

# Thermische Behandlung von stückigen Rückständen

Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung

R. Scholz, M. Beckmann, Clausthal, und J. Horn, M. Busch, München

Bei thermischen Verfahren zur Behandlung von Rückständen<sup>1)</sup> (z. B. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse) kann das Ziel entweder die Entsorgung (Bereich I) oder die Wertstoffrückgewinnung (Bereich II) sein. — Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit verschiedenen Möglichkeiten der Prozeßführung, d. h. Primärmaßnahmen bei thermischen Behandlungsverfahren von stückigen Rückständen (z. B. zur Entsorgung von Restmüll aus Hausmüll, zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Kunststoff-Metall-Verbundstoffen [Teilerückgewinnung]). Nach der Behandlung grundsätzlicher Aspekte werden verschiedene Gesichtspunkte zur Restmüllentsorgung anhand einiger Betriebsversuche an einer Rostfeuerungsanlage vorgestellt.

## Anforderungen an die Prozeßführung Allgemeines

Die Prozeßbedingungen bei thermischen Verfahren werden überwiegend durch die Haupteinflußgrößen

- Einsatzstoff,
- Konzentrationsniveau (z. B. Sauerstoffkonzentration),
- Temperaturniveau,
- Verweilzeit und Verweilzeitverhalten und

● Stoffeigenschaften

bestimmt. Die Festlegung bestimmter Prozeßbedingungen ist jeweils abhängig von dem angestrebten Prozeßziel. Rückstände sind in der Regel sehr heterogen zusammengesetzt, so daß bei der Prozeßführung je nach dem Ziel der

- Entsorgung (Bereich I) und/oder
  - Wertstoffrückgewinnung (Bereich II)
- bezüglich der einzelnen Stoff- bzw.

Stoffkomponentenströme verschiedene Teilaufgaben, wie beispielhaft in **Tabelle 1** dargestellt, berücksichtigt werden müssen (Ascheausbrand, Ascheeigenschaften, Qualität der zurückzugewinnenden Stoffe oder Teile usw.). Oftmals besteht jedoch die Schwierigkeit, daß für die Optimierung solcher Teilaufgaben jeweils unterschiedliche Prozeßbedingungen erforderlich sind. Es ist deshalb naheliegend, je nach Erfordernis einzelne Teilprozesse, in getrennten Prozeßstufen unabhängig voneinander zu optimieren. Die Aufteilung von Prozessen in einzelne Stufen und die getrennte Optimierung der Teilprozesse findet in anderen Gebieten der Verfahrenstechnik bereits seit langem Anwendung, im Zusammenhang mit den hier in Rede stehenden thermischen Behandlungsverfahren besteht jedoch größtenteils noch die Aufgabe, diese Erfahrungen entsprechend zu übertragen.

Im Bereich der Entsorgung gasförmiger, flüssiger und staubförmiger Rückstände (Bereich I) durch Verbrennung liegen bereits sehr umfangreiche Erfahrungen hinsichtlich einer gestuften Reaktionsführung vor, z. B. [1 bis 3]. Beispielsweise lassen sich Stickstoffoxide aus Brennstoffstickstoff u. a. durch Einrichten unterstöchiometrischer Stufen (Absenken des Sauerstoffpartialdruckes) sehr wirkungsvoll reduzieren. Zur Gewährleistung eines hohen CO<sub>2</sub>-Abbaugrades (Ausbrand) ist dann eine überstöchiometrische Ausbrandstufe nachzuschalten.

Weiterhin ist am Beispiel der Entsorgung von stückigen Rückständen (Bereich I) durch Verbrennung in Rostfeuerungsanlagen bereits mehrfach dargestellt [4; 5] worden, daß für die Lösung der Teilaufgaben

- hoher Ausbrand der festen Rückstände und
- Beeinflussung der Rückstandseigenschaften (Eluatverhalten usw.),
- Reduzierung von gas- und partikelförmigen Emissionen

wird mehr Möglichkeiten durch die Prozeßführung gegeben sind, wenn der Prozeß im Gegensatz zu herkömm-

lichen Verfahren deutlicher in eine

- Primärstufe („Vorverbrennungsstufe“/z. B. Rost) und möglichst vollständig getrennt in
- eine Nachverbrennungsstufe aufgeteilt wird. Die Nachverbrennungsstufe selbst ist dann wie eine eigenständige Feuerung, wiederum in verschiedene Reaktionsstufen unterteilt, zu gestalten.

Bei einer solchen mehrstufigen Prozeßführung können nun die Prozeßbedingungen in der Primärstufe so gewählt werden, daß

- neben dem wichtigen Kriterium eines hohen Abbaugrades organischer Substanzen (Ausbrand des Feststoffes),
- auch andere Eigenschaften des Feststoffes (z. B. Eluatverhalten) im Hinblick auf:

- eine Weiterverarbeitung/Wiederverwendung,
  - eine gezielte Schadstoffeinbindung,
  - eine direkte Ablagerung
- beeinflußt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte kann man nun im Zusammenhang mit der mehrstufigen Prozeßführung weiter daran denken, die Prozeßbedingungen so einzustellen, daß Wertstoffe thermisch separiert werden (Bereich II), wobei insbesondere Rücksicht auf Randbedingungen infolge der zurückzugewinnenden Stoffe zu nehmen ist. Beispielhaft sei das Interesse für die Entscheidung von Kunststoff-Metall-Verbundstoffen

- entweder zur Rückgewinnung von ganzen Formteilen (Teilerückgewinnung)
- oder zur Rückgewinnung von Metallen aus Shredderrückständen (Materialrückgewinnung) genannt.

Ausgehend von der möglichen Variationsbreite der eingangs erwähnten Haupteinflußgrößen Konzentrationsniveau (z. B. Sauerstoffkonzentration), Temperatur, Verweilzeit und Betteigenschaften sowie aus der Betrachtung ihrer Wirkungsweisen ergibt sich zunächst eine grobe Einengung hinsichtlich der Einstellung bestimmter Parameterkombinationen. Ferner erhält man bei der Betrachtung des Verweilzeitverhaltens durch die Beschreibung von

<sup>1)</sup> Prof. Dr.-Ing. R. Scholz, Institut für Energieverfahrenstechnik der Technischen Universität Clausthal, Dipl.-Ing. M. Beckmann, Clausthaler Umwelttechnik Institut GmbH — CUTEK-Institut GmbH, Dipl.-Ing. J. Horn und Dipl.-Ing. M. Busch, Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik, München.

<sup>2)</sup> Rückstände können sowohl Konsumgüterabfälle (Restmüll), die nach den Strategien Vermeiden, Vermindern, Verwerten verbleiben, als auch Produktionsreststoffe sein.

Grenzfällen wichtige Hinweise bezüglich der Wahl bestimmter Reaktoren (Rührkesselreaktor (Mixed Flow Reactor, MFR) und Kolbenstromreaktor (Plug Flow Reactor, PFR). Bei der Projektierung ist weiter darauf zu achten, daß für eine weitgehend getrennte Beeinflussung der o. g. Haupteinflußgrößen genügend Eintrittsmöglichkeiten vorhanden sein müssen.

### Haupteinflußgrößen

Aus den Gebieten der Verbrennungs- und Brennstofftechnik sind die grundsätzlichen Einflüsse von

- Sauerstoffkonzentration,
- Temperatur,
- Verweilzeit,
- sowie Verweilzeitverhalten

bekannt. Deshalb werden im folgenden einige wichtige Gesichtspunkte zusammengefaßt. Dabei ist zu beachten, daß die Einflußgrößen mehr oder weniger miteinander gekoppelt sind.

Bei dem Umwandlungsprozeß organischer stückiger Stoffe sind allgemeine die Teilschritte

- Trocknung und Entgasung,
- Vergasung,
- Restausbrand

zu berücksichtigen. Je nach Erfordernis kann man den Prozeß nach jedem dieser Teilschritte entweder abbrechen, unterbrechen oder kontinuierlich fortsetzen.

Trocknungs- und Entgasungsvorgänge laufen bei direkter oder indirekter Wärmezufuhr ab. Dabei werden sog. flüchtige Bestandteile abgespalten und es verbleibt ein fester Rückstand. Bei der Entgasung durch direkte Beheizung ist bei sauerstoffhaltigen Beheizungs-gasen bei entsprechend niedrigen Temperaturen nur die Enthalpie der Gase als physikalische Einflußgröße wichtig, nicht jedoch der Sauerstoff als Reaktionsmedium.

