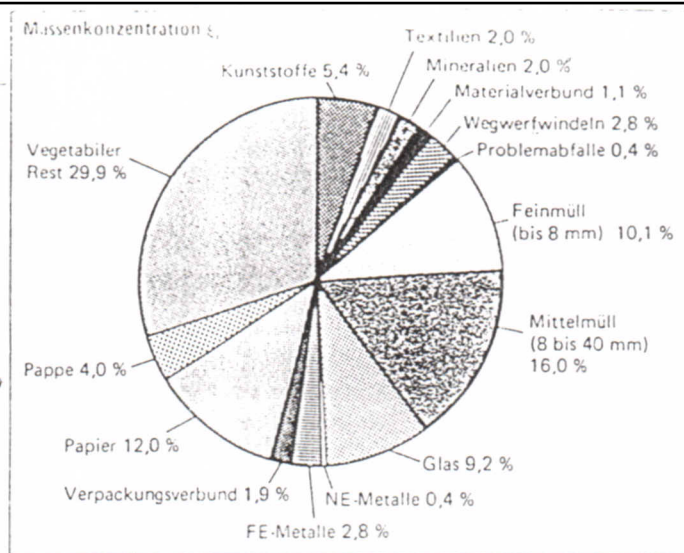


Bild 1: Massenkonzentrationen ξ_i der einzelnen Fraktionen im Hausmüll [2].



Durch Abfallvermeidungs- und Abfallverwertungsstrategien werden die absoluten Abfallmengen künftig vermutlich zurückgehen. Der danach verbleibende Müll (Restmüll) dürfte sich jedoch laufend mit der Zeit hinsichtlich seiner Zusammensetzung und Eigenschaften ändern. Diesen Sachverhalt mit berücksichtigend werden in diesem Beitrag, aufbauend auf bereits bekannten, grundsätzlichen Aspekten der Verbrennungstechnik, die Verfahrenstechnik der Rostfeuerung beschrieben und weitere Möglichkeiten der Prozeßführung in Hinblick auf Primärmaßnahmen aufgezeigt.

Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen^{*)}

R. Scholz, M. Beckmann und F. Schulenburg, Clausthal-Zellerfeld

Einleitung

Erste Erfahrungen mit Rostfeuerungen zur „Beseitigung von Kehrlicht“ reichen bis in das vorige Jahrhundert zurück; so wird z. B. in [1] über Anlagen in europäischen Ländern berichtet. Durch wachsende Erkenntnisse insbesondere auf den Gebieten der Verbrennungstechnik, Reaktionskinetik und auch durch die sich ständig erweiternden Möglichkeiten der Analytik erfährt diese Technik eine stetige Weiterentwicklung. Bei Verbrennungsverfahren einschließlich der Abgasreinigungsverfahren sind heute teilweise sehr strenge Auflagen zu beachten.

Die Verbrennung stellt innerhalb eines thermischen Entsorgungsverfahrens nur einen Teilprozeß dar, weitere Teilprozesse sind z. B. Verfahren der Vorbehandlung, Homogenisierung, Schadstoffentfrachtung des Restmülls sowie Schlackennachbehandlung, Rauchgasreinigung, Abwasserbehandlung u. a.

Ein Verbrennungskonzept muß ein möglichst niedriges Niveau an Schadstoffen (CO , C_xH_y , NO_x , Dioxine, Furarene usw.) gewährleisten, d. h. erst nach der Prozeßoptimierung unter den Gesichtspunkten der Schadstoffminimierung ist gegebenenfalls die energetische Nutzung der heißen Rauchgase

anzustreben. An dieser Stelle sei besonders auf die Stellung der Verbrennung innerhalb eines Abfallkonzeptes hingewiesen. Hierin stehen an erster Stelle die Forderungen

- Vermeiden,
- Vermindern von Abfällen

Die danach verbleibenden Stoffe sollen möglichst stofflich verwertet werden. Dies betrifft allgemein Recyclingverfahren, die unter angemessenem Aufwand (z. B. an Energie) einen Wiedereinsatz der Abfallstoffe in einem Produktionsprozeß zum Ziel haben. Restmüll kann somit nicht genau definiert werden, sondern ist das Ergebnis des jeweiligen Standes der Strategien Vermeiden, Vermindern, Verwerten.

An ein Entsorgungsverfahren für Restabfallstoffe sind u. a. folgende Anforderungen zu stellen:

- Inertisierung,
- Entsorgung der z. T. chemisch kompliziert zusammengesetzten Stoffe (chemische Verbindungen),
- Umwandlung in einfache überschaubare Stoffe, die entweder direkt in die Umwelt entlassen werden können oder mit bekannten Verfahren weiterbehandelt werden müssen,
- kontrollierbare Prozeßführung,
- nachvollziehbare Bilanzierung aller beteiligten Stoff- und Energieströme,
- nach Möglichkeit Rückführung der Entsorgungsprodukte in den Produktionskreislauf,

- Volumenreduzierung,
- gegebenenfalls energetische Nutzung

Bei der Beurteilung unterschiedlicher Entsorgungsverfahren für die o. g. Anforderungen sind jeweils gleiche Maßstäbe anzulegen bzw. die jeweiligen absoluten Emissionsströme bewertend gegenüberzustellen. Während man bei der Verbrennung ständig Schritte unternimmt, die Emissionen zu senken, ist man bei anderen Verfahren, wie z. B. Rotte oder dgl., zunächst noch mit der Aufgabe befaßt, die Emissionen überhaupt grob zu erfassen bzw. zu bilanzieren.

Charakterisierung von Müll am Beispiel Hausmüll

Restabfallstoffe aus dem Hausmüllbereich, die thermisch entsorgt werden sollen, sind verglichen mit fossilen Brennstoffen stark heterogen, sowohl bezüglich ihrer stofflichen Zusammensetzung als auch ihrer Konsistenz, Form und Größe, und werden somit auch als „schwierige“ Brennstoffe bezeichnet.

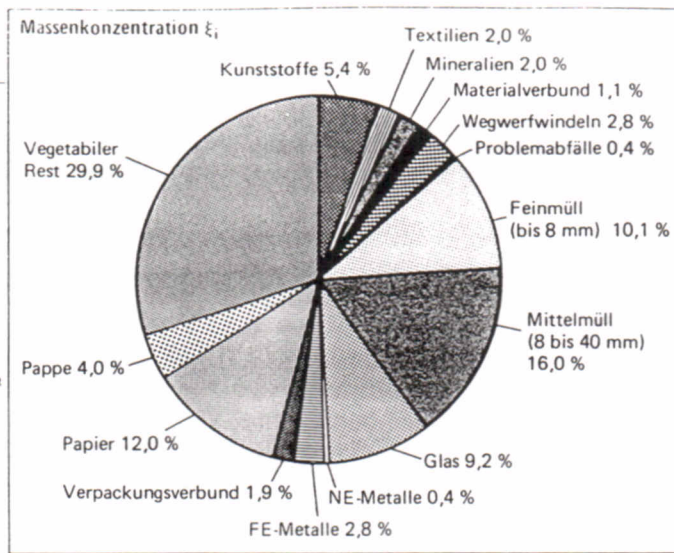
Zusammensetzung und Verbrennungstechnische Daten

Die stoffliche Zusammensetzung von Hausmüll ist regional und saisonbedingt verschieden. Eine Erhebung in den alten Bundesländern ergibt die durchschnittliche Analyse nach Bild 1

Es wird davon ausgegangen, daß sich durch die verstärkte Einführung der

^{*)} Vgl. auch Tagung „Prozeßführung und Verfahrenstechnik der Müllverbrennung“, 18./19. Juni 1991 in Essen, VDI-Bericht Nr. 895, S. 69–138

Bild 1: Massenkonzentrationen ξ_i der einzelnen Fraktionen im Hausmüll [2].



Durch Abfallvermeidungs- und Abfallverwertungsstrategien werden die absoluten Abfallmengen künftig vermutlich zurückgehen. Der danach verbleibende Müll (Restmüll) dürfte sich jedoch laufend mit der Zeit hinsichtlich seiner Zusammensetzung und Eigenschaften ändern. Diesen Sachverhalt mit berücksichtigend werden in diesem Beitrag, aufbauend auf bereits bekannten, grundsätzlichen Aspekten der Verbrennungstechnik, die Verfahrenstechnik der Rostfeuerung beschrieben und weitere Möglichkeiten der Prozeßführung in Hinblick auf Primärmaßnahmen aufgezeigt.

Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen*)

R. Scholz, M. Beckmann und F. Schulenburg, Clausthal-Zellerfeld

Einleitung

Erste Erfahrungen mit Rostfeuerungen zur „Beseitigung von Kehrriech“ reichen bis in das vorige Jahrhundert zurück; so wird z. B. in [1] über Anlagen in europäischen Ländern berichtet. Durch wachsende Erkenntnisse insbesondere auf den Gebieten der Verbrennungstechnik, Reaktionskinetik und auch durch die sich ständig erweiternden Möglichkeiten der Analytik erfährt diese Technik eine stetige Weiterentwicklung. Bei Verbrennungsverfahren einschließlich der Abgasreinigungsverfahren sind heute teilweise sehr strenge Auflagen zu beachten.

Die Verbrennung stellt innerhalb eines thermischen Entsorgungsverfahrens nur einen Teilprozeß dar, weitere Teilprozesse sind z. B. Verfahren der Vorbehandlung, Homogenisierung, Schadstoffentfrachtung des Restmülls sowie Schlackennachbehandlung, Rauchgasreinigung, Abwasserbehandlung u. a.

Ein Verbrennungskonzept muß ein möglichst niedriges Niveau an Schadstoffen (CO , C_xH_y , NO_x , Dioxine, Furare usw.) gewährleisten, d. h. erst nach der Prozeßoptimierung unter den Gesichtspunkten der Schadstoffminimierung ist gegebenenfalls die energetische Nutzung der heißen Rauchgase

anzustreben. An dieser Stelle sei besonders auf die Stellung der Verbrennung innerhalb eines Abfallkonzeptes hingewiesen. Hierin stehen an erster Stelle die Forderungen

- Vermeiden,
- Vermindern von Abfällen.

Die danach verbleibenden Stoffe sollen möglichst stofflich verwertet werden. Dies betrifft allgemein Recyclingverfahren, die unter angemessenem Aufwand (z. B. an Energie) einen Wiedereinsatz der Abfallstoffe in einem Produktionsprozeß zum Ziel haben. Restmüll kann somit nicht genau definiert werden, sondern ist das Ergebnis des jeweiligen Standes der Strategien Vermeiden, Vermindern, Verwerten.

An ein Entsorgungsverfahren für Restabfallstoffe sind u. a. folgende Anforderungen zu stellen:

- Inertisierung,
- Entsorgung der z. T. chemisch kompliziert zusammengesetzten Stoffe (chemische Verbindungen),
- Umwandlung in einfache überschaubare Stoffe, die entweder direkt in die Umwelt entlassen werden können oder mit bekannten Verfahren weiterbehandelt werden müssen,
- kontrollierbare Prozeßführung,
- nachvollziehbare Bilanzierung aller beteiligten Stoff- und Energieströme,
- nach Möglichkeit Rückführung der Entsorgungsprodukte in den Produktionskreislauf,

- Volumenreduzierung,
- gegebenenfalls energetische Nutzung.

