

Entwicklungsmöglichkeiten der Prozeßführung bei Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung

Prof. Dr.-Ing. R. Scholz, Dr.-Ing. M. Beckmann, Clausthal-Zellerfeld

Thermische Behandlungsanlagen können grundsätzlich in den Teil des thermischen Hauptverfahrens und den Teil zusätzlicher Verfahrensschritte wie Abgasreinigung, elektrische Stromerzeugung, sonstige Hilfseinrichtungen usw. aufgeteilt werden.

Nachdem in den vergangenen Jahren mit großen Anstrengungen insbesondere die Abgasreinigungs- und Reststoffnachbehandlungsverfahren (Sekundärmaßnahmen) verbessert worden sind und die entsprechend dem Stand der Technik ausgerüsteten Anlagen damit die gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffemissionen erfüllen, liegt gegenwärtig der Entwicklungsschwerpunkt zunehmend im Bereich des sogenannten thermischen Hauptverfahrens (Primärmaßnahmen). Hervorzuheben sind hierbei insbesondere die Zielstellungen:

- Senkung der Abgasmassenströme und damit
- Reduzierung der Emissionsfrachten,
- Beeinflussung der Reststoffeigenschaften (Glühverlust (Ausbrand), Eluat),
- Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades usw..

Um prozeßtechnische Möglichkeiten zu erörtern, hat man zunächst abhängig von den Eigenschaften der Abfallstoffe die Haupteinflußgrößen

- Sauerstoffangebot, Temperatur, Verweilzeit, Vermischung, Druck, usw.

näher zu betrachten. Dabei zeigt sich, daß es nicht sinnvoll erscheint, nur eine Größe wie z.B. Temperatur oder auch zwei Größen wie z.B. Temperatur und Verweilzeit für sich allein vorzuschreiben. Vielmehr hat man die o.g. Parameter insgesamt zu behandeln

- sowie die Verteilung und die Steuerungsmöglichkeiten der o.g. Haupteinflußgrößen entlang des Reaktionsweges zu diskutieren.

Vor dem Hintergrund der Entwicklungsmöglichkeiten der Prozeßführung bei klassischen Verfahren mit Rostsystemen wird in dem vorliegenden Beitrag zunächst kurz auf die sog. neuen Verfahren eingegangen. Danach werden die hier in Rede stehenden klassischen und die neuen Verfahren im Hinblick auf einen Vergleich so aufgeteilt, daß sie sich aus bekannten Grundbausteinen der Verfahrenstechnik zusammensetzen lassen. Dabei müssen für die Vergleichbarkeit der Verfahren zunächst gleiche Zielvorgaben und zugehörige Bilanzgrenzen festgelegt werden. Danach sind so viele Teilschritte miteinander zu koppeln, bis die Zielvorgaben erreicht sind, d.h.,

- bis der gleiche Zweck (Erzeugung elektrischen Stromes, Prozeßdampfes usw.) erreicht ist und
- bis die einzelnen austretenden Stoffströme
 - * dabei jeweils gleichen Anforderungen genügen (z.B. Eluierbarkeit der Reststoffe, Schadstoffkonzentrationen der Abgase usw.),
 - * direkt in die Umwelt entlassen bzw.
 - * direkt einer stofflichen Nutzung zugeführt werden können.

Danach wird weiter eine Einschätzung des Entwicklungspotentials von Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung gegeben.

Die gegenwärtigen Entwicklungen beinhalten beispielsweise Maßnahmen wie:

- Optimierung der Verteilung der Primärluft entlang des Rostweges zur Beeinflussung der Asche-/Schlackeeigenschaften,
- Abgasrückführung,
- Sauerstoffanreicherung der Primärluft,
- Einsatz wassergekühlter Roste,
- Weiterentwicklung der Regelung (z.B. Infrarotkamera),
- Einbindung von Prozeßmodellen zur betrieblichen Optimierung und zur Projektierung.

Darüber hinaus werden für künftige Entwicklungen auch neue, in der Erprobung befindliche Verfahrenskonzepte mit Rostsystemen wie z.B.

- die Vergasung mit Luft auf dem Rost und damit zusammenhängend
- die eigenständige Nachverbrennung der erzeugten Gase sowie
- das Versintern oder, falls zwingend vorgegeben, das Einschmelzen der Reststoffe

diskutiert.

Es zeigt sich, daß bei den "klassischen" Verfahren mit lang erprobter und bewährter Technik in den letzten Jahren erhebliche Entwicklungsschritte – z.T. auch durch die neuen Verfahren ausgelöst – durchgeführt wurden. Von einer Ablösung klassischer Verfahren kann derzeit nicht gesprochen werden. Es gilt somit für neue Verfahren wie für klassische Verfahren gleichermaßen, künftig die jeweils vorhandenen Entwicklungspotentiale zu untersuchen und in die Praxis umzusetzen.

Entwicklungsmöglichkeiten der Prozeßführung bei Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung

Prof. Dr.-Ing. R. Scholz, Dr.-Ing. M. Beckmann, Clausthal-Zellerfeld

Thermische Behandlungsanlagen können grundsätzlich in den Teil des thermischen Hauptverfahrens und den Teil zusätzlicher Verfahrensschritte wie Abgasreinigung, elektrische Stromerzeugung, sonstige Hilfseinrichtungen usw. aufgeteilt werden.

Nachdem in den vergangenen Jahren mit großen Anstrengungen insbesondere die Abgasreinigungs- und Reststoffnachbehandlungsverfahren (Sekundärmaßnahmen) verbessert worden sind und die entsprechend dem Stand der Technik ausgerüsteten Anlagen damit die gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffemissionen erfüllen, liegt gegenwärtig der Entwicklungsschwerpunkt zunehmend im Bereich des sogenannten thermischen Hauptverfahrens (Primärmaßnahmen). Hervorzuheben sind hierbei insbesondere die Zielstellungen:

- Senkung der Abgasmassenströme und damit
- Reduzierung der Emissionsfrachten,
- Beeinflussung der Reststoffeigenschaften (Glühverlust (Ausbrand), Eluat),
- Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades usw..

Um prozeßtechnische Möglichkeiten zu erörtern, hat man zunächst abhängig von den Eigenschaften der Abfallstoffe die Haupteinflußgrößen

- Sauerstoffangebot, Temperatur, Verweilzeit, Vermischung, Druck, usw.

näher zu betrachten. Dabei zeigt sich, daß es nicht sinnvoll erscheint, nur eine Größe wie z.B. Temperatur oder auch zwei Größen wie z.B. Temperatur und Verweilzeit für sich allein vorzuschreiben. Vielmehr hat man die o.g. Parameter insgesamt zu behandeln

- sowie die Verteilung und die Steuerungsmöglichkeiten der o.g. Haupteinflußgrößen entlang des Reaktionsweges zu diskutieren.

Vor dem Hintergrund der Entwicklungsmöglichkeiten der Prozeßführung bei klassischen Verfahren mit Rostsystemen wird in dem vorliegenden Beitrag zunächst kurz auf die sog. neuen Verfahren eingegangen. Danach werden die hier in Rede stehenden klassischen und die neuen Verfahren im Hinblick auf einen Vergleich so aufgeteilt, daß sie sich aus bekannten Grundbausteinen der Verfahrenstechnik zusammensetzen lassen. Dabei müssen für die Vergleichbarkeit der Verfahren zunächst gleiche Zielvorgaben und zugehörige Bilanzgrenzen festgelegt werden. Danach sind so viele Teilschritte miteinander zu koppeln, bis die Zielvorgaben erreicht sind, d.h.,

- bis der gleiche Zweck (Erzeugung elektrischen Stromes, Prozeßdampfes usw.) erreicht ist

und

- bis die einzelnen austretenden Stoffströme
 - * dabei jeweils gleichen Anforderungen genügen (z.B. Eluierbarkeit der Reststoffe, Schadstoffkonzentrationen der Abgase usw.),
 - * direkt in die Umwelt entlassen bzw.
 - * direkt einer stofflichen Nutzung zugeführt werden können.

Danach wird weiter eine Einschätzung des Entwicklungspotentials von Rostsystemen zur thermischen Abfallbehandlung gegeben.

Die gegenwärtigen Entwicklungen beinhalten beispielsweise Maßnahmen wie:

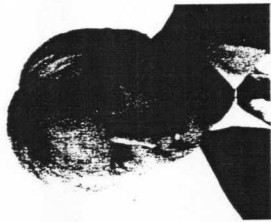
- Optimierung der Verteilung der Primärluft entlang des Rostweges zur Beeinflussung der Asche-/Schlackeeigenschaften,
- Abgasrückführung,
- Sauerstoffanreicherung der Primärluft,
- Einsatz wassergekühlter Roste,
- Weiterentwicklung der Regelung (z.B. Infrarotkamera),
- Einbindung von Prozeßmodellen zur betrieblichen Optimierung und zur Projektierung.

Darüber hinaus werden für künftige Entwicklungen auch neue, in der Erprobung befindliche Verfahrenskonzepte mit Rostsystemen wie z.B.

- die Vergasung mit Luft auf dem Rost und damit zusammenhängend
- die eigenständige Nachverbrennung der erzeugten Gase sowie
- das Versintern oder, falls zwingend vorgegeben, das Einschmelzen der Reststoffe

diskutiert.

Es zeigt sich, daß bei den "klassischen" Verfahren mit lang erprobter und bewährter Technik in den letzten Jahren erhebliche Entwicklungsschritte – z.T. auch durch die neuen Verfahren ausgelöst – durchgeführt wurden. Von einer Ablösung klassischer Verfahren kann derzeit nicht gesprochen werden. Es gilt somit für neue Verfahren wie für klassische Verfahren gleichermaßen, künftig die jeweils vorhandenen Entwicklungspotentiale zu untersuchen und in die Praxis umzusetzen.



Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz
geb. 1943 in Breslau

Maschinenbaustudium an der „Technischen Universität Hannover“ mit dem Studienschwerpunkt „Kraft- und Arbeitsmaschinen“ (Kraftwerkstechnik, Thermische Turbomaschinen, Dampfkessel)

Versuchingenieur bei der „Thyssen Niederhein AG“ (früher „Hüttenwerk Oberhausen AG“) in Oberhausen auf dem Gebiet der Stoff- und Energieumsetzung im Hochtemperaturbereich (Industrieöfen zur Stahlerzeugung und -behandlung)

Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent (ab 1973 als Oberingenieur) am Institut für Wärmetechnik und Industrieofenbau der Technischen Universität Clausthal (1972 Promotion zum Dr.-Ing.)

Professor an der „Hochschule Bremerhaven“ (Fachhochschule) für den Studienschwerpunkt „Heizungs-, Klima-, Lüftungstechnik“

Professor am „Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik“ der „Technischen Universität Clausthal“, Leitung der Abteilung „Technische Thermodynamik und Energieumwandlung“, Forschungsschwerpunkte sind ausgerichtet auf „Thermische Behandlung von Abfällen“, „Optimierung des Energie- und Rohstoffeinsatzes bei Hochtemperaturprozessen“, „Schadstoffarme Nutzung schwieriger Brennstoffe“, „Modellierung komplexer Systeme in Hinblick auf Minimierung des kumulierten Stoff- und Primärenergieeinsatzes“

1968 – 1971

1971 – 1976

1976 – 1983

seit 1983

Entwicklungsmöglichkeiten der Prozeßführung bei Rostsystemen zur Abfallbehandlung

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz, Dr.-Ing. M. Beckmann,
Dipl.-Ing. F. Schulenburg; Clausthal-Zellerfeld

1 Einleitung

Im Bereich der thermischen Abfallbehandlungsanlagen werden Rostsysteme ganz überwiegend zur Behandlung von Restabfällen aus Hausmüll, häuslichem gewerblichem oder dgl. eingesetzt. In den vergangenen Jahren standen Entwicklungen bei Abgasreinigungsanlagen usw. (sog. Sekundärmaßnahmen) im Vordergrund, so daß heute die gesetzlichen Emissionsanforderungen grundsätzlich – wie auch bei anderen Arten von thermischen Behandlungsanlagen – erfüllt werden. Gegenwärtig liegt ein Entwicklungsschwerpunkt verstärkt auf der Entwicklung und Optimierung der Prozeßführung des thermischen Hauptverfahrens (sogenannte Primärmaßnahmen), d.h. im Bereich des Rostes, der Nachverbrennung usw. (vgl. Bild 1), um

- die Abgasmassenströme (und damit die Schadstofffrachten) und auch die Abgasreinigungsanlagen zu verkleinern,
- die Energienutzung zu verbessern,
- die Reststoffeigenschaften zu beeinflussen.

Im folgenden soll in diesem Zusammenhang eine Einschätzung zum Stand der Technik und zur künftigen Entwicklung bei Rostsystemen gegeben werden, wobei gleichzeitig auch auf Kriterien zur Beurteilung eingegangen wird. Es zeigt sich, daß dies als Beispiel vorweg genommen, daß bei der derzeitigen Diskussion um die Höhe des anzustrebenden Temperaturniveaus im Prozeß natürlich auch andere Haupteinflußgrößen zu betrachten sind. Im Zusammenhang mit der Prozeßführung sind die Haupteinflußgrößen jeweils als Gruppe zu diskutieren. Die Betrachtung nur einer Haupteinflußgröße für sich allein – wie die Temperatur – ist für Interpretationen nicht ausreichend.

2 Abfallcharakterisierung

Rostsysteme sind insbesondere für überwiegend stückige Restabfälle geeignet. Dabei sind folgende Gesichtspunkte zur Kennzeichnung wichtig:

- Elementarzusammensetzung
 - brennbare und
 - flüchtige Bestandteile,
 - feste Inertstoffe¹⁾ (Asche),
 - Wasser usw.

¹⁾ Inertstoffe seien hier Stoffe oder Stoffgemische, die keine „brennbaren Bestandteile“ haben

- Spurenanalyse

- Schadstoffkonzentrationen (z.B. Halogene, Schwermetalle, halogenierte Kohlenwasserstoffe),

- Konsistenz und

- Heterogenität der Zusammensetzung.

Von dem in der Bundesrepublik gegenwärtig anfallenden Hausmüll und haushälterischen Gewerbeabfall werden der größte Teil einer Deponie und nur ein kleinerer Teil einer thermischen Behandlung zugeführt. Beispielhaft zeigt das Bild 2 eine Zusammensetzung von Hausmüll. Der mittlere Heizwert liegt (üblich) in einem Bereich von $h_{\text{u}} = 6 \text{ MJ/kg}$ bis 11 MJ/kg . Entsprechend den zu den einzelnen Fraktionen gehörenden Heizwerten kann für die Zusammensetzung in Bild 2 ein mittlerer Heizwert (Gesamtheizwert) von ca. $h_{\text{u}} = 8,5 \text{ MJ/kg}$ ermittelt werden. Aus Bild 2 ersieht man weiter, daß der mittlere Heizwert insbesondere durch Fraktionen, deren Heizwert sehr stark nach oben (z.B. Kunststoffe) bzw. nach unten (z.B. Komponenten mit hohem Inertanteil) von dem mittleren Wert abweicht, beeinflusst werden kann. Änderungen des Anteils von Vegetabilien haben hingegen weniger Einfluß, da deren Heizwert in der Größe des Gesamtheizwertes liegt.