### Sauerstoffkonzentration

Die nach der Entgasung verbleibende organische Substanz ist in einem nächsten Schritt umzusetzen.

Geschieht dies durch Sauerstoffzufuhr, so kann z. B. der Umsatz des fixen Kohlenstoffes im wesentlichen durch folgende Bruttoreaktionen beschrieben werden: Über die beiden heterogenen Reaktionen  $2C + O_2 \rightarrow 2CO$  und  $C + CO_2 \rightarrow 2CO$  (Boudouard-Reaktion) wird der fixe Kohlenstoff abgebaut; von der Fest-

**Tabelle 1: Beispielhafte Teilaufgaben bei der thermischen Entsorgung und Wertstoffrückgewinnung.**

<b>Zielstellung</b>	
<b>Entsorgung</b> (z. B. Restmüll aus Hausmüll)	<b>Wertstoffrückgewinnung</b> (z. B. Rückgewinnung beschichteter Stahl-Formteile)
Lösung durch hintereinandergeschaltete Prozeßstufen und Maßnahmen (Beschreibung im Text)	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Umwandlung chemisch komplizierter Stoffe in einfache überschaubare Stoffe</li> <li>2. hoher Ausbrand der festen Rückstände</li> <li>3. gezielte Beeinflussung der festen Rückstände, d. h.: „zweckmäßige“ Behandlung für eine               <ul style="list-style-type: none"> <li>• weitere Nutzung</li> <li>• gezielte Schadstoffbindung</li> <li>• unmittelbare Ablagerung</li> </ul>               z. B. durch Additive, Phasenänderung (langsamere Feststoff, Schlacke), usw.             </li> <li>4. Reduzierung der Flugstaubmengen</li> <li>5. hoher Ausbrand des Flugstaubes</li> <li>6. Senkung des absoluten Abgasmassenstroms</li> <li>7. hoher Ausbrand der Abgase (Reduzierung von Emissionen: CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, usw.)</li> <li>8. Reduzierung von Stickstoffoxiden</li> <li>9. Reduzierung des Einsatzes von Sekundärenergie (nach Möglichkeit energieautark)</li> <li>10. gegebenenfalls energetische Nutzung</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abbau organischer Substanzen in der festen Phase, z. B.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• zur Separation von Wertstoffen</li> <li>• zur thermischen Entsichtung nach Möglichkeit ohne Phasenänderung bei den Wertstoffen</li> </ul> </li> <li>2. hoher Ausbrand übriger fester anorganischer Rückstände</li> <li>3. gezielte Beeinflussung übriger fester anorganischer Rückstände z. B. durch Additive, Phasenänderung (langsamere Feststoff, Schlacke), usw., d. h.: „zweckmäßige“ Behandlung für eine               <ul style="list-style-type: none"> <li>• weitere Nutzung</li> <li>• gezielte Schadstoffbindung</li> <li>• unmittelbare Ablagerung</li> </ul>               nach einer Abtrennung der Wertstoffe             </li> <li>4. bis 10. wie linke Spalte</li> </ol>

stoffoberfläche wegdiffundierendes CO reagiert in der Grenzschicht über die homogene Gasphasenreaktion ( $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ ) mit dem Sauerstoff zu CO<sub>2</sub>, welches sowohl zur Oberfläche als auch zur Umgebung diffundiert. Der Abbrandverlauf ergibt sich aus der Kopplung von Stoff- und Wärmeaustausch mit der chemischen Kinetik, z. B. nach [6].

- Bei Sauerstoffmangel, d. h. unterstöchiometrischen Verhältnissen, ist die homogene Gasphasenreaktion gehemmt. Der fixe Kohlenstoff wird dann unter Bildung von CO jedoch umgesetzt, womit die Trennung von organischen und anorganischen Stoffen im Fall einer Wertstoffrückgewinnung (z. B. Thermisches Entsichten) bei relativ niedrigen Temperaturen möglich ist. Der unterstöchiometrische Umsatz wird allgemein als Vergasung bezeichnet.
- Bei Erhöhung des Sauerstoffangebotes bis zu stöchiometrischen bzw. überstöchiometrischen Verhältnissen findet die Umsetzung des CO zu CO<sub>2</sub> über die homogene Gasphasenreaktion bei entsprechend höheren Temperaturen statt (Restausbrand). Der Gesamtpro-

zeß aus den Teilschritten Trocknung, Entgasung, Vergasung und Restausbrand wird häufig insgesamt als Verbrennung bezeichnet. Diese Teilschritte finden auch bei der Verbrennung flüssiger und staubförmiger Stoffe in sehr schneller Folge in einer „Flamme“ statt.

Das Sauerstoffangebot selbst kann

- entweder durch die Variation des Massenstroms des Reaktionsgases (Luft usw.) bei konstanter Sauerstoffkonzentration,
- oder durch die Veränderung der Sauerstoffkonzentration in dem Reaktionsgas (durch Sauerstoff- oder Inertgaszufuhr, Abgasrückführung o. dgl.) vorgenommen werden.

Führt man den Prozeß nach der Entgasung jedoch unter Sauerstoffabschluss, d. h. ohne Sauerstoffzufuhr von außen nur durch Wärmezufuhr weiter fort, so finden chemische Spaltvorgänge und Abbaureaktionen statt, wobei sowohl gasförmige als auch kondensierbare Stoffe entstehen und ein kokartiger Rückstand verbleibt. Für diesen Vorgang wird häufig die Bezeichnung Pyrolyse verwendet.

Sowohl die Ausbeuten der einzelnen Massenströme als auch deren stoffliche Zusammensetzung sind von den Temperaturverhältnissen, den Aufheizgeschwindigkeiten und den Verweilzeiten abhängig. Mit steigenden Temperaturen und längeren Verweilzeiten nehmen der Anteil an „Koks“ bis zu einem bestimmten Wert ab und die Ausbeuten an flüchtigen Bestandteilen zu. Während bei niedrigen Aufheizgeschwindigkeiten und langen Verweilzeiten bei hohen Temperaturen mit einer Zunahme an niedrigmolekularen Spaltprodukten zu rechnen ist, fallen bei hohen Aufheizgeschwindigkeiten und kurzen Verweilzeiten vermehrt höhermolekulare, kohlenstoffreiche Verbindungen an.

● Bei vielen Rückständen ist die weitere stoffliche Nutzung der erhaltenen (polytischen) Produkte schwierig. Häufig bleibt nur die Möglichkeit, sowohl die flüchtigen Bestandteile als auch den koksartigen Rückstand einer entsprechenden Verbrennung (s. o.) zuzuführen.

● Im Fall einer beabsichtigten Wertstoffrückgewinnung ist häufig noch mit nennenswerten Anteilen mechanisch nicht einfach trennbarer Gemische aus Wertstoffen und koksartigem Rest zu rechnen. Für diesen Teil ist dann noch eine Vergasungsstufe (s. o.) oder Verbrennungsstufe (s. o.) nachzuschalten. Bei letzterer ist aber besonders darauf zu achten, daß dann teilweise die Vermeidung der Schmelztemperaturüberschreitung von Metallen schwierig ist und diese je nach Verweilzeit bei überstöchiometrischen Bedingungen mehr oder weniger oxidieren.

### Temperatur

Wie erwähnt, sind bestimmte Einstellungen der Stöchiometrie über die Reaktionsenthalpien mit einem entsprechenden Temperaturniveau gekoppelt. Es ist jedoch erforderlich, daß die Temperaturverhältnisse in bestimmten Grenzen insbesondere im Hinblick auf die Eigenschaften der anorganischen Rückstände bzw. die Rückgewinnung von Wertstoffen steuerbar sind (z. B. Vermeidung der Überschreitung von Schmelz- und Verdampfungspunkten bei Metallen, um einen zusätzlichen Aufwand bei der Abgasreinigung zu vermeiden usw.).

Abgesehen von einer ● Wärmeein- bzw. -auskoppelung, bestehen zur *Temperatursteuerung* im

wesentlichen die folgenden Möglichkeiten:

- Vorwärmung des Reaktionsgases (Luft usw.),
- Vorwärmung des Einsatzstoffes,
- Einstellung der Stöchiometrie,
- Zufuhr von Inertgasen (z. B. Abgasrückführung),
- Wassereindüsung,
- Zufuhr von Bettmaterial.

