

Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände

Prof. Dr.-Ing. R. Scholz, Dipl.-Ing. F. Schulenburg,
Dipl.-Ing. M. Beckmann, Clausthal

1. Einleitung

Die Ziele thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände können grob – wie auch bei anderen Behandlungsverfahren ähnlich – aufgeteilt werden:

- a) Das Mindestziel muß eine Entsorgung sein (chemische Verbindungen in umweltverträgliche umwandeln).
- b) Über das Ziel a) hinaus sollte falls möglich zusätzlich eine energetische Nutzung angestrebt werden (energetisches Verwerten).
- c) Oberstes Ziel ist eine stoffliche Nutzung (stoffliches Verwerten). Dabei muß jedoch darauf geachtet werden, daß der dazu ggf. erforderliche Energieaufwand bei dessen Bereitstellung ("Erzeugung") nicht "unverhältnismäßig" hohe Umweltbelastungen im Gegenzug verursacht.
- d) Bei allen genannten Punkten a), b) und c) ist gleichermaßen darauf zu achten, daß möglichst wenig zusätzliche Stoffe für die chemischen Umwandlungsprozesse benötigt werden, damit z.B. Reinigungsanlagen nicht unnötig groß werden, Abgasverluste kleingehalten werden können usw..

Bei den für eine Behandlung von Rückständen zur Diskussion stehenden Verfahren werden zur Lösung dieser grundsätzlichen Forderungen jeweils unterschiedliche Prozeßbedingungen, in z.T. auch mehreren getrennten Prozeßstufen vorgesehen. Entsprechend werden die einzelnen Verfahren z.B. nach ein- bzw. mehrstufigen Pyrolyse-, Vergasungs-, Verbrennungs- und Hydrierverfahren usw. unterschieden. Die Beurteilung ist oftmals dadurch erschwert, daß mit den unterschiedlichen Umwandlungsprozessen eine Reihe von verschiedenen Teilaufgaben angestrebt werden. Der Abbau organischer Substanzen läßt sich beispielsweise

gleichermaßen durch einen Verbrennungsprozeß und einen Vergasungsprozeß erreichen. Im Ergebnis beider Verfahren verbleiben anorganische Reststoffe (Asche, Schlacke, Flugstaub usw.) und Gase. Bei einem Verbrennungsverfahren entsteht ein Abgasstrom, dessen Enthalpie zur Erzeugung eines Dampfstromes genutzt werden kann. Im Unterschied dazu bildet sich bei einem Vergasungsprozeß ein Prozeßgas, das für anderer Zwecke zur Verfügung steht. Es ist in diesem Zusammenhang beim Vergleich der Verfahren z.B. nicht sinnvoll, den Vergasungsprozeß als "abgasfreies Verfahren" zu bezeichnen und dieses unter dem Titel "Verwerten" aufzuführen, während man den Verbrennungsprozeß "nur" dem Bereich "Entsorgen" zuordnet. So kann der bei der Verbrennung erzeugte Dampfstrom nicht nur zur Erzeugung elektrischer Energie sondern auch als Prozeßgas für verschiedene Herstellungsprozesse "verwertet" werden. Umgekehrt ist natürlich auch zu fragen, ob bei einem Vergasungsverfahren sich nicht doch mit dem erzeugten Prozeßgas noch ein Verbrennungsprozeß anschließt, dem ggf. auch wieder eine Abgasreinigung folgen muß.

Bei Verfahren mit Sauerstoffeinsatz sind selbstverständlich noch erforderliche Energie- und Emissionsströme des Verfahrens zur Sauerstoffherstellung mit einzubeziehen. Das Gleiche gilt beim Einsatz von elektrischer Energie, bei der der erforderliche Primärenergiestrom und die Emissionen bei dem jeweiligen Kraftwerksprozeß berücksichtigt werden müssen.

Weiter findet man häufig Formulierungen, die zur Verwechslung von Apparaten und in diesen ablaufenden Verfahren führen. Z.B. werden häufig "Drehrohrverfahren" mit "Verbrennung" gleichgesetzt, dabei ist bekannt, daß Drehrohre auch bei Pyrolyseprozessen (sowie anderen Herstellungsverfahren) eingesetzt werden. Diese wenigen Beispiele zeigen, daß bei der Beurteilung von Prozessen: unter Einbeziehung der verwendeten Maschinen und Apparate nicht nur die unmittelbar aufgewendeten Stoff- und Energieströme sowie die direkt entstandenen Schadstoffemissionen betrachtet werden müssen, sondern auch die Energie- und Stoffeinsätze, die sich sowohl beim Verfolgen bis hin zum Ursprung der Primärenergie bzw. des Rohstoffes zurück als auch nach dem eigentlichen Prozeß bei der Verfolgung des Entsorgungs- bzw. Verwertungspfad nach vorn ergeben. Es sind also die jeweils erforderlichen vorangehenden als auch nachfolgenden Teilprozesse

im Hinblick auf anfallende Schadstoffe, zusätzlichen Energie- und Rohstoffaufwand usw. in Bilanzen quantitativ mit einzubeziehen. Diese Aufgabenstellung ist bekannt unter den Begriffen der Ermittlung:

- des sog. kumulierten Energieeinsatzes,
- des sog. kumulierten Stoffeinsatzes,
- der sog. kumulierten Schadstoffemissionen

und ist so komplex, daß deren Lösung häufig schon wegen mangelnder Definitionen von Bilanzgrenzen (Abgrenzungen) nur teilweise gelingt. Es ist deshalb bereits ein Fortschritt, wenn die wichtigsten Ströme berücksichtigt werden können.

Der vorliegende Beitrag versucht nun vor dem Hintergrund umfangreichen vorhandenen Schrifttums zu dem Thema der thermischen Rückstandsbehandlung /z.B. 1 bis 17 und die dort wiederum aufgeführte Literatur/ sowie auch eigener Vorarbeiten /z.B. 18 bis 26/ mittels weniger verfahrenstechnischer "Grundbausteine" prinzipielle Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten verschiedener Behandlungsverfahren gegenüberzustellen, um damit die Voraussetzungen (Kriterien) bzw. eine gemeinsame Basis für die Beurteilung und einen Vergleich zu erhalten. Dazu wird folgende Vorgehensweise gewählt:

Ausgegangen wird von Haupteinflußgrößen bei thermischen Prozessen (Abschnitt 2). Verschiedene Kombinationen von Haupteinflußgrößen ergeben unterschiedliche "Bausteine" (z.B. bestimmtes Sauerstoff- und Temperaturniveau charakterisiert den Baustein "Vergasung").

Im nächsten Schritt wird erläutert, wie durch bestimmte Maßnahmen (Abschnitt 3) die Haupteinflußgrößen gesteuert werden können (z.B. Aufteilung in Zonen, Mischungsmechanismen zur Steuerung des Reaktorverhaltens, Abgasrückführung zur Temperatursteuerung usw.).

Einstellungen von Haupteinflußgrößen und Maßnahmen zu deren Steuerung werden in bestimmten Apparaten umgesetzt (Abschnitt 4). Die Apparate (z.B. Drehrohre, Wirbelschichtreaktoren, Rostsysteme usw.) sind dabei im Hinblick auf die Umsetzungsmöglichkeiten grob nebeneinander gestellt.

Die Zusammenschaltung mehrerer Apparate ergibt schließlich bestimmte Verfahren. In Abschnitt 5 werden einige typische Beispiele gegenübergestellt. Der Übersicht wegen sind die Bilanzgrenzen bewußt am Ende des heißen Teils gezogen, d.h. auf den "Gesamtprozeß" bezogen, vor der erforderlichen Gasbehandlungs- bzw. Abgasreinigungsanlage. Damit wird

nur die sog. Primärseite (Primärmaßnahmen) erfaßt. Da die sog. Sekundärseite (Sekundärmaßnahmen) im kalten Strang (z.B. Gas bzw. Abgasreinigung) ebenso wichtig ist, muß diese in gleicher Weise nach Haupteinflußgrößen, Maßnahmen, Apparaten und Verfahren, wie auch die der Sekundärseite folgenden Verfahren in denen die erzeugten Nutzstoffströme (Dampf, Prozeßgas usw.) abschließend Verwendung finden (Verwertungsstufen), getrennt in einer weiteren Arbeit dargestellt werden. So ist beispielsweise bei einer beabsichtigten elektrischen Stromerzeugung im Fall einer thermischen Behandlungsanlage mit Dampferzeugung selbstverständlich keine weitere Verbrennung mehr zu berücksichtigen – im Gegensatz zu einem Verfahren, bei dem ein Gas zum Antrieb von Verbrennungsmotoren erzeugt wird, denen ggf. erneut eine Gas- (Abgas-)reinigung zu folgen hat. Insgesamt hat man also die drei Stufen: Primär-, Sekundär- und Verwertungsstufe für die abströmenden Stoffe (Gase und Reststoffe (Schlacke usw.)), als Ganzes zu betrachten. Trotzdem ist die zunächst ausschließliche Betrachtung der Primärseite eine notwendige erste Basis für die Durchführung einer Verfahrensbeurteilung, wie im folgenden dargestellt wird.

2. Einflußgrößen und Bausteine

Die Stoffumwandlung, die mit einer thermischen Behandlung angestrebt wird, ist ein komplexer Vorgang, den man sich in der Regel aus einer Reihe von Teilschritten zusammengesetzt denken kann. Bei organischen stückigen Rückständen sind z.B. die Teilschritte:

- Trocknung,
- Entgasung,
- Pyrolyse,
- Vergasung und
- Restausbrand

zu berücksichtigen. Je nach Prozeßführung können Teilschritte parallel oder deutlich voneinander getrennt nacheinander ablaufen oder auch fehlen. Die jeweiligen Prozeßbedingungen werden maßgeblich durch die Haupteinflußgrößen:

- Einsatzstoffe,
- Konzentrationsniveau (insbesondere Sauerstoffkonzentration),
- Temperatur,
- Druck,

- Reaktorverhalten,
- Verweilzeit und
- Zusatzstoffe

bestimmt (Bild 1). Die Diskussion dieser Haupteinflußgrößen, auch im Hinblick auf ihre Variationsbereiche (Bild 1), ist aus den Fachbereichen der Energieverfahrenstechnik, der Brennstoff- und Verbrennungstechnik sowie dem Industrieofenbereich der Zement-, Glas-, Keramik-, Stahl-, Metallindustrie usw. bekannt und wird im Hinblick auf die thermische Behandlung von Rückständen nur stichpunktartig zusammengefaßt.