Bei der Beurteilung unterschiedlicher Entsorgungsverfahren für die o. g. Anforderungen sind jeweils gleiche Maßstäbe anzulegen bzw. die jeweiligen absoluten Emissionsströme bewertend gegenüberzustellen. Während man bei der Verbrennung ständig Schritte unternimmt, die Emissionen zu senken, ist man bei anderen Verfahren, wie z. B. Rotte oder dgl., zunächst noch mit der Aufgabe befaßt, die Emissionen überhaupt grob zu erfassen bzw. zu bilanzieren.

Charakterisierung von Müll am Beispiel Hausmüll

Restabfallstoffe aus dem Hausmüllbereich, die thermisch entsorgt werden sollen, sind verglichen mit fossilen Brennstoffen stark heterogen, sowohl bezüglich ihrer stofflichen Zusammensetzung als auch ihrer Konsistenz, Form und Größe, und werden somit auch als „schwierige“ Brennstoffe bezeichnet.

Zusammensetzung und Verbrennungstechnische Daten

Die stoffliche Zusammensetzung von Hausmüll ist regional und saisonbedingt verschieden. Eine Erhebung in den alten Bundesländern ergibt die durchschnittliche Analyse nach **Bild 1**.

Es wird davon ausgegangen, daß sich durch die verstärkte Einführung der

*) Vgl. auch Tagung „Prozeßführung und Verfahrenstechnik der Müllverbrennung“, 18./19. Juni 1991 in Essen; VDI-Bericht Nr. 895; S. 69–138.

getrennten Wertstoffsammlung Recyclingquoten von 20 bis 60 Ma.-% erreichen lassen [2; 3]. Insbesondere betrifft dies die Fraktionen Glas ξ_G , Pappe/Papier ξ_P und Kunststoffe ξ_K . Hinsichtlich des Heizwertes bei verschiedenen Hausmüllzusammensetzungen ist folgendes anzumerken:

- Für die in Bild 1 angegebene Zusammensetzung (1) von Hausmüll ergibt sich ein mittlerer Heizwert von $h_1 = 8,5 \text{ MJ/kg}$.

- Ausgehend von den in [2] angegebenen Recyclingprognosen wirkt sich eine Reduzierung der Massenkonzentrationen ξ_P und ξ_G (Zusammensetzung (2)) nur gering auf eine Veränderung des mittleren Heizwertes aus ($h_2 = 8,4 \text{ MJ/kg}$; vgl. Übergang von Zusammensetzung (1) auf Zusammensetzung (2))

in Bild 2). Weit größeren Einfluß auf den mittleren Heizwert übt die Kunststofffraktion aus. Erfolgt neben der Reduzierung der Massenkonzentrationen ξ_P und ξ_G (Zusammensetzung (2)) eine weitere Abnahme der Massenkonzentration ξ_K , z. B. von $\xi_K = 5,8\%$ auf $\xi_K = 3\%$ (Zusammensetzung (3)), so ergibt sich ein Heizwert von ca. $h_3 = 7,6 \text{ MJ/kg}$.

- Wird weiterhin ein Schwanken des Wassergehaltes ξ_W des Hausmülls berücksichtigt, so wird ausgehend von der Zusammensetzung (1) (Bild 1) für

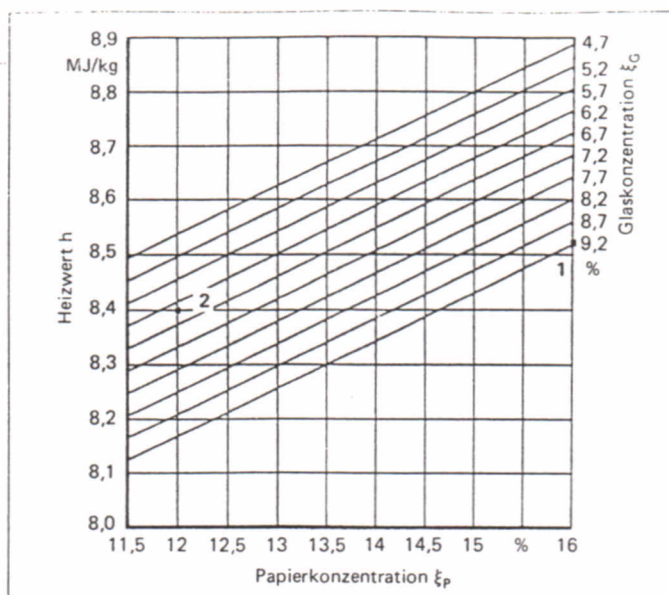


Bild 2: Abhängigkeit des Heizwertes h von den Glas- und Papierkonzentrationen ξ_G, ξ_P im Hausmüll, ausgehend von der Zusammensetzung (1), Reduzierung der Massenkonzentrationen – Pappe/Papier von $\xi_P = 16,0\%$ auf $\xi_P = 12,0\%$ und Glas von $\xi_G = 9,2\%$ auf $\xi_G = 6,5\%$ Zusammensetzung (2).

eine Schwankungsbreite des Wassergehaltes ξ_W von z. B. $\xi_{W,4} = 55\%$ bis $\xi_{W,5} = 20\%$ eine Heizwertschwankung von $h_4 \approx 5 \text{ MJ/kg}$ bis $h_5 \approx 10 \text{ MJ/kg}$ ermittelt (Zusammensetzung (4) und (5)).

Mit diesen fünf verschiedenen Hausmüllzusammensetzungen und den resultierenden Heizwerten ergeben sich hinsichtlich beabsichtigter, jeweils gleicher Feuerraumtemperaturen zwangsläufig unterschiedliche Luftüberschußverhältnisse (Bild 3). Aufgrund des relativ niedrigen Mindestluftbedarfs I_{min} für die Verbrennung von Hausmüll ist der Einfluß einer möglichen Luftvorwärmung (Luftvorwärmungstemperatur ϑ_V) zur Steigerung der Feuerraumtemperatur gering (s. Beispiel in Bild 3). Es ist weiter zu beachten, daß bei Einbeziehung von Wärme- oder Kühlungsverlusten (z. B. Rostkühlung) sich die Feuerraumtemperatur stark verringert (s. Beispiel in Bild 3).

Für den Verbrennungsprozeß weiterhin von Bedeutung sind:

- das Mindestabgasvolumen v_{fmin} ($v_{fmin} = 2 \text{ bis } 3 \text{ m}^3 \text{ (i. N.)}_r / \text{kg}_M$),
- das Reaktions- und Zündverhalten (z. B. $\vartheta_Z = 400 \text{ °C}$),
- die Schüttdichte ϱ_{Sch} und die Schütthöhe δ_{Sch} .
 - z. B. $\varrho_{Sch} = 150 \text{ bis } 350 \text{ kg/m}^3$ bei Wassergehalten $\xi_W = 10 \text{ bis } 50\%$.
 - Bei der geringen Schüttdichte und dem verhältnismäßig niedrigen Heizwert ergibt sich eine ebenso geringe Energieumsetzungsichte.
 - Bei dem auf die Schütthöhe bezogenen Druckverlust ist mit Größenordnungen von $\Delta p_{Sch} / \delta_{Sch} = 2 \text{ mbar/100 mm}$ zu rechnen. Je nach Grad der Müllverdichtung kann es hierbei erhebliche Abweichungen geben.

Schadstoffeintrag

Eine Erfassung aller im Hausmüll enthaltenen Schadstoffe und Spurenschadstoffe ist praktisch nicht möglich. Einzelne vorliegende Erhebungen lassen

Formelzeichen	
A	Fläche
c	Konzentration
D	Dispersionskoeffizient
d	Durchmesser
h	unterer Heizwert
L	Länge
l	Luftbedarf
m	Masse
N	Leistung
p	Druck
Pe	Péclet-Zahl
Q	Wärmeabfuhr
T	absolute Temperatur
U	Umsatz
v	Abgasvolumen
w	Geschwindigkeit
x	Wurfweite
z	Düsenzahl
α	Winkel der Rostneigung
Δ	Differenz
δ	Schütthöhe/Betthöhe
ϑ	Temperatur

λ	Luftzahl	ö	örtlich
ξ	Massenkonzentration	P	Papier/Pappe
ρ	Dichte	p	primär
τ	Verweilzeit	r	Reaktion
		R	Rost
		1,2,3,	verschiedene
		4,5	Hausmüllanalysen
		s	sekundär
		Sch	Schüttung
		V	Vorwärmung
		v	Abgas
		W	Wasser
		x	Wurfweite
		Z	Zündung
		zu	zugeführt
		o	Austritt

	Indizes		hochgestellte Indizes
	<i>tiefgestellte Indizes</i>		Strom
a	Anfang		*
ab	abgeführt		auf Längen- oder Flächeneinheit bezogen
an	angesaugt		
e	Ende		
f	feucht		
F	Feuerraum		
G	Glas		
g	groß		
ges	Gesamt		
i	Komponente		
K	Kunststoff		
k	klein		
M	Müll		
min	mindest.		

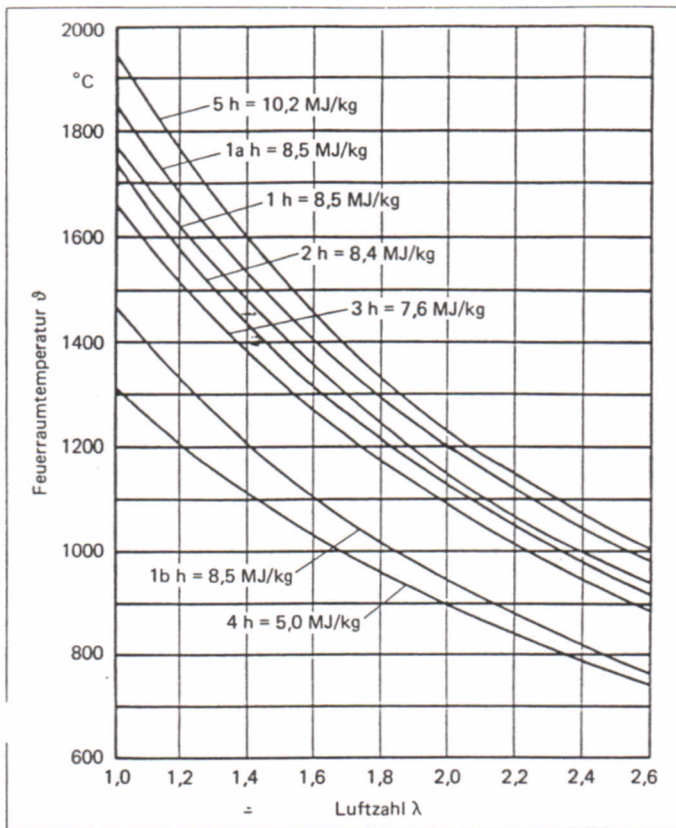


Bild 3: Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur ϑ_F von der Luftzahl λ für verschiedene Hausmüllzusammensetzungen.

1 bis 5 $\vartheta_v = 20\text{ °C}$, $\dot{Q}_{ob}/\dot{Q}_{zu} = 0\%$
 1a $\vartheta_v = 150\text{ °C}$, $\dot{Q}_{ob}/\dot{Q}_{zu} = 0\%$
 1b $\vartheta_v = 20\text{ °C}$, $\dot{Q}_{ob}/\dot{Q}_{zu} = 20\%$

aufgrund der jeweils stark unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzungen einen Vergleich nur schwer zu. **Tabelle 1** zeigt z. B. eine Erfassung einzelner Stoffe.

Verglichen mit fossilen Brennstoffen liegen die Gehalte an Schwermetallen und Chlor im Hausmüll um mehrere Zehnerpotenzen höher. Dieser Tatsache ist einerseits Rechnung zu tragen durch

Tabelle 1: Schadstoffkonzentrationen in ppm zur Charakterisierung von Hausmüll [4].