Eine Luftvorwärmung z. B. bei Verbrennungsprozessen zur Steuerung des Temperaturniveaus ist aufgrund des häufig geringen Mindestluftbedarfes weniger geeignet.

Die Vorwärmung des Einsatzstoffes ist insbesondere bei Gegenstromverfahren möglich.

Die Einstellung der Temperatur durch stark überstöchiometrische Verhältnisse ist wegen der damit verbundenen hohen Abgasmassenströme und Abgasverluste häufig nicht sinnvoll.

Die Zufuhr inerte Gase beeinflusst über die Enthalpie die Bilanztemperatur des Reaktionsraumes. Inertgase können z. B. rückgeführte Abgase, von außen zugeführter Stickstoff usw. sein. Enthält das rückgeführte Abgas nennenswerte Anteile an Sauerstoff, so ist zusätzlich auch auf die Stöchiometrie zu achten.

Bei einer Wassereindüsung sind prinzipiell zwei Wirkungsweisen auf das sich einstellende Temperaturniveau zu unterscheiden. Zunächst hat eine Wassereindüsung über Verdampfung und Dampferwärmung Einfluß auf die Bilanztemperatur des Reaktionsraumes. Darüber hinaus stellt der entstehende Wasserdampf auch ein Vergasungsmittel dar, das über endotherme Reaktionen die Temperatur herabsetzt.

Die Steuerung des Temperaturniveaus durch die Enthalpie von zugeführtem Bettmaterial (Vorwärmung oder Kühlung) ist ebenfalls möglich.

### Verweilzeit

Die für bestimmte Reaktionsabläufe erforderlichen mittleren Verweilzeiten sowohl der jeweiligen Gase als auch der festen Einsatzstoffe legen in der Regel die Größe des Apparates bei der Konstruktion fest. Die unabhängige Verweilzeitbeeinflussung z. B. der Feststoffe in einzelnen Reaktionszonen im Betrieb einer Anlage längs des Reaktionsweges ist hauptsächlich von konstruktiven Elementen abhängig (z. B. Austragswalze am Ende einer Rostfeuerung usw.). Mit der Steuerung der Verweil-

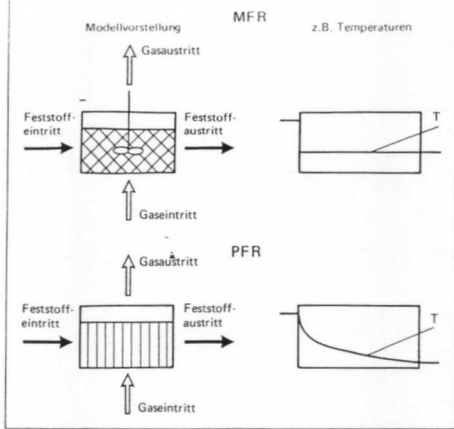
zeiten ist eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung der Prozeßbedingungen gegeben.

### Verweilzeitverhalten

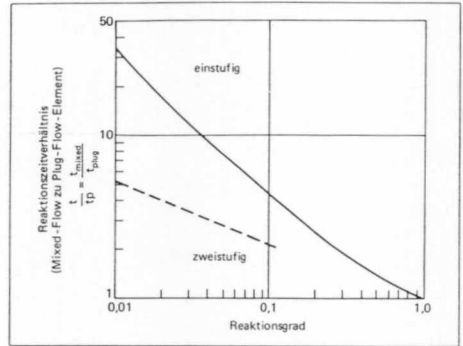
Wie bereits im Zusammenhang mit der Verbrennungsführung bei gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Stoffen gezeigt, z. B. [2; 7], können aus der Behandlung von Grenzfällen des Verweilzeitverhaltens Schlußfolgerungen hinsichtlich der Anlagenbauweise und Anlagenschaltung gezogen werden. Für eine grundsätzliche Behandlung genügt es in einem ersten Schritt, die Grenzfälle Mixed-Flow- (Rührkessel) und Plug-Flow-Reaktor (Kolbenströmer), wie schematisch in **Bild 1** dargestellt, zu betrachten. Bei einem Mixed-Flow-Reaktor geht man von einer einheitlichen, vollständig durchmischten Gas- und Feststoffphase aus. Im Gegensatz dazu findet bei einem Plug-Flow-Reaktor keine Durchmischung der Komponenten statt, es wird jedoch häufig vereinfachend vorausgesetzt, daß sich die Gaskonzentration über der Betthöhe nur wenig ändert.

So kann z. B. der Umsatz in Wirbelschichtreaktoren annähernd durch die Mixed-Flow-Charakteristik beschrieben werden. Rostsysteme entsprechen eher einer Plug-Flow-Charakteristik, wobei die Annahme einer einheitlichen Gaszusammensetzung über der Bethöhe eine grobe Vereinfachung bedeutet.

In **Bild 2** ist abhängig von dem Umsatzgrad beispielhaft die in einem Mixed-Flow-Reaktor erforderliche Verweilzeit, bezogen auf die in einem Plug-Flow-Reaktor notwendige dargestellt [8]. Es zeigt sich dabei, daß die für einen beabsichtigten Reaktionsgrad notwendigen Verweilzeiten bei einem Plug-Flow-Reaktor kürzer sind als bei einem Mixed-Flow-Reaktor. Die relative Verkürzung der Reaktionszeiten durch Übergang von einem auf zwei hintereinandergeschaltete Mixed-Flow-Elemente ist ebenfalls in **Bild 2** dargestellt. Bei Hintereinanderschaltung sehr vieler (gedanklich unendlich vieler) Mixed-Flow-Elemente kann man sich der Verweilzeitcharakteristik eines Plug-Flow-Reaktors entsprechend annähern. Es ist zu beachten, daß sehr häufig zur Einleitung von Reaktionen Mixed-Flow-Elemente erforderlich sind, ehe man auf eine Plug-Flow-Charakteristik übergehen kann (Reihenschaltung verschiedener Elemente).



**Bild 1:** Zum Verhalten eines Mixed-Flow- und Plug-Flow-Reaktors.



**Bild 2:** Vergleich der Reaktionszeiten von Mixed-Flow- und Plug-Flow-Reaktorcharakteristiken [8].

### Bettbeeinflussung

Zur Beeinflussung des Bettes kann gegebenenfalls eine Rückführung inerte Feststoffe vom Bettende her oder, falls sich dies nicht als sinnvoll herausstellt, die Zufuhr von inertem Feststoff von außen (z. B. grobkörniger Sand) vorgesehen werden. Damit sind sowohl die fluiddynamischen Eigenschaften des Bettes als auch die Temperaturen und gegebenenfalls die Bethöhe steuerbar.

Desweiteren kann daran gedacht werden, Reaktionen im Bett z. B. zur Schadstoffeinkbindung durch Zufuhr und Einmischung von Additiven zu ermöglichen bzw. zu verbessern.

### Grundlegende Apparatebauformen

Grundlegende Apparatebauformen, für eine thermische Behandlung stückiger Rückstände als Primärstufe, d. h. Vorverbrennungs-, Pyrolyse-, Separationsstufe usw. in Frage kommen, sind z. B.:

- Drehrohre,
- Rostsysteme,
- Etagenöfen,
- Tunnelöfen,
- Schachtreaktoren,
- Wirbelschichtreaktoren.

Die in der Primärstufe entstehenden Gase und – soweit nicht vermeidbar – auch die Flugstäube müssen einer getrennten Nachverbrennungsstufe zugeführt werden, d. h. den o. g. Aggregaten sind jeweils geeignete Apparatebauformen für gasförmige Einsatzstoffe z. B.

- Brennkammersysteme nachzuschalten. Die Vorteile einer sol-

chen mehrstufigen Prozeßführung sind bereits eingangs beschrieben.

Für die Apparateauswahl sind neben dem Einsatzstoff weiter die Möglichkeiten der Steuerung der

- Temperatur,
- Verweilzeit,
- Verweilzeitverhältnisse,
- Vermischung des Gutbettes selbst,
- Vermischung des Gutbettes mit Reaktionsgasen (Luft usw.),
- Konzentrationsverhältnisse (z. B. Sauerstoffpartialdruck) über dem Reaktionsweg,
- Gutbettbeeinflussung durch Zusatzstoffe (Additive und Inertstoffe) maßgeblich, siehe **Tabelle 2**.

