

Trends in der Gestaltung von Systemkomponenten zur Prozeßoptimierung am Beispiel der thermischen Abfallbehandlung

Dr.-Ing. Michael Beckmann, Dipl.-Ing. Hans-Joachim Gehrmann, Clausthal-Zellerfeld

1 Einleitung

Nachdem in der Vergangenheit im Bereich der thermischen Behandlung von Abfällen insbesondere die Abgasreinigungstechniken (sog. Sekundärmaßnahmen) weiterentwickelt wurden, stehen jetzt verstärkt Primärmaßnahmen zur Prozeßoptimierung im Vordergrund. Um Möglichkeiten zur Prozeßoptimierung bei der thermischen Abfallbehandlung erörtern zu können, muß man zunächst die Grundbausteine (Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung) und die wesentlichen Haupteinflußgrößen betrachten. Neben dem Niveau der Haupteinflußgrößen ist auch deren Verteilung entlang des Reaktionsweges zu berücksichtigen. Diese aus verfahrenstechnischer Sicht wichtigen Anforderungen sind eng mit der Apparatechnik verbunden. In thermischen Abfallbehandlungsprozessen kommen überwiegend Rost-, Brennkammer- und Drehrohrsysteme zum Einsatz. In dem vorliegenden Beitrag werden zunächst die verfahrens- und apparatechnischen Gesichtspunkte erläutert. Im Zusammenhang mit der klassischen Verbrennung von Hausmüll in Rostsystemen, der Vergasung in Rostsystemen mit getrennter Nachverbrennung in einem Brennkammersystem und der Pyrolyse sowie Verbrennung in Drehrohrsystemen werden danach Beispiele zur Prozeßoptimierung dargestellt. Dabei werden auch Ansätze zur mathematischen Modellierung berücksichtigt.

2 Haupteinflußgrößen und Prozeßbausteine

Die Stoffumwandlung, die mit einer thermischen Behandlung angestrebt wird, ist ein komplexer Vorgang, den man sich in der Regel aus Teilprozessen, wie z.B. Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung, zusammengesetzt denken kann. Je nach Prozeßführung und Aufbau der Anlage können Teilprozesse parallel oder deutlich voneinander getrennt nacheinander ablaufen oder auch fehlen. Die jeweiligen Prozeßbedingungen werden maßgeblich durch die Haupteinflußgrößen [1] bestimmt. Diese sind in Bild 1 mit den zugehörigen Variationsbereichen dargestellt.

Einsatzstoffe

Die Einsatzstoffe können hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften, insbesondere Aggregatzustand, Konsistenz und bezüglich der chemischen Eigenschaften wie z.B. Zusammensetzung (Anteil flüchtige Bestandteile,

Einsatzstoffe	physikalische Eigenschaften		
	chemische Eigenschaften		
	gasförmig, flüssig, pastös, fest (wiederinge oder nicht)		
	Zusammensetzung (Problemstoffe)		
Sauerstoffangebot	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
Reaktionsgase	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff), Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.		
Temperatur	Nieder- $\leq 600^\circ\text{C}$	bis	Hochtemperatur $\geq 1000^\circ\text{C}$ (sog. $\pm 200^\circ\text{C}$ - Bereich)
Druck	Nieder- $p = 0,1\text{ MPa}$	Umgebungs- $p = 0,1\text{ MPa}$	Hochdruck $p = 0,1\text{ MPa}$
Reaktorverhalten	Rührkessel (RK) $Pe = 0$	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) $Pe = \infty$
Stoffzufuhr	Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, usw.		
Verwollzeit	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
Zusatzstoffe	Additiv (z.B. Schadstoffeinbindung, Beeinflussung des Schmelzverhaltens)		
	Zusatzbrennstoff		
	Bett (z.B. Wirbelsbett, Festbett, Umlaufbett, Tragmatrix, Ascherückführung)		

Bild 1. Haupteinflußgrößen bei thermischen Behandlungsverfahren.

Inertmaterial) oder ihres Ascheerweichungsverhaltens charakterisiert werden. Aus der Zusammensetzung der Einsatzstoffe können i.d.Regel schon erste Hinweise auf die Gestaltung der Prozeßführung der thermischen Behandlung abgeleitet werden. Aus der Zusammensetzung der Abfallstoffe können weiter abhängig von den jeweilig vorgesehenen Prozeßbedingungen erste Aussagen zu den Eigenschaften der Reststoffe (Asche, Schlacke) getroffen werden. Weiterhin lassen sich aus den brennstofftechnischen Eigenschaften eines Ersatzbrennstoffes ($I_{\min}$, h_u , Energieaustauschverhältnis usw.) erste Aussagen bzgl. einer Substitution von Regelbrennstoffen treffen.

Sauerstoffangebot

Thermische Prozesse können hinsichtlich der Sauerstoffkonzentration in Prozesse (sog. Grundbausteine)

- unter Sauerstoffabschluß (Pyrolyse, $\lambda \approx 0$),
- understöchiometrisch (Vergasung $\lambda < 1$) und
- stöchiometrisch bis überstöchiometrisch (Verbrennung $\lambda \geq 1$)

unterschieden werden. Durch die Sauerstoffzufuhr und -verteilung als **eine** der im Hinblick auf Bildungs- und Abbaumechanismen von Schadstoffen wichtigen Haupteinflußgrößen lassen sich entlang des Reaktionsweges diese Mechanismen wesentlich beeinflussen, worauf weiter unten im Zusammenhang mit den anderen Haupteinflußgrößen (Temperatur, Durchmischung, Verweilzeit) zusammenfassend eingegangen wird. Dabei ist u.a. auf bekannte Schadstoffreaktionen wie Brennstoff- und thermische NO-Bildungsmechanismen Rücksicht zu nehmen. Durch eine entsprechend optimierte Prozeßführung (Luftstufung etc.) können diese Mechanismen gezielt beeinflußt werden.

Temperatur

Das Temperaturniveau ist bei der Betrachtung von chemischen Reaktionsgleichgewichten und Reaktionsgeschwindigkeiten ebenso wie die Sauerstoffkonzentration zu berücksichtigen. Die Zusammensetzung der Reaktionsprodukte bei der Pyrolyse (Gas, Öl, koksartiger Rückstand) wird maßgeblich durch das Temperaturniveau und die Temperaturverteilung (Aufheizgeschwindigkeit) beeinflußt. So darf beispielsweise bei der Pyrolyse von Plexiglas die Temperatur nur in bestimmten Bereichen variiert werden, um eine möglichst hohe Ausbeute an Monomethylmethacrylat bei entsprechender Verweilzeit zu erzielen.

Im Hinblick auf die Eigenschaften fester Reststoffe (Asche, Schlacke als Versatz- oder Baumaterial) oder der Produkte (Zementklinker, Stahl) ist es erforderlich zu prüfen, welche qualitativen Veränderungen sich aufgrund unterschiedlicher Temperaturniveaus ergeben. So können z.B. steigende Temperaturen in der Hauptverbrennungszone einer Rostanlage zur Müllverbrennung zu sinkenden Chlorid- und Sulfatgehalten in der Schlacke führen.

Druck

Die Beeinflussung der Reaktionsgleichgewichte durch eine Druckänderung findet bei Pyrolyse-, Vergasungs-, Verbrennungs- und Hydrierverfahren je nach angestrebter Ausbeute der gewünschten Produkte Anwendung. So ist z.B. bei sogenannten Druckvergasungsverfahren, die unter Verwendung von Sauerstoff bei Drücken von ca. 2 MPa betrieben werden, die bevorzugte Bildung mehratomiger Gase beabsichtigt.

Reaktorverhalten

In der chemischen Reaktionstechnik werden hinsichtlich des Reaktorverhaltens zwei Grenzfälle unterschieden:

- der ideale Rührkessel (RK) und
- der ideale Kolbenströmer (KS).

In einem idealen Rührkessel (RK) sind alle Komponenten homogen im Reaktorraum vermischt ($Pe = 0$). Hinsichtlich des Umsatzes

(Bildungs- und Abbaureaktionen) stellt der ideale Kolbenströmer (KS) zunächst die günstigere Reaktorcharakteristik dar (Bild 2).

Dabei werden jedoch einheitliche Reaktionsbedingungen über dem Querschnitt vorausgesetzt. In der Praxis lässt sich dies durch eine Reihenschaltung von RK- und KS- ähnlichen Elementen umsetzen. Bei der Auswahl von Prozeßteilschritten ist in diesem Zusammenhang zu untersuchen,

- inwieweit z.B. für die Vermischung von Stoffströmen zunächst Rührkessелеlemente vorgesehen werden können und
- sich danach ein Kolbenströmer mit entsprechender Länge zur Einstellung bestimmter Verweilzeiten und Umsatzgrade anschließt.

Verweilzeit

Die für bestimmte Prozeßabläufe erforderlichen mittleren Verweilzeiten werden hauptsächlich durch die Konstruktion (Geometrie des Apparates) und die durchgesetzten Massenströme festgelegt. Für den Umsatz von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Einsatzstoffen sind in der Regel vergleichsweise niedrige Verweilzeiten im Bereich von mehreren Sekunden bis Minuten erforderlich. Bei stückigen Rückständen sind die notwendigen Verweilzeiten deutlich höher. Für bestimmte Sonderabfälle, z.B. aus dem Bereich der Rüstungsaltslasten, können die Verweilzeiten mehrere Stunden bis Tage betragen.

Zusatzstoffe

Zusatzstoffe, die für thermische Verfahren in Frage kommen, sind im wesentlichen:

- Additive (z.B. zur Schadstoffeinbindung),
- Zusatzbrennstoffe (z.B. im Bereich der Brennstoffsubstitution in Hochtemperaturprozessen) und
- Stoffe, die beispielsweise zur Betterzeugung in Wirbelschichtreaktoren oder Bettbeeinflussung (vorgewärmtes Umlaufbett) dienen.

Insgesamt ergeben sich aufgrund des Niveaus der Haupteinflussgrößen bestimmte Prozeßbausteine, die mehr oder weniger deutlich ausgeprägt in den einzelnen Verfahren auftreten.

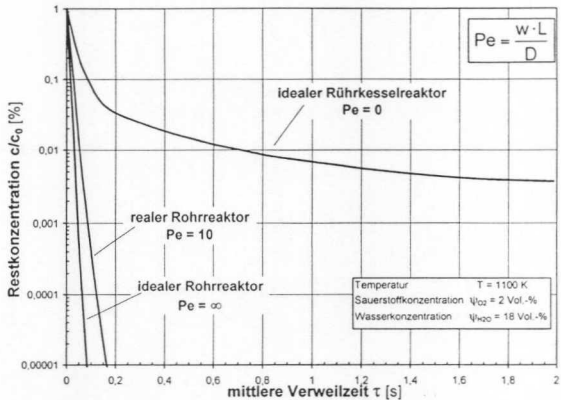


Bild 2: Abhängigkeit des CO-Abbaus von der mittleren Verweilzeit und dem Mischungsverhalten des Reaktors.