Einsatzstoffe

Die Rückstände können hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften, insbesondere Aggregatzustand, Konsistenz und bezüglich der chemischen Eigenschaften wie z.B. Zusammensetzung, Anteil organischer bzw. inerte Komponenten²⁾ charakterisiert werden.

Bei einer Beurteilung muß zunächst danach gefragt werden, in welcher Weise die in Frage kommenden Stoffe thermisch behandelt werden sollen und welche Bereiche der in Bild 1 weiter aufgeführten Haupteinflußgrößen sinnvoll erscheinen. Beispielsweise scheidet für stückige Rückstände, mit sehr geringen Anteilen organischer Komponenten und einem entsprechend sehr hohen Anteil an Inertstoffen eine direkte, selbstgängige Verbrennung aus. Zur Erzielung ausreichend hoher Verbrennungstemperaturen ist die direkte Wärmezufuhr mit hochwertigen Zusatzbrennstoffen nicht zweckmäßig, da der entstehende große Abgasstrom einen hohen Aufwand bei der Abgasreinigung erfordert und entsprechend erhöhte Verluste verursacht. Viel geeigneter ist es in einem solchen Fall, daß man dem zu behandelnden Rückstand in einem ersten Teilschritt direkt nur soviel Sauerstoff zuführt, wie für eine vollständige Überführung der organischen Bestandteile in die Gasphase erforderlich ist und dabei durch indirekte Wärmezufuhr (s.u. z.B. Verbrennung in Strahlungsrohren) ein ausreichend hohes Temperaturniveau einstellt. Die aus dem zu behandelnden Stoff erzeugten geringen Gasmengen können anschließend einem Nachverbrennungsprozeß zugeführt werden, während die Verbrennungsabgabe aus den Strahlungsrohren bei entsprechender Verbrennungsführung nicht gereinigt werden müssen, da sie mit dem zu behandelnden Stoff

²⁾ Inert wird hier im Zusammenhang mit Stoffen gebraucht, die keine Anteile organischer Komponenten enthalten.

nicht in Berührung kommen. Eine Erwärmung des zu behandelnden Stoffes ohne Sauerstoffzufuhr (Pyrolyse) ist hier in einem ersten Teilschritt deshalb nicht sinnvoll, weil die Abtrennung des Pyrolysekokes bei den niedrigen organischen Ausgangskonzentrationen als nicht erfolgreich erscheint. Diese beispielhafte Betrachtung macht deutlich, daß aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Rückstände bereits eine erste Abwägung der zu wählenden Bereiche der nachfolgenden Haupteinflußgrößen und Maßnahmen erfolgen muß. So ist es in diesem eben genannten Beispiel nicht sinnvoll, als Basis für den Vergleich zu anderen Verfahren die Einkoppelung von Energie durch direkte Verbrennung heranzuziehen, weil letztere in diesem Fall ohnehin nicht in Frage kommen würde, bzw. bereits im Ansatz ausscheidet. In jedem Fall können solche Vorabschätzungen nur im Zusammenhang mit der konkreten Aussage bezüglich der Eigenschaften der Einsatzstoffe durchgeführt werden. Allgemein sei jedoch darauf hingewiesen, daß künftig bei Zunahme des Inertanteils von Rückständen an die Einrichtung von Vorwärm- und Kühlzonen, wie je nach Bedarf im Industrieofenbau üblich, gedacht werden sollte.

Sauerstoffkonzentrationen

Der grundsätzliche Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf die Umwandlung organischer Komponenten ist bekannt.

Es werden dabei Prozesse unterschieden, die

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

ablaufen. Dabei ist u. a. auf bekannte Schadstoffreaktionen wie Brennstoff-Stickstoffoxid-Bildungsmechanismen usw. Rücksicht zu nehmen. Im Zusammenhang mit der hier in Rede stehenden Beurteilung von Verfahren ist jedoch auch der Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf anorganische Verbindungen zu untersuchen. Um eine Bildung von unerwünschten Verbindungen zu vermeiden, kann es diesbezüglich zweckmäßig sein, ganz bestimmte Teilschritte (z.B. für den Feststoff) unter Sauerstoffabschluß, unter reduzierenden oder oxidierenden Verhältnissen zu behandeln, um die Eigenschaften der Asche, Schlacke usw. zu beeinflussen.

So kann z.B. bei Kunststoffen mit relativ hohen Gehalten an organisch gebundenem Chlor dieses unter Sauerstoffabschluß von außen bei Temperaturen

um 200°C zu einem sehr hohen Anteil abgespalten werden /27/. Bei dem Feststoffausbrand stückiger Rückstände mit z.B. nennenswerten Chromgehalten scheint es sinnvoll zu sein, stark unterstöchiometrisch die organischen Bestandteile in die Gasphase zu überführen und damit im Feststoff unerwünschte höhere Oxidationsstufen des Chroms zu vermeiden. Diese wenigen Beispiele zeigen, daß in Abhängigkeit des zu behandelnden Rückstandes unterschiedliche Verfahrensstufen in Betracht kommen.

Als ein weiterer wichtiger Punkt ist an dieser Stelle zu erwähnen, daß bei Vergasungs- und Verbrennungsverfahren als Oxidationsmittel nicht nur Luft sondern auch mit Sauerstoff angereicherte Luft oder auch reiner Sauerstoff in Frage kommen. Dementsprechend verringert sich dann der Abgasmassenstrom. So wurden diesbezüglich auch bei Hausmüllverbrennungsanlagen Versuche mit sauerstoffangereicherter Luft unternommen /28/.

Temperatur

Das Temperaturniveau ist bei der Betrachtung von chemischen Reaktionsgleichgewichten und Reaktionsgeschwindigkeiten ebenso wie die Sauerstoffkonzentration zu berücksichtigen. Was die Zerstörung von Kohlenwasserstoffen in sauerstoffreicher Atmosphäre anbetrifft, so sollten dafür möglichst hohe Temperaturen angestrebt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß oberhalb von 1300°C die Bildung von thermischem Stickstoffdioxid maßgeblich anzusteigen beginnt.

Weiterhin übt die Temperatur (in Verbindung mit dem Druck) einen entscheidenden Einfluß auf die physikalischen Vorgänge wie z.B. Trocknen, Entgasen, Verdampfen, Schmelzen usw. aus.

Im Hinblick auf die Eigenschaften fester Reststoffe ist es erforderlich zu prüfen, welche qualitativen Veränderungen sich aufgrund unterschiedlicher Temperaturniveaus ergeben (Asche, Schlacke, angesinterter Reststoff). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, daß mit steigenden Temperaturen auch zunehmend Verdampfungen einsetzen. Die dabei flüchtigen Komponenten, wie z.B. entsprechende Schwermetalle bzw. Schwermetallverbindungen, können dann u.U. einen zusätzlichen Aufwand in der Abgasreinigung darstellen. Es ist allerdings auch möglich, daß solche Umwandlungspunkte für bestimmte Stoffe gezielt überschritten und damit deren Gehalte z.B. in den festen Reststoffen reduziert werden.

Aufgrund des Niveaus der Einflußgrößen Sauerstoffkonzentration und Temperatur ergeben sich wie in Bild 2 beispielhaft zusammengefaßt sogenannte Bausteine.

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 wie z.B. CH_4 beabsichtigt.

Verbrennungsverfahren unter erhöhtem Druck sind selten und werden bisher nur im Zusammenhang mit der Behandlung von speziellen Sonderabfallstoffen betrachtet. Ein Beispiel hierfür ist die Verbrennung von flüssigen chlorierten Kohlenwasserstoffen mit Sauerstoff bei Prozeßdrücken von ca. 1 MPa /29/, was zur stofflichen Verwertung in Chlorkreisläufen führt.

Hydrierverfahren erfordern in der Regel wesentlich höhere Prozeßdrücke (ca. 20 bis 30 MPa).

Reaktorverhalten

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

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

Die wesentlichen Unterschiede dieser Fälle lassen sich wie folgt zusammenfassen: In einem Rührkessel sind alle Komponenten homogen im Reaktorraum vermischt. Hingegen findet bei einem Kolbenströmer keine Rückvermischung statt. Die Umsatzgeschwindigkeiten sind dabei vergleichsweise höher.

Bei der Bewertung der einzelnen Verfahren ist nun zu untersuchen,

- inwieweit z.B. für die Vermischung von Stoffströmen zunächst Rührkessелеlemente vorgesehen sind,
- sich danach weitere Rührkessel- bzw. Kolbenströmerelemente in Reihe geschaltet anschließen, damit die Entstehung unerwünschter Kom-

ponenten behindert bzw. der angestrebte Abbau vorhandener Verbindungen unterstützt wird. Bei erhöhten Anforderungen z.B. an den CO-Abbau sollte der letzte Teil des Reaktionsweges eine Kolbenströmercharakteristik haben.

Diese Fragestellungen sind hauptsächlich von der apparatetechnischen Umsetzung abhängig. Darauf wird weiter unten noch näher eingegangen.

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 Sonderabfallstoffe, z.B. aus dem Bereich der Rüstungsaltslasten, können die Verweilzeiten u.U. mehrere Stunden bis Tage betragen.

Zusatzstoffe

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

- Additive (z.B. zur Schadstoffeinbindung oder zur Beeinflussung des Schmelzverhaltens usw.),
- Zusatzbrennstoffe und
- Stoffe (soweit erforderlich), die zur Betterzeugung und -beeinflussung dienen.

Insbesondere was die Betterzeugung und -beeinflussung betrifft, kann diese mit dem Ziel einer Verbesserung der fluidodynamischen Eigenschaften (z.B. Wirbelbett, Festbett) oder aber auch zur Steuerung von Teilschritten (vorgewärmtes Umlaufbett) erforderlich sein. Es kann beispielsweise daran gedacht werden, bei niedrig schmelzenden stückigen Kunststoffrückständen zur Steuerung des Entgasungsteilschrittes ein vorgewärmtes Umlaufbett einzusetzen. Dieses stellt dann

gleichzeitig eine sog. Trägermatrix für die Schmelze dar, wodurch die Gefahr von Anbackungen bzw. Verklebungen der Apparatekonstruktion verringert werden soll. Ungeachtet der Ziele, welche mit den Zusatzstoffen beabsichtigt sind, müssen diese in die Stoff- und Energiebilanzen mit einbezogen werden.

Insgesamt ergeben sich aufgrund des Niveaus der Haupteinflußgrößen (Bild 1) bestimmte Bausteine, die mehr oder weniger deutlich ausgeprägt in den einzelnen Verfahren auftreten.