Element	niedrigster errechneter Wert	höchster errechneter Wert	Spannweite
Kupfer	178	296	118
Eisen	3294	4859	1565
Mangan	137	200	63
Natrium	1528	1999	471
Blei	178	639	461
Zink	456	613	157
Cadmium	3	5	2
Quecksilber	0,4	1,1	0,7
Chlor	3365	4200	835
Fluor	9	16	7
Schwefel	661	848	187

eine entsprechende Prozeßführung, d. h. hohen Ausbrand, niedriger Flugstaubanteil usw. [5], und andererseits durch dem Verbrennungsprozeß nachgeschaltete Einrichtungen der Rauchgasreinigung, Schlacken- und Filterstaubnachbehandlung usw. Erwähnt seien hierzu z. B. das 3-R-Verfahren [6], die katalytische Zerstörung von PCDD/PCDF [7], Schmelzverfahren sowie Auslaugverfahren [3] und die Rückstandsverglasung [8]. Ein optimiertes Verbrennungskonzept stellt dann z. B. in bezug auf Dioxine und Furane eine Schadstoffsenke dar [3]. Weiterhin kann die Möglichkeit einer Nachverbrennung von Filter- und Kesselaschen in einer eigenständigen Feuerung mit schmelzflüssigem Schlackeabzug in Betracht gezogen werden.

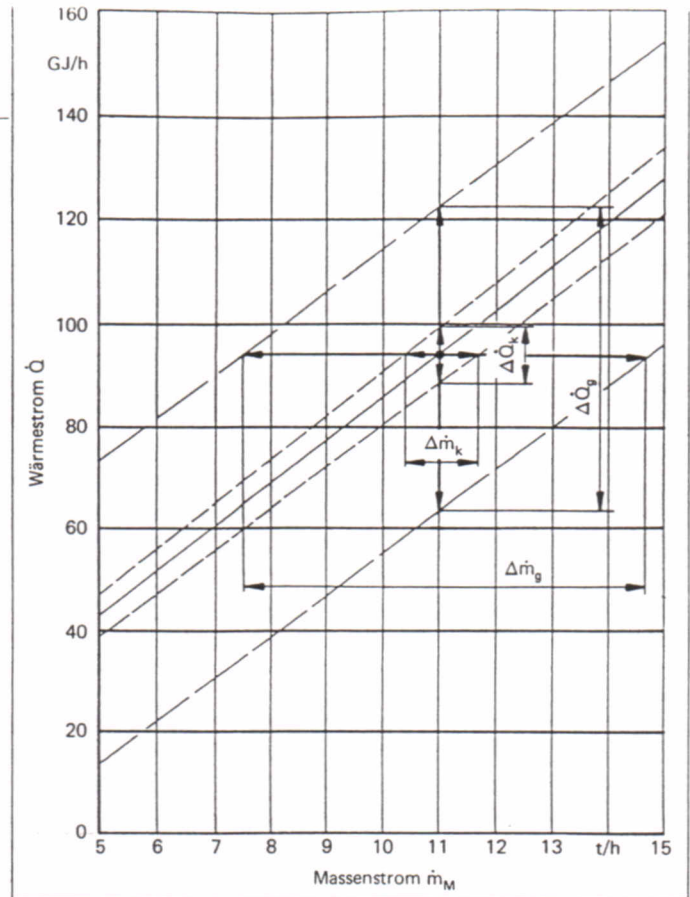


Bild 4: Auswirkungen von Heizwertschwankungen auf Massenstrom \dot{m}_M und Wärmestrom \dot{Q} .

Einfluß der Vorbehandlung

Hinsichtlich der Verbrennungstechnik kommt der Vorbehandlung, d. h.

- Homogenisierung,
 - Schadstoffentfrachtung,
 - Brikettierung u. a.
- ein hoher Stellenwert zu.

Durch Vorbehandlungsmaßnahmen sollen in feuerungstechnischer Hinsicht erreicht werden:

- eine Vergleichmäßigung der chemisch-physikalischen Eigenschaften,
- möglichst gleichbleibende Bedingungen für die Teilprozesse Trocknung, Entgasung, Vergasung, Zündung usw.,
- eine Verbesserung der Ausbrandeigenschaften,
- eine günstigere Feuerungsleistungsregelung,
- ein Herabsetzen der Gefahr von Strahlenbildungen im Feuerraum,
- eine Schadstoffentfrachtung.

Eine Verminderung der Heizwertschwankung führt bei einem vorgegebenen einzuhaltenden Wärmestrom \dot{Q} zu einer Verringerung der Schwankung des Müllmassenstroms \dot{m}_M , bzw. bei gleichbleibendem \dot{m}_M führt eine Verringerung der Heizwertschwankung zu einer entsprechenden Verringerung der

Schwankung des abgegebenen Wärmestromes Q (Bild 4), was sich positiv auf den Betrieb einer Anlage (Feuerungsleistungsdiagramm) auswirkt.

Die Vorbehandlung des Abfalls ist jeweils unter den Randbedingungen, wie z. B. Energiebedarf der Homogenisierungseinrichtungen, deren mechanischem Verschleiß sowie Einfluß einer Schadstoffentfrachtung auf die Gesamtemissionen usw., den Vorteilen, die sich für den Verbrennungsprozeß daraus ergeben, bewertend gegenüberzustellen.

Allgemeines zur Verbrennungsführung

Die Auswahl eines geeigneten Verbrennungsverfahrens richtet sich hauptsächlich nach den chemisch-physikalischen Eigenschaften des einzusetzenden Abfalls (Brennstoffs). Allgemein

kann eine Unterteilung in Verfahren für Abfälle gasförmiger, flüssiger sowie staubförmiger Konsistenz einerseits und Abfälle stückig fester oder pastöser Konsistenz andererseits vorgenommen werden. Die spezielle Verfahrensauswahl wird danach durch die jeweiligen Randbedingungen, wie z. B. chemische Zusammensetzung, Stückgröße bei festen Abfällen, Zerstäubbarkeit bei flüssigen Abfällen u. a., bestimmt. Bei ausschließlich gasförmiger, flüssiger oder staubförmiger Konsistenz der Abfälle genügt in der Regel nur ein Verbrennungssystem. Ist der Abfall jedoch heterogen zusammengesetzt (stückig, pastös, Mischungen aus stückigen und pastösen sowie flüssigen Anteilen), so ist in der Regel eine Reihenschaltung von wenigstens zwei Verbrennungssystemen erforderlich [siehe 5; 9]. Dabei ist das erste Verbrennungsteilsystem ausschließlich unter den Gesichtspunkten eines möglichst hohen Ausbrandes des Feststoffes und das zweite Verbrennungsteilsystem unter den Gesichtspunkten eines möglichst hohen Ausbrandes des aus dem ersten Teilsystem stammenden Gases bzw. Abgases und Flugstaubes zu betreiben. Das zweite Verbrennungsteilsystem sollte selbst wieder als eigenständige Feuerung aufgebaut sein. Grundsätzliche Aspekte der Verbrennung wie Vermischung, Verweilzeitverhalten, Temperaturführung, Ausbrand, Schadstoffmechanismen u. a. werden im folgenden nur soweit erforderlich angesprochen. Für eingehende Betrachtungen zu Grundsätzen der Ver-

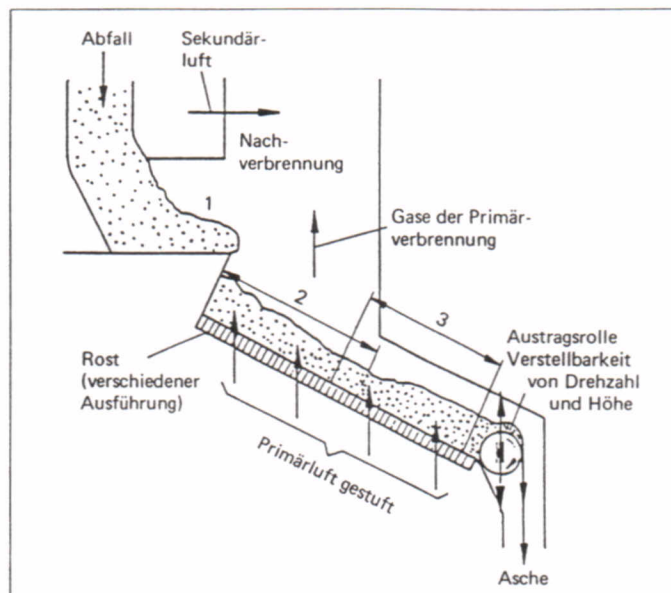


Bild 5: Teilprozesse in Rostfeuerungsanlagen.

- 1 ≙ Trocknung, Entgasung
- 2 ≙ Trocknung, Entgasung, Vergasung
- 3 ≙ Verbrennung, Ausbrand der Asche

brennung sei auf das Schrifttum [siehe 5; 9 bis 29] verwiesen.

Verfahrenstechnik bei Rostfeuerungen

Durch das Bestreben, den Verbrennungsprozeß einer Rostfeuerungsanlage unter dem Aspekt der Schadstoffminderung weiter zu verbessern und bedingt durch die verschiedenen brennstoffseitigen Anforderungen, gibt es unterschiedliche Bauformen von Rostfeuerungsanlagen sowie zahlreiche Entwicklungen, die gegenwärtig noch nicht abgeschlossen sind.

Häufig verwendete Rostsysteme

Allgemeines

Die einzelnen Teilprozesse bei der Feststoffverbrennung finden häufig zusammen mit einem Teil der Wärmeauskoppelung in nahezu einem Prozeßraum

statt (Bild 5). Die unmittelbare Beeinflussung der Feuerungs-führung (Primärmaßnahmen) setzt eine direkte Steuerung der Mischungs- und Verweilzeitverhältnisse sowie der Temperaturverhältnisse voraus.

Für die Verbrennungsführung (Bild 5) kann grob nach

- Feuerraumgestaltung,
- Verbrennungsrötypen,
- Primärluftzufuhr und -verteilung,
- Sekundärluftzufuhr und -verteilung,
- Steuerung von Brennstoffmassenstrom und Luftmassenstromverteilung

unterschieden werden. Die große Anzahl von Einflußgrößen (Tabelle 2), die die einzelnen Teilprozesse z. B. in Hinblick auf den Ausbrand gegenläufig beeinflussen, erschwert eine Optimierung insbesondere bei unmittelbar

Tabelle 2: Einflußgrößen auf das Mischungs-, Verweilzeit- und Temperaturverhalten (Beispiele).

	Durchmischung	Verweilzeit	Temperatur
Feststoffverbrennung	z. B. – Rosttyp – Rosttransportgeschwindigkeit – Druckverlust	z. B. – Rostlänge – Rosttransportgeschwindigkeit – Brennstoffmassenstrom – Brennstoffbetthöhe	z. B. – Brennstoffmassenstrom – Primärluft – Wärmeauskoppelung – Feuerraumgeometrie/Strömungsführung – Strömungsgeschwindigkeit im Feuerraum
Nachverbrennung	z. B. – Feuerraumgeometrie/Strömungsführung, Einbauten – Strömungsgeschwindigkeit im Feuerraum – Sekundärlufteindüsung	z. B. – Feuerraumgeometrie/Strömungsführung, Einbauten – Strömungsgeschwindigkeit im Feuerraum	z. B. – Feuerraumgeometrie – Wärmeauskoppelung – Sekundärlufttemperatur

ineinander übergehenden Reaktionszonen.

