

# VDI BERICHTE 895

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

VDI-GESELLSCHAFT ENERGIETECHNIK

## PROZESSFÜHRUNG UND VERFAHRENSTECHNIK DER MÜLLVERBRENNUNG

Tagung Essen, 18. und 19. Juni 1991

VDI VERLAG

### Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen

Prof. Dr.-Ing. R. Scholz VDI, und Dipl.-Ing. M. Beckmann, Clausthal

**Zusammenfassung:** Ausgehend von einer allgemeinen Darstellung von Gesichtspunkten, die bei der Verbrennung von Abfallstoffen grundsätzlich zu beachten sind, werden in diesem Beitrag verschiedene Möglichkeiten der Verbrennungsführung fester Restabfallstoffe aus dem Bereich Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle usw. sowie der Einfluß der jeweiligen Gestaltung der Verbrennungsführung auf die Begrenzung der Schadstoffemissionen durch Primärmaßnahmen diskutiert.

#### 1. Einleitung

Die Entsorgung von Restmüll aus dem Bereich Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle usw. auf Rostfeuerungen zählt seit Jahrzehnten zum Stand der Technik, der sich durch Erkenntnisse insbesondere auf dem Gebiet der Verbrennungsführung ständig erneuert. Erfahrungen mit Rostfeuerungsanlagen für Müll reichen bis in das vorige Jahrhundert zurück, wie z.B. in /1/ über Anlagen in England, Deutschland, Frankreich, Schweden, Österreich/Ungarn usw. berichtet wird. Die Verbrennung stellt nur einen Teilprozeß der thermischen Behandlung von Restmüll bzw. Abfallstoffen dar und ist durch weitere Verfahren wie z.B. Vorbehandlung, Homogenisierung, Schadstoffentfrachtung des Restmülls sowie Schlackennachbehandlung, Rauchgasreinigung usw. zu ergänzen. Ein Verbrennungskonzept muß ein möglichst niedriges Niveau an Schadstoffen (CO, CxHy, NOx, Dioxine, Furane, HCl, Schwermetalle usw.) gewährleisten. Nach der Prozeßoptimierung unter den Gesichtspunkten der Schadstoffminimierung ist gegebenenfalls die energetische Nutzung der heißen Rauchgase anzustreben. Weiterhin wichtig ist die Stellung der Verbrennung (thermi-

schen Restmüllbeseitigung) als Entsorgungsverfahren innerhalb eines gesamten Abfallkonzeptes. Hierin stehen an erster Stelle die Forderungen

- Vermeiden
- Vermindern

von Abfällen.

Für die danach verbleibenden Stoffe schließt sich die Forderung nach einer stofflichen Verwertung von Abfällen an. Dies betrifft allgemein Recyclingverfahren, die unter angemessenem Aufwand (z.B. an Energie) einen Wiedereinsatz der Abfallstoffe in einem Produktionsprozeß zum Ziel haben.

Nach den Strategien Vermeiden, Vermindern und stoffliches Verwerten verbleiben Reststoffe, die entsorgt werden müssen. An ein Entsorgungsverfahren für Restabfallstoffe sind u.a. folgende Anforderungen zu stellen:

- Inertisierung,
- Entsorgung der zum Teil 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.

Die derzeitige Situation der Entsorgung von Müll aus dem Bereich Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle usw. geht aus Bild 1 hervor. Dabei sei deutlich hervorgehoben, daß die absoluten Mengen (Bild 2) durch die o.g. Strategien Vermeiden, Vermindern und stoffliches Verwerten künftig zurückgehen sollten, was u.a. zur Folge hat, daß der danach verbleibende Müll (Restmüll) sich laufend mit der Zeit hinsichtlich

seiner Zusammensetzung und Eigenschaften ändern dürfte. Dem entsprechend muß auch die Verbrennungsführung an den verbleibenden Müll (Restmüll) angepaßt werden. Restmüll kann somit nicht genau definiert werden, sondern ist das Ergebnis des jeweiligen Standes der Strategien Vermeiden, Vermindern, Verwerten.

Bei Verbrennungsverfahren einschließlich der Abgasreinigungsverfahren sind heute teilweise sehr scharfe Auflagen zu beachten. Die zugehörigen Meßverfahren zur Emissionsüberwachung sind entsprechend weiterentwickelt worden. Trotzdem wird die Restmüllverbrennung häufig wesentlich kritischer betrachtet als andere Verfahren wie z.B. Rotte o. dgl., bei denen man noch nicht in der Lage ist die Emissionen in dem Maße wie bei Verbrennungsprozessen zu erfassen. Bei der Bewertung unterschiedlicher Entsorgungsverfahren innerhalb eines gesamten Abfallkonzeptes ist es jedoch notwendig, jeweils gleiche Maßstäbe anzulegen bzw. die jeweiligen absoluten Emissionsströme bewertend gegenüberzustellen. Während man bei der Verbrennung ständig Schritte unternimmt, die eine Senkung des Energieaufwandes und der Emissionen beinhalten, ist man in anderen Bereichen zunächst noch bei der Aufgabe, die Emissionen überhaupt grob zu erfassen bzw. zu bilanzieren.

## 2. Charakterisierung von Müll - Beispiel Hausmüll

Restabfallstoffe aus dem Hausmüllbereich, die einer thermischen Entsorgung zugeführt werden sollen, sind verglichen mit fossilen Brennstoffen durch eine starke Heterogenität sowohl bezüglich ihrer stofflichen Zusammensetzung als auch ihrer Konsistenz, Form und Größe gekennzeichnet.



### 2.1. Zusammensetzung

Bei Hausmüll kann hinsichtlich der Fraktionen wie in Bild 3 dargestellt unterschieden werden. Die bundesweit durchgeführten Analysen weisen sowohl regionale als auch saisonbedingte Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung aus. Durch die verstärkte Einführung der getrennten Wertstoffsammlung war von 1979/80 bis 1983/85 eine Verminderung der Massenkonzentration der Fraktionen Papier/Pappe von  $\xi_P=18,7\%$  auf  $\xi_P=16,0\%$  und der Fraktion Glas von  $\xi_G=11,6\%$  auf  $\xi_G=9,2\%$  zu verzeichnen. Die Kunststoffmassenkonzentration  $\xi_K$  verringerte sich in dem betrachteten Zeitraum von  $\xi_K=6,1\%$  auf  $\xi_K=5,4\%$ , was u.a. auf eine Abnahme der Wandstärken bei Verpackungen zurückgeführt werden kann /2/. Für die Massenkonzentration  $\xi_P$  im Hausmüll wird eine weitere Abnahme in den kommenden Jahren bis auf  $\xi_P=12,0\%$  erwartet /2/. Bei Annahme einer steigenden Sammlung und Verwertung des Altglasmassenstromes von gegenwärtig  $\dot{m}_G=1,1$  Mio t/a auf  $\dot{m}_G=1,75$  Mio t/a /2/ kann die Massenkonzentration  $\xi_G$  im Hausmüll gleichzeitig auf ca.  $\xi_G=6,5\%$  reduziert werden.

### 2.2. Verbrennungstechnische Daten

Verglichen mit fossilen Brennstoffen ist Hausmüll in den Bereich "schwieriger" Brennstoffe einzuordnen.

Hinsichtlich des Heizwertes bei verschiedenen Hausmüllzusammensetzungen ist folgendes anzumerken:

- Für die in Bild 3 angegebene Zusammensetzung von Hausmüll (A) ergibt sich ein mittlerer Heizwert von  $h_A=8,519$  MJ/kg (Bild 4).
- Die weitere Reduzierung der Massenkonzentrationen  $\xi_P$  und  $\xi_G$  wirkt sich, wie in Bild 5 dargestellt, nur gering auf eine Veränderung des mittleren Heizwertes aus (B), da in diesem Zusammenhang davon ausgegangen werden kann, daß die Wertstoffeffassung beider Fraktionen verhältnismäßig gleich erfolgt ( $h_B=8,339$  MJ/kg).

- Wesentlich mehr Einfluß auf den mittleren Heizwert übt die Kunststofffraktion aus. In Bild 6 ist die Veränderung des mittleren Heizwertes in Abhängigkeit von der Massenkonzentration  $\xi_K$  jeweils für die Zusammensetzungen A und B (Bild 5) dargestellt. Erfolgt neben der Reduzierung der Massenkonzentrationen  $\xi_P$  und  $\xi_G$  (B) eine weitere Abnahme der Massenkonzentration  $\xi_K$  z.B. auf  $\xi_K=3\%$ , ergibt sich ein Heizwert von ca.  $h_C=7,5$  MJ/kg (C) (Bild 6).
- Wird weiterhin ein Schwanken des Wassergehaltes  $\xi_W$  des Hausmülls berücksichtigt, so kann ausgehend von der Zusammensetzung A (Bild 3) für eine Schwankungsbreite des Wassergehaltes  $\xi_W$  von z.B.  $\xi_{W,D}=55\%$  bis z.B.  $\xi_{W,E}=20\%$  eine Heizertschwankung von  $h_D=5$  MJ/kg (D) bis  $h_E=10$  MJ/kg (E) ermittelt werden.

Hinsichtlich der Feuerraumtemperatur  $\vartheta_F$  sind folgende Gesichtspunkte zu beachten:

- Der Einfluß der Luftzahl  $\lambda$  auf die Feuerraumtemperatur für die Zusammensetzungen A bis E ist in Bild 7 dargestellt. Es ist einerseits für die Erreichung einer hohen Feuerraumtemperatur und andererseits auch für die Verminderung des Abgasvolumens und somit für die Entlastung nachgeschalteter Aggregate sinnvoll, den Luftüberschuß so gering wie möglich zu halten.
- Aufgrund des relativ niedrigen Mindestluftbedarfes  $l_{min}$  für die Verbrennung von Hausmüll ist der Einfluß einer möglichen Luftvorwärmung (Luftvorwärmungstemperatur  $\vartheta_V$ ) zur Steigerung der Feuerraumtemperatur wie in Bild 8 beispielhaft für die Zusammensetzung A dargestellt gering.
- Bei Einbeziehung von Wärme- oder Kühlungsverlusten (z.B. Rostkühlung) verringert sich die Feuerraumtemperatur stark. Beispielsweise ist für das Erreichen einer Feuerraumtemperatur von  $\vartheta_F=1200$  °C bei Zugrundelegen einer relativen Wärmeabfuhr

$\dot{Q}_{ab}/\dot{Q}_{zu}=20$  % bei der Zusammensetzung A eine Luftzahl von  $\lambda=1,4$  erforderlich (Bild 8).

Für die Auslegung des Feuerraumes sowie der nachgeschalteten Einrichtungen ist u.a. die Kenntnis des Abgasvolumens  $v_f$  wichtig (Bild 9).

Für den Verbrennungsprozeß weiterhin von Bedeutung sind:

- das Reaktions- und Zündverhalten,
  - + bei Hausmüll kann erst oberhalb einer Temperatur  $\vartheta_z$  von  $\vartheta_z=400$  °C mit einer Zündung gerechnet werden,
- die Schüttdichte  $\rho_{Sch}$  und die Schütthöhe  $\delta_{Sch}$ .
  - + Die Schüttdichte schwankt zwischen  $\rho_{Sch}=150$  kg/m<sup>3</sup> bis  $\rho_{Sch}=350$  kg/m<sup>3</sup> bei Wassergehalten  $\xi_w=10$  % bis  $\xi_w=50$  %.
  - + Bei der geringen Schüttdichte und dem verhältnismäßig niedrigen Heizwert ergibt sich eine ebenso geringe Energieumsetzungsdichte.
  - + Bei dem auf die Schütthöhe bezogenen Druckverlust ist mit Größenordnungen von  $\Delta p_{Sch}/\delta_{Sch}=2$  mbar/100 mm zu rechnen. Je nach Grad der Müllverdichtung kann es hierbei erhebliche Abweichungen geben.

### 2.3. Schadstoffeintrag

Die Situation des Schadstoffeintrages mit dem Hausmüll stellt sich wie folgt dar:

- Eine Erfassung aller im Hausmüll enthaltenen Schadstoffe ist praktisch nicht möglich.
- Für die im Hausmüll enthaltenen Schadstoffe gibt es nur sehr wenige Erhebungen.
- Die einzelnen Angaben bzgl. des Schadstoffgehaltes lassen sich aufgrund unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung schlecht vergleichen.
- Eine Erfassung einzelner Stoffe liegt z.B. in Bild 10 vor.

Verglichen mit fossilen Brennstoffen liegen die Gehalte an Schwermetallen und Chlor im Hausmüll um mehrere Zehnerpotenzen höher. Dieser Tatsache ist durch dem Verbrennungsprozeß nachgeschaltete Einrichtungen der Rauchgasreinigung, Schlacken- und Filterstaubnachbehandlung in besonderer Weise Rechnung zu tragen.

### 2.4. Einfluß der Vorbehandlung

Hinsichtlich der Verbrennungstechnik kommt der Vorbehandlung, d.h.

- Homogenisierung,
- Schadstoffentfrachtung,
- Brikettierung u.a.

ein hoher Stellenwert zu.

Aus der Sicht der mechanischen Verfahrenstechnik können die einzelnen Teilprozesse, die für eine Behandlung des Hausmülls vor einer Verbrennung zur Anwendung gelangen, wie folgt unterteilt werden:

- Zerkleinern,
- Sortieren,
- Homogenisieren,
- Verdichten.

In das Fachgebiet der Aufbereitungstechnik sind Verfahren wie

- Extraktion,
- Lösen,
- Laugen usw.

einzuordnen.

Durch Vorbehandlungsmaßnahmen sollen in feuerungstechnischer Hinsicht

- 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

erreicht werden. Wie in Bild 11 dargestellt führt eine Verminderung der Heizwertschwankung bei einem vorgegebenen einzuhaltenden Wärmestrom  $\dot{Q}$  zu einer Verringerung der Schwankung des Müllmassenstromes  $\dot{m}_M$ . Desgleichen führt bei gleichbleibendem Müllmassenstrom  $\dot{m}_M$  eine Verringerung der Heizwertschwankung zu einer entsprechenden Verringerung der Schwankung des abgegebenen Wärmestromes  $\dot{Q}$ .

Wird eine Behandlung des Restabfalls der Verbrennung vorgeschaltet, so sind den o.g. Vorteilen, die auf den Verbrennungsprozeß wirken,

- der Energiebedarf z.B. der Homogenisierungseinrichtungen,
- deren mechanischer Verschleiß sowie
- der Einfluß auf die Gesamtemissionen bei einer Schadstoffentfrachtung u.a.

gegenüberzustellen. Es ist deshalb unter der Vorgabe der entsprechenden Randbedingungen jeweils zu untersuchen, ob eine Vorbehandlung auf den Gesamtprozeß positive Wirkungen ausübt.

### 3. 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 (Brennstoffe) gasförmiger, flüssiger sowie staubförmiger Konsistenz einerseits und Abfälle (Brennstoffe) 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 (Brennstoffen), Zerstäubbarkeit bei flüssigen Abfällen (Brennstoffen) usw. 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 /z.B. 4,5/. Dabei ist das erste Teilsystem ausschließlich unter den Gesichtspunkten eines möglichst hohen Ausbrandes des Feststoffes und das zweite Verbrennungssystem 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 usw. werden im folgenden nur soweit erforderlich angesprochen. Für eingehende Betrachtungen zu Grundsätzen der Verbrennung sei auf das Schrifttum /z.B. 4 bis 11/ verwiesen. Der Übersichtlichkeit wegen seien die maßgeblichen Gesichtspunkte hier stichpunktartig wiederholt.

#### 3.1. Gasförmig, flüssige, staubförmige Stoffe

(z.B. Nachverbrennung von Abgas und Flugstaub der Rostfeuerungsstufe)

##### 3.1.1. Strömungs- und Vermischungsverhältnisse

- Es ist einzugehen auf eine gute Mischungsintensität für ein "stabiles" Verbrennen und Zünden (z.B. zum Zünden von Stoffen mit wenig flüchtigen Bestandteilen zu Beginn nur erforderliche Mindesterstluft zugeben).
- Es ist eine hohe Mischungsintensität ("Rührkessel-element") anzustreben, um ein Feld wenig unterschiedlicher Temperaturen zu erzeugen und um den gesamten Reaktionsraum nutzen zu können; d.h. um gleichmäßige

Reaktionsbedingungen zu ermöglichen: für

- + Ausbrand,
  - + Schadstoffminderung,
  - + Additivdosierung (falls erforderlich),
  - + hohe Energieumsetzungsdichte,
  - + Bewältigung großer Massenströme,
  - + kleine Baugröße.
- Für hohe Anforderungen (optimaler Restausbrand) ist gegebenenfalls die Nachschaltung eines "Kolbenströmer"-Elementes (keine "Rückvermischung") im Anschluß an das vorgenannte "Rührkessel"-Element erforderlich.
- Es ist eine ausreichende mittlere Verweilzeit und ein geeignetes Verweilzeitspektrum zur Verfügung zu stellen.