3. Maßnahmen zum Steuern der Haupteinflußgrößen

Eine grundsätzliche Anforderung an die Prozeßführung ist die Steuerbarkeit von Haupteinflußgrößen. In Frage kommende Maßnahmen sind beispielhaft in einer Übersicht in den Bildern 3.4 und 5 enthalten. Wie bereits erwähnt sind die Stoffumwandlungsprozesse sowohl in der Feststoff- als auch in der Gasphase in der Regel so komplex, daß die angestrebte hohe Güte der Umsetzung nicht in einem Reaktionsraum –wie heute noch häufig anzutreffen– erreicht werden kann. Grundsätzlich sollte die Prozeßführung sowohl für stückige Rückstände als auch für Gas und Flugstaub vollständig voneinander getrennt optimierbar sein. Darüber hinaus müssen diese Verfahrensstufen für Feststoff und Gas nach Möglichkeit weiter in Teilreaktionszonen unterteilt werden.

Aufteilen in Teilschritte (Bild 3)

Für die gezielte Umsetzung von einzelnen Stoffkomponenten bzw. Stoffströmen sind häufig ganz bestimmte Prozeßbedingungen erforderlich. Dementsprechend werden bei einer Reihe von Verfahren Teilschritte voneinander entkoppelt bzw. Stoffströme abgezogen und getrennt behandelt.

Eine wichtige Voraussetzung ist dabei zunächst die Trennung von Reaktionszonen und der Wärmeauskopplung um z.B. ausreichend hohe Wandtemperaturen zu erreichen und damit im Reaktionsraum Quencheffekte zu vermeiden. Im übrigen läßt sich dann auch bei heizwertarmen Stoffen ein ausreichend hohes Temperaturniveau erreichen.

Wärmeein- bzw. -auskopplung (Bild 4)

Neben der häufig vorkommenden direkten Wärmeeinkopplung sei besonders auf die indirekte Wärmeeinkopplung hingewiesen. Sie kommt dann in Betracht, wenn:

- bestimmte Teilschritte unter Sauerstoffabschluß (Pyrolyse) ablaufen sollen,
- bei hohen Inertanteilen der Rückstände große zu reinigende Abgasmassenströme vermieden werden sollen (Beispiel Verbrennung in Strahlungsrohren mit indirekter Energieübertragung zur Trennung der Abgasströme, so daß dem Rückstand nur der/die zur Oxidation erforderliche Sauerstoff/Luft zuzuführen ist) oder
- eine getrennte Steuerung des Niveaus der Sauerstoffkonzentration und der Temperatur erforderlich ist, was z.B. bei Vergasungsprozessen vorteilhaft genutzt werden kann.

Von den in Bild 4 aufgeführten Maßnahmen der Wärmeauskopplung kommt in den Reaktionszonen in der Regel eine indirekte Form zum Schutz der Apparate in Frage (z.B. Rostkühlung). Eine Wärmeauskopplung zur Energienutzung sollte grundsätzlich in nachgeschalteten Wärmetauschern (z.B. Abhitzekeessel) und weniger entlang des Reaktionsweges erfolgen.

Niveau der Haupteinflußgrößen (Bild 5)

Zunächst ist die Steuerung des Niveaus der Haupteinflußgrößen zu diskutieren. Deren Verteilung über dem Reaktionsweg ergibt sich durch Steuern des Niveaus in den einzelnen Teilzonen.

Bei der Einrichtung von hintereinander geschalteten Teilschritten kann deren Optimierung durch geeignete Maßnahmen zur Steuerung der Haupteinflußgrößen erfolgen. Insbesondere sollte dies für die Größen:

- Sauerstoffkonzentration,
- Temperatur,
- Verweilzeit und
- Reaktionsverhalten

entlang des Reaktionsweges geschehen.

Sauerstoffkonzentration

Das Sauerstoffangebot kann z.B. durch

- Luftstufung,
- Brennstoffstufung,
- Abgasrückführung,
- Sauerstoffzufuhr,
- Inertgaszufuhr und
- Lastzustand

verändert werden.

Zur Reduzierung von Stickstoffoxiden bei Verbrennungsprozessen kann es z.B. erforderlich sein, unterstöchiometrische Zonen einzurichten. Diesbezüglich haben sich insbesondere die Luft- und Brennstoffstufung als sehr wirkungsvolle Maßnahme erwiesen [z.B. 13, 14, 25]. Was die Sauerstoffanreicherung betrifft, so sei an dieser Stelle wiederholt darauf hingewiesen, daß dies bei Vergasungs- und Verbrennungsverfahren prinzipiell möglich ist und entsprechend in den Stoff- und Energiebilanzen berücksichtigt werden muß. Bezüglich der verfahrenstechnischen Auswirkungen, die sich durch eine Sauerstoffanreicherung bei der Restmüllverbrennung in Rostfeuerungen ergeben, liegen erste Ergebnisse vor [28]. Eine Sauerstoffanreicherung führt zu einem niedrigeren Primärreaktionsgasmassenstrom. Mit den damit verbundenen niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten wird die Gefahr der Entstehung von Flugstaub, sowohl was die Teilchengröße wie auch die Menge insgesamt betrifft, reduziert. Der Abgasmassenstrom ist entsprechend niedriger, wodurch sich der Aufwand in den nachgeschalteten Anlagen der Abgasreinigung entsprechend verringert. Mit dem gleichen Ziel ist die Luftüberschußzahl bei Verbrennungsverfahren möglichst weit abzusenken. Das läßt sich umso besser erreichen, je deutlicher die Reaktionszonen voneinander entkoppelt sind. In bestimmten Fällen könnte daher über die Absenkung gesetzlich vorgeschriebener Mindestsauerstoffgehalte in den Abgasen nachgedacht werden.

Temperatur

Die Steuerung des Temperaturniveaus kann z.B. durch:

- Luftvorwärmung,
- Vorwärmung der Einsatzstoffe,

- Einstellung der Stöchiometrie,
- Zufuhr von Inertgasen (Abgasrückführung),
- Wassereindüsung,
- Zufuhr von Zusatzstoffen (Zusatzbrennstoff, Bettmaterial) und
- Lastzustand

erfolgen. Zur Vermeidung einer nennenswerten Bildung von thermischem Stickstoffoxid bei überstöchiometrischen Verhältnissen ist insbesondere bei heizwertreichen Rückständen eine Absenkung und Vergleichmäßigung des Temperaturniveaus z.B. durch eine Abgasrückführung wirksam.

Druckniveau

Variationen des Druckniveaus innerhalb einer Verfahrensstufe sind sehr schwierig und in der Regel nicht üblich. Falls für die einzelnen Teilschritte unterschiedliche Druckniveaus vorgesehen sind, so werden diese apparatetechnisch voneinander getrennt.

Verweilzeit

Die Verweilzeitbeeinflussung im Betrieb kann durch die Variation der zugeführten Massenströme und durch die Transportgeschwindigkeiten vorgenommen werden. Die Möglichkeiten dafür sind jeweils von der Konstruktion der Apparate abhängig und werden in diesem Zusammenhang weiter unten näher dargestellt. Prinzipiell läßt sich neben der Ermittlung der mittleren Verweilzeit auch die reale Verweilzeitverteilung bzw. das Verweilzeitspektrum durch die Größe der Peclet-Zahl Pe charakterisieren, welche die Strömungsgeschwindigkeit w und die Apparategröße L mit dem Grad der Vermischung über einen Dispersionskoeffizienten D verknüpft ($Pe = (wL)/D$) [z.B. 30].

Reaktorverhalten

Während des Betriebes ist eine Variation des Reaktorverhaltens kaum möglich. Je nachdem welche Reaktorcharakteristik gewünscht wird, ist dies bereits bei der Projektierung zu beachten. Die einzelnen Möglichkeiten ergeben sich aus Bild 5b und werden im Zusammenhang mit den einzelnen Apparaten erläutert.

Zusatzstoffe

Neben den in Bild 5 erwähnten Gesichtspunkten ist besonders auf die folgende Problematik bei der Additivzugabe hinzuweisen. Die Additivmassenströme sind in der Regel klein im Verhältnis zu den Massenströmen, in die sie eingemischt werden sollen. Um für die beabsichtigte Wirkung lediglich nahstöchiometrische Mengen zuführen zu müssen, ist die Verteilung (Einnischung) besonders wichtig. Zur Vermeidung von Strahlenbildungen, Schlupf usw. sind hierzu insbesondere Rührkessелеlemente erforderlich.

4. Apparate

Die apparatetechnische Umsetzung der bisher genannten Gesichtspunkte ist ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Verfahrensbeurteilung. Es ergibt sich dadurch eine Entscheidungshilfe, für welche Art von Rückständen das jeweils betrachtete Verfahren insgesamt als geeignet erscheint. Dabei sind sowohl die Eigenschaften der Rückstände selbst als auch das Niveau und soweit möglich die Steuerbarkeit der weiteren Einflußgrößen durch die verschiedenen Maßnahmen zu berücksichtigen. Für die verschiedenen Verfahrensteilschritte kommen z.B. folgende Apparatetypen in Frage:

- Brennkammersysteme (Bild 6),
- Drehrohre (Bild 7),
- Rostsysteme (Bild 8),
- Etagenöfen (Bild 9),
- Wirbelschichtreaktoren (Bild 10),
- Durchlauföfen (Bild 11) und
- Schachtreaktoren (Bild 12).

Diese Apparatetypen sind im Zusammenhang mit Stoffbehandlungs- bzw. Energieumwandlungsverfahren in den Fachgebieten Industrieofenbau, Verbrennungs- und Brennstofftechnik usw.⁹ bereits sehr detailliert untersucht worden¹⁰; weshalb auf die entsprechende Literatur der Stahl-, Glas-, Keramikindustrie usw. verwiesen wird. Was den Einsatz der Apparate in den Bereichen Entsorgung und energetisches bzw. stoffliches Verwerten betrifft, so ist in den Bildern 6 bis 12 eine Übersicht zur Charakterisierung versucht worden.

Brennkammersysteme (Bild 6)

Brennkammersysteme wie sie für die Entsorgung von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Rückständen (z.B. kontaminierte Ablüfte, Rückstandsöle) oder die stoffliche Verwertung in bestimmten Fällen (z.B. HCl-Rückführung /29/) Anwendung finden, sind hinsichtlich der Einflußgrößen Sauerstoffkonzentration, Temperatur und Verweilzeit in einem breiten Variationsbereich sehr gut steuerbar. Was das Reaktorverhalten betrifft, so lassen sich einzelne Teilstufen strömungstechnisch je nach Erfordernis entweder in Richtung einer RK-Charakteristik oder einer KS-Charakteristik einrichten.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet für Brennkammersysteme ist die Nachverbrennung von Gasströmen (einschließlich Flugstaub), welche z.B. bei anderen thermischen Behandlungsverfahren in Teilverfahrensstufen entstehen. Bei der Ausbildung einer solchen Nachverbrennungsstufe können die vorgeschalteten Teilstufen ausschließlich im Hinblick auf die Eigenschaften der jeweils zu behandelnden festen Rückstände optimiert werden. Die im Zusammenhang mit gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Rückständen gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse, insbesondere zur Reduzierung von Stickstoffoxiden und zur Verbesserung des Umsatzes von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen, sind dabei in den Nachverbrennungsstufen entsprechend zu übertragen.