Die Optimierung der Verbrennungsführung erfordert weiterhin auch ein entsprechend aufwendiges Automatisierungskonzept [30 bis 34].

Feuerraumgestaltung

Bei nicht deutlich voneinander getrennten Prozeßstufen ist die Gestaltung der Feuerraumgeometrie sowohl unter den Gesichtspunkten der einzelnen Teilprozesse des Feststoffumsatzes als auch gleichzeitig bezüglich der Qualität der Nachverbrennung der gasförmigen Bestandteile und des Flugstaubes zu betrachten.

Unterschieden werden bei der Feuerraumgestaltung

- Gleichstromführung,
- Gegenstromführung,
- Mittelstromführung.

Bei der *Gleichstromführung* werden die Abgase durch das Temperaturmaximum in der Verbrennungszone des Rostes geführt, was zu einer ersten Nachverbrennung noch im Rostbereich führt. Die Trocknung und Entgasung bzw. Zündung des festen Brennstoffes ist hierbei maßgeblich von der Wärmeübertragung durch Strahlung einer ungekühlten, feuerfesten heißen Feuerraumdecke beeinflusst. Für eine Anwendung der Gleichstromführung sind brennstoffseitige Randbedingungen, wie z. B. niedriger Wassergehalt, gute Zündeigenschaften und hoher Heizwert, zu berücksichtigen.

Bei einer *Gegenstromführung* werden die heißen Abgase in Richtung Trocknungs- und Zündzone geführt und der Wärme- und Stoffübergang somit durch den Konvektionseinfluß der Abgase verbessert, was sich insbesondere bei solchen festen Brennstoffen mit relativ hohen Wassergehalten, schlechtem Zündverhalten und niedrigen Heizwerten günstig auswirkt. Die Gase bzw. Abgase werden dabei nicht mehr durch das Temperaturmaximum über dem Rostbereich geführt, was jedoch in der Nachverbrennungsstufe ausgeglichen werden kann.

Die *Mittelstromführung* ist zwischen Gleich- und Gegenstromführung einzuordnen, d. h. einerseits soll die teilweise Führung der Abgase durch das Temperaturmaximum die Ausbrandqualität der gasförmigen und staubförmigen Bestandteile noch im Rostbereich erhöhen, andererseits ist mit einem gün-

stigen Einfluß durch Konvektion auf die Trocknung und Zündung usw. zu rechnen.

Es sei nochmals betont, daß aus der Rostverbrennungsstufe möglichst wenig Flugstaub in die Nachverbrennungszone übertreten soll. Neben geringen Strömungsgeschwindigkeiten in der Brennstoffschicht ist weiter darauf zu achten, daß bei der Strömungsführung über dem Rost Möglichkeiten einer Feststoffabscheidung in das Brennstoffbett durch geeignete Gestaltung der Feuerraumgeometrie gegeben sind [z. B. 3].

Verbrennungstypen

Entsprechend der unterschiedlichen Beschaffenheit der festen Brennstoffe setzt man zahlreiche Typen von Verbrennungsrösten ein. Allgemein müssen an einen Verbrennungsrost folgende Anforderungen gestellt werden:

- Tragen des Brennstoffbettes,
- Transport des Brennstoffbettes,
- gleichmäßige Verteilung des Brennstoffes,
- Zufuhr und Verteilung der primären Verbrennungsluft,
- Vermischung des Brennstoffes mit der Verbrennungsluft,
- geringer Aschedurchfall,
- Steuerung der Verweilzeit des Brennstoffes z. B. durch:
 - Brennstoffbetthöhe,
 - Transportgeschwindigkeit,
- geringer Wartungsaufwand und Verschleiß, u. a.

In dem Bereich der thermischen Entsorgung von Hausmüll sind hauptsächlich die Rosttypen

- Wanderrost,
- Walzenrost,
- Vorschubrost,
- Rückschubrost

zu unterscheiden. Zu Einzelheiten sei hier auf das Schrifttum verwiesen [z. B. 3; 15; 33 bis 37].

Wanderroste werden bei der Verbrennung von Müll aus dem Hausmüllbereich als Stufenwanderroste ausgeführt. Der Rost arbeitet als Transportband. Die Transportgeschwindigkeiten der einzelnen Roststufen können verschieden sein. Bei Stufenwanderrosten erfolgt eine Durchmischung des Brennstoffes und ein Zerfallen grober Agglomerationen jeweils beim Abkippen von einer höhergelegenen auf eine tiefer gelegene Stufe. Die Brennstoffbetthöhe

auf den einzelnen Roststufen ist einheitlich bzw. hängt jeweils von der Brennstoffdosierung und der Transportgeschwindigkeit ab.

Walzenroste bestehen aus hintereinander angeordneten Transportwalzen, die gleichzeitig der Zufuhr und Verteilung der Verbrennungsluft dienen. Die Walzen sind zur Steuerung der Verweilzeit in den einzelnen Zonen jeweils getrennt stufenlos regelbar. Der Neigungswinkel der Walzen beträgt ca. $\alpha_R = 20$ bis 30° .

Bei den *Vorschubrosten* besteht die Rostoberfläche aus schuppenförmig in Transportrichtung übereinanderliegenden Roststabgliedern, die quer zur Transportrichtung zu beweglichen oder feststehenden Reihen zusammengefaßt sind. Die Rostfläche ist entweder waagrecht oder auch leicht zum Ausstrag hin geneigt, wobei die einzelnen Roststabreihen durchaus auch eine Neigung nach oben aufweisen können. Letzteres bewirkt eine Intensivierung der Durchmischung des Feststoffes. Abweichend davon können die Roststabreihen auch durch gegeneinander bewegliche Rostplatten ersetzt sein. Im Gegensatz zu einer kontinuierlichen Neigung des Vorschubrostes können jeweils mehrere Roststabreihen zu einer stufenförmigen Anordnung zusammengefaßt werden. In diesem Fall unterstützt der Abwurf von der einen auf die nächste Roststufe den Mischungseffekt und das Zerfallen gröberer Brennstofffraktionen bzw. während des Prozesses gebildeter Agglomerate.

Rückschubroste weisen in der Regel eine stärkere Neigung in Austragsrichtung auf als Vorschubroste. Die einzelnen Roststabglieder liegen in der Gegenrichtung schuppenförmig übereinander. Die Rückwärtsbewegung des Rostes wirkt der aufgrund der Schräglage durch die Schwerkraft hervorgerufenen Abwärtsbewegung des Brennstoffes entgegen und erzeugt auf diese Weise eine Durchmischung des Feststoffes.

Die bei Vorschub- und Rückschubrosten unterschiedliche Rostbewegung bei jeweils gleicher Brennstofftransportrichtung ist u. a. die Ursache für unterschiedliche Intensitätsverteilungen des Brennstoffumsatzes über der Rostlänge. Bei Vorschubrosten hat man qualitativ bei der relativen Aufteilung der Rostlänge mit einer etwas ausgedehnteren Trocknungs-, Entgasungs- und Zündphase zu rechnen, bei Rückschubrosten

hingegen mit einer relativ ausgedehnten Abbrandzone [35]. Beide Rosttypen können natürlich für einen ausreichenden Ausbrand ausgelegt werden.

Primärluftzufuhr und Verteilung

Der Massenstrom der als Primärluft zugeführten Verbrennungsluft bezogen auf den Gesamtluftmassenstrom beträgt ca. $\dot{m}_p/\dot{m}_{ges} = 70$ bis 80%. Für die Steuerung des Verbrennungsablaufes ist die Aufteilung der Primärluft in mehrere Primärluftzonen unterhalb des Rostes erforderlich. Die Aufteilung des Primärluftmassenstroms auf die einzelnen Zonen gestaltet sich entsprechend den Brennstoffeigenschaften wie Wassergehalt, Anteil flüchtiger Bestandteile, Heizwert usw. unterschiedlich (Bild 6).

Bei hohen Wassergehalten, d. h. niedrigen Heizwerten, ist der erste Teil der Rostlänge noch zur Trocknung erforderlich. Der in diesem Rostabschnitt zur Verfügung stehende Verbrennungsluftmassenstrom reicht zur Trocknung bei weitem nicht aus. Die Trocknung hat vielmehr durch Wärmeübertragung infolge Strahlung durch eine ungekühlte feuerfeste heiße Feuerraumdecke und durch Wärme- und Stoffaustausch infolge Konvektion durch Rostabgase insbesondere bei Gegenstromführung zu erfolgen. Gegebenenfalls ist noch ein Hilfsbrenner, im Feuerraum oberhalb des Brennstoffbettes angeordnet, erforderlich. Dieser unterstützt dann auch entscheidend das Einsetzen der Zündung. In der Trocknungszone sollte daher der zugehörige Primärluftanteil entsprechend klein sein (Bild 6b) und die Primärluft zur eigentlichen Reaktion erforderliche Luft (Brennstoffumsatz) erst in den nachfolgenden Rostzonen verstärkt zugeführt werden. Es ist weiter darauf zu achten, daß die Zündung des Brennstoffes nicht durch unnötig hohen Luftmassenstrom bei der Trocknung behindert wird. Lokale Schwelzonen, deren Ausbildung insbesondere bei sehr feuchtem Abfall in Betracht zu ziehen ist und die zu einer Verschlechterung der Ausbrandqualität führen, sind zu vermeiden [38].

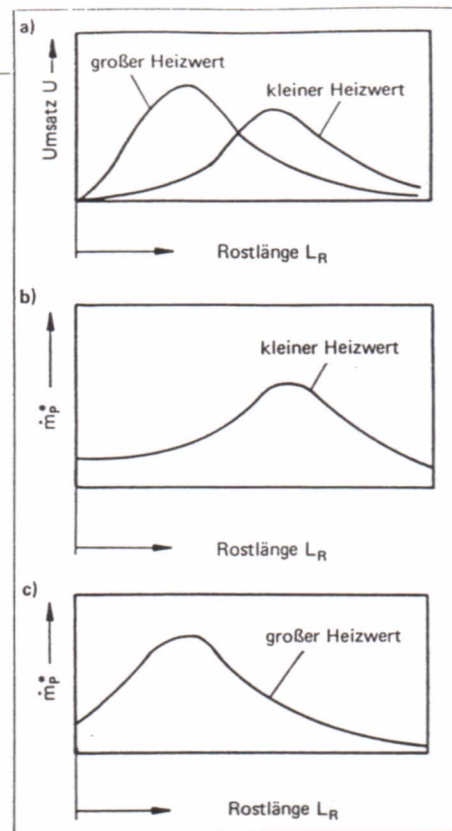


Bild 6: Umsatz U sowie Primärluftverteilung \dot{m}_p^* über der Rostlänge L_R bei Hausmüll mit unterschiedlichem Heizwert h.

Bei niedrigen Wassergehalten, d. h. bei hohen Heizwerten, ist der für die Trocknung erforderliche Rostabschnitt entsprechend gering. Die „Reaktionszeit“ ist in erhöhtem Maße somit bereits in den vorderen Rostzonen zuzuführen (Bild 6c). Es ist hier jedoch besonderer Augenmerk auf lokale Temperaturspitzen zulegen, die u. U. zu Verschlackungen und erhöhter Verschleißgefahr des

Rostes führen können. Inwieweit eine kontinuierliche Verteilung des Primärluftmassenstroms verwirklicht werden und an sich ändernde Betriebsbedingungen angepaßt werden kann, hängt von der Anzahl der gewählten Luftzonen ab. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, daß bei betrieblichen Schwankungen des Heizwertes zwar der erforderliche Primärluftmassenstrom wie gezeigt entsprechend variiert werden, jedoch bei einer gewählten (projektierten) Feuerraumgestaltung (Gleichstrom-, Gegenstrom-, Mittelstromführung) diese nicht an veränderte Betriebsbedingungen angepaßt werden kann. Die Nachverbrennung muß in diesen Fällen jeweils die veränderten Verhältnisse des Gases bzw. Abgases aus dem Rostbereich berücksichtigen.