### Drehrohre

**1A** Die Drehrohrverfahren werden insbesondere im Bereich der Verbrennung industrieller Sonderabfälle verwendet, d. h. für Gemische aus flüssigen, pastösen, rieselfähigen und stückigen Stoffen. Aufgrund dieser stofflichen Zusammensetzung werden hohe Anforderungen an die thermische und insbesondere mechanische Belastbarkeit des Reaktors gestellt.

Desweiteren werden Drehrohre nicht nur zur Verbrennung, sondern auch als getrennte Entgasungs- und Pyrolysestufen eingesetzt. Die Wärmezufuhr kann hierbei entweder direkt durch einen Gasstrom oder indirekt erfolgen.

**1B** Bei Verbrennungsprozessen werden in der Regel Temperaturen von ca. 1200 °C oberhalb der jeweiligen Ascheschmelzpunkte eingestellt. Die

Einstellung von höheren oder niedrigeren Temperaturen ist möglich.

**1C** Die Verweilzeiten in Drehrohren liegen im Minuten- bis Stundenbereich. Sie sind durch Durchmesser und Länge des Drehrohres bei der Projektierung und durch Füllungsgrad und Drehzahl im Betrieb insgesamt beeinflussbar, jedoch nicht über der Länge variabel. Erfolgt die Beheizung z. B. bei Pyrolysestufen indirekt, so sind aufgrund der damit verbundenen vergleichsweise geringen Aufheizgeschwindigkeiten entsprechend hohe Verweilzeiten erforderlich. Das Verweilzeitverhalten von Drehrohröfen kann insgesamt durch eine PFR-Charakteristik angenähert werden. Die einzelnen Abschnitte längs des Drehrohres entsprechen über dem Querschnitt wegen der Gutumwälzung mehr einer MFR-Charakteristik.

**1D/1E** Durch die Rotationsbewegungen des Rohres läßt sich eine gute Durchmischung des Einsatzstoffes erreichen. Dabei findet jedoch nur eine bedingte Vermischung des Gutbettes mit den Reaktionsgasen statt. Die Mischungsverhältnisse sind ebenso wie die Verweilzeit von Durchmesser und Länge sowie Füllungsgrad und Drehzahl abhängig.

**1F** Eine getrennte Steuerung der Konzentrationsverhältnisse insbesondere des Sauerstoffpartialdruckes über dem Reaktionsweg ist in der Regel nicht möglich.

**1G** Das Gutbett selbst kann durch entsprechende Zusatzstoffe beeinflusst werden (z. B. Zugabe von Flußmitteln zur Schlackeerzeugung).

Tabelle 2: Einflußgrößen bei verschiedenen Apparatetypen zur thermischen Behandlung.

Apparatetyp	Primärstufe								Nachverbrennung*)
	A	B	C	D	E	F	G	H	
	Einsatzstoff	Temperatur °C	Verweilzeit	Vermischung des Bettes selbst	Vermischung des Bettes mit Reaktionsgas	Bedingungen über den Reaktionsweg steuerbar	Bett- beeinflussung durch Zusatzstoffe	Temperatur °C	
1. Drehrohr	stückig, rieselfähig, pastös, flüssig	bis 1200	ca. 1 h	gut	bedingt	nicht möglich	möglich	1200	
2. Rost	stückig, rieselfähig, pastös	ca. 850	ca. 2 h	gut	sehr gut	sehr gut	möglich	1200	
3. Etagenofen	rieselfähig, pastös	ca. 950	ca. 1/2 h	gut	bedingt bis gut	möglich	möglich	1200	
4. Tunnelofen	stückig	bis 1400	mehrere Stunden bis Tage	—	gut	sehr gut möglich	—	1200	
5. Schacht	Schüttgut	bis 1600	Stunden bis Tagebereich	bedingt	sehr gut	bedingt möglich	möglich	1200	
6. Wirbelschicht	Stoff mit engem Kornband	ca. 850	im Minutenbereich	sehr gut	sehr gut	nicht möglich	möglich	1200	
7. Brennkammer	flüssig, gasförmig, staubförmig	bis 1500	im Sekundenbereich	sehr gut	sehr gut	sehr gut möglich	—	1200	

\*) höhere Temperaturen sind möglich

### Rostsysteme

**2A** Rostsysteme sind für die Behandlung von stückigen und rieselfähigen Einsatzstoffen sowie durch „Aufstreuen“ auf das Bett auch für pastöse Stoffe sehr gut geeignet. Die Rosttechnik wird häufig im Bereich der Verbrennung von stückigen Rückständen eingesetzt. Sie ist aber auch zunehmend für eine Anwendung zur Wertstoffrückgewinnung (z. B. Teilerückgewinnung, Shredderbehandlung) für kontinuierliche Verfahren in Erwägung zu ziehen.

**3** Die Temperaturen des Bettes betragen in der Hauptreaktionszone in der Regel nicht mehr als 850 °C. Dabei liegen die Temperaturen an der Rostoberfläche in der Nähe der Reaktionsgaseintrittstemperaturen und an der Bettoberfläche teilweise höher als 850 °C (bis 1000 °C).

**2C** Die Verweilzeiten liegen im Stundenbereich. Der Einsatzstoff wird durch mechanische Elemente (Stufen) mit unterschiedlichen Bewegungsmechanismen (z. B. Wanderrost, Walzenrost, Vorschubrost, Rückschubrost) transportiert. Die Verweilzeiten sind je nach Bauweise in einzelne Zonen getrennt und damit längs des Reaktionsweges steuerbar. Jede einzelne Roststufe läßt sich dabei entweder durch ein PFR-Element (z. B. Wanderrost) oder ein MFR-Element (z. B. Rückschubrost) an-

nähern. Aus der Hintereinanderschaltung der einzelnen Stufen ergibt sich die Gesamtcharakteristik (bei entsprechend vielen Stufen insgesamt somit PFR).

**2D** Durch die entsprechende Gestaltung der mechanischen Rostelemente läßt sich eine gute Durchmischung des Einsatzstoffes erreichen.

**2E** Aufgrund der Durchströmung des Bettes durch das Reaktionsgas (z. B. Primärluft) stellen sich sehr gute Vermischungs- und damit Reaktionsbedingungen zwischen Einsatzstoff und Gasphase ein.

**2F** Zur Steuerung der Reaktionsbedingungen über dem Reaktionsweg bestehen bei Rostfeuerungen ausreichend Möglichkeiten. Durch die getrennte Zufuhr von Reaktionsgas (z. B. Primärluft) in die einzelnen Zonen lassen sich insbesondere Sauerstoffkonzentrationsverhältnisse (O<sub>2</sub>-Partialdruck) sowie die Betttemperatur über dem Reaktionsweg variabel je nach Anforderung beeinflussen.

**2G** Zunächst ist üblicherweise eine Bettbeeinflussung durch Additive möglich (z. B. Zuschläge für beabsichtigte Schadstoffbindungen usw.). Desweiteren sollte insbesondere im Hinblick auf die Wertstoffrückführung auch bei Rostfeuerungen daran gedacht werden, das Bett durch Rückführung

von Inertmaterial vom Bettende her oder durch Zufuhr von Inertmaterial von außen (z. B. grobkörniger Sand) zu verändern, damit über dem Reaktionsweg ständig eine sog. Auffangmatrix vorhanden ist.

### Etagenöfen

**3A** Im Bereich der thermischen Rückstandsbehandlung werden Etagenöfen z. B. für Verbrennungsprozesse pastöser und rieselfähiger Stoffe (z. B. Klärschlamm, Fangstoffe aus der Papierindustrie, usw.) eingesetzt. Der Einsatzstoff wird über Krälarme von oben nach unten nacheinander meist im Gegenstrom zu dem Gas den einzelnen Etagen zugeführt.

**3B** Die Temperaturen in den Hauptreaktionszonen betragen ca. 950 °C.

**3C/3D** Die Verweilzeiten liegen im Minuten- bis Stundenbereich. Aufgrund der Durchmischung des Einsatzstoffes in den einzelnen Etagen können diese mehr oder weniger als MFR-Elemente angesehen werden, durch ihre Hintereinanderschaltung ergibt sich insgesamt für den Etagenofen mehr eine PFR-Charakteristik.

**3E** Der Kontakt zwischen dem Einsatzstoff und der Gasphase ist durch das Herabrieseln von einer Etage zur anderen gegeben.

**3F** Durch Zufuhr bzw. Abfuhr von Reaktionsgas in den einzelnen Etagen kann eine Steuerung der Temperatur- und Konzentrationsverhältnisse über dem Reaktionsweg erreicht werden.