Drehrohre (Bild 7)

Werden aufgrund der stofflichen Zusammensetzung der Einsatzstoffe sehr hohe Anforderungen an die thermische und mechanische Belastbarkeit des Apparates gestellt, so können in der Regel Drehrohre diesen Anspruch erfüllen. Sie kommen dementsprechend häufig als Teilstufen für die Verbrennung von Sonderabfallstoffen zum Einsatz. Diese Stoffe sind meist sehr heterogene Mischungen aus flüssigen, pastösen und stückigen Rückständen, insbesondere Fässer und Gebinde mit flüssigen und stückigen Rückständen, die vor der Verbrennung nicht geöffnet werden dürfen. Bei einer feuerfesten Ausmauerung lassen sich entsprechend hohe Temperaturen (bis 1600°C und ggf. höher) einstellen, so daß verbleibende feste Reststoffe falls erforderlich schmelzflüssig abgezogen werden können. Eine Variation der Einflußgrößen entlang des Reaktionsweges ist in der Regel nicht möglich.

Drehrohre werden im Zusammenhang mit anderen Verfahren auch als Pyrolysestufen z.B. mit dem Ziel der Vorbereitung einer Metallabtrennung bei stückigen Verbundstoffen, d.h. zur Wertstoffrückgewinnung eingesetzt.

Rostsysteme (Bild 8)

Bei Rostsystemen bestehen sehr gute Möglichkeiten zur Steuerung der Sauerstoffkonzentration, Temperatur und Verweilzeit längs des Reaktionsweges. Das Reaktionsgas durchströmt zwangsweise das Bett direkt und es stellen sich entsprechend intensive Vermischungs- und Reaktionsbedingungen zwischen Feststoff und Gas ein. Rostsysteme werden häufig als Teilstufe eines Verbrennungsverfahrens z.B. für Restmüll eingesetzt. Gleichmaßen wie bei anderen Verfahren auch, werden bei der Entsorgung von Restmüll in Rostsystemen Primärmaßnahmen, die zu einer weiteren Schadstoffreduzierung führen können, untersucht. Was die gezielte Beeinflussung der Eigenschaften der anorganischen Reststoffe betrifft, sind bei Rostsystemen aufgrund der zahlreichen Möglichkeiten zur Prozeßbeeinflussung entlang des Reaktionsweges noch zahlreiche Entwicklungen zu erwarten. Weiterhin sollten diese Möglichkeiten auch im Hinblick auf eine Wertstoffrückgewinnung zielgerichtet untersucht werden (Thermisches Entschichten von Metall-Kunststoff-Verbundstoffen usw.).

Etagenöfen (Bild 9)

Etagenöfen sind vor allem für die Behandlung von pastösen und stückigen Rückständen mit enger Korngrößenverteilung geeignet. Der Rückstand rieselt von oben nach unten über mehrere Etagen, auf denen er durch sogenannte Krälarne mechanisch gerührt wird (RK). Die Hintereinanderschaltung mehrerer Etagen bedeutet insgesamt eine KS-Charakteristik. Der Ausbrand erfolgt häufig im Gegenstrom zu den Gasen. Insbesondere bei dieser Gegenstromführung von Rückstand und Gas ergibt sich eine günstige Energieausnutzung durch Wärmerückgewinnung aus der Asche (Vorwärmung des Gases) in den unteren Etagen. Zur Steuerung der Reaktionsbedingungen entlang des Reaktionsweges können Gasströme relativ einfach zu- bzw. abgeführt werden.

Wirbelschichtreaktoren (Bild 10)

Wirbelschichtreaktoren können ebenso wie Etagenöfen für die Behandlung von pastösen und stückigen Rückständen mit einer engen Korngrößenverteilung und darüber hinaus auch für flüssige Rückstände eingesetzt werden. Im Gegensatz zu Apparaten mit Gleich- oder Gegenstromführung von Rückstand und Gas (vgl. z.B. Etagenöfen) stellen die Wirbelschichtreaktoren auf den gesamten Reaktor bezogen nahezu einen Rührkessel dar. Damit ergeben sich in dem Reaktionsraum sehr homogene Reaktionsbedingungen. Es bestehen allerdings nur bedingt Möglichkeiten, die Prozeßbedingungen über der Höhe zu steuern. Eine Maßnahme zur Erweiterung dieser Möglichkeiten stellt die Übereinanderschaltung mehrerer Wirbelschichten dar. Mit den künftig wachsenden Anforderungen an die Qualität der Abgabe (z.B. Ausbrand) deutet sich in zunehmendem Maße an, daß auch hinter Wirbelschichtreaktoren entsprechende Nachbehandlungsstufen (z.B. Nachverbrennung) erforderlich werden.

Durchlauföfen (Bild 11)

Feuerfest ausgekleidete Durchlauföfen werden in vielen Bereichen der keramischen Industrie, Ziegelindustrie, Metallurgie usw. eingesetzt. Im Zusammenhang mit den hier in Rede stehenden thermischen Verfahren zur Rückstandsbehandlung können solche Öfen insbesondere für Rückstände, die u.U. sehr lange Verweilzeiten erfordern, in Erwägung gezogen werden (z.B. aus dem Bereich der Rüstungsaltslasten). Die Konzentrationsverhältnisse in der Gasphase sowie die Temperaturen lassen sich bei Durchlauföfen entlang des Reaktionsweges sehr gut steuern. Für einen optimierten Energieeinsatz können getrennte Vorwärm-, Heiz- und Kühlzonen für das Transportmittel (z.B. Wagen, Band, usw.) und das "Gut" (Rückstand) eingerichtet werden. Es sind sowohl Gegen- als auch Gleichstromführungen des Gutes mit dem Gas, auch getrennt auf einzelne Zonen des Durchlaufofens bezogen, möglich.

Schachtreaktoren (Bild 12)

Schachtreaktoren werden häufig zur thermischen Behandlung von stückigen Einsatzstoffen eingesetzt (z.B. Erzreduktion, Kalkentsäuerung, Kupolöfen in Gießereien usw.). Im Bereich der Brennstoffveredelung haben Schachtreaktoren für

Verkokungs-, Schmelz- und Vergasungsprozesse (Druckvergasung) Bedeutung erlangt. Der Feststoff bewegt sich aufgrund der Schwerkraft von oben nach unten und wird zwangsweise von Gas im Gegen- oder Gleichstrom durchströmt. Der konstruktive Aufwand zur Gewährleistung von gleichzeitig hohen Prozeßtemperaturen und hohen Drücken ist vergleichsweise gering. Dementsprechend kommen Schachtreaktoren u.a. für Druckvergasungsverfahren in Betracht. In Anlehnung an Öfen in der Stahlindustrie werden im Zusammenhang mit den hier in Rede stehenden thermischen Behandlungsverfahren erste Versuche zum Einschmelzen von Metallen und Abbau von organischen Komponenten usw. z.B. von Rückständen aus der Automobilindustrie durchgeführt.

5. Massen- und Energiebilanzen

Wie eingangs erwähnt ergeben sich u.a. aus der Zusammenschaltung von Einflußgrößen, Maßnahmen und Apparaten verschiedene Verfahren. Im folgenden sind einige einfache Beispiele vergleichend gegenübergestellt, wobei nur die wichtigsten Massen- und Energieströme für einzelne Bausteine berücksichtigt werden. Auf die detaillierten Schaltungsvarianten und Verfahrenstechniken innerhalb der Bausteine (z.B. Feststoffausbrand, Vergasung, Pyrolyse, Nachverbrennung usw.) kann hier nicht weiter eingegangen werden weshalb in diesem Zusammenhang allgemein auf das eingangs erwähnte Schrifttum verwiesen sei. Dargestellt sind:

- (1) ein mehrstufiges Verbrennungsverfahren mit Feststoffabtrennung vor der Nachverbrennung (Bilder 13, 14, 15),
- (2) ein mehrstufiges Verbrennungsverfahren mit Feststoffabtrennung vor der Nachverbrennung und teilweiser Wärmeauskopplung während des Feststoffausbrandes (Bilder 16, 17, 18),
- (3) ein Pyrolyseverfahren mit Feststoffabtrennung vor einer Nachverbrennung (Bilder 19, 20, 21),
- (4) ein Vergasungsverfahren mit Feststoffabtrennung vor einer Nachverbrennung (Bilder 22, 23, 24),
- (5) ein Pyrolyseverfahren mit Feststoffabtrennung vor einer Vergasung (Bild 25),
- (6) ein mehrstufiges Verbrennungsverfahren mit Feststoffabtrennung vor einer Nachverbrennung und indirekter Wärmeinkopplung während des Feststoffausbrandes (Trennung der Abgasströme) (Bild 26).

Im Beispiel (1) (Bild 13) handelt es sich um eine Verbrennung, bei der bei überstöchiometrischen Verhältnissen der verbleibende Feststoff unmittelbar als Schmelze/Schlacke anfällt. Der Apparat für den Feststoffausbrand könnte z.B. ein Drehrohr sein. Einschließlich der Nachverbrennung wird ein Luftüberschuß mit $\lambda = 1,4$ angenommen. Die heißen Abgase werden zur Dampferzeugung genutzt. Es bleibt offen, ob die erzeugte Schmelze/Schlacke vor dem Erstarren (z.B. je nach vorangegangener Verweilzeit im Reaktor) einer Nachbehandlung (z.B. weiteres Verweilen unter oxidierenden Bedingungen bei gleichzeitigem Rühren usw.) unterzogen werden sollte. Falls die Konsistenz der Rückstände (z.B. Fässer mit festen und flüssigen Stoffen, die in anderen Apparaten nicht direkt behandelt werden können) im Feststoffreaktor einen höheren Luftüberschuß als $\lambda = 1,4$ erfordern, so ließe sich z.B. durch zusätzliches Einbringen heizwertreicher flüssiger Rückstände in die Nachverbrennung insgesamt an deren Ende bei einer sorgfältigen Feuerungsführung wieder ein Stöchiometrieverhältnis von $\lambda = 1,4$ und niedriger erreichen. Die Annahme dieses Wertes soll lediglich dem relativen Vergleich der Verfahrensbeispiele untereinander dienen. Die Massen- und Energiebilanz zu diesem Beispiel (1) sind in den Bildern 14 und 15 dargestellt.