Aus der Zusammensetzung des Abfalls können erste Aussagen z.B. zu verfahrenstechnischen Eigenschaften abgeleitet werden. So ist der Einfluß der Luftzahl λ auf zu erwartende Temperaturen für die o.g. Zusammensetzung (Bild 2) in Bild 3 ersichtlich. Es ist einerseits für das Erreichen ausreichend hoher Temperaturen (unter Beachtung von Wärmeverlusten) und andererseits auch für die Verminderung des Abgasvolumens und somit zur Entlastung nachgeschalteter Aggregate sinnvoll, den Luftüberschuß so gering wie möglich zu halten. Aufgrund des relativ niedrigen Mindestluftbedarfes (hier $1_{\text{min}} = 2,8 \text{ kg Luft/kg Abfall}$) ist im vorliegenden Fall der Einfluß einer Luftvorwärmung zur Erhöhung der Reaktionstemperatur relativ gering. Auf die einzelnen Möglichkeiten der Prozeßführung wird weiter unten noch näher eingegangen.

3 Einordnung von Rostsystemen in den Bereich thermischer Behandlungsanlagen

3.1 Haupteinflußgrößen

Um prozeßtechnische Möglichkeiten erörtern zu können, müssen zunächst die Haupteinflußgrößen näher betrachtet werden (Bild 4). Dabei sind nicht nur das jeweilige Niveau, sondern auch die Verteilung der Haupteinflußgrößen längs des Reaktionsweges zu beachten.

- Der Einsatzstoff (Input, Abfall, Restabfall) ist in der Regel vorgegeben und im Hinblick auf Konsistenz, Zusammensetzung und anfallende Mengen in Abhängigkeit von der Zeit zu beschreiben.

- Mittels des Sauerstoffangebots lassen sich Thermolyse (Pyrolyse), Vergasung und Verbrennung unterscheiden. Bei der Thermolyse liegt kein Sauerstoffangebot vor. Eine Wärmezufuhr bewirkt dann eine Trocknung, Entgasung und Pyrolyse des Abfalls. Bei der Vergasung erfolgt eine Sauerstoffzufuhr so, daß sich stöchiometrische Bedingungen einstellen. Bei der Verbrennung führt die Sauerstoffzufuhr zu stöchiometrischen bzw. überschüssigen Bedingungen. Als Reaktionsgas für die thermische Behandlung des Abfalls kann Luft, mit Sauerstoff angereicherte Luft, technisch reiner Sauerstoff, Luft mit zurückgeführtem Abgas usw. vorgesehen werden.
- Die Beeinflussung der Prozeßführung (Einstellung des Niveaus und der Verteilung) der Größen längs des Reaktionsweges kann je nach Bedarf in vielfältiger Weise geschehen.) So kann z.B. die Sauerstoffkonzentration durch Luft- und Brennstoffzufuhr, Sauerstoff- und Inertgaszufuhr, Abgasrückführung und Lastzustand variiert werden (Variation der Reaktionsgase). Entsprechende Maßnahmen kommen auch zur Steuerung der Temperatur längs des Reaktionsweges, zur Schadensbegrenzung (z.B. NO_x) und zur Ausbrandbeeinflussung infrage [z.B. 5 bis 13].
- Sehr wichtig ist die richtige Wahl des Reaktorverhaltens. Häufig ist als Beispiel eine Reihenschaltung von Rührkessel, d.h. idealem Vermischer (z.B. für Stoffe, die miteinander reagieren sollen) und nachfolgend einem Kolbenströmer, d.h. einer nicht mischenden Strecke (z.B. Beruhigungsstrecke zur Ausbrandverbesserung), zu wählen.
- Unter Art der Stoffzuführung ist z.B. die Gestaltung von Eintragsimpuls, Zerstäubung der Einsatzstoffe, Reaktionsgase usw. zu verstehen.
- Verweilzeiten werden im wesentlichen durch Apparategröße und Transportgeschwindigkeiten festgelegt. Bei Feststoffen bewegen sie sich im Bereich „Minuten bis Stunden“ bei Gasen im Bereich „Sekunden“.
- Bei der Wahl der Temperatur ist im Zusammenhang mit den übrigen Haupteinflußgrößen nur ein Mindestniveau zu wählen (zu hohe Temperaturen können teilweise sogar nachteilig sein (z.B. thermische NO_x -Bildung)). Das Temperaturniveau ist im übrigen auch durch Maßnahmen zur direkten und indirekten Wärmein- und -auskopplung (z.B. Wassereindüsung, Strahlungsrohre usw.) zu beeinflussen.
- Der Druck bewegt sich in der Regel bei Umgebungsdruckniveau bzw. aus anlagentechnischen Gründen bei geringem Über- oder Unterdruckniveau. In einigen Fällen kommen „hohe“ Drücke (z.B. Hochdruckvergasung 40 bar) oder niedrige Drücke (z.B. Vorgänge im Teilvakuum) vor.
- Je nach Zielstellung und Art des Einsatzstoffes (Abfall) können verschiedene Zusatzstoffe wie Additive usw. an den verschiedenen Orten zugeführt, Zusatzbrennstoffe verwendet oder auch Maßnahmen zur Beeinflussung des Gutbettes ergriffen werden.

Eine Vielzahl von Möglichkeiten sind so miteinander kombinierbar. Dabei ist anzustreben, daß die unterschiedlichen Aufgaben der Reihe nach in hintereinandergeschalteten Reaktoren „abgearbeitet“ werden. In einigen Anlagen (insbesondere älterer Bauart) gelangen diese verschiedenen Optimierungsaufgaben weniger gut, da zum Baupunkt die Anforderungen (auch gesetzliche) noch entsprechend weniger streng waren. Ein wesentlicher Aspekt künftiger weiterentwickelter Anlagen liegt daher in der Tat in der bautechnischen Hintereinanderschaltung von Elementen, in denen jeweils Teilleiße getrennt optimiert erreicht werden können.

3.2 Apparate

Bei der Realisierung eines thermischen Behandlungsverfahrens bestimmen einerseits die Einsatzstoffe die infrage kommenden Apparate, andererseits legen diese wiederum das mögliche Niveau der Haupteinflußgrößen und deren Steuerungsmöglichkeiten längs des Apparates (Reaktionsweges) zumindest teilweise fest. So kommt z.B. für die thermische Behandlung von stückigen Abfällen häufig ein Rost infrage, weil hier über dem Reaktionsweg eine gestufte Prozeßführung wirkungsvoll möglich ist; für Gemische aus flüssigen und festen Stoffen muß man in der Regel auf ein Drehrohr zurückgreifen. Entsprechend können die Apparate im Hinblick auf die gestellten Anforderungen, die Haupteinflußgrößen, deren Niveau und Steuerung längs des Reaktionsweges, usw. eingeordnet werden. Hauptsächlich handelt es sich dabei um die Typen:

- **Rost** (vgl. Bild 5); z. B. für den Feststoffumsatz bei Hausmüll,
 - **Brennkammer** (vgl. Bild 6); z. B. für gasförmige, flüssige und staubförmige Einsatzstoffe, insbesondere auch bei Einsatz als Nachverbrennungszone¹⁾ bei Rostfeuerungs- und Drehrohranlagen
 - **Drehrohr**; z. B. für Feststoffumsatz bei Sondermüll.
- Mit diesen drei Apparattypen wird heute der größte Teil von Restabfall aus dem Bereich „Hausmüll“ und „Sonderabfall“ verarbeitet. Weitere Apparattypen sind:
- **Wirbelschichtreaktor**; z. B. für den Feststoffumsatz bei Klärschlamm oder anderen entsprechend aufbereiteten staubförmigen bis stückigen Rückständen mit geeigneter enger Korngrößenverteilung,
 - **Etagenöfen**; z. B. für den Feststoffumsatz bei Klärschlamm oder stückigen Stoffen mit der Möglichkeit der Energie-rückgewinnung aus der Asche,
 - **Durchlauföfen**; z. B. für den Feststoffumsatz bei Prozessen mit extrem langen Verweilzeiten,
 - **Schachtofen**.

¹⁾ Häufig ist die „Brennkammer“ im Anschluß an einen Rost (vgl. Bild 1) geometrisch übergangslos über dem Rost angeordnet. Daher spricht man dann nicht von einer Brennkammer, sondern von einer Nachverbrennungszone.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, daß zwischen den Begriffen „Verfahren“ und „Apparat“ sorgfältig unterschieden werden sollte. Ein Apparat kann in ganz unterschiedlichen Verfahren verwendet werden. Beispielsweise benutzt man das Drehrohr nicht nur in der „Sonderabfallverbrennung“, sondern auch bei Entwicklungslinien mit Pyrolyseprozessen (Thermolyse) [14]. Ähnliches gilt für den Apparat „Rost“, auf dem Verbrennungs-, Vergasungs- und Pyrolyseprozesse durchgeführt werden können. Häufig benutzte Begriffe wie „Drehrohrverfahren“ oder „Rostverfahren“ sagen daher über das eigentliche Verfahren nur wenig aus und können sogar irreführend sein.

3.3 Systematische Darstellung

Ein wesentlicher Teil des jeweiligen Gesamtverfahrens (Beispiel Bild 1) ist das sog. thermische Hauptverfahren. Es läßt sich zunächst allgemein grob wie folgt grundsätzlich in zwei thermische Einheiten gemäß Bild 7 weiter aufteilen:

Die erste Einheit dient der Behandlung stückiger, pastöser Abfälle oder auch von Gemischen aus stückigen, pastösen und flüssigen Abfällen mittels Thermolyse, Vergasung oder Verbrennung zum Zwecke der

- Produktion eines inerten Reststoffes mit entsprechend hohem Ausbrand (kleine Werte für Glühverlust und TOC) und/oder der
 - Erzeugung recyclingfähiger Stoffe (auch durch anschließende Stofftrennung).
- Die zweite Einheit dient dazu, mittels Verbrennung oder Vergasung das aus der ersten Stufe stammende

- Gas (Abgas, Pyrolysegas, Vergasungsgas) sowie die darin enthaltenen Flugsäube

und

- je nach Absicht den gegebenenfalls in der 1. Einheit erzeugten Pyrolysekoks nach einer Zwischenaufbereitung umzusetzen.

Ist die 2. Einheit eine Verbrennung, (Verfahren A, B, C in Bild 7), erzeugt man in der Regel entweder Prozeßdampf oder über eine Dampfturbine und einen Generator elektrische Energie. Wird die 2. Einheit als Vergasung (D, E in Bild 7) betrieben, ist eine Prozeßgas- (Synthesegas-) erzeugung für den Einsatz in der chemischen Industrie beabsichtigt. Es ist jedoch auch mit einer zusätzlich nachgeschalteten Synthesegasverbrennung (auch motorisch) die Erzeugung von elektrischer Energie möglich.

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Verfahren müssen zunächst gleiche Zielvorgaben festgelegt werden. Danach müssen so viele Teilschritte miteinander gekoppelt werden, bis die Zielvorgaben erreicht sind, d.h.,

- bis der gleiche Zweck, d. h. z. B. Erzeugung elektrischen Stromes oder Prozeßdampferzeugung, erreicht ist und
- bis die einzelnen austretenden Stoffströme (verbleibenden Reststoffe) dabei jeweils gleichen Anforderungen genügen (z. B. Eluierbarkeit der Aschen, Schadstoffkonzentrationen der Abgabe) und
- bis die einzelnen austretenden Stoffströme jeweils direkt in die Umwelt entlassen bzw. direkt einer vorgesehenen Verwertung zugeführt werden können.

Dabei erweist es sich als zweckmäßig, die Bilanzgrenzen zunächst nur für das thermische Hauptverfahren festzulegen (Teilbilanz). Danach ist unter gleicher Zielvorgabe (s. o.) und gleicher Vorgabe der Anforderungen an die austretenden Stoffe der Bilanzkreis auf das Gesamtverfahren zu erweitern. Für den Fall einer beabsichtigten Erzeugung von elektrischer Energie, ist z. B.

- bei einem klassischen Verbrennungsverfahren in den Bilanzraum des Gesamtverfahrens die Abgasreinigungsanlage, die Turbinenanlage und der Generator usw. mit einzubeziehen,
- bei einem Verfahren mit Synthesegaserzeugung in den Bilanzraum des Gesamtverfahrens die zusätzliche Verbrennung z. B. mit einem Gasmotor, die Reinigung der zugehörigen Motorabgabe, der Generator usw. mit einzuschließen.

Auf Restsystemen können als 1. Einheit sowohl Verbrennung als auch Vergasung aber auch Pyrolyse durchgeführt werden.

Bei der klassischen Behandlung von Restmüll aus Hausmüll wird nach dem dargestellten Schema zunächst eine Verbrennung auf dem Rest (1. Einheit) und anschließend eine Nachverbrennung der aus der 1. Einheit kommenden Gase und Flugschläube in der 2. Einheit (Nachverbrennungszone, Brennkammer o.ä.) durchgeführt. Es handelt sich somit um ein Verfahren nach A in Bild 7. Ausgehend von Bild 1 ist mit Hilfe der vorgenommenen Einteilung die Prozeßführung auf Restsystemen für die „klassische Müllverbrennung“ zunächst in einem vereinfachten Schema nach Bild 8 darstellbar. Bei der Erstellung des Blockfließbildes werden innerhalb der Bilanzgrenzen die wichtigsten Bausteine und deren Kopplung erfaßt. Dabei sollten schon hier die zusätzlich erforderlichen Ströme (betriebshilfsstoffe, elektrische Energie) bzw. auch die austretenden Ströme (Nutzenergie, Wärmeverlust, Abgasströme, Reststoffe) prinzipiell aufgeführt sein. Als Reaktionsgas für die Verbrennungsprozesse wird in den meisten Fällen Luft, gelegentlich auch Zusatzsauerstoff zugeführt. Gegenwärtig werden die Abfälle im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit der Verbrennungsbedingungen nur grob vorbehandelt

(zerkleinert, assortiert), weshalb u. a. zur Erreichung eines niedrigen Glühverlustes der Reststoffe am Ende der ersten Prozeßeinheit (Rost) häufig ein hoher Luftüberschuß erforderlich ist. Bei Restsystemen werden die Reststoffe in der Regel als Asche abgezogen. Vorteilhaft ist dabei ein angesinterter Zustand im Hinblick auf die Verwertung [22, 23]. Wird ein schmelzflüssiger Abzug (Schlacke) der Reststoffe gefordert oder werden aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen thermischen Behandlungsverfahren bei der Asche weitere bzw. andere Behandlungsstufen (Wäsche o.ä.) erforderlich, so müssen diese selbstverständlich in den Bilanzkreis des thermischen Hauptverfahrens mit aufgenommen werden (in Bild 8 als Nachbehandlung bezeichnet). Bei dieser Betrachtungsweise können dann auch Verfahren, die eine sogenannte integrierte Reststoffbehandlung (z. B. mit schmelzflüssigem Abzug) vorsehen, mit Verfahren, bei denen eine zusätzliche Nachbehandlung der Reststoffe erforderlich ist, auf gleicher Basis bewertet werden. Bei dem Verfahrenskonzept A (Bild 8) wird in der Regel zunächst Dampf erzeugt, der für eine energetische Nutzung verwendet oder aber auch wie bereits erwähnt als Prozeßdampf einer stofflichen Nutzung zugeführt werden kann. Bild 9 zeigt nach der gleichen schematischen Vorgehensweise als Beispiel für ein Verfahren nach B das sog. Schmelzbrennverfahren nach Siemens [16]. Hier werden in der 1. Einheit ein indirekt beheiztes Drehrohr und in der 2. Einheit eine Brennkammer verwendet. Zur Darstellung anderer Verfahren wie Noell-Konversionsverfahren, Thermoselect, Plasmax-Verfahren, usw. siehe [16 bis 21, 24].