3 Maßnahmen zur Steuerung der Haupteinflußgrößen in Apparaten der thermischen Behandlung zur Prozeßoptimierung

In diesem Abschnitt werden die grundsätzlichen Unterschiede von Apparaten in der thermischen Behandlung, insbesondere im Abfallbereich, sowie die Maßnahmen und Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen und Maßnahmen zur Prozeßoptimierung kurz erläutert.

Die Prozeßoptimierung durch geeignete Primärmaßnahmen und entsprechende Apparategestaltung verfolgt insbesondere die Zielstellungen

- Senkung der Abgasströme,
- Reduzierung der Emissionen und der Emissionsfrachten,
- Beeinflussung der Reststoff- bzw. Produkteigenschaften und
- Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades.

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

Die thermischen Hauptverfahren lassen sich jeweils in eine

- erste Stufe zur Umwandlung der festen und pastösen Abfälle und in eine
- zweite Stufe zur Behandlung der aus der ersten Stufe stammenden Gase, Flugschläube oder Pyrolysekoks (Bild 3) aufteilen.

Für die genannten Grundbausteine bzw. Verfahrensteilschritte werden im wesentlichen folgende Apparatetypen eingesetzt:

- Rost- und Brennkammersysteme (Abschnitt 3.1) sowie
- Drehrohrsysteme (Abschnitt 3.2).

Eine Übersicht zum Niveau der Haupteinflußgrößen und zu Möglichkeiten ihrer Steuerung in den jeweiligen Apparatetypen ist in dem Bild 4 enthalten.

Diese Apparatetypen sind im Zusammenhang mit Stoffbehandlungs- bzw. Energieumwandlungsverfahren in den Fachgebieten Industrieofenbau, Verbrennungs- und Brennstofftechnik usw. bereits sehr detailliert untersucht worden, weshalb an dieser Stelle auch auf die entsprechende Literatur der Stahl-, Glas-, Keramikindustrie usw. verwiesen wird. Dabei werden Gesichtspunkte aus der industriellen Praxis und Ergebnisse von Pilotanlagen zur Optimierung der Prozeßführung und zur mathematischen Modellierung erwähnt. Die im Bild 4 zusammenfassend dargestellten Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen für Rost- und Brennkammersysteme sowie für Drehrohrsysteme werden an einem ausgewählten Beispiel erläutert.

	1. Stufe	2. Stufe	Verfahren
A.	Verbrennung ¹⁾	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. klassische Müllverbrennung))
B.	Thermolyse ²⁾	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Schmelz-Brenn-Verfahren nach Siemens KWU)
C.	Vergasung ³⁾	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (weiterentwickelte klassische Müllverbrennung)
D.	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Konversionsverfahren nach NOELL, Thermoselect-Verfahren usw.)
E.	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach Lurgi)

1) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge

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

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

Bild 3: Systematische Einordnung von thermischen Hauptverfahren.

Apparat	Rostsystem	Brennkammer	Drehrohr
Einsatzstoffe			
	stücker, in Verbindung mit einem Feststoff- oder Inertbett auch pastös	gasförmig, flüssig, staubförmig	flüssig, pastös, stücker
Sauerstoffangebot			
Niveau	überschießendmetrisch üblich (Verbrennung); unterschietmetrisch (Vergasung) möglich; durch eigenständige Nachverbrennung möglich; Sauerstoffabschluß (Pyrolyse) nicht üblich	unter- bis überschietmetrisch; in weiten Bereichen variabel; falls am Reaktoraustritt Überschietmetrie „Brennkammer“; falls am Ende Unterschietmetrie: „Vergasungsreaktor“	Sauerstoffabschluß (Pyrolyse) oder überschietmetrisch (Verbrennung); unterschietmetrisch (Vergasung) nicht üblich
Steuerung längs des Reaktionsweges	getrennt in einzelnen Zonen sehr gut einstellbar (z.B. Luft-Sauerstoffzufuhr, Abgasrückführung, usw.); in Verbindung mit Temperatursteuerung sind die Teilschritte Trocknen, Entgasen, Vergasen, Restausbrand des Feststoffes beeinflufbar	durch Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff längs des Verbrennungsweges sehr gut möglich (einbringen über Rührseeelemente)	in der Regel nicht möglich; in Einzelfällen durch spezielle Sauerstoffanlagen
Temperatur			
Niveau	Bettobeflächen Temperatur bei ca. 1000°C und höher; mittlere Betttemperaturen niedriger	unterschiedliche Verbrennungstemperaturen im Bereich von 1000 °C bis 2000 °C ggf. auch höher; Bereich sehr variabel	Niedertemperatur (z.B. Pyrolyse, indirekte Beheizung, 500 °C) bis Hochtemperatur (z.B. 1000 °C, 1500 °C ggf. höher)
Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einteilung in mehrere Zonen sehr gute Möglichkeiten, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftvorwärmung, Abgasrückführung, Wasser-/Dampfzuführung)	neben der Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff über dem Reaktionsweg, insbesondere Eingriffe durch Abgasrückführung, Wassereindosung usw. möglich; indirekte Wärmein- bzw. -auskopplung durch entsprechende Heiz- bzw. Kühlsysteme; viele Möglichkeiten	direkte und indirekte Wärmein- bzw. -auskopplung durch Gegen- und Gleichstromführung, Steuerung darüberhinaus schwierig
Druck			
	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck, Hochdruckverbrennung selten; Druckvergasung häufiger	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck;
Reaktorverhalten			
Feststoff	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer RK-Charakteristik (z.B. Rückschubrost) oder eine KS-Charakteristik (z.B. Wandernrost) angenähert werden; über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angenähert eine KS-Charakteristik		einzelne Abschnitte sind über dem Querschnitt wegen der Feststoffumwälzung angenähert als Rührkessel zu betrachten, über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angenähert eines Kolbenströmmercharakteristik
Gas	a) Oxidationsmittel usw. strömt zwangsweise durch das Bett und wird gleichmäßig über der Bettobefläche verteilt, damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich; Gasbehandlung im nachfolgenden Verfahrensschritt notwendig (z.B. Nachverbrennung)	strömungstechnisch können sowohl Rührkessel- als auch Kolbenströmmer-Charakteristiken für Staub- und Gas angenähert werden	das Reaktorverhalten der Gasphase ist angenähert durch eine Kolbenströmmercharakteristik zu beschreiben; Gas überströmt Feststoff und ist getrennt nachzuverbrennen
Verweilzeit			
Niveau (mittlere Verweilzeit)	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden; durch Rostgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar und bei Projektierung durch Gesamtlänge und Breite beeinflufbar	im Bereich von Sekunden (bei höherem Druck entsprechend länger); durch Lastzustand einstellbar und bei Projektierung durch geometrische Abmessungen beeinflufbar	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden; durch Drehzahl, Neigung und Füllungsgrad einstellbar
Steuerung längs des Reaktionsweges	durch getrennte Geschwindigkeitseinstellungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich; falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Ausbrandes am Rostende Steuerung durch Austragselze	nur schwer möglich; Verweilzeitverteilung über Reaktorverhalten steuerbar	kaum möglich
Zusatzstoffe			
	Additive zur Schadstoffeinbindung in den Feststoff und Beeinflussung der Eigenschaften der verbrennenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke); Inertbett z.B. Trägermatrix für event. leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoff)	Additive insbesondere über Rührseeelemente einbringen, sowohl zur Schadstoffeinbindung (z.B. Schwefeloxid, Stickstoffoxide) als auch zur Beeinflussung der Schlackeeigenschaften und Schmelztemperaturen der Stäube	Additive z.B. zur Beeinflussung der Schlackeeigenschaften und Schmelztemperaturen
Einsatzbereiche (Beispiele)			
	für den Feststoffumsatz in der 1. Stufe bei Hausmüllverbrennungsanlagen, Separieren von Metallen aus Verbundstoffen bei niedrigen Temperaturen und gleichzeitig unterschietmetrischen Verhältnissen	Verbrennung von flüssigen Rückständen, Nachverbrennung von Gas und Stäuben in der 2. Stufe von brennischen Behandlungsverfahren;	Verbrennung als Verfahrensschritt z.B. bei Sonderabfall; Pyrolyse als Verfahrensschritt zur Vorbereitung der Abtrennung einer Metallfraktion

Bild 4. Charakterisierung von Rost-, Brennkammer und Drehrohrsystemen.

Aus prozeßtechnischer Sicht können Einsatzstoffe hinsichtlich ihrer Konsistenz in gasförmige, staubförmige und flüssige sowie in stückige Einsatzstoffe unterteilt werden. Die Verbrennung gasförmiger, staubförmiger und flüssiger Einsatzstoffe erfolgt in der Regel in Brennkammersystemen, wobei die Brennkammer selbst in mehrere Stufen mit jeweils spezifischen Reaktionsbedingungen (Sauerstoffangebot, Temperatur, Reaktorverhalten, Verweilzeit) unterteilt ist. Bei stückig festen Einsatzstoffen sind die Umsatzvorgänge wesentlich komplexer. Hier kann zunächst grob hinsichtlich des Feststoffumsatzes und der weiteren Behandlung

der dabei erzeugten Gase unterschieden werden. Vor diesem Hintergrund wird im folgenden nur auf Beispiele der Behandlung stückiger Abfälle eingegangen.

3.1 Vergasung auf Rostsystemen mit getrennter Nachverbrennung in Brennkammersystemen

Rostsysteme werden bei den „klassischen“ Verfahren überwiegend eingesetzt und stellen eine lang erprobte und bewährte Technik dar (z.B. Müllverbrennung).

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

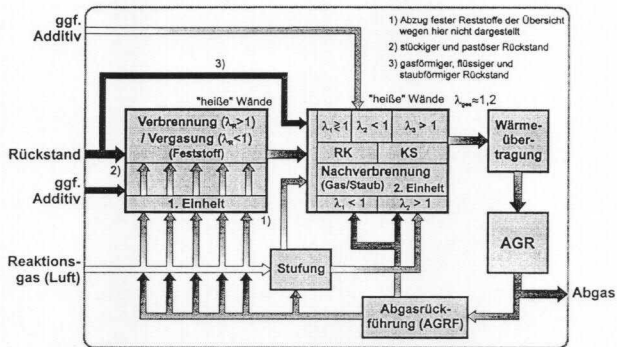


Bild 5. Schematische Darstellung der getrennten Prozeßführung.

Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung, Modellierung und Optimierung der Prozeßführung (sog. Primärmaßnahmen) des thermischen Kernverfahrens. Wesentliche Voraussetzung für die Optimierung der Teilaufgaben sind zunächst die Trennung der Prozeßschritte

- Feststoffumsatz auf dem Rost,
- Nachverbrennung der Gase und
- Wärmeauskopplung (Bild 5).

Bei dieser getrennten Prozeßführung können die Haupteinflußgrößen [2] Sauerstoff, Reaktionsgase, Reaktorverhalten bzw. Durchmischung, Art der Stoffzufuhr, Verweilzeit, Temperatur und Zusatzstoffe getrennt für den Feststoffumsatz (Glühverlust, Eluateigenschaften) und

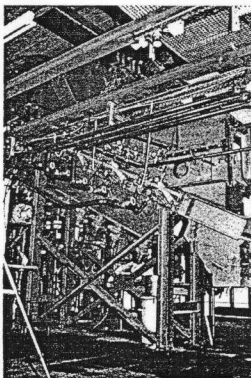


Bild 6. Rostsystem.

den Umsatz der Gase (CO , C_xH_y , PCDD/F , NO_x) eingestellt werden. Wie das Bild 5 weiter zeigt, sind bei einer solchen Kombination aus Rost und Brennkammersystem (Bild 6 und Bild 7) durch Luftstufung, Abgasrückführung, Sauerstoffzufuhr usw. zahlreiche Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen vorhanden [3]. Zur Vermeidung von Queneffekten sollte die Wärmeübertragung separat erfolgen. Die Kühlung einzelner Berei-

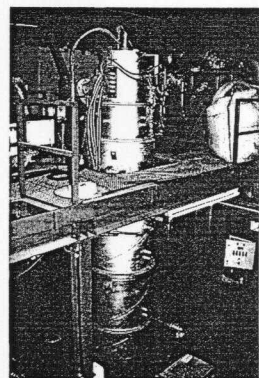


Bild 7. Brennkammersystem.

che, wie z.B. durch einen wassergekühlten Rostbelag [4], kann hingegen im Hinblick auf die unabhängige Einstellung der Temperatur von den Stöchiometrieverhältnissen (niedrige Luftzahl), insbesondere bei heizwertreichen Abfällen, von Vorteil sein.

Bei der in Bild 5 dargestellten getrennten Prozeßführung kann der Feststoff auf dem Rost auch stark unterstöchiometrisch durch Vergasung umgesetzt werden.

Wie die Ergebnisse in Bild 8 zeigen, kann durch eine entsprechende Luftstufung und Verweilzeitsteuerung über der Rostlänge, bei der Vergasung ebenso wie bei der Verbrennung, ein sehr niedriger Glühverlust der Reststoffe erreicht werden. Das in dem Rostsystem erzeugte Vergasungs- oder Verbrennungsgas kann anschließend eigenständig gestuft mit Primärmaßnahmen [5-8] in dem Brennkammersystem (Bild 7) nachverbrannt werden. Um gleichmäßige Reaktionsbedingungen im Brennraum zu erzeugen, müssen Brenngas oder ggf. der flüssige Einsatzstoff und das Oxidationsmittel sorgfältig miteinander vermischt werden, d.h. zur Vergleichmäßigung der Temperatur- und Konzentrationsverhältnisse ist zunächst ein Rührkessel-Element und zur weiteren Erhöhung des Abbaugrades ein Kolbenströmer in Reihe geschaltet, vorzusehen. Im Zusammenhang mit einem möglichst einheitlichen Temperaturniveau sei an dieser Stelle erwähnt, daß eine verstärkte Wärmeauskoppelung, verbunden mit Quencheffekten an kalten Wänden, im Verbrennungsraum vermieden werden sollte.

Für die Vermischung im Bereich der Nachverbrennung scheiden aufgrund des hohen Temperaturniveaus, der Korrosion usw. mechanische Einbauten in der Regel aus. Es bieten sich im wesentlichen nur zwei fluiddynamische Rührmechanismen an:

- sogenannte überkritische Drallströmungen mit interner Rückführung bzw. Rückvermischung heißer Gase [9, 10] bei Anlagen kleinerer Leistung oder aber
- einzelne oder mehrfach über- bzw. nebeneinander angeordnete Freistrahlen, die als Injektoren das umgebende Medium ansaugen und umwälzen [11, 12]. Dabei muß durch die richtige Auslegung der Düsengeometrie, Düsenanzahl und -anordnung sowie Eintrittsimpuls eine gute Überdeckung des Querschnittes, eine hinreichende Eindringtiefe der Injektorstrahlen und ein ausreichendes Ansaugen des zu vermischenden Grundstromes erreicht werden.

Die Einrichtung einer solchen intensiven Durchmischungszone (Rührkesselreaktor) am Eintritt der Nachverbrennung führt, wie in Bild 5 schematisch dargestellt, zu der vorangestellt erwähnten strömungstechnischen Trennung. Unterstützend wirkt, wenn die Durchmischungszone in einem eingezogenen Querschnitt angeordnet wird. Nach der Mischungszone schließt sich dann eine Beruhigungsstrecke (Rohrreaktor als geeignetere Reaktorcharakteristik für den Abbau) an. Im Zusammenhang mit der Verminderung von NO_x bei gleich-

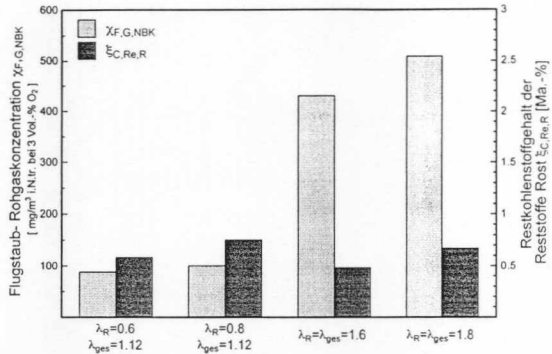


Bild 8: Staubkonzentrationen im Rohgas $\chi_{F,G,NBK}$ und Glühverlust $\xi_{C,Re,R}$ bei verschiedenen Stöchiometrieverhältnissen λ auf dem Rost.

zeitig hohem Ausbrand (CO, Flugasche, organischen Spurenstoffen usw.) sollte das Reaktionsgas gestuft der Brennkammer zugeführt werden (Bild 9).

So werden z.B. bei entsprechender Verweilzeit und Durchmischung Dioxine/Furane schon bei Temperaturen um 950 °C zerstört [13]. In diesem Zusammenhang sei hier auch auf die Entwicklung von On-line-Meßtechniken zur Bestimmung von organischen Spurenstoffen hingewiesen [14].

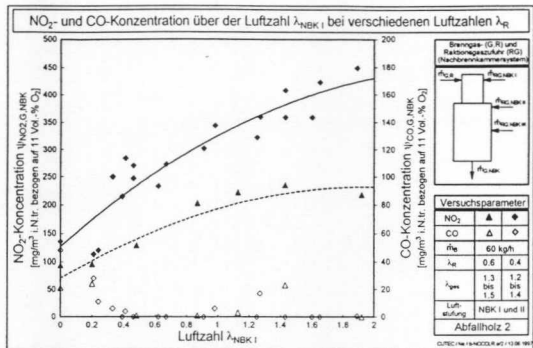


Bild 9: NO₂- und CO-Konzentration in Abhängigkeit von der Luftzahl λ_{NBK1} bei verschiedenen Luftzahlen λ_{Rost} .

Dieses gegenwärtig im Pilotmaßstab untersuchte Vergasungs- Nachverbrennungskonzept mit Rostsystemen [3] erscheint insbesondere deshalb sehr aussichtsreich, weil über die Vorteile einer getrennten Prozeßführung hinaus zusätzlich u.a.:

- Flugstaubkonzentrationen (Bild 7) [3],
- Abgasströme (Reduzierung von $\lambda_{ges}=1,8$ auf $\lambda_{ges}=1,2$) [3] und damit
- Emissionsfrachten deutlich reduziert werden,
- Brenngase erzeugt werden, die einen eigenständigen Nachverbrennungsprozeß ohne Zusatzbrennstoff ermöglichen [3],
- der Nachverbrennungsprozeß selbst, mit bekannten Primärmaßnahmen, im Hinblick auf NO_x-Minderung bei gleichzeitig hohem Ausbrand (CO, C_xH_y, PCDD/F optimiert werden kann (Bild 8) [3],
- der Gesamtwirkungsgrad insgesamt verbessert wird [15].

Die Optimierung der Prozeßführung in Rostsystemen für Abfälle, sowohl der konventionellen wie auch der Vergasungsfahrweise, erfolgt bislang weitgehend empirisch an Praxis- oder

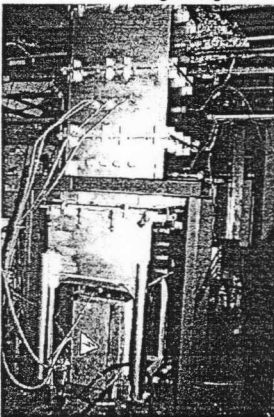


Bild 10. Batch-Rost.

Pilotanlagen. Zum weiteren Verständnis des Feststoffumsatzes in Rostsystemen werden aufbauend auf den Erfahrungen und mathematischen Modellen im Zusammenhang mit fossilen Brennstoffen [z.B. 16 bis 20] zunehmend auch mathematische Modelle für den Umsatz von Abfällen in Abhängigkeit bestimmter Haupteinflußgrößen (Temperatur, Druck, Verweilzeit) entwickelt und gezielt in die Optimierung mit einbezogen [z.B. 21 bis 25]. Die in näher beschriebene Modellvorstellung nimmt für die Beschreibung des Verweilzeitverhaltens als Reaktorauflösung für den Rost eine Rührkesselskaskade an. Die Beschreibung des Umsatzes erfolgt zunächst für ein einzelnes Rührkessелеlement (Zelle) mit Hilfe von Massen-, Stoff- und Energiebilanzen („Zellenmodell“). Insbesondere aufgrund der häufig heterogenen Zusammensetzung und fehlender Basisdaten werden die allgemein bekannten

Teilvorgänge des Feststoffumsatzes durch einen vereinfachten Ansatz mit einem „effektiven“ Gesamtreaktionskoeffizienten zusammenfassend betrachtet.