### 3.1.2. Trennung der Verbrennung und Wärmeübertragung

- Durch Vermeidung der Wärmeauskoppelung während der Verbrennung und wegen der damit verbundenen "heißen" Wände (feuerfest, z.B. >1000 °C) wird ein "Einfrieren" von Reaktionen an den Wänden verhindert (keine Quencheffekte).
- Auch bei Abfällen mit niedrigen Heizwerten kann in Verbindung mit niedrigen Luftzahlen ein entsprechend hohes Temperaturniveau (z.B. um 1200 °C) ermöglicht werden (nahezu adiabate Verbrennung, gegebenenfalls Verzicht auf Luftvorwärmung und Zusatzfeuerung möglich).
- Damit verbunden ist die Wärmeübertragung über einen Abhitzeessel vorzusehen (Energienutzungskorzept).

### 3.1.3. Variable Einstellung eines gewünschten Temperaturniveaus

Das erforderliche Temperaturniveau zur

- Optimierung von Reaktionsbedingungen,
- Schadstoffminimierung,
- Vermeidung des Überschreitens von Ascheerweichungspunkten
- u.v.a.

kann z.B. geschehen durch:

- Luftüberschuß,
- Wassereindüsung,
- Rauchgasrückführung in
  - + die Verbrennungsluft,
  - + den Verbrennungsraum.

### 3.1.4. Schadstoffbildungs- und -abbaumechanismen

Mit den vorgenannten Gesichtspunkten zur Mischungs-, Temperatur- und Verweilzeitführung muß die Prozeßführung in Hinblick auf die Schadstoffbildungs- und Schadstoffabbaumechanismen gestaltet werden.

Schadstoffe bei technischen Verbrennungsprozessen lassen sich in solche, die durch die jeweilige Prozeßführung beeinflussbar sind und in Schadstoffe, die unabhängig von der Prozeßführung entstehen, unterscheiden. Entsprechend werden die Maßnahmen, die zu einer Reduzierung von Schadstoffen unmittelbar während der Verbrennungsführung führen, als Primärmaßnahmen und solche Maßnahmen, die nach der Verbrennung im kalten Abgas durchgeführt werden, als Sekundärmaßnahmen unterschieden. Im Zusammenhang mit der Verbrennungsführung bei Müll auf Rostfeuerungsanlagen sollen im folgenden nur Primärmaßnahmen behandelt werden, zu Sekundärmaßnahmen sei auf das Schrifttum verwiesen.



### 3.1.4.1. Ausbrand (CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, Ruß usw.)

Eine hohe Qualität des Verbrennungsprozesses setzt einen hohen Feststoffausbrand und einen niedrigen Gehalt an CO in den Abgasen voraus. Sowohl der Rest-C-Gehalt der festen Verbrennungsrückstände, (z.B. Flugstaub) als auch der CO-Gehalt der gasförmigen Bestandteile und Ruß, der aus Crackprozessen in der Gasphase und einer nachfolgenden Agglomeration der Einzelelemente entstehen kann, werden maßgeblich von den Mischungs- und Verweilzeitbedingungen, dem Temperaturniveau sowie der Luftzahl bestimmt. Hinsichtlich des Verweilzeitverhaltens unterscheidet man in der chemischen Verfahrenstechnik zwei Grenzfälle, den idealen Rührkesselreaktor und den idealen Rohrreaktor. In Bild 12 ist für diese Grenzfälle das Abbauverhalten von CO in Abhängigkeit von der Verweilzeit  $t$  dargestellt. Es zeigt sich, daß der ideale Rohrreaktor für den Abbaugrad zunächst die geeignetere Reaktorcharakteristik aufweist, es wird jedoch dabei vorausgesetzt, daß ein einheitliches Konzentrations- und Temperaturprofil über dem Reaktionsquerschnitt vorliegt, was wiederum die Vorschaltung eines Rührkessелеlementes erfordert. Die Forderung nach einer einheitlichen Temperaturverteilung läßt sich auch nur dadurch erfüllen, daß auf eine Wärmeauskoppelung in dem Prozeßraum verzichtet wird, d.h. Quencheffekte in den Reaktionszonen vermieden werden. Weiterhin maßgebend für den CO-Abbau ist das Temperaturniveau. Bei zu hohem Luftüberschuß setzt durch Herabsinken der Reaktionstemperatur eine erhöhte CO-Bildung ein. Ein zu geringer Luftüberschuß zieht ebenfalls eine unvollkommene Verbrennung nach sich und führt somit auch zu einer erhöhten CO-Bildung. Der oxidative Abbau von Kohlenwasserstoffen erfolgt wesentlich schneller als die Weiteroxidation des als Zwischenprodukt gebildeten CO /12/. Verfahrenstechnisch ist die Erhöhung der Verweilzeit (z.B. nachgeschalteter Rohrreaktor) für den CO-Abbau eine sehr wirksame Maßnahme.

### 3.1.4.2. Stickstoffoxide

Die Herkunftspfade für Stickstoffoxide sind bekannt. Sie lassen sich in thermisches-NO<sub>x</sub>, "Prompt"-NO<sub>x</sub> und "Brennstoff"-NO<sub>x</sub> unterscheiden /z.B. 13, 14, 15/. Thermisches-NO<sub>x</sub> entsteht in technischen Feuerungen durch die Reaktion von atomarem Sauerstoff und Stickstoff der Verbrennungsluft insbesondere bei hohen Temperaturen ( $\vartheta_F > 1500$  °C) und entsprechender Verweilzeit. Aufgrund der Verbrennungstemperaturen in Rostfeuerungsanlagen, die unterhalb  $\vartheta_F = 1500$  °C liegen, ist somit die Bildung von thermischem-NO<sub>x</sub> wenig wahrscheinlich. Zur Steuerung des Temperaturniveaus bzw. der Temperaturführung längs des Verbrennungsweges ist daher z.B. eine Rauchgasrückführung nicht erforderlich, jedoch gegebenenfalls zur Mischungsintensivierung (s.u) in Erwägung zu ziehen.

Die Bildung von Brennstoff-NO<sub>x</sub> aus im Brennstoff organisch gebundenem Stickstoff kann durch Primärmaßnahmen wie Luft- oder Brennstoffstufung, d.h. Steuerung des Sauerstoffpartialdruckes über dem Verbrennungsweg, eingeschränkt werden. Dadurch werden örtlich unterstöchiometrische Verbrennungszonen erzeugt, in denen gebildetes Stickstoffmonoxid zu einem nennenswerten Anteil zu molekularem Stickstoff reduziert wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß bei einer Luft- bzw. Brennstoffstufung der Erfolg der NO<sub>x</sub>-Minderung wesentlich vom Ort der Luft- bzw. Brennstoffzuführung abhängt /z.B. 9,16/. Die Maßnahmen zur Minimierung der NO<sub>x</sub>-Schadstoffemissionen führen insgesamt zu einer "verzögerten" Verbrennung. Sie sind also teilweise gegenläufig zu anderen Schadstoffemissionen (z.B. CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, Ruß usw.). Ein optimiertes Verbrennungskonzept ist in diesem Zusammenhang besonders wichtig (z.B. Bild 13).

### 3.1.4.3. Dioxine und Furane

Für das Auftreten von Dioxinen und Furanen in dem Abgasstrom einer Müllverbrennungsanlage können verschiedene Ursachen in Betracht gezogen werden.



1. Dioxine und Furane liegen im Müll vor und werden durch unzureichende Reaktionsbedingungen während des Verbrennungsprozesses nicht in entsprechendem Maße abgebaut.
2. In der Nachverbrennungsstufe liegen unzureichend optimierte Reaktionsbedingungen vor, so daß während des Verbrennungsprozesses aus im Müll enthaltenen chlorierten Kohlenwasserstoffen gebildete Dioxine und Furane nur ungenügend abgebaut werden können.
3. Dioxine und Furane werden aus (wegen unzureichender Verbrennung noch vorhandenen) nicht chlorierten Kohlenwasserstoffen und anorganischen Chlorverbindungen neu gebildet.

Die aufgeführten Herkunfts- (Punkt 1) bzw. Bildungswege (Punkte 2,3) von Dioxinen und Furanen bedeuten für den Verbrennungsingenieur in Hinblick auf die Minimierung der Dioxin- und Furanemissionen hinter Verbrennungsanlagen die Aufgabenstellung, mit den bisher beschriebenen Mitteln einen möglichst hohen Ausbrand in einem Feuerungskonzept sicherzustellen, d.h. geeignete Mischungsmechanismen, ein einheitliches und ausreichendes Temperaturniveau, Temperatursteuerungsmechanismen, kontrollierbare Einflußgrößen auf die einzelnen Verbrennungsteilschritte sowie eine entsprechende Größe des jeweiligen Brennraumes bzw. der Verweilzeit zu erzeugen.

Hinsichtlich des Abbaus von vorhandenen oder während des Verbrennungsprozesses gebildeten Dioxinen und Furanen kann für einen Abbaugrad (thermische Umwandlung) von  $c/c_0 = 10^{-10}$  bei ausreichender Sauerstoffkonzentration und einer Temperatur um  $\vartheta_F = 1200^\circ\text{C}$  eine mittlere Verweilzeit von  $\tau = 0,1$  s angenommen werden /6/. Unter Berücksichtigung verschiedener Verweilzeitspektren sollte bei einer Temperatur  $\vartheta_F = 1200^\circ\text{C}$  in der Nachverbrennung eine mittlere Verweilzeit von  $\tau = 2$  s ausreichend sein.

Neben den beschriebenen Bildungswegen im Verbrennungsprozeß selbst kann es auch über den Weg von Substitutionsreaktionen

bei der Abkühlung des Abgasstromes und dem Vorhandensein von Restkonzentrationen nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe und Metallchloriden z.B. im Flugstaub zu einer Neubildung von Dioxinen und Furanen kommen. Außer der Gewährleistung eines hohen Ausbrandes der gasförmigen Bestandteile sind insbesondere auch feuerungstechnische Maßnahmen, die zu einer Herabsetzung des Flugstaubanteils und dessen "vollständigem" Ausbrand führen, zu berücksichtigen. Bei einem Rostfeuerungsprozeß kann z.B. durch die Verminderung der Durchströmungsgeschwindigkeit der Flugstaubaustrag vermindert werden. Niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten in dem sich anschließenden Nachverbrennungsraum lassen somit auch nur den Transport kleinerer Flugstaubpartikeln zu, die wiederum bei entsprechender Auslegung der Nachverbrennung einen höheren Ausbrandgrad aufweisen. Bei nennenswerten Staubgehalten im heißen Abgas einer Nachverbrennungsanlage empfiehlt es sich daher, Entwicklungen weiter zu verfolgen, die bei einer hohen Temperatur (um  $1200^\circ\text{C}$ ) eine Heißgasentstaubung (Heißgaszyklon, Filterkeramik usw.) ermöglichen und auf diese Weise eine Neubildung von Dioxinen und Furanen über die "de novo"-Synthese in dem sich abkühlenden Abgas vermindern.

Die Kinetik zu Bildungs- und Abbaumechanismen von Dioxinen und Furanen sind heute noch nicht abschließend geklärt, weshalb auf das entsprechende Schrifttum verwiesen sei /6, 17 bis 23/.

#### 3.1.4.4. Nicht unmittelbar durch die Verbrennungsführung beeinflussbare Schadstoffe

Schadstoffe, die durch die Verbrennungsführung nicht unmittelbar beeinflusst werden können ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$ , Schwermetalle oder Schwermetalloxide usw.), müssen durch Sekundärmaßnahmen im "kalten" Abgasstrang beseitigt werden.

Es sei jedoch auch auf die Möglichkeit hingewiesen, z.B.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  auch bei hohen Prozeßtemperaturen durch Zufuhr von geeigneten Additiven (z.B.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) zu binden



/z.B. 24, 25/. Dabei muß jedoch betont werden, daß im Zuge der abgesenkten Emissionsgrenzwerte diese Verfahren als alleinige Minderungsmaßnahmen häufig nicht ausreichen. Sie sind deshalb die Sekundärmaßnahmen ergänzende und entlastende Verfahren.

### 3.2. Feste, nicht staubförmige Abfallstoffe

(z.B. erste Verbrennungsstufe auf einem Rost)

Der Verbrennungsablauf fester Brennstoffe gliedert sich in die Teilprozesse:

- Feststoffverbrennung,
  - + Trocknung,
  - + Entgasung,
  - + Vergasung,
  - + Ausbrand des Feststoffes,
- Nachverbrennung,
  - + Nachverbrennung der gasförmigen Bestandteile,
  - + Nachverbrennung des Flugstaubes.

Wie bereits erwähnt ist bei hohen Anforderungen an den Ausbrand und die primäre Schadstoffminderung eine Trennung (Reihenschaltung) in Verbrennungsteilsysteme erforderlich, wobei eine Grobaufteilung in

- eine "Vorverbrennungsstufe" und
  - eine Nachverbrennungsstufe
- vorgenommen werden kann, die ihrerseits wieder in entsprechende Teilsysteme untergliedert werden sollten.

Die Nachverbrennungsstufe für die Abgas- und Flugstaubnachverbrennung ist entsprechend Abschnitt 3.1. als eigenständige Feuerung zu gestalten.

Für die Vorverbrennungsstufe kommen bei Abfällen

- für eine kontinuierliche Verfahrensweise z.B.
  - + Rost,
  - + Drehrohr,
  - + Etagenöfen,
  - + Wirbelschicht und
- für eine diskontinuierliche Verfahrensweise
  - + z.B. Chargenöfen

in Betracht.

Für die Verbrennung von Müll aus dem Hausmüllbereich wird in der Regel für die Vorverbrennungsstufe eine Rostfeuerung aus folgenden Gründen bevorzugt eingesetzt:

- Es ist z.B. im Vergleich zu Wirbelschichtfeuerungen ein geringerer Aufbereitungsaufwand erforderlich.
- Die Feuerungsführung ist in Hinblick auf die einzelnen Teilprozesse dieser Vorverbrennungsstufe (Trocknung, Entgasung, Vergasung, Restausbrand) über der Rostlänge gut steuerbar (z.B. im Vergleich zu Drehrohröfen).
- Die Durchströmungs- und Mischungsbedingungen des Brennstoffbettes für die Verbrennungsluft sind in den Teilabschnitten dieser Vorverbrennungsstufe einzeln steuerbar (Unterstöchiometrie Rostanfang, Überstöchiometrie Rostende).
- Durch die Einstellung der Betthöhe und der Geschwindigkeit der Rostelementbewegung ist eine ausreichende Verweilzeitbeeinflussung für den Feststoffumsatz gegeben.

### 4. Verfahrenstechnik zu 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 auch noch nicht abgeschlossen sind.

## 4.1. Häufig verwendete Rostsysteme

### 4.1.1. Allgemeines

Die einzelnen Teilprozesse bei der Feststoffverbrennung finden häufig zusammen mit einem Teil der Wärmeauskoppelung in nahezu einem Prozeßraum statt (Bild 14). Die unmittelbare Beeinflussung der Feuerungsführung (Primärmaßnahmen) setzt eine direkte Steuerung der Mischungs- und Verweilzeitverhältnisse sowie der Temperaturverhältnisse voraus. Die große Anzahl von Einflußgrößen, die sowohl die Feststoffverbrennung als auch die Nachverbrennung unterschiedlich und zum Teil auch gegenläufig beeinflussen (Bild 15) und die bei Müll, wie beschrieben, ohnehin vorliegenden schwierigen verbrennungstechnischen Eigenschaften erschweren eine Optimierung der Verbrennungsführung insbesondere dann, wenn die für die verschiedenen Teilprozesse vorgesehenen Reaktionsräume unmittelbar ineinander übergehen.

Für die Verbrennungsführung (Bild 14) kann grob nach

- Feuerraumgestaltung,
- Verbrennungsrosttypen,
- Primärluftzufuhr und -verteilung,
- Sekundärluftzufuhr und -verteilung,
- Steuerung von Brennstoffmassentrom und Luftmassenstromverteilung

unterschieden werden, wobei jeweils die Einzelgesichtspunkte (Bild 15) zu berücksichtigen sind. Durch die Vielzahl der benannten Einflußgrößen ist für eine Optimierung der Verbrennungsführung auch ein entsprechend aufwendiges Automatisierungskonzept erforderlich /26 bis 30/.

### 4.1.2. Feuerraumgestaltung

Bei einer nahezu einstufigen Prozeßführung ist die Gestaltung der Feuerraumgeometrie sowohl unter den Gesichtspunkten Trocknung, Entgasung, Zündung, Verbrennung usw. des Feststoffes als auch gleichzeitig bezüglich der Qualität der

Nachverbrennung der gasförmigen Bestandteile und des Flugstaubes maßgebend.