4 Verbrennung auf dem Rost (klassisches Verfahren)

4.1 Entwicklungsmöglichkeiten

Aufgrund der in den Bildern 5 und 6 dargestellten grundsätzlichen Beeinflussungsmöglichkeiten der Hauptfließgrößen bei den Apparaten Rost und Brennkammer kann man nun das Bild 8 mittels verfahrenstechnischer Gesichtspunkte zur Prozeßführung – auf die klassische Müllverbrennung mit Restsystemen zugechnitten – entsprechend detaillieren bzw. erweitern, wie Bild 10 zeigt.

Zunächst wird der Aufbau des Bildes 10 erläutert und dann an einigen Beispielen gezeigt, wie die verfahrenstechnischen Grundgedanken in die Praxis umgesetzt werden können.

- Um Quenchreaktionen an Wandoberflächen zu vermeiden sind dort hohe Temperaturen erforderlich, was man durch entsprechende Feuerfestauskleidung (1. Einheit und 2. Einheit) erreicht. Dies bedeutet gleichzeitig, daß die Wärmeübertragung weitgehend von dem Feststoffumsatz und der Nachverbrennung getrennt ist, d. h. im wesentlichen in Reihe zu den beiden ersten Einheiten geschaltet ist.
- In der 1. Einheit kann Entlauf des Rostweges über die verschiedenen Zonen durch unterschiedliche Entlauf von Reaktionsgas (in der Regel Luft, aber auch

Sauerstoff und rückgeführtes Abgas) der Sauerstoffpartitionierung und Temperatur im Bett so gesteuert werden, daß gemäß Bild 11 und 12 Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge im Gultbett ablaufen können. Es ist in dem vorliegenden Beispiel von „Verbrennung auf dem Rost“ die Rede, weil die gesamte dem Rost zugeführte Luft (häufig Primärluft genannt) bezogen auf den zugeführten Abfall überstöchiometrische Verhältnisse (z.B. $\lambda = 1,3$) ergibt.

- Die 2. Einheit ist in Bild 10 vollständig getrennt von der ersten gezeichnet. Damit soll verdeutlicht werden, daß man sich, je besser die Entkopplung ist, um so leichter getrennt den unterschiedlichen Teilaufgaben widmen kann, d.h.
 - Optimierung des Feststoffumsatzes in der ersten Einheit (Ausbrand, Temperaturverteilung, Asche ggf. angesintert) und
 - Optimierung der Nachverbrennung von aus der 1. Einheit stammendem Gas und Flugstaub (Optimierung des Ausbrandes und der Minimierung von Schadstoffen (z.B. NO_x))

Die Temperatur kann durch Luftzufuhr und Abgasrückführung gesteuert werden, wobei letztere schon aus Gründen der Verkleinerung der Abgasmassenströme bevorzugt werden sollte. Als Voraussetzung für einen optimalen Ausbrand ist zunächst eine intensive Mischungzone einzusetzen (Rührkessel), was z.B. über Injektorfeinstrahlen (Art der Stoffzuführung) aus rückgeführtem Abgas möglich ist. An den Rührkessel sollte sich eine beruhigte Strömungsstrecke (Kolbenströmer) anschließen, in der die Reaktionen so weit wie erforderlich ablaufen können. Darüber hinaus kann man daran denken zur NO_x -Minderung eine „gestufte Verbrennungsführung“ vorzusehen. Dies ist jeweils im Einzelfall je nach Art der vom Rost kommenden Gase zu prüfen. Anhand des Schaltbildes 10 erkennt man bereits deutlich, daß sich sehr viele Eingriffsmöglichkeiten zur Optimierung, Verbrennung und Entwicklung von Rostsystemen ergeben.

Anhand einiger typischer Beispiele für derzeitige Entwicklungsschritte sei einerseits die Einordnung in das Verfahrensschema des Bildes 10 erläutert und andererseits dargestellt, wie qualitativ theoretische Überlegungen zur Verfahrensführung in der Praxis verwirklicht werden können.

Der Feststoffumsatz auf dem Rost kann längs seines Weges durch verschiedene Maßnahmen beeinflusst werden, was wie erwähnt wegen der sich ständig ändernden Zusammensetzung des Mülls und seines Reaktionsverhaltens von großem Vorteil ist. Damit sind entsprechende Anpassungen und Regelungen auch während des Betriebs möglich. Zu nennen sind vor allem:

- Änderung der Primärluftverteilung (in Bild 12 fünf Zuführungen). Mit der Variation der Primärluftverteilung wird versucht, einerseits den Ascheausbrand insbesondere bei sich ändernden Heizwerten (Bild 13) und Massenströmen zu optimieren und andererseits Temperaturen und Verweilzeiten im Raum un-

mittelbar über dem Bett so zu beeinflussen, daß sich die Bedingungen für eine Nachverbrennung verbessern.

- Neben der Variation der Primärluftverteilung werden Versuche mit unterschiedlicher Sauerstoffanreicherung in den verschiedenen Zonen des Rostes an industriellen Anlagen durchgeführt (z.B. O₂-Anreicherung beim sog. „Syncom“-Verfahren (Bild 14) [26] bis 35 Vol.-% in der Hauptverbrennungszone). Damit wird ein Ausbrand für Deponieklasse I sichergestellt und eine Verkleinerung des Abgasstromes erreicht (Bild 15). Darüber hinaus wird der durch das Bett strömende Gasstrom verkleinert, was eine Verringerung der Flugstaubmengen und des Durchmessers der Flugstaubpartikel bewirkt. Die Verkleinerung der Partikeldurchmesser bedingt wieder einen verbesserten Ausbrand bei sonst gleich bleibenden Verhältnissen.

- Änderung der Rostelementgeschwindigkeit (Transportgeschwindigkeit) zur Änderung von Verweilzeit und Verweilzeitverhalten (z.B. 0,5 h bis 2 h) des Bettes;
- Steuerung der Betthöhe zusätzlich über Geschwindigkeit der Beschickung;
- Zugabe von Zusatzstoffen auf das Bett (Kalkprodukte zur Behandlung von Schadstoffen und Aschebeeinflussung usw.).

Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Ausbrandvorgänge sowie auch Eigenschaften der Aschen können so beeinflusst werden [z.B. 27]. Es ist allerdings zu bemerken, daß in der Regel die Primärluft auch die Aufgabe hat, die Rostelemente zu kühlen. Um sie vor Überhitzung zu schützen, ist häufig der Primärluftvolumenstrom so groß zu wählen, daß insgesamt maximale Aschetemperaturen um 850 °C bis 950 °C nicht überschritten werden, um so zu verhindern, daß die Reststoffe als Schlacke (teigig, flüssig) anfallen. Im Hinblick auf das Eluatverhalten zeigt sich, daß 950 °C ausreichend sind [22]. Es muß jedoch deutlich betont werden, daß, wenn Schmelzfluß (Schlacke) erreicht werden soll, ein zusätzliches Einschmelzaggregat nachzuschalten ist.

Von der Projektierung her hat man weitere Beeinflussungsmöglichkeiten:

- durch den Rosttyp (Wandler, Walzen-, Vorschub-, Rückschubrost usw.), d.h., durch die Art der Gutterdurchmischung selbst kann auf die Prozeßführung und auf den Feststoffumsatz Einfluß genommen werden (z.B. können Rückschubroste im Hinblick auf die Gultbettbewegung nährungsweise als Hintereinanschaltung von Rührkessenelementen aufgefaßt werden [28]). Die Gultbettbewegung bei den verschiedenen Rosttypen ist einerseits ein wichtiger Parameter, andererseits kann man im Zusammenhang mit den vielen Möglichkeiten des Eingriffs auf Rosten keinem bestimmten Rosttyp den Vorzug geben.
- Die prinzipielle Anordnung der Strömungsführung über dem Gultbett ist als Gleichstrom-, Mittelstrom- oder Gegenstromprinzip möglich (Bild 16). Beim

Gleichstromprinzip strebt man eine erste Nachverbrennung der vom Rostanfang kommenden Gase an, beim Gegenstromprinzip sollen die heißen Gase vom Rostende der Trocknungs- und Engtungszone am Rostanfang Wärme zuführen. Diese Überhitzungen können nun wiederum ganz erheblich durch sog. Sekundäreffekte, d.h. durch Strahlungsaustausch zwischen den umliegenden feuerfest ausgekleideten Wänden und der Gutoberfläche, beeinflusst werden, so daß man auch hier nicht einem bestimmten Prinzip den Vorzug geben kann. Bei entsprechender Trennung der Nachverbrennungszone (2. Einheit) von der Rostzone (1. Einheit) können im übrigen die im Gleich- oder Gegenstrom geführten Gase unabhängig von ihrem Zustand am Eintritt in die Nachverbrennung in dieser optimiert nachverbrannt werden.

Auf die Trennung der Nachverbrennung von dem Rost wird aus den dargelegten Gründen zunehmend Wert gelegt.

- Die Trennung muß nicht geometrisch sein, sie kann auch strömungstechnisch erfolgen. Optimal wäre eine geometrische Trennung (etwa über eine Rohrführung). Diese läßt sich jedoch aus praktischen Gründen in der Regel nicht durchführen. Eine strömungstechnische Trennung (Bilder 17, 18, 19) ist ebenfalls sehr wirksam, wenn z.B. entsprechend der Freistrahtheorie durch Dimensionierung von Düsengeometrie und Eintrittsimpuls eine gute „Überdeckung des Querschnitts“, ausreichendes Ansaugen des zu vermischenden Grundstromes und hinreichende „Eindringtiefe“ der Injektorstrahlen erreicht werden. In der Regel führt dies zu Düsenfeldern in mehreren Ebenen (Bild 18). Nach Möglichkeit sollten zwecks guter Überdeckung an allen Kanalseiten Düsenfelder der angeordneten sein. Unterstützend wirkt, wenn die Eindüsung an einem „eingezogenen“ Strömungsquerschnitt der Nachverbrennungszone angeordnet ist (Bilder 17 und 18). Diese strömungstechnische Trennung führt gleichzeitig zur Bildung des in Bild 10 dargestellten Rührkessелеlements. Oberhalb der Düsenfelder (Bild 18 und 19) ist dann die Beruhigungsstrecke angeordnet (Kolbenströmzone). Die Eindüsung von Sekundärluft sollte soweit wie möglich vermieden werden. Der Ersatz der Sekundärluft durch rückgeführtes Abgas verringert einerseits den Abgasmassenstrom (am Kamin), und vermeidet andererseits bei „richtiger“ Auslegung der Injektorstrahlen durch intensive Vermischung gleichzeitiger Temperaturspitzen in der Nachverbrennung, was zu einer verminderten thermischen NO-Bildung führt. Beispielhaft hierfür ist in Bild 20 zur Simulation einer Abgasrückführung als inertes Stickstoff über Injektdüsen zur Vermischung der vom Rost kommenden Gase verwendet worden.

- Eine andere als im Bild 10 dargestellte Trennung zwischen Rost- und Nachverbrennung zeigt Bild 21. Hier ist das Rührkessелеlement für die Nachverbrennung der vom Rost stammenden Gase bereits über der ersten Hälfte eines Walzenrostes angeordnet, die Nachverbrennungszone beinhaltet „nur noch“ die „beruhigte Ausbrandstrecke“ (Kolbenströmzone, Nr. 7 in Bild 21).

Schließlich sei noch erwähnt, daß ein Rost auch wassergekühlt sein kann. Dies stellt einen größeren konstruktiven Aufwand dar, im Vergleich zu dem Fall, daß die Kühlung nur durch die Primärluft erfolgt. Es ergibt sich jedoch der Vorteil, daß im Gegensatz zu dem nur durch Primärluft gekühlten Rost nunmehr die Primärluftverteilung ohne Rücksicht auf die Konstruktion (Kühlung) verändert werden kann [29]. Die vorgenannten Maßnahmen und zugehörigen Vorteile kommen dann noch deutlicher zum Tragen. Die Luftzahl, die Abgas- und Flugstaubströme können weiter gesenkt werden, die Temperaturen können soweit angehoben werden, daß die Aschen angesinter bzw. angeschmolzen sind, was z.B. im Hinblick auf das Eluatverhalten ausreichend ist [22].

- Darüber hinaus hat eine Wasserkühlung den Vorteil [29], daß
 - der Verschleiß durch thermische Einflüsse geringer wird und auch bei hohen Heizwerten keine thermische Überlastung eintreten droht und
 - der Rostdurchfall verringert wird (geringere Dehnungen gestatten engere Schlitzze zwischen den Rostelementen).

Schließlich sind Entwicklungsarbeiten zur verbesserten Regelung mittels Infrarotkameras (Bild 22) zu nennen, die auf das Rostbild gerichtet sind und über die Ausmessung von Temperaturfeldern erkennen, wo sich die Hauptreaktionszone befindet. Diese kann dann durch Umverteilung der Primärluft je nach Erfordernis mehr zum Rosteintritt oder Rostende geregelt verschoben werden [31, 32]. Durch gezielte Veränderung der Primärluft (Reaktionsgaszugabe) ist eine schnelle Anpassung an Schwankungen der Restmüllzusammensetzung, eine Vermeidung von Ausbränden und von Strahlenbildungen, eine Verbesserung des Reststoffabbrands und eine Vermeidung von Emissionsspitzen zu erwarten.

Weiter wird daran gedacht, vereinfachte mathematische Modelle zum Feststoffumsatz auf dem Rost [z.B. 28, 33 bis 36] in die Prozeßregelung on-line im Hinblick auf die Beschreibung des dynamischen Verhaltens in die Prozeßregelung zu integrieren, um den Betrieb bei Veränderungen der Randbedingungen (z.B. Schwankung des Heizwertes) mit Rücksicht auf die thermische Trägheit des Prozesses weiter zu verbessern. Prozeßmodelle werden darüber hinaus für Projektionen und Simulationen unterschiedlicher Betriebsweisen zunehmend eingesetzt (siehe auch Abschnitt 4.3).

4.2 Bilanzierungen und Wirkungsgrade

Bei der Bilanzierung geht man zweckmäßiger Weise von den Bilanzgrenzen der thermischen Hauptverfahren und des Geamverfahrens nach Bild 8 aus. Es bestehen ganz unterschiedliche Möglichkeiten, für die einzelnen o.g. Bilanzräume Bewertungskriterien in Form von Wirkungsgraden zu bilden. Allgemein versteht man unter einem Wirkungsgrad η das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Je nachdem, was als „Nutzen“ und als „Aufwand“ angesehen wird, er-

geben sei für die genannten Bilanzräume ganz unterschiedliche Wirkungsgrade (Bild 23).

Betrachtet man als erstes den Bilanzraum des thermischen Hauptverfahrens, so kann als „Nutzen“ z.B. der aus dem Abgasstrom ausgekoppelte thermische Nutzenergiestrom in Form von Dampf gewertet werden. „Aufwand“ ist der mit dem Restabfall zugeführte Energiestrom und die benötigten Zusatzenergieströme zum Betreiben der Anlage. Das Verhältnis Nutzen zu Aufwand ergibt dann den thermischen Wirkungsgrad für das thermische Hauptverfahren $\eta_{th,HV}$ in Bild 23. Erweitert man diese Betrachtung auf das Gesamtverfahren ergibt sich entsprechend Bild 23 der thermische Wirkungsgrad für das Gesamtverfahren $\eta_{th,GV}$.