**3G** Eine Beeinflussung des Gutbettes durch Additive und Inertstoffe ist möglich. Durch eine Gegenstromführung des Gases zum Feststoff ist eine Vorwärmung des Bettes vor Reaktionsbeginn und Ausnutzung des Bettes am Prozeßende zur Reaktionsgasvorwärmung (z. B. Luftvorwärmung) durchführbar (energetische Nutzung der Bettenthalpie).

#### Tunnelöfen

**4A** Der Begriff Tunnelofen soll hier allgemein für feuerfest ausgekleidete Durchlauföfen stehen. Solche Öfen

werden in vielen Bereichen der keramischen Industrie, Ziegelindustrie usw. zum Brezmen (Stoffbehandlung) entsprechenden Gutes benutzt. Die Anwendung insbesondere im Bereich der Wertstoffrückgewinnung (Stoffbehandlung) ist künftig in zunehmendem Maße in Betracht zu ziehen, da sie zahlreiche Eingriffsmöglichkeiten zur Prozeßsteuerung insbesondere im Hinblick auf die Reaktionsgasführung (Zufuhr und Absaugung von Gas) zulassen. Das Einsatzgut ist sorgfältig auf Wagen als sogenannter Besatz zu stapeln, da bei diesen Öfen der Gesichtspunkt der Bettdurchmischung nicht gegeben ist.

**4B** Es können Temperaturen bis zu 1400 °C erreicht werden.

**4C** Die Verweilzeiten liegen im Bereich von mehreren Stunden bis Tagen. Tunnelöfen sind durch eine PFR-Charakteristik beschreibbar.

**4D** Eine Durchmischung des Einsatzstoffes findet nicht statt.

**4E** Abhängig von der Besatzart ist jedoch ein guter Kontakt des zu behandelnden Stoffes mit dem Reaktionsgas infolge Durchströmung gegeben.

**4F** Gerade bei Tunnelöfen lassen sich Temperatur- und Konzentrationsverhältnisse über dem Reaktionsweg insofern sehr gut steuern, als nicht nur Reaktionsgase zu-, sondern auch abgeführt werden können. Damit können einzelne Zonen relativ gut voneinander getrennt werden.

**4G** Ein Bett im Sinne der vorgenannten Apparatetypen ist nicht vorhanden. Der Besatz wird durch sogenannten Gegenstrombetrieb in der Kühlzone des Ofens (Austritt) in der Regel zur Luftvor-

wärmung benutzt, während die Abgase den Besatz nach Eintritt in den Ofen vorwärmen. Damit ist auch eine sehr gute energetische Prozeßführung möglich.

#### Schachtreaktoren

**5A** Schachtreaktoren sind häufig vorkommende Aggregate bei Prozessen zur thermischen Behandlung von Schüttgütern (Erzreduktion, Kalkentsäuerung usw.). Sie kommen aber auch in Zusammenhang mit der Wertstoffrückgewinnung in Frage, wie dies beispielsweise bei der Metall-Schrottverwertung schon lange der Fall ist. Das Gas kann sowohl im Gegenstrom als auch im Gleichstrom zum Feststoff geführt werden, der seinerseits aufgrund der Schwerkraft von oben nach unten transportiert wird. Ein enges Kornklassenspektrum der Einsatzstoffe wirkt sich günstig auf das fluiddynamische Verhalten aus.

**5B** Es können abhängig von der Ausmauerung Temperaturen bis zu 1600 °C erreicht werden.

**5C** Die Verweilzeiten liegen im Stunden- bis Tagebereich und sind aufgrund der kontinuierlichen Schüttgutbewegungen längs des Reaktionsweges nicht beeinflussbar. Das Verweilzeitverhalten entspricht annähernd einer PFR-Charakteristik.

**5D/5E** Eine Vermischung des Einsatzstoffes findet beim Guttransport durch Schwerkraft nur bedingt statt. Der Kontakt des Feststoffes mit der Gasphase ist abhängig von den Durchströmungsbedingungen der Schüttung gegeben.

**5F** Eine getrennte Steuerung der Temperatur- und Konzentrationsverhältnisse ist aufgrund ihrer Koppelung durch die kontinuierlich nachrutschende Schüttung in der Regel schwierig. Zwar sind sowohl eine Zu- als auch eine Abfuhr von Reaktionsgas über dem Reaktionsweg möglich, jedoch sind dann zum Abbau von Konzentrations- und Temperaturgradienten über dem Querschnitt zusätzliche Einbauten erforderlich.

**5G** Die Schüttung selbst wird je nach angestrebtem Ziel aus Einsatzstoffen und Zusatzstoffen zusammengesetzt.

#### Wirbelschicht

**6A** Bei einer Wirbelschicht wird das körnige Einsatzmaterial in der Regel zusammen mit einem ebenfalls körnigen Inertmaterial (z. B. Sand) in einem

Reaktor von unten über einen Düsenboden von dem Reaktionsgas angeströmt und in einen schwebelähnlichen Zustand versetzt. Bei Wirbelschichtreaktoren werden hohe Anforderungen an die Korngröße und Korngrößenzusammensetzung gestellt. Sie eignen sich daher gut für den Einsatz von schüttgutähnlichen Stoffen sowie von stückigen Stoffen, die zuvor zu einem engen Kornband geshreddet werden.

**6B** In Wirbelschichten zur thermischen Behandlung liegen die Prozeßtemperaturen bei ca. 800 bis 900 °C.

**6C** Die Verweilzeiten in Wirbelschichtreaktoren stellen sich u. a. in Abhängigkeit von der sich infolge von Reaktionen verändernden Teilchengröße ein (z. B. Verweilzeit im Minutenbereich). Wirbelschichtreaktoren haben in der Regel eine Reaktorcharakteristik, die näher an einem MFR-Verhalten liegt, so daß sich relativ homogene Temperatur- und Konzentrationsfelder einstellen.

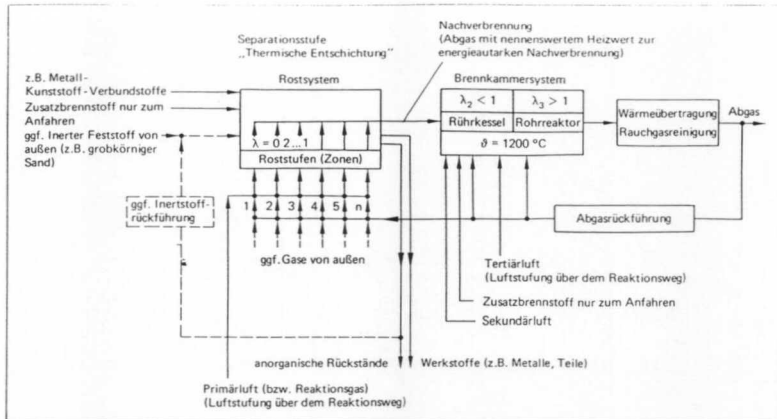
**6D/6E** Die Zuordnung zu einer MFR-Charakteristik ist auf die erreichbaren guten Durchmischungseigenschaften sowohl hinsichtlich der Partikelphase (Vermischung des Einsatzstoffes) als auch der Reaktionspartner untereinander zurückzuführen. Hohe Strömungs- und Relativgeschwindigkeiten wirken sich auf den Stoff- und Wärmeübergang sehr günstig aus, wodurch sich u. a. sehr hohe Aufheizgeschwindigkeiten erreichen lassen.

**6F** Innerhalb eines Wirbelschichtreaktors kann man durch über die Höhe angeordnete Zuführungen bzw. Abführungen für Reaktionsgas (Luft, Inertgas) nur bedingt eine Beeinflussung der Reaktionsverhältnisse wegen der MFR-Charakteristik erreichen. Eine getrennte Steuerung über dem Reaktionsverlauf wird nur durch eine Hintereinanderschaltung mehrerer Wirbelschichtreaktoren (z. B. über der Höhe) möglich.

**6G** Die Steuerung des Wirbelbettes durch einen bestimmten Anteil an Inertstoffen (Grundmatrix) ist für die Apparatfunktion eine wichtige Voraussetzung.

#### Brennkammer

**7A** Aus dem Bereich der Entsorgung von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Rückständen ist bekannt, daß durch eine geeignete Prozeßführung eine erhebliche Emissionsminderung er-



**Bild 3: Schaltbild einer mehrstufigen thermischen Behandlung zur Wertstoffrückgewinnung mit Rostsystemen (Beispiel).**

reicht werden kann. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen sind im Zusammenhang mit den hier in Rede stehenden Möglichkeiten der Prozeßführung bei der thermischen Behandlung von stückigen Rückständen auf die Nachverbrennungsstufen zu übertragen.