Unterschieden werden bei der Feuerraumgestaltung (Bild 16)

- 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 hingegen 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. Zwar werden hierbei die Gase bzw. Abgase nun 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 erhöhen, andererseits ist mit einem günstigen Einfluß durch Konvektion auf die Trocknung und Zündung usw. zu rechnen.

Bei der Verbrennung von Müll aus dem Hausmüllbereich finden aufgrund der schwierigen verbrennungstechnischen Eigenschaften verstärkt die Gegen- und Mittelstromführung Anwendung.



### 4.1.3. Verbrennungsrosttypen

Entsprechend der unterschiedlichen Beschaffenheit der festen Brennstoffe finden zahlreiche Typen von Verbrennungsrosten Anwendung. 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, usw.

In dem Bereich der thermischen Entsorgung von Hausmüll sind die Rosttypen

- Wanderrost,
- Walzenrost,
- Vorschubrost,
- Rückschubrost

zu unterscheiden.

Wanderroste werden bei der Verbrennung von Müll aus dem Hausmüllbereich als Stufenwanderroste (Bild 17) 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. Bei dem System in Bild 18 sind z.B.

6 Walzen, jeweils stufenlos regelbar, in einem Neigungswinkel von  $\alpha_R=30^\circ$  angebracht.

Bei den Vorschubrosten (Bild 19) 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 Austrag 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 der kontinuierlichen Neigung des im Bild 19 dargestellten 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 größerer Brennstofffraktionen bzw. während des Prozesses gebildeter Agglomerate.

Rückschubroste (Bild 20) weisen i.d.R. 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 ausgedehnteren Abbrandzone /33/. Beide Rosttypen können natürlich für einen ausreichenden Ausbrand ausgelegt werden.



#### 4.1.4. Primärluftzufuhr und Verteilung

Der Massenstrom der als Primärluft zugeführten Verbrennungsluft bezogen auf den Gesamtluftmassenstrom beträgt ca.  $\dot{m}_p/\dot{m}_{ges}=70\%$  bis  $\dot{m}_p/\dot{m}_{ges}=80\%$ . Für die Steuerung des Verbrennungsablaufes ist die Aufteilung der Primärluft in mehrere Primärluftzonen unterhalb des Rostes erforderlich (Bild 21). Die Aufteilung des Primärluftmassenstromes auf die einzelnen Zonen gestaltet sich entsprechend den Brennstoffeigenschaften wie Wassergehalt, Anteil flüchtiger Bestandteile, Heizwert usw. unterschiedlich (Bild 22).

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 wesentlich das Einsetzen der Zündung. In der Trocknungszone sollte daher der zugehörige Primärluftanteil entsprechend klein sein (Bild 22 b) und die zur eigentlichen Reaktion erforderliche Luft (Brennstoffumsatz) vermehrt erst in den nachfolgenden Rostzonen zugeführt werden. Es ist weiter darauf zu achten, daß die Zündung des Brennstoffes nicht durch unnötig hohen Luftmassenstrom bei der Trocknung behindert wird.

Bei niedrigen Wassergehalten, d.h. bei hohen Heizwerten, ist der für die Trocknung erforderliche Rostabschnitt entsprechend gering. Die "Reaktionsluft" ist in erhöhtem Maße somit bereits in den vorderen Rostzonen zuzuführen (Bild 22 c). Inwieweit eine kontinuierliche Verteilung des Primärluftmassenstromes verwirklicht werden und an sich ändernde Betriebsbedingungen angepaßt werden kann, hängt von der Anzahl der gewählten Luftzonen ab. In diesem Zusammenhang sei ange-

merkt, daß bei betrieblichen Schwankungen des Heizwertes zwar der erforderliche Primärluftmassenstrom wie gezeigt entsprechend variiert werden kann, jedoch bei einer gewählten (projektierten) Feuerraumgestaltung (Gleichstrom-, Gegenstrom-, Mittelstromführung) diese nicht an veränderte Betriebsbedingungen angepaßt werden kann. Die Nachverbrennung hat in diesen Fällen jeweils den veränderten Verhältnissen des Gases bzw. Abgases aus dem Rostbereich Rechnung zu tragen.

Der Primärluftmassenstrom selbst kann durch entsprechende Einrichtungen vorgewärmt zugeführt werden, was insbesondere sehr positive Auswirkungen in dem Teilabschnitt Trocknung hat, für die Feuerraumtemperatur jedoch aufgrund des relativ geringen Mindestluftbedarfes bei Hausmüll von weniger großer Bedeutung ist (vgl. Bild 8). Mit einer Luftvorwärmung z.B. auf  $\vartheta_v=150\text{ }^\circ\text{C}$  kann ein erheblicher Teil der Müllfeuchtigkeit sehr effektiv schon bei der Durchströmung des Müllbettes durch Konvektion in die Gasphase überführt werden (Strahlung/Kondensation). Die Luftvorwärmtemperatur  $\vartheta_v$  sollte in Hinblick auf die Rostkonstruktion, d.h. die Schmierung, Lagerung, Wärmeausdehnung usw.,  $\vartheta_v=150\text{ }^\circ\text{C}$  nicht überschreiten /34/.

#### 4.1.5. 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  $w_o$ , Düsendurchmesser, örtliche Anordnung usw. ist dabei sehr wichtig. Bei bestehenden Anlagen beträgt der Sekundärluftmassenstrom bezogen auf den Gesamtluftmassenstrom ca.  $\dot{m}_s/\dot{m}_{ges}=20\%$  bis  $\dot{m}_s/\dot{m}_{ges}=30\%$ . Beispielhafte Anordnungen der Sekundärluftzugabe sind in Bild 23 gezeigt. Bei der Betrachtung des Vermischungseffektes beruhend auf dem Freistrahprinzip /z.B. 11, 36/ zeigt sich, wie später noch eingehender behandelt, daß nur bei einer günstigen An-



ordnung der Sekundärluftdüsen über der Querschnittsfläche Mischungsverhältnisse eines technischen Rührkessel-elementes vorliegen können. Häufig sind Austrittsgeschwindigkeiten aus Sekundärluftdüsen von  $w_0=100$  m/s erforderlich.

#### 4.1.6. Steuerung von Brennstoffmassenstrom und Luftmassenstromverteilung

Ausgehend von einem insgesamt übertragenem Wärmestrom  $\dot{Q}$  (Dampferzeugung) läßt sich über den zugeführten Müllmassenstrom  $\dot{m}_M$  ungefähr auf den jeweiligen Heizwert schließen. Damit kann über eine Müllmengensteuerung und zugehörigem absoluten Primärluftmassenstrom sowie dessen Verteilung über der Rostlänge (vgl. Bild 22) ein gewisser Grobgleich durchgeführt werden (Bild 24). Bedingt durch die schnell schwankende Müllzusammensetzung wird ein jeweils kurzfristig vorzunehmender Feinabgleich durch die Steuerung der Sekundärluftzufuhr ermöglicht, die bei Einhaltung der Grenzwerte CO und O<sub>2</sub> zu einer maximalen Temperatur  $\vartheta_F$  am Ende der Nachverbrennung führen soll (Bild 24). Danach kann weiter überlegt werden, ob durch unterschiedliche Aufteilung der Sekundärluft noch eine NO<sub>x</sub>-Minderung vorgenommen werden soll.

### 4.2. Zusätzliche Parametervariationen

#### 4.2.1. Allgemeines

In einem Verbrennungsraum, in dem die einzelnen Verbrennungsteilaufgaben einschließlich teilweiser Wärmeauskopplung in unterschiedlichen Zonen zu lösen vorgesehen sind (Bild 25), ist eine Optimierung der gesamten Prozeßführung 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, wie bereits mehrfach erwähnt, 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, 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 Restmüllverbrennung mehrere kleinere vollständige Verbrennungsanlagen (Rostfeuerungsanlagen; 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 weniger kleinere Verbrennungsanlagen mit jeweils besserer Kapazitätsauslastung zu betreiben. Damit ist ein wesentlich kleineres Mindestmüllaufkommen als bei Betrieb von nur einer großen Anlage erforderlich.

#### 4.2.2. Rostverbrennungsstufe

Häufig werden Rostfeuerungen (Bild 25) 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 ( $\lambda_{Ra}=1$ ) zu betreiben (Bild 26). 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 14 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 Abgasvolumenstromes 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 werden, so ist gegebenenfalls noch zusätzlich die Rückführung kalter gereinigter Rauchgase zur Temperatursteuerung in Erwägung zu ziehen (Bild 27). Insbesondere bei sehr feuchten Abfällen kann die Rauchgasrückführung auch zur Unterstützung der Trocknung durch Konvektion eine sehr wirkungsvolle Maßnahme sein (vgl. Abschn. 4.2.4.), wozu allerdings der rückgeführte Rauchgasstrom wenigstens eine Temperatur  $\vartheta_v=150$  °C aufweisen sollte. Dabei kann man weiter daran denken (in Bild 27 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 27,  $\lambda_R < 1$ ). Damit werden auch ohne eine verstärkte Wärmeauskoppelung 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 gewährleistet (Ausbrand bis auf Rest-Kohlenstoff 0,5 bis 0,2 Ma%) /5/. 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 (Bild 28).

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 werden eine Gleichmäßigkeit der Luftbeaufschlagung in den jeweiligen Rostzonen bewirkt und bekanntlich "Durchbläser" vermieden. Zur Flugstaubverringerung allgemein sei wiederholt, daß die Strömungsgeschwindigkeiten so klein wie möglich gehalten werden sollten.

In Verbindung mit einer Optimierung der Verbrennungsführung in der Roststufe kann in Hinblick auf die Einbindung von Schwefel und Chlor in die 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 (Bild 29), 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 Transportes des Müll/Additiv-Gemisches im Aufgabetrichter bei sehr niedrigen Temperaturen ist über die flüssige Phase (Müllfeuchtigkeit) denkbar, worauf u.a. auch Grundlagenversuche /38/ hinweisen (Bild 30). 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 /z.B. 39,40/.

#### 4.2.3. Nachverbrennungsstufe

Über die vielfältigen Schaltungsmöglichkeiten von Nachverbrennungsanlagen (schadstoffbeladene Abgase usw.), bzw. Anlagen für gasförmige, flüssige und staubförmige Abfallstoffe, ist bereits ausreichend eingegangen worden (vgl. Abschn.3.1). Daher wird hier nur noch auf einige im Zusammenhang mit der Vorstufe "Rostverbrennung" wichtig erscheinende Gesichtspunkte eingegangen.

Wie bereits erläutert ist der erste Teil der Nachverbrennung als Rührkessелеlement auszuführen. Hier ergeben sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- Bei kleinen Anlagen kann an eine überkritische Drallströmung mit sehr stark ausgeprägter innerer Rezirkulationszone 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 so groß, daß eine wirksame Verdrallung (überkritischer Drall mit innerer Rezirkulationszone) 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 31). Bei Einblasen von  $z$  Freistrahlen mit jeweils dem Massenstrom  $\dot{m}_{0i}$ , der Geschwindigkeit  $w_{0i}$  und dem Austrittsdurchmesser  $d_{0i}$  ist aufgrund des Impulserhaltungssatzes die Entwicklung des Massenstromes über der Wurfweite  $x$

$$\dot{m}_x = z \cdot 0,32 \frac{x}{d_{0i}} \sqrt{\frac{T_0}{T_x}} \dot{m}_{0i} \quad (1),$$

der Geschwindigkeitsverlauf

$$w_{xi} = \frac{1}{0,32} \frac{x}{d_{0i}} \sqrt{\frac{T_0}{T_x}} w_{0i} \quad (2),$$

und die geometrische Entwicklung des Strahlquerschnittes

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

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

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

- Eine Auslegung geschieht wie folgt:

+ Vorgabe:

- \* Der anzusaugende Massenstrom  $\dot{m}_j$  ist durch den Abgasmassenstrom  $\dot{m}_v$  vorgegeben.
- \* Die Strahllänge  $x$  (Wurfweite) (z.B. Kanallänge  $L$  in Bild 31 a oder Kanallänge  $L/2$  Bild 31 b) ist bekannt.

- \* Aus Gründen einer nicht zu hohen Temperaturabsenkung durch Einmischen des i.d.R. vergleichsweise kalten Massenstromes  $\dot{m}_0$  (Treibmittel) sollte der Massenstrom  $z \dot{m}_{0i}$ 

$$z \dot{m}_0 \leq 0,1 \dot{m}_v \quad (5)$$

betragen.

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

+ Aus den vorgenannten Gleichungen zu berechnen:

- \* der Düsendurchmesser  $d_{0i}$  der einzelnen Düsen,
- \* die jeweilige Austrittsgeschwindigkeit  $w_{0i}$ ,
- \* die Düsenzahl  $z$  für eine ausreichende Überdeckung des Einmischquerschnittes.

- Aus dem Impulserhaltungssatz, der Kontinuitätsgleichung und der geometrischen Strahlentwicklung lassen sich mit vorgegebenem  $\dot{m}_j$  die Abhängigkeiten

$$\dot{m}_0 \sim \frac{1}{w_0 \cdot z \cdot x^2} \quad (6),$$

$$w_0 \sim \frac{1}{d_0 \cdot z \cdot x} \quad (7)$$

und die für den Strahlantrieb erforderliche Leistung

$$N \sim \frac{1}{d_0 \cdot z^2 \cdot x^3} \quad (8)$$

angeben, woraus die Vielzahl der möglichen Parameterkombinationen erkennbar ist.

- Besteht z.B. die Aufgabe:

- + für einen quadratischen Querschnitt mit der Länge  $L=4$  m,

+ einen Abgasmassenstrom von  $\dot{m}_v=20$  kg/s,  
 + bei einer Mindesttemperatur von  $\vartheta_F=900$  °C,  
 + und einer Treibmitteltemperatur  $\vartheta_0=200$  °C  
 durch Freistrahlen wenigstens einmal umzuwälzen,  
 so ergibt sich für den

+ Fall Bild 31 a:	+ Fall Bild 31 b:
* $x=4$ m	* $x=2$ m
* $z=8$ Düsen	* $z=32$ Düsen
* $w_0=80$ m/s	* $w_0=80$ m/s
* $d_{0i}=0,08$ m	* $d_{0i}=0,04$ m
* $\dot{m}_0/\dot{m}_x=0,1$	* $\dot{m}_0/\dot{m}_x=0,1$

- Der größere Aufwand von  $z=32$  Düsen ist mit einer besseren Überdeckung und Durchmischung im betrachteten Querschnitt verbunden (Bild 31 a und b).

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 4.2.2. (Roststufe) hingewiesen. Geht man wieder wie dort von einer Betriebsweise mit relativ hohen Gesamtluftzahlen  $\lambda_{ges} \approx 1,8$  (Bild 25) 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 Rührkessелеlement eingerichtet werden muß (Abschnitt 3.1.1), 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  $\Delta\vartheta_F=50$  °C bis  $\Delta\vartheta_F=100$  °C gerechnet werden kann. Bei entsprechend kleinen Gesamtluftzahlen läßt sich



ein so hohes Temperaturniveau  $\vartheta_F$  erzielen, daß auch die genannte Temperaturabsenkung ohne Zusatzbrennstoff möglich wird.

- Im Zusammenhang mit sehr stark unterstöchiometrischen Verhältnissen nach der Roststufe (z.B.  $\lambda_R=0,4$ , Bild 27) erhält man zusätzliche Freiheitsgrade, die Verbrennungsführung in der Nachverbrennung zu gestalten, da das ankommende Abgas (Bild 28) 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 Weise erhält man die in Bild 32 dargestellte Aufteilung in Primär-, Sekundär- und Tertiärluft. Damit ist u.a. eine  $\text{NO}_x$ -Minderung mit Primärmaßnahmen z.B. von einem Niveau  $c_{\text{NO}_x}=1200 \text{ mg/m}^3$  (i.N.tr. bei  $\psi_{\text{O}_2}=3 \%$ ) auf etwa  $c_{\text{NO}_x}=450 \text{ mg/m}^3$  (i.N.tr. bei  $\psi_{\text{O}_2}=3 \%$ ) bei gleichzeitig sehr gutem Ausbrand ( $c_{\text{CO}} < 10 \text{ mg/m}^3$  (i.N.tr. bei  $\psi_{\text{O}_2}=3 \%$ )) möglich.
- Es sei noch erwähnt, daß bei Notwendigkeit eines Zusatzbrennstoffes daran gedacht werden kann, zur Schonung wertvoller Brennstoffe auch z.B. flüssige Abfälle zu verwenden (Voraussetzung: "sorgfältig" geführte Nachverbrennung).