Für das Beispiel (2) zeigen die Bilder 16, 17 und 18 für den gleichen Rückstand das Schema und die Bilanzen für den Fall, daß der Feststoffausbrand mit Rücksicht auf zu kühlende Apparateteile (z.B. Roststäbe) durchzuführen ist. Das bedeutet, daß der verbleibende Reststoff als Asche den Reaktor verläßt und nicht als Schmelze. Aus Vergleichsgründen wurde wieder $\lambda = 1,4$ gewählt. Wegen der Wärmeauskopplung ergeben sich dann auch niedrigere Nachverbrennungstemperaturen. Im Hinblick auf die Eigenschaften der verbleibenden Reststoffe bedeutet dies hingegen nicht, daß deren Eigenschaften (z.B. Ausbrand) im Vergleich zu Beispiel (1) schlechter sein müssen, da bei einem angenommenen Rostsystem die Möglichkeiten zur Steuerung des Feststoffverbrennungsablaufs (vgl. Bild 8) größer sind. Auch hier bleibt jedoch die Aufbereitung und Nachbehandlung (z.B. bezüglich Eluatverhalten usw.) wie auch bei allen anderen Beispielen offen.

Im Beispiel (3) (Bilder 19, 20, 21) ist für den gleichen Rückstand eine Pyrolysestufe mit anschließender Nachverbrennung angenommen. Die Pyrolyse wird durch Abgaswärme beheizt. Der Rückstand soll bei entsprechend niedrigen Temperaturen (z.B. 500°C) für eine nachfolgende mechanische Abtrennung von Wertstoffen (z.B. Fe-Metalle) vorbereitet werden. Bei einer solchen Abtrennung

muß allerdings damit gerechnet werden, daß ein Teil der anorganischen Komponenten im Pyrolysekoks verbleibt, welcher seinerseits dann zusammen mit dem entstehenden Pyrolysegas einer Nachverbrennung zuzuführen ist. Diese Art der Prozeßaufteilung wird gewählt,

- wenn erhebliche Inertanteile und gleichzeitig nennenswerte organische Bestandteile im Feststoff vorliegen oder
- wenn z.B. daran gedacht ist, aus Verbundmaterialien (z.B. aus der Konsumgüterindustrie) Wertstoffe zu separieren.

Für das Beispiel (4) sind in den Bildern 22, 23 und 24 für den gleichen gewählten Rückstand ein Fließbild sowie die Bilanzen dargestellt. Dabei wird ein Vergasungsverfahren mit nachgeschalteter Nachverbrennung angenommen. Im Unterschied zu dem Verfahren im Beispiel (3) wird hier mit gleicher Zielsetzung angestrebt, durch Optimierung der Haupteinflußgrößen Sauerstoffkonzentration und Temperatur, die Abtrennung von Inert- oder Wertstoffen zu ermöglichen (z.B. 700°C), ohne daß nach der ersten Teilstufe ein koksartiger Rückstand verbleibt. In der Nachverbrennung erfolgt daher lediglich die Umsetzung von Vergasungsgas und ggf. Flugstaub. In dem vorliegenden Zusammenhang ist es wichtig darauf hinzuweisen, daß diese Art der Feuerungsführung auch z.B. für Restmüll aus Hausmüll in Frage kommt (d.h. eine deutlich unterstöchiometrische Roststufe erzeugt Vergasungsgas für eine selbstgängige Nachverbrennung; durch optimierte Zonenaufteilung auf dem Rost, hoher Feststoffausbrand möglich /21/). Wie die Massenbilanz in Bild 23 zeigt, lassen sich damit geringere Abgasmassenströme erzielen. Das liegt u.a. daran, daß im Zusammenhang mit einer stark unterstöchiometrischen ersten Stufe (auch bei Vergasung mit Luft), die Nachverbrennung der so entstandenen Gase bei $\lambda = 1,4$ insgesamt zu einem geringeren Abgasmassenstrom führt.

Bei einem Vergleich der Bilanzen zu allen bisherigen vier Beispielen zeigt sich somit, daß sich im Hinblick auf die Abgasmassenströme nur im Beispiel (4) Vorteile ergeben. Es ist weiter darauf hinzuweisen, daß es sicherlich möglich ist, bei der Nachverbrennung von Pyrolysegas und sorgfältig aufbereitetem Pyrolysekoks oder von Vergasungsgas die Luftzahlen unter $\lambda = 1,4$ abzusenken und damit weiter verkleinerte Abgasströme zu erreichen. Ob die Aufbereitungs- und Nachbehandlungsschritte insgesamt Vorteile gegenüber z.B. mehrstufigen Verbrennungsverfahren ergeben, muß jeweils im Einzelfall geprüft werden. Die Bewertung der Aufbereitungs- und Nachbehandlungsschritte (Aufwand und Qualität) in den genannten Beispielen muß gesondert erfolgen.

Im Beispiel (5) (Bild 25) sind die Bausteine Pyrolyse und Vergasung zusammengeschaltet. Damit werden u.a. eine Wertstoffabtrennung und die Erzeugung von Prozeßgas angestrebt. Auf einen Vergleich der Massen- und Energieströme mit den vorher aufgeführten Beispielen ist hier der Übersicht halber bewußt verzichtet worden:

- Für den Vergasungsprozeß wird Sauerstoff und nicht Luft als Vergasungsmittel verwendet. Wegen des fehlenden Stickstoffballastes sind die dabei durchgesetzten Gasmassenströme wesentlich kleiner.
- Über die dargestellten Bilanzgrenzen wird ein Prozeßgas geführt. Der damit verbundene, im Vergleich zu einem Verbrennungsverfahren weiter verkleinerte Massenstrom, ist zunächst ein Vorteil im Hinblick auf die Größe der folgenden Reinigungsanlagen. Welcher Aufwand bei der Reinigung selbst für die geforderte Qualität in der nachfolgenden Verwertungsstufe betrieben werden muß, kann hier nicht beurteilt werden. Im übrigen sind auch die in der Verwertungsstufe durch eine Prozeßgasumwandlung entstehenden Abgasmassenströme im Einzelfall wieder zu bilanzieren.
- Es ist weiter darauf hinzuweisen, daß bei einer Rückführung des Prozeßgases zur Beheizung der Pyrolysestufe, dieses zuvor entsprechend gereinigt werden muß, was in Bild 25 der Einfachheit wegen nicht so dargestellt ist. Ob für das bei der Pyrolysebeheizung entstehende Abgas eine weitere Abgasreinigung erforderlich wird, ist u.a. von dem Aufwand der Prozeßgasreinigung und der Feuerungsführung während der Pyrolysebeheizung abhängig.

Abschließend ist für das Beispiel (6) in Bild 26 ein Fließbild für ein mehrstufiges Verbrennungsverfahren mit indirekter Wärmeeinkopplung während des Feststoffausbrandes dargestellt. Wie bereits erwähnt, kann ein solches Verfahren insbesondere für Rückstände mit sehr geringen Anteilen organischer Komponenten eingesetzt werden. Wie Bild 26 zeigt, wird der bei einer Umwandlung der organischen Komponenten entstehende vergleichsweise niedrige Abgasmassenstrom getrennt zu dem Abgasmassenstrom, der für die Wärmeeinkopplung (hier Verbrennung in Strahlungsrohren) erforderlich ist, geführt. Als Apparate für den Feststoffausbrand sind insbesondere Durchlauföfen (z.B. Bandöfen) geeignet. Werden diese, wie aus dem Industrieofenbau bekannt, in Vorwärm-, Heiz- und Kühlzonen aufgeteilt (Wärmerückgewinnung aus dem Abgas und dem verbleiben-

den Reststoff), so ergibt sich eine günstige Energieausnutzung. Das Abgas zur Beheizung wird dabei wie in Bild 26 dargestellt im Gegenstrom zu dem zu behandelnden Rückstand geführt und verläßt den Reaktor kalt (kein Wärmetauscher im Abgasstrang). Bei geeigneter Verbrennungsführung muß dieses keiner weiteren Reinigung zugeführt werden. Der Aufwand für eine Abgasreinigung bezieht sich nur auf den geringen Abgasmassenstrom aus der Oxidation der zu behandelnden Rückstände.

6. Literaturverzeichnis

- /1/ VDI-Tagung "Prozeßführung und Verfahrenstechnik der Müllverbrennung".
18./19. Juni 1991, Essen.
VDI-Berichte Nr. 895, 1991.
- /2/ GVC-Tagung "Entsorgung von Sonderabfällen durch Verbrennung",
4.-6. Dezember 1989, Baden-Baden.
Tagungsband.
- /3/ Erbach, G.; Schöner, P.:
Thermische Behandlung von Sonderabfällen.
Abfallwirtschaftsjournal 2(1990) 10.
- /4/ Kitzerow, H.-G.; Hölter, G.:
Stellenwert der Wirbelschichtverbrennung bei der thermischen Abfallverwertung.
Tagungsband der VGB-Konferenz "Thermische Abfallverwertung 1992" am 11./12. November 1992 in Essen.
- /5/ Reher, P.:
Entsorgung von Sonderabfallstoffen durch Verbrennung.
GVC-Tagung "Entsorgung von Sonderabfällen durch Verbrennung",
4.-6. Dezember 1989, Baden-Baden.
Tagungsband.

- /6/ Hasberg, W.; Römer, R.:
Organische Spurenschadstoffe in Brennräumen von Anlagen zur thermischen Entsorgung.
Chem.-Ing.-Techn. 60(1988)6.
- /7/ Sattler, K. (Hrsg.):
Umweltschutz Entsorgungstechnik.
ISBN 3-8023-0641-4.
- /8/ Thome-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.):
Verfahren zur Sanierung von Rüstungsaltslasten.
ISBN 3-924511-54-3.
- /9/ Vogg, H.; Hunsinger, H.; Merz, A.; Stieglitz, L.; Vehlow, J.:
Organische Spurenschadstoffe - Stand der Erkenntnisse zum Thema Dioxine/Furane.
- /10/ Hagenmaier, H.; Brunner, H.; Haag, R.; Kraft, M.:
Mechanismen der Bildung und Zerstörung von Dioxinen in Abfallverbrennungsanlagen.
VGB Konferenz "Müllverbrennung 1986", 14. Oktober 1986 in Essen.
- /11/ Horch, K.; Schetter, G.; Fahlenkamp, H.:
Dioxinminderung für Abfallverbrennungsanlagen.
Entsorgungspraxis 1991, Nr. 5.
- /12/ Christmann, A.:
Zukünftiges Feuerungskonzept zur thermischen Restmüllbehandlung.
VDI-Berichte Nr. 895, 1991.
- /13/ Kremer, H.; Schulz, W.:
Minderung der NO_x -Emissionen durch verbrennungstechnische Maßnahmen.
VDI-Berichte Nr. 495, 1984.

