

Verfahrenskonzepte zur Verbrennung von Reststoffen

Reinhard Scholz, Rudolf Jeschar, Michael Beckmann,
Jost Sternberg, Clausthal-Zellerfeld ¹⁾

1. Einleitung

Im Hinblick auf eine Schonung der zur Verfügung stehenden Ressourcen und der Umwelt werden gegenwärtig große Anstrengungen unternommen, Abfälle überhaupt nicht erst entstehen zu lassen bzw. einer Wiederverwertung zuzuführen. Dennoch hat man davon auszugehen, daß auch in Zukunft z.B. bei Produktionsverfahren Reststoffe anfallen, die einer kontrollierten Behandlung unterzogen werden müssen. Weiterhin ist in Betracht zu ziehen, daß auch bei der Aufbereitung von Produkten, die zu Abfallstoffen geworden sind, bestimmte Reststoffe verbleiben. Allgemein sind an Behandlungsverfahren für o.g. Reststoffe die folgenden Anforderungen zu stellen:

- kontrollierbare Prozeßführung,
- nachvollziehbare Bilanzierung aller beteiligten Stoff- und Energieströme,
- Umwandlung kompliziert zusammengesetzter Stoffe in einfache überschaubare Stoffe, die entweder direkt in die Umwelt entlassen werden können oder mit bekannten Verfahren weiterbehandelt werden müssen (Inertisierung der Rückstände),
- nach Möglichkeit Rückführung der Entsorgungsprodukte in den Produktionskreislauf und
- gegebenenfalls energetische Nutzung.

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. R. Scholz, Prof. Dr.-Ing. R. Jeschar:
Institut für Energieverfahrenstechnik der Technischen
Universität Clausthal und Abteilungsleiter der
Clausthaler-Umwelttechnik-Institut GmbH.
Dipl.-Ing. M. Beckmann, Wissenschaftlicher Mitarbeiter der
Clausthaler-Umwelttechnik-Institut GmbH.
Dipl.-Ing. J. Sternberg, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Institut für Energieverfahrenstechnik der Technischen
Universität Clausthal.

Mit welchen grundsätzlichen Entsorgungsmöglichkeiten, d.h. chemisch-physikalischen oder biologischen Verfahren, sich die oben erwähnten Kriterien jeweils besser erfüllen lassen, richtet sich maßgeblich nach der Beschaffenheit der Reststoffe. Diese sind z.T. heterogen und chemisch sehr kompliziert zusammengesetzt und so für eine biologische Umwandlung bzw. Behandlung mit Verfahren der Aufbereitungstechnik häufig nicht geeignet. Bei der damit infrage kommenden thermischen Behandlung "Verbrennung" ist in den letzten Jahren eine deutliche Verminderung der absoluten Schadstoffemissionen erreicht worden. Trotzdem werden Verbrennungsverfahren häufig wesentlich kritischer betrachtet als andere. Bei Reststoffverbrennungsanlagen einschließlich der Abgasreinigungsverfahren sind im Hinblick auf die Emissionen schlüssige Stoffbilanzen möglich und die entsprechenden gesetzlichen Vorschriften können garantiert werden. Hinsichtlich einer Beeinflussung der bei Verbrennungsprozessen anfallenden Rückstände (Asche, Schlacke) durch eine gezielte Prozeßführung sind noch erhebliche Potentiale vorhanden. Dies erscheint insbesondere für die Weiterbehandlung bzw. Wiederverwertung solcher Rückstände wichtig.

Der folgende Vortrag soll zeigen, welche Möglichkeiten der Verbrennungsführung (Primärmaßnahmen) bestehen:

- einen gezielten Abbau von organischen Verbindungen (C_xH_y , PCDD/F, PCB usw.),
- eine Reduzierung von Schadstoffemissionen (z.B. CO , NO_x , Staub, SO_2 , HF, HCl usw.) und
- Eigenschaften der Rückstände

zu beeinflussen. Der Vortrag folgt dabei der im Anhang ausführlich dargestellten Gliederung.

2. Eigenschaften von Reststoffen

Zunächst erscheint es wichtig, festzulegen, was unter dem Begriff Reststoff zu verstehen ist, um danach die ökologischen und gesetzlichen Konsequenzen ableiten zu können. In vielen Bereichen der Produktion, u.a. auch in der Papierindustrie, werden Reststoffe definiert als Stoffe, die den Produktionsprozeß verlassen und einer weiteren Entsorgung mit dem Ziel einer Rückgewinnung von Wertstoffen oder einer kontrollierten Ablagerung zugeführt werden müssen [z.B. 1]. Als Beispiel hierfür ist der technologische Ablauf der Zellstoffherstellung schematisch in Bild 1 dargestellt. Bei der Behandlung von Reststoffen aus Produktionsprozessen bzw. bei der Aufbereitung von Abfallstoffen (z.B. Hausmüll oder hausmüllähnlicher Gewerbeabfall) mit dem Ziel einer Wertstoffrückgewinnung fallen selbst wiederum Rückstände an. Neben den Stofffraktionen, die mit bestimmten Wertstoffen angereichert werden, entstehen wie in Bild 2 dargestellt z.B. nach einer mechanischen Vorbehandlung von Haus- und Gewerbemüll "Restmüllfraktionen", die dann häufig durch Verbrennungsverfahren entsorgt werden.

Im Hinblick auf die verbrennungstechnischen Eigenschaften müssen Reststoffe als "schwierige Brennstoffe" bezeichnet werden.

Vor diesem Hintergrund können Reststoffe wie alle übrigen Brennstoffe auch zunächst hinsichtlich ihrer Konsistenz in:

- gasförmig (z.B. Deponiegas, schadstoffbeladene Ablüfte),
- flüssig (z.B. chemische Rückstände, Ablaugen, Schlämme, Rückstandsöle),
- pastös (z.B. eingedickte Schlämme) und
- fest (z.B. Restmüll, Petrolkoks, kontaminierte Böden, BRAM)

unterteilt werden, wobei die festen Stoffe hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit weiter in:

- stückig feste Stoffe (z.B. Restmüll) und
- staubförmig feste Stoffe (z.B. getrockneter Klärschlamm)

unterschieden werden.

Im Unterschied zu den fossilen Brennstoffen aus dem Bereich der Energieumwandlung sind "schwierige" Brennstoffe z.B. durch:

- eine heterogene Zusammensetzung sowohl bzgl. der Stoffzusammensetzung, als auch hinsichtlich der Konsistenz und Stückgröße (z.B. Mischungen aus festen, pastösen und flüssigen Materialien sowie Gebinden und Fässern),
- einen hohen Anteil inerter Komponenten (Mineralien, Wasser, Stickstoff usw.),
- niedrige Heizwerte,
- einen geringen Anteil flüchtiger Bestandteile und
- zum Teil hohe Schadstoffkonzentrationen (Schwermetalle, Salze usw.)

gekennzeichnet.

Aus der Sicht der Verbrennungstechnik kommt einer auf die Vergleichmäßigung der chemisch-physikalischen Eigenschaften der Reststoffe ausgerichteten Vorbehandlung, d.h. z.B. Mahlen, Zerkleinern, Brikettieren usw. ein hoher Stellenwert zu. Wie beispielhaft in Bild 3 dargestellt, führt eine Verminderung der Heizwertschwankung:

- bei einem vorgegebenen einzuhaltenden Wärmestrom $\dot{Q}$ zu einer Verringerung der Schwankung des Brennstoffmassenstromes,
- bzw. bei gleichbleibendem Brennstoffmassenstrom zu einer entsprechenden Verringerung der Schwankung des abgegebenen Wärmestromes $\dot{Q}$.

Für die Beurteilung der Wirksamkeit einer o.g. Vorbehandlung sind den Vorteilen, die sich aus verbrennungstechnischer Sicht ergeben, auch der Energiebedarf der Homogenisierungseinrichtungen, deren Verschleiß usw. gegenüberzustellen, d.h. unter Einbeziehung der entsprechenden Randbedingungen, ist jeweils der Gesamtprozess zu untersuchen.

Für die Auslegung und den Betrieb von Verbrennungsanlagen sind neben den Angaben bezüglich des stöchiometrisch notwendigen Verbrennungsluftmassenstromes für eine stabile Zündung und Verbrennung, des zu erwartenden Abgasmassenstromes, der Feuerraumtemperatur usw. in Hinblick einer gezielten Verbrennungsführung zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Schadstoffen Kenntnisse zu deren Bildungs- und Abbaumechanismen wichtig. Daraus lassen sich dann weitere Anforderungen an die Verbrennungsführung, d.h. hinsichtlich der anzustrebenden Mischungs-, Verweilzeit- und der Temperaturverhältnisse ableiten sowie Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Umsetzung diskutieren.

3. Schadstoffbildungs- und abbaumechanismen

Bei der chemischen Umsetzung von Brennstoffen sind die Konzentrationen der Reaktionsprodukte maßgeblich von den jeweils vorherrschenden Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck, Vermischung, Verweilzeit, Konzentrationen von Ausgangsstoffen, Katalysatoren usw.) abhängig. Durch die Einstellung bestimmter Konzentrations-, Temperatur- und Verweilzeitbedingungen können bei Verbrennungsprozessen

- der Abbau von Schadstoffkomponenten (z.B. CO und Restkohlenstoffgehalt (Ausbrand), Kohlenwasserstoffverbindungen einschließlich chlorierter Kohlenwasserstoffe, Reduktion von gebildetem Stickstoffoxid usw.) unterstützt bzw.
- die Bildung von Schadstoffen (Stickstoffoxid, Ruß, Staub, Neubildung von PCDD/F) vermindert werden.

Entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand hinsichtlich der Reaktionsabläufe bei Verbrennungsprozessen faßt man diese Schadstoffe auch als Gruppe der durch die Prozeßführung beeinflussbaren Schadstoffe zusammen. Für diese Schadstoffgruppe wird im folgenden gezeigt, welche verbrennungstechnischen Maßnahmen (Primärmaßnahmen) zu einer Schadstoffminderung führen.

Darüber hinaus entstehen bei Verbrennungsprozessen Schadstoffe, die durch die Prozeßführung kaum oder überhaupt nicht beeinflussbar sind (z.B. SO_2 , HF, HCl, Schwermetalle). Inwieweit neben den gas- und partikelförmigen Emissionen auch bestimmte Eigenschaften der festen Rückstände (z.B. Eluatverhalten) bereits durch die Prozeßführung einstellbar sind, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch weitestgehend ungeklärt. Hier besteht noch ein großes Entwicklungspotential. Durch die Verbrennungsführung nicht beeinflussbare Schadstoffe sind mit geeigneten Verfahren der Abgasreinigung bzw. Rückstandsbehandlung (Sekundärmaßnahmen) zu reduzieren. Im Rahmen dieses Vortrages wird hierzu beispielhaft die Einbindung von SO_2 mit kalziumhaltigen Additiven beschrieben.

3.1 Durch die Verbrennungsführung beeinflussbare Schadstoffe

Kohlenmonoxid

Der Umsatz von Brennstoffen zu den Reaktionsprodukten vollzieht sich über Kettenreaktionsmechanismen. Ausgehend von höhermolekularen Brennstoffbestandteilen erfolgt über Radikalreaktionen ein Abbau zu Kohlenmonoxid (CO), dessen Reaktion zu Kohlendioxid (CO_2) entsprechend der Bruttoreaktionsgleichung:



vergleichsweise langsam abläuft.

Zur Beschreibung der Kinetik obenstehender Bruttoreaktionsgleichung geben Dryer und Glassman [4] den Ansatz an:

$$-\frac{d[\text{CO}]}{dt} = k \cdot [\text{CO}] \cdot [\text{O}_2]^{0.5} \cdot [\text{H}_2\text{O}]^{0.25} \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right) \left[\frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{cm}^3}\right]$$

k_0 :	$= 10^{14.6+0.25}$
E :	$= 40000 \pm 1200 \text{ J/mol}$
$[\text{CO}], [\text{O}_2], [\text{H}_2\text{O}]$:	$= \text{Konzentration in } [\text{mol}/\text{cm}^3]$
t :	$= \text{Zeit in } [\text{s}]$
T :	$= \text{absolute Temperatur in } [\text{K}]$
R :	$= \text{allgemeine Gaskonstante}$ $\text{in } [\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$

In diesem Ansatz ist der katalytische Einfluß des Wasserdampfes mit berücksichtigt. Weiterhin wird deutlich, daß für einen hohen Abbaugrad von CO neben hohen Sauerstoffpartialdrücken auch ein ausreichend hohes Temperaturniveau erforderlich ist. Ein zu geringer Luftüberschuß führt aufgrund des damit herabgesetzten Sauerstoffpartialdruckes zu einer Verminderung der CO-Abbaugeschwindigkeit. Ein zu hoher Luftüberschuß hat wiederum ein Absinken der Reaktionstemperatur zur Folge, wodurch ebenfalls der CO-Abbau gehemmt wird.

Im Zusammenhang mit dem Einfluß der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit sei an dieser Stelle betont, daß für das Erreichen von hohen Umsatzraten im gesamten Reaktionsvolumen ein einheitliches Temperatur- und Konzentrationsprofil anzustreben ist, d.h. es sind die Vermischungsverhältnisse zu optimieren und Quencheffekte an "kalten" Wänden zu vermeiden.

Neben der formalen Reaktionskinetik ist bei technischen Verbrennungsprozessen auch die Betrachtung der Verweilzeitverhältnisse wichtig. Diesbezüglich unterscheidet man in der chemischen Verfahrenstechnik zwei Grenzfälle, den idealen Rührkesselreaktor (Continuous Stirred Reactor, CSR) und den idealen Rohrreaktor (Plug Flow Reactor, PFR) (Bild 4). Der ideale Rührkesselreaktor wird durch eine vollständige Durchmischung (Dispersionskoeffizient $D = \infty$) der Reaktionspartner beschrieben, d.h.

überall im Reaktionsraum liegen dieselben Temperaturen bzw. Konzentrationen vor. Im idealen Rohrreaktor findet im Gegensatz dazu keine axiale Rückvermischung statt ($D = 0$) und alle Reaktionspartner haben aufgrund eines vorausgesetzten Kolbenströmerprofils dieselbe Verweilzeit.

Mit Hilfe der o.g. Reaktionskinetik und der Reaktorcharakteristiken können nun Aussagen hinsichtlich des Abbauverhaltens getroffen werden.

In Bild 5 ist für die erwähnten Grenzfälle das Abbauverhalten von CO in Abhängigkeit von der Verweilzeit τ dargestellt. Es zeigt sich, daß der ideale Rohrreaktor hinsichtlich des Abbaugrades c/c_0 zunächst die günstigere Reaktorcharakteristik darstellt. Das gilt unter der Voraussetzung, daß über dem Reaktorquerschnitt ein einheitliches Temperatur- und Konzentrationsprofil vorliegt. Es ist deshalb die Vorschaltung eines Rührkessелеlementes als Mischelement erforderlich. Diese Aussage bestätigt die o.g. Forderung einer Optimierung der Vermischungsverhältnisse. Durch das Nachschalten eines Rohrreaktors hinter ein Rührkessелеlement kann jedoch der Abbaugrad von CO weiter verbessert werden.

Flugkoks, Ruß

Flugkoks bildet sich insbesondere bei der Verbrennung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus Brennstofftropfen, die während des Verdampfens in sauerstoffarmer Umgebung bei hohen Temperaturen cracken. Bei Crackvorgängen wird bevorzugt Wasserstoff abgespalten und es verbleibt ein Kohlenstoffskellett als Flugkoks [z.B. 5]. Die Flugkoksbildung in technischen Feuerungen läßt sich nur qualitativ beschreiben. Aus Versuchen bei der Ölverbrennung läßt sich ableiten, daß die Flugkoksentstehung mit zunehmender Viskosität gefördert wird. Zur Flugkoksvermeidung ist demnach eine Erniedrigung der Viskosität, verbunden mit einer feineren Zerstäubbarkeit, z.B. durch Wasserzumischung und Brennstoffvorwärmung anzustreben.

Ruß entsteht im Gegensatz zum Flugkoks durch Crackvorgänge in der Gasphase in sauerstoffarmer Umgebung. Die Rußbildung läßt sich nicht vollkommen vermeiden und wird durch lange Verweilzeiten und hohe Temperaturen begünstigt, d.h. es sind geeignete Maßnahmen zu einem Rußabbau zu treffen. Für den Abbau von bereits gebildetem Ruß in einer laminaren Flamme läßt sich folgende Näherungsgleichung [6] angeben:

$$\frac{d\left(\frac{M}{M_0}\right)}{dt} = 3600 \cdot s_m \cdot p_{O_2} \cdot T^{0.5} \cdot \exp\left(-\frac{164000}{R \cdot T}\right)$$

M : = Rußmasse in [kg]

M₀ : = Anfangsrußmasse in [kg]

t : = Zeit in [s]

s_m : = spezifische Oberfläche des Ausgangsrußes in [cm²/g]

p_{O₂} : = Sauerstoffpartialdruck in [bar]

T : = absolute Temperatur in [K]

R : = allgemeine Gaskonstante [J/mol·K]

Mit dieser Gleichung kann qualitativ eine Beschreibung der Haupteinflußgrößen vorgenommen werden. In Bild 6 ist die Abbauzeit von Ruß in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Sauerstoffpartialdruck dargestellt. Daraus ist zu erkennen, daß sowohl eine Temperaturerhöhung als auch eine Anhebung des Sauerstoffpartialdruckes den Rußabbau beschleunigen. Bei Verbrennungsprozessen sind beide Einflußgrößen miteinander gekoppelt, d.h. eine Temperaturerhöhung über die Stöchiometrie ist mit einer Verringerung des Sauerstoffpartialdruckes verbunden. Qualitativ läßt sich aus Bild 6 abschätzen, daß eine Temperaturerhöhung einen stärkeren Einfluß auf die Rußabbaugeschwindigkeit ausübt als eine Erhöhung des Sauerstoffpartialdruckes.

Dioxine/Furane

Für das Auftreten von Dioxinen und Furanen im Abgasstrom einer Verbrennungsanlage können verschiedene Ursachen in Betracht kommen:

- Dioxine und Furane werden mit dem Brennstoff in den Verbrennungsprozeß eingetragen und aufgrund unzureichender Reaktionsbedingungen ungenügend abgebaut,
- Dioxine und Furane werden aus Vorläufersubstanzen (z.B. PCB) während des Verbrennungsprozesses gebildet und aufgrund unzureichender Reaktionsbedingungen ungenügend abgebaut (s.o.) (Bild 7),
- Dioxine und Furane werden aus nicht chlorierten Kohlenwasserstoffen und anorganischen Chlorverbindungen neugebildet.

Hinsichtlich des Abbaus von vorhandenen oder während des Verbrennungsprozesses gebildeten Dioxinen und Furanen gelten prinzipiell die gleichen Forderungen wie für den CO-Abbau. Es ist dabei jedoch zu berücksichtigen, daß die Abbaugeschwindigkeit z.B. von TCDD bei vorgegebener Verweilzeit wesentlich niedriger liegt als die von CO (Bild 8). Für einen Abbaugrad von $c/c_0 = 10^{-10}$ für TCDD wird bei einer Temperatur von 1200 °C in einem technischen Rohrreaktor bei ausreichenden Sauerstoffkonzentrationen in der Literatur eine Verweilzeit von $\tau = 0.1$ s angegeben [7], d.h. unter Berücksichtigung verschiedener Verweilzeitspektren sollte bei einer Temperatur von 1200 °C eine mittlere Verweilzeit von $\tau = 2$ s ausreichend sein.

Für die Vermeidung einer Neubildung von Dioxinen und Furanen bei der Abkühlung des Abgasstromes aufgrund katalytischer Gas-Feststoffreaktionen sind neben der Gewährleistung eines hohen Ausbrandes der gasförmigen Bestandteile auch feuerungstechnische Maßnahmen, die zu einer Herabsetzung des Flugstaubanteils und dessen "vollständigem" Ausbrand führen, zu berücksichtigen.