### 5. Ausblick

In diesem Beitrag werden ausschließlich Möglichkeiten der Verbrennungsführung fester Restabfallstoffe aus dem Bereich Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle usw. behandelt, d.h. Primärmaßnahmen die zu einer Begrenzung der Schadstoffe  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , Ruß usw. und  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  (letztere durch eine Einbindung in die Rostasche) führen. Die vorangehenden Ausführungen zeigen, daß weitere Entwicklungen im Bereich der Primär-

maßnahmen sowohl in der Rost- als auch in der Nachverbrennungsstufe möglich erscheinen. Dazu sind jedoch teilweise noch Grundlagenuntersuchungen mit entsprechenden Parametervariationen erforderlich. In diesem Zusammenhang wird derzeit eine Pilotanlage errichtet, deren Grundschemata und veranschlagte Kapazität in Bild 33 dargestellt sind.

### 6. Literaturverzeichnis

- /1/ de Etienne, F.: Elektrizität aus Kehricht. K.U.K. Hofbuchhandlung von Julius Benkö, Budapest, 1911
- /2/ Daten zur Umwelt 1988/1989, Umweltbundesamt
- /3/ Umweltbundesamt: Berichte des Umweltbundesamtes "Chemisch-physikalische Analyse von Hausmüll". E. Schmidt-Verlag, Berlin, 1983
- /4/ Scholz, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.: Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von Abfällen. Chem.-Ing.-Tech. 62(1990) 11
- /5/ Scholz, R.; Schopf, N.: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and some Test Results of Pilot Plants. Proceedings "The 1989 Incineration Conference", Knoxville, USA, 1989
- /6/ Hasberg, W.; Römer, R.: Organische Spurenschadstoffe in Brennräumen von Anlagen zur thermischen Entsorgung. Chem.-Ing.-Tech. 60(1988) 6

- /7/ Kolb, T.; Leuckel, W.:  $\text{NO}_x$ -Minderung durch 3-stufige Verbrennung - Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone  
2. Tecflam-Seminar, Stuttgart, 1988
- /8/ Leuckel, W.; Römer, R.: Schadstoffe aus Verbrennungsprozessen. VDI-Berichte Nr. 346, 1979
- /9/ Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung.  
4. Tecflam-Eminar, Heidelberg, 1990
- /10/ Scholz, R.; Klöppner, G.; Wagner, R.: Schadstoffarme Deponiegasverbrennung durch geeignete Flammenführung. GIT Supplement 5/87 Umwelt II
- /11/ Günther, R.: Verbrennung und Feuerung.  
Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1974
- /12/ Dryer, F.L.; Glassman, I.: 14th Int. Symp. on Combustion. Comb. Inst. Pittsburgh, 1973
- /13/ de Soete, G.: Physikalisch-chemische Mechanismen der Stickstoffoxidbildung in industriellen Flammen. Gas-wärme international 30(1981), 15
- /14/ Fenimore, C.P.: Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. 13th Int. Symp. on Combustion, Comb. Inst. Pittsburgh 1971
- /15/ Kremer, H.: Grundlagen der  $\text{NO}_x$ -Entstehung und Minderung. Erdöl und Kohle- Erdgas 40(1982)
- /16/ Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.: Schadstoffarme Verbrennung in einem Drallbrennkammersystem. Die Industriefeuerung 38(1986)
- /17/ Bartelds, H.; Gielen, J.W.J.; Brem, G.: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Dibenzodioxine und polychlorierte

- Dibenzofurane aus Verbrennungsanlagen - Emissionen und deren Bekämpfung. VDI-Berichte 574, 1985
- /18/ Ruby, W.A.; Dellinger, B.; Hall, D.L.; Mazer, S.L.: High-temperature gas-phase formation and destruction of polychlorinated dibenzofuranes. Chemosphere 14(1985)
- /19/ Vogg, H.; Hunsinger, H.; Merz, A.; Stieglitz, L.; Vehlow, J.: Organische Spurenschadstoffe - Stand der Erkenntnisse zum Thema Dioxine/Furane.
- /20/ Hasenkopf, O.; Nonnenmacher, A.; Auchter, E.; Hagenmaier, H.; Kraft, M.: Wirksamkeit von Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Dioxinminderung in Müllverbrennungsanlagen. VGB-Kraftwerkstechnik 67(1987)11
- /21/ Hagenmaier, H.; Bunner, H.; Haag, R.; Kraft, M.: Mechanismen der Bildung und Zerstörung von Dioxinen in Abfallverbrennungsanlagen. VGB - Fachtagung "Müllverbrennung 1989", 14. Oktober 1986, Essen
- /22/ Schetter, G.: Dioxin- und Furanemissionen aus Müllverbrennungsanlagen. Müll und Abfall 2(1988)
- /23/ Vogg, H.; Stieglitz, L.: Thermal behavior of PCDD, PCDF in fly ash from municipal incinerations. Chemosphere 15(1986)
- /24/ Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.: Heißent-schwefelung in einem Drallbrennkammersystem und einem isothermen Rohrreaktor.  
VDI-Berichte 574 (1985)
- /25/ Mehlmann, N.; Peschen, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.: Kalkprodukte für die trockene Rauchgasreinigung. Brennstoff-Wärme-Kraft 39(1987)



- /26/ Horch, K.; Mützenreich, G.: Feuerungsautomatisierung für Abfallverbrennungsanlagen.  
In: Thome'-Kozmiensky, K.J., Müllverbrennung und Umwelt 2, E. Freitag-Verlag für Umwelttechnik, Berlin, 1985
- /27/ Wintrich, F.: Entwicklung und erste Betriebserfahrungen mit einem neuen Feuerleistungsregelungskonzept für Müllverbrennungsanlagen. VGB Kraftwerkstechnik 69(1989)10
- /28/ Rennert, K.D.: Primärmaßnahmen zur Schadstoffeinbindung bei Müllverbrennungsanlagen. VGB-Fachtagung "Thermische Abfallverwertung 1989", 22. September 1989, Essen
- /29/ Kassebohm, B.: Düsseldorfer Müll - sauber verbrannt. Umwelt 4/87
- /30/ Leitmeir, E.; Hoepfner, J.: Thermische Abfallverwertung. Sonderdruck der Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik, März 1987
- /31/ Müllverbrennungseinheit Mannheim KI
- /32/ Walzenrost, System Düsseldorf
- /33/ Martin, J.; Leitmeir, E.; Schetter, G.: Müllverbrennung und Umwelt - Technische Realisierung nach dem System Martin. Müllverbrennung 1986, HdT Essen 21./22. Januar 1986
- /34/ Reimann, D.O.: Optimierung der Rostfeuerung für Hausmüll. Phoenix international, Zürich, Bd. 6, 2 (1988)
- /35/ Jochem, M.: Stand der Rostfeuerungstechnik und Entwicklungstendenzen. Entsorgungspraxis - Spezial 10, Bertelsmann Fachzeitschriftenverlag (1989) 12

- /36/ Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.: Zur Thermodynamik von Freistrahlen. Gas wärme international 33(1984)1
- /37/ Institut für Energieverfahrenstechnik der TU Clausthal: Messungen MHKW Ha<sup>mm</sup> 1989. Clausthal, 1989
- /38/ Hühnlich, Th.; Jeschar, R., Scholz, R.: Sorptionskinetik von SO<sub>2</sub> aus Verbrennungsabgasen bei niedrigen Temperaturen. Veröffentl. demnächst
- /39/ Schetter, G.; Martin, J.: Gemeinsame Verbrennung von Müll und Klärschlamm auf dem Rückschubrost. VGB-Kraftwerkstechnik 65(1985)11
- /40/ Reimann, D.O.: Direktverbrennung von entwässertem Klärschlamm gemeinsam mit Müll. VGB-Kraftwerkstechnik 69(1989)12
- /41/ Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.: Schadstoffarme Verbrennungsführung bei unterschiedlichen Brennstoffen am Beispiel eines Drallbrennkammersystems. Chem.-Ing.-Tech. 59(1987)

Weiter verwendete Literatur:

Erbach, G.; Schöner, P.: Thermische Behandlung von Sonderabfällen. Abfallwirtschaftsjournal 2(1990)10

Schetter, G.: Simulation von Feuerräumen in Müllverbrennungsanlagen. Brennstoff-Wärme-Kraft 37(195)11

Elsässer, F.; Kohnle, K.-D.; Mross, R.: Ökologische Gegenüberstellung von Restmülldeponie

und Restmüllverbrennung. Abfallwirtschaftsjournal 3 (1990) 1/2

Eichele, G.: Aktuelle Überlegungen zur thermischen Abfallbehandlung und -verwertung. VGB-Kraftwerkstechnik 68 (1988) 1

Schetter, G.; Leitmeir, E.: Umweltverträglichkeit der thermischen Abfallverwertung. VGB-Kraftwerkstechnik 67 (1987) 2

Reimann, D.O.: Primärmaßnahmen zur Reduzierung von Emissionen am Beispiel der Rostfeuerung. Technische Mitteilungen 81 (1988) 6

Johnke, B.: Dioxinmessungen aus Hausmüllverbrennungsanlagen. Unveröffentlichtes Vortragsmanuskript VGB-Fachtagung "Thermische Abfallverwertung 1989" in Essen u. München

Leitmeir, E.; Temme, K.: Das Müllheizkraftwerk Coburg. Sonderdruck der Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik

Barniske, L.: Die Bedeutung der thermischen Behandlung in der integrierten Abfallentsorgung. November 1990

Köhne, V.; Knorth, H.; Pötsch, H.-D.: Zur Haltbarkeit feuerfester Werkstoffe in kommunalen Müllverbrennungsanlagen. VGB-Kraftwerkstechnik 68 (1988) 12

Lorber, K.E.: Die Zusammensetzung des Mülls und die durch Müllverbrennungsanlagen emittierten Schadstoffe. In: Thome-Kozmiensky, K.J., Müllverbrennung und Umwelt 2, E. Freitag-Verlag für Umwelttechnik, Berlin, 1985

Johnke, B.; Vater, C.: Hausmüllverbrennung - ein umweltverträglicher Behandlungsschritt auf einem umweltentlastenden Entsorgungsweg. Müll und Abfall 2/1989

Hägenmaier, H.; Mittelbach, G.: Versuche zum katalytischen  $\text{NO}_x$ - und Dioxinabbau im Abgas einer Müllverbrennungsanlage. VGB-Kraftwerkstechnik 70 (1990) 6

Reimann, D.O.: Dioxinmissionen - Mögliche Techniken zur Einhaltung des Dioxin-Grenzwertes von  $0,1 \text{ ng/TEQm}^3$  (Stand 1991). Abfallwirtschaftsjournal 3 (1991) 1,2

Hick, H.; Kern, W.; Killinger, E.: Anlage zum Verbrennen von Müll oder einem Müll-Klärschlammgemisch. DE 3139867/A1/ 21. April 1983



7. Formelverzeichnis:Symbole:Lateinische Symbole:

A	Fläche
c	Konzentration
d	Durchmesser
h	Höhe
L	Länge
l	Luftbedarf
m	Masse
N	Leistung
p	Druck
Q	Wärmeabfuhr
U	Umsatz
v	Abgasvolumen
w	Geschwindigkeit
x	Wurfweite
z	Düsenanzahl

Griechische Symbole:

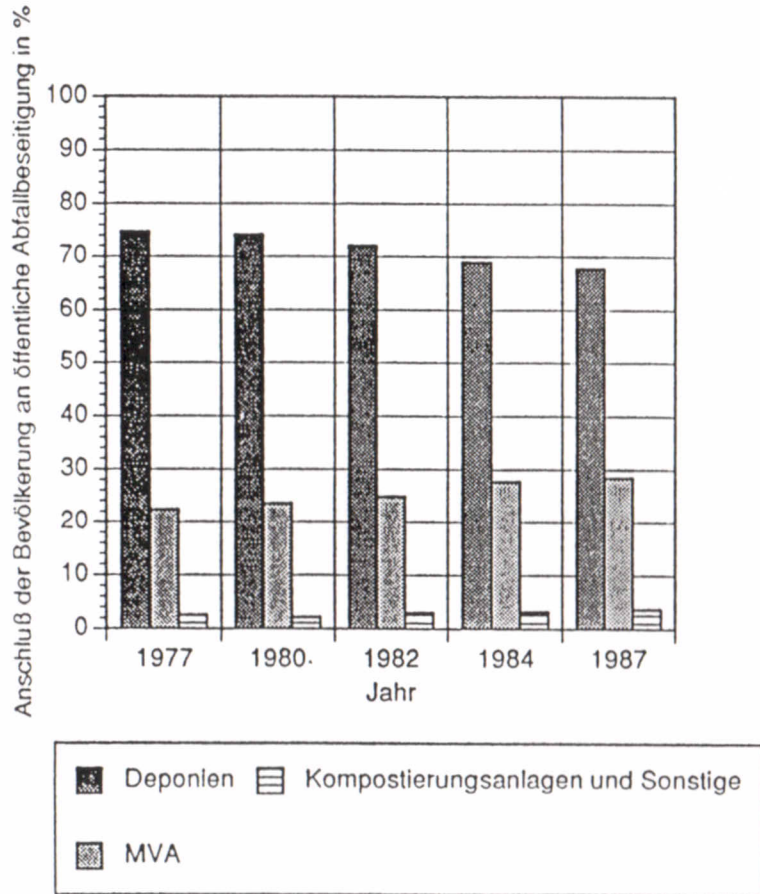
$\alpha$	Winkel der Rostneigung
$\Delta$	Differenz
$\delta$	Schütthöhe/Betthöhe
$\eta$	Wirkungsgrad
$\vartheta$	Temperatur
$\lambda$	Luftzahl
$\xi$	Massenkonzentration
$\rho$	Dichte
$\tau$	Verweilzeit
$\phi$	relative Feuchte
$\psi$	Volumenanteil

Indices:tiefgestellte Indices:

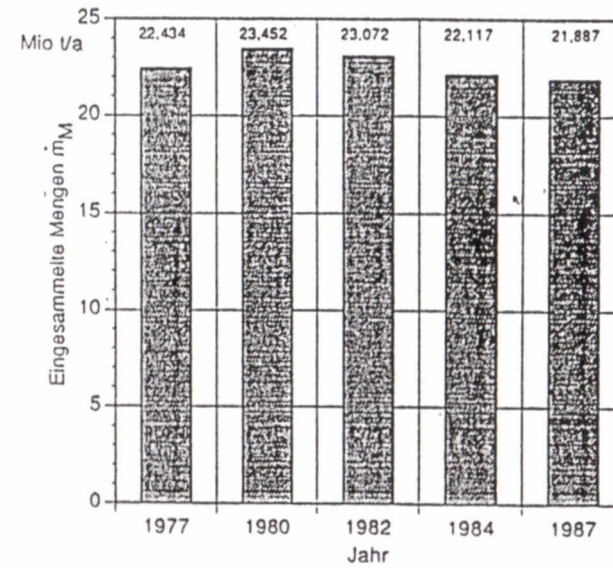
a	Anfang	s	sekundär
ab	abgeführt	Sch	Schüttung
A, B, C,		SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
D, E	verschiedene Hausmüll- analysen	t	Teil
Az	Ausbrandzone	V	Vorwärmung
CO	Kohlenmonoxid	v	Abgas
e	Ende	W	Wasser
f	feucht	x	Wurfweite
F	Feuerraum	Z	Zündung
G	Glas	zu	zugeführt
ges	Gesamt	o	Austritt
i	Komponente		
K	Kunststoff		
min	mindest		
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxid		
O <sub>2</sub>	Sauerstoff		
ö	örtlich		
P	Papier/ Pappe		
p	primär		
r	Reaktion		
R	Rost		

hochgestellte Indices:

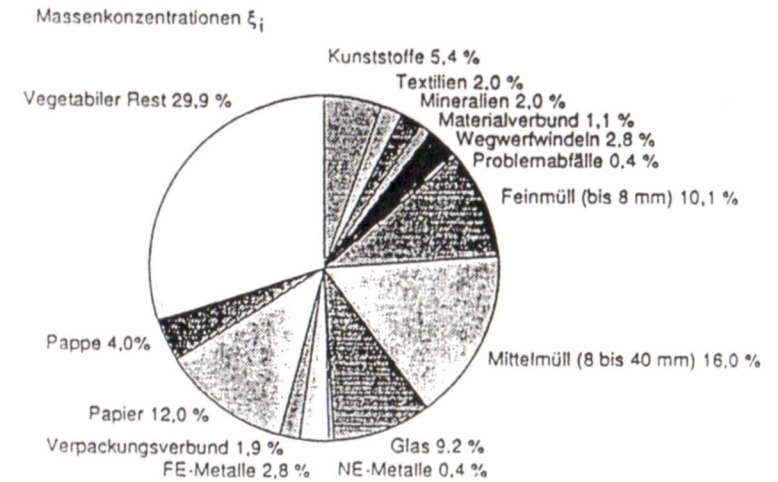
.	Strom
*	auf Längen- oder Flächeneinheit bezogen