Zählt man neben den zusätzlichen zum Betrieb der Anlage zuzuführenden Energien noch die Verlustenergieströme bei der zugehörigen Primärenergiumwandlung als Aufwand hinzu, d.h., wertet man die für den Betrieb der Anlage erforderlichen Primärenergienströme insgesamt jeweils als Aufwand (extern erzeugt), z. B.:

- Primärenergie für den elektrischen Strom, $(\dot{H}_{Pr,el} = \dot{E}_{el} / (\eta_{el}))$,
- Primärenergiebedarf für eine eventuelle Sauerstoffherzeugung,
- Primärenergie zur Erzeugung von weiteren Betriebs- und Hilfsstoffen,
- usw.,

dann erhält man entsprechend aus dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand den sogenannten Primärwirkungsgrad für das thermische Hauptverfahren $\eta_{Pr,HV}$ bzw. für das Gesamtverfahren $\eta_{Pr,GV}$ (Bild 23).

Wird der thermische Nutzenergiestrom zur Stromerzeugung genutzt, so ergeben sich aus den thermischen Wirkungsgraden η_{th} und den Primärwirkungsgraden η_{Pr} unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste entsprechend die jeweiligen elektrischen Wirkungsgrade $\eta_{th,el}$ oder $\eta_{Pr,el}$ (im Bild 23 nicht näher dargestellt).

Der zur thermischen Behandlung erforderliche Primärenergieeinsatz würde als Ressource geschont werden können, wenn es den zu behandelnden Abfall nicht gäbe. Der Überschussenergiestrom (Nettoenergiestrom) des Gesamtverfahrens $\dot{H}_{Netto,GV}$ ergibt sich (Bild 23) also erst dann, wenn von dem thermischen Nutzenergiestrom $\dot{H}_{th,Nutz,GV}$ der benötigte Primärenergiestrom $\dot{H}_{Pr,GV}$ abgezogen, d.h. gedanklich zurückgegeben wird. Bei den hier vorliegenden Verhältnissen interessiert nur der Fall, daß sich ein Überschuss ergibt, d.h., daß $\dot{H}_{Netto,GV} > 0$ ist. Dieser „Überschussenergiestrom“ ($\dot{H}_{Netto,GV} > 0$, Bild 23) wird auf den eingetragenen Abfallenergiestrom $\dot{H}_A$ bezogen. Damit erhält man den Nettoprimärwirkungsgrad des Gesamtverfahrens $\eta_{Pr,net}$ (Bild 23). Aus diesem Nettoprimärwirkungsgrad des Gesamtverfahrens kann für die elektrische Stromerzeugung mit einem entsprechenden Umwandlungswirkungsgrad η_{el}

der elektrische Nettoprimärwirkungsgrad für das Gesamtverfahren $\eta_{Pr,net}$ gebildet werden.

Beispielhaft für eine klassische Müllverbrennungsanlage mit Rostfeuerungs-system sind im unteren Teil des Bildes 23 die verschiedenen Wirkungsgrade mit angegeben. Es ergibt sich für das betrachtete Beispiel für das thermische Gesamtverfahren (Luftzahl $\lambda = 1,9$, Heizwert $h_u = 10,6$ MJ/kg) unter Berücksichtigung der Primärenergien ein Primärwirkungsgrad des Gesamtverfahrens von $\eta_{Pr,GV} = 69\%$. Wird die benötigte Primärenergie vom sogenannten Nutzenergiestrom des Gesamtverfahrens abgezogen, so erhält man den Nettoprimär-wirkungsgrad von $\eta_{Pr,net} = 65\%$. Bei einer angenommenen Verstromung des Dampfes (Wirkungsgrad für die Umwandlung $\eta_{el} = 33\%$) ergibt dies einen elek-trischen Nettoprimärwirkungsgrad von ca. $\eta_{Pr,net,el} = 21\%$ für das Gesamtver-fahren. Belastet man die Anlage mit dem Aufwand einer zusätzlichen Ein-schmelzanlage für die Asche, um sie in „Schlackequalität“ umzuformen, so ist mit den Angaben in [37] ein elektrischer Aufwandsgrad von $\eta_{Auf,el} = 17\%$ bei einer mit Erdgas befeuerten Einschmelzanlage und von $\eta_{Auf,el} = 13\%$ bei einer elektrisch beheizten Einschmelzanlage zu erwarten [38]. Es sei nochmals betont, daß entsprechend [22] eine Einschmelzung nicht für erforderlich gehalten wird, daß aber das Einschmelzen, wenn es zwingend gefordert wird, grundsätzlich möglich ist. Es ist festzustellen, daß andere thermische Behandlungsverfahren kei-ne besseren Wirkungsgrade im Vergleich zur klassischen Behandlung mit Rost-feuerungs-systemen haben (vgl. z. B. 38, 39).

In diesem Zusammenhang sei kurz auf den Einfluß der oft diskutierten Maßnah-men „Feuerung mit Zusatzbrennstoff“, „Feuerung mit O₂-Anreicherung“ und „Feuerung mit erheblich abgesenkter Luftzahl“ eingegangen. Die letztgenannte Maßnahme ist z.B. möglich, wenn eine Vergleichmäßigung der Abfallzusam-mensetzung und der Konsistenz durch eine entsprechende Vorbehandlung er-folgt. In Bild 24 ist für eine klassische thermische Abfallbehandlung (Bild 8) an einem Beispiel der Vergleich der Abgasmassenströme und der Wirkungsgrade für unterschiedliche Prozeßführungen dargestellt. Geht man aus Vergleichs-gründen von einem sehr niedrigen Heizwert des Restabfalls aus (in Bild 24 z.B. $h_u = 6,5$ MJ/kg) (der sehr niedrige Heizwert ist gewählt, um die Verhältnisse deutlich hervortreten zu lassen), so ist folgendes zu erkennen:

- Ist eine Luftzahl von $\lambda = 1,9$ vorgegeben, wie sie heute noch häufig für das klassische Verfahren bei fehlender Vorbehandlung anzutreffen ist, muß Zu-satzbrennstoff (z.B. Erdgas als Primärenergie) eingesetzt werden. Es ergibt sich dann ein elektrischer Nettoprimärwirkungsgrad (siehe Definition Bild 23) für das Gesamtverfahren $\eta_{Pr,net,el} = 7\%$ und eine spezifische Abgasmasse $A = 11,7$ kg Abgas/kg Abfall. Bezieht man diese spezifische Abgasmasse auf die Basis einer spezifischen Mindestabgasmasse A_{min} (Verbrennung des Abfalls mit reinem Sauerstoff bei einem Stöchiometrie-verhältnis $\lambda_{100} = 1$), so ergibt sich für die thermische Behandlung mit Zusatzbrennstoff ein 7,4-fach

höherer Abgasmassenstrom im Vergleich zum physikalisch/chemisch vorgegebenen Mindestabgasmassenstrom ($A/A_{\min} = 7,4$).

- Durch eine Sauerstoffanreicherung ($X_{O_2} = 28,6$ Ma.%) der Verbrenungsluft ist es möglich, trotz des Energieaufwandes für die Sauerstoffherzeugung den gesamten Primärenergieeinsatz stark zu senken und damit eine Wirkungsgradverbesserung von $\eta_{th,pr,el} = 7\%$ auf $\eta_{th,pr,el} = 14\%$ im Vergleich zur Prozeßführung mit Zusatzbrennstoff zu erreichen. Außerdem ergibt sich eine Senkung des Abgasmassenverhältnisses von $A/A_{\min} = 7,4$ auf $A/A_{\min} = 3,4$.
- Durch eine Vergleichsmäßigung der Zusammensetzung und Konsistenz des Abfalls mit einer entsprechenden Vorbehandlung kann die Luftzahl für die thermische Behandlung deutlich gesenkt werden (im vorliegenden Beispiel $\lambda_{2,3} = 1,54$). Dies führt zu ausreichenden Verbrennungstemperaturen, ohne Zusatzbrennstoff oder Sauerstoffanreicherung zu benötigen. Mit dieser Prozeßführung kann der elektrische Nettoprimärwirkungsgrad η_{el} das Gesamtverfahren auf $\eta_{th,pr,el} = 18\%$ gesteigert werden. Für das Abgasverhältnis ergibt sich ein Wert von $A/A_{\min} = 3,5$. Es liegt damit in der Nähe des Wertes der Sauerstoffanreicherung.

Anhand dieses Beispiels wird der Vorteil durch eine vorgeschaltete Vorbehandlung für die thermische Behandlung des Restabfalls deutlich. Desweiteren erkennt man allgemein, daß für die vorliegenden Verhältnisse die Maßnahme „Zusatzbrennstoff“ die schlechteste, „ O_2 -Anreicherung“ die bessere, die „Senkung der Stöchiometriezahl (Luftzahl)“ die beste Maßnahme ist. In der letzten Spalte sind zu Vergleichszwecken die Werte dargestellt, die sich ergeben, wenn man einen nicht vorbehandelten Abfall mit einem Heizwert von $h_u = 10,6$ MJ/kg bei einem dann häufig notwendigen Luftüberschuß von ca. $\lambda_{2,3} = 1,9$ thermisch behandelt. Man erkennt, daß man durch die Maßnahme „Senkung der Stöchiometriezahl“ bei vorbehandeltem Restmüll mit kleinem Heizwert mit dem Wirkungsgrad $\eta_{th,pr,el} = 18\%$ in die Nähe des Wirkungsgrades des Restmülls mit hohem Heizwert $\eta_{th,pr,el} = 21\%$ gelangt, der wegen fehlender Vorbehandlung eine Luftzahl von ca. $\lambda_{2,3} = 1,9$ benötigt. In diesem Zusammenhang lassen also Abfälle mit hohen Heizwerten erwarten, daß, wenn ihre Konsistenz durch Vorbehandlung vergleichmäßig wird, eine Steigerung des Wirkungsgrades über die derzeit übliche Größenordnung ($\eta_{th,pr,el} = 21\%$, siehe Bild 24, letzte Spalte) hinaus möglich ist. Dieser Fall ist hier nicht näher dargestellt. Zusätzlich zeigt Bild 24, daß der thermische Wirkungsgrad des Gesamtverfahrens $\eta_{th,gv}$ für die Bewertung eines Verfahrens nicht geeignet ist. So ergibt sich für die Prozeßführung mit Zusatzbrennstoff der höchste thermische Wirkungsgrad für das Gesamtverfahren $\eta_{th,gv} = 74\%$. Dies ist zwar einleuchtend, da man sich mit zunehmendem Erdgasanteil dem thermischen Wirkungsgrad einer Erdgasheizung nähert, zeigt aber, daß damit keine objektive Bewertung mit Rücksicht auf den Primärenergieeinsatz erfolgt. Man kann natürlich nicht aus der Steigerung des thermischen Wirkungsgrades die Maßnahme ableiten, den Primärenergieeinsatz, d. h. den Erdgasanteil weiter zu steigern.

4.3 Prozeßmodellierung

Änderungen der Prozeßführung in Rostsystemen werden bislang weitgehend empirisch vorgenommen. Im Zusammenhang mit einer gezielten Untersuchung der vorstehend beschriebenen Einflußgrößen, wie z.B. Sauerstoffpartialdruck, Temperatur und Vernetzung sowie der zugehörigen Steuerungsmöglichkeiten werden gegenwärtig zunehmend auch mathematische Modelle zur Beschreibung des Feststoffumsatzes durch Verbrennung und Vergasung auf einem Rost entwickelt und die Integration in die Prozeßregelung (on line) im Hinblick auf die Beschreibung des dynamischen Anlagenverhaltens bei Veränderung der Randbedingungen (z.B. Heizwertschwankungen) angestrebt. Neben den Aufgaben bei der Optimierung und der on-line Regelung werden Prozeßmodelle auch im Zusammenhang mit der Projektierung von Anlagen, der Simulation und der Bewertung im Hinblick auf einen Verfahrensvergleich verwendet.

Eine Übersicht bezüglich wichtiger experimenteller und theoretischer Grundlagen zum Feststoffumsatz durch Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen ist z.B. in [28] enthalten. Es sei an dieser Stelle deshalb nur zusammenfassend bemerkt, daß ein großer Teil der Arbeiten an kohlebefeuerten Anlagen bereits in den Jahren vor 1940, insbesondere unter den Fragestellungen einer stabilen Zündung und Verbrennung, einer Erhöhung der spezifischen Rost- und Feuerbelastung usw. durchgeführt wurden [41 bis 51]. Erst im Zusammenhang mit der thermischen Abfallbehandlung besteht erneut ein Interesse, die einzelnen Feststoffumwandlungsprozesse auf einem Rost für diesen Anwendungsfall detaillierter zu untersuchen und mit mathematischen Modellen zu beschreiben [z.B. 28, 33 bis 36, 52 bis 54].

Abfälle sind in der Regel heterogen zusammengesetzt. Eine Beschreibung des Verbrennungsprozesses mit Hilfe eines mathematischen Modells ist deshalb dadurch erschwert, daß die Basisdaten für die komplex ineinandergreifenden Stofftransport-, Wärmeübertragungs- und Reaktionsmechanismen häufig nicht verfügbar sind und über empirische Ansätze angenähert werden müssen. Damit können die komplexen Zusammenhänge des realen Prozesses häufig nur mit sogenannten vereinfachten Modellansätzen (z.B. über summenkinetische Daten) beschrieben werden. [siehe auch 28, 34].

Für das hier im folgenden zusammenfassend dargestellte mathematische Modell zur Beschreibung des Feststoffumsatzes in Rostsystemen läßt sich die Tragfähigkeit durch den Vergleich berechneter und experimentell ermittelter Daten zeigen [28, 34].

- Bei der Entwicklung der Modellvorstellung wird davon ausgegangen, daß insbesondere die Teilschritte Vergasung und Restabbrand für den Verlauf des Feststoffumsatzes bestimmend sind (Bild 25), da diese Teilschritte je nach Zusammensetzung bis zu 90% der Gesamtumsatzzeit in Anspruch nehmen (Gut-

bett besteht dann aus fixem Kohlenstoff und Inertstoff). Die Trocknung und Entgasung kann als Anlaufvorgang zusammengefaßt werden.

- Abhängig vom Rosttyp, d.h. von der Bewegung der Rostelemente, wird das Brennstoffbett mehr oder weniger stark durchmischelt. Das Verweilzeitverhalten des Feststoffes in Rostsystemen läßt sich, wie in Bild 25 weiter dargestellt, durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Rührkessellelemente annähern (vgl. experimenteller Nachweis in [34, 55]).

- Zunächst erfolgt die Beschreibung des Feststoffumsatzes für einen nicht bewegten Rost (Chargenrost) an einem einzelnen Rührkessellelement (Zelle) mit Hilfe von Massen- bzw. Stoff- und Energiebilanzen. Unter der Annahme, daß das Bett vereinfacht zunächst aus Kohlenstoff und Inertstoff besteht (s.o.), führt ein von unten zugeführter Reaktionsgasmassenstrom (P_{r}) nach oben, unterwind, abhängig von den jeweils in der Schüttung vorherrschenden Reaktionsbedingungen (z.B. Temperatur, reaktive Oberfläche, Partikeldurchmesser), zur Freisetzung des fixen Kohlenstoffes.