Dieser wird durch Versuche an einer, eine Zelle nachbildenden, nicht bewegten Roststufe (Batch-Prozeß, Bild 10) in Verbindung mit dem Zellenmodell bestimmt. Durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Zellen zu der o.g. Rührkesselskaskade läßt sich dann der Feststoffumsatz für einen entlang des Rostweges bewegten Abfall beschreiben ("Kontinuierliches Modell").

Ein Vergleich der Modellrechnungen mit Meßergebnissen an einer Pilotanlage zeigt, daß mit diesem Modell sowohl stationäre Zustände als auch die nach einem sprunghaften Prozeßeingriff folgenden instationären Übergänge in einen neuen stationären Zustand tragfähig wiedergegeben werden können (Bild 11).

Damit besteht nun die Möglichkeit, für Abfälle mit zunächst noch unbekanntem Verbrenungsverhalten, durch Versuche an einem Batch-Rost (Bild 10) zusammen mit dem „Zellenmodell“ Gesamtreaktionskoeffizienten zu ermitteln und danach mit dem „Kontinuierlichen Modell“ erste Aussagen bezüglich einer geeigneten Prozeßführung abzu-
leiten. Bei Projektierungen und Betriebsoptimierungen ist man somit nicht mehr allein auf ein empirisches Vorgehen angewiesen.

3.2 Feststoffumsatz in Drehrohrsystemen

In gleicher Weise wie Rostsysteme sind Drehrohrsysteme für bestimmte Teilschritte (Pyrolyse, Verbrennung) in Gesamtverfahren eingebettet. Drehrohrsysteme werden seit etwa 100 Jahren in der Stoffbehandlung und seit ca. 30 Jahren auch in der Abfallbehandlung eingesetzt. Ein Vorteil von Drehrohrsystemen liegt im weit gefächerten Einsatzstoffspektrum: es können feste, stückige, pastöse und flüssige Stoff- und Stoffgemische zugeführt werden.

In der Stoffbehandlung werden beispielsweise im Vergleich zu Abfallgemischen weitgehend homogene Einsatzstoffe wie Kalkstein oder Kreide dem Kalk- bzw. Zementbrennprozeß zugeführt. In der Abfallbehandlung kommen Drehrohre u.a. im Bereich der Sonderabfallbehandlung (z.B. BASF-Sondermüllverbrennungsanlage zur energetischen Verwertung toxischer Abfälle) und im Bereich der Pyrolyse von Abfallgemischen (z.B. Siemens Schweiß-Brenn-Verfahren oder Noell-Konversionsverfahren zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Abfällen) zum Einsatz. In Drehrohren kann die Verweilzeit über Geometrieparameter (z.B. Länge L, Durchmesser D, und ggf. Einbauten) und Betriebsparameter wie Drehzahl n, Neigung β und Massenstrom (Füllungsgrad) beeinflusst werden. Bei Verbrennungsdrehrohren ist eine Steuerung der Temperatur längs des Reaktionsweges nur begrenzt über Sauerstoffflanz möglich. Bei indirekt beheizten Drehrohren zur Pyrolyse kann über getrennt voneinander

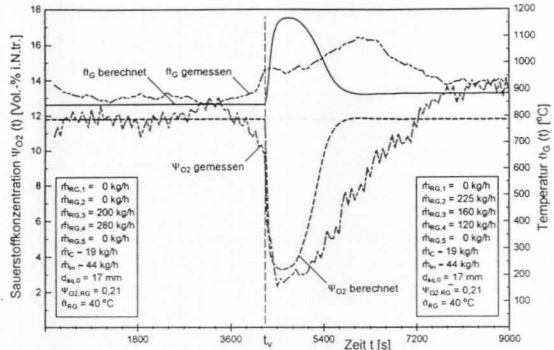


Bild 11: Gemessene und berechnete Sauerstoffkonzentration und Temperatur (Modellbrennstoff Braunkohle) (Umwertung des Luftmassenstromes).

steuerbare Heizzonen die Aufheizgeschwindigkeit und das Temperaturniveau beeinflusst werden. Beispiele für die Wertstoffrückgewinnung sind die Depolymerisation von Plexiglasabfällen oder auch das thermische Recycling von Kohlenstoffverbundfasermaterialien.

Im Hinblick auf die Projektierung neuer Anlagen und Optimierung bestehender Anlagen sind mathematische Modelle zur Beschreibung des Feststofftransportes und Verweilzeitverhaltens sowie der

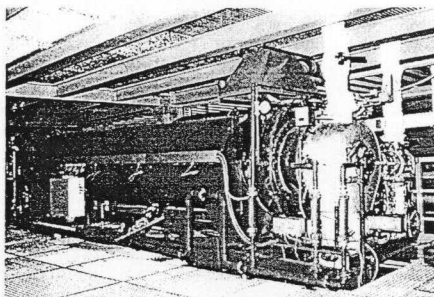


Bild 11. Pyrolyse-Drehrohr.

Stoff- und Wärmeübertragung ein wichtiges Hilfsmittel. Dabei bildet die mathematische Beschreibung des Feststofftransportes und des Verweilzeitverhaltens die Grundlage für ein Gesamtmodell. Die Vorgehensweise zur Beschreibung der komplex ineinandergreifenden Vorgänge im Drehrohr entspricht der bereits im Abschnitt 3.1 für den Rost dargestellten Vorgehensweise: Das Drehrohr wird entsprechend dem „Zellenmodell“ in Rührkessелеlemente unterteilt und entsprechende Verweilzeiten für jede Zelle (zunächst für den Feststoff, anschließend auch für die Gasphase) nach vereinfachten Ansätzen, die u.a. die Drehrohrlänge, den Drehrohrdurchmesser, die Neigung, die Drehzahl, den Schüttwinkel und den Füllungsgrad miteinander verbinden. Anschließend können die Zellen über zonale Massen- und Energiebilanzen miteinander verknüpft werden. Vor diesem Hintergrund werden derzeit Untersuchungen zum Verweilzeitverhalten an einem Drehrohr im Pilotmaßstab (Bild 11) durchgeführt [26].

4 Symbolverzeichnis

Symbole

β	Drehrohrneigung
D	Durchmesser, Diffusionskoeffizient
d	Partikeldurchmesser
ϑ	Temperatur [°C]
k	Konstante
L	Länge
λ	Stöchiometrieverhältnis, Luftzahl
n	Drehrohrdrehzahl
p	Druck
Pe	Peclet-Zahl
τ	Verweilzeit
Θ	Schüttwinkel des Einsatzstoffes
ξ	Konzentration (auf Masse bezogen)
ψ	Konzentration (auf Volumen bezogen)
w	Geschwindigkeit

Indices

$\dot{a}q$	äquivalent
B	Brennstoff
C	Kohlenstoff
F	Flugstaub
G	Brenngas/Abgas
ges	gesamt
i.N.tr.	im Normzustand, trocken
in	inert
i	innen
NBK	Nachbrennkammer
R	Rost
Re	Reststoffe
RG	Reaktionsgas
I, II, III	Zonen für Reaktionsgaszufuhr Rost und Nachbrennkammer

5 Schrifttum

- [1] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände. VDI- Berichte 1033: „Techniken der Restmüllbehandlung - Kalte und/oder thermische Verfahren.“, VDI- Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993
- [2] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Waste Incineration Systems, Current Technology and Future Developments in Germany. 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 18.-21. April 1995, Lisbon, Portugal.

- [3] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Busch, M.; Peppler, E.: Gasification of waste materials in grate systems. 4 th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 1.-4. April 1997.
- [4] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17. - 19. Oktober 1994, Würzburg
- [5] Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der NO_x - Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. TECFLAM- Seminar, Oktober 1990, Heidelberg, 1990.
- [6] Kolb, T.; Leuckel, W.: NO_x - Minderung durch 3-stufige Verbrennung - Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM- Seminar, Stuttgart, 1988.
- [7] Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der NO_x - Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985.
- [8] Klöppner, G.: Zur Kinetik der NO-Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991.
- [9] Leuckel, W.: Swirl intensities, swirl types and energy losses of different swirl generating devices. IFRF Ijmuiden, November 1967, G 02/a/16.
- [10] Carlowitz, O.; Jeschar, R.: Entwicklung eines variablen Drallbrennkammersystems zur Erzeugung hoher Energieumsetzungsichten. BWK 32(1980).
- [11] Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.: Zur Thermodynamik von Freistrahlen. Gas-Wärme-International 33 (1984) 1.
- [12] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen. VDI Berichte 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.
- [13] Beckmann, M.; Zimmermann, R.: Gasification - Post- Combustion of Waste Materials; Influencing Parameters and On-line Monitoring of Organic Substances. PTF Topical Meeting „Advanced Technologies for Particle Processing“, Miami Beach, USA, 15.-20. Nov., 1998
- [14] Zimmermann, R.; Lenoir, D.; Kettrup, A.; Nagel, H.; Boesel, U.: On-Line Emission Control of Combustion Processes by Laser Induced Resonance Enhanced Multiphoton Ionization Combined with a Time of Flight Mass Analyzer. 26th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh(1996), 2859.
- [15] Schulenburg, F.: Modellierung von Verfahrensbausteinen zur Bewertung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen, Veröffentlichung demnächst
- [16] Marcard, W.: Rostfeuerungen. VDI-Verlag GmbH, Berlin, 1934.
- [17] Nusselt, W.: Die Vergasung und Verbrennung auf einem Rost. Zeitschrift des VDI, Bd.60, Nr.6, 5.Februar 1916.
- [18] Traustel, S.: Verbrennung, Vergasung und Verschlackung. Dissertation TH Berlin, 1939.
- [19] Rosin, P.; Rammler, E.: Die Durchzündung beim Wanderrost. Archiv für Wärmewirtschaft, 1932, H.5.
- [20] Werkmeister, H.: Versuche über den Verbrennungsverlauf bei Steinkohlen mittlerer Korngrößen. Dissertation TH Hannover, 1932.
- [21] Behrendt, T.: Thermodynamische Modellierung des Betriebsverhaltens von Hausmüllverbrennungsanlagen am Beispiel TAMARA. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 25, Nr.99, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992
- [22] Gruber, T.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: Modell zur Verbrennung auf dem Rost. Abfallwirtschafts Journal 5 (1993) 10.
- [23] Raupenstrauch, H.: Ein Beitrag zur Computersimulation reagierender Schüttschichten. Dissertation TU Graz, 1991.
- [24] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung, CUTEC-Schriftenreihe, 1995.
- [25] Kessel, van, L.B.M.; Brem, G.: A dynamic model of a municipal solid waste incinerator as a tool for process optimization and operator training. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [26] Beckmann, M.; Gehrman, H.-J.: Verweilzeitverhalten in Drehrohrsystemen Veröffentlichung demnächst



DECHEMA e.V.