**7B** Im Hinblick auf den Ausbrand der Gase und nicht vermeidbarer Flugstäube sind viele Möglichkeiten der Steuerung der Temperaturen in einem weiten Bereich von sehr niedrigen bis höchsten Temperaturen (auch oberhalb 1500 °C) gegeben.

**7C** Die Verweilzeit in Brennkammern liegt im Sekundenbereich. Durch die Strömungsführung lassen sich sowohl MFR als auch PFR-Elemente einrichten.

**7D/7E** Durch eine entsprechende Strömungsführung kann eine sehr gute Durchmischung des Einsatzstoffes selbst wie des Einsatzstoffes mit der Gasphase erreicht werden.

**7F** Die Reaktionsbedingungen in Brennkammern können durch eine oder mehrere Stufen von Reaktionsgas (z. B. Luft, Einsatzstoff, Brennstoff usw.) über dem Reaktionsweg gesteuert werden.

**7G** Bei Brennkammern existiert kein Bett. Es ist jedoch daran zu denken, daß mit Hilfe der strömungstechnischen Durchmischungsmechanismen die Zufuhr von staubförmigen Additiven für beabsichtigte Reaktionen (z. B. Heißentschwefelung durch Kalkzufuhr) durchgeführt werden kann.

#### Möglichkeiten der Wertstoffrückgewinnung mit Rostsystemen

Im Anschluß an die Darstellung von grundsätzlichen Gesichtspunkten bei

der thermischen Behandlung von stückigen Rückständen sollen im folgenden beispielhaft kurz Möglichkeiten der Prozeßführung bei der Wertstoffrückgewinnung (Bereich II) erläutert werden. Das **Bild 3** zeigt dafür ein verfahrenstechnisches Fließbild. Der Prozeß läßt sich grob aufteilen in die Prozeßstufen

- Separationsstufe (Thermische Entschichtung auf dem Rost) für anorganische Substanzen, wobei Metalle und übrige anorganische Bestandteile am Rostende getrennt vorliegen sollen und vollständig davon getrennt, in Reihe geschaltet,
- Nachverbrennungsprozeß für die in der Separationsstufe entstehenden Gase und — soweit nicht vermeidbar — Flugstäube.

#### Separationsstufe (Rost)

*Haupteinflußgröße Sauerstoffpartialdruck:* Wie in **Bild 3** dargestellt, ist der Reaktionsweg in der Separationsstufe in  $n$  (z. B. fünf) voneinander getrennte Zonen aufgeteilt. Durch die in den einzelnen Zonen jeweils einstellbaren Primärluftströme kann das Sauerstoffangebot über dem Reaktionsweg gezielt von außen aufgeprägt werden. Die örtliche Sauerstoffzahl ( $\lambda_{O_2}^{(2)}$ ) variiert je nach Erfordernis von stark unterstöchiometrisch (z. B.  $\lambda_{O_2} = 0,2$ ) bis (falls erforderlich) nahstöchiometrisch ( $\lambda_{O_2} \approx 1$ ). Auf jeden Fall müssen zur Vermeidung von Metalloxidationen reduzierende Bedingungen im Bett eingehalten werden. Durch die Sauerstoffpartialdruckstufung über den Reaktionsweg wird zunächst der fixe Kohlenstoff in sauerstoffarmer Atmosphäre zu Kohlenmonoxid umgesetzt, so daß hier

nicht wie bei Pyrolysevorgängen Koks-rückstände verbleiben müssen. Wird der Prozeß mit angereicherter Sauerstoffkonzentration im Reaktionsgas durchgeführt, so sinkt bei gleichem absolutem Sauerstoffangebot der Primärgasmassenstrom. Damit ergeben sich niedrige Strömungsgeschwindigkeiten im Gutbett und der Abgasmassenstrom wird kleiner. Gleichzeitig verringert sich damit auch der Flugstaubmassenstrom. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, daß bereits bei der Konstruktion beachtet werden muß, daß der Druckverlust der Rostelemente viel größer sein sollte als der Druckverlust des Reaktionsbettes, um sog. Durchbläser zu vermeiden.

*Haupteinflußgröße Temperatur:* In **Bild 3** ist weiter dargestellt, daß zur Temperatursteuerung in der Separationsstufe jeder einzelnen Zone gereinigte Abgase zugemischt werden können (Abgasrückführung).

Darüber hinaus können zur Temperatursteuerung bei Anwendung geeigneter Gas-Separationstechnologien auch andere Inertgasströme (z. B. Stickstoff) von außen zugeführt werden.

Über getrennte Stoffströme zur Sauerstoff- und Inertgaszufuhr ist somit teilweise eine unabhängige Variation der Haupteinflußgrößen Sauerstoffpartialdruck und Temperatur möglich. So läßt sich beispielsweise die Reaktionsführung so gestalten, daß insbesondere am Rostanfang keine Verklebungen bzw. Verkrustungen durch evtl. niedrig schmelzende Kunststoffe im Bett auf-

<sup>2)</sup> Wegen der Möglichkeit, die Sauerstoffkonzentration anreichern oder absenken zu können, ist die sonst übliche Luftzahl  $\lambda$  hier nicht zu verwenden.

treten und in die Rostkonstruktion gelangen.

In diesem Zusammenhang ist es ein weiteres wichtiges Ziel, die Temperatur über dem Reaktionsweg so niedrig zu halten, daß möglichst wenig Schwermetalle entsprechend ihren Dampfdrücken in das Abgas gelangen. Weiter müssen Schmelzphasen der Metalle vermieden werden. Es sei noch erwähnt, daß es sinnvoll erscheinen kann, das Gutbett mit rückgeführten Abgasen insbesondere in der ersten Rostzone vorzuwärmen.

**Haupteinflußgröße Verweilzeit:** Die einzelnen Roststufen, die hintereinandergeschaltet den Reaktionsweg ergeben, sind in ihrer Bewegung und somit hinsichtlich des Transportes des Gutes getrennt ansteuerbar. Damit wird die Verweilzeit in den einzelnen Stufen unabhängig von anderen Einflußgrößen veränderbar.

**Haupteinflußgröße Reaktionsbetteigenschaften:** Zur Beeinflussung der Eigenschaften des Bettes kann man daran denken, wie bereits oben erwähnt, eine Rückführung inerte Feststoffe vom Bettende her oder, falls sich dies nicht als sinnvoll herausstellt, die Zufuhr von inertem Feststoff von außen (z. B. grobkörniger Sand), durchzuführen. Mit einer solchen Inertstoffanreicherung sind dann folgende Gesichtspunkte verbunden:

- Die fluiddynamischen Eigenschaften des Reaktionsbettes werden verbessert.
  - Falls durch die Temperaturregulation allein, bei sehr niedrig schmelzenden Inertstoffen, ein Anschmelzen nicht verhindert werden kann, wird durch zusätzliche Inertstoffe eine entsprechende Auffangmatrix gebildet.
  - Im Verlauf des gesamten Reaktionsweges und insbesondere am Rostende ist eine ausreichende Betthöhe gegeben.
- Nachverbrennungsstufe:** Entsprechend Bild 3 werden die Gase aus der ersten Stufe, die noch einen nennenswerten Anteil heizwertreicher Komponenten ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , usw.) aufweisen können, einer Hochtemperaturverbrennung zugeführt. Dabei ist nach Möglichkeit die Zufuhr von zusätzlichem Brennstoff (Sekundärenergieeinsatz) zu vermeiden (energieautarke Prozeßführung).

Auf die Gestaltung und Schaltung der Nachverbrennungsstufe (Temperatur, Verweilzeit, Vermischung,  $\text{O}_2$ -Partialdruck über dem Verbrennungsweg, MFR-, PFR-Charakteristik usw.) sei hier

nicht näher eingegangen, sondern dazu auf das Schrifttum [1 bis 3; 9] verwiesen (Zur Aufzählung der verschiedenen Teilaufgaben in der Nachverbrennung siehe Tabelle 1).