Das Ausschöpfen der verbrennungstechnischen Möglichkeiten bezüglich einer wirksamen Zerstörung von chlorierten

Kohlenwasserstoffen führt zu einer Entlastung der nachgeschalteten Sekundärmaßnahmen der PCDD/PCDF-Abscheidung, auf die an dieser Stelle hingewiesen sei [z.B. 8 bis 11].

Stickstoffoxide

Das bei Verbrennungsprozessen gebildete NO reagiert erst bei relativ niedrigen Temperaturen ($\theta < 500$ K) weiter zum NO₂, weshalb hier insbesondere die Bildung von NO betrachtet werden soll.

Einen Überblick bezüglich der Reaktionsmechanismen gibt Bild 9. Entsprechend der Stickstoffquelle und dem Reaktionsort unterscheidet man

- Thermisches NO,
- Brennstoff-NO und
- Prompt-NO [12-16].

Thermisches NO entsteht in technischen Feuerungen durch die Reaktion von atomarem Sauerstoff und molekularem Stickstoff der Verbrennungsluft. Zeldovich schlug den nach ihm benannten Reaktionsmechanismus vor:



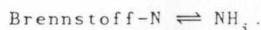
In einer schnellen Folgereaktion reagiert der entstehende atomare Stickstoff mit molekularem Sauerstoff weiter zu NO:



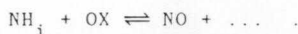
Dieser Reaktionsmechanismus läßt sich noch durch eine Vielzahl von Reaktionen erweitern [z.B.12]. Besonders die erste Reaktion ist stark temperatur- und verweilzeitabhängig. Für die Vermeidung einer maßgeblichen Bildung von thermischen NO sind ein geringes Sauerstoffangebot, Temperaturen unterhalb von $\theta_F = 1500$ °C sowie kurze Verweilzeiten in Zonen hoher Temperaturen anzustreben.

Die Bildung von Prompt-NO durch die Aufspaltung von molekularem Stickstoff durch reaktive Kohlenwasserstoffradikale in der Flammenfront ist in der Regel bei technischen Verbrennungsprozessen von untergeordneter Bedeutung.

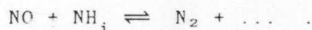
Ebenso wie die thermische NO-Bildung kann auch die Bildung von Brennstoff-NO mit Hilfe einer Modellvorstellung beschrieben werden. Nach Fenimore wird der im Brennstoff organisch gebundene Stickstoff in der Flammenfront unabhängig von seiner Bindung sehr schnell zu einfachen NH_i -Verbindungen umgesetzt:



Diese reagieren dann mit Sauerstoffträgern zu Stickstoffmonoxid weiter:



Bereits gebildetes Stickstoffmonoxid kann durch aktivierte NH_i -Verbindungen oder entsprechend der sog. NO-Recyclereaktion mit CH-Radikalen wieder aufgespalten werden und zu molekularem Stickstoff weiterreagieren:



Die Brennstoff-NO-Bildung ist im wesentlichen abhängig vom organisch gebundenem Stickstoff im Brennstoff und der örtlichen Sauerstoffkonzentration. In Bild 10 ist der Einfluß der Luftzahl und der Temperatur auf die Brennstoff-NO-Bildung nach Fenimore für eine laminare Vormischflamme dargestellt. Für eine effektive Minderung der Brennstoff-NO-Bildung sind örtlich unterstöchiometrische Zonen anzustreben.

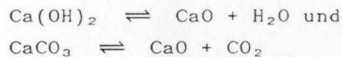
Die Maßnahmen zur Minimierung der NO_x -Konzentrationen führen insgesamt zu einer "verzögerten" Verbrennung und sind teilweise gegenläufig zu anderen Schadstoffminderungsmaßnahmen (CO , C_xH_y).

Ruß usw.). Es ist somit jeweils eine der entsprechenden Problemstellungen angepaßte Verbrennungsführung erforderlich. Welche verfahrenstechnischen Möglichkeiten für eine solche Optimierung bestehen wird weiter unten gezeigt.

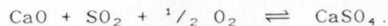
3.2 Nicht unmittelbar durch die Verbrennungsführung beeinflussbare Schadstoffe

Schadstoffe, die sich durch die Verbrennungsführung nicht unmittelbar oder kaum beeinflussen lassen (SO_2 , HCl , HF , Schwermetalle usw.), müssen durch Sekundärmaßnahmen abgeschieden bzw. stabilisiert werden. Es sei jedoch auf die Möglichkeit hingewiesen, z.B. SO_2 auch bei hohen Prozeßtemperaturen durch die Zufuhr geeigneter Additive zu binden. Welche Randbedingungen dabei zu einer optimalen Schwefeleinbindung führen, sei im folgenden kurz erläutert.

Bei Einsatz von Kalziumhydroxid als Additiv zur Entschwefelung findet zunächst eine Zersetzung entsprechend der Reaktionen



statt. Geht man von hinter Verbrennungsanlagen charakteristischen Gleichgewichtspartialdrücken für H_2O und CO_2 mit $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2$ bar und $p_{\text{CO}_2} = 0,1$ bar aus, so ist für die Zersetzung von Ca(OH)_2 eine Gleichgewichtstemperatur von $\vartheta_G = 450^\circ\text{C}$ und für das CaCO_3 von $\vartheta_G = 750^\circ\text{C}$ erforderlich (Bild 11, links). Nach einer Zersetzung des Additives erfolgt die Einbindung des SO_2 gemäß der Reaktionsgleichung:



Dabei ist darauf zu achten, daß das Temperaturniveau nicht zu hoch liegt. Mit steigender Temperatur wird das Gleichgewicht dieser Reaktion wie in Bild 11 (rechts) dargestellt in Richtung der Ausgangsstoffe verlagert, d.h. die SO_2 -Einbindung ver-

schlechtert. Wenn die SO_2 -Konzentration bei einem Sauerstoffgehalt von $r_{\text{O}_2} = 6 \text{ Vol\%}$ unter $r_{\text{SO}_2} = 100 \text{ ppm}$ bleiben soll, darf eine Gleichgewichtstemperatur von $\vartheta_{\text{G}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschritten werden. Bei höheren Temperaturen beginnt die Zersetzung von bereits gebildetem Kalziumsulfat. Außerdem beginnen die Kalziumadditive bei Temperaturen $\vartheta_{\text{F}} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ zu sintern, wodurch die Poren verschlossen werden und der Diffusionswiderstand für den Stofftransport erheblich ansteigt (Inaktivieren, Totbrennen). Aus diesen Überlegungen ergibt sich, daß man für die Entschwefelung mit kalziumhaltigen Additiven bei hohen Temperaturen einen Temperaturbereich zwischen $\vartheta_{\text{F}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $\vartheta_{\text{F}} = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ einhalten muß. Darüber hinaus sind Temperaturspitzen oberhalb $\vartheta_{\text{F}} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ zu vermeiden.

4. Verbrennungsführung von gasförmigen, flüssigen und festen staubförmigen Reststoffen

Im folgenden soll auf wesentliche Gesichtspunkte für die Prozeßführung zur Verbrennung gasförmiger, flüssiger und staubförmiger Reststoffe eingegangen werden. Es sei an dieser Stelle bereits erwähnt, daß diese grundsätzlichen Aspekte ebenso bei der Gestaltung von Nachverbrennungsstufen von Anlagen zur Verbrennung stückiger Reststoffe berücksichtigt werden müssen. *

4.1 Anforderungen an die Strömungsverhältnisse

Um gleichmäßige Reaktionsbedingungen im Brennraum zu erzeugen, müssen Brennstoff und Oxidationsmittel sorgfältig miteinander vermischt werden, d.h. wie im Zusammenhang mit dem CO-Abbau beschrieben, ist zur Vergleichmäßigung der Temperatur- und Konzentrationsverhältnisse zunächst ein Rührkessелеlement und zur weiteren Erhöhung des Abbaugrades, in Reihe dahinter geschaltet, ein Rohrreaktor vorzusehen.

Für Brennstoffe mit relativ wenig flüchtigen Bestandteilen ist darauf zu achten, daß zu Beginn nur die "Mindesterstluft" für eine stabile Zündung zugegeben wird.

Durch die Art der Brennstoffaufgabe ist für flüssige Brennstoffe eine ausreichend feine Tröpfchenverteilung oder für staubförmige Brennstoffe eine ausreichende Dispergierung zu gewährleisten. Für die Durchmischung von Brennstoff und Luft scheiden wegen des hohen Temperaturniveaus, der Korrosion usw. mechanische Einbauten in der Regel aus. Hier bieten sich im wesentlichen nur zwei fluiddynamische Rührmechanismen an:

- sog. überkritische Drallströmungen mit interner Rückführung bzw. Rückvermischung heißer Rauchgase oder aber
- einzelne oder mehrfach nebeneinander angeordnete Freistrahlen, die als Injektoren das umgebende Medium ansaugen (sich damit vermischen) und umwälzen.

In Bild 12 sind die Wirkungsweisen und die Strömungsverhältnisse einer sog. überkritischen Drallströmung dargestellt. In einen zylindrischen Brennraum werden axial der Brennstoff und tangential die Verbrennungsluft eingebracht. Durch die tangential Luftzuführung wird der axialen Vorwärtsströmung das in Bild 12 rechts dargestellte tangential Geschwindigkeitsprofil überlagert, womit durch die auftretenden Fliehkräfte im innern der Vorwärtsströmung ein Unterdruckgebiet entsteht, in das Rauchgase vom Brennraumaustritt zurück strömen. Gerade für den Einsatz heizwertreicher Brennstoffe mit großem spezifischen Lüftbedarf ergeben sich bei Massenstromverhältnissen von Luft zu Brennstoff von $\dot{m}_L / \dot{m}_B \geq 10$ allein über die tangential Luftzuführung erhebliche Mischungsintensitäten. Beim Einsatz von heizwertschwachen Brennstoffen mit nur geringem spezifischen Luftbedarf ist mitunter der tangential Impuls zu gering, so daß durch gleichzeitige tangential Zuführung des Brennstoffes oder von heißen Rauchgasen der Mischimpuls erhöht werden muß. Eine Verbesserung der Mischungsintensität kann zusätzlich durch eine Querschnittserweiterung am Brennraumaustritt erreicht werden. Durch den vergrößerten Anlagenquerschnitt hinter der Brennkammer wird die tangential Geschwindigkeitskomponente der Rückwärtsströmung deutlich verringert, so daß an der Trennlinie zwischen Vor- und Rückströmung (Linie $v_a = 0$, Bild 12) Wirbelfäden

erzeugt und somit die Turbulenzen erhöht werden. Nach eigenen Untersuchungen [18] sind Durchmesserergrößerungen auf $1,5 \cdot d$ ausreichend.

Die Wirkungsweise von Freistrahlinjektoren wird anhand von Bild 13 erklärt [z.B. 19,20]. Als eintretende Strahlen kommen sowohl Sekundärluft oder rückgeführtes Abgas, aber auch Hochgeschwindigkeitsbrenner bei Eintrag von Zusatzbrennstoffen in Frage. Der Eintrittsimpuls, gebildet aus der Eintrittsgeschwindigkeit v_0 und dem Eintrittsmassenstrom $\dot{m}_0$, bleibt über den gesamten Mischungsweg konstant. Durch den Impulsaustausch mit der Umgebung wird das umgebende Medium erfaßt, wodurch der Strahldurchmesser und der Massenstrom $\dot{m}(x)$ zunehmen, und die Geschwindigkeit des Strahles $v(x)$ abnimmt. Die dargestellte Freistrahlausbreitung gilt allerdings strenggenommen nur für ruhende Umgebungen, in vielen technischen Anwendungen muß dagegen die Strahlablenkung in Hauptströmungsrichtung mit berücksichtigt werden.

4.2 Trennung der Verbrennung und Wärmeübertragung

Für das Erreichen einer möglichst homogenen Temperaturverteilung sind neben der intensiven Durchmischung einerseits Quencheffekte durch "kalte" Wände (z.B. Wärmeübertragerflächen) und andererseits Temperaturspitzen durch ungleichmäßige Umsatzgeschwindigkeiten über den Verbrennungsweg zu vermeiden.

Wird, wie in Bild 14 schematisch dargestellt, auf eine Wärmeauskopplung im Prozeßraum verzichtet, so kann auch bei Reststoffen mit niedrigen Heizwerten in Verbindung mit niedrigen Luftzahlen bei entsprechender Isolierung ein ausreichend hohes Temperaturniveau ermöglicht werden (nahezu adiabate Verbrennung). Der Einfluß einer Wärmeauskopplung $\dot{Q}_{ab}/\dot{Q}_{zu}$ auf die Feuerraumtemperatur in Abhängigkeit von der Luftzahl λ ist für einen Heizwert von $h = 8,5 \text{ MJ/kg}$ in Bild 15 dargestellt. Es zeigt sich, daß ausgehend von der adiabaten Verbrennungstemperatur

($\dot{Q}_{ab}/\dot{Q}_{zu} = 0 \%$) bereits bei $\dot{Q}_{ab}/\dot{Q}_{zu} = 20 \%$ mit einer erheblichen Herabsetzung der Feuerraumtemperatur zu rechnen ist. Die Abhängigkeit der adiabaten Verbrennungstemperatur von dem Heizwert ist für verschiedene Luftzahlen λ in Bild 16 dargestellt. Weiterhin wird durch Vermeidung der Wärmeauskopplung während der Verbrennung und wegen der damit verbundenen "heißen" Wände (feuerfest, z.B. $\vartheta_w > 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) ein "Einfrieren" von Reaktionen an den Wänden (Quencheffekte) verhindert.

Im Hinblick auf einen hohen Wirkungsgrad der Energienutzung ist die Wärmeübertragung z.B. über einen Abhitzekegel vorzusehen (Energienutzungskonzept).

4.3 Variable Einstellung eines gewünschten Temperaturniveaus

Neben der wichtigen Forderung eines ausreichend hohen und gleichmäßigen Temperaturprofils ist es im Hinblick der weiteren Optimierung der Reaktionsbedingungen bzw. auch zur Vermeidung von Überschreitungen der Ascheerweichungstemperaturen, insbesondere bei Brennstoffen mit höherem Heizwert erforderlich, das Temperaturniveau im Prozeßraum zu steuern.

Dies kann z.B. über die Stöchiometrie, d.h. den Luftüberschuß, eine Wassereindüsung oder wie in Bild 14 schematisch dargestellt auch durch eine Rauchgasrückführung in die Verbrennungsluft oder den Verbrennungsraum vorgenommen werden.

4.4 Bedingungen und Forderungen aus der Schadstoffbegrenzung

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3 beschriebenen Schadstoffbildungs- und Abbaumechanismen und der vorstehend genannten Möglichkeiten zur Einflußnahme auf die Prozeßführung müssen jeweils abgestimmt auf die zu behandelnden „Reststoffe“ Verbrennungskonzepte entwickelt werden. Durch die teiweise gegenläufigen Anforderungen ist für eine optimale Prozeßführung häufig die Hintereinanderschaltung entkoppelter Prozeßstufen erforderlich. Bild 17 zeigt die einzelnen Schaltungsmöglich-

keiten, die für die Entwicklung eines solchen Konzeptes in Frage kommen.

So ist die Rückführung kalter Rauchgase besonders wirksam, die Bildung thermischer Stickstoffoxide zu vermeiden, da zum einen der Sauerstoffpartialdruck im Abgas abgesenkt und die Temperatur selbst bei nahestöchiometrischer Verbrennung unter $\vartheta_F = 1500^\circ\text{C}$ gehalten werden kann. Mit dem in Bild 18 dargestellten Brennkammersystem wird durch Einbau eines zylindrischen Schusses die Temperaturführung zur Minderung der thermischen NO -Bildung durch innere Rezirkulation von Gasen in einer überkritischen Drallströmung und durch äußere Rezirkulation in einem Ringspalt innerhalb des Brennraumes entlang der Wärmeübertragungsflächen weiter optimiert.

Zur Reduzierung der Bildung von Stickstoffoxiden aus brennstoffgebundenem Stickstoff muß eine weitestgehende Überführung der N-Spezies zu molekularem Stickstoff erreicht werden. Dieses läßt sich ebenso wie die Reduktion bereits bestehender Stickstoffoxide durch die Schaffung reduzierender Verbrennungsbedingungen erreichen, wobei man hier die mehrstufige Prozeßführung nach Luft- bzw. Brennstoffstufung unterscheidet. Beide Schaltungsvarianten sind ebenfalls schematisch in Bild 17 dargestellt. Bei der Luftstufung wird dem gesamten Brennstoffstrom in der ersten Verbrennungsstufe nur ein Teil der Verbrennungsluft zugeführt ($\lambda_1 < 1$), so daß sich dort wegen des Sauerstoffmangels vornehmlich molekularer Stickstoff bildet. Zur beschleunigten Umsetzung ist hier eine möglichst hohe Prozeßtemperatur anzustreben. Der Ausbrand der Abgase aus der ersten Stufe erfolgt nach Zugabe der Restluft ($\lambda_3 > 1$). Sollte sich durch die Luftstufung die Ausbrandqualität deutlich verschlechtern, so kann weiter zur Einstellung reduzierender Bedingungen in einer Prozeßstufe eine Brennstoffstufung in Erwägung gezogen werden. Dabei erfolgt zunächst in der ersten Stufe eine nahestöchiometrische Umsetzung des schwierigen Brennstoffes ($\lambda_1 \approx 1$). In der zweiten Stufe werden durch Zugabe von Reduktionsbrennstoff ($\lambda_2 < 1$) bereits gebildete Stickstoffoxide aus der ersten Stufe reduziert. Der Ausbrand erfolgt dann erst in der dritten Stufe ($\lambda_3 > 1$) unter

erneuter Zugabe von Verbrennungsluft. Steigen die Verbrennungstemperaturen in der Ausbrandstufe durch die starke Unterstöchiometrie in der reduzierenden Stufe soweit an, daß mit einer erhöhten Bildung von thermischem NO zu rechnen ist, so läßt sich das Temperaturniveau wiederum durch Rückführung "kalter" Rauchgase erniedrigen. Da insgesamt die verbrennungstechnischen Maßnahmen zur Stickstoffoxidminderung zu einer verzögerten Umsetzung des eingesetzten Brennstoffes führen, muß darauf geachtet werden, daß sie den Ausbrand (CO , C_xH_y , Ruß usw.) nicht verschlechtern. Gegebenenfalls ist dann ein Rohrreaktor nachzuschalten.

Wie beispielhaft anhand der Versuchsergebnisse zur mehrstufigen Verbrennung von Bitumen- und Visbrakerrückständen in Bild 19 dargestellt, hat die Wahl des Zugabeortes für die Stufenluft sehr sorgfältig zu erfolgen, da sonst sogar eine Verschlechterung bezüglich der Stickstoffoxidemissionen eintreten kann. Erst bei ausreichend starker Trennung von Primär- und Sekundärstufe wird eine deutliche Reduktion erreicht.

Bild 20 zeigt weiter eine direkte Gegenüberstellung von einstufiger, zweistufiger und dreistufiger Verbrennung, wobei für die dreistufige Verbrennungsführung noch zwei unterschiedliche Zugabeorte für Erdgas als Stufenbrennstoff (Gas I, Gas II) untersucht wurden. Ausgehend von Stickstoffoxidkonzentrationen von $c_{\text{NO}_x} \approx 1000 \text{ mg/m}^3$ bei einstufiger Verbrennung konnten durch eine zweistufige Verbrennungsführung die Stickstoffoxidkonzentrationen bis auf $c_{\text{NO}_x} = 400 \text{ mg/m}^3$ begrenzt werden. Durch die dreistufige Verbrennungsführung ließen sich unter weiterer Erhöhung der Verweilzeit in der reduzierenden Stufe (Brennstoffzugabe Gas I) Werte von $c_{\text{NO}_x} = 200 \text{ mg/m}^3$ erreichen.