19. Konstruktions-Symposium
der DECHEMA e.V.

Anlagenentwicklung
Trends in der Gestaltung von Systemkomponenten
zur Prozeßoptimierung

4. und 5. Februar 1999
DECHEMA-Haus, Frankfurt am Main

Tagungshandbuch

ISBN 3-926959-99-1

Trends in der Gestaltung von Systemkomponenten zur Prozeßoptimierung am Beispiel der thermischen Abfallbehandlung

Dr.-Ing. Michael Beckmann, Dipl.-Ing. Hans-Joachim Gehrmann, Clausthal-Zellerfeld

1 Einleitung

Nachdem in der Vergangenheit im Bereich der thermischen Behandlung von Abfällen insbesondere die Abgasreinigungstechniken (sog. Sekundärmaßnahmen) weiterentwickelt wurden, stehen jetzt verstärkt Primärmaßnahmen zur Prozeßoptimierung im Vordergrund. Um Möglichkeiten zur Prozeßoptimierung bei der thermischen Abfallbehandlung erörtern zu können, muß man zunächst die Grundbausteine (Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung) und die wesentlichen Haupteinflußgrößen betrachten. Neben dem Niveau der Haupteinflußgrößen ist auch deren Verteilung entlang des Reaktionsweges zu berücksichtigen. Diese aus verfahrenstechnischer Sicht wichtigen Anforderungen sind eng mit der Apparatechnik verbunden. In thermischen Abfallbehandlungsprozessen kommen überwiegend Rost-, Brennkammer- und Drehrohrsysteme zum Einsatz. In dem vorliegenden Beitrag werden zunächst die verfahrens- und apparatechnischen Gesichtspunkte erläutert. Im Zusammenhang mit der klassischen Verbrennung von Hausmüll in Rostsystemen, der Vergasung in Rostsystemen mit getrennter Nachverbrennung in einem Brennkammersystem und der Pyrolyse sowie Verbrennung in Drehrohrsystemen werden danach Beispiele zur Prozeßoptimierung dargestellt. Dabei werden auch Ansätze zur mathematischen Modellierung berücksichtigt.

2 Haupteinflußgrößen und Prozeßbausteine

Die Stoffumwandlung, die mit einer thermischen Behandlung angestrebt wird, ist ein komplexer Vorgang, den man sich in der Regel aus Teilprozessen, wie z.B. Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung, zusammengesetzt denken kann. Je nach Prozeßführung und Aufbau der Anlage können Teilprozesse parallel oder deutlich voneinander getrennt nacheinander ablaufen oder auch fehlen. Die jeweiligen Prozeßbedingungen werden maßgeblich durch die Haupteinflußgrößen [1] bestimmt. Diese sind in Bild 1 mit den zugehörigen Variationsbereichen dargestellt.

Einsatzstoffe

Die Einsatzstoffe können hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften, insbesondere Aggregatzustand, Konsistenz und bezüglich der chemischen Eigenschaften wie z.B. Zusammensetzung (Anteil flüchtige Bestandteile,

Einsatzstoffe	physikalische Eigenschaften		gasförmig, flüssig, pastös, fest (reaktionstauglich oder nicht)
	chemische Eigenschaften		Zusammensetzung (Problemstoffe)
Sauerstoffangebot	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
Reaktionsgase	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff), Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.		
Temperatur	Nieder- $\theta < 600^\circ\text{C}$	bis	Hochtemperatur $\theta > 1700^\circ\text{C}$ (ab 1700°C = 1400°C)
Druck	Nieder- $p \approx 0,1 \text{ MPa}$	Umgebungs- $p \approx 0,1 \text{ MPa}$	Hochdruck $p \approx 0,1 \text{ MPa}$
Reaktorverhalten	Rührkessel (RK) $Pe = 0$	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) $Pe \rightarrow \infty$
Stoffzufuhr	Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, usw.		
Verweilzeit	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
Zusatzstoffe	Additiv (z.B. Schadstoffbindung, Beeinflussung des Schmelzverhaltens) Zusatzbrennstoff Bett (z.B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung)		

Bild 1. Haupteinflußgrößen bei thermischen Behandlungsverfahren.

DUETEC / HAN / BURESTY CORP. 20.01.1998

Inertmaterial) oder ihres Ascheerweichungsverhaltens charakterisiert werden. Aus der Zusammensetzung der Einsatzstoffe können i.d.Regel schon erste Hinweise auf die Gestaltung der Prozeßführung der thermischen Behandlung abgeleitet werden. Aus der Zusammensetzung der Abfallstoffe können weiter abhängig von den jeweilig vorgesehenen Prozeßbedingungen erste Aussagen zu den Eigenschaften der Reststoffe (Asche, Schlacke) getroffen werden. Weiterhin lassen sich aus den brennstofftechnischen Eigenschaften eines Ersatzbrennstoffes ($I_{\min}$, h_u , Energieaustauschverhältnis usw.) erste Aussagen bzgl. einer Substitution von Regelbrennstoffen treffen.

Sauerstoffangebot

Thermische Prozesse können hinsichtlich der Sauerstoffkonzentration in Prozesse (sog. Grundbausteine)

- unter Sauerstoffabschluß (Pyrolyse, $\lambda \approx 0$),
- unterstöchiometrisch (Vergasung $\lambda < 1$) und
- stöchiometrisch bis überstöchiometrisch (Verbrennung $\lambda \geq 1$)

unterschieden werden. Durch die Sauerstoffzufuhr und -verteilung als **eine** der im Hinblick auf Bildungs- und Abbaumechanismen von Schadstoffen wichtigen Haupteinflußgrößen lassen sich entlang des Reaktionsweges diese Mechanismen wesentlich beeinflussen, worauf weiter unten im Zusammenhang mit den anderen Haupteinflußgrößen (Temperatur, Durchmischung, Verweilzeit) zusammenfassend eingegangen wird. Dabei ist u.a. auf bekannte Schadstoffreaktionen wie Brennstoff- und thermische NO-Bildungsmechanismen Rücksicht zu nehmen. Durch eine entsprechend optimierte Prozeßführung (Luftstufung etc.) können diese Mechanismen gezielt beeinflußt werden.

Temperatur

Das Temperaturniveau ist bei der Betrachtung von chemischen Reaktionsgleichgewichten und Reaktionsgeschwindigkeiten ebenso wie die Sauerstoffkonzentration zu berücksichtigen. Die Zusammensetzung der Reaktionsprodukte bei der Pyrolyse (Gas, Öl, koksartiger Rückstand) wird maßgeblich durch das Temperaturniveau und die Temperaturverteilung (Aufheizgeschwindigkeit) beeinflußt. So darf beispielsweise bei der Pyrolyse von Plexiglas die Temperatur nur in bestimmten Bereichen variiert werden, um eine möglichst hohe Ausbeute an Monomethylmethacrylat bei entsprechender Verweilzeit zu erzielen.

Im Hinblick auf die Eigenschaften fester Reststoffe (Asche, Schlacke als Versatz- oder Baumaterial) oder der Produkte (Zementklinker, Stahl) ist es erforderlich zu prüfen, welche qualitativen Veränderungen sich aufgrund unterschiedlicher Temperaturniveaus ergeben. So können z.B. steigende Temperaturen in der Hauptverbrennungszone einer Rostanlage zur Müllverbrennung zu sinkenden Chlorid- und Sulfatgehalten in der Schlacke führen.

Druck

Die Beeinflussung der Reaktionsgleichgewichte durch eine Druckänderung findet bei Pyrolyse-, Vergasungs-, Verbrennungs- und Hydrierverfahren je nach angestrebter Ausbeute der gewünschten Produkte Anwendung. So ist z.B. bei sogenannten Druckvergasungsverfahren, die unter Verwendung von Sauerstoff bei Drücken von ca. 2 MPa betrieben werden, die bevorzugte Bildung mehratomiger Gase beabsichtigt.

Reaktorverhalten

In der chemischen Reaktionstechnik werden hinsichtlich des Reaktorverhaltens zwei Grenzfälle unterschieden:

- der ideale Rührkessel (RK) und
- der ideale Kolbenströmer (KS).

In einem idealen Rührkessel (RK) sind alle Komponenten homogen im Reaktorraum vermischt ($Pe = 0$). Hinsichtlich des Umsatzes

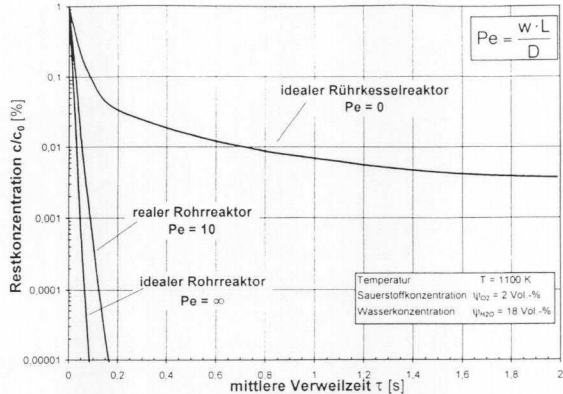


Bild 2: Abhängigkeit des CO-Abbaus von der mittleren Verweilzeit und dem Mischungsverhalten des Reaktors.

(Bildungs- und Abbaureaktionen) stellt der ideale Kolbenströmer (KS) zunächst die günstigere Reaktorcharakteristik dar (Bild 2).

Dabei werden jedoch einheitliche Reaktionsbedingungen über dem Querschnitt vorausgesetzt. In der Praxis läßt sich dies durch eine Reihenschaltung von RK- und KS- ähnlichen Elementen umsetzen. Bei der Auswahl von Prozeßteilschritten ist in diesem Zusammenhang zu untersuchen,

- inwieweit z.B. für die Vermischung von Stoffströmen zunächst Rührkessелеlemente vorgesehen werden können und
- sich danach ein Kolbenströmer mit entsprechender Länge zur Einstellung bestimmter Verweilzeiten und Umsatzgrade anschließt.

Verweilzeit

Die für bestimmte Prozeßabläufe erforderlichen mittleren Verweilzeiten werden hauptsächlich durch die Konstruktion (Geometrie des Apparates) und die durchgesetzten Massenströme festgelegt. Für den Umsatz von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Einsatzstoffen sind in der Regel vergleichsweise niedrige Verweilzeiten im Bereich von mehreren Sekunden bis Minuten erforderlich. Bei stückigen Rückständen sind die notwendigen Verweilzeiten deutlich höher. Für bestimmte Sonderabfälle, z.B. aus dem Bereich der Rüstungsalten, können die Verweilzeiten mehrere Stunden bis Tage betragen.