### Möglichkeiten der Restmüllentsorgung mit Rostsystemen Algemeines

Bei der Prozeßführung in Rostsystemen zur Entsorgung von Restmüll, wie schematisch in Bild 4 dargestellt, ist der Gesamtprozeß ebenfalls wieder in Teilstufen aufgeteilt. In einer

- Vorverbrennungsstufe (Rost) müssen die Prozeßbedingungen im Hinblick auf die Eigenschaften der anorganischen Rückstände (Ausbrand, Eluatverhalten usw.) optimiert werden. Die Steuerung der Konzentrations-, Temperatur- und Verweilzeitbedingungen über dem Verbrennungsweg erfolgt in gleicher Weise wie am Beispiel der Wertstoffrückgewinnung erläutert. Es kann hier auf eine Beeinflussung des Gutbettes verzichtet werden. Darüber hinaus können für den Rost insgesamt auch überstöchiometrische Verhältnisse (Vorverbrennung) eingestellt werden.

Unabhängig davon erfolgt dann in einer in Reihe geschalteten

- Nachverbrennungsstufe die Optimierung hinsichtlich der Reduzierung von Emissionen im Abgas ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , usw.). Auch hier wird ebenso wie im vorangegangenen Abschnitt auf das Schrifttum verwiesen [1 bis 3; 9; 10].

### Ausgewählte Betriebsversuche an einer Müllverbrennungsanlage

#### Ziel

Im Zusammenhang mit der Umsetzung der vorstehend genannten Möglichkeiten zur Beeinflussung der Prozeßbedingungen in Rostfeuerungen wird auf einige Betriebsversuche in einem Müllheizkraftwerk eingegangen.

Dabei erfolgte in der Roststufe eine Anreicherung der Sauerstoffkonzentration und in der Nachverbrennung eine erhebliche Zufuhr von Inertgas (Stickstoff) als Vermischungshilfe für die Nachreaktionen.

Die Versuche sind im Rahmen eines vom BMFT geförderten Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit der Fa. Martin, München, und der Fa. Linde, Höllriegelskreuth, im Müllheizkraftwerk Coburg durchgeführt worden.

Sauerstoffanreicherung und Stickstoffzufuhr erscheinen als Primärmaßnahmen vor dem Hintergrund lohnend, da die Kosten für die erforderliche Luftzerlegung durch den dann möglichen verminderten Aufwand für Sekundärmaßnahmen kompensiert werden.

#### Anlagen- und Versuchsbeschreibung

Das MHKW-Coburg ist mit zwei Verbrennungslinien für Restmüll ausgestattet. Beide Linien sind mit einem Rück Schub<sup>®</sup>-Rostsystem der Fa. Martin ausgerüstet und bei einem unteren Heizwert des Restmülls von  $h_u = 7,6 \text{ MJ/kg}$  jeweils für einen Müll-Durchsatz von  $m = 11 \text{ t/h}$  ausgelegt [10].

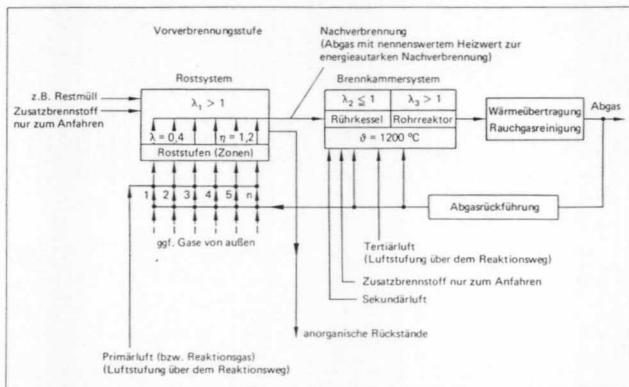
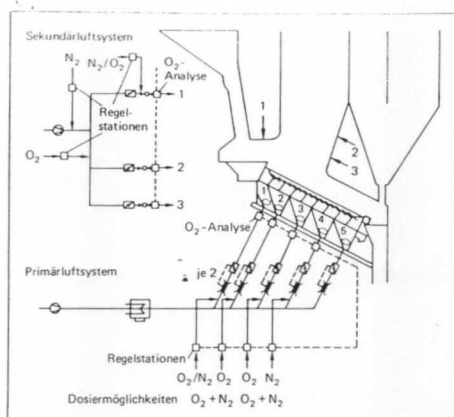


Bild 4: Schaltbild einer mehrstufigen thermischen Behandlung zur Restmüllentsorgung mit Rostsystemen (Beispiel).





**Bild 5:** Prinzipskizze des untersuchten Rostsystems (Möglichkeiten der Sauerstoff-/Stickstoff-Dosierung in der Rost- und Nachverbrennungsstufe).

Die Primärluft (das Primärreaktionsgas) wird über fünf Zonen entlang des Reaktionsweges gestuft dem Rost zugeführt. Die Sekundärluft-(gas-)zuführung in der Nachverbrennung erfolgt über drei getrennt regelbare Düsenreihen (Bild 5).

Die Nachverbrennung ist zwar geometrisch unmittelbar über dem Rost angeordnet, aber durch sorgfältige Optimierung der Injektorwirkung der Sekundärluft-(gas-)zuführung in verbrennungstechnischer Hinsicht von dem Rostsystem getrennt.

Für die Versuche der Anreicherung der Sauerstoffkonzentrationen bzw. der Zufuhr von Stickstoff wurde Flüssiggas eingesetzt, wobei ein hoher sicherheitstechnischer Aufwand jeweils für Sauerstoff und Stickstoff erforderlich war.

Getrennte Flüssiggasversorgungssysteme bestehend aus Tankanlage, Verdampfer und mehreren Regelstationen. Über die Regelung wurde die Sauerstoffkonzentration in den einzelnen Rostzonen über einen bestimmten Zeitraum konstant eingestellt. In der Nachverbrennung wurde jeweils der Gesamtmassestrom aus Sekundärluft und zugeführtem Stickstoff konstant gehalten. Während der Versuche ist über die Feuerleistungsregelung die Dampfleistung ebenfalls konstant gehalten worden.

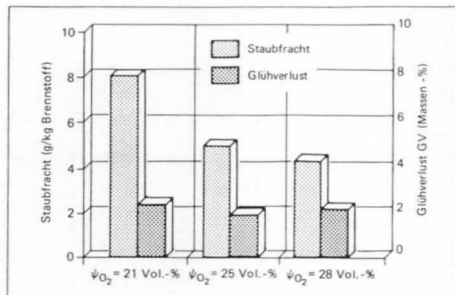
#### V Versuchsergebnisse

Sauerstoffanreicherung in den Rostzonen 2 und 3 (Hauptreaktionszonen, Bild 5): Zunächst konnte bei einer Anhebung der Sauerstoffkonzentrationen in den Hauptverbrennungszonen optisch eine Vergleichmäßigung des Ver-

breunungsablaufes mit einer Verkürzung der sichtbaren Flammenhöhe über dem Müllbett beobachtet werden. Eine Sauerstoffanreicherung in der Roststufe hat zur Folge, daß sich bei gleichbleibendem absoluten Sauerstoffangebot ein niedriger Gesamtmassestrom an Primärreaktionsgas einstellt. Das ist sowohl in bezug auf die Belastung der nachgeschalteten Anlagen der Abgasreinigung von Bedeutung, als auch im Hinblick auf niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten durch das Müllbett wichtig. Letzteres wiederum bedingt kleinere Flugstauteilchen sowie eine Reduzierung des Flugstaubmassestroms (Bild 6). Aufgrund des Sachverhaltes, daß mit der Sauerstoffanreicherung der nicht an der Verbrennung teilnehmende Inertgasanteil abnimmt, sinkt wegen der konstant eingestellten Dampferzeugung mit der Sauerstoffanreicherung auch der erforderliche Müllmassestrom. Aus diesem Grund sind in Bild 6 die Staubfrachten auf den Müllmassestrom bezogen. Es wird weiterhin deutlich, daß der Glühverlust annähernd konstant bleibt.

Eine Absenkung des Primärgasmasse- bzw. -volumenstroms in den einzelnen Rostzonen sollte jedoch nur soweit durchgeführt werden, wie die gleichmäßige Durchströmung des Bettes gewährleistet ist. In diesem Zusammenhang ist daher auch auf die Konstruktion der Rostelemente besonderes Augenmerk zu richten.