An dieser Stelle sei aber auch darauf hingewiesen, daß die Ergebnisse der Brennstoff- und Luftstufung nicht direkt vergleichbar sind, da bei der Brennstoffstufung neben der Reduktion durch Zugabe von Stufenbrennstoff auch eine erhebliche Vergrößerung des Abgasstromes und damit ein Verdünnungseffekt

verbunden ist.

In Bild 21 sind zu diesen Versuchsreihen die Kohlenmonoxidkonzentrationen im Abgas der Ausbrandstufe in Abhängigkeit von der Luftzahl λ aufgetragen. Für die reine Luftstufung (zweistufig) steigen die Konzentrationen bei Primärluftzonen kleiner $\lambda_{pr} < 0,7$ erheblich. Die Brennstoffstufung liefert hier tendenziell bessere Ergebnisse.

Ist zur Gewährleistung eines genügend guten Ausbrandes die Nachschaltung eines Rohrreaktors notwendig, so kann dieser falls erforderlich auch als Entschwefelungsreaktor zur Einbindung von SO_2 bei hohen Temperaturen durch Trockenadditive dienen. Wie eigene Versuche gezeigt haben, können bei entsprechender Prozeßführung ähnlich gute Entschwefelungsergebnisse wie in der Wirbelschicht erreicht werden [26]. Die Versuchsergebnisse hierzu sind mit verschiedenen anderen, der Literatur entnommenen Ergebnissen, in Bild 22 dargestellt.

5. Verbrennungskonzepte sowie Primärmaßnahmen in technischen Feuerungen für stückige und pastöse Reststoffe sowie für Mischungen aus flüssigen, pastösen und festen Reststoffen

Prinzipiell lassen sich die gleichen Forderungen, die aus der Sicht der Schadstoffbegrenzung an ein Verbrennungskonzept für gasförmige, flüssige und staubförmige Brennstoffe gestellt werden, auch auf die Verbrennungsführung stückiger Brennstoffe übertragen. Bei diesen hat man jedoch einerseits in Abhängigkeit von der Stückgröße und der stofflichen Zusammensetzung für einen vollständigen Abbau mit wesentlich höheren Reaktionszeiten zu rechnen. Andererseits muß man hierbei neben den reinen Gasphasenreaktionen verstärkt Gas-Feststoff-Reaktionen mit berücksichtigen. Der Verbrennungsablauf kann im Gegensatz zu der Gruppe der vorstehend betrachteten gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Brennstoffe bei stückigen Brennstoffen wie in

Bild 23 beispielhaft dargestellt wesentlich deutlicher in die einzelnen Teilschritte:

- Trocknung,
- Entgasung,
- Vergasung,
- Ausbrand des Feststoffes,
- Nachverbrennung der gasförmigen Bestandteile,
- Nachverbrennung der nicht vermeidbaren Flugstaubpartikel (Ruß, Flugkoks usw.)

untergliedert werden.

Sind die einzelnen Reaktionszonen, in denen diese Teilschritte ablaufen ungenügend voneinander getrennt, d.h. werden mehrere Zielstellungen in nahezu einem Reaktionsraum angestrebt, wie das bei herkömmlichen Anlagen häufig der Fall ist, so sind eine Vielzahl von Ziel- und Einflußgrößen überlagert und damit eine Optimierung im Hinblick auf die Reduzierung von Schadstoffen durch die Prozeßführung schwierig. Durch eine Auftrennung der Prozeßführung wird eine Reduzierung der Ziel- und Einflußgrößen in jeder einzelnen Prozeßstufe erreicht.

Der Feststoffverbrennungsprozeß ist zunächst grob in die selbständigen Verbrennungsteilsysteme:

- Feststoffausbrandprozeß (Vorverbrennungsstufe) und vollständig davon getrennt, in Reihe geschaltet,
- den Nachverbrennungsprozeß der Gase und soweit nicht vermeidbar der Flugstäube (Nachverbrennungsstufe)

aufzuteilen, wobei die Stufen ihrerseits wieder in entsprechende Teilsysteme zu untergliedern sind.

Die Vorverbrennungsstufe sollte primär nach den Gesichtspunkten eines möglichst hohen Ausbrandes der Asche bzw. Schlacke betrieben werden. Inwieweit bei einer solchen mehrstufigen Verbrennungsführung dann in der Vorverbrennungsstufe auch die

Eigenschaften der Rückstände (z.B. Eluatverhalten) beeinflussbar sind, läßt sich gegenwärtig noch nicht genügend beantworten. Da jedoch insbesondere bei der Vorverbrennungsstufe Rost hierzu Möglichkeiten gegeben erscheinen, wird auf diese Problematik bei der Beschreibung von möglichen Parametervariationen speziell bei Rostfeuerungen weiter unten näher eingegangen. Zunächst ist hinsichtlich der Zielsetzung in der Vorverbrennungsstufe unabhängig von dem jeweils betrachteten Verfahren zu erwähnen, daß neben einem hohen Ausbrand von Asche bzw. Schlacke auch auf niedrige Stömungsgeschwindigkeiten geachtet werden muß, um den Eintrag von Flugstäuben in die nachgeschalteten Stufen zu minimieren.

Die Nachverbrennungsstufe ist selbst wie eine eigenständige Feuerung für gasförmige, flüssige und staubförmige Brennstoffe, wie im vorangestellten Abschnitt dargestellt, auszubilden. Entsprechend der Aufgabenstellung in der Vorverbrennungsstufe weisen die entstandenen staubhaltigen Gase noch einen hohen Anteil brennbarer Bestandteile auf. Aus verbrennungstechnischer Sicht ist das für die in Reihe geschaltete Nachverbrennungsstufe sogar vorteilhaft. Die aus der Vorverbrennungsstufe stammenden Gase können dann wie ein "schwieriger" Brennstoff oder als Schadstoff beladenes Abgas betrachtet werden. Somit können durch eine mehrstufige Prozeßführung auch bei Feststoffverbrennungsprozessen Primärmaßnahmen, die zu einer Reduzierung von Schadstoffen, deren Bildung bzw. Abbau sich hauptsächlich in der Gasphase bzw. durch katalytische Gas-Feststoff-Reaktionen an in der Gasphase enthaltenen Flugstäuben vollzieht, angewendet werden. Im folgenden wird daher lediglich noch auf die jeweilige Vorverbrennungsstufe eingegangen.

Für die Vorverbrennungsstufe kommen bei Reststoffen:

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

in Betracht.

5.1 Drehrohrofenanlagen

Reststoffe, die sich aus Gemischen flüssiger, pastöser und stückiger Stoffe, einschließlich von Gebinden und Fässern, zusammensetzen, stellen aufgrund der stofflichen Kombination an die Verbrennungsanlage hohe Anforderungen hinsichtlich der thermischen und mechanischen Belastbarkeit (Aufreißen von Fässern und anschließende Verpuffung usw.). Für diese Reststoffe ist deshalb in der Regel als Vorverbrennungsstufe nur eine Drehrohrofenanlage wie beispielhaft in Bild 24 dargestellt geeignet.

Die Durchmischung des zu verbrennenden Stoffgemisches sowie dessen Verweilzeit sind durch Durchmesser und Länge des Drehrohres bei der Projektierung und durch Füllungsgrad und Drehzahl im Betrieb beeinflussbar. Bei Drehrohren besteht im allgemeinen nicht die Möglichkeit einer Luftaufteilung über den Verbrennungsweg, d.h. es ist für einen ausreichend hohen Ausbrand der Rückstände ein relativ hoher Luftüberschuß ($\lambda = 2$ bis $\lambda = 3$) erforderlich. Spontan eintretende Schwankungen des Sauerstoffbedarfes u.a. durch Aufreißen von Fässern versucht man z.B. durch schnell variierende Luftzufuhr am Drehrohreintrag bzw. über verschiedene Lanzen, die in das Drehrohr hineinragen, auszugleichen. Im Drehrohr selbst wird in der Regel keine Wärmeauskopplung vorgenommen. Weiterhin sind Drehrohre mit entsprechenden Isolierungen versehen, so daß sich auch bei sehr hohem Luft-

überschuß für den Ausbrand genügend hohe Temperaturen einstellen und der Austrag am Drehrohrende flüssig abgezogen wird und in einem anschließendem Wasserbad zu Schlacke erstarrt .

Bei sehr heizwertarmen Reststoffen kann zur Gewährleistung der für den flüssigen Austrag erforderlichen Temperatur eine Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft bzw. die Zufuhr von technisch reinem Sauerstoff in Erwägung gezogen werden.

Aufgrund der ungleichmäßigen Umsetzungen im Drehrohr weisen die in die Nachverbrennungszone gelangenden Gase stark schwankende Zusammensetzungen und z.T. auch hohe Konzentrationsspitzen von CO , C_xH_y usw. auf. Es sind deshalb an die Nachverbrennungsstufe sehr hohe Anforderungen zu richten.

Bedingt durch die relativ hohe Überstöchiometrie im Drehrohr ist man in der Nachverbrennungszone in der Regel auf die Zufuhr von Fremdbrennstoff angewiesen (z.B. flüssige Sonderabfallstoffe). Hinsichtlich der Verbrennungsführung in der Nachverbrennungsstufe ist zu sagen, daß die einzelnen Nachverbrennungszonen noch deutlicher als gegenwärtig der Fall wie eine eigenständige Feuerung durchgebildet werden sollten. Das bezieht sich insbesondere auf die bereits erwähnten Mischungsmechanismen und die Möglichkeiten zur Beeinflussung des Verweilzeitverhaltens sowie zur Temperatur- und Sauerstoffpartialdruckführung.

5.2 Rostfeuerungen

Allgemeines

Der Vorteil bei Drehrohranlagen, fast alle Reststoffarten aufgeben zu können, ist wie erwähnt mit dem Nachteil verbunden, daß sich die Feuerungsführung über der Drehrohrlänge relativ wenig beeinflussen läßt. Aus diesem Grund sollten daher für weniger heterogene, stückige Reststoffe andere Möglichkeiten in Betracht gezogen werden. Für die Verwendung von stückigem Restmüll aus Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbemüll, BRAM, Abfallhölzer

u. dgl. kommen häufig Rostfeuerungen zum Einsatz. Zunehmend wird auch überlegt, pastöse Stoffe, z.B. entwässerten Klärschlamm, auf das Gutbett zu streuen [28].

Kennzeichnende Merkmale von Rostfeuerungen sind z.B.:

- Die Feuerungsführung ist im Hinblick auf die einzelnen Teilprozesse (Trocknung, Entgasung, Vergasung, Restausbrand) über der Rostlänge gut steuerbar (z.B. im Vergleich zu Drehrohröfen).
- Eine Aufteilung der Verbrennungsluftmassenströme in Primär- und Sekundärluftstrom ist möglich.
- Die Durchströmungs- und Mischungsbedingungen des Brennstoffbettes sind in den Teilabschnitten dieser Vorverbrennungsstufen einzeln über die Bewegung der Rostelemente zu beeinflussen.
- Durch die Einstellung der Betthöhe und der Geschwindigkeit, mit der sich die Rostelemente bewegen, ist eine ausreichende Verweilzeitbeeinflussung für den Feststoffumsatz gegeben. Darüber hinaus besteht bei Verbrennungsrosten die Möglichkeit, durch eine am Ende installierte höhen- und drehzahlverstellbare Austragswalze die Verweilzeit in der Ausbrandstufe zu variieren.

Trotz der variablen Betriebsweisen bei Rostfeuerungen sind auch hier im Hinblick auf eine deutlichere Aufteilung der einzelnen Reaktionszonen (Roststufe als Vorverbrennungsstufe und unabhängige Nachverbrennungsstufe) noch Entwicklungsschritte und Verfahrensverbesserungen möglich.

Auf diese zusätzlichen Parametervariationen soll im folgenden näher eingegangen werden. Zu der speziellen Verfahrenstechnik bei Rostfeuerungen, wie z.B. verschiedene Rosttypen, Roststabformen, Feuerraumgeometrien, Regelungskonzepte usw., wird an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen [28-33].

Zusätzliche Parametervariationen in der Roststufe

Ausgehend von einer nahezu einstufigen Betriebsweise, wie sie bei Rostfeuerungen häufig anzutreffen und schematisch in Bild 25

dargestellt ist, sollte bereits bei der Projektierung auf eine sorgfältige Trennung der Stufen Feststoffverbrennung, Nachverbrennung und Wärmeübertragung geachtet werden. Durch die Entkopplung der Stufen Verbrennung und Wärmeübertragung wird wie bereits erwähnt auch bei Brennstoffen mit relativ geringen Heizwerten eine Erhöhung der Feuerraumtemperaturen erreicht. Dabei ist der Einfluß einer Luftvorwärmung in dem für die Rostkonstruktion zulässigem Temperaturbereich [z.B. 32] gering (Bild 15). Das ist u.a. auf den niedrigen Mindestluftbedarf bei Brennstoffen mit geringen Heizwerten zurückzuführen. Durch eine Luftvorwärmung auf $\vartheta_v \approx 150^\circ\text{C}$ kann jedoch ein erheblicher Teil der Brennstoffeuchte sehr effektiv schon bei der Durchströmung des Brennstoffbettes durch Konvektion in die Gasphase überführt werden (Strahlung/Kondensation).

Bei einer weiteren Prozbauaufteilung in eine unabhängige Vorverbrennungs- und Nachverbrennungsstufe reduziert sich die Zahl der Einflußgrößen hinsichtlich der Durchmischungs-, Verweilzeit- und Temperaturverhältnisse in jedem Teilprozeß. Eine mehrstufige Betriebsweise zeigt Bild 26.

Gegenüber einer nahezu einstufigen Prozeßführung ist nun eine weitergehende Optimierung möglich. Zur Reduzierung der Abgasverluste und zur Verringerung der Abgasmassenströme können bei einer solchen Prozeßführung zunächst die Luftzahlen λ in der Roststufe erheblich abgesenkt werden. Damit verbunden steigen die Temperaturen.

Die Absenkung des Luftverhältnisses läßt sich in einem großen Bereich des Rostes bis $\lambda_R \approx 1$ vornehmen. In der Ausbrandstufe am Rostende ist gegebenenfalls eine örtliche Überstöchiometrie ($\lambda_{Re} > 1$) einzustellen. Zur Vermeidung von Überhitzungen der Rostkonstruktion bzw. von Schlackenbackungen ist u.U. zusätzlich eine Rostkühlung (z.B. Wasserkühlung) vorzusehen. Kann bei einer nahstöchiometrischen Fahrweise die Einhaltung der Temperaturverhältnisse in der Rostkonstruktion nicht allein durch eine verstärkte Wärmeauskopplung gesichert werden, so ist wie in Bild 27 schematisch dargestellt, zusätzlich die Rückführung kalter gereinigter Rauchgase in Erwägung zu ziehen. Insbesondere bei sehr feuchten Reststoffen unterstützt die Rauchgasrückfüh-

rung die Trocknung am Rostanfang in der gleichen Weise wie die vorgewärmte Verbrennungsluft, wozu der zurückgeführte Rauchgasstrom ebenfalls wenigstens eine Temperatur von $\vartheta_v = 150^\circ\text{C}$ aufweisen sollte. Im Zusammenhang mit dem Trocknungsprozeß am Rostanfang kann man weiter daran denken, auf eine Luftzufuhr in der ersten Stufe des Rostes (in Bild 27 gestrichelt dargestellt) zu verzichten, da für den Brennstoffumsatz an dieser Stelle noch keine Reaktionsluft erforderlich ist. Bei einer solchen Schaltung hat man wiederum mit einer Erhöhung des Abgasvolumenstromes in einem Teil der nachgeschalteten Anlagenteile zu rechnen.

Eine deutlichere Durchbildung der einzelnen Prozeßstufen erhält man, wenn in der Roststufe nur der für den Umsatz des "fixen" Kohlenstoffes erforderliche Primärluftmassenstrom zugeführt wird. Bezogen auf den Mindestluftbedarf für eine vollkommene und vollständige Verbrennung ergeben sich für die Roststufe dabei Luftverhältnisse von $\lambda_R \approx 0,4$. Die in die Nachverbrennungsstufe eintretenden Abgase weisen dann einen für die eigenständige Verbrennung ausreichend hohen Heizwert auf. In der Nachverbrennungsstufe kann auf die Zufuhr von Fremdbrennstoff verzichtet werden. Bei einer solchen eigenständigen Nachverbrennungsstufe lassen sich die einzelnen Reaktionszonen wie in Abschnitt 4 beschrieben besser trennen.

Die unterstöchiometrische Fahrweise in der Roststufe hat die weitere wichtige Folge, daß durch die Verringerung des Primärluftmassenstromes auch die Strömungsgeschwindigkeit und somit die Flugstaubkonzentration erheblich herabgesetzt werden.

Die Entkoppelung der einzelnen Zielgrößen bei Feststoffverbrennungsprozessen und insbesondere bei Rostfeuerungen ist weiterhin eine notwendige Voraussetzung, um Freiheitsgrade zur "Einstellung" bestimmter Eigenschaften der Rückstände bereits durch die Verbrennungsführung zu erhalten, ohne daß dadurch wiederum eine Verschlechterung z.B. des Ausbrandes der Abgase eintritt.

Unabhängig von der Betriebsweise in der Roststufe ist bereits bei der Projektierung eines Rostes darauf zu achten, daß der Druckverlust in der Rostkonstruktion sehr viel größer sein

sollte als der Druckverlust des Brennstoffbettes. Damit werden eine gleichmäßige Luftverteilung in den einzelnen Rostzonen erreicht und bekanntlich "Durchbläser" vermieden.

Zur Flugstaubvermeidung allgemein sei wiederholt, daß die Strömungsgeschwindigkeiten so klein wie möglich gehalten werden sollten. Die Absenkung der Strömungsgeschwindigkeiten im Brennstoffbett kann einerseits durch eine unterstöchiometrische Fahrweise aufgrund der herabgesetzten Luftvolumenströme erreicht werden, andererseits kann auch die Anreicherung von Sauerstoff zur Verbrennungsluft eine Verminderung der Luftvolumenströme bewirken. Die Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft in bestimmten Rostzonen ist sowohl bei unter- als auch bei überstöchiometrischer Fahrweise für eine schnellere Zündung und einen besseren Umsatz des fixen Kohlenstoffes weiter von Vorteil.

Abschließend zu den erwähnten Möglichkeiten einer Beeinflussung der Verbrennungsführung in der Roststufe sei erwähnt, daß durch die Zugabe von Additiven auf der Basis von Kalksteinmehl zum Brennstoff bereits vor dem Verbrennungsprozeß, eine Einbindung von Schwefel und Chlor möglich ist.

Wie in Bild 28 dargestellt, lassen sich dadurch die SO_2 - Rohgaskonzentrationen erheblich herabsetzen, was eine Entlastung der Sekundärreinigungsverfahren bedeutet. Grundlagenuntersuchungen haben ergeben, daß auch im Bereich niedriger Temperaturen bei entsprechenden Feuchtegehalten eine hohe SO_2 -Einbindung erfolgt. Die dafür erforderlichen Reaktionszeiten liegen wie in Bild 29 dargestellt im Bereich von mehreren Minuten. Die Aufenthaltszeiten des Brennstoff/Additiv-Gemisches, die Temperaturverhältnisse und die Feuchtegehalte im Aufgabetrichter erscheinen für eine Einbindung über die flüssige Phase als ausreichend.

Nachverbrennungsstufe hinter Rosten

In Bild 30 ist die schematische Darstellung einer Pilotanlage zur Durchführung der voranstehenden Parametervariationen wiedergegeben. Darin sind auch die Schaltungsmöglichkeiten, die für

eine Beeinflussung der Verbrennungsführung in der Nachverbrennungsstufe in Frage kommen, berücksichtigt. Da auf diese bereits ausführlich in Abschnitt 4 eingegangen worden ist, wird hier nur noch auf einige im Zusammenhang mit der Vorverbrennungsstufe "Rostfeuerung" wichtig erscheinende Punkte hingewiesen.