Zusatzstoffe

Zusatzstoffe, die für thermische Verfahren in Frage kommen, sind im wesentlichen:

- Additive (z.B. zur Schadstoffeinbindung),
- Zusatzbrennstoffe (z.B. im Bereich der Brennstoffsubstitution in Hochtemperaturprozessen) und
- Stoffe, die beispielsweise zur Betterzeugung in Wirbelschichtreaktoren oder Bettbeeinflussung (vorgewärmtes Umlaufbett) dienen.

Insgesamt ergeben sich aufgrund des Niveaus der Haupteinflußgrößen bestimmte Prozeßbausteine, die mehr oder weniger deutlich ausgeprägt in den einzelnen Verfahren auftreten.

3 Maßnahmen zur Steuerung der Haupteinflußgrößen in Apparaten der thermischen Behandlung zur Prozeßoptimierung

In diesem Abschnitt werden die grundsätzlichen Unterschiede von Apparaten in der thermischen Behandlung, insbesondere im Abfallbereich, sowie die Maßnahmen und Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen und Maßnahmen zur Prozeßoptimierung kurz erläutert.

Die Prozeßoptimierung durch geeignete Primärmaßnahmen und entsprechende Apparategestaltung verfolgt insbesondere die Zielstellungen

- Senkung der Abgasströme,
- Reduzierung der Emissionen und der Emissionsfrachten,
- Beeinflussung der Reststoff- bzw. Produkteigenschaften und
- Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades.

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

Die thermischen Hauptverfahren lassen sich jeweils in eine

- erste Stufe zur Umwandlung der festen und pastösen Abfälle und in eine
- zweite Stufe zur Behandlung der aus der ersten Stufe stammenden Gase, Flugstäube oder Pyrolysekoks (Bild 3) aufteilen.

Für die genannten Grundbausteine bzw. Verfahrensteilschritte werden im wesentlichen folgende Apparatetypen eingesetzt:

- Rost- und Brennkammersysteme (Abschnitt 3.1) sowie
- Drehrohrsysteme (Abschnitt 3.2).

Eine Übersicht zum Niveau der Haupteinflußgrößen und zu Möglichkeiten ihrer Steuerung in den jeweiligen Apparatetypen ist in dem Bild 4 enthalten.

Diese Apparatetypen sind im Zusammenhang mit Stoffbehandlungs- bzw. Energieumwandlungsverfahren in den Fachgebieten Industrieofenbau, Verbrennungs- und Brennstofftechnik usw. bereits sehr detailliert untersucht worden, weshalb an dieser Stelle auch auf die entsprechende Literatur der Stahl-, Glas-, Keramikindustrie usw. verwiesen wird. Dabei werden Gesichtspunkte aus der industriellen Praxis und Ergebnisse von Pilotanlagen zur Optimierung der Prozeßführung und zur mathematischen Modellierung erwähnt. Die im Bild 4 zusammenfassend dargestellten Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen für Rost- und Brennkammersysteme sowie für Drehrohrsysteme werden an einem ausgewählten Beispiel erläutert.

	1. Stufe	2. Stufe	Verfahren
A.	Verbrennung ¹⁾	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. klassische Müllverbrennung)
B.	Thermolyse ²⁾	Verfeuerung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Schmel-Brenn-Verfahren nach Siemens KWU)
C.	Vergasung ³⁾	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (weiterentwickelte klassische Müllverbrennung)
D.	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Konversionsverfahren nach NOELL, Thermoselect-Verfahren usw.)
E.	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach Lurgi)

1) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge

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

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

Bild 3: Systematische Einordnung von thermischen Hauptverfahren

Apparat	Rostsystem	Brennkammer	Drehrohr
Einsatzstoffe			
	stücker, in Verbindung mit einem Feststoff, oder inertbett auch pastös	gasförmig, flüssig, staubförmig	flüssig, pastös, stücker
Sauerstoffangebot			
Niveau	überstöchiometrisch üblich (Verbrennung), unterstöchiometrisch (Vergasung) möglich, dadurch eigensandige Nachverbrennung möglich, Sauerstoffabschluß (Pyrolyse) nicht üblich	unter- bis überstöchiometrisch, in weiten Bereichen variabel, falls am Reaktoraustritt überstöchiometrisch „Brennkammer“ falls am Ende Unterstöchiometrie „Vergasungsreaktor“	Sauerstoffabschluß (Pyrolyse) oder überstöchiometrisch (Verbrennung), unterstöchiometrisch (Vergasung) nicht üblich
Steuerung längs des Reaktionsweges	in der Regel nicht möglich, in Einzelfällen durch spezielle Sauerstoffanlagen	durch Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff längs des Verbrennungsweges sehr gut möglich (einbringen über Rührkessellemente)	
Temperatur			
Niveau	Bettoberflächen Temperatur bis ca. 1000°C und höher, mittlere Betttemperaturen niedriger	unterschiedliche Verbrennungstemperaturen im Bereich von 1000 °C bis 2000 °C ggf. auch höher, Bereich sehr variabel	Niedertemperatur (z.B. Pyrolyse, indirekte Beheizung, 500 °C) bis Hochtemperatur (z.B. 1000 °C, 1500 °C ggf. höher)
Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einteilung in mehrere Zonen sehr gute Möglichkeiten, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftvorwärmung, Abgasrückführung, Wasser-/Dampfzuführung)	neben der Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff über dem Reaktorweg, insbesondere Eingriffe durch Abgasrückführung, Wasserzuführung usw. möglich; indirekte Wärmein- bzw. -auskopplung durch entsprechende Heiz- bzw. Kühlsysteme, viele Möglichkeiten	direkte und indirekte Wärmein- bzw. -auskopplung durch Gegen- und Gleichstromführung, Steuerung darüber hinaus schwierig
Druck			
	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck, Hochdruckverbrennung selten, Druckvergasung häufiger	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck
Reaktorverhalten			
Feststoff	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer RK-Charakteristik (z.B. Rückschubrost) oder eine KS-Charakteristik (z.B. Wandrost) angehängt werden, über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angehängt eine KS-Charakteristik		einzelne Abschnitte sind über den Querschnitt wegen der Feststoffumwälzung angehängt als Rührkessel zu betrachten, über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angehängt eine Kolbenstromcharakteristik
Gas	a) Oxidationsmittel usw. strömt zwangsläufig durch das Bett und wird gleichmäßig über der Bettoberfläche verteilt, damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich, Gasbehandlung im nachfolgenden Verfahrensschritt notwendig (z.B. Nachverbrennung)	strömungstechnisch können sowohl Rührkessel- als auch Kolbenstrom-Charakteristiken für Staub und Gas angehängt werden	das Reaktorverhalten der Gasphase ist angehängt durch eine Kolbenstromcharakteristik zu beschreiben, Gas überströmt Feststoff und ist getrennt nachzuverbrennen
Verweilzeit			
Niveau (mittlere Verweilzeit)	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden, durch Rostgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar und bei Projektierung durch Gesamtlänge und Breite beeinflussbar	im Bereich von Sekunden (bei höherem Druck entsprechend länger), durch Lastzustand einstellbar und bei Projektierung durch gemeinsame Abmessungen beeinflussbar	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden, durch Drehzahl, Neigung und Füllungsgrad einstellbar
Steuerung längs des Reaktionsweges	durch getrennte Geschwindigkeits-einstellungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich, falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Ausbrandes am Rostende Steuerung durch Austragswalze	nur schwer möglich, Verweilzeitverteilung über Reaktorverhalten steuerbar	kaum möglich
Zusatzstoffe			
	Additive zur Schadstoffbindung in den Feststoff und Beeinflussung der Eigenschaften der verbrennenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke). Inertiert z.B. Trägematerial für event. leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoff)	Additive insbesondere über Rührkessellemente einbringen, sowohl zur Schadstoffbindung (z.B. Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid) als auch zur Beeinflussung der Schlackeigenschaften und Schmelztemperaturen der Staube	Additive z.B. zur Beeinflussung der Schlackeigenschaften und Schmelztemperaturen
Einsatzbereiche (Beispiele)			
	für den Feststoffumsatz in der 1. Stufe bei Haus- müllverbrennungsanlagen, Separieren von Metallen aus Verbundstoffen bei niedrigen Temperaturen und gleichzeitig unterstöchiometrischen Verhältnissen	Verbrennung von flüssigen Rückständen/Nachverbrennung von Gas und Stäuben in der 2. Stufe von thermischen Behandlungsverfahren	Verbrennung als Verfahrensteilschritt z.B. bei Sonderabfall, Pyrolyse als Verfahrensteilschritt zur Vorbereitung der Abtrennung einer Metallfraktion

Bild 4. Charakterisierung von Rost-, Brennkammer und Drehrohrsystemen

Aus prozeßtechnischer Sicht können Einsatzstoffe hinsichtlich ihrer Konsistenz in gasförmige, staubförmige und flüssige sowie in stückige Einsatzstoffe unterteilt werden. Die Verbrennung gasförmiger, staubförmiger und flüssiger Einsatzstoffe erfolgt in der Regel in Brennkammersystemen, wobei die Brennkammer selbst in mehrere Stufen mit jeweils spezifischen Reaktionsbedingungen (Sauerstoffangebot, Temperatur, Reaktorverhalten, Verweilzeit) unterteilt ist. Bei stückig festen Einsatzstoffen sind die Umsatzvorgänge wesentlich komplexer. Hier kann zunächst grob hinsichtlich des Feststoffumsatzes und der weiteren Behandlung

der dabei erzeugten Gase unterschieden werden. Vor diesem Hintergrund wird im folgenden nur auf Beispiele der Behandlung stückiger Abfälle eingegangen.

3.1 Vergasung auf Rostsystemen mit getrennter Nachverbrennung in Brennkammersystemen

Rostsysteme werden bei den „klassischen“ Verfahren überwiegend eingesetzt und stellen eine lang erprobte und bewährte Technik dar (z.B. Müllverbrennung).

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

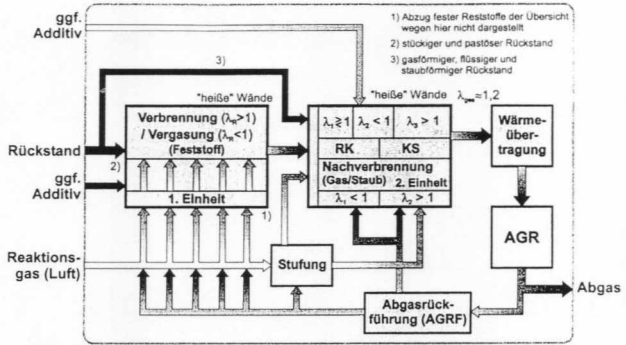


Bild 5. Schematische Darstellung der getrennten Prozeßführung.

Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung, Modellierung und Optimierung der Prozeßführung (sog. Primärmaßnahmen) des thermischen Kernverfahrens. Wesentliche Voraussetzung für die Optimierung der Teilaufgaben sind zunächst die Trennung der Prozeßteilschritte

- Feststoffumsatz auf dem Rost,
- Nachverbrennung der Gase und
- Wärmeauskopplung (Bild 5).

Bei dieser getrennten Prozeßführung können die Haupteinflußgrößen [2] Sauerstoff, Reaktionsgase, Reaktorverhalten bzw. Durchmischung, Art der Stoffzufuhr, Verweilzeit, Temperatur und Zusatzstoffe getrennt für den Feststoffumsatz (Glühverlust, Eluateigenschaften) und

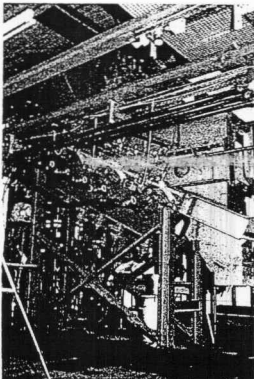


Bild 6. Rostsystem.

den Umsatz der Gase (CO , C_xH_y , PCDD/F , NO_x) eingestellt werden. Wie das Bild 5 weiter zeigt, sind bei einer solchen Kombination aus Rost und Brennkammersystem (Bild 6 und Bild 7) durch Luftstufung, Abgasrückführung, Sauerstoffzufuhr usw. zahlreiche Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen vorhanden [3]. Zur Vermeidung von Quencheffekten sollte die Wärmeübertragung separat erfolgen. Die Kühlung einzelner Berei-

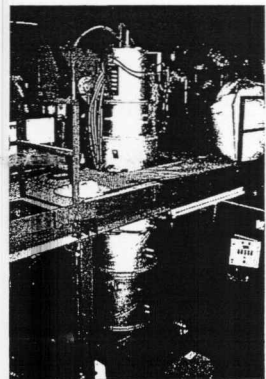


Bild 7. Brennkammersystem.

che, wie z.B. durch einen wassergekühlten Rostbelag [4], kann hingegen im Hinblick auf die unabhängige Einstellung der Temperatur von den Stöchiometrieverhältnissen (niedrige Luftzahl), insbesondere bei heizwertreichen Abfällen, von Vorteil sein.

Bei der in Bild 5 dargestellten getrennten Prozeßführung kann der Feststoff auf dem Rost auch stark unterstöchiometrisch durch $\xi_{C,Re,R}$ bei verschiedenen Stöchiometrieverhältnissen λ auf dem Rost Vergasung umgesetzt werden.

Wie die Ergebnisse in Bild 8 zeigen, kann durch eine entsprechende Luftstufung und Verweilzeitsteuerung über der Rostlänge, bei der Vergasung ebenso wie bei der Verbrennung, ein sehr niedriger Glühverlust der Reststoffe erreicht werden. Das in dem Rostsystem erzeugte Vergasungs- oder Verbrennungsgas kann anschließend eigenständig gestuft mit Primärmaßnahmen [5-8] in dem Brennkammersystem (Bild 7) nachverbrannt werden. Um gleichmäßige Reaktionsbedingungen im Brennraum zu erzeugen, müssen Brenngas oder ggf. der flüssige Einsatzstoff und das Oxidationsmittel sorgfältig miteinander vermischt werden, d.h. zur Vergleichmäßigung der Temperatur- und Konzentrationsverhältnisse ist zunächst ein Rührkessel-Element und zur weiteren Erhöhung des Abbaugrades ein Kolbenströmer in Reihe geschaltet, vorzusehen. Im Zusammenhang mit einem möglichst einheitlichen Temperaturniveau sei an dieser Stelle erwähnt, daß eine verstärkte Wärmeauskoppelung, verbunden mit Quencheffekten an kalten Wänden, im Verbrennungsraum vermieden werden sollte.

Für die Vermischung im Bereich der Nachverbrennung scheiden aufgrund des hohen Temperaturniveaus, der Korrosion usw. mechanische Einbauten in der Regel aus. Es bieten sich im wesentlichen nur zwei fluiddynamische Rührmechanismen an:

- sogenannte überkritische Drallströmungen mit interner Rückführung bzw. Rückvermischung heißer Gase [9, 10] bei Anlagen kleinerer Leistung oder aber
- einzelne oder mehrfach über- bzw. nebeneinander angeordnete Freistrahlen, die als Injektoren das umgebende Medium ansaugen und umwälzen [11, 12]. Dabei muß durch die richtige Auslegung der Düsengeometrie, Düsenanzahl und -anordnung sowie Eintrittsimpuls eine gute Überdeckung des Querschnittes, eine hinreichende Eindringtiefe der Injektorstrahlen und ein ausreichendes Ansaugen des zu vermischenden Grundstromes erreicht werden.

Die Einrichtung einer solchen intensiven Durchmischungszone (Rührkesselreaktor) am Eintritt der Nachverbrennung führt, wie in Bild 5 schematisch dargestellt, zu der vorangestellt erwähnten strömungstechnischen Trennung. Unterstützend wirkt, wenn die Durchmischungszone in einem eingezogenen Querschnitt angeordnet wird. Nach der Mischungszone schließt sich dann eine Beruhigungsstrecke (Rohrreaktor als geeignetere Reaktorcharakteristik für den Abbau) an. Im Zusammenhang mit der Verminderung von NO_x bei gleich-

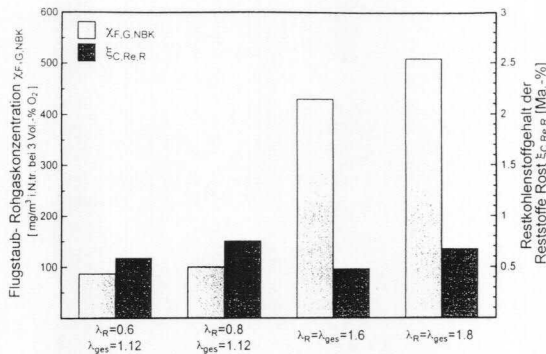


Bild 8: Staubkonzentrationen im Rohgas $\chi_{F,G,NBK}$ und Glühverlust $\xi_{C,Re,R}$ bei verschiedenen Stöchiometrieverhältnissen λ auf dem Rost.

zeitig hohem Ausbrand (CO, Flugasche, organischen Spurenstoffen usw.) sollte das Reaktionsgas gestuft der Brennkammer zugeführt werden (Bild 9).

So werden z.B. bei entsprechender Verweilzeit und Durchmischung Dioxine/Furane schon bei Temperaturen um 950 °C zerstört [13]. In diesem Zusammenhang sei hier auch auf die Entwicklung von On-line-Meßtechniken zur Bestimmung von organischen Spurenstoffen hingewiesen [14].

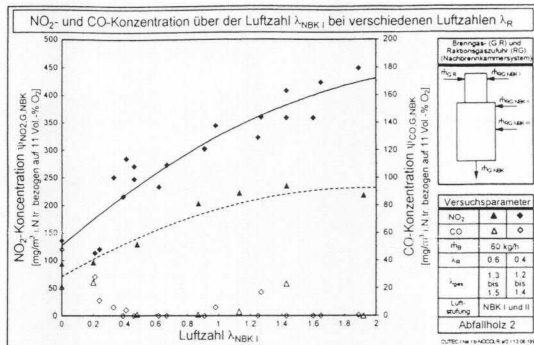


Bild 9: NO₂- und CO-Konzentration in Abhängigkeit von der Luftzahl $\lambda_{\text{NBK I}}$ bei verschiedenen Luftzahlen $\lambda_{\text{R-rost}}$.

Dieses gegenwärtig im Pilotmaßstab untersuchte Vergasungs- Nachverbrennungskonzept mit Rostsystemen [3] erscheint insbesondere deshalb sehr aussichtsreich, weil über die Vorteile einer getrennten Prozeßführung hinaus zusätzlich u.a.:

- Flugstaubkonzentrationen (Bild 7) [3],
- Abgasströme (Reduzierung von $\lambda_{\text{ges}}=1,8$ auf $\lambda_{\text{ges}}=1,2$) [3] und damit
- Emissionsfrachten deutlich reduziert werden,
- Brenngase erzeugt werden, die einen eigenständigen Nachverbrennungsprozeß ohne Zusatzbrennstoff ermöglichen [3],
- der Nachverbrennungsprozeß selbst, mit bekannten Primärmaßnahmen, im Hinblick auf NO_x-Minderung bei gleichzeitig hohem Ausbrand (CO, C_xH_y, PCDD/F optimiert werden kann (Bild 8) [3],
- der Gesamtwirkungsgrad insgesamt verbessert wird [15].

Die Optimierung der Prozeßführung in Rostsystemen für Abfälle, sowohl der konventionellen wie auch der Vergasungsfahrweise, erfolgt bislang weitgehend empirisch an Praxis- oder

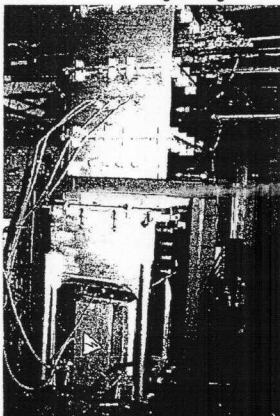


Bild 10. Batch-Rost.

Pilotanlagen. Zum weiteren Verständnis des Feststoffumsatzes in Rostsystemen werden aufbauend auf den Erfahrungen und mathematischen Modellen im Zusammenhang mit fossilen Brennstoffen [z.B. 16 bis 20] zunehmend auch mathematische Modelle für den Umsatz von Abfällen in Abhängigkeit bestimmter Haupteinflußgrößen (Temperatur, Druck, Verweilzeit) entwickelt und gezielt in die Optimierung mit einbezogen [z.B. 21 bis 25]. Die in näher beschriebene Modellvorstellung nimmt für die Beschreibung des Verweilzeitverhaltens als Reaktoraufteilung für den Rost eine Rührkesselskaskade an. Die Beschreibung des Umsatzes erfolgt zunächst für ein einzelnes Rührkessелеlement (Zelle) mit Hilfe von Massen-, Stoff- und Energiebilanzen („Zellenmodell“). Insbesondere aufgrund der häufig heterogenen Zusammensetzung und fehlender Basisdaten werden die allgemein bekannten

Teilvorgänge des Feststoffumsatzes durch einen vereinfachten Ansatz mit einem „effektiven“ Gesamtreaktionskoeffizienten zusammenfassend betrachtet.