- Insbesondere aufgrund der häufig heterogenen Zusammensetzung von Rückständen und fehlender zugehöriger Basisdaten werden die Teilvorgänge des Feststoffumsatzes durch einen vereinfachten Ansatz mit einem effektiven „Gesamtreaktionskoeffizienten“ zusammenfassend betrachtet, so daß man schreiben kann:

$$\dot{m}_C(t) = M_C \cdot A_{K,a}(t) \cdot k_{\text{eff},a}(t) \cdot \frac{[p_{O_2, \text{RG}} + p_{O_2}(t)]}{2 \cdot R \cdot T(t)} \quad (1)$$

Dabei sind die von der Zeit abhängigen Größen:

$\dot{m}_C(t)$	umgesetzter Kohlenstoffmassenstrom
$A_{K,a}(t)$	äußere Oberfläche
$k_{\text{eff},a}(t)$	effektiver Reaktionskoeffizient
$p_{O_2}(t)$	Sauerstoffpartialdruck
$T(t)$	Temperatur

(Der effektive Gesamtreaktionskoeffizient schließt die Stoffübertragung über eine Sherwoodfunktion und die chemische Umsetzung über einen Arrhenius-Term ein).

Die konstanten Größen sind:

M_C	molare Masse Kohlenstoff
$p_{O_2, \text{RG}}$	Sauerstoffpartialdruck des Reaktionsgases
R	universelle Gaskonstante

- Für die Energiebilanz einer betrachteten, entlang des Rostweges wandernden Zelle erhält man:

$$\dot{m}_{\text{RG}} \cdot c_{p, \text{RG}} \cdot (T_{\text{RG}} - T_0) \cdot dt + \dot{m}_C(t) \cdot (-\Delta h_{\text{p}}) \cdot dt + \dot{m}_I(t) \cdot c_{\text{I}} \cdot (T - T_0) \cdot dt + \dot{Q}_S \cdot dt = \quad (2)$$

$$\dot{m}_{\text{IG}}(t) \cdot c_{p, \text{IG}} \cdot (T - T_0) \cdot dt + \dot{m}_{C, \text{RG}}(t) \cdot c_{\text{C}} \cdot dT + \dot{m}_{\text{In}} \cdot c_{\text{In}} \cdot dT + \dot{Q}_V \cdot dt$$

Darin ist:

A	B	C	D
E	F	G	H
Enthalpie des zugeführten Reaktionsgases	freigesetzte Reaktionsenthalpie	an den umgesetzten Kohlenstoffmassenstrom gekoppelte Enthalpie	Wärmeaustausch
Enthalpie des abgeführten Gases	Wärmeverlust	im Restkohlenstoff gespeicherte Enthalpie	im Inertstoff gespeicherte Enthalpie

- Setzt man in die Energiebilanz (Gl. (2)) den Modellansatz für den Feststoffumsatz nach Gleichung (1) ein, so ergeben sich, wie in [28, 34] ausführlicher dargestellt, die Kurvenverläufe für die Sauerstoffkonzentration, die Temperatur, den Restkohlenstoffgehalt usw. über der Zeit. Beispielhaft zeigt das Bild 26 den berechneten Verlauf des Kohlenstoffumsatzes über der Zeit für verschiedene Modellschritte, wenn man zunächst einen Reaktionskoeffizienten annimmt. Wird in einem ersten Schritt von einer vorgegebenen Temperatur der Schüttung ausgegangen und werden der Inertstoffanteil und die Wärmeübertragungsbedingungen vernachlässigt (Glieder D, G und H in Gl. 2), so ergibt sich der Kurvenverlauf 1 in Bild 26. Im Gegensatz dazu wird in einem nächsten Schritt (Kurve 2) der Inertstoffanteil (Glieder G) berücksichtigt. Wie der Verlauf am Reaktionsende zeigt, wird dabei ein deutlich niedrigerer Restkohlenstoffgehalt erreicht. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, daß in dem Inertstoffanteil während der Hauptverbrennungsphase genügend Energie gespeichert und somit in der Ausbrandphase wiederum von dem Inertstoff Energie an den restlichen Kohlenstoff abgegeben werden kann. Die Gefahr des „Kaltblasens“ wird damit vermindert. Werden nun zusätzlich die Wärmeübertragungsbedingungen (Strahlungsaustausch mit den Wänden usw.) berücksichtigt (Kurve 3 in Bild 26), so zeigt sich nach einer entsprechenden „Aufheizzeit“ (Anlaufzeit) im weiteren erwartungsgemäß ein ähnlicher Verlauf wie in den vorangegangenen Fällen (Kurven 1 und 2). Die Kurve 4 zeigt schließlich beispielhaft den Fall einer Luftstufung über der Zeit, dem sich, bei einer entlang des Rostweges

mit einer angenommenen Rosttransportgeschwindigkeit wandernden Zelle, eine Stufung entlang des Rostweges zuordnen läßt.

- Der effektive Reaktionskoeffizient selbst wird für einen unbekannten Rückstand durch Versuche an einem, eine Zelle nachbildenden, nicht bewegten Chargenrost (Bild 27) ermittelt. Man erhält dann den gesuchten Reaktionskoeffizienten $k_{\text{eff},a}$ in Abhängigkeit von der Temperatur T , wie beispielhaft für einen Holz-Kunststoff-Rückstand in Bild 28 aufgetragen ist (Arrhenius-Diagramm).
- Durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Zellen nach Bild 25 gelangt man zu einer Modellvorstellung für einen bewegten Rost. Die Zellen werden zunächst jeweils nach einer Zeit Δt entlang des Rostweges in die nächste Zone verschoben (Bild 29), ohne daß dabei ein Feststoffaustausch zwischen den Zellen zugelassen wird. Eine Luftstufung wird dabei durch jeweils unterschiedliche Reaktionsgasmassenströme m_{Rg} in den einzelnen Zonen nachgebildet.
- Für eine genauere Betrachtung der Verhältnisse eines kontinuierlichen Rostes sind nun je Unterwindzone mehrere hintereinandergeschaltete Zellen anzunehmen und der mechanisch, durch Rostbewegung erfolgende Feststoffaustausch zwischen den Zellen zu berücksichtigen (Rührwirkung der Rostelemente). Betrachtet man in einem ersten Schritt den Feststoffumsatz für jede Zelle getrennt, so ergeben sich beispielhaft für einen Rost mit 5 Unterwindzonen und jeweils 2 Rührkessellementen je Unterwindzone die in Bild 30 dargestellten Verläufe der Sauerstoffkonzentrationen über der Zeit. Dabei kann von einer angenommenen Anfangsbelegung des Rostes mit Brennstoff und einer vorgegebenen Temperatur ausgegangen werden. Nach einem Anlaufvorgang (Einschwingvorgang) stellt sich für jedes Rührkessellement ein stationärer Zustand ein. In Bild 31 sind die in dem stationären Zustand berechneten Sauerstoffkonzentrationen und Temperaturen (der einzelnen Rührkessellemente) über der Rostlänge dargestellt. Durch die Zusammenfassung der einzelnen Rührkessellemente (Vermischung der aus den einzelnen Rührkessellementen kommenden Abgasströme) ergibt sich schließlich eine integrale Sauerstoffkonzentration bzw. Bilanztemperatur für den gesamten Abgasstrom sowie ein Restkohlenstoffgehalt am Rostende.
- Die Überprüfung des Modells für einen bewegten Rost erfolgt durch Versuche an einer Rückschubrost-Platanlage mit einer thermischen Leistung von ca. 0,4 MW_{th} (bei einem Heizwert von $h_v = 15$ MJ/kg und einem Abbladdurchsatz von $\dot{m}_R = 100$ kg/h), d.h., mit einer Anlage, bei der mit den gewonnenen Daten auch auf praxisrelevante Verhältnisse geschlossen werden kann. Die Bilder 32 und 33 zeigen für zwei verschiedene Beispiele die Auswirkung einer sprunghaften Veränderung der Luftstufung auf die zuvor genannte integrale Sauerstoffkonzentration. Es sind jeweils die an der Platanlage experimentell ermittelten Ergebnisse und die zugehörigen Modellrechnungen gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, daß mit der vereinfachten Betrachtungsweise sowohl

stationäre Zustände als auch die nach einem sprunghaften Prozeßeingriff folgenden instationären Übergänge in einen neuen stationären Zustand tragfähig wiedergegeben werden können.

Damit besteht die Möglichkeit, für Rückstände mit unbekannten Verbrennungsverhalten, zunächst die zugehörigen Gesamtreaktionskoeffizienten durch Versuche an einem Chargenrost zu ermitteln und danach mit dem Modell für einen bewegten Rost Aussagen bezüglich einer geeigneten Prozeßführung abzuleiten. Bei Projektierungen und Betriebsoptimierungen ist man somit nicht mehr allein auf ein empirisches Vorgehen angewiesen. Darüber hinaus kann das erarbeitete mathematische Modell als Grundlage für ein Prozeßmodell in ein Regelungskonzept einbezogen werden. Damit lassen sich dann u.a. Veränderungen nach Prozeßeingriffen, die wegen der thermischen Trägheit des Bettes in der Regel langsam verlaufen (vgl. Bild 32, thermische Trägheit ca. 1 h), vergleichsweise schnell voraussagen und „rechtzeitig“ Regelungseingriffe vornehmen.

5 Vergasung auf dem Rost

Entsprechende Untersuchungen haben gezeigt [17, 55, 56], daß es wegen der guten Steuerbarkeit der Haupteinflußgrößen längs des Weges auch möglich ist, einen Rost als Vergaser (Vergasungsmittel ist Luft) zu betreiben. Bei einer Vergasung (z.B. Stöchiometriezahl $\lambda_R = 0,5$) kann ebenso wie bei einer Verbrennung ein nahezu vollständiger Umsatz des Feststoffes mit einem entsprechend kleinem Glühverlust (z.B. um 1% der Reststoffe erreicht werden; Pyrolysekok wird somit vermieden). Das Vergasungsgas und der Flugstaub werden in einer Nachbrennkammer nachverbrannt. Es handelt sich somit um ein sog. Vergasungs-Nachbrennverfahren (Verfahren C nach Bild 7).

Die Verfahrensmerkmale lassen sich wie folgt beschreiben:

- Das Verfahrensfließbild bzw. das Schaltbild ist das gleiche wie Bild 10, jedoch mit dem Unterschied, daß nun die gesamte dem Rost zugeführte Luft (Primärluft) bezogen auf den zugeführten Abfall einer Luftzahl ($\lambda_R = 0,5$) entspricht (in Bild 10 $\lambda_R = 1,3$). In der ersten Einheit in Bild 10 laufen die Vorgänge somit von der Trocknung und Entgasung bis zur Vergasung ab. Falls erforderlich, ist es auch möglich, in der letzten Roststufe leicht überstöchiometrische Bedingungen (bei Einhaltung einer Gesamtluftzahl $\lambda_R = 0,5$) herzustellen. Durch die Möglichkeit, die Haupteinflußgrößen längs des Weges in vielfältiger Weise – wie in Abschnitten 3 und 4 bereits beschrieben – längs des Reaktionsweges gut steuern zu können (Bild 11), wird das Ziel eines möglichst hohen Umsatzes, d.h. Restkohlenstoffgehalt in den Reststoffen kleiner 1% (vgl. Bild 34), erreicht.
- Die geringe Primärluftzahl hat weiter eine Senkung der Durchströmungsgeschwindigkeit des Bettes und damit eine erhebliche Reduzierung des Flugstaubes zur Folge, der in der Nachbrennkammer noch zu verbrennen ist (Bild 34).

- Wird die Vergasung von Restmüll üblichen Heizwertes auf dem Rost mit über seine Länge verteilter Primärluft so durchgeführt, daß sich eine Primärluftzahl um $\lambda_p = 0,5$ ergibt, stellen sich Bettentemperaturen um 850 °C bis 900 °C ein. Eine Wasserkühlung ist dann nicht erforderlich.
- Geht man von einer Primärluftzahl von $\lambda_p = 0,4$ bis 0,5 aus, erhält man beispielsweise für ein Abfallholz ein Vergasungsgas mit einer Zusammensetzung aus Kohlenmonoxid 8 bis 12 Vol.-%, Kohlendioxid 12 bis 16 Vol.-%, Methan 1 bis 3 Vol.-%, Wasserstoff 2 bis 4 Vol.-%, Sauerstoff 1 bis 2 Vol.-% und Stickstoff 63 bis 76 Vol.-% was einem Heizwert von $h_p = 2500$ kJ/kg entspricht. Der Heizwert reicht aus, um in Verbindung mit den mit 600 °C bis 700 °C in die Nachverbrennung einleitenden Gasen, dort eine eigenständige Verbrennung (Sekundär- und Tertiärluft) (vgl. Bild 10, 2. Einheit), gegebenenfalls mit Stufung und Abgasrückführung zur Reduzierung von CO , C_2H_4 , NO_x durchzuführen (vgl. Ergebnisse in Bild 35). Die Nachverbrennung sollte vollständig von der Vergasung auf dem Rost getrennt sein, um beide Einheiten unabhängig voneinander optimieren zu können. Mit den oben genannten Bedingungen sind in der Nachbrennkammer Temperaturen erreichbar, die über denen bei klassischer Fahrweise (Rost überstöchiometrisch) liegen. Dies sei erwähnt, falls zwingend erhöhte Temperaturen (z.B. 1200 °C) gefordert werden.
- Bei einer Primärluftzahl von $\lambda_p = 0,3$ bis 0,5 lassen sich weiter Gesamtluftzahlen (einschließlich Sekundär- und ggf. Tertiärluft) um $\lambda_{ges} = 1,2$ erreichen (vgl. Bild 36), was im Vergleich zu den in Abschnitt 4 erläuterten Abgasströmen eine erhebliche Reduzierung und damit auch Reduzierung von Schadstofffrachten bedeutet.
- Der elektrische Nettoprimärwirkungsgrad liegt bei der Vergasung auf dem Rost in dem Bereich des Wirkungsgrades für klassische Verfahren zur thermischen Behandlung und ist wegen der geringeren Abgasverluste eher noch etwas höher.
- Welche Aufbereitung der Reststoffe am Rostaustritt sinnvoll ist (z.B. Trennung in Metalle und Inertstoffe), muß geprüft werden. Da grundsätzlich die Apparate Rost und Nachbrennkammer verwendet werden und die Vergasung mit Luft erfolgt, erhält man dieses Verfahren vom Prinzip her auch aus der klassischen Müllverbrennung, wobei bei dieser „lediglich“ die Luftverteilungen stark verändert werden. Aus dieser Sicht kann das Vergasungs-Nachverbrenungsverfahren auch als „Weiterentwicklung der klassischen Müllverbrennung“ angesehen werden. Der derzeitige Stand des Verfahrens ist als „in der Entwicklung befindlich“ zu bezeichnen. Es geht jedoch in seinen Anfängen bis in die 20er Jahre dieses Jahrhunderts zurück und wird im übrigen vom Prinzip her seit langem zur Trennung von Verbundwerkstoffen im Zuge des Recyclings verwendet, z.B. bei kunststoffbeschichteten Metallen, bei denen der Kunststoff vergast wird und somit der metallische Grundkörper zur Wiederverwertung erhalten bleibt.