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 genutzt. 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 ist. In diesem Fall sind Freistrahldüsen (Injektorstrahlen, wie erwähnt) so zu dimensionieren, daß möglichst der gesamte Strömungsquerschnitt erfaßt, und der gesamte Abgasstrom wenigstens einmal durch die Injektorstrahlen umgewälzt wird (Bild 31). Bei der Dimensionierung ist weiter zu berücksichtigen, daß mit der Einmischung von vergleichsweise kalten Sekundärluftströmen eine Temperaturabsenkung verbunden ist. In diesem Zusammenhang sei nochmals erwähnt, daß mit sinkender Gesamtluftzahl steigende Feuerraumtemperaturen erreicht werden können bzw. sich bei einer stark unterstöchiometrischen Fahrweise in der Roststufe dann auch in der Nachverbrennungsstufe ohne die Zufuhr von Zusatzbrennstoff ausreichend hohe Temperaturen einstellen.
- Falls jedoch auf einen Zusatzbrennstoff nicht verzichtet werden kann, so sollte zur Schonung wertvoller Energieträger auch der Einsatz von flüssigen Reststoffen in einer "sorgfältig" geführten Nachverbrennungsstufe in Erwägung gezogen werden.

Abschließend zu den Betrachtungen bezüglich Rostfeuerungen sei kurz auf die Ergebnisse bei der mehrstufigen Verbrennung von BRAM in einer Pilotanlage mit einer thermischen Leistung von 1 MW_{th} hingewiesen. Konzeptionell stimmte der Grundaufbau dieser Pilotanlage mit dem wie in Bild 30 dargestellten überein. Eine Rückführung kalter gereinigter Rauchgase in die Roststufe war jedoch nicht vorgesehen. Bei einer stark unterstöchiometrischen Betriebsweise in der Roststufe ($\lambda_R = 0,4$) wurde ein guter Ausbrand der Asche erreicht (Restkohlenstoffgehalt 0,5 bis 0,2 Ma%). Die Nachverbrennungsstufe konnte wie eine eigenständige Feuerung betrieben werden, da die aus der Roststufe stammenden Gase noch einen Heizwert von ca. $h = 2000 \text{ kJ/kg}$ und eine Temperatur von ca. $\vartheta_v = 700^\circ\text{C}$ aufwiesen. Ausgehend von NO_x -Konzentrationen $c_{\text{NO}_x} = 1200 \text{ mg/m}^3$ (i.N.tr. bei $r_{\text{O}_2} = 3\%$) ohne Luftstufung wurden bei einer Aufteilung der Verbrennungsluft in Primär-, Sekundär- und Tertiärluft die NO_x -Konzentrationen auf etwa $c_{\text{NO}_x} = 450 \text{ mg/m}^3$ (i.N.tr. bei $r_{\text{O}_2} = 3\%$), bei gleichzeitig sehr gutem Ausbrand ($c_{\text{CO}} < 10 \text{ mg/m}^3$ (i.N.tr. bei $\psi_{\text{O}_2} = 3\%$)) erreicht [36].

5.3. Etagenöfen und Wirbelschichten

Je nach Konsistenz des Abfalls kommen neben Drehrohr und Rost auch andere Verfahrensprinzipien zum Einsatz, die kurz beschrieben werden sollen. Aus der Vielzahl der bekannten Verfahren wird der Etagenofen und die Wirbelschichtfeuerung ausgewählt. Wie am Beispiel des Etagenofens gezeigt, ist auch bei diesen Verfahren eine mehrstufige Prozeßführung mit einer deutlichen Trennung in Vor- und Nachverbrennungsstufe häufig erforderlich.

Bei einem Etagenofen wird Klärschlamm, wie in Bild 32 dargestellt über Krälarme von oben nach unten nacheinander den einzelnen Etagen zugeführt. Die Verbrennungsluft wärmt sich im Gegenstrom dazu zunächst direkt unter Abkühlung der Asche vor. Nach der Hauptverbrennungszone, unterhalb der gegebenenfalls ein Zusatzbrenner vorzusehen ist, wird ein Teil der entstehenden

Abgase der Nachverbrennungsstufe zugeleitet. Der im Ofen verbleibende Teilgasstrom wird weiter im Gegenstrom nach oben geleitet und bewirkt eine Trocknung und Vorwärmung des Brennstoffes. Von diesem Gasstrom werden u.a. Schadstoffe erfaßt, die durch pyrolytische Vorgänge nach der Trocknungsphase entstehen. Der entstehende Brüden ist deshalb einer Nachverbrennung zuzuführen. Insgesamt ist mit einer Gegenstromführung eine sehr günstige Energie- und Temperaturführung (in Anlehnung an die "Wärmerückgewinnung aus dem Gut" bei Industrieöfen, Vermeidung der Ascheerweichung- und verbackung) verbunden.

Wirbelschichtfeuerungen eignen sich sowohl für die Verbrennung von Klärschlamm als auch für andere speziell aufgearbeitete "schwierige" Brennstoffe wie z.B. BRAM.

Bei einer Wirbelschichtfeuerung werden der Brennstoff zusammen mit einem körnigem Inertmaterial (z.B. Sand) in einen Reaktor mit einem Düsenboden von der Luft im Gegenstrom angeströmt und in einen schwebebähnlichen Zustand versetzt. Das bewirkt zugleich einen sehr guten Stoff- und Wärmeübergang. Wirbelschichtfeuerungen sind dadurch gekennzeichnet, daß auch bei Stoffen mit relativ niedrigen Heizwerten ($h < 5 \text{ MJ/kg}$) noch eine autarke Verbrennung möglich ist. Eine intensive Bettzirkulation im unteren Anlagenteil einer Wirbelschichtfeuerung, wie in Bild 33 dargestellt, scheint dabei von Vorteil. Auf die sogenannte Combi-Fluid-Feuerung mit interner Bettzirkulation und darüber angeordnetem Axialzyklon, insbesondere für "Problembrennstoffe", sei verwiesen [39].

6. Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag behandelt unter Einbeziehung verschiedener Bildungs- und Abbaumechanismen von Schadstoffen Möglichkeiten zur Optimierung von Verbrennungsprozessen insbesondere für sogenannte schwierige Brennstoffe (Reststoffe). Dabei werden je nach Konsistenz der Reststoffe Verbrennungskonzepte für gasförmige, flüssige, staubförmige und für feste, nicht staub-

förmige Reststoffe betrachtet. Die jeweils angeführten Beispiele geben grundsätzliche Zusammenhänge wieder, so daß die Ergebnisse prinzipiell auch auf andere Reststoffe übertragbar sind. Es zeigt sich dabei, daß bei Anwendung sogenannter mehrstufiger Verbrennungskonzepte gas- und partikelförmige Emissionen erheblich herabgesetzt werden können. Darüber hinaus sind in der Zukunft auch Fragestellungen hinsichtlich einer auf die Wiederverwendung der Rückstände ausgerichteten Prozeßführung sehr interessant. Konzeptionell erscheinen dazu bei einer deutlicheren Trennung der einzelnen Verbrennungsteilsysteme (z.B. Vorverbrennungsstufe Rost und Nachverbrennungsstufe Brennkammersystem) eine Vielzahl von Möglichkeiten gegeben.

Zur Abscheidung von Schadstoffen, die kaum oder überhaupt nicht durch die Prozeßführung beeinflussbar sind oder deren Konzentrationen gegebenenfalls trotz Primärmaßnahmen die zulässigen Grenzen überschreiten, bleiben Sekundärmaßnahmen erforderlich. Zu diesem Problemkreis wird an dieser Stelle, da er ebenfalls von großer Bedeutung und sehr umfangreich ist, auf die entsprechende Literatur verwiesen. Abschließend sei erwähnt, daß mit den dargestellten und noch weiter zu entwickelnden Primärmaßnahmen nachgeschaltete Verfahren zur Schadstoffreduzierung erheblich entlastet werden.

7. Literatur

- [1] Heyde, H. von der:
Vortragsreihe Reststoffe, Teil 1, Einführung und Bestandsaufnahme.
Wochenblatt für Papierfabrikation 2, 1990.
- [2] Ökobilanz von Packstoffen.
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern,
Februar 1991.
- [3] Hoppenheit, P.; Beyer, J.; Allhorn, H.:
Abfallaufbereitungstechnik als Bestandteil eines integrierten Abfallwirtschaftskonzeptes.
Technische Überwachung 32 (1992) 10.
- [4] Dryer, F.L.; Glassman, I.:
High-Temperature Oxidation of CO and CH₄
14th Int. Symposium on Combustion.
Combustion Inst. Pittsburgh, 1973.
- [5] Günther, R.:
Verbrennung und Feuerungen.
Springer Verlag 1974.
- [6] Lee, K.B.; Thring, M.W.; Beer, J.M.:
On the rate of combustion of soot in a laminar soot flame.
Combustion and flame 6 (1962), 137.
- [7] Hasberg, W.; Römer, R.:
Organische Spurenschadstoffe in Brennräumen von Anlagen zur thermischen Entsorgung.
Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) 6.
- [8] Hagenmaier, H.; Mittelbach, G.:
Versuche zum katalytischen NO_x- und Dioxinabbau im Abgas einer Müllverbrennungsanlage.
VGB Kraftwerkstechnik 70 (1990) 6.

- [9] Vogg, H.; Hunsinger, H.:
Versuche der chemisch-oxidativen Zerstörung primärseitig
gebildeter Dioxine/Furane.
Symposium 25 Jahre LIT 5 Jahre TAMARA, 7./8. April 1992,
Kernforschungszentrum Karlsruhe, ISSN 0303-4003.
- [10] Schetter, G.; Horch, K.:
Destruction of PCDD and PCDF in refuse incineration plants
by primary and secondary measures.
International Flame Research Foundation, ToTeM5, October
1.-3., 1991, Bari, Italy.
- [11] Thielen, W.:
Fluegas cleaning in waste incineration with activated
carbon.
International Flame Research Foundation, ToTeM5, October
1.-3., 1991, Bari, Italy.
- [12] de Soete, G.:
Physikalische-chemische Mechanismen bei der
Stickstoffoxidierung industrieller Flammen.
Gas-Wärme-International 30 (1981), 15.
- [13] Fenimore, C.P.:
Reactions of Fuel-Nitrogen in Rich Flame Gases.
Combustion and Flame 26 (1976), 249.
- [14] Fenimore, C.P.:
Studies of Fuel-Nitrogen Spezies in Rich Flame Gases.
17th Symposium (Int.) on Combustion, Pittsburgh, 1978, 661.
- [15] Jansohn, P.; Kolb, T.; Leuckel, W.:
HCN - ein wichtiges Zwischenprodukt bei der NO-Bildung in
turbulenten Diffusionsflammen.
VDI-Berichte Nr. 765, VDI-Verlag, Düsseldorf 1989, 331.

- [16] Eberius, H.; Just, Th.; Kelm, S.; Warnatz, J.:
Modellierung der Stickoxidbildung von brennstoffgebundenem
Stickstoff in dotierten Kohlenwasserstoff/Luftflammen mit
Inertgaszusatz.
VDI-Berichte, VDI-Verlag, Düsseldorf 1989, 99.
- [17] Jeschar, R.; Klöppner, G.:
Mechanismen zur Schadstoffentstehung und -vermeidung in
Feuerungen.
Clausthaler Kurses zur Umwelttechnik "Mindern von
Emissionen", 24.-26. April 1989, Clausthal.
- [18] Carlowitz, O.; Scholz, R.; Jeschar, R.:
Vereinfachte Berechnungen von Wirbelfäden zur Erzeugung
freier Turbulenz in Mischkammern.
Abhandlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen
Gesellschaft 31 (1980), S. 7-36.
- [19] Oswatitsch, K.:
Grundlagen der Gasdynamik.
Springer-Verlag Wien, New York, 1976.
- [20] Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.:
Zur Thermodynamik von Freistrahlen.
Gas-Wärme International 33 (1984) 1.
- [21] Scholz, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.:
Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen
Verbrennung von Abfällen.
Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) 11.
- [22] Scholz, R.; Beckmann, M.:
Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in
Rostfeuerungsanlagen.
VDI-Berichte Nr. 895, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991.

- [23] Firmenprospekt der Fa. Saacke, Bremen.
Hannover-Messe, 1992.
- [24] Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.:
Schadstoffarme Verbrennung in einem Drallbrennkammersystem.
Die Industrieheizung 38 (1986), S. 90-95.
- [25] Malek, Ch.J.; Jeschar, R.; Scholz, R.:
Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von
Erdölrückständen.
VDI-Berichte Nr.922, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991,
S. 271-282.
- [26] Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.:
Heißentschwefelung in Drallbrennkammersystemen und einem
isothermen Rohrreaktor.
VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag, Düsseldorf 1985,
S. 673-687.
- [27] Erbach, G.:
VGB Kraftwerkstechnik 64 (1984), S.1015-1019.
- [28] Schetter, G.; Martin, J.:
Gemeinsame Verbrennung von Müll und Klärschlamm auf dem
Rückschubrost.
VGB Kraftwerkstechnik 65 (1985) 11.
- [29] Jochem, M.:
Stand der Rostfeuerungs-technik und Entwicklungstendenzen.
Entsorgungspraxis Spezial 10, Bertelsmann Fachzeitschriften
(1989) 12.
- [30] Horch, K.; Mützenreich, G.:
Feuerungsautomatisierung für Abfallverbrennungsanlagen.
In: Thome-Koznienski, K.J., Müllverbrennung und Umwelt 2.
E. Freitag-Verlag für Umwelttechnik, Berlin 1985.

- [31] Schäfers, W.; Daimler, P.:
Design of waste incineration plants - experience at
Steinmüller.
International Flame Research Foundation, ToTeM5, October
1.-3., 1991, Bari, Italy.
- [32] Reimann, D.O.:
Optimierung der Rostfeuerung für Hausmüll.
Phoenix international, Zürich, Bd. 6, 2 (1988).
- [33] Martin, J.E.:
Moderne Abfallentsorgung nach dem Martin-System.
Sonderdruck der Firma Martin GmbH für Umwelt- und
Energietechnik, München.
- [34] Institut für Energieverfahrenstechnik der TU Clausthal.
Messungen MHKW Hamm 1989.
Clausthal, 1989.
- [35] Hünlich, Th., Jeschar, R.; Scholz, R.:
Sorptionstechnik von SO_2 aus Verbrennungsabgasen bei
niedrigen Temperaturen.
Zement-Kalk-Gips 44 (1991) 5, S. 228-237.
- [36] Scholz, R.; Schopf, N.:
Combustion Process for Waste Fuels and some Test Results of
Pilot Plants.
Proceedings "The 1989 Incineration Conference", Knoxville,
USA, 1989.
- [37] Reher, P.:
Entsorgung von Sonderabfallstoffen durch Verbrennung.
Vortrags- und Diskussionstagung, 4.-6.12. 1989,
Baden-Baden, GVC-VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen.
- [38] Fischer, G.; Martin, A.:
Müll und Abfall 6 (1987), S. 248-258.

- [39] Altmann, W.; Bohm, D.; Reichenbach, V.; Sonderring, D.;
Stams, N.:
XX. Kraftwerkstechnisches Kolloquium.
Dresden, 1988.

8. Formelverzeichnis

Symbole:

Lateinische Symbole:

c	Konzentration
d	Durchmesser
D	Dispersionskoeffizient
E	Aktivierungsenergie
h	Heizwert, unterer
$\dot{m}$	Massenstrom
p	Druck
$\dot{Q}$	Wärmestrom
r	Volumenkonzentration
t	Zeit
T	absolute Temperatur
v	Geschwindigkeit
x	Weg
z	Düsenanzahl

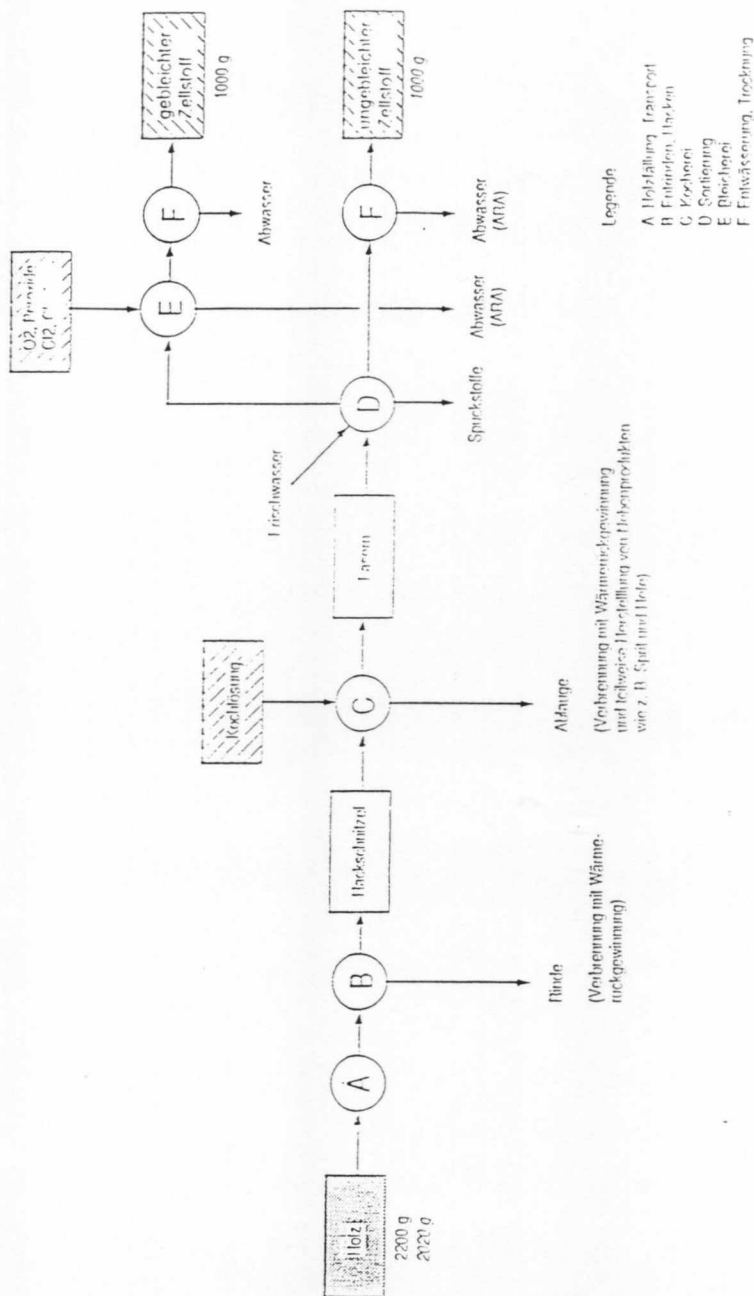
Griechische Symbole:

η	Wirkungsgrad
ϑ	Temperatur
λ	Luftzahl
τ	Verweilzeit
φ	relative Feuchte

Indices:

a	axial	Ra	Rost Anfang
ab	abgeführt	Re	Rost Ende
		S	Sättigung
B	Brennstoff	v	Abgas
F	Feuerraum	V	Vorwärmung
G	Gleichgewicht	x	Ort
i	Anzahl	zu	zugeführt
L	Luft	O	Austritt
m	mittlere		
pr	Primär		
R	Rost		
th	thermisch		