**Bild 1:** Prozentualer Anschluß der Bevölkerung an öffentliche Abfallbeseitigungsanlagen in den alten Bundesländern 1977, 1980, 1982, 1984, 1987 /2/

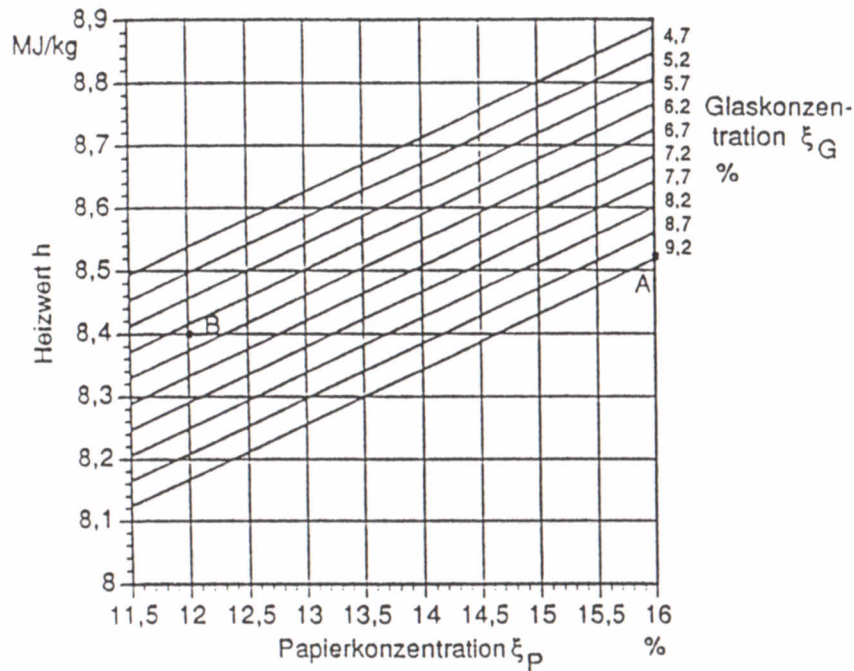


**Bild 2:** Eingesammelte Mengen  $m_M$  an Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen und Sperrmüll 1977, 1980, 1982, 1984, 1987 in den alten Bundesländern /2/

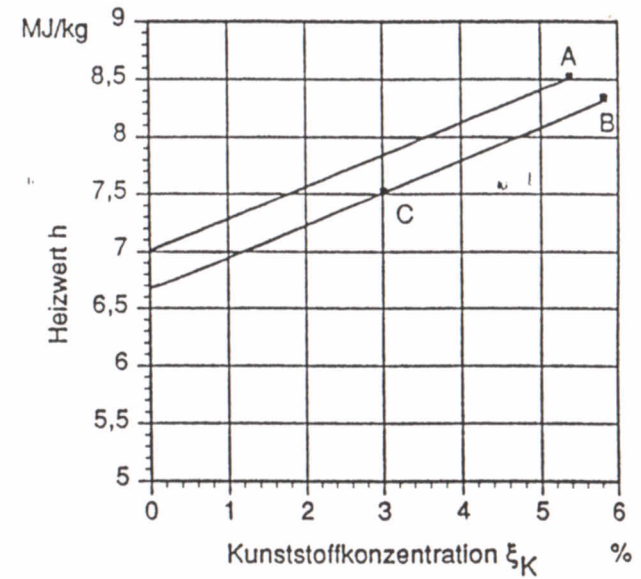


**Bild 3:** Massenkonzentrationen  $\xi_i$  der einzelnen Fraktionen in Hausmüll /2/



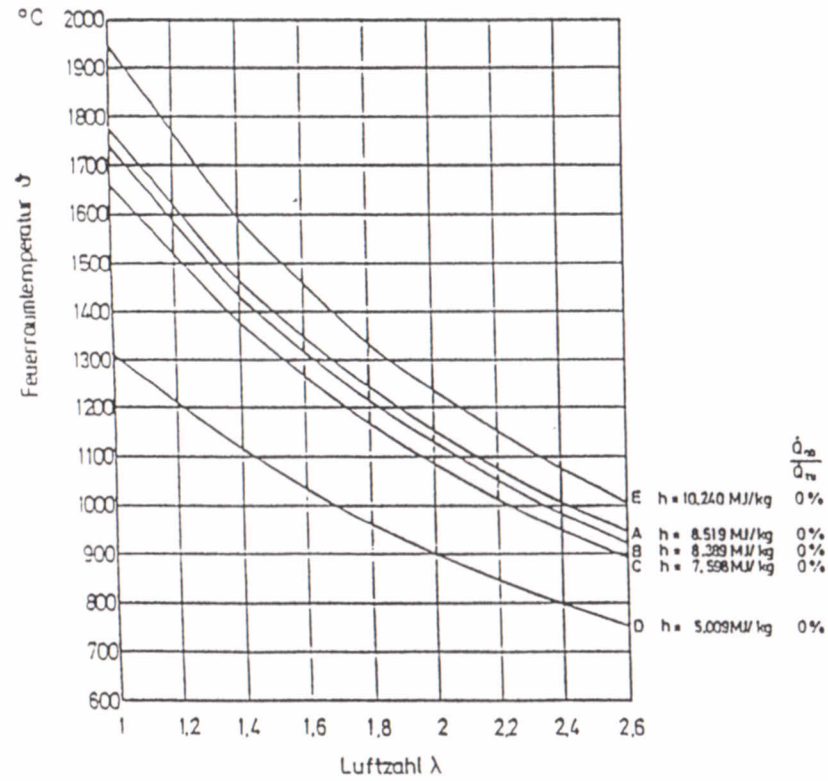


**Bild 5:** Abhängigkeit des Heizwertes h von den Glas- und Papierkonzentrationen  $\xi_G$ ,  $\xi_P$  im Hausmüll ausgehend von der Analyse 1985 (A-h<sub>A</sub>),  
 Reduzierung der Massenkonzentrationen  
 - Pappe/Papier von  $\xi_P = 16,0$  % auf  $\xi_P = 12,0$  % und  
 - Glas von  $\xi_G = 9,2$  % auf  $\xi_G = 6,5$  % (B-h<sub>B</sub>)

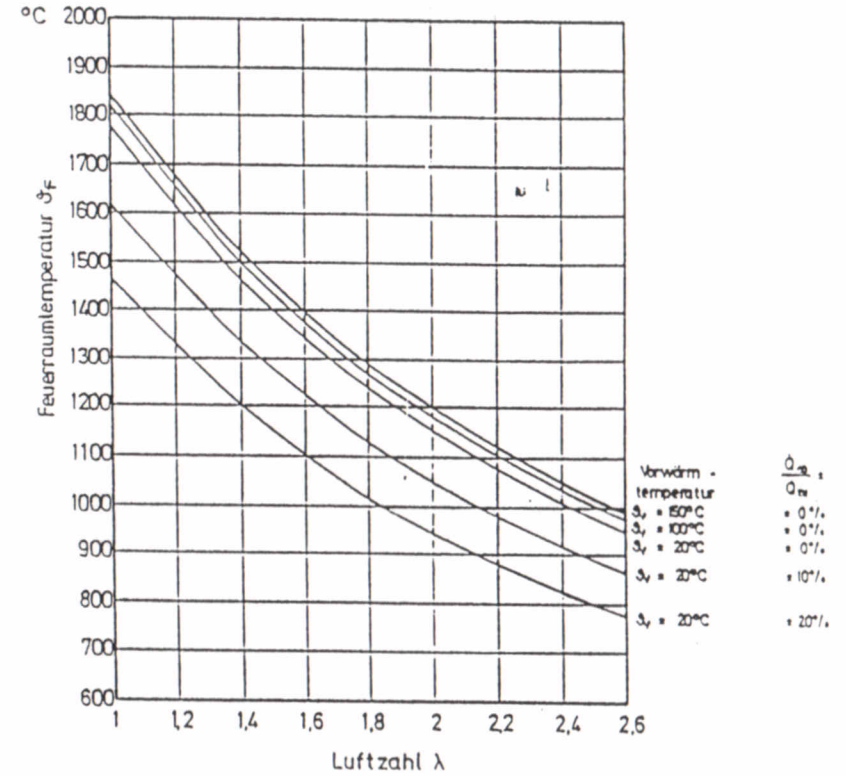


**Bild 6:** Abhängigkeit des Heizwertes h von der Kunststoffkonzentration  $\xi_K$

- A - Hausmüllzusammensetzung 1985
- B - Reduzierung der Glas- und Papierkonzentration im Hausmüll (vgl. Bild 5)
- C - Reduzierung der Kunststoffkonzentration



**Bild 7:** Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur  $\theta_F$  von der Luftzahl  $\lambda$  für verschiedene Hausmüllzusammensetzungen



**Bild 8:** Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur  $\theta_F$  von der Luftzahl  $\lambda$  für die Hausmüllzusammensetzung A (Bild 3) bei verschiedenen Luftvorwärmtemperaturen  $\theta_V$  und Einbeziehung von teilweise Wärmeauskoppelung  $\frac{\dot{Q}_{ab}}{\dot{Q}_{zu}}$



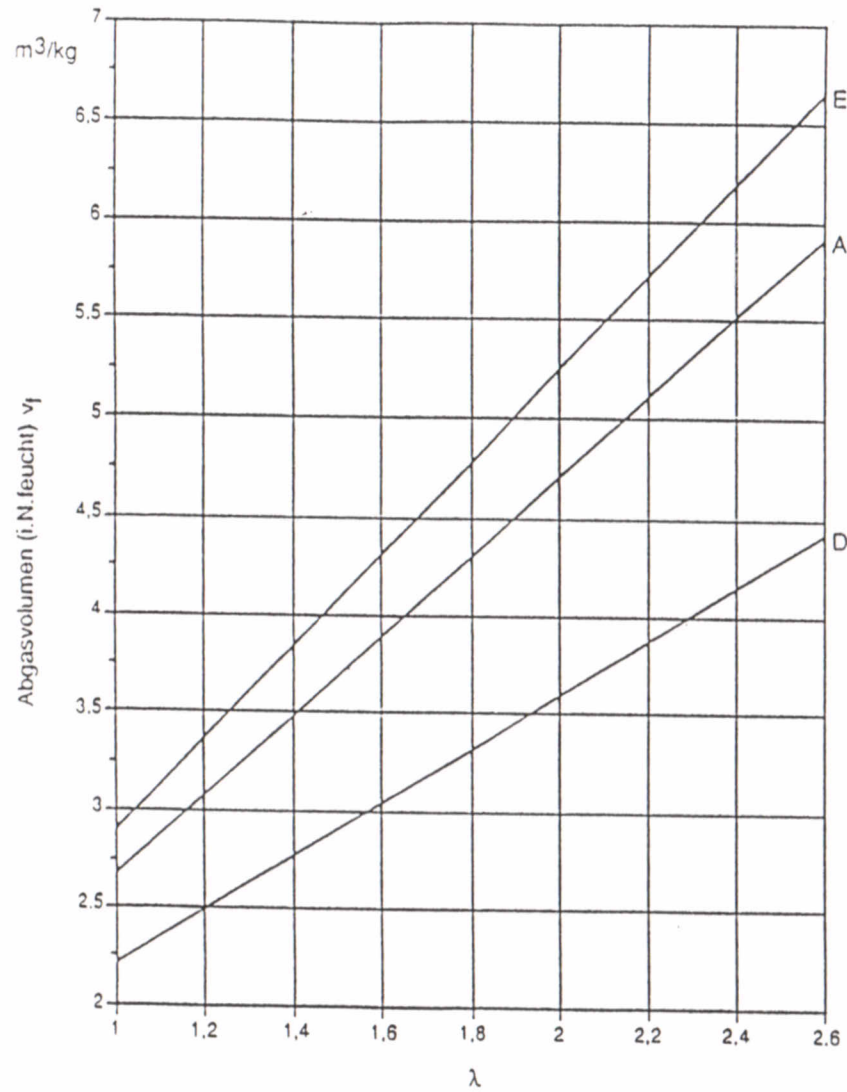


Bild 9: Abhängigkeit des Abgasvolumens (i.N.feucht)  $v_f$  von der Luftzahl  $\lambda$  für verschiedene Hausmüllzusammensetzungen A, E, D

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	325
Fluor	9	16	7
Schwefel	661	848	137

Bild 10: Schadstoffkonzentrationen in ppm zur Charakterisierung von Hausmüll [3]

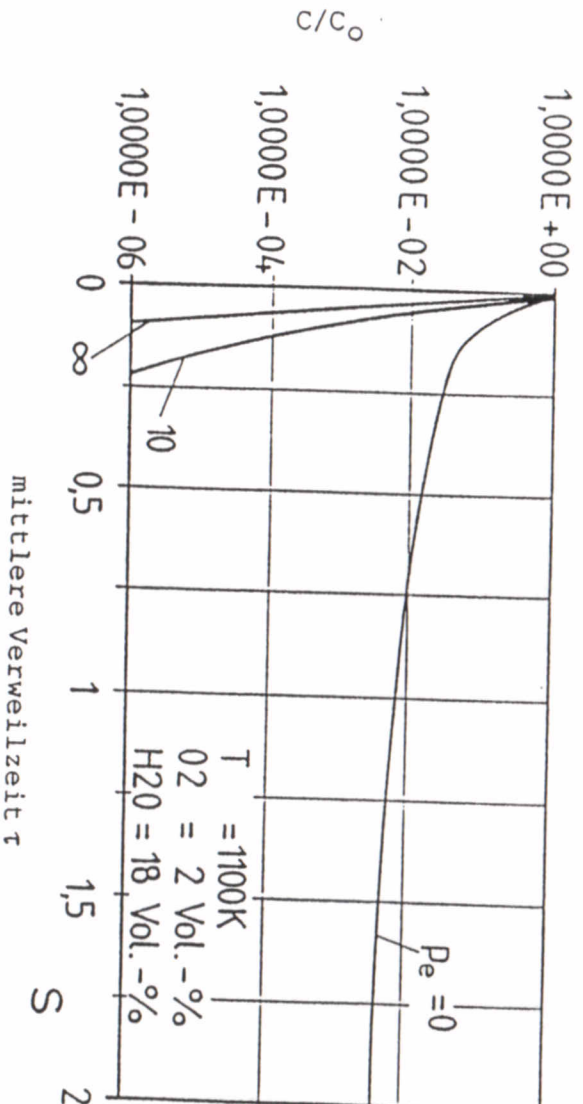
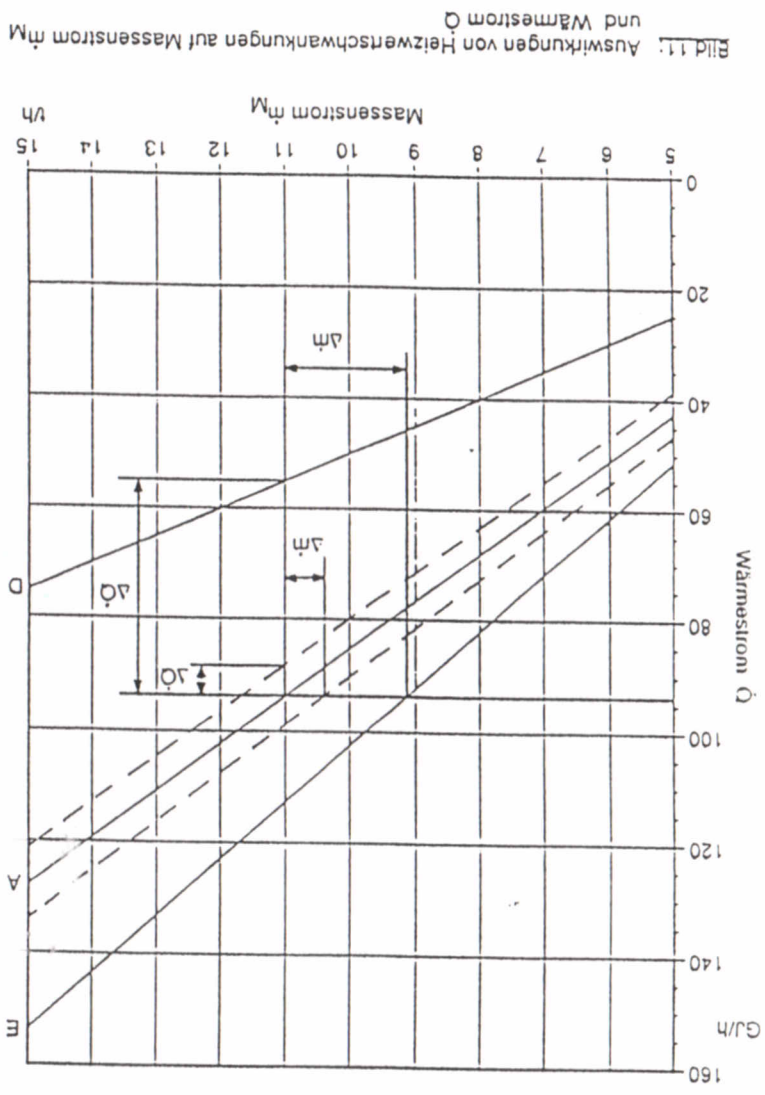