Der Primärluftmassenstrom selbst kann durch entsprechende Einrichtungen vorgewärmt zugeführt werden, was insbesondere positive Auswirkungen für den Teilprozeß Trocknung hat, für die Feuerraumtemperatur jedoch aufgrund des relativ geringen Mindestluftbedarfes bei Hausmüll von weniger großer Bedeutung ist (Bild 3). Mit einer Luftvorwärmung z. B. auf $\vartheta_v = 150$ °C kann die Müllfeuchtigkeit schon bei der Durchströmung des Müllbettes durch Konvektion zu einem erheblichen Teil reduziert werden. Das führt zu einer Verbesserung des Trocknungsvorgangs im Vergleich zu der Verfahrensweise, bei der hauptsächlich über eine feuerfeste, ungekühlte, heiße Feuerraumdecke durch Strahlung getrocknet wird. Die Luftvorwärmtemperatur ϑ_v sollte in Hinblick auf die Rostkonstruktion, d. h. die Schmierung, Lagerung, Wärmeausdehnung usw., $\vartheta_v = 150$ °C nicht überschreiten [36].

Sekundärluftzufuhr und Verteilung

Ziel der Sekundärluftzugabe ist es, eine möglichst gute Nachverbrennung der aus dem Rostbereich stammenden Gase bzw. Abgase und des Flugstaubes zu gewährleisten. Die Projektierung der Sekundärluftzugabe in Hinblick auf Austrittsgeschwindigkeiten w_0 , Düsendurchmesser, örtliche Anordnung usw. ist dabei sehr wichtig. Bei bestehenden Anlagen beträgt der Sekundärluftmas-

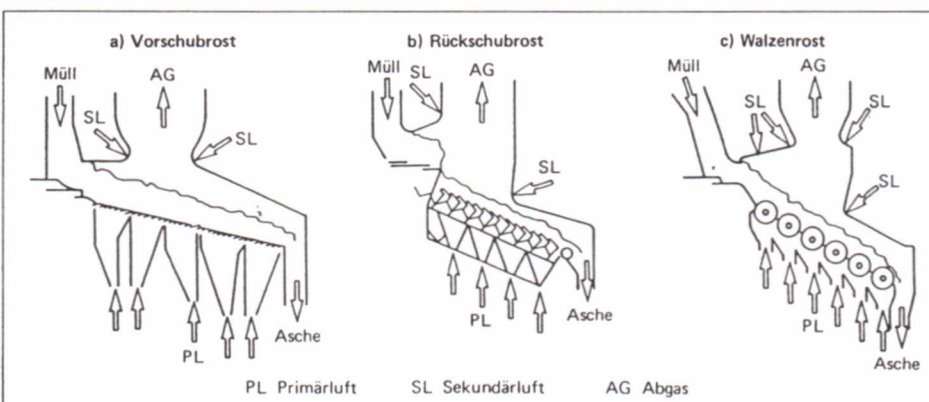


Bild 7: Schematische Darstellung verschiedener Möglichkeiten der Sekundärluftzufuhr [38].

senstrom bezogen auf den Gesamtluftmassenstrom ca. $\dot{m}_s/\dot{m}_{ges} = 20$ bis 30%. Beispielhafte Anordnungen der Sekundärluftzugabe sind in **Bild 7** gezeigt. Bei der Betrachtung des Vermischungseffektes beruhend auf dem Freistahlprinzip [siehe 15; 39] zeigt sich, wie später noch eingehender behandelt, daß nur bei einer günstigen Anordnung der Sekundärluftdüsen über der Querschnittsfläche Mischungsverhältnisse eines technischen Rührkessel-elementes vorliegen können. Häufig sind Austrittsgeschwindigkeiten aus Sekundärluftdüsen von $w_o = 100$ m/s erforderlich.

Steuerung von Brennstoffmassenstrom und Luftmassenstromverteilung

Ausgehend von einem insgesamt übertragenem Wärmestrom \dot{Q} (Kampferzeugung) läßt sich über den zugeführten Müllmassenstrom \dot{m}_M ungefähr auf den jeweiligen Heizwert schließen. Damit kann über eine Müllmassenstromsteuerung und zugehörigem absoluten Primärluftmassenstrom sowie dessen Verteilung über der Rostlänge (vgl. Bild 6) ein gewisser Grob- abgleich durchgeführt werden. Bei einer schnell schwankenden Müllzusammensetzung wird ein jeweils kurzfristig vorzunehmender Feinabgleich durch die Steuerung der Sekundärluftzufuhr ermöglicht, wobei bei Einhaltung der Grenzwerte die Konzentrationen CO und O₂ zu einer maximalen Temperatur ϑ_f am Ende der Nachverbrennung führen soll. Danach kann weiter überlegt werden, ob durch unterschiedliche Aufteilung der Sekundärluft noch eine NO_x-Reduzierung vorgenommen werden soll.

Zusätzliche Parametervariationen Allgemeines

In einem Verbrennungsraum, in dem die einzelnen Verbrennungsteilaufgaben einschließlich teilweiser Wärmeauskoppelung in unterschiedlichen Zonen zu lösen vorgesehen sind (**Bild 8**) ist eine Optimierung der gesamten Prozeß-

führung insofern schwierig, als sich die einzelnen Reaktionszonen mehr oder weniger stark überlappen und sie sich daher manchmal auch nur in unzureichender Weise — insbesondere in Hinblick auf unterschiedliche Betriebsbedingungen (Teillast, Vollast usw.) — trennen lassen. Es sollte daher bereits bei der Projektierung an eine sorgfältige Trennung der einzelnen Teilsysteme gedacht werden.

Zunächst ergibt sich eine Grobaufteilung in Rost- und Nachverbrennungsstufe. Einerseits soll der Rostprozeß vollständig unabhängig ohne Rücksicht auf die thermische Nachverbrennung nur in Hinblick auf den Feststoffumsatz geführt werden können, um u. a. geforderte Eigenschaften der Asche einstellen und beeinflussen zu können (hoher Ausbrand, Versintern, Eluation u. a.). Andererseits soll auch die thermische Nachverbrennung für sich in Hinblick auf den Ausbrand der gasförmigen Bestandteile und des Flugstaubes wie eine eigenständige Feuerung aufgebaut sein, d. h. ohne Rücksicht auf den Rostprozeß betrieben werden können. Je nach Erfordernis sollten diese beiden „Grobstufen“ in weitere Unterstufen unterteilt werden.

Allgemein erscheint es daneben sinnvoll, zur Rostmüllverbrennung mehrere kleinere vollständige Verbrennungsanlagen (Rostfeuerungslinien; Rost und Nachverbrennung) aus folgenden Gründen nebeneinander aufzustellen:

- Bei einer vorgeschalteten Homogenisierung und Sortierung kann jede Verbrennungsanlage (Linie) brennstoffspezifisch beschickt und optimiert werden (Vergleichmäßigung der Feuerungsführung in jeder Linie möglich).
- Bei geringer werdendem Müllaufkommen sind entsprechend wenige kleinere Verbrennungsanlagen mit jeweils besserer Kapazitätsauslastung zu betreiben. Damit ist der für den Betrieb mindestens erforderliche Müll-

massenstrom viel kleiner als bei Vorhandensein nur einer großen Anlage.

Rostverbrennungsstufe

Häufig werden Rostfeuerungen (**Bild 8**) so betrieben, daß bezogen auf eine Gesamtluftzahl z. B. $\lambda_{ges} = 1,8$ am Ende der Nachverbrennung die Luftzahl des Rostprozesses selbst bereits $\lambda_R = 1,4$ beträgt, um z. B. im Rostbereich ausreichend kleine Temperaturen zu erhalten (um ein Überschreiten von Ascheerweichungspunkten, Überhitzungen usw. zu vermeiden).

Bei Verbrennungsprozessen ist es in Hinblick auf geringe Abgasverluste und insbesondere wegen geringer Abgasvolumenströme wünschenswert, mit einer kleinen Gesamtluftzahl auszukommen. Damit wird es erforderlich, den Rostprozeß auf einer relativ großen Teillänge nahstöchiometrisch ($\lambda_{Ro} \approx 1$) zu betreiben (**Bild 9**). Um eine höhere Temperatur im Rostbereich dann zu vermeiden, wäre z. B. (bereits bei der Projektierung) eine verstärkte Wärmeauskoppelung vorzusehen (ungeachtet der Qualität des Abgases und des Flugstaubes aus dem Rostbereich wegen der folgenden Nachverbrennung). Am Ende der Roststufe ist in Hinblick auf den Feststoffausbrand eine örtliche Überstöchiometrie einzustellen (z. B. $\lambda_{Re} = 1,2$). Hier kann durch eine höhenverstellbare Austragswalze (in **Bild 5** angedeutet) die Verweilzeit für den Restausbrand des Feststoffes nochmals unabhängig von dem Müllmassenstrom \dot{m}_M und der Rostbewegung beeinflußt werden. Mit der auf diese Weise abgesenkten Luftzahl im Rostbereich (z. B. $\lambda_R = 1$) sollte eine Nachverbrennung mit einer Gesamtluftzahl, z. B. $\lambda_{ges} = 1,3$, möglich sein. Dies hat den weiteren Vorteil, daß wegen des mit der abgesenkten Luftzahl entsprechend geringeren Abgasvolumenstroms auch die nachgeschalteten Wärmeübertragungs- und Abgasreinigungsanlagen mit kleinerer Baugröße ausgeführt werden können.

Kann bei einer nahstöchiometrisch betriebenen Roststufe das Temperaturniveau nicht allein über eine verstärkte Wärmeauskoppelung vorgenommen

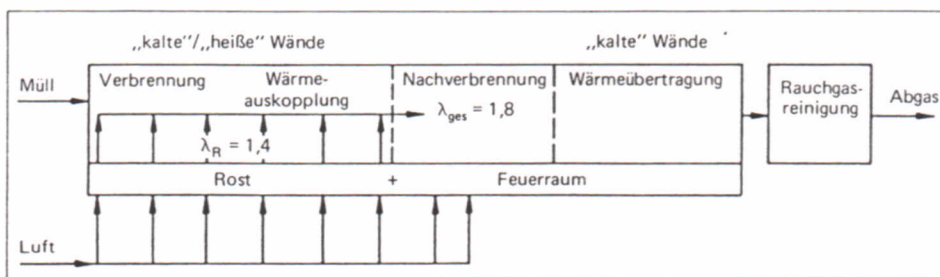


Bild 8: Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen mit überlappenden Reaktionszonen.