9. Bilder



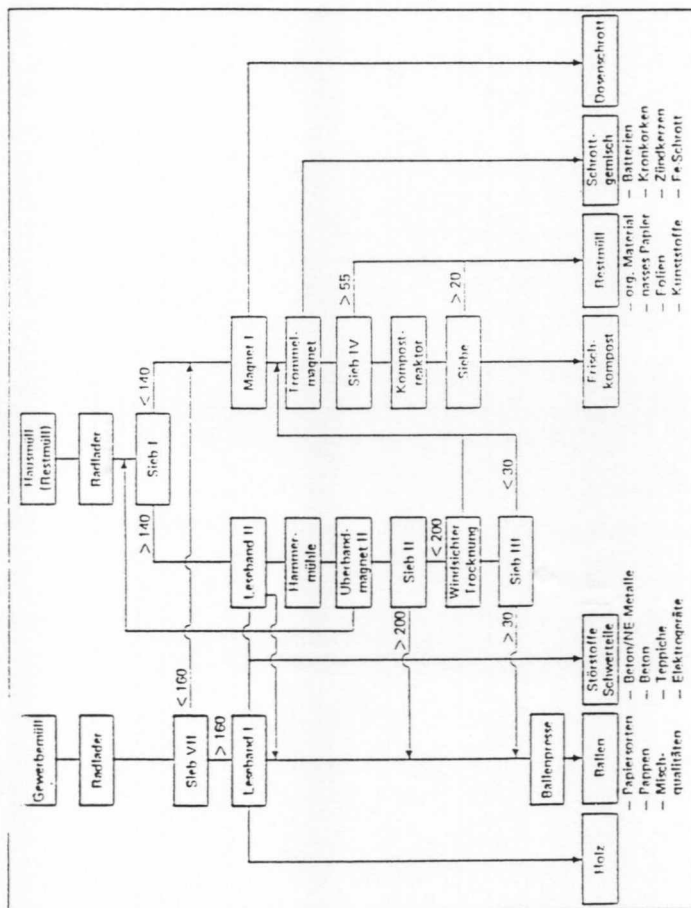


Bild 2: Verfahrenstechnisches Fließbild für eine Vorbehandlung von Haus und Gewerbemüll [3]

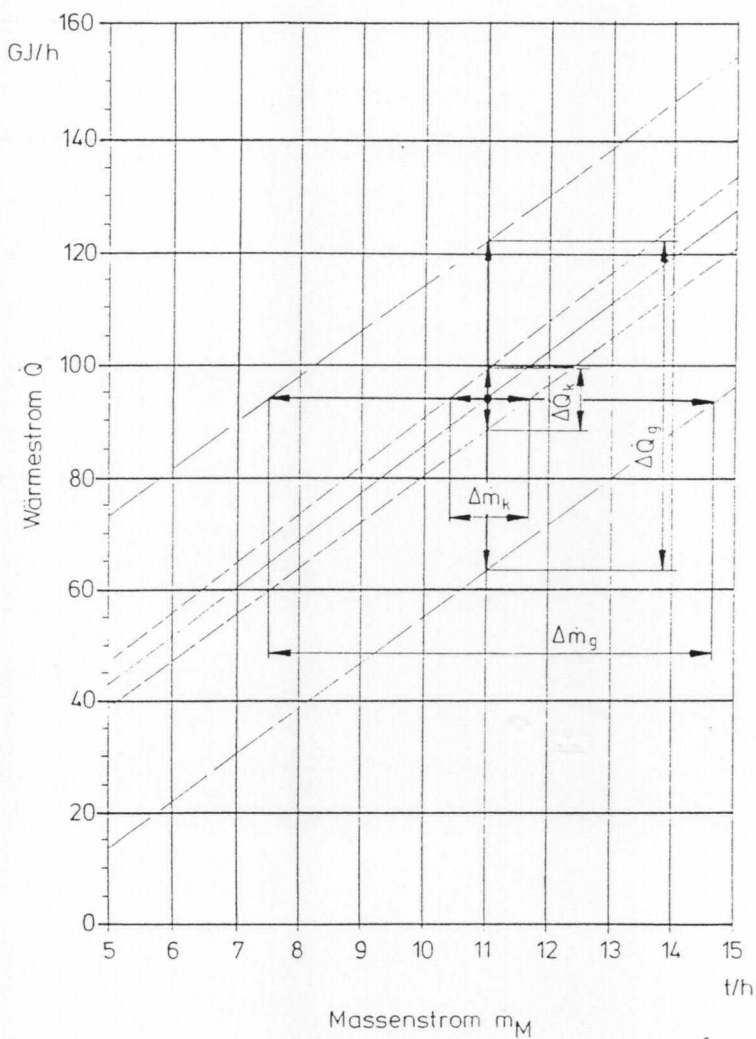
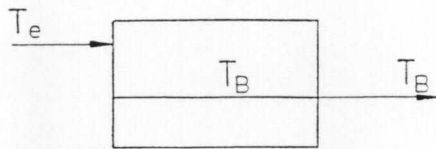


Bild 3: Auswirkungen von Heizwertschwankungen auf Massenstrom $\dot{m}_M$ und Wärmestrom $\dot{Q}$

Rührkessel (CSR):

$$Pe = \frac{w \cdot L}{D} = 0$$



Kolbenströmer (PFR):

$$Pe = \frac{w \cdot L}{D} = \infty$$

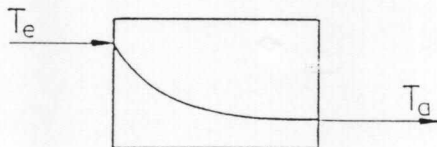


Bild 4: Darstellung eines Rührkessels und eines Rohrreaktors anhand der Temperaturverläufe (Pe Peclet-Zahl, w mittlerer Geschwindigkeit, L charakt. Länge, D Dispersionskoeffizient, T_e Eintritts-, T_a Austritts-, T_B Bilanztemperatur)

CO-Abbau (Dryer /Glassman)

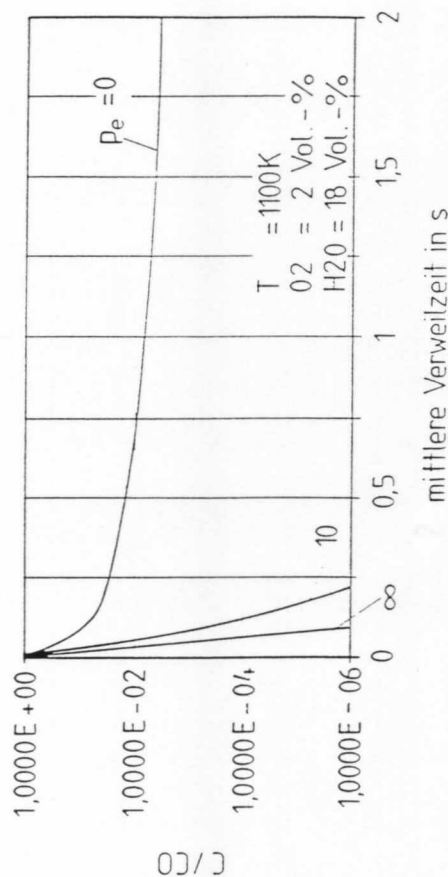


Bild 5: Abhängigkeit des CO-Abbaus c/c_0 von der mittleren Verweilzeit τ und dem Mischungsverhalten des Reaktors [4] ($Pe = wL/D$, w charakteristische Geschwindigkeit, L charakteristische Reaktorlänge, D Dispersionskoeffizient, $Pe = 0$ Rührkessel, $Pe = \infty$ Kolbenströmer, $Pe = 10$ technischer Reaktor)

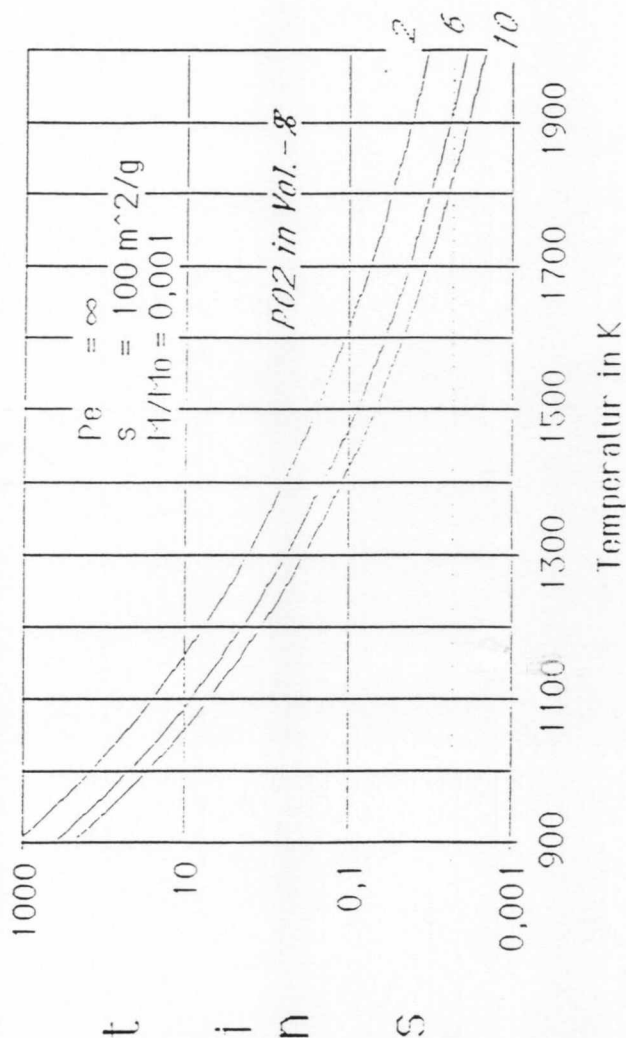


Bild 6: Abhängigkeit der Abbauzzeit von Ruß von der Temperatur und dem Sauerstoffpartialdruck in laminaren Flammen [6]

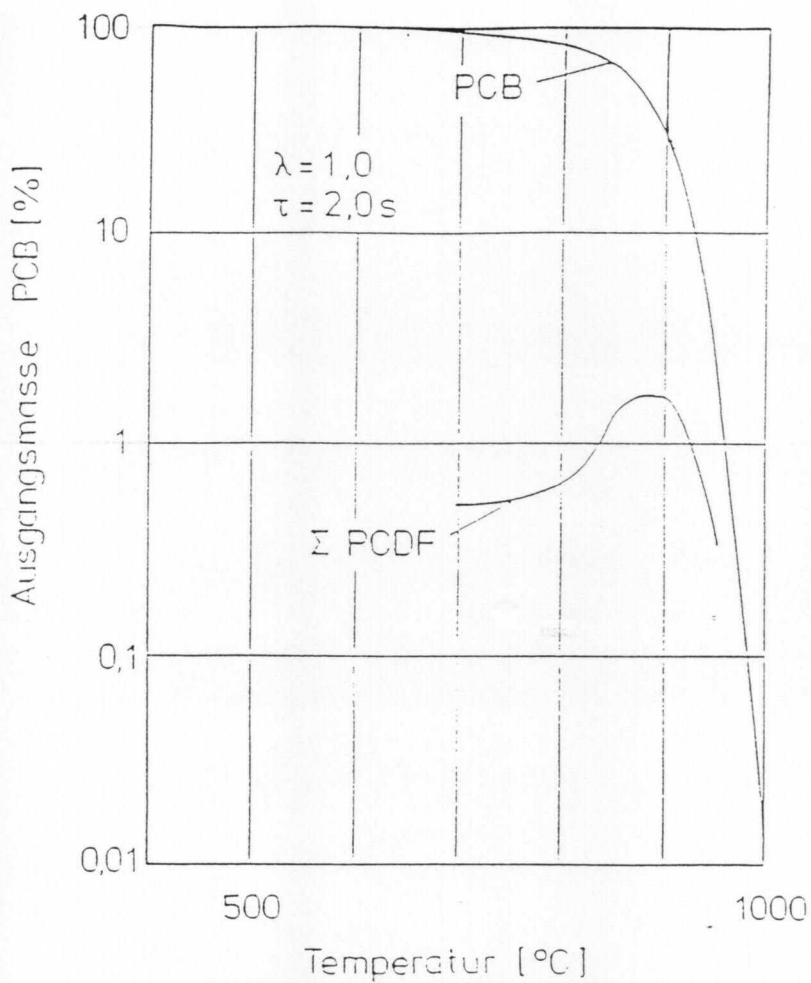


Bild 7: Abbau von PCB in Abhängigkeit von der Temperatur [7]

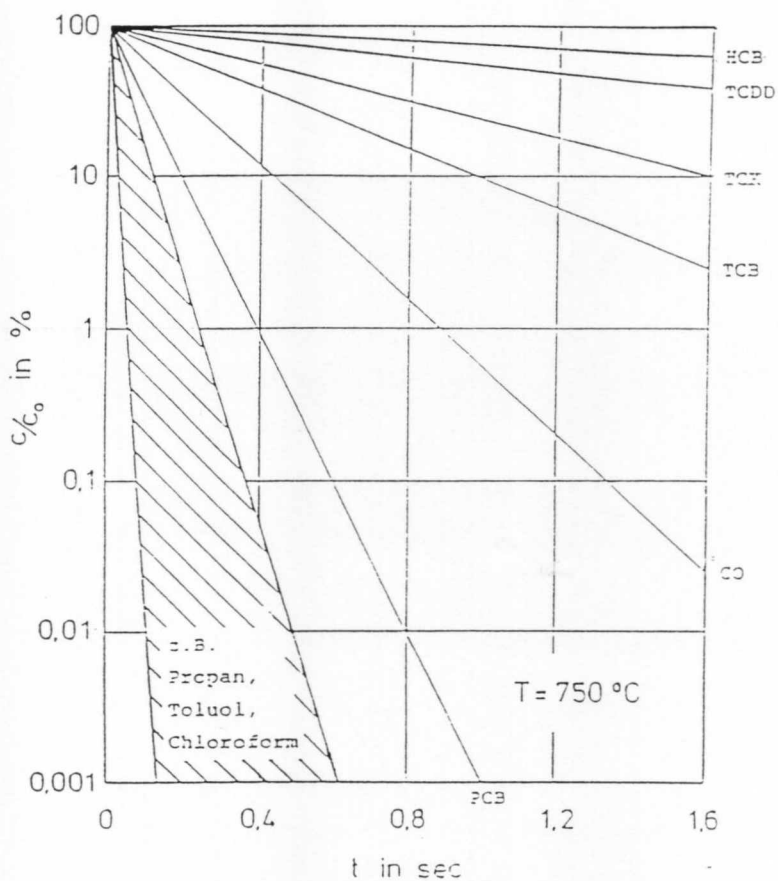


Bild 8: Abbau von organischen Substanzen für verschiedene Verweilzeiten in Luft innerhalb eines PFR bei 750 °C [7]

Stickstoffquelle	Reaktionsmedium	Mechanismus der NO-Bildung
N_2 (Luftstickstoff) $N = N$	Rauchgas $N_2 + O \rightleftharpoons NO + N$ $N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$	Thermisches NO
NX (Brennstoff-Stickstoff) $C_5 H_5 N$	Flammenfront HCN $HCN \rightarrow NH_i$ I $NH_i + O \rightleftharpoons NO +$ II $NH_i + NO \rightleftharpoons N_2 +$	Brennstoff-NO Prompt-NO $N_2 + CH \rightleftharpoons NHCN$

Bild 9: Schematische Darstellung der Mechanismen zur NO - Bildung [12]

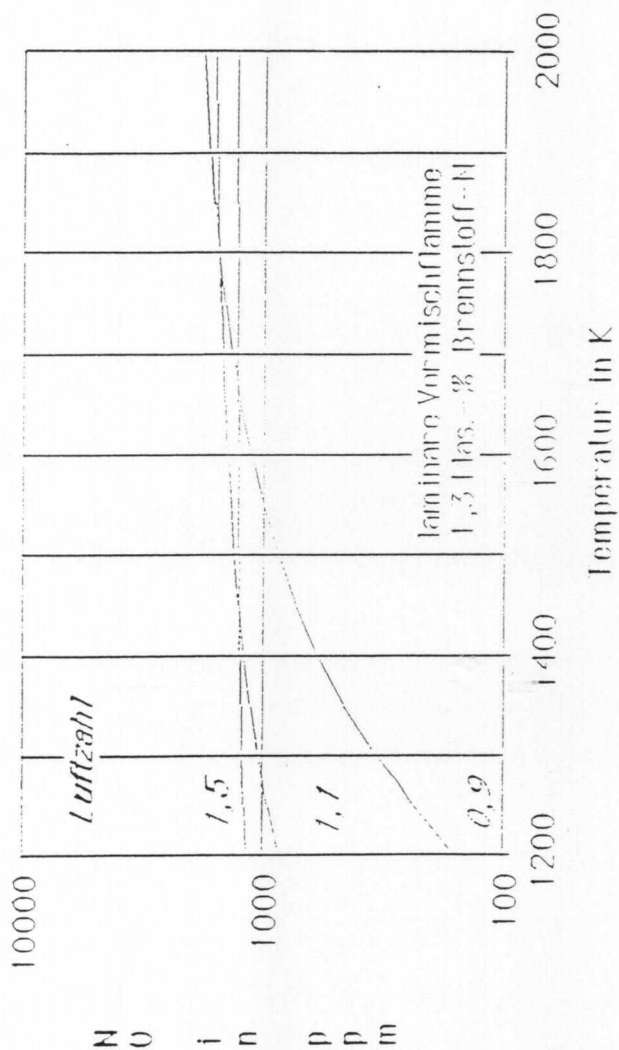


Bild 10: Abhängigkeit der Brennstoff-NO-Bildung von der Temperatur und der Luftzahl für eine laminare Vormischflamme [17]

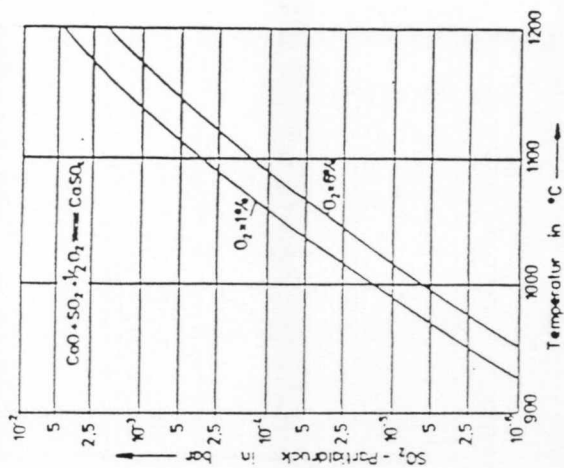
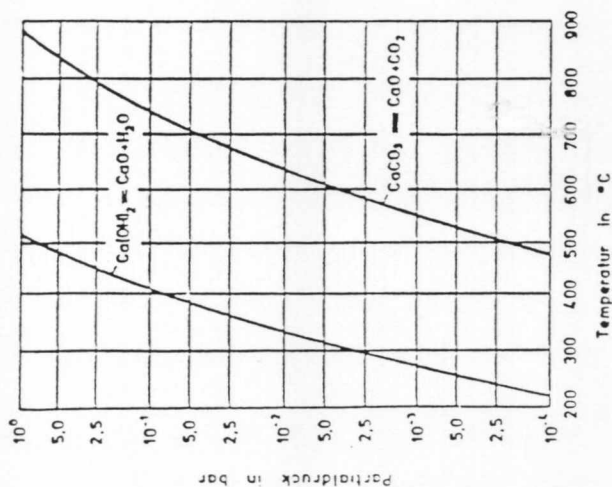
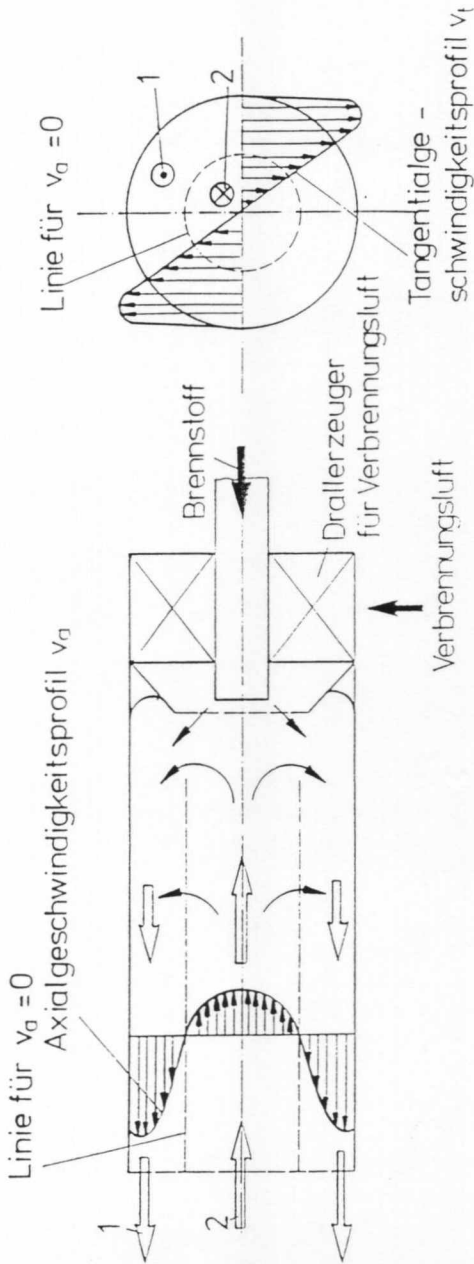