Bild 12: Abhängigkeit des CO-Abbaus  $c/c_0$  von der mittleren Verweilzeit  $\tau$  und dem Mischungsverhalten des Reaktors /12/

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



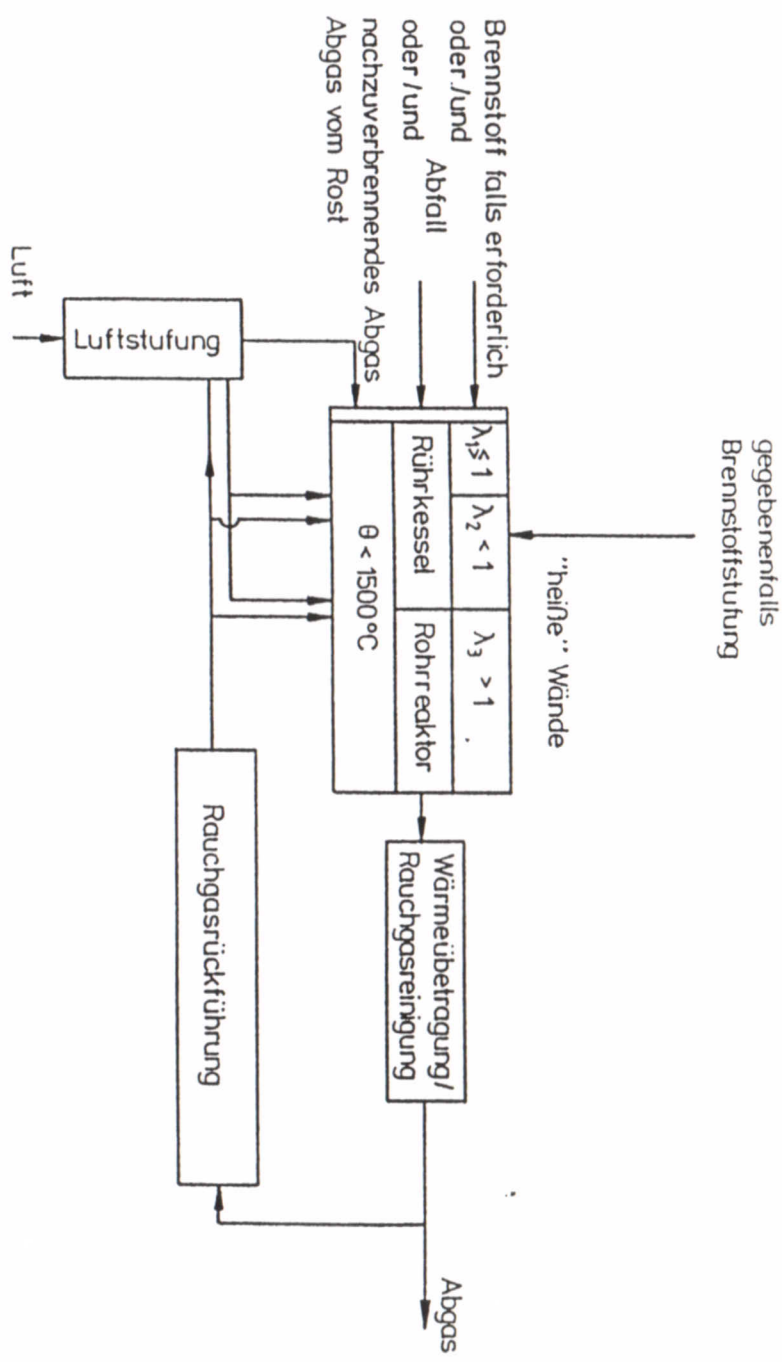


Bild 13: Schematische Darstellung der Verbrennungsführung bei gasförmigen, flüssigen, staubförmigen Brennstoffen/Abfällen [4/]

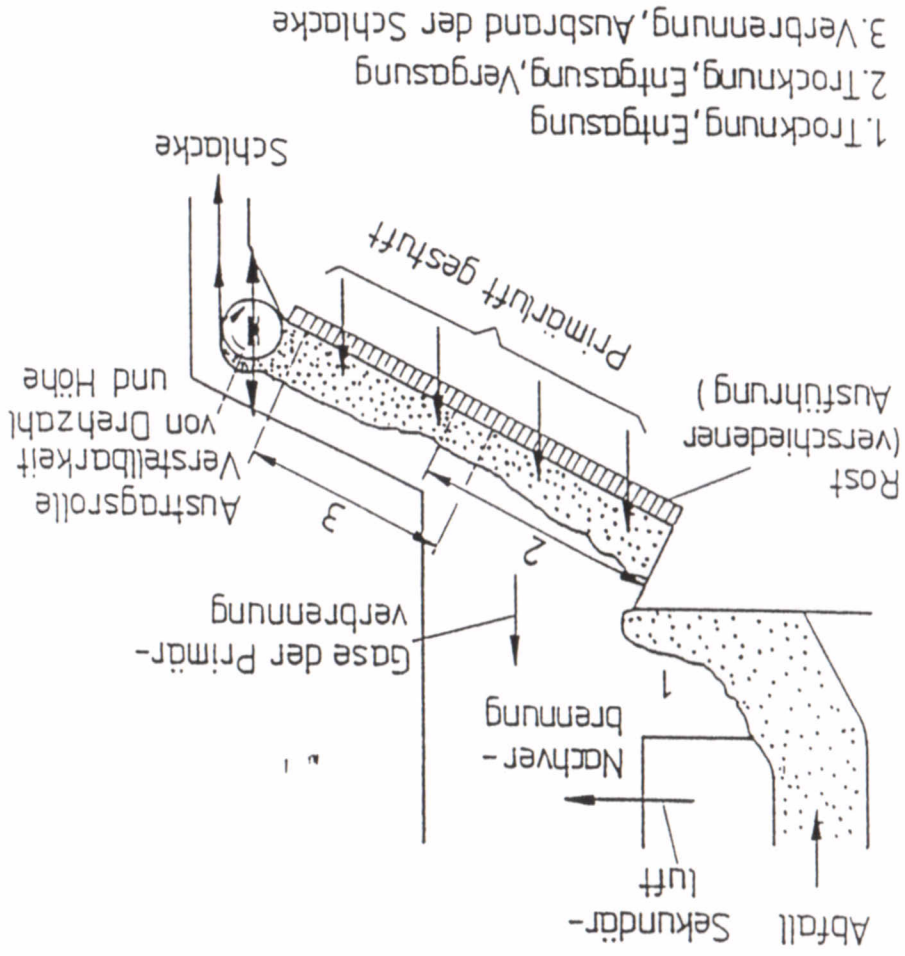
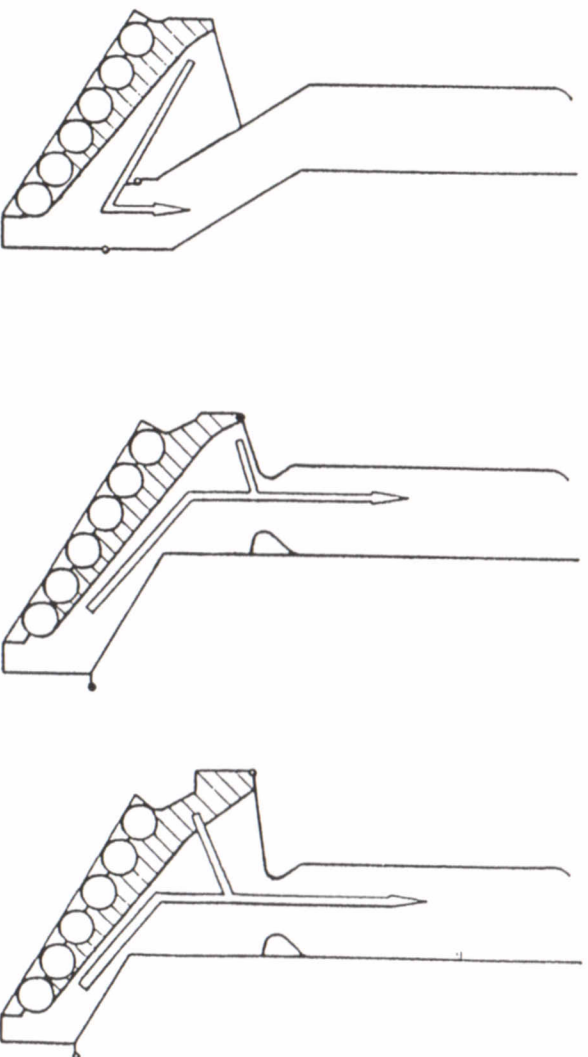


Bild 14: Verbrennungsablauf in Rostfeuerungsanlagen

	Durchmischung	Verweilzeit	Temperatur
Feststoff- verbrennung	z.B. - Rosttyp - Rosttransport- geschwindigkeit - Druckverlust	z.B. - Rostlänge - Rosttransport- geschwindigkeit - Brennstoffmassenstrom - Brennstoffbetthöhe	z.B. - Brennstoffmassenstrom - Primärluft - Wärmetauskoppelung - Feuerraumgeometrie/ Strömungsführung - Strömungs- geschwindigkeit im Feuerraum
Nach- verbrennung	z.B. - Feuerraumgeometrie/ Strömungsführung, Einbauten - Strömungs- geschwindigkeit im Feuerraum - Sekundärlufteindüsung	z.B. - Feuerraumgeometrie/ Strömungsführung, Einbauten - Strömungs- geschwindigkeit im Feuerraum	z.B. - Feuerraumgeometrie - Wärmetauskoppelung - Sekundärluft- temperatur

Bild 15: Einfluggrößen auf das Mischungs-, Verweilzeit- und Temperaturverhalten (Beispiele)



GLEICHSTROM

GEGENSTROM

MITTELSTROM



Brennstoffschicht

Bild 16: Schematische Darstellung verschiedener Möglichkeiten der Feuerraumgestaltung