- /14/ Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.:
Reduzierung der NO_x -Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung.
6. Tecflam-Seminar "Schadstoffreduktion bei Verbrennungsprozessen", 1990.
- /15/ Buttke, B.; Rabe, W.:
Nutzung von Vergasungstechniken zur Verwertung von Abfall- und Reststoffen.
Tagungsband der VGB-Konferenz "Thermische Abfallverwertung 1992" am 11./ 12. November 1992 in Essen.
- /16/ Redmann, E.; Ahrens-Botzong, R.:
Die thermische Behandlung von Auto-Shredder-Leichtfraktion im Siemens-Schmelzbrennverfahren.
Tagungsband der VGB-Konferenz "Thermische Abfallverwertung 1992" am 11./ 12. November 1992 in Essen.
- /17/ Geiger, T.; Knopf, H.-J.; Seifert, H.; Leistner, G.:
Chemisches Recycling und Verbrennung von Kunststoffabfällen im Vergleich.
Deutsch-französische Gemeinschaftstagung "Verbrennung von Sonderabfällen", am 12.- 14. Oktober 1992 in Lyon-F.
- /18/ Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.:
Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen.
VDI-Berichte Nr. 895, 1991.
- /19/ Scholz, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.:
Prozessführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von Abfällen.
Chem.-Ing.-Techn. 62(1990) Nr. 11.

- /20/ Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.:
Thermische Behandlung von stückigen Rückständen.
BWK/TÜ/Umwelt-Special (1992) Oktober.
- /21/ Scholz, R.; Schopf, N.:
General Design Concept for Combustion Process for Waste Fuels and some Test Results of Pilot Plants.
Proceedings of "The 1989 Incineration Conference", Knoxville, USA, 1989.
- /22/ Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.:
Schadstoffarme Verbrennungsführung bei unterschiedlichen Brennstoffen am Beispiel eines Drallbrennkammersystems.
Chem.-Ing.-Techn. 59 (1987).
- /23/ Jeschar, R.; Scholz, R.; Schopf, N.:
Mehrstufige Verbrennungsführung bei der Verbrennung von BRAM.
In: K.J. Thome-Kozmiensky: Müllverbrennung und Umwelt 2, ISBN 3-924511-28-4.
- /24/ Steinebrunner, K.; Becker, R.; Seifert, H.; Sternberg, J.; Scholz, R.:
Untersuchungen zur thermischen Entsorgung NO_x -haltiger Abläufe.
VDI-Berichte 992, 1991.
- /25/ Malek, Ch.; Jeschar, R.; Scholz, R.:
Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von Erdölrückständen.
VDI-Berichte 992, 1991.
- /26/ Klöppner, G.; Scholz, R.; Jeschar, R.:
On Simplified Calculation on the NO_x -Formation during Technical Combustion.
(demnächst).
- /27/ Kühmann, R.; Schleussner, M. und Bockhorn, H.:
Untersuchungen zur Pyrolyse von PVC und anderen Polymeren.
VDI-Berichte Nr. 922, 1991.

- /28/ Martin, J.; Busch, M.; Horn, J.; Rampp, F.:
Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen
Schadstoffreduzierung.
VDI-Berichte (vorliegender Tagungsbericht), 1993.
- /29/ BASF process for the incineration of liquid chlorinated hydrocarbons.
BASF informeet, BASF Antwerpen N.V..
- /30/ Levenspiel, O.:
Chemical Reaction Engineering.
John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, 1972.

Einsatzstoffe	physikalische Eigenschaften		chemische Eigenschaften		gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stickig)		Zusammensetzung (Problemstoffe)	
	Pyrolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$					
Sauerstoffpartialdruck	Nieder- $\vartheta < 600^\circ\text{C}$	bis	Hochtemperatur $\vartheta > 1000^\circ\text{C}$ (ggf. 18.000 $^\circ\text{C}$ u. höher)					Trocknen, Engasen, Schmelzen, Verdampfen, Sublimieren
Temperatur	Niederdruck $p \ll 0,1 \text{ MPa}$	Umgebungsdruck $p \approx 0,1 \text{ MPa}$	Hochdruck $p \gg 0,1 \text{ MPa}$					
Druck	Rührkessel (RK) $Pe = 0$	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) $Pe \rightarrow \infty$					
Reaktorverhalten	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d					
Verweilzeit								
Zusatzstoffe	Additiv (z.B. Schadstoffbindung, Beeinflussung des Schmelzverhaltens) Zusatzbrennstoff Bett (z.B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung)							

Bild 1: Haupteinflußgrößen bei thermischen Behandlungsverfahren.

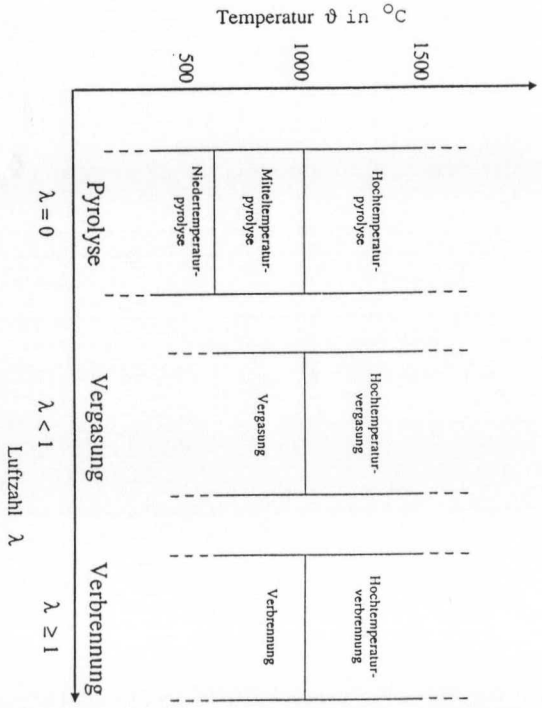


Bild 2: Bausteine thermischer Behandlungsverfahren aufgrund des Niveaus der Einflußgrößen Sauerstoffkonzentration und Temperatur.

-Trennung von Reaktionszonen und Wärmeauskopplung

+ heiße Wände

+ ausströmend hohe Temperaturen bei
heizwertarmen Stoffen

+ Vermeidung von Quenechfeffekten

+ usw.

- Aufteilung in unterschiedliche Reaktionszonen

+ zur getrennten Optimierung von
Teilschritten (Stufung usw.)

+ zum Abziehen von Teilströmen

+ usw.

Bild 3: Maßnahmen zum Steuern der Haupteinflußgrößen; hier Aufteilung von Teilschritten.

Wärmeeinkopplung

- direkter Kontakt mit dem Rückstand
- z. B. : + Verbrennung von Brennstoff über dem Rückstand
- + Überleiten von heißen Abgasen
- + Bettvorwärmung (Umlaufbett)
- + sonstige Möglichkeiten (z.B. Lichtbogen)
- indirekt, ohne Kontakt mit dem Rückstand
- z. B. : + Verbrennung von Zusatzbrennstoff
- z. B. in Strahlungsrohren
- + Heizsysteme mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern
- (z.B. Abgas, Dampf, Thermalöl)

Wärmeauskopplung

- direkter Kontakt des Kühlmediums mit dem Rückstand
- (z.B. Luft, Abgas, usw.)
- indirekt, ohne Kontakt mit dem Rückstand
- z. B. : + Kühlsysteme mit unterschiedlichen Kühlmedien
- (z.B. Wasser, Dampf, Thermalöl)

Bild 4: Maßnahmen zum Steuern der Haupteinflußgrößen;
hier Wärmecin- bzw. -auskopplung.

- Sauerstoffkonzentration

- + Luftzufuhr
- + Brennstoffzufuhr
- + Abgasrückführung
- + Sauerstoffzufuhr
- + Inertgaszufuhr
- + zugeführter Massensstrom (Lastwechsel; hier Vollast, Teillast usw.)
- + usw.

- Temperatur

- + Luftvorwärmung
- + Vorwärmung des Einsatzstoffes
- + Einstellung der Stöchiometrie
- + Abgasrückführung
- + Zufuhr von Inertgasen
- + Wassereindüsung
- + Zufuhr von Bettmaterial (z.B. Zusatzbrennstoff, Bettvorwärmung)
- + usw.

- Druck

(nur grob apparativ in weiten Stufen möglich)

Bild 5a: Maßnahmen zum Steuern der Haupteinflußgrößen;
hier Niveau in den einzelnen Zonen.

- Reaktorverhalten

Rührkessel:
+ für feste Rückstände und Zusatzstoffe mech. Rühren durch Apparate und Apparateinbauten (z.B. Drehrühr, Rost, Teller, Wirbelschicht)

+ für Gase staubförmige, flüssige Additive strömungs-technisches "Rühren" (z.B. Freistrahl, Drallzerzeugung, Einbauen und Wirbelschicht)

Kolbenströmer:
+ für feste Rückstände Transportbänder, Herdwagen, Schubbeeinrichtung

+ für Gase Strömungsrohr (Bernhigungsstrecke)

- Verweilzeit

+ zugeführte Massenströme
+ Transportgeschwindigkeiten des Feststoffes
+ Geschwindigkeiten der Gase

- Zusatzstoffe siehe Reaktorverhalten

Additive:

+ Eismischen in den zu behandelnden Stoffstrom (s. Reaktorverhalten)
+ Anpassen der Additivmassenströme an die Reaktionsbedingungen

Bett:

Anpassen des Bettmassenstroms an Art und Strom des Rückstandes

Zusatzbremsstoff:

an verschiedenen Orten in Abhängigkeit von Stochiometrie und Temperatur zugeben

Bild 5b: Maßnahmen zum Steuern der Haupteinflußgrößen: hier Niveau in den einzelnen Zonen.