6 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man für das thermische Gesamtverfahren von Hausmüllbehandlungsanlagen, die mit Rostsystemen ausgerüstet sind, folgendes feststellen:

- Thermische Abfallbehandlungsanlagen mit Rostsystemen sind nicht veraltet. Auf ihnen lassen sich ganz unterschiedliche Verfahren von der Verbrennung über die Vergasung bis zur Pyrolyse durchführen. Die Prozeßführung wird nach modernen Gesichtspunkten der Verfahrenstechnik gestaltet.
- Es handelt sich um langjährig erprobte, sichere und ausgereifte Technik mit großer Betriebserfahrung an ca. 50 Anlagen.
- Es gibt keine Einschränkungen der Flexibilität hinsichtlich des Durchsatzes, der Abfallzusammensetzung und des Heizwertes für typischen Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfall.
- Die Anlagen arbeiten mit einer Verfügbarkeit von über 7500 Stunden im Jahr und sind im Betrieb sehr flexibel.
- In den letzten Jahren wurden erhebliche Entwicklungsschritte (z.T. auch durch den Druck von sog. neuen Verfahren ausgelöst) vollzogen.
- Von Ablösung klassischer Verfahren durch sog. neue Verfahren kann derzeit nicht gesprochen werden. Es ist jedoch sinnvoll, kein Verfahren auszuschließen, da es wichtig ist, die Leistungsfähigkeit durch künftig zu erbringende Betriebsergebnisse an industriell ausgeführten Anlagen jeweils nachzuweisen.
- Bei klassischen und sog. neuen Verfahren zeichnen sich auch künftig weitere Entwicklungspotentiale ab.

7 Literatur

- 1) Emissionsminderung bei Müllverbrennungsanlagen. Endbericht eines Verbundvorhabens zwischen Firma MARTIN GmbH, München, NOELL GmbH, Würzburg, L. & C. Steinmüller GmbH, Gummersbach, Projektträger UBA-Berlin, 1994.
- 2) Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulten, F.; Thermische Verfahren zur Abfallbehandlung – Prozeßführung, Bausteine und Bewertung, VDI-Berichte Nr. 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- 3) Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulten, F. Möglichkeiten der Verbrennungs-führung bei Restmüll in Rostfeuerungen. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK)/Umwelt-Special 32 (1991) Nr. 10.

- 4) Scholz, R.; Schulenburg, F.; Beckmann, M.: Kriterien zur Beurteilung thermischer Behandlungsverfahren für Rückstände. VDI-Berichte Nr. 1033, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- 5) Malek, C.; Scholz, R.; Jeschar, R.: Vereinfachte Modellierung der Stickstoffoxidbildung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Ausbrandes bei einer Staubfeuerung. VDI-Berichte Nr. 1090, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- 6) Schopf, N.: Berechnungen und Versuche zur Heißentschwefelung mit Kalkadditiven unter Berücksichtigung der Verbrennungsführung. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 78, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990.
- 7) Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der NO_x -Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. TECFLAM-Seminar, Oktober 1990, Heidelberg, 1990.
- 8) Kolb, T.; Leuckel, W.: NO_x -Minderung durch 3-stufige Verbrennung – Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM-Seminar, Stuttgart, 1988.
- 9) Soete, G. de: Physikalisch-chemische Mechanismen der Stickstoffoxidbildung in industriellen Flammen. Gas-Wärme-International 30 (1981) Nr. 15.
- 10) Fenimore, C. P.: Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. 13th Int. Symp. on Combustion, Comb. Inst. Pittsburgh, 1971.
- 11) Kremer, H.: Grundlagen der NO_x -Entstehung und Minderung. Erdöl und Kohle-Erdgas 40 (1982).
- 12) Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der NO_x -Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985.
- 13) Klöppner, G.: Zur Kinetik der NO-Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991.
- 14) Blitewski, H.; Hähle, M.: Grundlagen der Pyrolyse von Rohstoffen. In: Thome-Kozmiensky (Hrsg.): Pyrolyse von Abfällen. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1985.
- 15) Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Brinker, W.: Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren – Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994) 11/12.
- 16) Berwein, H.-J.: Siemens-Schwel-Brenn-Verfahren – Thermische Reaktionsabläufe. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.

- 17) Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Experimental research on gasification of coarse waste on a stocker system and separate after burning as well as optimization with the aid of a process model. The 1994 Incineration Conference, May 9-13, Houston, Texas.
- 18) Höller, H.K.: Plasmax – Das Plasma-Ultrahochtemperaturverfahren. Symposium Sonderabfalltechnik '93, Darmstadt, 31. März 1993.
- 19) Göhler, P.; Schingnitz, M.: Stoff- und Wärmebilanzen bei der Abfallverbrennung nach dem NOELL-Konversionsverfahren. In: Energie und Umwelt '95 mit Energieverbrauchsreduzierung bei Gebäuden, TU Bergakademie Freiberg, 22.-23. März 1995.
- 20) Stahlberg, R.; Feuerriegel, U.: Thermoselect – Energie und Rohstoffgewinnung. In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.
- 21) Albrecht, J.; Loeffler, J.; Reimert, R.: Restabfallvergasung mit integrierter Ascheverackung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994, in Würzburg, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Düsseldorf, 1994.
- 22) Vehlouw, J.; Pfirang-Slotz, G.; Schneider, J.: Untersuchungen über verbesserte Umweltverträglichkeit von Müllverbrennungsschlacken. GVC-Abfallbehandlung, Vortrag 8./9. Nov. 1993, Elville.
- 23) Hunsinger, H.; Merz, A.; Vogt, H.: Beeinflussung der Schlackequalität bei der Rostverbrennung von Hausmüll. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994 in Würzburg, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Düsseldorf, 1994.
- 24) Von Roll AG Umwelttechnik: Duotherm: Mit zwei Schritten in eine neue Ära beim thermischen Verwerten von Hausmüll (1994), Firmenprospekt.
- 25) Martin, J.; Leitmeir, E.; Schetter, G.: Müllverbrennung und Umwelttechnische Realisierung nach dem System Martin. Müllverbrennung 1986. Hdt Essen 21/22. Jan. 1986.
- 26) Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Bericht 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- 27) Scholz, R.; Beckmann, M.; Horn, J.; Busch, M.: Thermische Behandlung von stückigen Rückständen – Möglichkeiten der Prozeßführung im Hinblick auf Entsorgung oder Wertstoffrückgewinnung. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1992) Nr. 10.
- 28) Beckmann, M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5.
- 29) Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994, Würzburg.

- 30) Christmann, A., Quittek, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- 31) Martin, J., Busch, M., Horn, J., Rapp, F.: Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen Schadstoffreduzierung. VDI-Berichte 1033, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- 32) Schäfers, W.; Limper, K.: Fortschrittliche Feuerungsleistungsregelung durch Einbeziehung der Fuzzy-Logik und der IR Thermografie. In: Thomé-Kozmiesky, K.J. (Hrsg.): Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1993.
- 33) Reimann, D.O.: Die Entwicklung der Rostfeuerungsregelung für die Abfallverbrennung - Vom Zellenol zur vollautomatischen, emissions- und leistungsregulierten Rostfeuerung. In: Reimann, D. O. (Hrsg.): Rostfeuerungen zur Abfallverbrennung. EF-Verlag für Energie und Umwelt GmbH, Berlin, 1991.
- 34) Beckmann, M.; Scholz, R.: Simplified mathematical model of the combustion in stoker systems, 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 18.-21. April 1995, Lisbon, Portugal und Modellvorstellung zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostfeuerungen. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, 17.-19. Oktober 1994, Würzburg.
- 35) Schetter, G.: Simulation von Feuerräumen in Müllverbrennungsanlagen. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 37 (1985) Nr. 11.
- 36) Behrendt, T.: Thermodynamische Modellierung des Betriebsverhaltens von Hausmüllverbrennungsanlagen am Beispiel TAMARA. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 25, Nr. 99, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992.
- 37) Rizzon, J.: MLEinschmelztechnik mit dem KSMF- Prozeß unter möglichem Einsatz von z.B. Herdolenkoks. VDI-Bildungswerk Seminar 436003, 13./14. Januar 1993, Düsseldorf.
- 38) Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Waste Incineration Systems, Current Technology and Future Developments in Germany, 3rd European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 18.-21. April 1995, Lisbon, Portugal.
- 39) Barin, I.: Thermodynamische Analyse von Verfahren zur thermischen Entsorgung von Hausmüll. In: Billetzki, B.; Faulstich, M.; Urban, A.; Thermische Restabfallbehandlung, Erich Schmidt Verlag GmbH & co., Berlin, 1996.
- 40) Scholz, R.; Schulenburg, F.: Prozeßführung bei Verfahren zur thermischen Restabfallbehandlung in Kombination mit mechanisch-biologischer Vorbehandlung. In: Zukunft der thermischen Behandlung von Rest-Abfällen, UTECH-Berlin, Umwelttechnologieforum, Seminar 02, 1996.
- 41) Marcand, W.: Rostfeuerungen. VDI-Verlag GmbH, Berlin, 1934.

- 42) Leye, A.R.: Die Verbrennung auf dem Rost. Dissertation TH Berlin, 1933.
- 43) Werkmeister, H.: Versuche über den Verbrennungsvorlauf bei Steinkohlen mittlerer Korngrößen. Dissertation TH Hannover, 1932.
- 44) Rosin, P.; Rammler, E.: Die Durchzündung beim Wanderrast. Archiv für Wärmewirtschaft, 1932, H.5.
- 45) Martin, J.: Der Martin- Rückschubrost. Produktbeschreibung, 1933.
- 46) Rosin, P.; Kayser, H.-G.; Fehling, R.: I Die Zündung fester Brennstoffe auf dem Rost. II Untersuchungen über das Zündverhalten. Berichte der Technisch-Wirtschaftlichen Sachverständigenausschüsse des Reichskohlenrates. Berlin, 1935.
- 47) Tamer, J.: Der Temperaturverlauf im Brennstoffbett und im Rost bei der Verbrennung von Steinkohle. Dissertation TU Darmstadt, 1933.
- 48) Arend, W.: Untersuchungen über das aerodynamische Verhalten nichtbackender Kohle auf Wanderrasten. Dissertation TH Hannover, 1933.
- 49) Marcand, W.: Die Verbrennung als Strömungsvorgang. Die Wärme, Zeitschrift für Dampfkessel und Maschinenbetrieb, 60. Jahrgang, Nr. 17 vom 24. April 1937.
- 50) Nusselt, W.: Die Vergasung und Verbrennung auf einem Rost. Zeitschrift des VDI, Bd 60, Nr. 6, 5. Februar 1916.
- 51) Traustel, S.: Verbrennung, Vergasung und Verschlackung. Dissertation TH Berlin, 1939.
- 52) Raupenstrauch, H.: Ein Beitrag zur Computersimulation reagierender Schichtschichten. Dissertation TU Graz, 1991.
- 53) Gruber, T.; Thomé-Kozmiesky, K.J.: Modell zur Verbrennung auf dem Rost. Abfallwirtschafts Journal 5 (1993) 10.
- 54) Kessel van, L.B.M.; Brem, G.: A dynamic model of a municipal solid waste incinerator as a tool for process optimization and operator training. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- 55) Beckmann, M.; Scholz, R.: Mathematische Modellierung und experimentelle Untersuchungen zur Vergasung und Verbrennung in Rostsystemen. demnächst.
- 56) Scholz, R.; Schopf, N.: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and some Test Results of Pilot Plants. Proceedings of "The 1989 Incineration Conference", Knoxville, USA, 1989.

8 Bilder

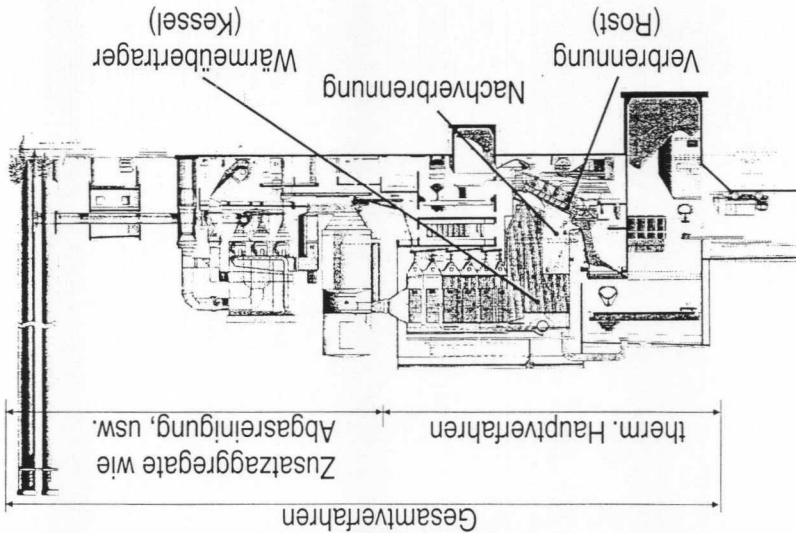


Bild 1: Schematische Darstellung eines klassischen Verfahrens zur thermischen Behandlung von Hausmüll (Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren) [1]



Bild 2: Hausmüll Zusammensetzung und Heizwerte (Beispiel) [2]

Kurzbezeichnung	1. Einheit	2. Einheit	Verfahren
A.	Verbrennung **)	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Bild 8) (z.B. klassische Müllverbrennung)
B.	Thermolyse *)	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. [6, 16]) (z.B. Scheidbrennverfahren nach Siemens V201)
C.	Vergasung **)	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. nach chemischer Katalytische Nachverbrennung *) und Pyrolyse Verfahren [18])
D.	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergassungs-Verfahren (z.B. [9, 20]) (z.B. Konventionelles nach HCL, Thermolyse Verfahren etc.)
E.	Vergasung	Vergasung	Vergassungs-Nachvergassungs-Verfahren (z.B. [21]) (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach Lurgi)

*) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge
 **) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Vergassungsvorgänge
 ***) hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge

Bild 7: Systematische Einordnung von thermischen Hauptverfahren [15]

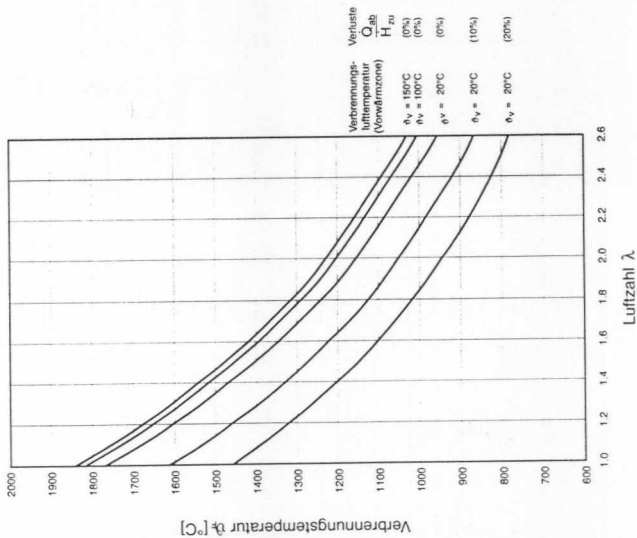


Bild 3: Verbrennungstemperatur ϑ_v in Abhängigkeit von der Luftzahl λ für Hausmüll in Bild 2 mit Verbrennungslufttemperatur ϑ_{v0} und Wärmeverlust ($\dot{Q}_{ab}/H_{0v}$) als Parameter [3]

Haupteinflußgrößen		Varianen	
Einsatzstoffe		chemische Eigenschaften gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stückig)	
Einsatzstoffe		physikalische Eigenschaften Zusammensetzung („Problemelemente“)	
Sauerstoffangebot	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
Reaktionsgase	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.)	Kolbenströmer (KS) keine Durchmischung ($Pe \rightarrow \infty$)	
Reaktorverhalten	Rührkessel (RK) vollkommene Durchmischung ($Pe = 0$)	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) keine Durchmischung ($Pe \rightarrow \infty$)
Art der Stoffzufuhr	Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, usw.		
Verweilzeit	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
Temperatur	Nieder- $\vartheta > 800^\circ\text{C}$	Umgebungs- bis $800^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$	Hochtemperatur $\vartheta > 1000^\circ\text{C}$ (ggf. b. 2000°C u. höher)
Druck	$p = 0,1 \text{ MPa}$	$p = 0,1 \text{ MPa}$	$p = 0,1 \text{ MPa}$
Zusatzstoffe		Additiv (z. B. zur Schadstoffeinkbindung, zur Beeinflussung des Schmelzverhaltens usw.) Zusatzstoff (z. B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung usw.)	