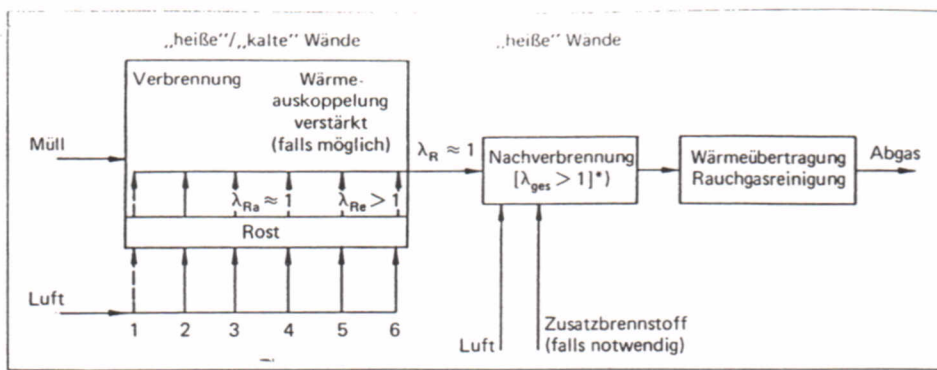
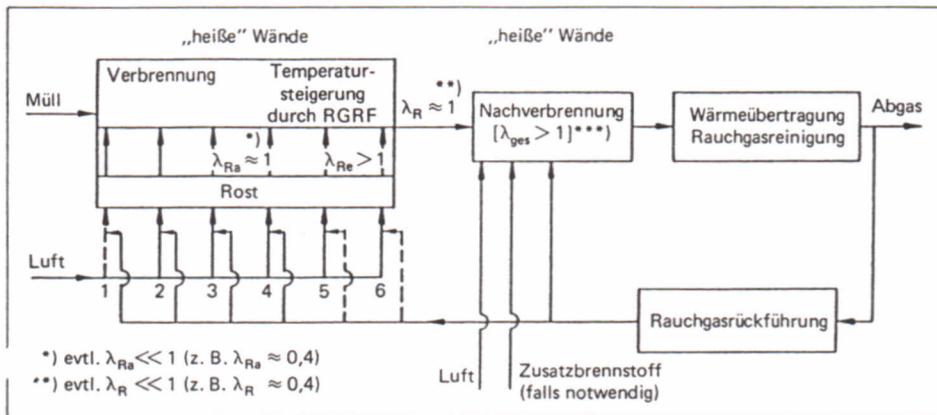


Bild 9: Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen mit verringerter Luftzufuhr (Erklärung im Text).

(*) Gestaltung der Nachverbrennung nach Gesichtspunkten unter Abschnitt Nachverbrennungsstufe



Rostasche die Zugabe von Additiven auf der Basis z. B. von Kalksteinmehl zum Müll bereits in dem Aufgabetrichter in Erwägung gezogen werden. Es hat sich gezeigt, daß sich durch diese Maßnahme z. B. SO_2 -Rohgaskonzentrationen unmittelbar nach der Roststufe erheblich senken lassen [40], was eine entsprechende Entlastung der nachfolgenden Sekundärabgasreinigungsanlagen bedeutet. Der dabei ablaufende Reaktionsweg bzw. Reaktionsmechanismus kann gegenwärtig noch nicht genügend beschrieben werden. Eine Einbindung, z. B. des Schwefels während des Transports des Müll/Additiv-Gemisches im Aufgabetrichter bei sehr niedrigen Temperaturen, ist über die flüssige Phase (Müllfeuchtigkeit) denkbar, worauf u. a. auch Grundlagenversuche [41] hinweisen. Die Aufenthaltszeiten des Müll/Additiv-Gemisches im Aufgabetrichter und im Bereich des Rosteintrittes sind für die erforderlichen Reaktionszeiten (im Bereich mehrerer Minuten) mehr als ausreichend.

Zu den verschiedenen Möglichkeiten der Gestaltung des Rostprozesses sei abschließend darauf hingewiesen, daß bei Aufgabe von Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen usw. auf die Rostverbrennungsstufe auch daran gedacht werden kann, gleichzeitig andere Abfälle (wie z. B. vorgetrockneter Klärschlamm) mit einzutragen oder auf das Bett aufzustreuen [siehe 42; 43].

Nachverbrennungsstufe

Über die vielfältigen Schaltungsmöglichkeiten von Nachverbrennungsanlagen (schadstoffbeladene Abgase usw.), bzw. Anlagen für gasförmige, flüssige und staubförmige Abfallstoffe ist häufig berichtet worden [siehe z. B. 5]. Daher wird hier nur noch auf einige im Zusammenhang mit der Vorstufe „Rostverbrennung“ wichtig erscheinende Gesichtspunkte eingegangen.

Die sich aus der Forderung der Vermeidung von Quencheffekten ableitende Konsequenz einer Trennung von

werden, so ist gegebenenfalls noch zusätzlich die Rückführung kalter, gereinigter Rauchgase zur Temperatursteuerung in Erwägung zu ziehen (Bild 10). Insbesondere bei sehr feuchten Abfällen kann die Rauchgasrückführung auch zur Unterstützung der Trocknung durch Konvektion eine sehr wirkungsvolle Maßnahme sein (vgl. Abschn. Primärluftzufuhr und Verteilung), wozu allerdings der rückgeführte Rauchgasstrom ein Temperaturniveau um $\vartheta_v = 150^\circ\text{C}$ aufweisen sollte. Dabei kann man weiter daran denken (in Bild 10 gestrichelt dargestellt), mehr oder weniger in der Stufe 1 des Rostes auf die Luftzuführung zu verzichten. Eine zunehmende Rauchgasrückführung zum Rost bedeutet allerdings wiederum eine laufende Erhöhung des Abgasvolumens in einem Teil der nachgeschalteten Anlagenteile, womit sich der zuvor genannte Vorteil kleinerer Baugröße für diesen Teil der Apparate wieder teilweise verringert.

Im nächsten Schritt kann man dazu übergehen, die gesamte Roststufe stark unterstöchiometrisch zu betreiben (Symbole ** in Bild 10, $\lambda_R \ll 1$). Damit werden auch ohne eine verstärkte Wärmeabkoppelung und Rauchgasrückführung zu hohe Temperaturen im Rostbereich vermieden. Der Restausbrand des Feststoffes am Ende des Rostes ist dann nach wie vor durch eine Einstellung einer örtlichen Luftzahl $\lambda_{Re} > 1$ in den Stufen 5 und 6 des Rostes

Bild 10: Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen mit verringerter Luftzahl und Rauchgasrückführung.

(***) Gestaltung der Nachverbrennung nach Gesichtspunkten unter Abschnitt Nachverbrennungsstufe

gewährleistet (Ausbrand bis auf Restkohlenstoff 0,5 bis 0,2 Ma.-%) [9]. Bei dieser Betriebsweise haben die in die Nachverbrennung eintretenden Abgase noch einen hohen Anteil brennbarer Bestandteile, d. h. in der Nachverbrennungsstufe kann auf die Zufuhr von Zusatzbrennstoff verzichtet werden.

Es sei nochmals betont, daß bei der Projektierung eines Rostes darauf zu achten ist, daß der Druckverlust in der eigentlichen Rostkonstruktion sehr viel größer sein sollte als der Druckverlust des Müllbettes ($\Delta p_R \gg \Delta p_{Sch}$). Damit wird eine gleichmäßige Luftbeaufschlagung in den jeweiligen Rostzonen bewirkt und bekanntlich „Durchbläser“ vermieden. Zur Flugstaubverminderung allgemein sei wiederholt, daß die Strömungsgeschwindigkeiten klein gehalten und Möglichkeiten zur Staubabscheidung zurück in das Brennstoffbett genutzt werden sollten.

In Verbindung mit einer Optimierung der Verbrennungsführung in der Roststufe kann in Hinblick auf die Einbindung von Schwefel und Chlor in die

Reaktionszonen und Wärmeauskopplung sei an dieser Stelle nochmals erwähnt. Zur Einstellung geeigneter Reaktionsbedingungen sind Möglichkeiten zur Steuerung der Temperatur-, der Mischungs- und Verweilzeitverhältnisse erforderlich. Eine Steuerung des Temperaturniveaus kann z. B. durch Variation des Luftüberschusses, durch Zufuhr von Sekundärbrennstoff, durch Wassereindüsung und Rauchgasrückführung erfolgen. Entsprechende Strömungsverhältnisse müssen dabei ein einheitliches Temperaturniveau gewährleisten. Hinsichtlich des Verweilzeitverhaltens unterscheidet man in der chemischen Verfahrenstechnik zwei Grenzfälle, den idealen Rührkesselreaktor und den idealen Rohrreaktor. In **Bild 11** ist für diese Grenzfälle das Abbauverhalten von CO in Abhängigkeit von der Verweilzeit τ dargestellt. Danach weist der ideale Rohrreaktor für den Abbaugrad zunächst die geeignetere Reaktorcharakteristik auf; es wird jedoch dabei vorausgesetzt, daß ein einheitliches Konzentrations- und Temperaturprofil über dem Reaktionsquerschnitt vorliegt, was wiederum die Vorschaltung eines Rührkessel-elementes erfordert. Häufig liegt bereits nach dem Rührkessel-element ein genügend hoher Ausbrand vor.

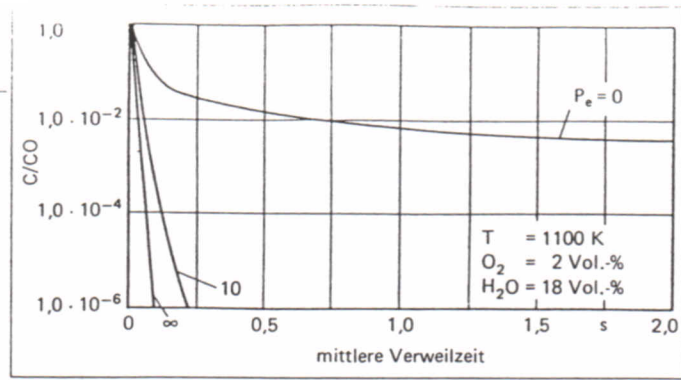


Bild 11: Abhängigkeit des CO-Abbaus c/c_0 von der mittleren Verweilzeit τ und dem Mischungsverhalten des Reaktors [16] mit der Pécletzahl Pe als Parameter.

($Pe = (w \cdot L)/D$, w charakteristische Geschwindigkeit, L charakteristische Reaktorlänge, D Dispersionskoeffizient, $Pe = 0$ Rührkessel, $Pe = \infty$ Kolbenströmer, $Pe = 10$ Beispiel für technischen Reaktor)

stufe ein optimiertes Verbrennungskonzept, wie z. B. in **Bild 12** dargestellt.

Der erste Teil der Nachverbrennung ist wie erwähnt als Rührkessелеlement auszuführen. Je nach Erfordernis ist diesem Rührkessелеlement ein Kolbenströmer nachzuschalten (**Bild 13**). Für die Gestaltung des Rührkessелеlementes ergeben sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- Bei kleinen Anlagen kann an eine überkritische Drallströmung mit sehr

wirksame Verdrehung (überkritischer Drall mit innerer Rezikulationszone) nicht möglich erscheint. In diesem Fall sind Freistrahldüsen (Injektorstrahlen) so zu dimensionieren und anzuordnen, daß möglichst der gesamte Strömungsquerschnitt erfaßt, d. h. nach Möglichkeit der gesamte zu durchmischende Abgasstrom wenigstens einmal durch die Injektorstrahlen erfaßt (angesaugt) und umgewälzt wird.