Bild 11: Gleichgewichtspartialdruck für die Zersetzung von Kalkadditiven und Bildung von Sulfat



- 1 Vorwärtströmung
- 2 Rückwärtsströmung

Bild 12: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung in einer überkritischen Drallströmung in einer zylindrischen Brennkammer [z.B. 18]

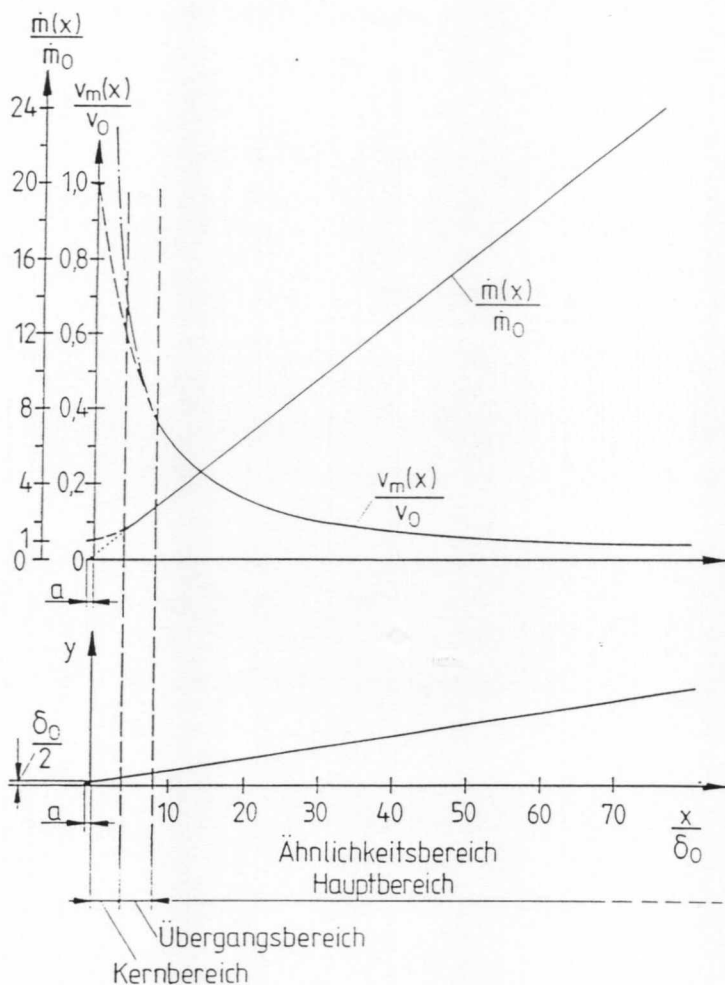
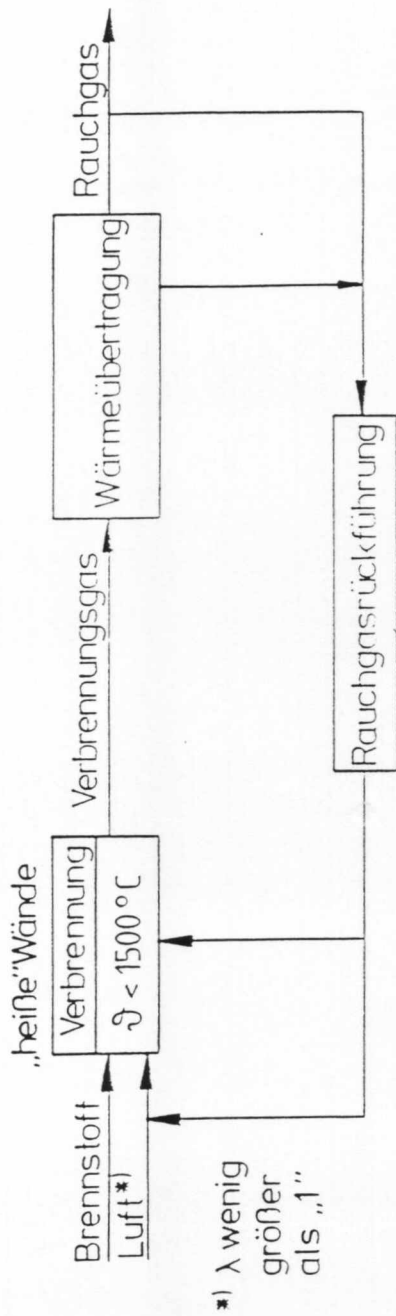
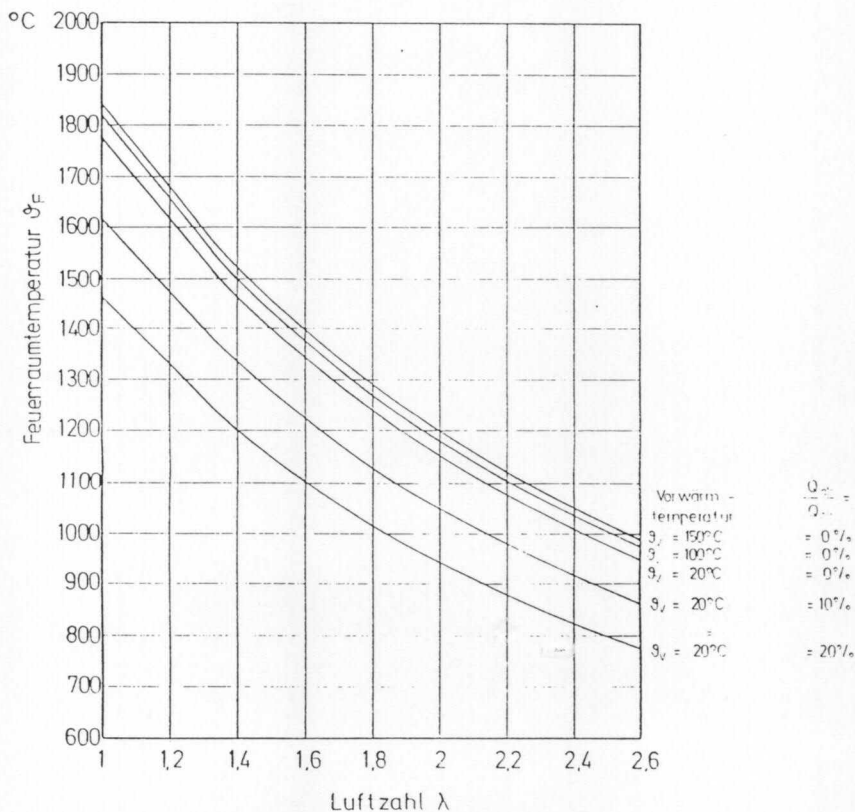


Bild 13: Abhängigkeit des Massenstromes $\dot{m}(x)$ und der mittleren Geschwindigkeit $v(x)$ vom Strömungsweg bei Freistrahlen



*) λ wenig
größer
als „1“

Bild 14: Schematische Darstellung der Verbrennungstemperatursteuerung durch Entkopplung von Verbrennung und Wärmeübertragung und Rauchgasrückführung [21]



! Id 15: Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur Θ_F von der Luftzahl λ für verschiedene Luftvorwärmtemperaturen Θ_V und unterschiedliche Verhältnisse der Wärmeabkopplung $\dot{Q}_{ab}/\dot{Q}_{zu}$ (Brennstoffheizwert $h = 8,5 \text{ MJ/kg}$)

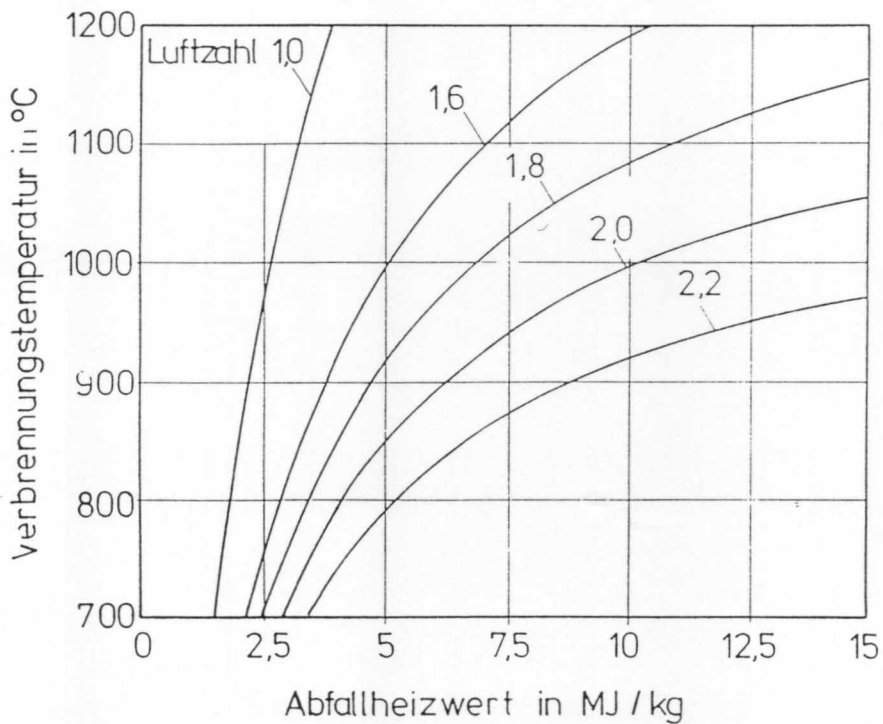


Bild 16: Abhängigkeit der adiabaten Verbrennungstemperatur vom Heizwert bei verschiedenen Luftzahlen λ

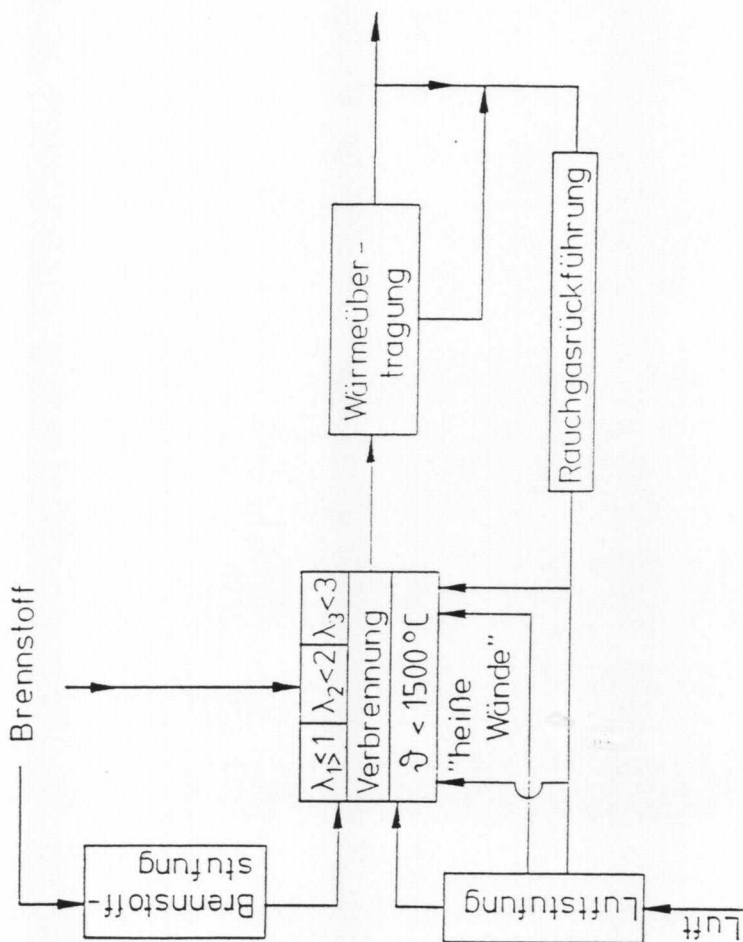


Bild 17: Verbrennungskonzept zur Optimierung der Vermischungs-, Verweilzeit- und Temperaturverhältnisse im Hinblick auf eine Schadstoffreduzierung [21]

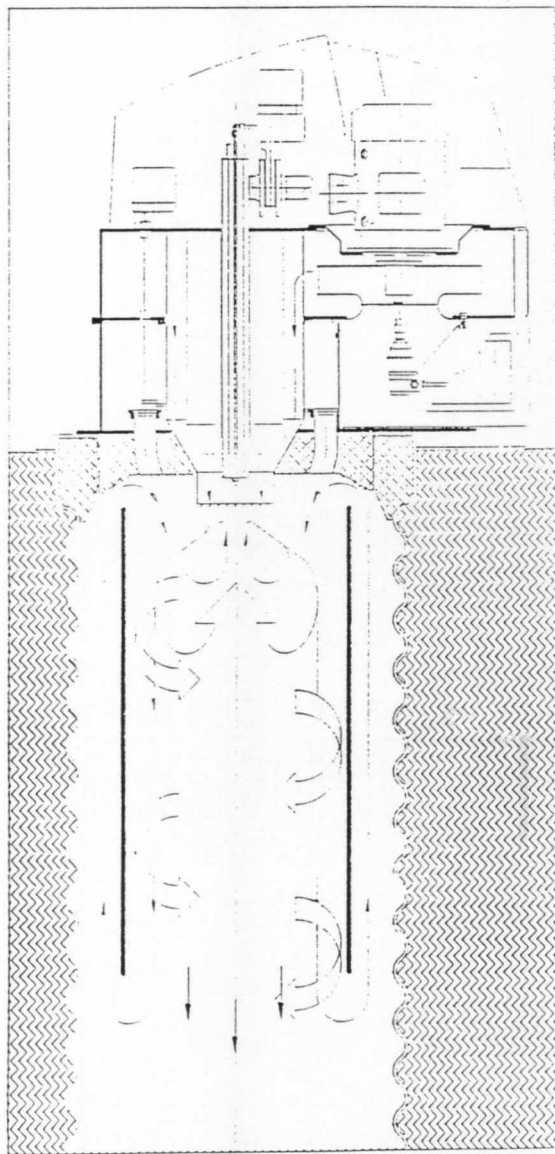


Bild 18: Brennkammersystem mit interner Rauchgasrückführung zur NO_x -Minderung [23]

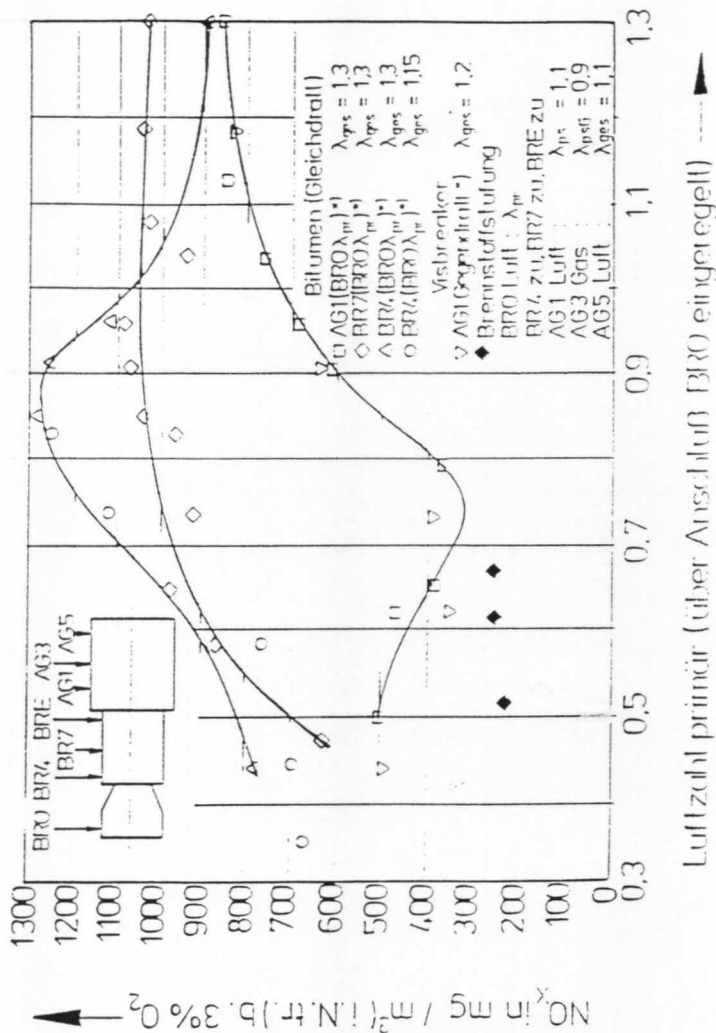


Bild 19: Einfluß der Primärluftzahl, des Zugabeortes der Sekundärluft und der Brennstoffstufung auf die NO_x -Emissionen der Verbrennung von Rückstandsölen [24]

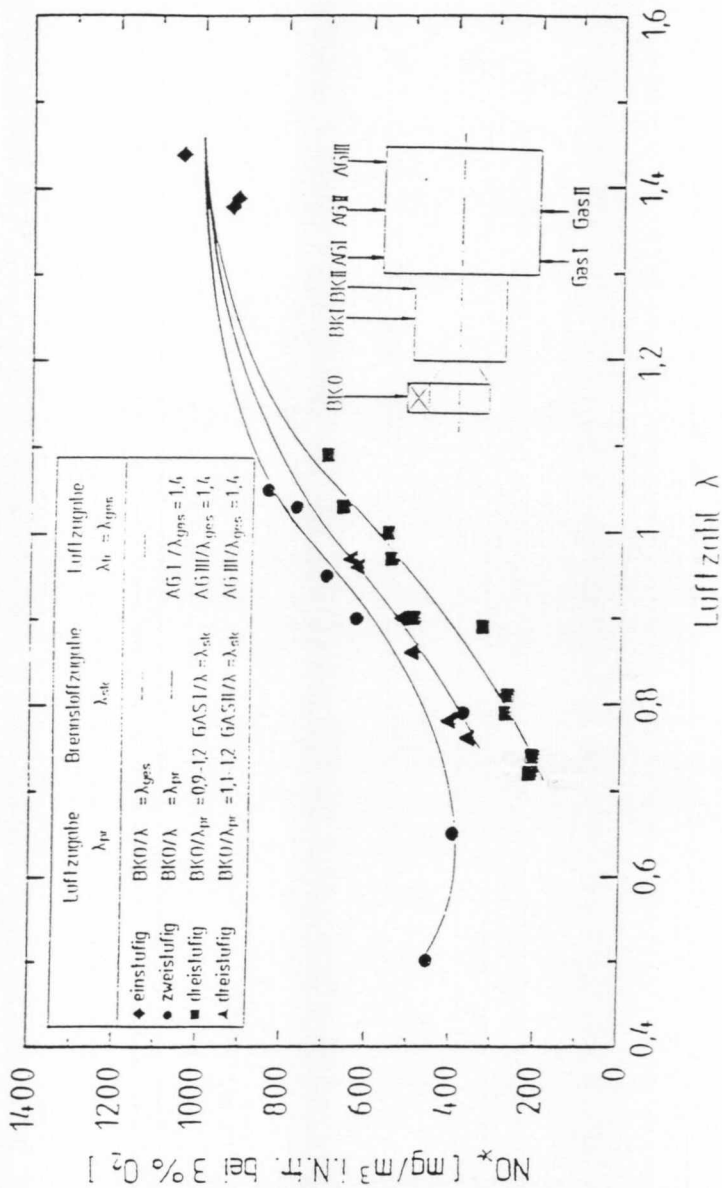


Bild 20: NO_x -Konzentration abhängig von der Luftzahl λ in der Reduktionsstufe bei der mehrstufigen Verbrennung von Erdölrückständen[25]