Bild 4: Haupteinflußgrößen bei thermischen Behandlungsverfahren [4]

Apparat: Rost

HaupteinflüßgröÙe		Bemerkung
Einatzstoffe		stüchtig, in Verbindung mit einem Feststoffteil auch passiv
Sauerstoff-angebot	Niveau	überstöchiometrisch (üblich (Verbrennung), unterstöchiometrisch (Vergasung) möglich, dadurch eigenständige Nachverbrennung möglich; Sauerstoffanreicherung (Pyrolyse) nicht üblich jedoch auch möglich
	Steuerung längs des Reaktionsweges	gerichtet in einzelnen Zonen sehr gut einstellbar (z.B. Luft-Luft-Grenzschicht, Abgasrückführung, Wasserdampf, in Verbindung mit Temperatursteuerung, sind die Teilbereiche: Trocknen, Engpässe, Vergasen, Restabbrand des Feststoffes beeinflusst)
Temperatur	Niveau	Reaktorfließtemperatur bis ca. 1000°C, mittlere Reaktortemperaturen niedriger
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einleitung in mehrere Zonen ebenfalls sehr gute Möglichkeiten, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftverbrennung, Abgasrückführung, Wasser-/Dampf-Kühlung)
Druck		bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen weniger Pa Unterdruck
Reaktorverhalten	Staub/Gas	je nach Bewegung der Reaktantelemente können die einzelnen Zonen einer RK-Charakteristik (z.B. Rücklaufbrennstoff) oder eine KS-Charakteristik (z.B. Wandbrennstoff) zugeordnet werden; über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich ungefähr eine KS-Charakteristik
	Gas	a) Oxidationsmittel usw. strömt zwangsweise durch das Bett und wird gleichzeitig über dem Rost verteilt, damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich, Gasbehandlung im nachfolgenden Verfahrensschritt notwendig (z.B. Nachverbrennung)
Verweilzeit	Niveau (mittlere Verweilzeit)	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden, durch Reaktantelemente und -anordnungen einstellbar, bei Projektierung durch Gesamtlänge und Breite beeinflusst
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch getrennte Geschwindigkeitseinstellungen der Reaktantelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich; falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Abbrandes am Rostende Steuerung durch Ausgaswahl
Zusatzstoffe		Additive zur Schadstoffbindung in dem Feststoff und Reaktivierung der Eigenschaften der verbleibenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke); hierbei z.B. Trägermatrix für event. leicht schmelzbare Stoffe (z.B. Kunststoff)
Einatzbereiche (Beispiele)		für den Feststoffumsatz in der 1. Einheit bei Harnstoffverbrennung; Separieren von Metallen aus Verbundstoffen bei niedrigen Temperaturen und gleichzeitig unterstöchiometrischen Verhältnissen

Bild 5: Charakterisierung von Rostsystemen [4]

Apparat: Brennkammer

HaupteinflüßgröÙen		Bemerkungen
Einatzstoffe		gasförmig, flüchtig, staubförmig
Sauerstoffangebot	Niveau	unter- bis überstöchiometrisch; in weiten Bereichen variabel; falls am Reaktoraustritt überstöchiometrie, Bezeichnung „Brennkammer“, falls am Ende unterstöchiometrie, Bezeichnung „Vergasungsreaktor“
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff längs des Verbrennungsweges sehr gut möglich (einbringen über Rührkessellemente)
Temperatur	Niveau	unterschiedliche Verbrennungstemperaturen im Bereich von 1000°C bis 2000°C ggf. auch höher; Bereich sehr variabel
	Steuerung längs des Reaktionsweges	neben der Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff über dem Reaktionsweg, insbesondere Eingriffe durch Abgasrückführung usw. möglich; indirekte Steuerung durch einwirkende Heiz- bzw. Kühlsysteme; viele Möglichkeiten der Steuerung gegeben
Druck		bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa Unterdruck; Hochdruckverbrennung und -vergasung seltener
Reaktorverhalten		Staub/Gas strömungstechnisch können sowohl Rührkessel- als auch Kolbenströmer-Charakteristiken für Staub und Gas angenommen werden
Verweilzeit	Niveau (mittlere Verweilzeit)	im Bereich von Sekunden (bei höherem Druck entsprechend länger), durch Lastzustand einstellbar und bei Projektierung durch geometrische Abmessungen beeinflussbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	nur schwer möglich; Verweilzeitverteilung über Reaktor verhalten steuerbar
Zusatzstoffe		Additive insbesondere über Rührkessellemente einbringen, sowohl zur Schadstoffbindung (z.B. Asche, Schlacke) und Stickstofffixierte als auch zur Beeinflussung der Schlackeigenschaften und Schmelztemperaturen der Schläke (falls flüssiger Abzug gewünscht)
Einatzbereiche (Beispiele)		Verbrennung von flüssigen Rückständen; Nachverbrennung von Gas und Stäuben in der 2. Einheit im thermischen Behandlungverfahren; Hochtemperatur-Vergasung von Rückständen zur Erzeugung von Prozeszgas

Bild 6: Charakterisierung von Brennkammersystemen [4]

Bild 8: Blockfließbild für ein Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren;
Beispiel: Klassische Hausmüllverbrennung [15]

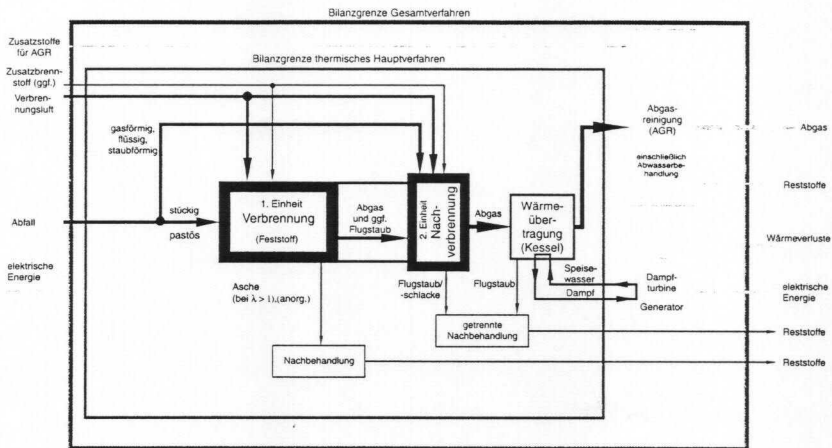
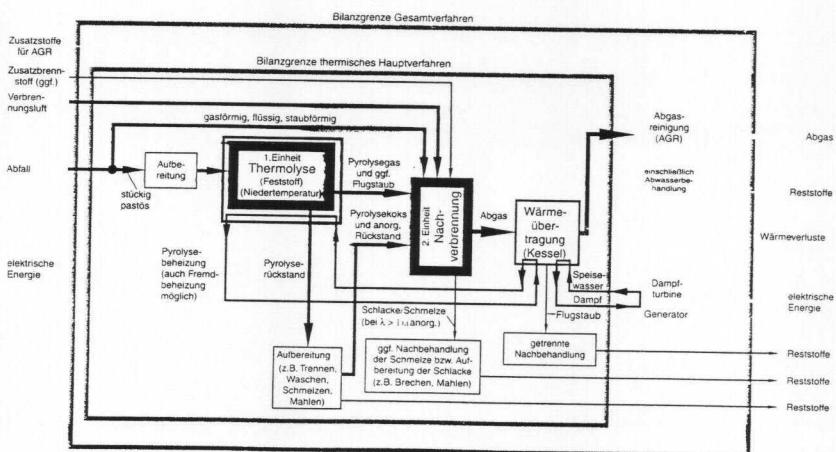


Bild 9: Blockfließbild für ein Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren;
Beispiel: Schmelz-Brenn-Verfahren nach Siemens [15]



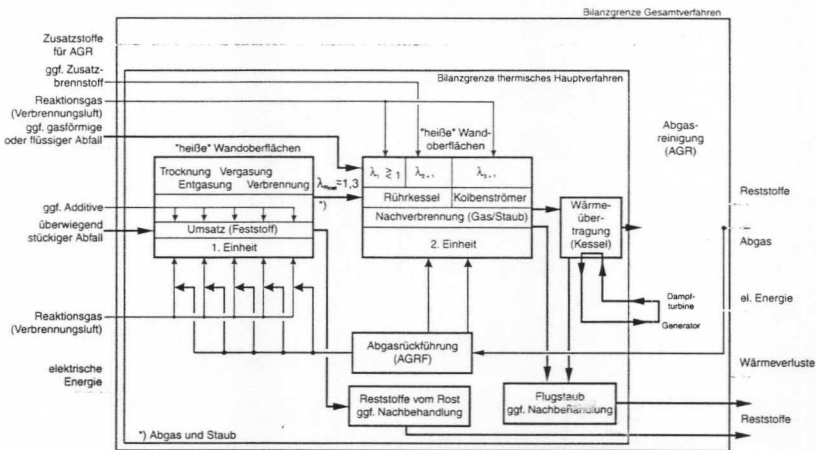


Bild 10: Schematische Darstellung der thermischen Behandlung bei stückigen Abfällen anhand einer klassischen Restabfallbehandlung mittels Rostfeuerungs-system [3]

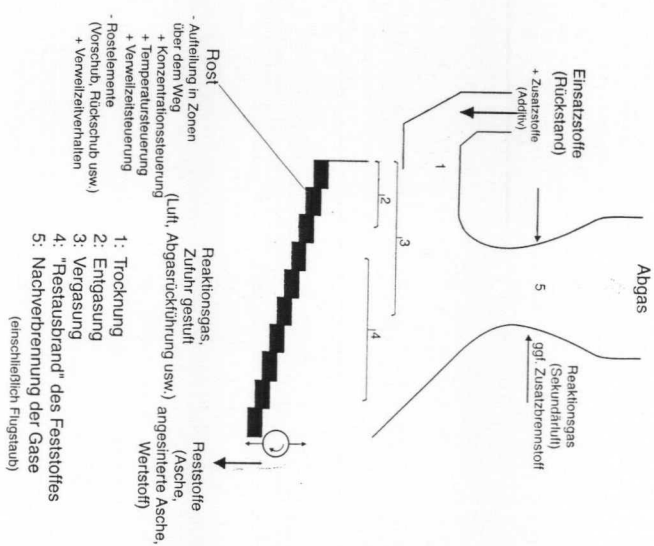


Bild 11: Feststoffumsatz auf einem Rost [3]

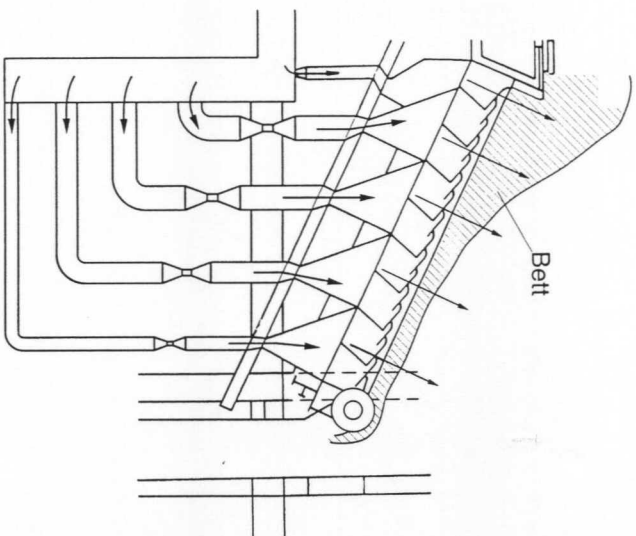


Bild 12: Schematische Darstellung einer Primärluftstufung [25]

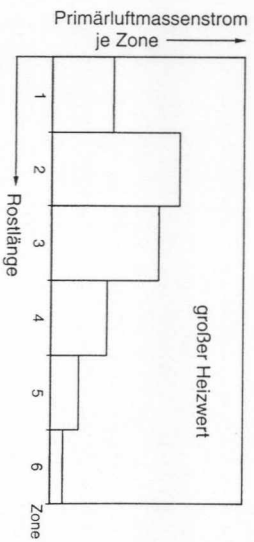
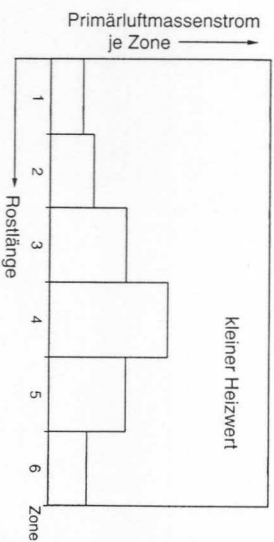


Bild 13: Verteilung des Primärluftmassenstromes über der Rostlänge bei Hausmüll mit unterschiedlichem Heizwert

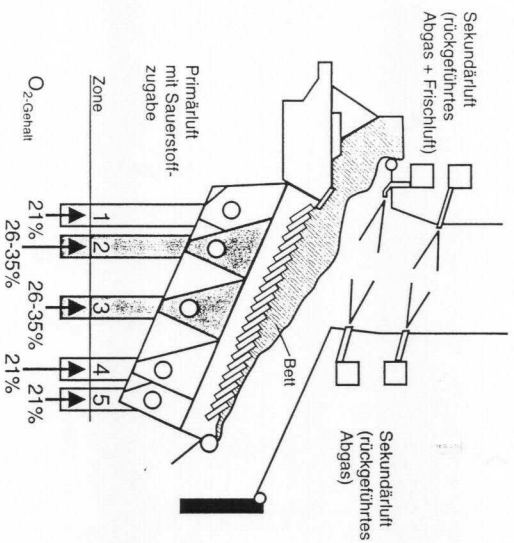


Bild 14: Sauerstoffanreicherung der Primärluft [26]

Spezifische Abgasmasse in kg/kg Brennstoff

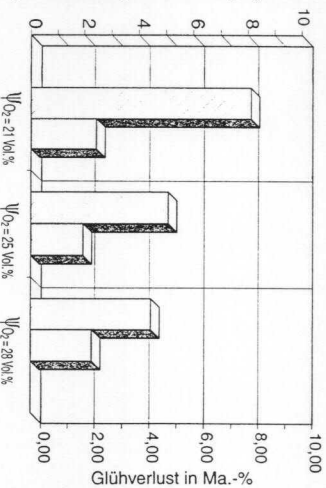


Bild 15: Spezifische Abgasmasse und Glühverlust der Asche bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten der Primärluft [27]