In Bild 7 ist der CO-Gehalt nach der Nachverbrennung in Abhängigkeit von der Primärsauerstoffzahl dargestellt. Es ist anzumerken, daß erstens bei diesen Versuchen in der Nach-



**Bild 6:** Staubfracht im Rohgas und Glühverlust der Asche in Abhängigkeit der Sauerstoffanreicherung in den Zonen 2 und 3 der Roststufe (Erklärung im Text).

verbrennungsstufe kein Stickstoff zugeführt wurde und zweitens die jeweils eingeleiteten Sekundärluftmassenströme über alle Versuche konstant waren. Die aus Bild 7 erkennbare Tendenz, daß mit abnehmender Primärsauerstoffzahl auch die CO-Konzentrationen sinken, kann damit erklärt werden, daß die mit kleineren Primärsauerstoffzahlen auch verbundenen geringeren absoluten Abgasmasseströme aus dem Rostbereich in der Nachverbrennungsstufe bei gleichbleibend hoher Injektorwirkung der (konstanten) Sekundärluftmassenströme besser durchmischt und bei gleichzeitig erhöhter Verweilzeit ausreichend nachverbrannt werden.

Wegen der konstanten Sekundärluftmassenströme in der Nachverbrennungsstufe bedeuten kleine Primärsauerstoffzahlen auch entsprechend niedrige Gesamtsauerstoffzahlen. Bild 6 macht damit deutlich, daß auch bei kleineren Gesamtsauerstoffzahlen (Rost und Nachverbrennung) sehr niedrige CO-Werte erreichbar sind. Voraussetzung ist allerdings auch eine optimale Auslegung der Treibstrahl-(Freistrah-)injektoröden in der Nachverbrennung.

Schließlich erkennt man aus Bild 7 den erwarteten Zusammenhang, daß mit steigender Sauerstoffanreicherung der Ausbrand steigt, bzw. die CO-Konzentrationen sinken.

#### V Versuchsergebnisse

Inertgaszufuhr in der Nachverbrennungsstufe (Stickstoff): Bei den Versuchen der Stickstoffzufuhr zur Nachverbrennungsstufe ist der insgesamt zugeführte Sekundärgasmassestrom

jeweils konstant gehalten worden, d. h. der Sekundärluftmassenstrom wurde um den Massenstrom des zugeführten Stickstoffs verringert. Mit der Stickstoffzufuhr ist somit eine erhebliche Inertgasanreicherung bei gleichbleibender Injektorstrahlwirkung (Ansaugen und Mischleistung) bei allen drei Düsenreihen in der Nachverbrennungsstufe gegeben. Bei diesen Versuchen wurde weiterhin in der Vorverbrennungsstufe (Rost) nur Primärluft, also kein zusätzlicher Sauerstoff zugeführt. Mit abnehmendem Sekundärluftmassenstrom ist die Primärluftzahl in der Vorverbrennungsstufe (Rost) erhöht worden.

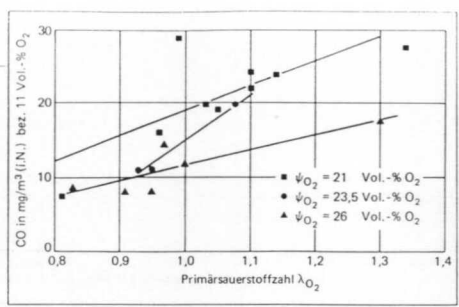
In Bild 8 sind nun die  $\text{NO}_x$ - und CO-Konzentrationen — gemessen hinter der Nachverbrennung — über dem Inertgasverhältnis aufgetragen. Letzteres ist das Verhältnis des der Nachverbrennungszone zugeführten Stickstoffmassenstromes zu dem der Nachverbrennungszone insgesamt zugeführten Gasmassenstrom (Sekundärgasmassenstrom).

Bei den angegebenen Gaskonzentrationen von  $\text{NO}_x$  und CO ist der Verdünnungseffekt durch den eingeblasenen Stickstoff korrigiert; d. h. die Konzentrationen sind auf die sich ohne Stickstoffeinblasung ergebenden verkleinerten Abgasvolumenströme bezogen.

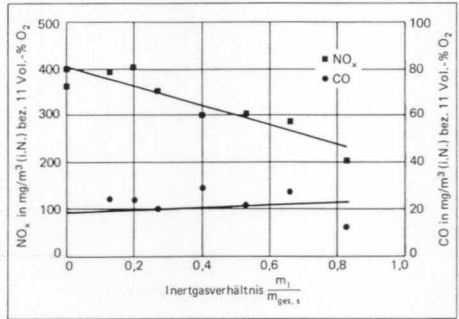
Aus Bild 8 ergibt sich, daß mit steigendem Inertgasverhältnis die Stickstoffoxidkonzentrationen um den Faktor zwei auf  $\xi_{\text{NO}_x} = 200 \text{ mg/m}^3$  (i.N.) bezogen auf 11%  $\text{O}_2$  gesenkt werden können. Entsprechend dem vorher erwähnten Sachverhalt bedeutet ein solches Inertgasverhältnis von z. B.  $\frac{m_{\text{I}}}{m_{\text{ges. s}}} = 0,8$ , daß dann praktisch der gesamte zur Verbrennung erforderliche Sauerstoff über die Vorverbrennungsstufe (Rost) zugeführt wird.

Die Durchmischung der vom Rost kommenden Abgase erfolgt mit Injektorstrahlen, die kaum Sauerstoff und nur Inertgas (Stickstoff) enthalten. Da weiter vorwiegend nur über Inertgas Mischleistung in die Nachverbrennungsstufe eingebracht wird, können hohe Temperaturspitzen vermieden werden, wie sie bei Injektorstrahlen mit nennenswerten Sauerstoffkonzentrationen zu erwarten wären. Insgesamt erhält man so eine Absenkung der  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen. Dabei ist bemerkenswert, daß bis zu einem Inertgasverhältnis von etwa 20% sich keine  $\text{NO}_x$ -Minderung ergibt.

**Bild 7: CO-Konzentration hinter der Nachverbrennungsstufe in Abhängigkeit von der Primärsauerstoffzahl  $\lambda_{\text{O}_2}$ .**



**Bild 8:  $\text{NO}_x$ - und CO-Konzentrationen hinter der Nachverbrennungsstufe in Abhängigkeit vom Inertgasverhältnis.**



Die über dem Inertgasverhältnis gleichbleibend niedrige CO-Konzentration zeigt, daß die Mischung der Sekundärgasinjektorstrahlen in der Nachverbrennungszone gut ausgelegt ist. Bei hohen Inertgasverhältnissen muß ein erhöhter, von der Verbrennungsstufe kommender Primärgasmassenstrom bei gleicher Mischleistung bewältigt werden.

Die vorstehenden Versuchsergebnisse machen deutlich, daß bei thermischen Behandlungsverfahren noch ein erhebliches Potential an wirkungsvollen Primärmaßnahmen zur Schadstoffreduzierung (vgl. Tabelle 1) besteht und dazu weitere intensive Untersuchungen erforderlich sind.

### Schrifttum

[1] *Kremer, H.; Schulz, W.*: Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch verbrennungstechnische Maßnahmen. VDI-Berichte 495, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984.  
 [2] *Scholz, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.; Klöpffer, G.*: Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von Abfällen. Chemie-Ingenieur-Technik 62 (1990) Nr. 11.

[3] *Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.*: Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 6. Teclam-Seminar „Schadstoffreduktion bei Verbrennungsprozessen“ (1990).  
 [4] *Scholz, R.; Schopf, N.*: Environmental Protective Combustion Process For Waste Fuels. Proceedings of the 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 21–24. March 1988, Lisbon, Portugal.  
 [5] *Scholz, R.; Beckmann, M.*: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen. VDI-Berichte 895, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.  
 [6] *Specht, E.; Jeschar, R.*: Ermittlung der geschwindigkeitsbestimmenden Mechanismen bei der Verbrennung von dichten Kohleteilen. VDI-Berichte 645, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987.  
 [7] *Klöpffer, G.; Scholz, R.*: Zur Berechnung der  $\text{NO}_x$ -Bildung bei der technischen Verbrennung. Veröffentlichung demnächst.  
 [8] *Levenspiel, O.*: Chemical Reaction Engineering. John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, 1972.  
 [9] *Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.; Klöpffer, G.*: Schadstoffarme Prozeßführung bei unterschiedlichen Brennstoffen am Beispiel eines Dralbbrennkammerstystems. Synopse: Chemie-Ingenieur-Technik 59 (1987) Nr. 7, vollständiges Manuskript als Mikrofiche N5 16/6/87.  
 [10] *Martin, J. E.*: Moderne Abfallentsorgung nach dem Martin-System. Sonderdruck der Firma Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik, München. M 006