- Die Einmischmechanismen mittels Freistrahlen sind hinreichend bekannt, so daß im folgenden nur kurz zusammenfassend auf ein Beispiel eingegangen werden soll (**Bild 14**). Bei Einblasen von z Freistrahlen mit jeweils dem Massenstrom \dot{m}_{0i} , der Geschwindigkeit w_{0i} und dem Austrittsdurchmesser d_{0i}

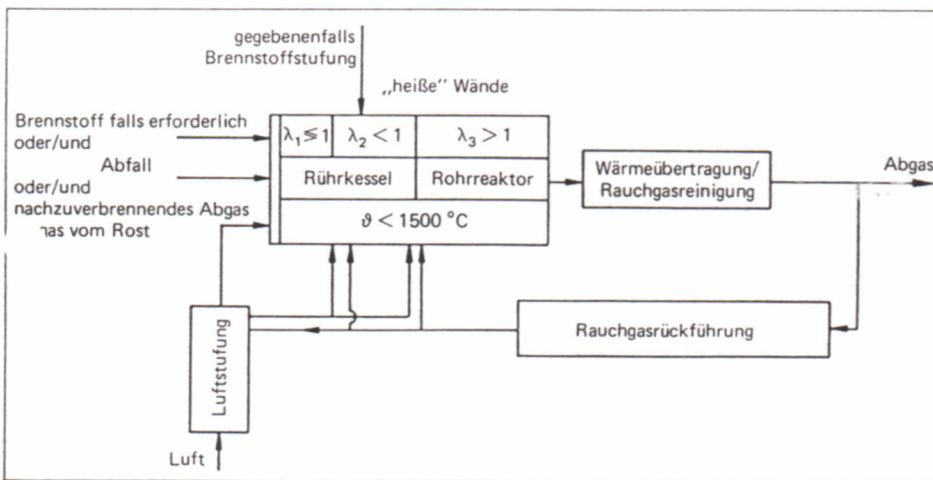


Bild 12: Schematische Darstellung der Verbrennungsführung bei gasförmigen, flüssigen, staubförmigen Brennstoffen/Abfällen [5].

Im Zusammenhang mit der Variation von Primärmaßnahmen die zu einer Schadstoffminimierung führen sollen, ergibt sich für die Nachverbrenungs-

stark ausgeprägter innerer Rezikulationszone gedacht werden. Für die Durchmischung wird somit die Strömung selbst benutzt. Es ist kein zusätzliches Treibmittel (Injektordüsen) erforderlich.

- Bei Anlagen größerer Bauart, wie sie bei Müllverbrennungsanlagen üblicherweise vorkommen, sind die Querschnitte häufig so groß, daß eine

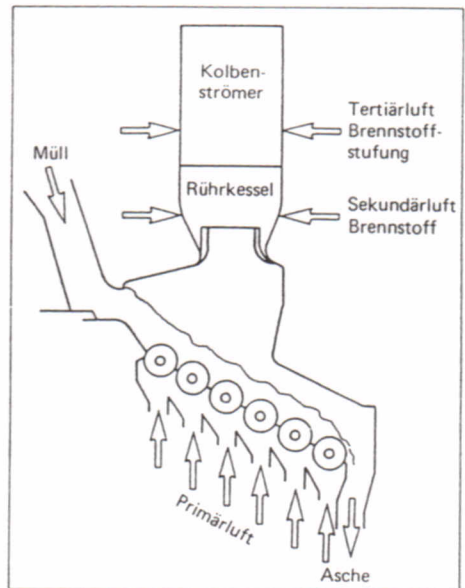


Bild 13: Schematische Darstellung der Luftstufung für eine Rostfeuerung.

ist aufgrund des Impulserhaltungsgesetzes die Entwicklung des Massenstroms über der Wurfweite x

$$\dot{m}_x = z \cdot 0,32 \frac{x}{d_{0i}} \sqrt{\frac{T_{0i}}{T_f}} \dot{m}_{0i} \quad (1),$$

Bild 14: Möglichkeiten der Anordnung von Düsenfeldern in zwei Ebenen über einem Strömungsquerschnitt zur Herstellung eines „Rührkessel“-Elementes (Erklärung im Text).

Vorgabe (Bild a):
 $\dot{m}_v = 20 \text{ kg/s}$
 $\vartheta_f = 900 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\vartheta_0 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

Ergebnis:
 $w_{\alpha} = 80 \text{ m/s}$
 $d_{\alpha} = 0,08 \text{ m}$
 $\frac{\dot{m}_0}{\dot{m}_x} = 0,1$

Vorgabe (Bild b):
 $\dot{m}_v = 20 \text{ kg/s}$
 $\vartheta_f = 900 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\vartheta_0 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

Ergebnis:
 $w_{\alpha} = 80 \text{ m/s}$
 $d_{\alpha} = 0,04 \text{ m}$
 $\frac{\dot{m}_0}{\dot{m}_x} = 0,1$

der Geschwindigkeitsverlauf

$$w_x = \frac{1}{0,32 \frac{x}{d_{\alpha}}} \sqrt{\frac{T_f}{T_0}} w_0 \quad (2),$$

und die geometrische Entwicklung des Strahlquerschnittes

$$A_x = 0,08 x^2 \quad (3).$$

Der gesamte durch Injektorwirkung angesaugte Massenstrom \dot{m}_{an} ist somit in der Entfernung x von der Eintrittsstelle:

$$\dot{m}_{an} = \dot{m}_x - \dot{m}_0 \quad (4).$$

Aus Gründen einer nicht zu hohen Temperaturabsenkung durch Einmischen des i. d. R. vergleichsweise kalten Massenstromes \dot{m}_0 (Treibmittel), sollte der Massenstrom ($z \cdot \dot{m}_{\alpha}$)

$$z \cdot \dot{m}_{\alpha} \leq 0,1 \dot{m}_v \quad (5)$$

betragen.

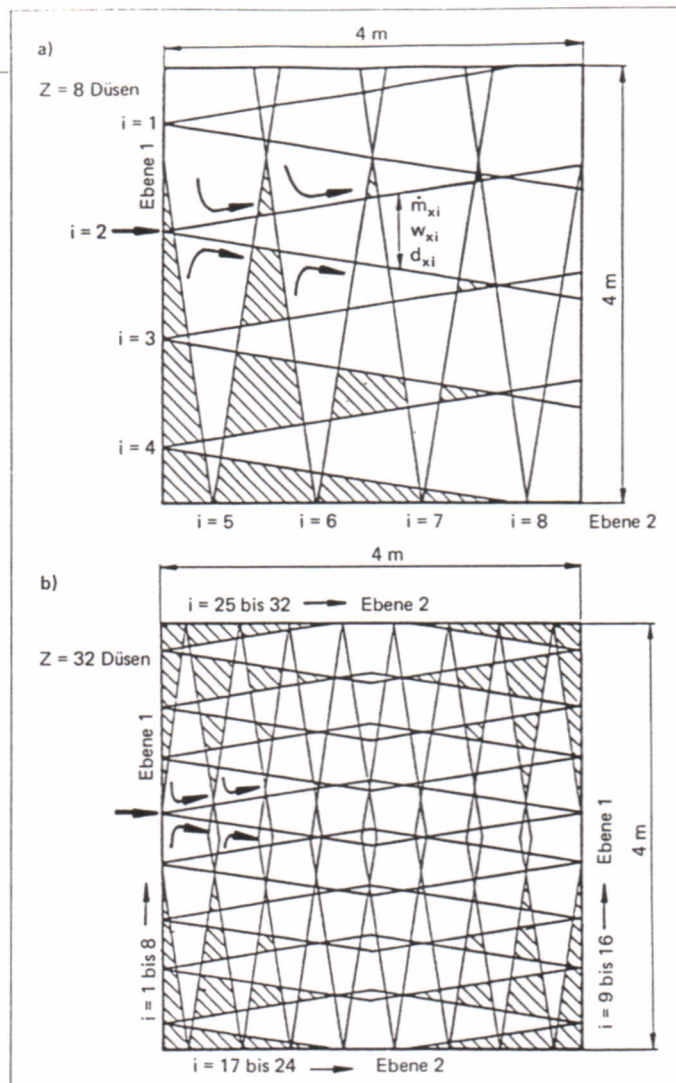
Die Geschwindigkeit w_x am Ende der Strahllänge x sollte deutlich größer als die Grundgeschwindigkeit des Abgasmassenstromes w_v sein.

● Aus dem Impulserhaltungssatz, der Kontinuitätsgleichung und der geometrischen Strahlentwicklung lassen sich mit vorgegebenem \dot{m}_{an} die Abhängigkeiten

$$\dot{m}_{\alpha} \sim \frac{1}{w_{\alpha} z x^2} \quad (6),$$

$$w_{\alpha} \sim \frac{1}{d_{\alpha} z x} \quad (7)$$

und die für den Strahlantrieb erforderliche Leistung



$$N \sim \frac{1}{d_{\alpha} z^2 x^3} \quad (8)$$

angeben, woraus die Vielzahl der möglichen Parameterkombinationen erkennbar ist.

Was die Verbrennungsführung insgesamt in der Nachverbrennungsstufe betrifft, so sei über die bereits mehrfach erwähnten Gestaltungsregeln hinaus nur noch auf einige zusätzliche Gesichtspunkte in Hinblick auf den vorangegangenen Abschnitt (Rostverbrennungsstufe) hingewiesen. Geht man wieder wie dort von einer Betriebsweise mit relativ hohen Gesamtluftzahlen $\lambda_{ges} \approx 1,8$ (Bild 8) aus, so ist es auch für die Nachverbrennung aus mehreren Gründen wünschenswert, die Gesamtluftzahl zu senken:

- Mit sinkender Gesamtluftzahl vergrößern sich die Möglichkeiten, wegen steigender Temperaturen ohne Zusatzbrennstoff auszukommen.
- Da der erste Teil der Nachverbrennung als Rührkessel-element eingerichtet werden muß, ist zur intensiven Durchmischung ein Treibmittelstrom (Luft oder

rückgeführte Rauchgase, die in der Regel vergleichsweise kalt sind) erforderlich. Bei optimierter Projektierung beträgt das Verhältnis der Massenströme \dot{m}_0/\dot{m}_x ungefähr 5 bis 10%, so daß bei dieser Art des Durchmischens mit Temperaturabsenkungen von $\Delta\vartheta_f = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $\Delta\vartheta_f = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ gerechnet werden kann, d. h. ungeachtet dieser Temperaturabsenkung läßt sich bei entsprechend kleinen Gesamtluftzahlen in der Nachverbrennungsstufe noch ein ausreichend hohes Temperaturniveau ϑ_f erzielen.

- Im Zusammenhang mit sehr stark unterstöchiometrischen Verhältnissen nach der Roststufe (z. B. $\lambda_R = 0,4$, Bild 10) erhält man zusätzliche Freiheitsgrade, die Verbrennungsführung in der Nachverbrennung zu gestalten, da das ankommende Abgas wie ein Brennstoff betrachtet werden kann. Nun ist z. B. neben der Möglichkeit Treibluft zum Durchmischen der Gase einzublasen auch noch eine Luftstufung innerhalb der Nachverbrennung ohne Zusatzbrennstoff möglich. Auf diese

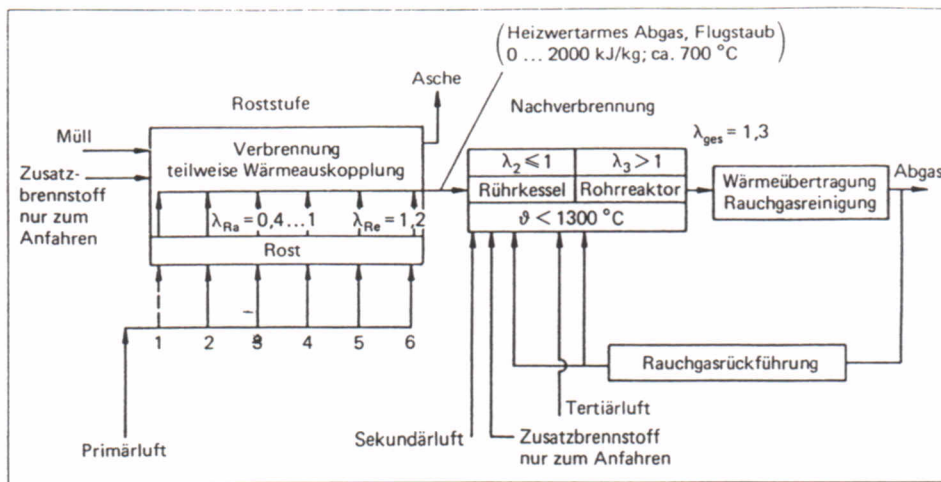


Bild 15: Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen (Erklärung im Text).

weise erhält man die in **Bild 15** dargestellte Aufteilung in Primär-, Sekundär- und Tertiärluft. Damit ist u. a. eine NO_x -Minderung in erheblichem Umfang bei gleichzeitig gutem Ausbrand möglich [9].