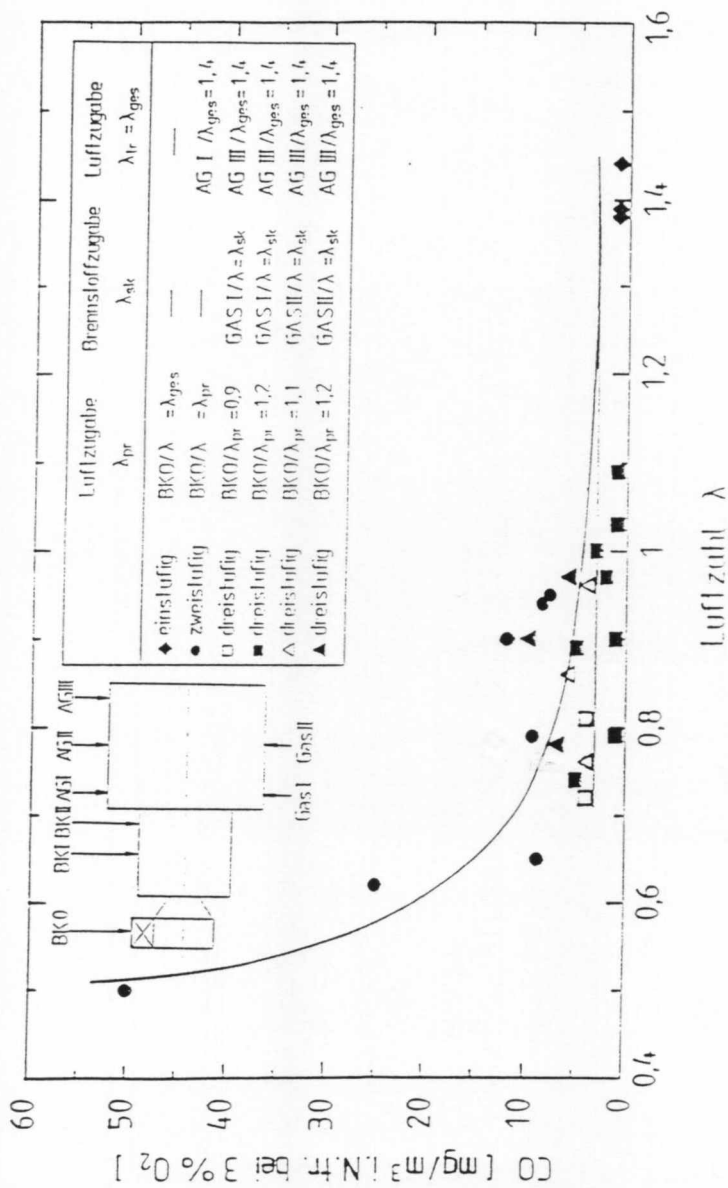
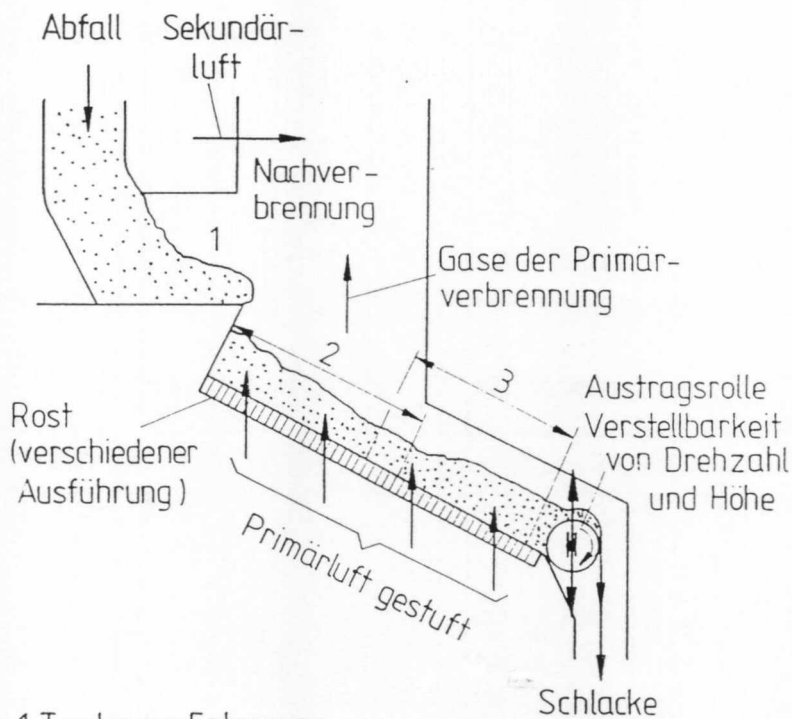


Bild 21: CO-Konzentration abhängig von der Luftzahl λ in der Reduktionsstufe bei der mehrstufigen Verbrennung von Erdölrückständen [25]



1. Trocknung, Entgasung
2. Trocknung, Entgasung, Vergasung
3. Verbrennung, Ausbrand der Schlacke

Bild 23: Verbrennungsablauf von festen stückigen Brennstoffen
am Beispiel einer Rostfeuerung

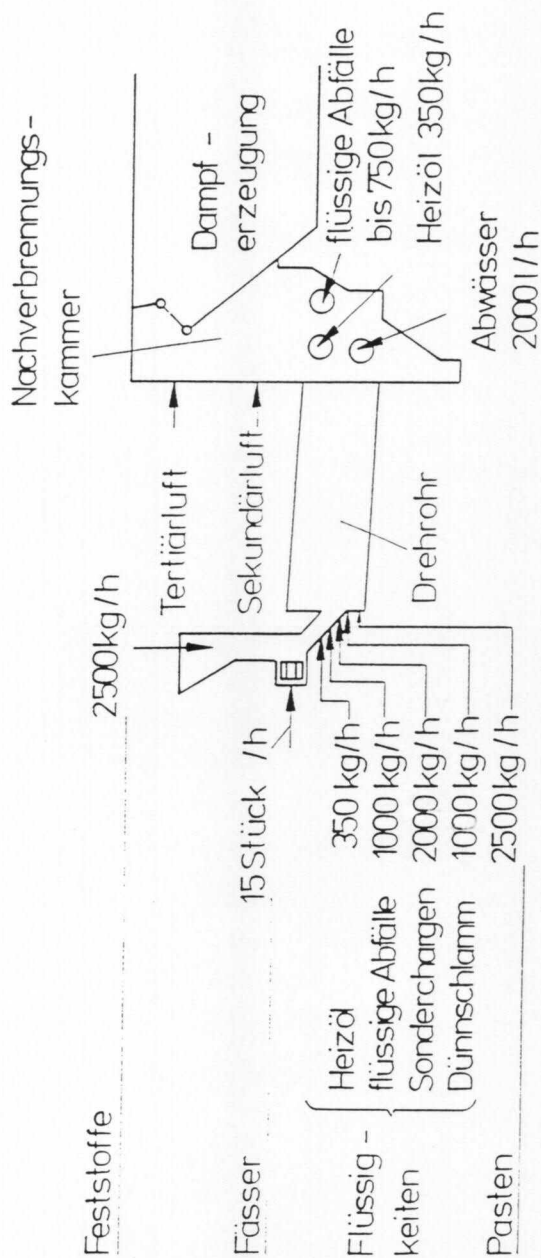


Bild 24: Vorverbrennungsstufe Drehrohr mit nachgeschalteter Nachverbrennungsstufe für die Verbrennung von Feststoffen, Flüssigkeiten und Pasten [27]

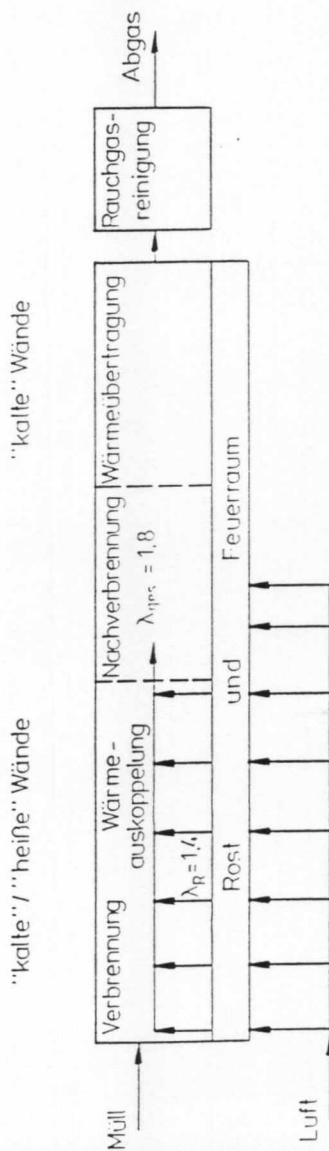


Bild 25: Schematische Darstellung einer Verbrennungsführung in Rostfeuerungsanlagen mit überlappenden Reaktionszonen [22]

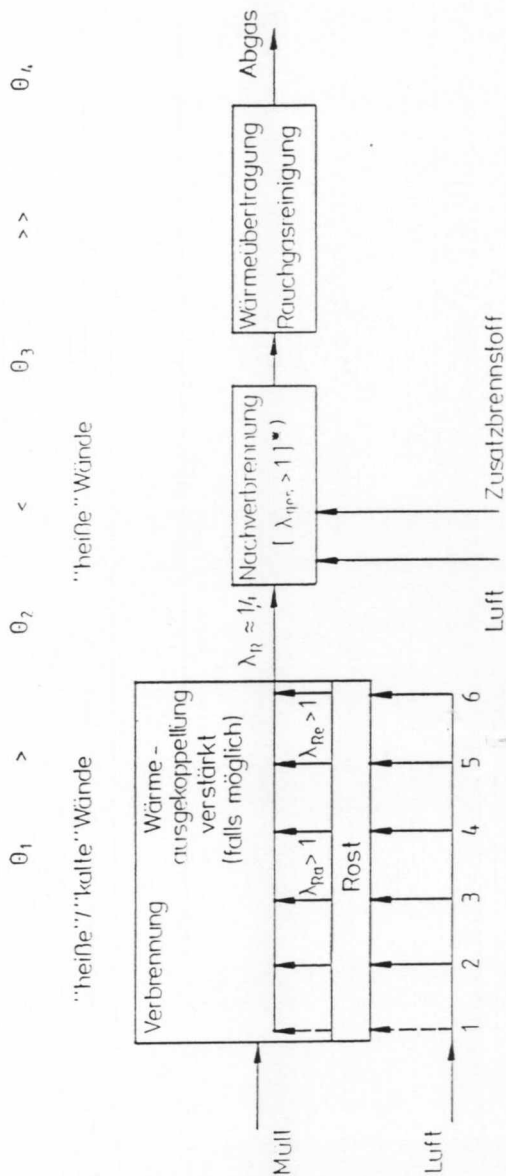


Bild 26: Schematische Darstellung einer mehrstufigen Verbrennungsführung in Rost-
 feuerungsanlagen mit veringierter Luftzufuhr (*) Gestaltung der Nachverbren-
 nung unter Gesichtspunkten aus Abschnitt 4) [22]

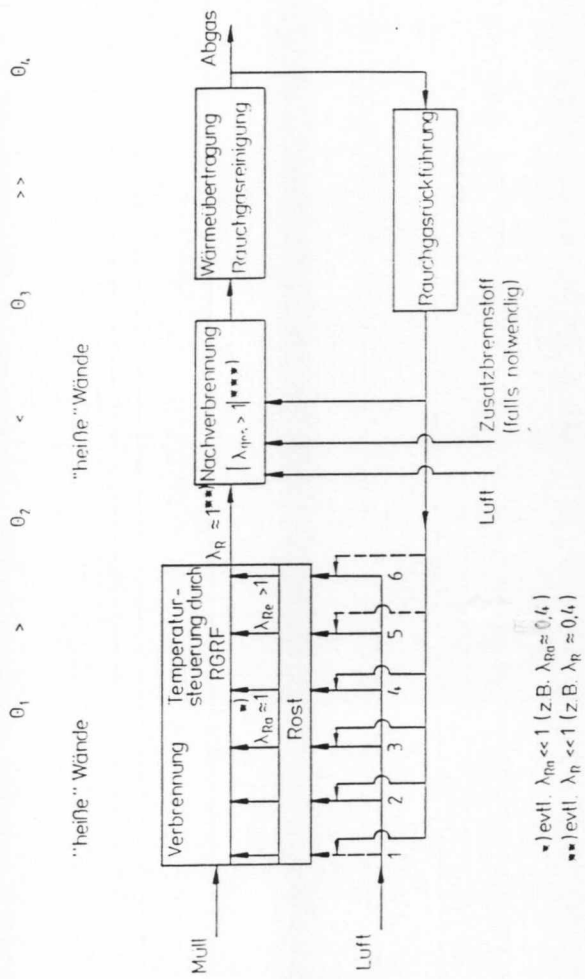


Bild 27: Schematische Darstellung einer mehrstufigen Verbrennungsführung für Rost-
 feuerungsanlagen mit verringerter Luftzufuhr und Rauchgasrückführung
 (***) Gesichtspunkte entsprechend Abschnitt 4) [22]

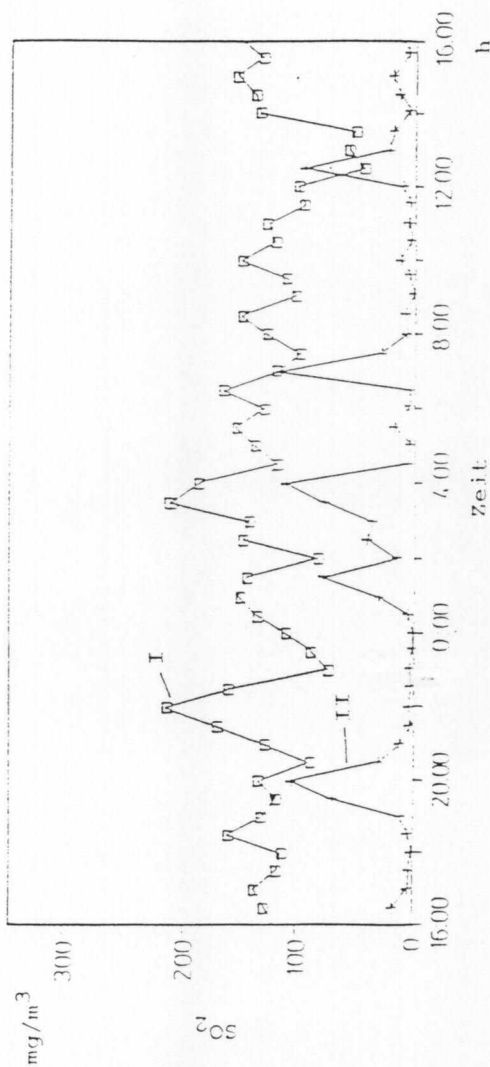


Bild 28: Halbstundenmittelwerte der SO_2 -Rohgaskonzentration. Kurve I = Ofenlinie ohne Additiv zum MÜllaufgabetrichter; Kurve II = Ofenlinie mit 23 kg Additiv (CaCO_3) pro 1000 kg Müll zum Aufgabetrichter [34]

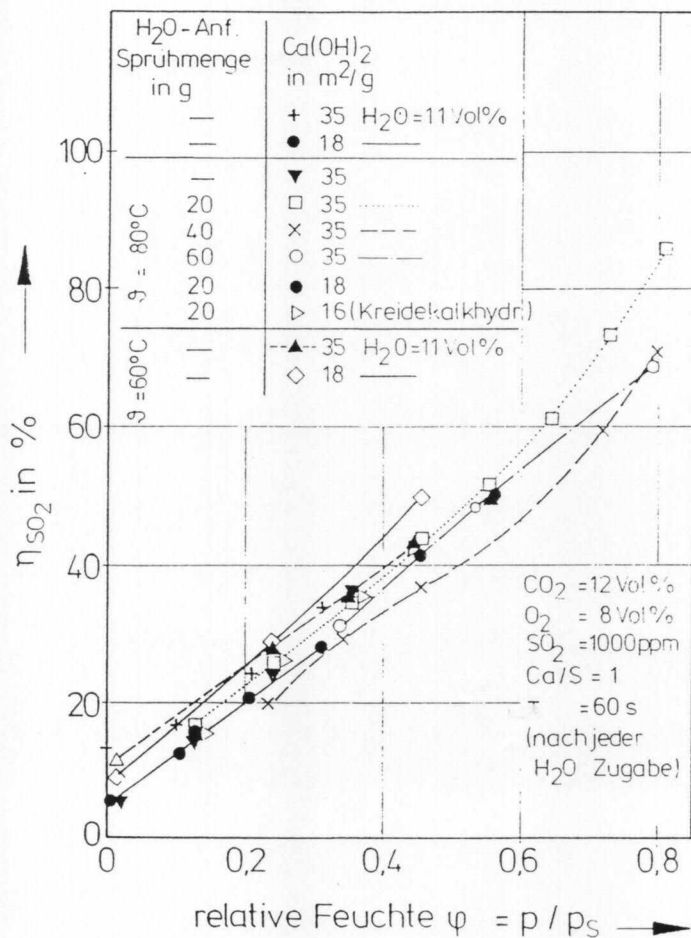


Bild 29: SO₂-Einbindung durch Kalkmilchsuspensionen bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit von der relativen Feuchte φ in einem Modellreaktor /35/

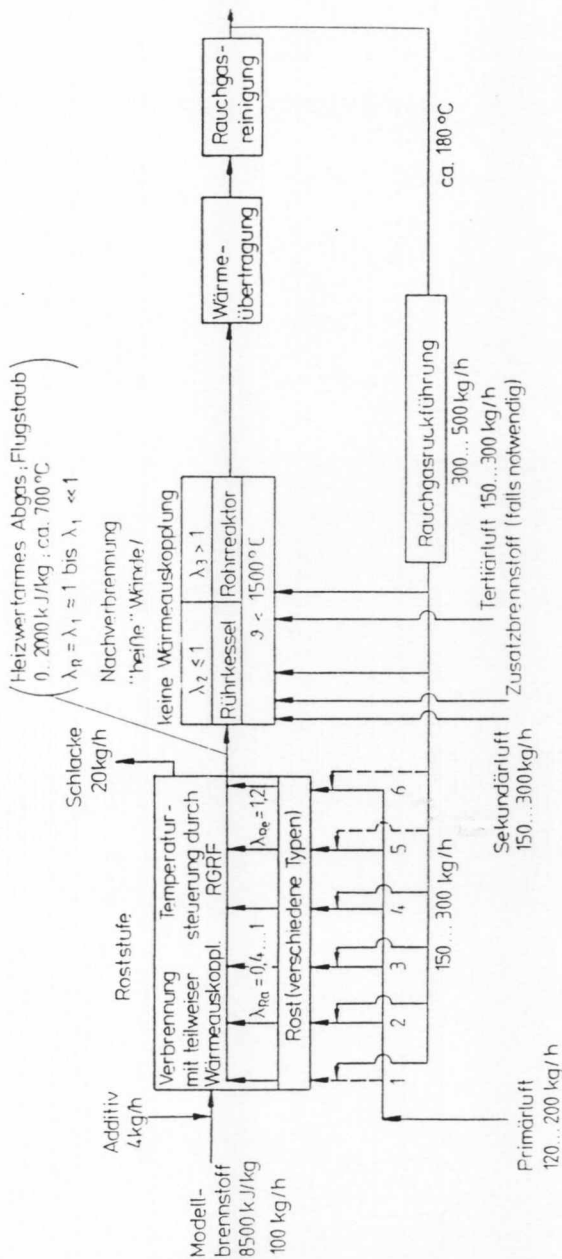


Bild 30: Schematische Darstellung einer Pilotanlage zur Durchführung von Parameter-
 variationen in der Rost- und Nachverbrennungsstufe im Hinblick auf eine
 optimierte Verbrennungsführung [22]