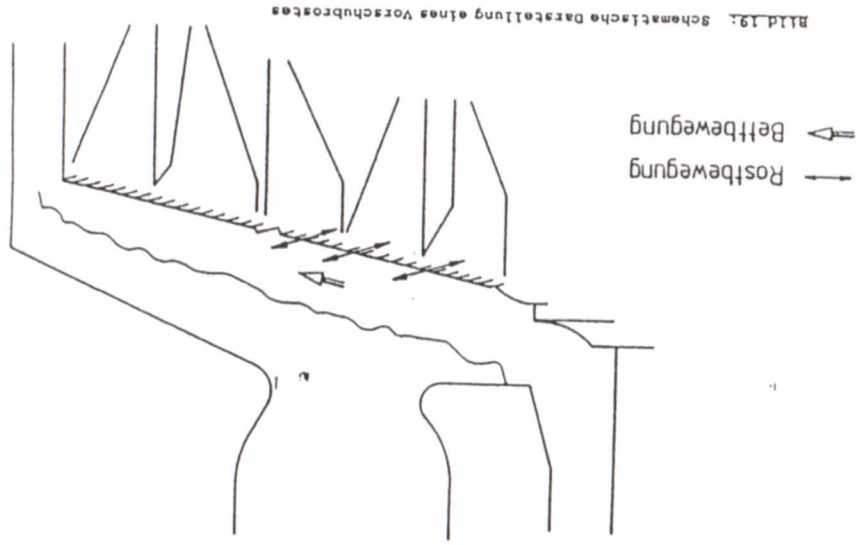


Bild 19: Schematische Darstellung eines Vorschubrostes

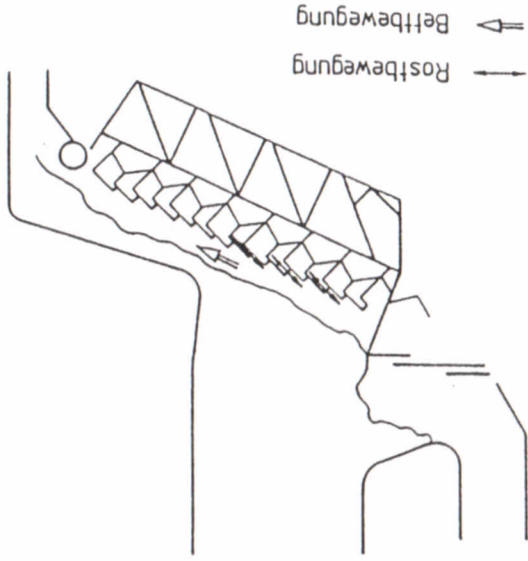


Bild 20: Schematische Darstellung eines Rückschubrostes

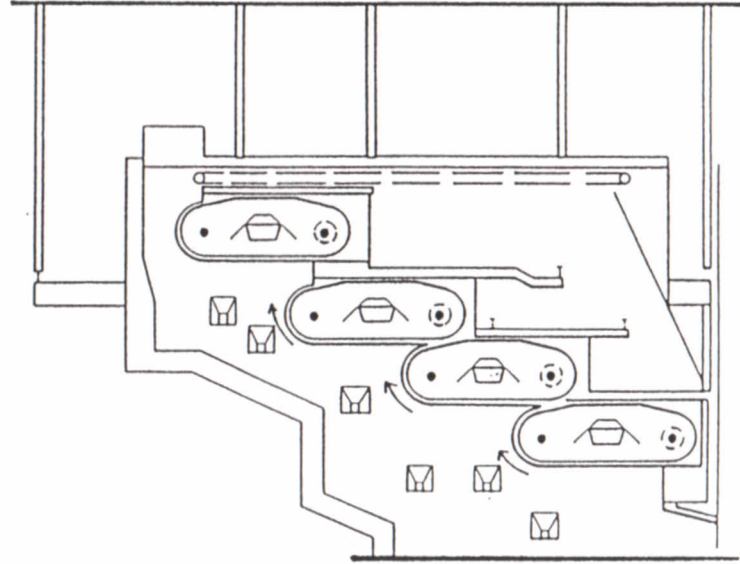


Bild 17: Schematische Darstellung eines Stufenwanderrostes

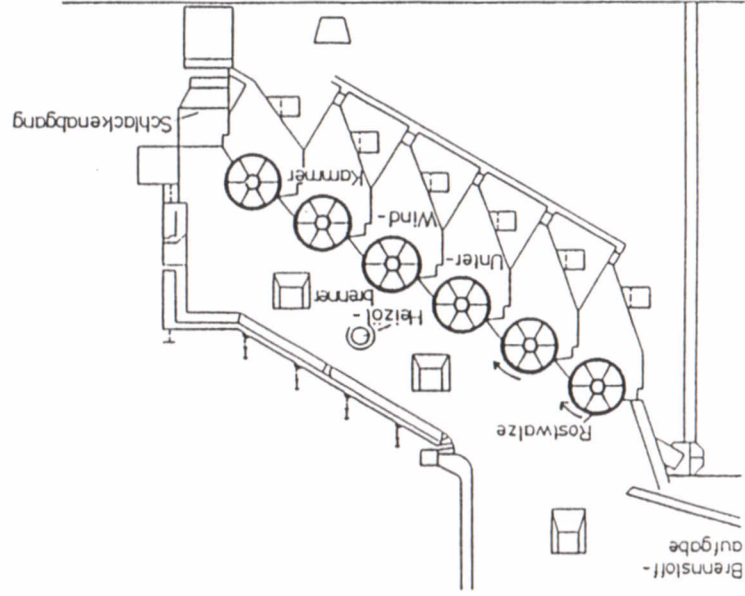


Bild 18: Schematische Darstellung eines Walzenrostes

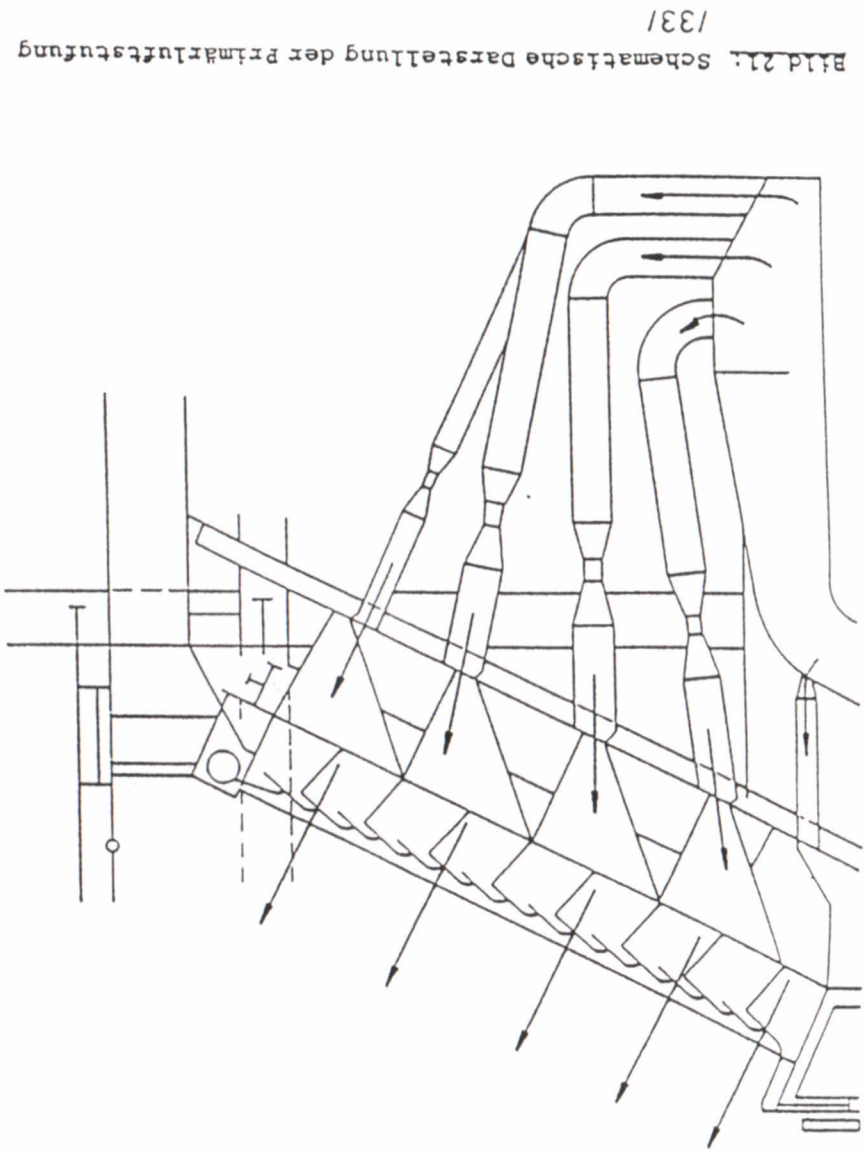


Bild 21: Schematische Darstellung der Primärluftstufung  
/331

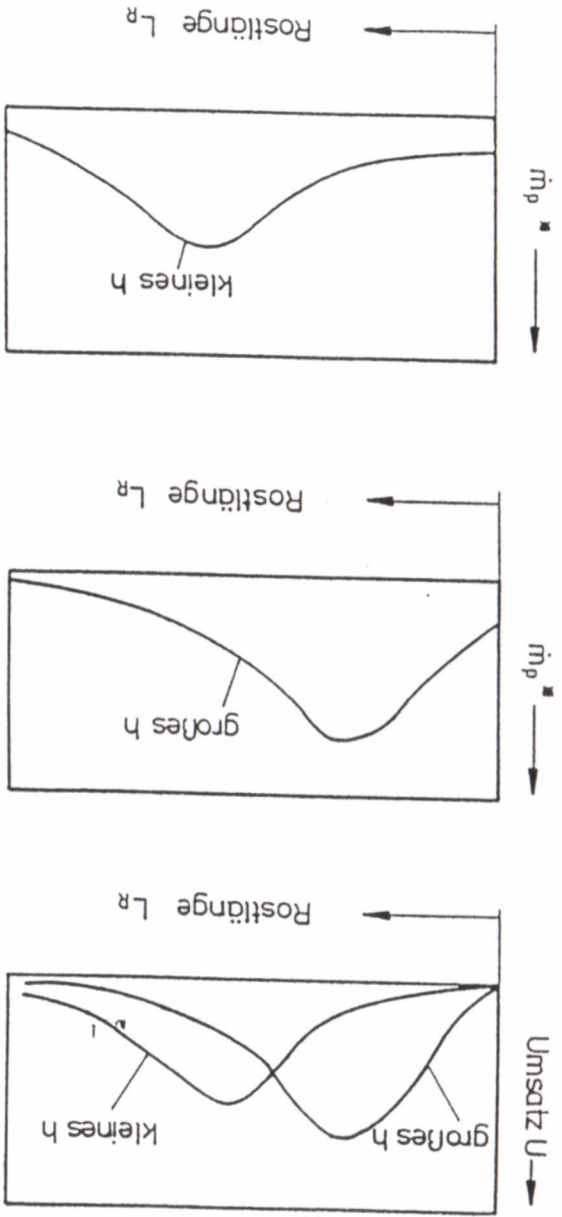


Bild 22: Umsatz U sowie Primärluftverteilung  $m_p^*$  über der Rostlänge  $L_r$  bei Hauswolle mit unterschiedlichem Heizwert h



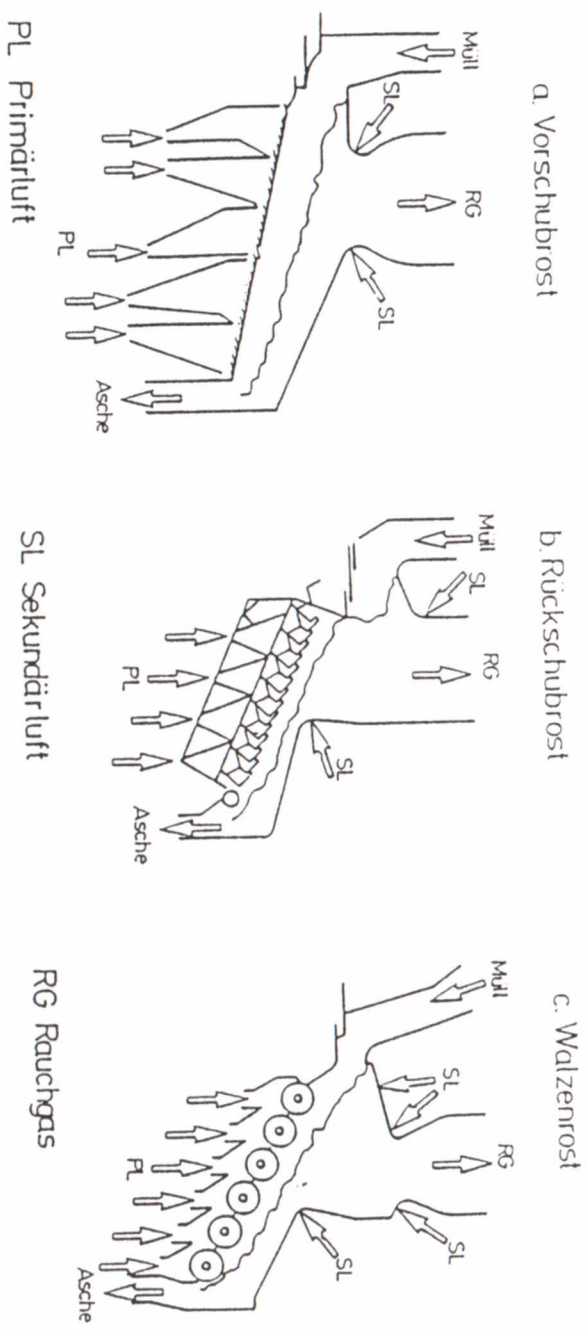
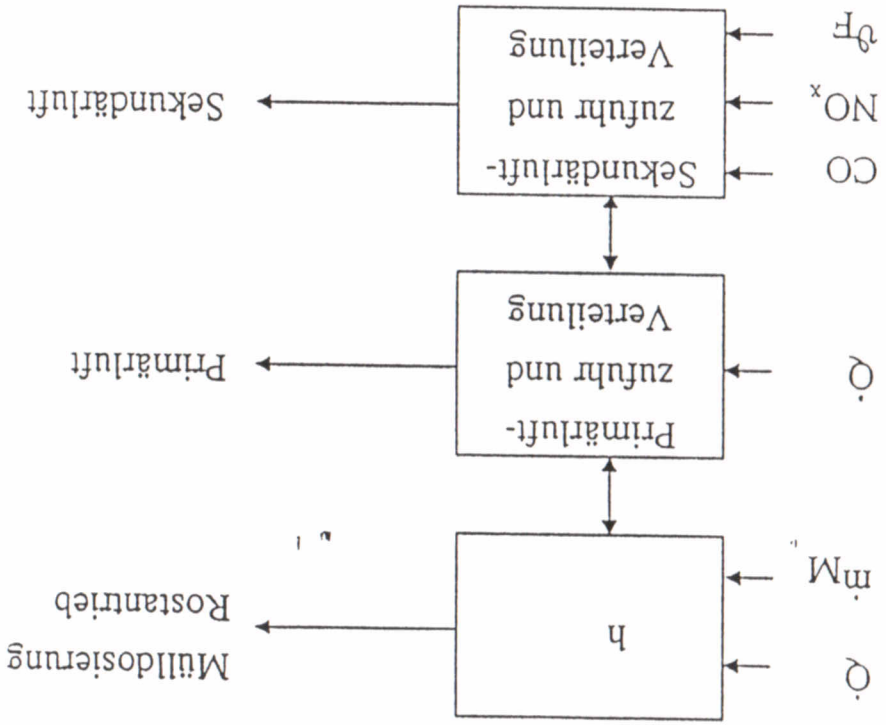
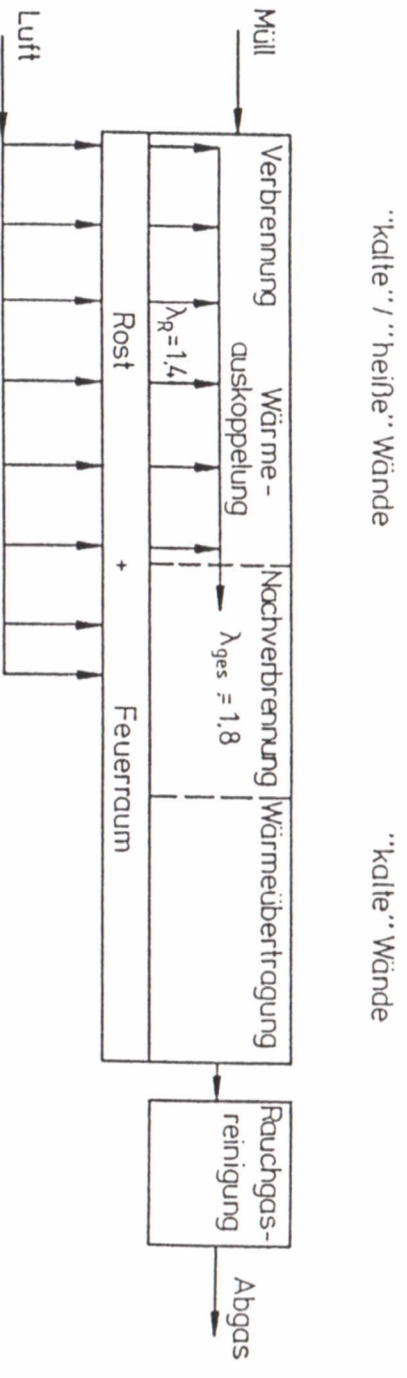


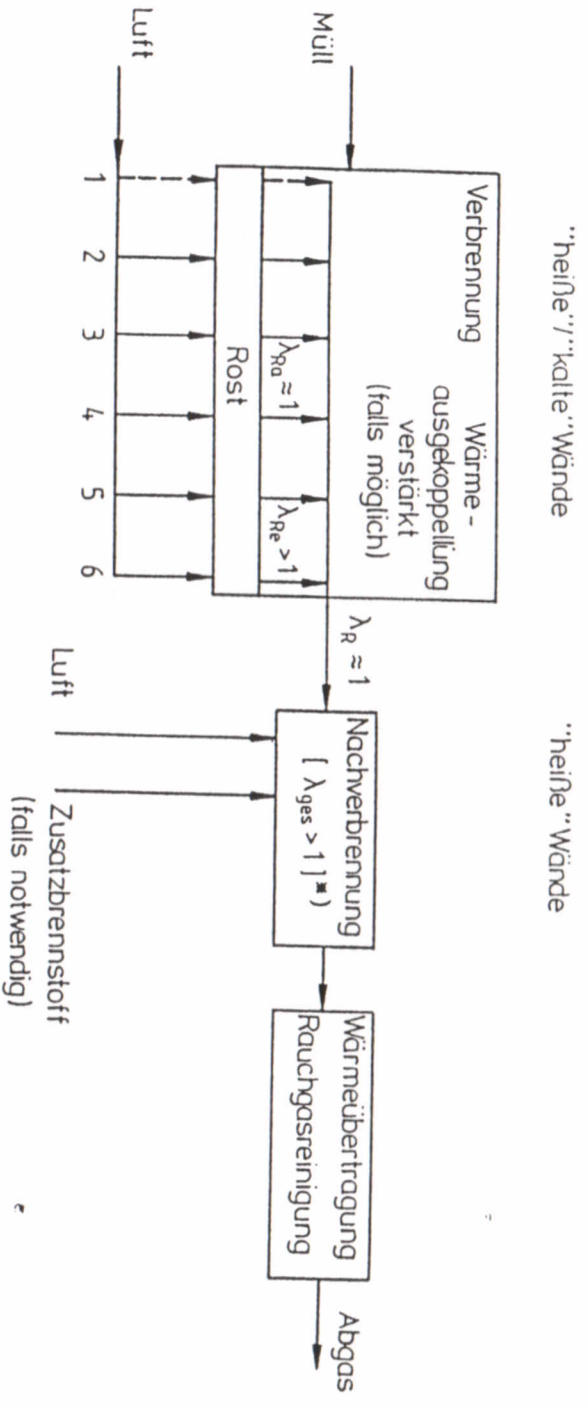
Bild 23: Schematische Darstellung verschiedener Möglichkeiten der Sekundärluftzufuhr /35/



Blind 24: Gegenseitige Beeinflussung maßgebender Größen zur Regelung einer Müllverbrennungsanlage (Erklärung im Text)

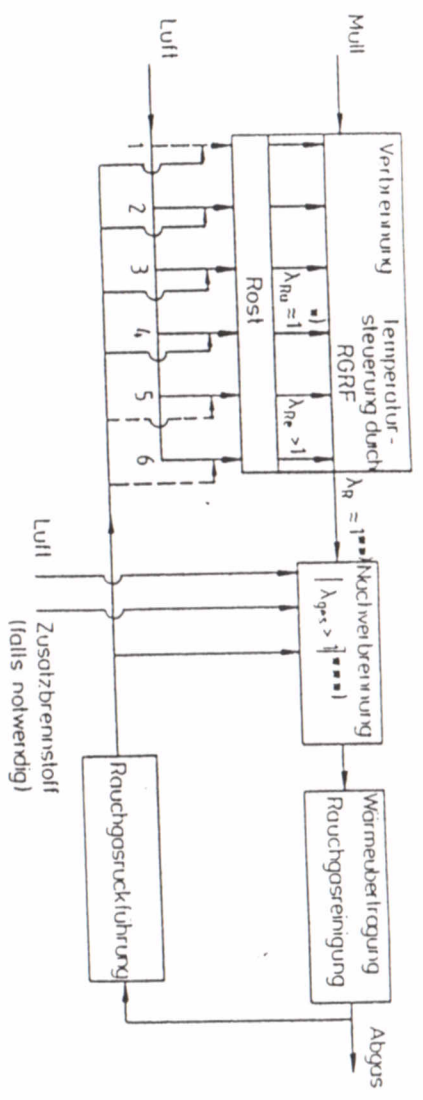


**Bild 25:** Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen mit überlappenden Reaktionszonen



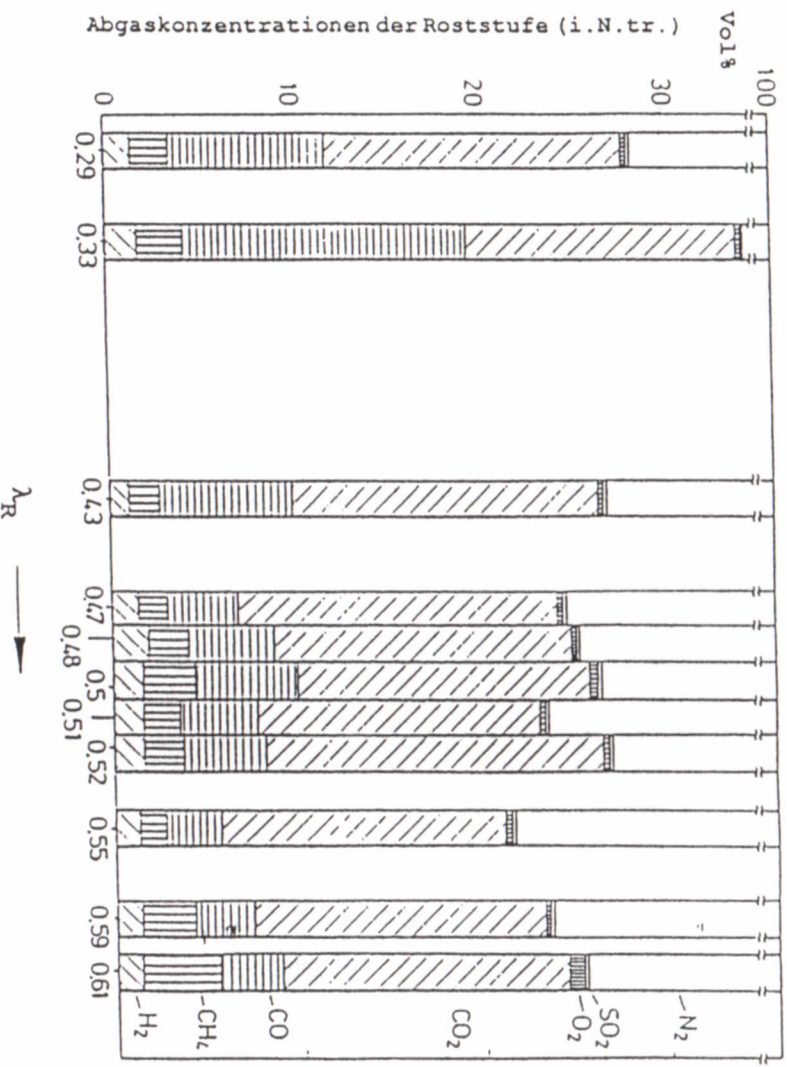
**Bild 26:** Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen mit verringerter Luftzufuhr (Erklärung im Text)  
 (\*) Gestaltung der Nachverbrennung nach Gesichtspunkten unter Abschnitt 3.1)