Apparat Brennkammersysteme

Einsatzstoffe	gasförmig, flüssig, staubförmig
Sauerstoffkonzentration	unter- bis überstöchiometrisch; in weiten Bereichen variabel; falls am Reaktoraustritt (Überschichttemperatur; Bezeichnung "Brennkammer"; falls am Ende Unterschichttemperatur; Bezeichnung "Vergasungsreaktor")
Steuerung längs des Reaktionsweges des Verstromungsweges	durch Steuerung von Oxidationsmittel und Brennstoff längs des Verstromungsweges sehr gut möglich (einbringen über Rührkesselteilenein)
Temperatur	unterschiedliche Verstromungstemperaturen im Bereich von 1000°C bis 2000°C ggf. auch höher; Bereich sehr variabel
Steuerung längs des Reaktionsweges	neben der Steuerung von Oxidationsmittel und Brennstoff über dem Reaktionsweg, insbesondere Eingriffe durch Abgasrückführung, Wassereindüsung usw. möglich; Indirekte Wärmeübertragung, auskoppelung durch entsprechende Heiz- bzw. Kühlsysteme; viele Möglichkeiten der Steuerung gegeben
Druck	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa. Unterdruck; Hochdruckverstromung selten; Druckvergasung häufiger
Reaktorverhalten	strömungs-technisch können sowohl Rührkessel- als auch Kolbenströmer-Charakteristiken für Staub und Gas angetroffen werden
Verweilzeit	im Bereich von Sekunden (bei höherem Druck entsprechend länger); durch Lastzustand einstellbar
Steuerung längs des Reaktionsweges	nur schwer möglich; Verweilzeitverteilung über Reaktorverhalten steuerbar
Zusatzstoffe	Additive insbesondere über Rührkesselteilenein einbringen, so wohl zur Schadstoffeinbindung (z.B. Schwefeldioxid, Stickstoffoxide) als auch zur Beeinflussung der Schmelzkezeigenschaften und Schmelztemperatur der Stäube
Einsatzbereiche	Verstromung von Rückständen: Nachverbrennung innerhalb anderer industrieller Behandlungsverfahren; Verstromung von Rückständen zur Erzeugung von Prozeßgas; Vergasung Verstromungsverfahren (z.B. Rückführung von Chlor als Salzsäure in den Produktionskreislauf usw.)

Bild 6: Charakterisierung von Brennkammersystemen.

Drehrohre

Apparat	Einzelstoffe	Sauerstoffkonzentration	Steuerung längs des Reaktionsweges	Temperatur	Steuerung längs des Reaktionsweges	Druck	Reaktorverhalten	Feststoff	Gas	Verweilzeit	Steuerung längs des Reaktionsweges	Zusatzstoffe
	flüssig, pastös, stückig	Niveau	Sauerstoffabschub (Pyrolyse) oder überschichtomnestisch (Verfeuerung); unterschichtomnestisch (Vergasung) nicht üblich	In der Regel nicht möglich; in Einzelzellen durch spezielle Sauerstoffanlagen	Niedertemperatur (z.B. Pyrolyse, indirekte Beheizung, z.B. 400°C) bis Hochtemperatur (z.B. 1000°C, 1200°C, 1500°C ggü. höher) bei entsprechender feuerfester Auskleidung	direkte und indirekte Wärmein- bzw. -auskopplung durch Gegen- und Gleichtstromführung; Steuerung darüber hinaus schwierig	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagenmechanischen Gründen wenig Pa. Unterdruck	einzelne Abschnitte sind über dem Querschnitt wegen der Feststoffverweilzeit als Rührkessel zu betrachten, über die gesamten Reaktorlänge ergibt sich angedeutet eine Kolbenstrom-Charakteristik	das Reaktorverhalten der Gasphase ist angedeutet durch eine Kolbenstrom-Charakteristik zu beschreiben; Gas überströmt Feststoff und ist getrennt nachzuverfeuern	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden; durch Drehzahl und Füllungsgrad einstellbar	kaum möglich	Additive z.B. zur Beeinflussung der Schlackeeigenschaften und Schmelztemperaturen
												Pyrolyse als Verfahrensabschnitt z.B. bei Sonderabfall; Verfeuerung als Verfahrensabschnitt zur Vorbehandlung der Abtreunung einer Metallfraktion

Bild 7: Charakterisierung von Drehrohren.

Rostsysteme

Apparat	Einzelstoffe	Sauerstoffkonzentration	Steuerung längs des Reaktionsweges	Temperatur	Steuerung längs des Reaktionsweges	Druck	Reaktorverhalten	Feststoff	Gas	Verweilzeit	Steuerung längs des Reaktionsweges	Zusatzstoffe	Einzelbereiche (Beispiele)	
	stückig, in Verbindung mit einem Feststoff- oder Inertbett auch pastös	Überschichtomnestisch üblich (Verfeuerung); Gas Nachverfeuerung möglich; Unterschichtomnestisch (Pyrolyse) nicht üblich	Niveau	Benötigter Reaktorleertemperatur bis ca. 1000 °C und höher; mittlere Temperaturen in mehreren Zonen sehr gut einstellbar; Verfeuerung, Reaktorabbrand des Feststoffes beeinflussbar	Bedieneroberfläche niedrigere	Niveau	Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftverfeuerung, Abgasrückführung, Wasser-/Dampfklühung)	bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagenmechanischen Gründen wenig Pa. Unterdruck	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer Rost-Charakteristik (z.B. Rücklaufstrom) oder einer Rost-Charakteristik (z.B. Wandstrom) angedeutet werden; über die gesamte Reaktorlänge ergibt sich angedeutet eine Ks-Charakteristik	a) Oxidationsmittel usw. stromt zwangsweise durch das Bett und wird gleichmäßig über der Rostfläche verteilt damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Gegenstromführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich; Gasbehandlung im nachfolgenden Verfahrensteil leicht notwendig (z.B. Nachverfeuerung)	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden; durch Rostgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar	durch gemeinsame Geschwindigkeitsanpassungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung des Ausstromes am erforderlichen für zusätzliche Verfeuerung des Ausstromes am Rostende Steuerung durch Austragswalze	Additive zur Schmelzfeststoffbindung in den Feststoff und Beschleunigung der Eigenschaften der verbindenden Roststoffe (Asche, Schlacke); Inertstoffe z.B. Tia-gematrix für event. leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoffe)	Verfeuerung als Verfahrensabschnitt (Rostmüll, Feststoffabbrand); Separieren von Metallen aus Verbundstoffen bei niedrigen Temperaturen und gleichzeitig unterschichtomnestischen Verfeuerung (erste Versuche)

Bild 8: Charakterisierung von Rostsystemen.

Btgenöfen

Apparat	Einlaßstoffe	Sauerstoffkonzentration	Steuerung längs des Reaktionsweges	Temperatur	Niveau	Steuerung längs des Reaktionsweges	Druck	Reaktorverhalten	Feststoff	Gas	Verweilzeit	Steuerung längs des Reaktionsweges	Zusatzstoffe	Einlaßbereiche
	stüßig mit enger Korngrößenverteilung, pastös	unterschiedslos (Verdünnung) üblich, unterschiedslos (Verdünnung) denkbar,	Zu- und Abfuhr von Gasströmen in den einzelnen Ebenen möglich (z.B. Luftströmung, Sauerstoffzufuhr, Abgasrückführung); Verteilung schwierig	in den Hauptreaktionszonen bei ca. 950°C	Steuerung längs des Reaktionsweges durch Luftströmung, Abgasrückführung usw.	Wärme- bzw. -auskopplung durch Gegen- und Gleichstrom-	bei Umgebungsdruk; in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenig Pa-Unterdruck	Durchmischung des Feststoffes in den einzelnen Etagen Rheinstoff-Charakteristik; insgesamt kann das Reaktorverhalten durch eine Kolbenströmung-Charakteristik angenähert werden	das Verhalten des Gases Rheinstoff-Kolbenströmung, bei Gegenstromführung wird die Einhaltpfe (Energie) des ausgetragenen Feststoffes (Asche) durch Abkühlung genützt (Wärmerückgewinnung aus der Asche); Gasbehandlung im nachfolgenden Verfahrensschritt notwendig (z.B. Nachverbrennung)	im Minuten- bis Stundenbereich durch Drehzahl und Füllungsgrad einstellbar	kaum möglich, da alle Transportrichtungen (z.B. Kollarme) in der Regel gleiche Geschwindigkeit besitzen	Additive z.B. zur Einbindung von Schadstoffen	Verdünnung als Verfahrensschritt (z.B. Kollarmaschinen aus verschiedenen Bereichen), gut geeignet für eine Wärmerückgewinnung aus der Asche	Einlaßbereiche (Beispiele)

Bild 9: Charakterisierung von Btgenöfen.

Wirbelschichtreaktoren

Apparat	Einlaßstoffe	Sauerstoffkonzentration	Niveau	Steuerung längs des Reaktionsweges	Temperatur	Niveau	Steuerung längs des Reaktionsweges	Druck	Reaktorverhalten	Feststoff/Gas	Verweilzeit	Niveau	(mittlere Verweilzeit)	Steuerung längs des Reaktionsweges	nicht möglich	Zusatzstoffe	Einlaßbereiche
Wirbelschichtreaktoren	staubförmig bis stückig mit enger Korngrößenverteilung, pastös, flüssig	unterschiedslos (Vergasung) oder übersäuerstoffarm (Verwertung)	Sauerstoffüberschuß (Pyrolyse) nicht üblich	bedingt möglich, durch Zuführung über der Reaktorhöhe; besser möglich bei mehreren übereinander angeordneten Wirbelschichten	bis ca. 850°C und höher	Steuerung längs des Reaktionsweges durch Gas- und Feststoffmassenstrom steuerbar	im Minutenbereich; falls erforderlich durch Feststoffrückführung (Zirkulation) höher	zwischen Umgebungsdruck bis Hochdruck bei ca. 2 MPa	die Verwirbelung von Gas und Feststoff im "Wirbelschicht"-Reaktor ist eine Rheinstoff-Charakteristik; hohe Strömungs- und Reaktionsgeschwindigkeiten bedingen sehr guten Kontakt zwischen Feststoff (Rückstand) und Gas	Verweilzeit	Niveau	(mittlere Verweilzeit)	Steuerung längs des Reaktionsweges	nicht möglich	Zusatzstoffe	Einlaßbereiche	

Bild 10: Charakterisierung von Wirbelschichtreaktoren.