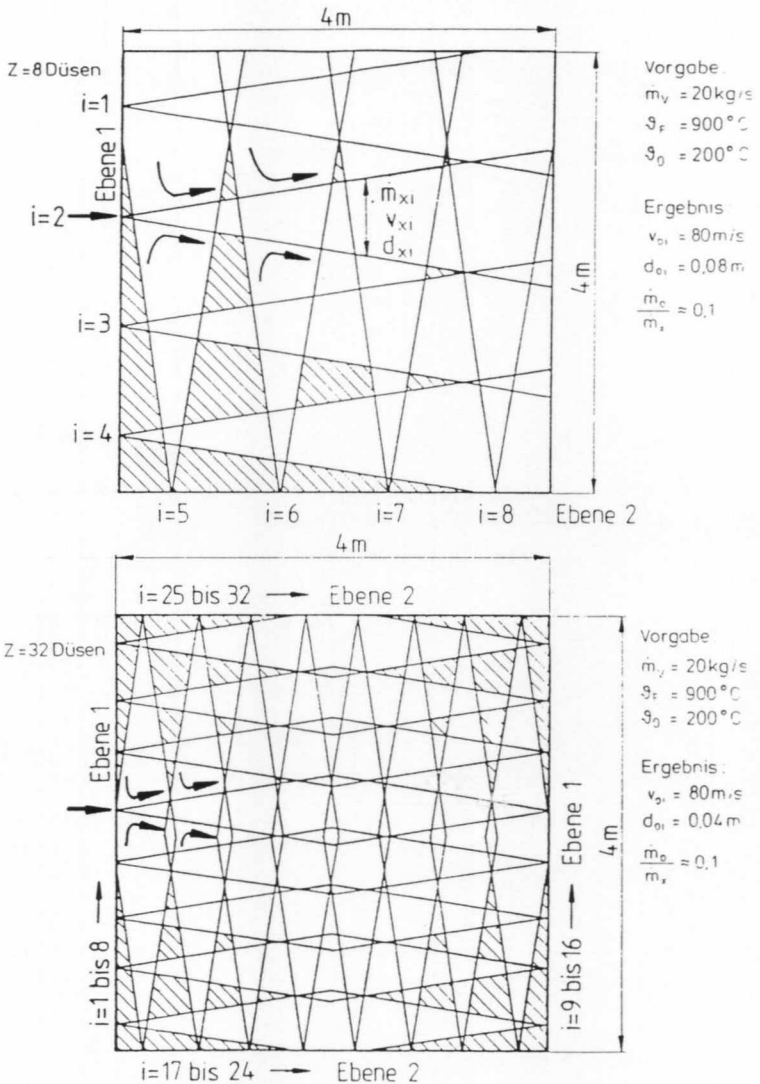


Bild 31: Möglichkeiten der Anordnung von Düsenfeldern in zwei Ebenen über einem Strömungsquerschnitt zur Herstellung eines "Rührkessel"-Elementes

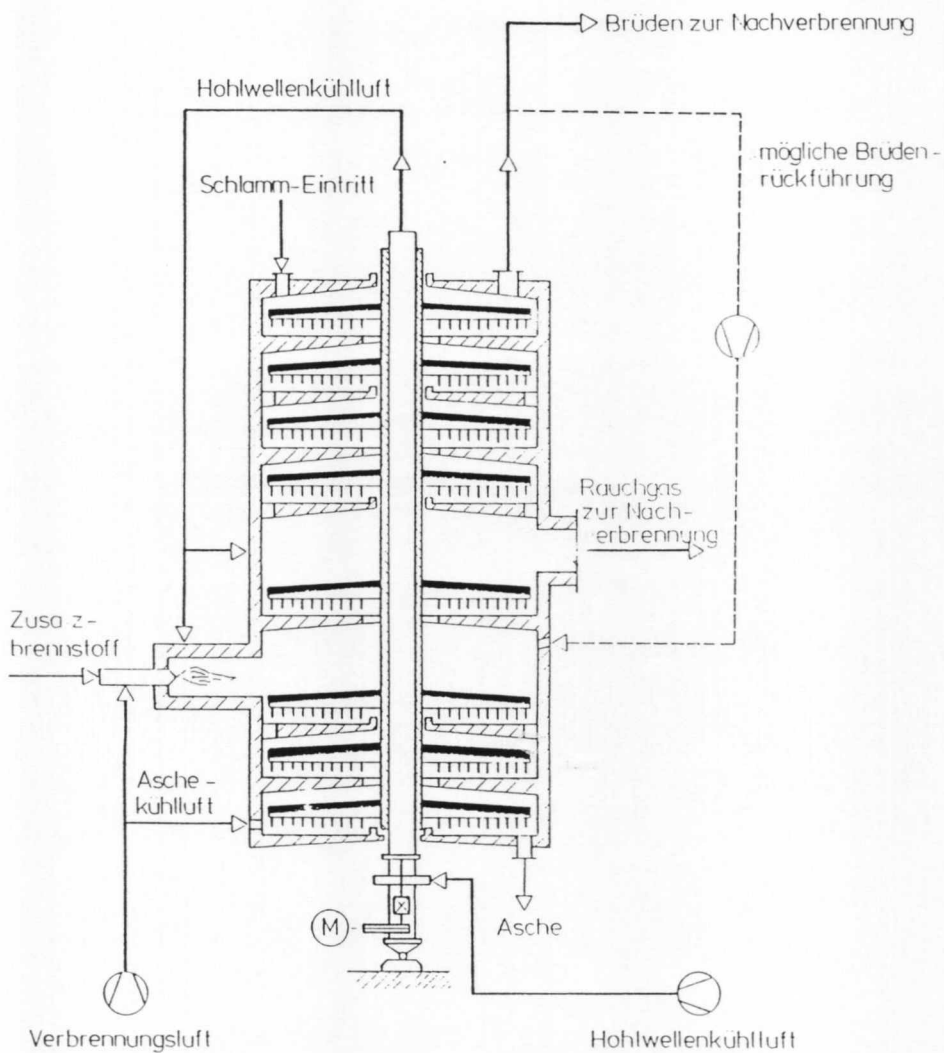


Bild 32: Etagenofen zur Klärschlammverbrennung [37]

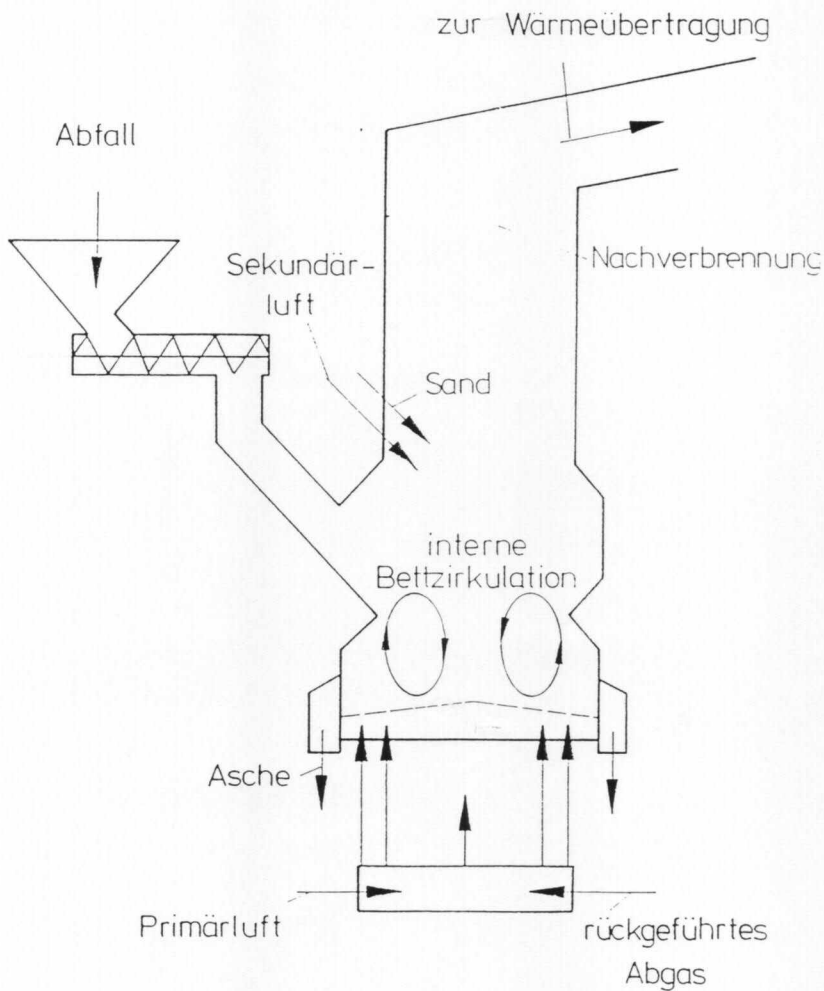


Bild 33: Abfallverbrennung in einer Wirbelschicht mit interner Bettzirkulation [38]

10. Anhang

Ausführliche Gliederung

1. Allgemeines

Betrachtung von Stoffkreisläufen, d.h. Verfolgung des "Pfades" eines Elementes bis es "verträglich für die Umwelt" ist.

Vermeiden, Vermindern, Verwerten,

Komplexe chemische Verbindungen in "einfache" handhabbare zerlegen

Verbrennung von Reststoffen

- Reduktion komplexer chemischer Verbindungen
- schlüssige Bilanzierung möglich
- Anfallende Rückstände müssen u.U. weiter behandelt werden
- Emissionen konnten erheblich herabgesetzt werden
- auf Verbrennungsführung achten (Primärmaßnahmen)

- auf Verfahrenstechnik der Rauchgas- und Reststoffnachbehandlung achten (Sekundärmaßnahmen)

- Deponie (Rest): direkte Deponierung vor Verbrennung
- in der Regel wegen Vielstoffproblematik (Deponiegas, Sickerwasser usw.) nicht möglich

2. Eigenschaften von Reststoffen

Reststoffe "Schwierige" fossile Brennstoffe

Kennzeichen:

- heterogene Zusammensetzung
- hoher Inertanteil (Ballastanteil)
Nichtbrennbares wie Asche, Wasser usw. bei Festbrennstoffen
CO₂, N₂ usw. bei Gasen
Salze, H₂O usw. bei Flüssigkeiten
- vergleichsweise hohe Gehalte an Schwefel-, Stickstoff-,
Halogenverbindungen, langkettige Kohlenwasserstoffe, etc.
- niedrige Heizwerte
- einen niedrigen Anteil flüchtiger Bestandteile

"Schwierige" fossile Brennstoffe können somit z.B. sein:

fest:	Sondermüll
	Hausmüll
	BRAM, BRAPP
	Petrolkoks
	kontaminierte Böden
	usw.
pastös:	eingedickte Schlämme, usw.
flüssig:	überschwere Öle, Rückstandöl, Laugen, sonstige chemische Rückstände, Schlämme, usw.
gasförmig:	schadstoffbeladene Ablüfte, Deponiegas, andere Abfallgase

Unterscheidung von Reststoffen hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit

- stückig festes Material
- staubförmig festes Material
- pastöse Produkte
- flüssige Güter
- gasförmige Stoffe
- Mischungen aus festen, pastösen und flüssigen Materialien sowie Gebinden und Fässern
- Produkte mit relativ hohem Wassergehalt wie Klärschlämme oder Rindenmaterial der Zellstoff- und Paperindustrie.

Brennstoffaufbereitung

- Sortieren
- Mahlen
- Zerstäuben usw.
- Vergleichmäßigung der verbrennungstechnischen Eigenschaften
- Schadstoffentfrachtung usw.
- Gesamtbilanz (Schadstoffe, Energie usw.) notwendig

3. Schadstoffbildungs- und abbaumechanismen

3.1. Durch die Verbrennungsführung beeinflussbare Schadstoffe

- CO , NO_x , C_xH_y , PCDD, PCDF, RuB, Flugkoks, Staub, usw.

3.2. Nicht unmittelbar durch die Prozeßführung beeinflussbare Schadstoffe

- SO_2 , HCl, HF, Schwermetalle, usw.

4. Verbrennungsführung von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Reststoffen

4.1. Anforderung an die Strömung

- Gute Mischungsintensität für ein "stabiles Verbrennen" (Mischen und Zünden), z.B. zu Beginn nur erforderliche "Erstluft" bei Brennstoffen mit wenig Flüchtigen zuführen
- Gute Mischungsintensität (Rührkessелеlement) anstreben, um Feld wenig unterschiedlicher Temperaturen zu erzeugen (isothermer Reaktor), um gesamten Reaktionsraum nutzen zu können, indem gleichmäßige Reaktionsbedingungen ermöglicht werden, für:
 - hohen Ausbrand,
 - Schadstoffminderung,
 - Additivdosierung (falls nötig),
 - hohe Energieumsetzungsichte,
 - Bewältigung großer Massenströme,
 - kleine Baugröße;
- Verbrennung in Nachbrennkammer ohne "Rückvermischung", Kolbenströmelement für optimalen Restausbrand
- Verweilzeit (mittelere) und Verweilzeitspektrum

4.2. Trennung der Verbrennung von der Wärmeübertragung

Aufgabe der Verbrennung und Wärmeübertragung getrennt lösbar

- Wärmeauskopplung während der Verbrennung weitgehend vermeiden
- heiße Wände (z.B. $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), kein Einfrieren von Reaktionen (keine Quencheffekte)
- auch bei schwachkalorischen Brennstoffen Temperaturniveau z.B. $> 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ möglich durch:
 - a) "adiabate" Verbrennung,
 - b) Luftvorwärmung,
 - c) Zusatzfeuerung;
- Energienutzungskonzept

4.3. Möglichkeiten zur variablen Einstellung eines gewünschten Temperaturniveaus durch

- Luftüberschuß,
- H_2O -Eindüsung,
- Rauchgasrückführung in
 - die Verbrennungsluft,
 - den Brennraum;

erforderlich zur:

- Optimierung von Reaktionsbedingungen,
- Schadstoffminimierung,
- Vermeidung des Überschreitens von Ascheerweichungspunkten usw.;

4.4. Bedingungen und Forderungen aus der Schadstoff begrenzung

Durch Prozeßführung beeinflussbare Schadstoffe, Konzepte der Verbrennungsführung:

- z.B. NO_x :
Luftstufung,
Brennstoffstufung,
Rauchgasrückführung,
Temperaturbegrenzung ($\vartheta < 1300^\circ\text{C}$),
Temperaturführung längs des Verbrennungsweges;
- z.B. SO_2 :
Additivdosierung im Bereich von 900°C bis 1100°C
- z.B. "Dioxin":
Temperatur $> 1200^\circ\text{C}$ (heiße Wände $> 1000^\circ\text{C}$ und
möglichst isothermes Temperaturfeld,
Verweilzeit, Verweilzeitspektrum
- z.B. Kohlenstoffmonoxid (CO),
Restkohlenwasserstoffe (C_xH_y),
Ruß

Durch Prozeßführung nicht beeinflussbare Schadstoffe

- eventuell SO_2 , HF, HCl im "kalten" Abgas
(Sekundärmaßnahmen beachten),
- z.B. Flugasche (Verweilzeit, Temperatur)
- z.B. Asche/Schlacke

"Chemie der Reststoffe" Reststoffbehandlung- und verwertung
eigenes Thema

Möglichkeiten zur Beeinflussung der Eigenschaften der
Rückstände durch die Verbrennungsführung weiter untersuchen

5. Verbrennungsführung bei stückigen, pastösen sowie Gemischen
aus stückigen, pastösen und flüssigen Reststoffen

- prinzipielle Übertragbarkeit der Forderungen aus Abschnitt 4, d.h. mehrstufige Prozeßführung anstreben
- Aufteilung der Prozeßführung in eine Vorverbrennungsstufe und eine Nachverbrennungsstufe

"Vorverbrennungsstufe"

Trocknung, Entgasung, Vergasung, Ausbrand des Inertmaterials

- kontinuierlich:
 - auf Rost,
 - im Drehrohr,
 - in Etagenöfen,
 - in Wirbelschichten,
- diskontinuierlich:
 - in Chargenöfen
 - usw.

Zonenaufteilung, Zonenführung der Luft (O_2 -Partialdruck), Temperatur, Sauerstoffanreicherung usw.

Schlackenzusammensetzung, Beeinflussung der Eigenschaften der Rückstände usw.

Drehrohr

- Durchmischung und Verweilzeit
Projektierung: Länge und Durchmesser
Betrieb: Drehzahl und Füllungsgrad
- Luftaufteilung über den Weg nicht möglich
- Hoher Luftüberschuß im Drehrohr
Wegen unterschiedlich stark schwankenden Sauerstoffbedarfs (Faßzugabe etc.)
- Schlacke wird flüssig abgezogen

Nachverbrennungstufe zum Drehrohr (wie unter Abschnitt 4)

- Wegen schwankenden Sauerstoffbedarf im Drehrohr hohe Anforderung an Nachverbrennung
- Zusatzbrennstoff erforderlich
- Luftstufung , Brennstoffstufung
- Flüssige oder gasförmige Rückstände als Zusatzbrennstoff möglich
- Rauchsrückführung
für Temperatursteuerung
für Vermischungshilfen wie Freistrahlen etc.
- Abwassereindüsung

Rostfeuerung

- Verbrennungsluft zum Rost in Stufen für die Einzelprozesse steuerbar
 - Trocknung
 - Entgasung
 - Vergasung
 - Restausbrand
- Gute Durchmischungs- und Durchströmungsbedingungen
- Geringe Flugaschemengen durch Einstellung möglich
- Guter Ausbrand durch Überstöchiometrie am Ende des Rostes

- geringe Abgasverluste und Abgasvolumenströme sind anzustreben, d.h. möglichst niedrige Gesamtluftzahlen, damit steigende Temperaturen
- Bezogen auf gesamten Rost Unterstöchiometrie (bis $\lambda = 0,4$) möglich, dadurch Gas mit nennenswertem Heizwert in Nachverbrennungszone
 - Temperatur auf Rost einstellbar
 - verstärkte Wärmeauskopplung (Projektierung)
 - Rückführung kalter gereinigter Abgase (unterstützt insbesondere bei sehr feuchten Abfallstoffen den Trocknungsprozeß ($\vartheta_v = 150\text{ °C}$): zunehmende RGRF zum Rost bedeutet laufende Erhöhung des Abgasvolumenstromes in einem Teil der nachgeschalteten Anlagen)
 - stark unterstöchiometrische Fahrweise (z.B. $\lambda = 0,4$)
 - Druckverlust in der eigentlichen Rostkonstruktion sollte sehr viel größer sein als der Druckverlust des Müllbettes ($\Delta p_R \gg \Delta p_{Sch}$, Gleichmäßigkeit der Luftbeaufschlagung)
 - niedrige Strömungsgeschwindigkeiten (Flugstaubverminderung)
 - Sauerstoffanreicherung (Flugstaub, Zündung, Ausbrand)
 - Möglichkeit der Additivzugabe zum Brennstoff/Müll bereits im Aufgabetrichter (Entlastung der Sekundärmaßnahmen)

Nachverbrennung zur Rostfeuerung (wie Abschnitt 4)

- Möglichkeit ohne Zusatzbrennstoff auszukommen wegen Primärgas mit ausreichendem Heizwert
- Luftstufung, Brennstoffstufung
- Flüssige oder gasförmige Rückstände als Zusatzbrennstoff möglich
- Rauchgasrückführung:
 - für Temperatursteuerung
 - für Vermischungshilfen wie Freistrahlen usw.

11. Verfahrenskonzepte zur Verbrennung von Reststoffen

R. SCHOLZ, R. JESCHAR, M. BECKMANN und J. STERNBERG,
Clausthal-Zellerfeld

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Jeschar
Institut für Energieverfahrenstechnik
der TU Clausthal
und Clausthal-Umwelttechnik-Institut GmbH
Dipl.-Ing. Michael Beckmann
Clausthaler-Umwelttechnik-Institut GmbH
Dipl.-Ing. Jost Sternberg
Institut für Energieverfahrenstechnik der
TU Clausthal
Agricolastraße 4
W-3392 Clausthal-Zellerfeld