- \* )evtl.  $\lambda_{Rn} \ll 1$  (z.B.  $\lambda_{Rn} = 0,4$ )
- \* )evtl.  $\lambda_R \ll 1$  (z.B.  $\lambda_R = 0,4$ )

**Bild 27:** Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen mit verringerter Luftzahl und Rauchgasrückführung  
 (\*\*\*\*) Gestaltung der Nachverbrennung nach Gesichtspunkten unter Abschnitt 3.1)



**Bild 28:** Abgaszusammensetzung bei verschiedenen Primärluftzahlen in der Roststufe /5/

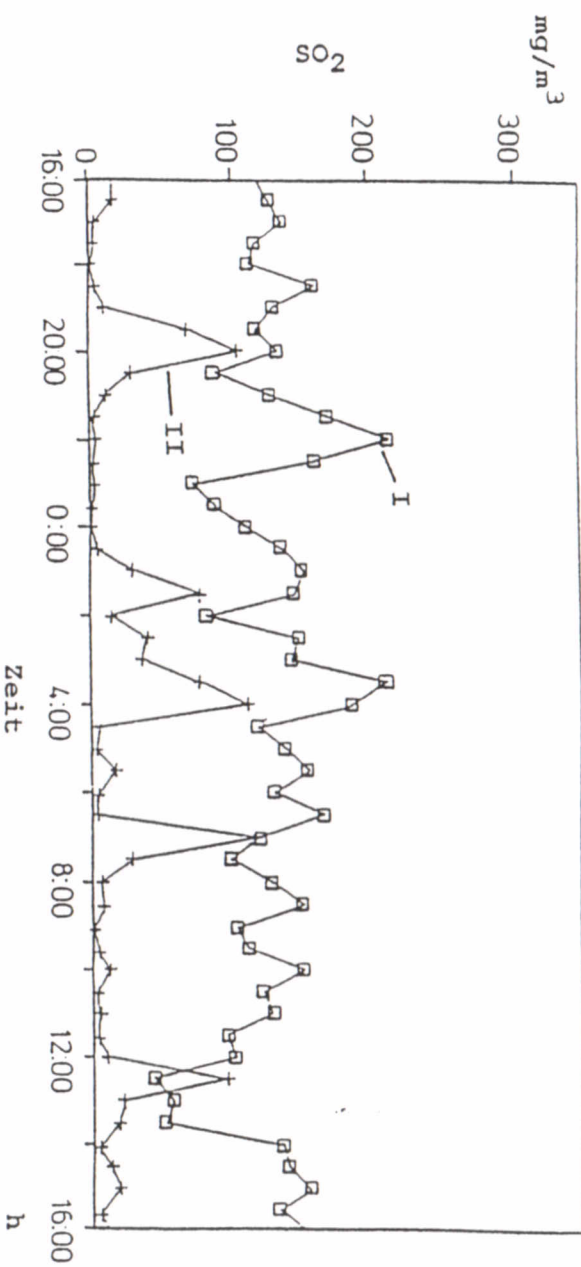


Bild 29: Halbstundenmittelwerte der  $\text{SO}_2$ -Rohgaskonzentrationen. Kurve I = Ofenlinie I ohne Additiv zum Müllaufgabetrichter; Kurve II = Ofenlinie II mit 23 kg Additiv ( $\text{CaCO}_3$ ) pro 1000 kg Müll zum Aufgabetrichter. /37/

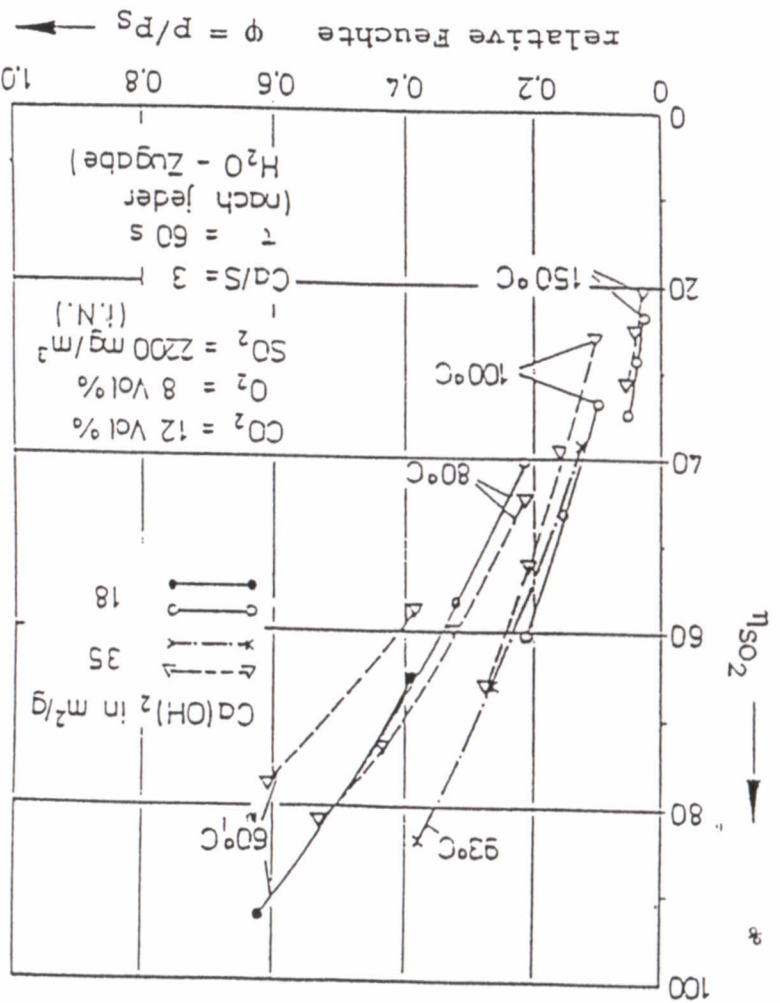


Bild 30:  $\text{SO}_2$ -Einbindung durch Kalkmilchsuspensionen bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit von der relativen Feuchte in einem Modellreaktor /38/



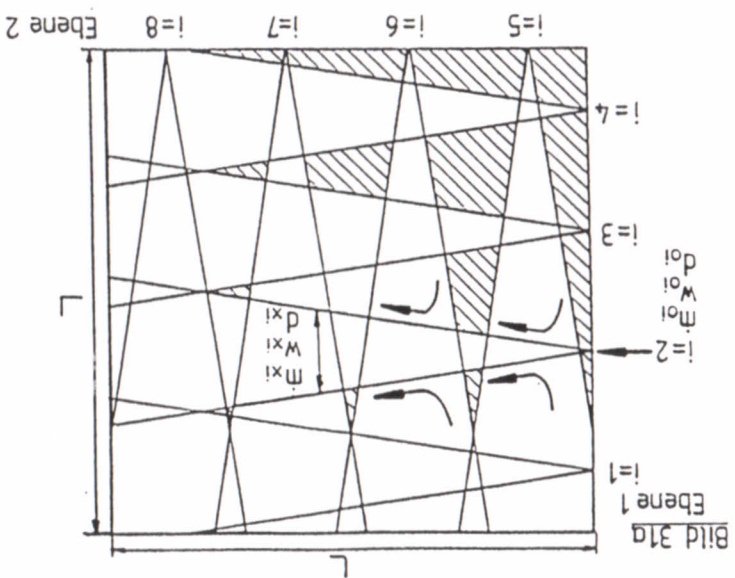


Bild 31a

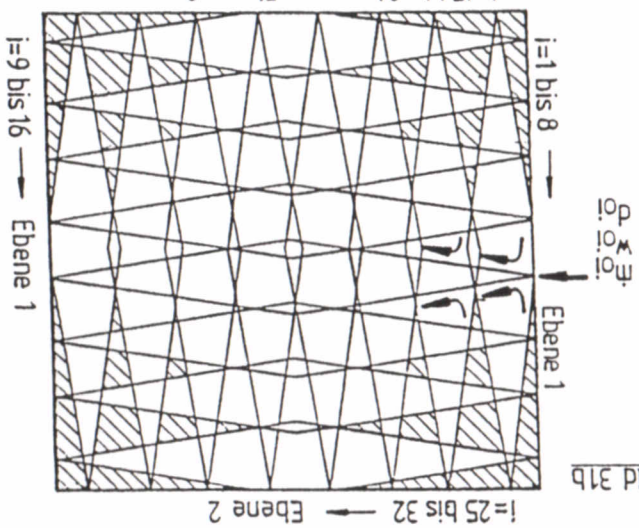
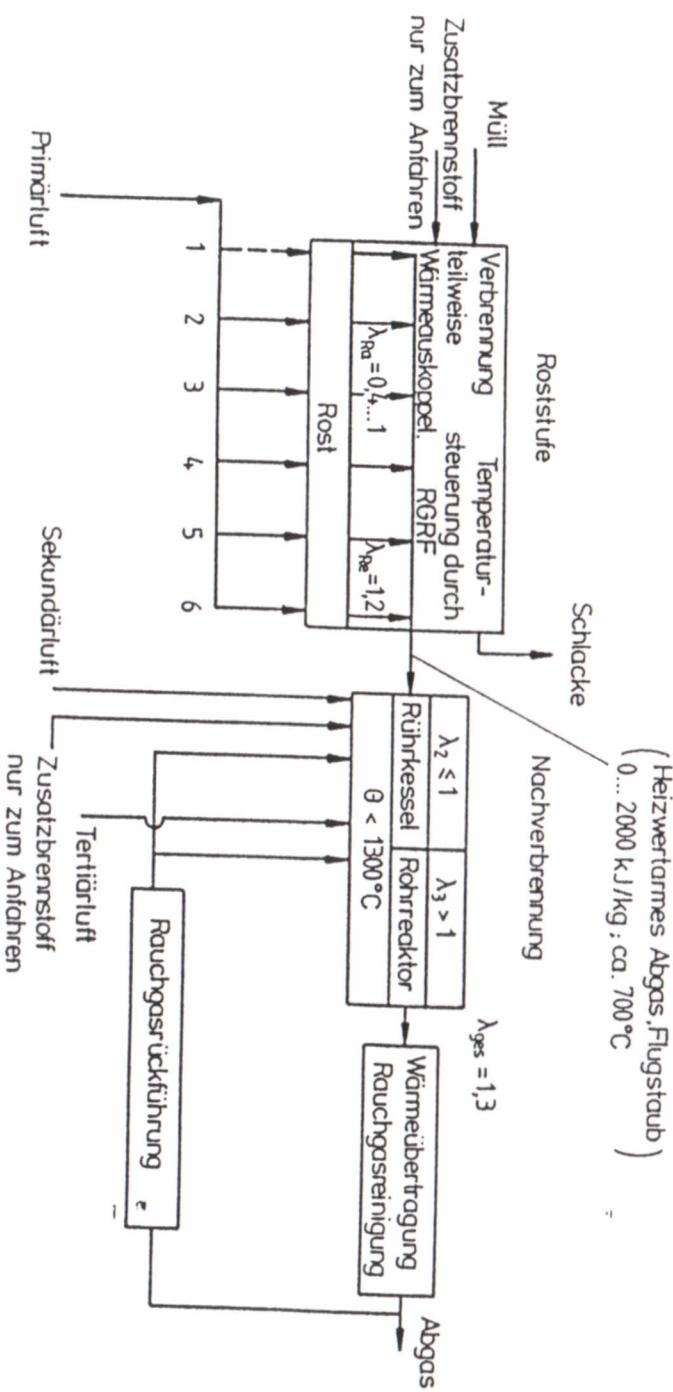


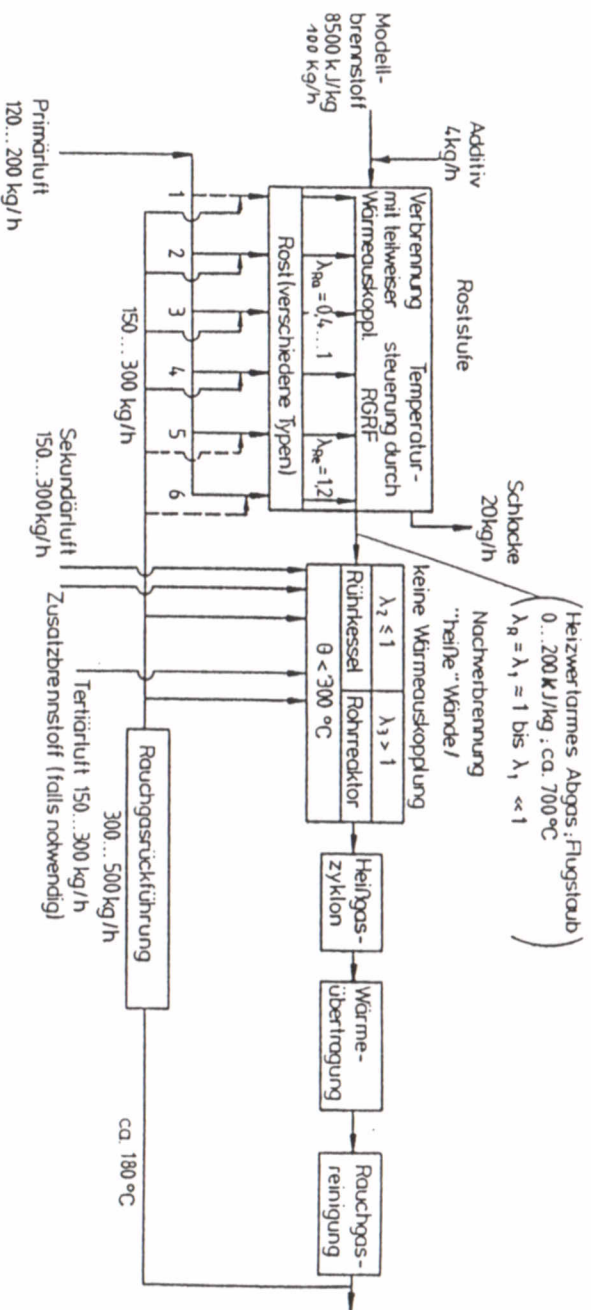
Bild 31b

Bild 31: Möglichkeiten der Anordnung von Düsenfeldern in zwei Ebenen über einem Strömungsquerschnitt zur Herstellung eines "Rührkessel"-Elementes (Erklärung im Text)



(Heizwertarmes Abgas, Flugstaub)  
(0... 2000 kJ/kg; ca. 700°C)

Bild 32: Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen (Erklärung im Text)



**Bild 33:** Schematische Darstellung einer Pilotanlage zur Durchführung von Parameter-variationen in der Rost- und Nachverbrennungsstufe im Hinblick auf eine optimierte Verbrennungsführung