Durchlaufofen (z.B. Tunnelofen, Bandofen)

Einsatzstoffe	stücker, auch größere Gegenstände
Sauerstoffkonzentration	unterstöchiometrische (reduzierende) und überstöchiometrische (oxidierende) Fahrweise üblich
Niveau	
Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einblinden in mehreren Zonen zu- und abblinden von Gasen längs des Weges sehr gut steuerbar (z.B. Luft-/Sauerstoffströmung, Abgasrückführung)
Temperatur	in der Heizzone von 800°C bis 1500°C
Reaktionsweges des Druck	in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenigste Pa-Unterdruck
Reaktorverhalten	der Feststoff wird auf einem Transportmittel gefördert, dabei kann er auf dem Transportmittel ruhen (Transportwagen) oder auch durchmischt werden (z.B. Rührwerk über einem Transportband)
Gas	in der Regel Kolbenstromer-Charakteristik; Einfließen von Rührkesselselementen in Zonen möglich (z.B. Impulsbrenner)
Verweilzeit	im Bereich von mehreren Minuten, Stunden bis Tagen; durch die Geschwindigkeit des Transportmittels in weiten Bereich steuerbar
Niveau (mittlere Verweilzeit)	nicht möglich, alle Elemente des Ofens haben die gleiche Transportgeschwindigkeit
Reaktionsweges	Steuerung längs des Reaktionsweges
Zusatzstoffe	in der Regel Zusatzbrennstoff Additivstoffe nicht üblich Verbrennung bei extrem hohen Verweilzeiten; thermische Behandlung von Stoffen mit sehr hohem Inwertanteil, da Vorwärm- und Kühlzone zur Wärmerückgewinnung aus dem Feststoff möglich
Einsatzbereiche (Beispiele)	

Bild 11: Charakterisierung von Durchlaufofen

Schachtreaktoren

Apparat	
Einsatzstoffe	stückig
Sauerstoffkonzentration	häufig reduzierende Atmosphäre üblich
Steuerung längs des Reaktionsweges	über Zu- und Abführungen von Gasströmen bedingt möglich; Verlebung über den Querschnitt schwierig; eine optimale Verteilung erfordert häufig Einbauten deren Anbringung schwierig ist
Temperatur	Temperatur z.B. von 1000°C, 1200°C, 1600°C ggf. höher bei entsprechender feuerfester Auskleidung (z.B. Einschnitzeln von Schrott)
Steuerung längs des Reaktionsweges	direkte und indirekte Wärmeinkopplung durch Gegen- und Zu- und Abführungen von Gasströmen möglich
Druck	von Umgebungsdruk bis Hochdruck (bis 20 MPa und mehr) möglich
Reaktorverhalten	der Schacht entspricht angeblich einer Kolbenstromer-Charakteristik; eine Vermischung des Feststoffes findet beim Absinken nur bedingt statt
Gas	zwangsweise Durchströmung der Schüttung als Kolbenströmer; Vermischung über dem Querschnitt begrenzt
Verweilzeit	im Bereich von mehreren Stunden; über die zu- und abgeführten Massenströmen bedingt steuerbar
Steuerung längs des Reaktionsweges	aufgrund der konstruktiv nachunterschieden Schüttung kaum möglich
Zusatzstoffe	Additiv z.B. zur Beeinflussung der Schmelzeigenschaften, Zusatzbrennstoff als Reduktionsmittel z.B. Koks
Einsatzbereiche (Beispiele)	Vergasung als Verfahrensteilschritt (z.B. Druckvergasung); erste Versuche in verschiedenen Bereichen (z.B. Rückstände aus der Automobilindustrie)

Bild 12: Charakterisierung von Schachtreaktoren.

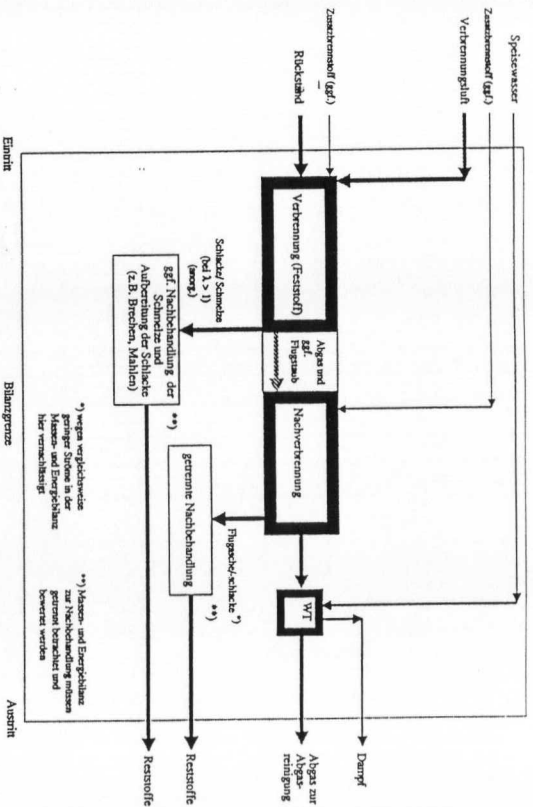
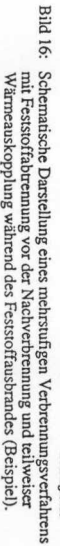


Bild 13: Schematische Darstellung eines mehrstufigen Verbrennungsverfahrens mit Feststoffverbrennung vor der Nachverbrennung (Beispiel).



Bild 14: Beispielhafte Massenbilanz zu Bild 13 (Bilanzgrenze siehe dort; Speisewasser- (Eintritt) und Dampfmassenstrom (Austritt) gleich groß, deshalb hier keine Berücksichtigung).



Wärmeauskopplung während des Feststoffausbrandes (Beispiel).

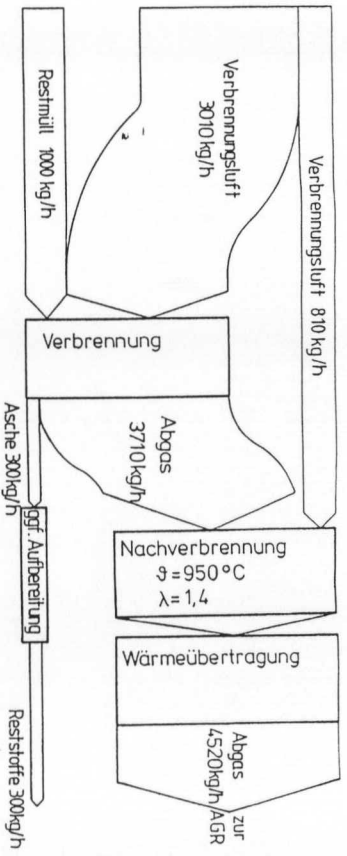


Bild 17: Beispielfhafte Massenbilanz zu Bild 16 (Bilanzgrenze siehe dort; Speisewasser- (Eintritt) und Dampfmassenstrom (Austritt) gleich groß, deshalb hier keine Berücksichtigung).

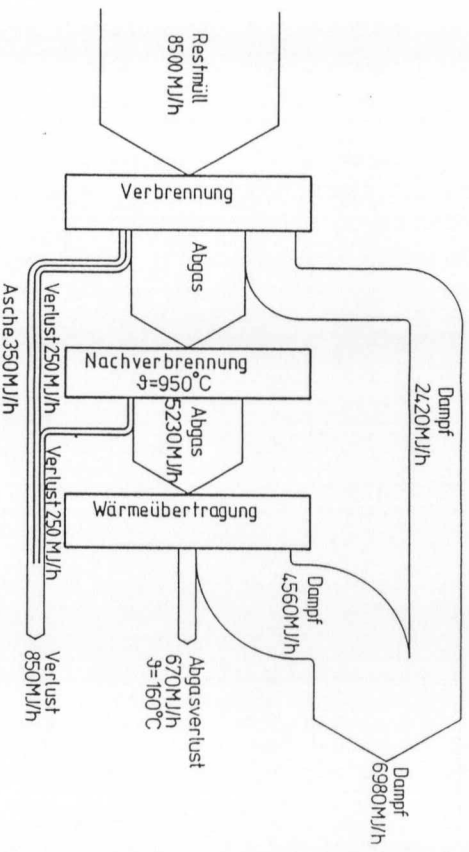
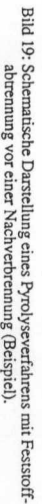
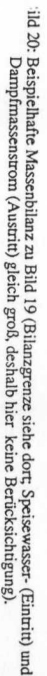
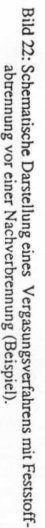


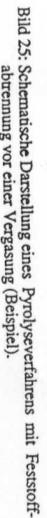
Bild 18: Beispielfhafte Energiebilanz zu Bild 16 (Bilanzgrenze siehe dort).



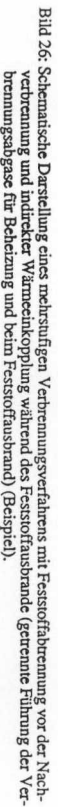
VDI-BERICHT







abrennung vor einer Vergasung (Beispiel).



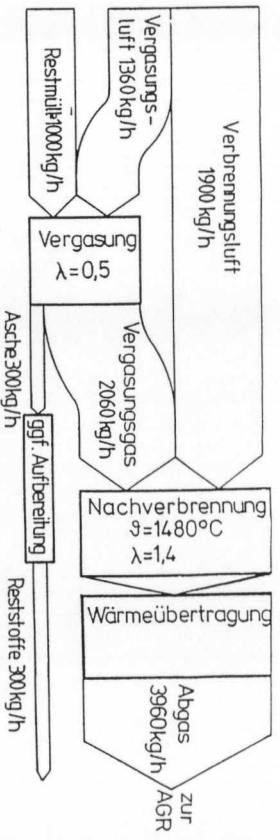


Bild 23: Beispielhafte Massenbilanz zu Bild 22 (Bilanzgrenze siehe dort: Speisewasser- (Eintritt) und Dampfmassenstrom (Austritt) gleich groß, deshalb hier keine Berücksichtigung).

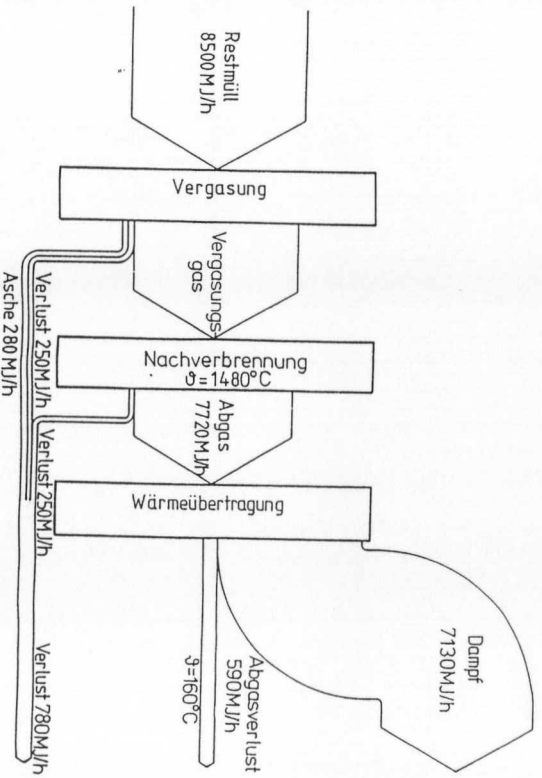


Bild 24: Beispielhafte Energiebilanz zu Bild 22 (Bilanzgrenze siehe dort).