- Es sei noch erwähnt, daß unter der Voraussetzung einer „sorgfältig“ geführten Nachverbrennung bei Notwendigkeit eines Zusatzbrennstoffes zur Schonung wertvoller Brennstoffe daran gedacht werden kann, auch z. B. flüssige Abfälle zu verwenden.

Ausblick

Die Entwicklung in Hinblick auf eine Minimierung der Schadstoffemissionen durch Primärmaßnahmen sind noch nicht abgeschlossen. Je nach Beschaffenheit des Abfallstoffes sind entsprechende Optimierungsversuche und Grundlagenuntersuchungen erforderlich.

Bei verschiedenen Rosttypen sind z. B. zu optimieren:

- die Menge und Aufteilung der Primär-, Sekundär-, Tertiärluft sowie Rauchgasrückführung,
 - zum Erreichen eines hohen Ausbrandes sowohl des Feststoffes als auch der Abgase,
 - zur NO_x -Reduzierung,
 - Unterstützung des Trocknungsprozesses,
 - Vermeidung von Rostverschlackungen u. a.
- die Einmischverhältnisse der Primärluft im Rostbereich,
 - zur Minimierung des Flugstaubanteils,
 - zur Optimierung der Durchströmung

und Durchmischung der Brennstoffschicht,

– zur Rostkühlung u. a.

- Verweilzeit in den unterschiedlichen Reaktionszonen,
- Additivzugabe.

Für bestimmte Fragestellungen ist es weiterhin sinnvoll, zur Einstellung repräsentativer Versuchsbedingungen entsprechende Modellbrennstoffe zu verwenden. Zusammen mit dem Einsatz einer entsprechenden Meßtechnik zur visuellen Prozeßüberwachung (z. B. Pyrodetektoren, IR-Kameras) können die Ergebnisse solcher Grundlagenuntersuchungen bei einem Regelungskonzept erheblich zur Verringerung der Totzeiten und somit insgesamt zu einer Verbesserung der Prozeßführung beitragen.

V 008

Schrifttum

- [1] *de Etienne, F.*: Elektrizität aus Kehrlicht. Budapest: K.U.K. Hofbuchhandlung von Julius Benkö 1911.
- [2] Daten zur Umwelt 1988/1989. Umweltbundesamt.
- [3] *Christmann, A.*: Zukünftiges Feuerungskonzept zur thermischen Restmüllbehandlung. VDI-Berichte Nr. 895 (1991).
- [4] Umweltbundesamt: Berichte des Umweltbundesamtes „Chemisch-physikalische Analyse von Hausmüll“. Berlin: E. Schmidt-Verlag 1983.
- [5] *Scholz, R.; R. Jeschar; N. Schopf; G. Klöpner*: Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von Abfällen.
- [6] *Merz, A.; J. Schneider; L. Stieglitz; J. Vehlow; H. Vogg; K. Horch*: Thermische Zerstörung von PCDD/PCDF-Verbindungen durch Rückführung von 3-R-Produkten in den Müllverbrennungsöfen. VDI-Bildungswerk, 12.–14. April 1989, Düsseldorf.
- [7] *Hagenmeier, H.; G. Mittelbach*: Versuche zum katalytischen NO_x - und Dioxinabbau im Abgas einer Müllverbrennungsanlage. VGB-Kraftwerkstechnik 70 (1990) Nr. 6, S. 491/493.

- [8] *Mayer-Schwinnig, G.; H. Merlet; H. Pieper; H. Zschocher*: Verglasungsverfahren zur Inertisierung von Rückstandsprodukten aus der Schadgasbeseitigung bei thermischen Abfallbeseitigungsanlagen. VGB Kraftwerkstechnik 70 (1990) Nr. 4, S. 332/336.
- [9] *Scholz, R.; N. Schopf*: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and some Test Results of Pilot Plants. Proceedings "The 1989 Incineration Conference", Knoxville, USA (1989).
- [10] *Hasberg, W.; R. Römer*: Organische Spurenschadstoffe in Brennräumen von Anlagen zur thermischen Entsorgung. Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) Nr. 6, S. 435/443.
- [11] *Kolb, T.; W. Leuckel*: NO_x -Minderung durch 3stufige Verbrennung – Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. Tecflam-Seminar, Stuttgart (1988).
- [12] *Leuckel, W.; R. Römer*: Schadstoffe aus Verbrennungsprozessen. VDI-Berichte Nr. 346 (1979).
- [13] *Kolb, T.; G. Sybon; W. Leuckel*: Reduzierung der NO_x -Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. Tecflam-Seminar, Heidelberg (1990).
- [14] *Scholz, R.; G. Klöpner; R. Wagner*: Schadstoffarme Deponiegasverbrennung durch geeignete Flammenführung. GIT Supplement 5/87 Umwelt II.
- [15] *Günther, R.*: Verbrennung und Feuerung. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag 1974.
- [16] *Dryer, F. L.; I. Glassmann*: 14th Int. Symp. on Combustion. Comb. Inst. Pittsburgh (1973).
- [17] *de Soete, G.*: Physikalisch-chemische Mechanismen der Stickstoffoxidbildung in industriellen Flammen. Gas-wärme international 30 (1981) Nr. 15, S. 15/23.
- [18] *Fenimore, C. P.*: Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. 13th Int. Symp. on Combustion, Comb. Inst. Pittsburgh 1971.
- [19] *Kremer, H.*: Grundlagen der NO_x -Entstehung und Minderung. Erdöl und Kohle-Erdgas 40 (1982).
- [20] *Jeschar, R.; R. Scholz; N. Schopf; G. Klöpner*: Schadstoffarme Verbrennung in einem Drallbrennkammersystem. Die Industrie-Feuerung 38 (1986), S. 90/95.
- [21] *Bartelds, H.; J. W. J. Gielen; G. Brem*: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Dibenzodioxine und polychlorierte Dibenzofurane aus Verbrennungsanlagen – Emissionen und deren Bekämpfung. VDI-Berichte Nr. 574 (1985).
- [22] *Ruby, W. A.; B. Dellinger; D. L. Hall; S. L. Mazer*: High-temperature gas-phase formation and destruction of polychlorinated dibenzofuranes. Chemosphere 14 (1985).
- [23] *Vogg, H.; H. Hunsinger; A. Merz; L. Stieglitz; J. Vehlow*: Organische Spurenschadstoffe – Stand der Erkenntnisse zum Thema Dioxine/Furane.

- [24] *Hasenkopf, O.; A. Nonnenmacher; E. Aucher; H. Hagenmaier; M. Kraft*: Wirksamkeit von Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Dioxinminderung in Müllverbrennungsanlagen. VGB-Kraftwerkstechnik 67 (1987) Nr. 11, S. 1069/1073.
- [25] *Hagenmaier, H.; H. Bunner; R. Haag; M. Kraft*: Mechanismen der Bildung und Zerstörung von Dioxinen in Abfallverbrennungsanlagen. VGB-Fachtagung „Müllverbrennung 1989“, 14. Oktober 1986, Essen.
- [26] *Schetter, G.*: Dioxin- und Furanemissionen aus Müllverbrennungsanlagen. Müll und Abfall 2 (1989), S. 2/16.
- [27] *Vogg, H.; L. Stieglitz*: Thermal behaviour of PCDD, PCDF in fly ash from municipal incinerations. Chemosphere 15 (1986), S. 1373/1378.
- [28] *Jeschar, R.; R. Scholz; N. Schopf*: Heißentswefelung in einem Drallbrennkammer-system und einem isothermen Rohrreaktor. VDI-Berichte 574 (1985).
- [29] *Mehlmann, N.; R. Peschen; R. Jeschar; N. Schopf*: Kalkprodukte für die trockene Rauchgasreinigung. Brennstoff-Wärme-Kraft 39 (1987) Nr. 11, S. 479/481.
- [30] *Horch, K.; G. Mützenreich*: Feuerungsautomatisierung für Abfallverbrennungsanlagen. In: *Thomé-Kozmiensky, K. J.*, Müllverbrennung und Umwelt 2, Berlin: E. Freitag-Verlag für Umwelttechnik 1985.
- [31] *Wintrich, F.*: Entwicklung und erste Betriebserfahrungen mit einem neuen Feuerleistungsregelungskonzept für Müllverbrennungsanlagen. VGB-Kraftwerkstechnik 69 (1989) Nr. 10, S. 998/1003.
- [32] *Rennert, K. D.*: Primärmaßnahmen zur Schadstoffeinbindung bei Müllverbrennungsanlagen. VGB-Fachtagung „Thermische Abfallverwertung 1989“, 22. September 1989, Essen.
- [33] *Kassebohm, B.*: Düsseldorfer Müll — sauber verbrannt. Umwelt 17 (1987) Nr. 4, S. 179/181.
- [34] *Leitmeir, E.; J. Hoepfner*: Thermische Abfallverwertung. Sonderdruck der Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik, März 1987.
- [35] *Martin, J.; E. Leitmeir; G. Schetter*: Müllverbrennung und Umwelt — Technische Realisierung nach dem System Martin. Müllverbrennung 1986, HdT Essen, 21./22. Januar (1986).
- [36] *Reimann, D. O.*: Optimierung der Rostfeuerung für Hausmüll. Phoenix international, Zürich, Bd. 6, 2 (1988).
- [37] *Jochem, M.*: Stand der Rostfeuerungstechnik und Entwicklungstendenzen. Entsorgungspraxis — Spezial 10, Bertelsmann Fachzeitschriftenverlag (1989) 12, S. 28/36.
- [38] *Vogg, H.; H. Hunsinger; A. Merz; L. Stieglitz; J. Vehlow*: Head-end-Techniken zur Dioxinminderung; VDI-Berichte 895 (1991).
- [39] *Scholz, R.; R. Jeschar; O. Carlowitz*: Zur Thermodynamik von Freistrahlen. Gas wärme international 33 (1984) Nr. 1, S. 22/27.
- [40] Institut für Energieverfahrenstechnik der TU Clausthal: Messungen MHKW Hamm 1989. Clausthal (1989).
- [41] *Hühnlich, Th.; R. Jeschar; R. Scholz*: Sorptionskinetik von SO₂ aus Verbrennungsabgasen bei niedrigen Temperaturen. Zement-Kalk-Gips 44 (1991) Nr. 5, S. 228/237.
- [42] *Schetter, G.; J. Martin*: Gemeinsame Verbrennung von Müll und Klärschlamm auf dem Rückschubrost. VGB-Kraftwerkstechnik 65 (1985) Nr. 11, S. 1038/1044.
- [43] *Reimann, D. O.*: Direktverbrennung von entwässertem Klärschlamm gemeinsam mit Müll. VGB-Kraftwerkstechnik 69 (1989) Nr. 12, S. 1184/1188.