Dieser wird durch Versuche an einer, eine Zelle nachbildenden, nicht bewegten Roststufe (Batch-Prozeß, Bild 10) in Verbindung mit dem Zellenmodell bestimmt. Durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Zellen zu der o.g. Rührkesselkaskade läßt sich dann der Feststoffumsatz für einen entlang des Rostweges bewegten Abfall beschreiben ("Kontinuierliches Modell").

Ein Vergleich der Modellrechnungen mit Meßergebnissen an einer Pilotanlage zeigt, daß mit diesem Modell sowohl stationäre Zustände als auch die nach einem sprunghaften Prozeßeingriff folgenden instationären Übergänge in einen neuen stationären Zustand tragfähig wiedergegeben werden können (Bild 11).

Damit besteht nun die Möglichkeit, für Abfälle mit zunächst noch unbekanntem Verbrenungsverhalten, durch Versuche an einem Batch-Rost (Bild 10) zusammen mit dem „Zellenmodell“ Gesamtreaktionskoeffizienten zu ermitteln und danach mit dem „Kontinuierlichen Modell“ erste Aussagen bezüglich einer geeigneten Prozeßführung abzuleiten. Bei Projektierungen und Betriebsoptimierungen ist man somit nicht mehr allein auf ein empirisches Vorgehen angewiesen.

3.2 Feststoffumsatz in Drehrohrsystemen

In gleicher Weise wie Rostsysteme sind Drehrohrsysteme für bestimmte Teilschritte (Pyrolyse, Verbrennung) in Gesamtverfahren eingebettet. Drehrohrsysteme werden seit etwa 100 Jahren in der Stoffbehandlung und seit ca. 30 Jahren auch in der Abfallbehandlung eingesetzt. Ein Vorteil von Drehrohrsystemen liegt im weit gefächerten Einsatzstoffspektrum: es können feste, stückige, pastöse und flüssige Stoff- und Stoffgemische zugeführt werden.

In der Stoffbehandlung werden beispielsweise im Vergleich zu Abfallgemischen weitgehend homogene Einsatzstoffe wie Kalkstein oder Kreide dem Kalk- bzw. Zementbrennprozeß zugeführt. In der Abfallbehandlung kommen Drehrohre u.a. im Bereich der Sonderabfallbehandlung (z.B. BASF-Sondermüllverbrennungsanlage zur energetischen Verwertung toxischer Abfälle) und im Bereich der Pyrolyse von Abfallgemischen (z.B. Siemens Schweißbrenn-Verfahren oder Noell-Konversionsverfahren zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Abfällen) zum Einsatz. In Drehrohren kann die Verweilzeit über Geometrieparameter (z.B. Länge L , Durchmesser D , und ggf. Einbauten) und Betriebsparameter wie Drehzahl n , Neigung β und Massenstrom (Füllungsgrad) beeinflusst werden. Bei Verbrennungsdrehrohren ist eine Steuerung der Temperatur längs des Reaktionsweges nur begrenzt über Sauerstoffkonzentrationen möglich. Bei indirekt beheizten Drehrohren zur Pyrolyse kann über getrennt voneinander

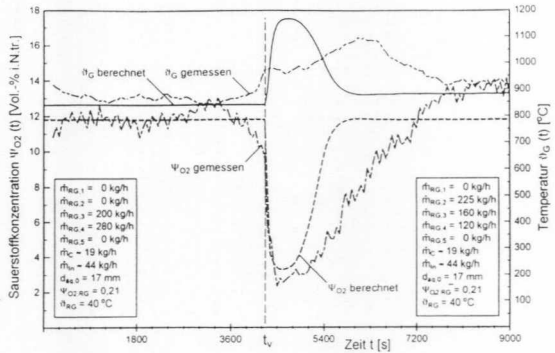


Bild 11: Gemessene und berechnete Sauerstoffkonzentration und Temperatur (Modellbrennstoff Braunkohle) (Umverteilung des Luftmassenstromes).

steuerbare Heizzonen die Aufheizgeschwindigkeit und das Temperaturniveau beeinflusst werden. Beispiele für die Wertstoffrückgewinnung sind die Depolymerisation von Plexiglasabfällen oder auch das thermische Recycling von Kohlenstoffverbundfasermaterialien.

Im Hinblick auf die Projektierung neuer Anlagen und Optimierung bestehender Anlagen sind mathematische Modelle zur Beschreibung des Feststofftransportes und Verweilzeitverhaltens sowie der

Stoff- und Wärmeübertragung ein wichtiges Hilfsmittel. Dabei bildet die mathematische Beschreibung des Feststofftransportes und des Verweilzeitverhaltens die Grundlage für ein Gesamtmodell. Die Vorgehensweise zur Beschreibung der komplex ineinandergreifenden Vorgänge im Drehrohr entspricht der bereits im Abschnitt 3.1 für den Rost dargestellten Vorgehensweise: Das Drehrohr wird entsprechend dem „Zellenmodell“ in Rührkessellemente unterteilt und entsprechende Verweilzeiten für jede Zelle (zunächst für den Feststoff, anschließend auch für die Gasphase) nach vereinfachten Ansätzen, die u.a. die Drehrohrlänge, den Drehrohrdurchmesser, die Neigung, die Drehzahl, den Schüttwinkel und den Füllungsgrad miteinander verbinden. Anschließend können die Zellen über zonale Massen- und Energiebilanzen miteinander verknüpft werden. Vor diesem Hintergrund werden derzeit Untersuchungen zum Verweilzeitverhalten an einem Drehrohr im Pilotmaßstab (Bild 11) durchgeführt [26].

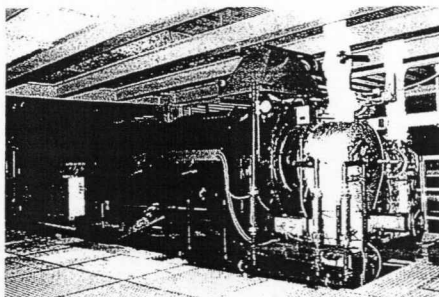


Bild 11. Pyrolyse-Drehrohr.

4 Symbolverzeichnis

Symbole

β	Drehrohrneigung
D	Durchmesser, Diffusionskoeffizient
d	Partikeldurchmesser
ϑ	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
k	Konstante
L	Länge
λ	Stoichiometrieverhältnis, Luftzahl
n	Drehrohrdrehzahl
p	Druck
Pe	Peclet-Zahl
τ	Verweilzeit
Θ	Schüttwinkel des Einsatzstoffes
ξ	Konzentration (auf Masse bezogen)
ψ	Konzentration (auf Volumen bezogen)
w	Geschwindigkeit

Indices

$\dot{a}q$	äquivalent
B	Brennstoff
C	Kohlenstoff
F	Flugstaub
G	Brenngas/Abgas
ges	gesamt
$i.N.tr.$	im Normzustand, trocken
in	inert
i	innen
NBK	Nachbrennkammer
R	Rost
Re	Reststoffe
RG	Reaktionsgas
I, II, III	Zonen für Reaktionsgaszufuhr Rost und Nachbrennkammer

5 Schrifttum

- [1] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände. VDI-Berichte 1033: „Techniken der Restmüllbehandlung - Kalte und/oder thermische Verfahren.“, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993
- [2] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Waste Incineration Systems, Current Technology and Future Developments in Germany. 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 18.-21. April 1995, Lisbon, Portugal.

- [3] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Busch, M.; Peppler, E.: Gasification of waste materials in grate systems. 4th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 1.-4. April 1997.
- [4] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17. - 19. Oktober 1994, Würzburg
- [5] Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der NO_x -Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. TECFLAM-Seminar, Oktober 1990, Heidelberg, 1990.
- [6] Kolb, T.; Leuckel, W.: NO_x -Minderung durch 3-stufige Verbrennung - Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM-Seminar, Stuttgart, 1988.
- [7] Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der NO_x -Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985.
- [8] Klöppner, G.: Zur Kinetik der NO-Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991.
- [9] Leuckel, W.: Swirl intensities, swirl types and energy losses of different swirl generating devices. IFRF Ijmuiden, November 1967, G 02/a/16.
- [10] Carlowitz, O.; Jeschar, R.: Entwicklung eines variablen Drallbrennkammersystems zur Erzeugung hoher Energieumsetzungsichten. BWK 32(1980).
- [11] Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.: Zur Thermodynamik von Freistrahlen. Gas-Wärme-International 33 (1984) 1.
- [12] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen. VDI Berichte 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.
- [13] Beckmann, M.; Zimmermann, R.: Gasification - Post-Combustion of Waste Materials; Influencing Parameters and On-line Monitoring of Organic Substances. PTF Topical Meeting „Advanced Technologies for Particle Processing“, Miami Beach, USA, 15.-20. Nov., 1998
- [14] Zimmermann, R.; Lenoir, D.; Kettrup, A.; Nagel, H.; Boesel, U.: On-Line Emission Control of Combustion Processes by Laser Induced Resonance Enhanced Multiphoton Ionization Combined with a Time of Flight Mass Analyzer. 26th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh(1996), 2859.
- [15] Schulenburg, F.: Modellierung von Verfahrensbausteinen zur Bewertung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen, Veröffentlichung demnächst
- [16] Marcard, W.: Rostfeuerungen. VDI-Verlag GmbH, Berlin, 1934.
- [17] Nusselt, W.: Die Vergasung und Verbrennung auf einem Rost. Zeitschrift des VDI, Bd.60, Nr.6, 5.Februar 1916.
- [18] Traustel, S.: Verbrennung, Vergasung und Verschlackung. Dissertation TH Berlin, 1939.
- [19] Rosin, P.; Rammier, E.: Die Durchzündung beim Wanderrost. Archiv für Warmewirtschaft, 1932, H.5.
- [20] Werkmeister, H.: Versuche über den Verbrennungsverlauf bei Steinkohlen mittlerer Korngrößen. Dissertation TH Hannover, 1932.
- [21] Behrendt, T.: Thermodynamische Modellierung des Betriebsverhaltens von Hausmüllverbrennungsanlagen am Beispiel TAMARA. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 25, Nr.99, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992
- [22] Gruber, T.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: Modell zur Verbrennung auf dem Rost. Abfallwirtschafts Journal 5 (1993) 10.
- [23] Raupenstrauch, H.: Ein Beitrag zur Computersimulation reagierender Schüttschichten. Dissertation TU Graz, 1991.
- [24] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung, CUTEC-Schriftenreihe, 1995.
- [25] Kessel, van, L.B.M.; Brem, G.: A dynamic model of a municipal solid waste incinerator as a tool for process optimization and operator training. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [26] Beckmann, M.; Gehrmann, H.-J.: Verweilzeitverhalten in Drehrohrsystemen Veröffentlichung demnächst