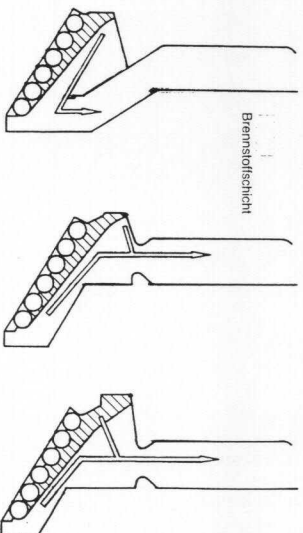


Bild 16: Schematische Darstellung verschiedener Möglichkeiten der Gasführung über dem Gutbett

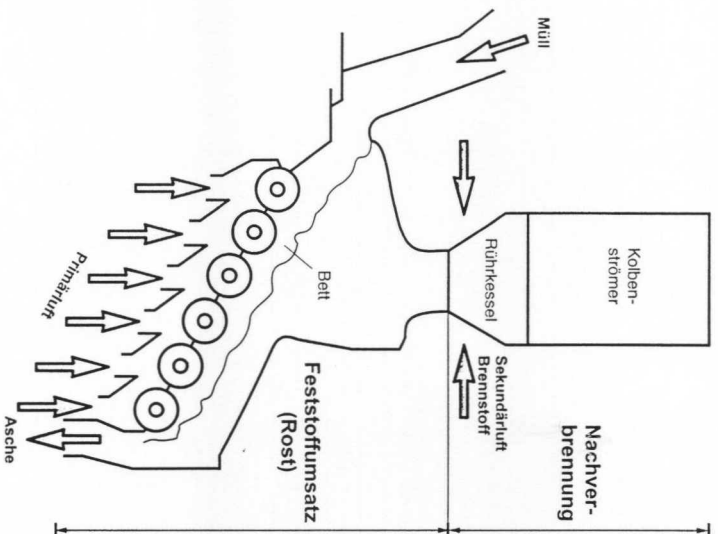


Bild 17: Schematische Darstellung der strömungstechnischen Trennung von Rost und Nachverbrennung

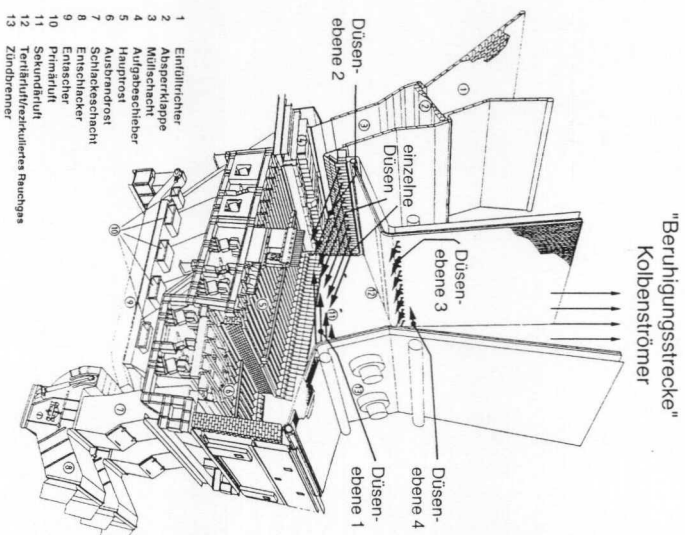


Bild 18: Schematische Darstellung eines Vorschubrosters mit anschließender Nachverbrennung [29]

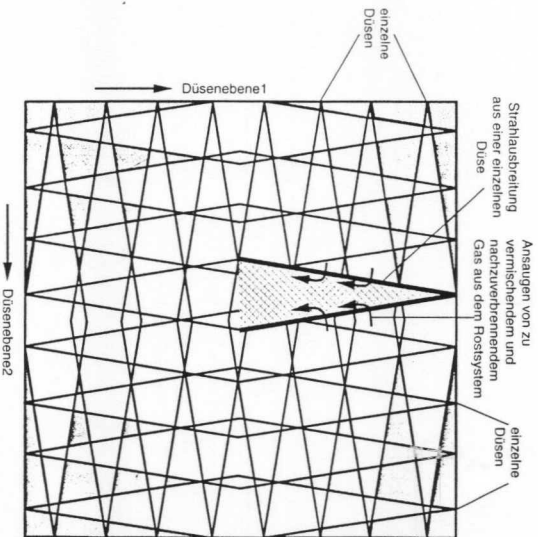


Bild 19. Möglichkeiten der Anordnung von Düsenfeldern in zwei Ebenen über einen Strömungsquerschnitt zur Herstellung eines „Rührkessel“-Elementes [3]

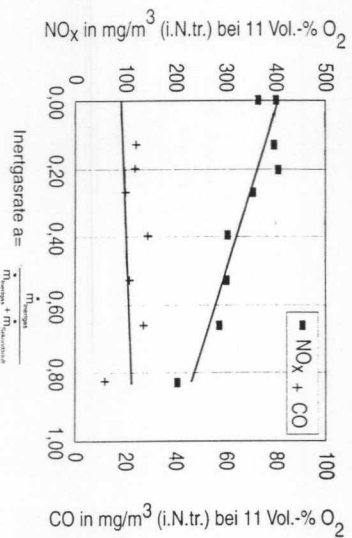
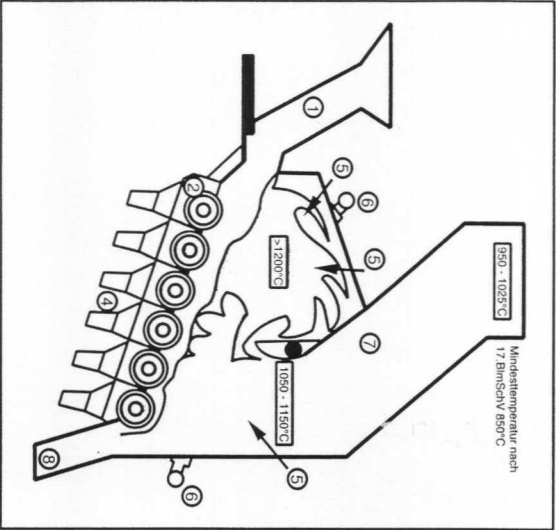


Bild 20. NO_x - und CO -Rohgaskonzentration in Abhängigkeit von der Inertgasrate, d. h. in Abhängigkeit des sekundären Luftstroms $m_{\text{sekundär}}$ (a = 0 heißt: nur Sekundärluft; a = 1 heißt: Sekundärluft vollständig durch Inertgas ersetzt)

	mit Zusatz- brennstoff	mit O ₂ - Anreicherung	kleineres λ (durch Verbrennung möglich)	ohne Zusatz- brennstoff
$\lambda_{23} = 1,9$	$\lambda_{23} = 1,9$	$\lambda_{23} = 1,54$	$\lambda_{23} = 1,9$	
h_u	MJ/kg	6,5	6,5	10,6
X_{O_2}	Ma.-%	23,3	28,6	23,3
$\eta_{\text{th, GV}}$	%	74	66	72
$\eta_{\text{th, pr, el}}$	%	22	50	54
$\eta_{\text{th, pr, el}}$	%	7	14	18
A	kg Abgas kg Abfall	11,7	4,5	8,1
A / A _{min}	-	7,4	3,4	4,9

Bild 24. Bewertung einer klassischen Müllverbrennungsanlage mit Zusatzfeuerung, mit Sauerstoffanreicherung und mit gesenkter Luftzahl, die durch mechanische Abfallvorbehandlung möglich ist. (Der Index an der Luftzahl λ deutet auf den Masseanteil des Sauerstoffs im Oxidationsmittel hin; λ_{23} bedeutet somit Luft als Oxidationsmittel; λ_{100} bedeutet somit reiner Sauerstoff als Oxidationsmittel) [40]



- 1 - Aufgabevorrichtung
- 2 - Walzenrost
- 3 - Gleichstromföhrung
- 4 - Primärluftsystem
- 5 - Sekundärluftsystem
- 6 - Brenner
- 7 - Nachbrennzone
- 8 - Schlackeaustrag

Bild 21: Rostsystem nach [30] (Erläuterung im Text)

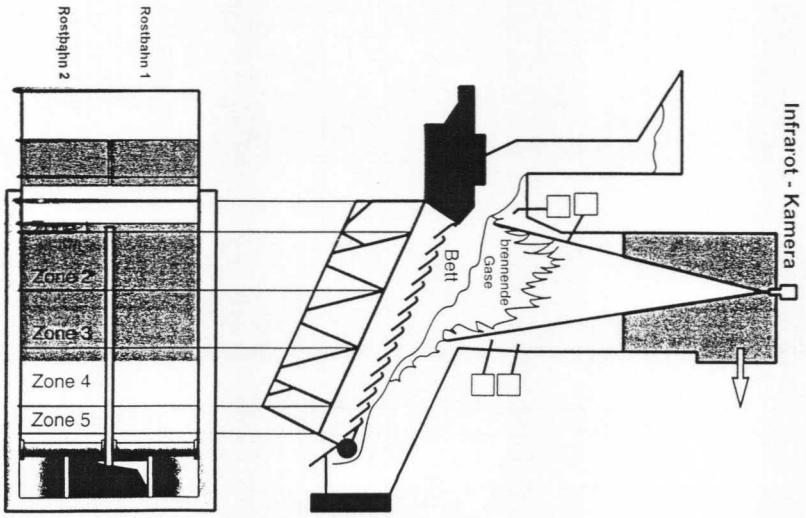


Bild 22: Regelung eines Rostes mittels Infrarot-kamera [32]

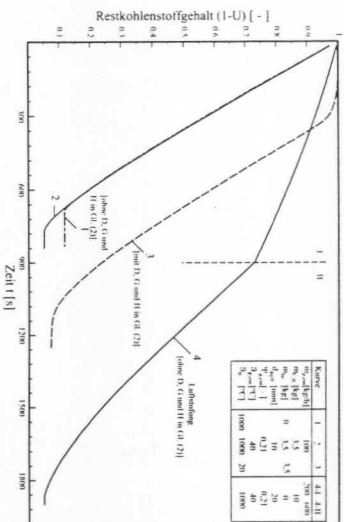


Bild 26: Berechneter Restkohlenstoffgehalt über der Zeit für ein gegebenes Brennstoffteit [34]

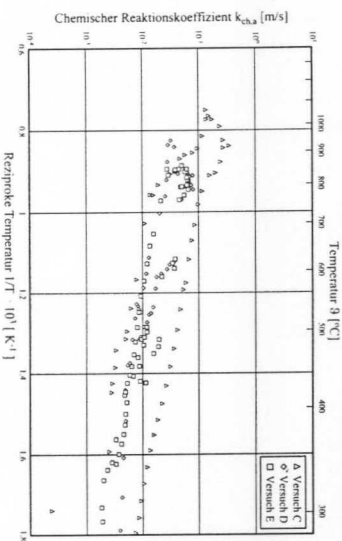


Bild 28: Auf die äußere Oberfläche bezogene chemische Reaktionskoeffizienten (Modellbrennstoff Holz, Kunststoff Rückstand) [55]

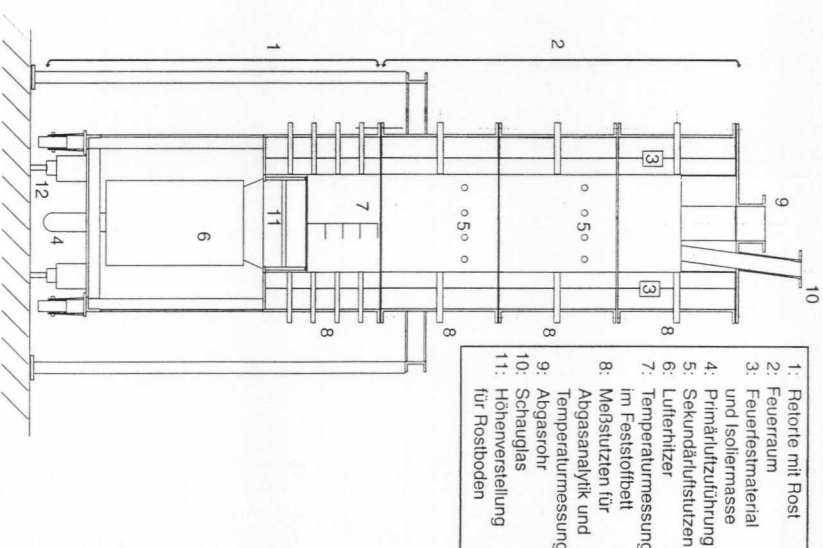


Bild 27: Schematische Darstellung einer diskontinuierlich betriebenen Rost-Versuchsanlage (Chargenrost) [28]

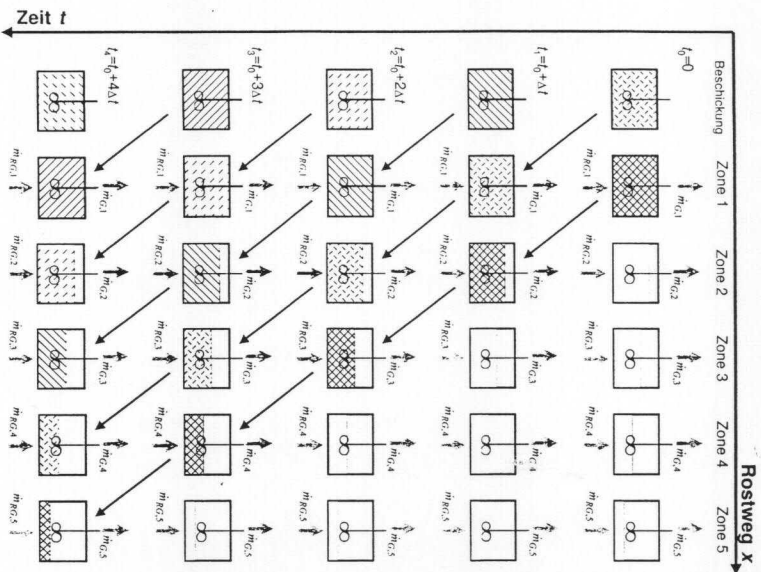


Bild 29: Modellvorstellung zur Beschreibung des Feststoffumsatzes über der Rostlänge (ohne Feststoffaustausch zwischen den RK-Elementen, Beispiel für 5 Unterwindzonen mit jeweils einem RK-Element) [34]

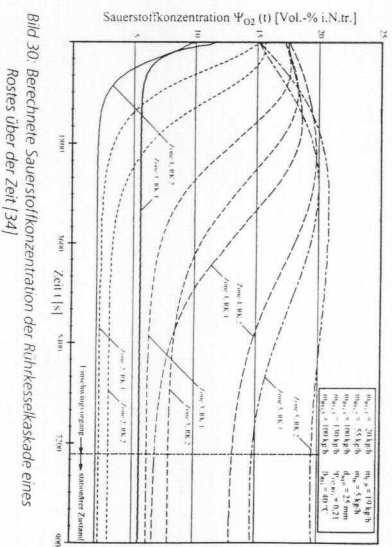


Bild 30: Berechnete Sauerstoffkonzentration der Rührkaskade eines Rostes über der Zeit [34]

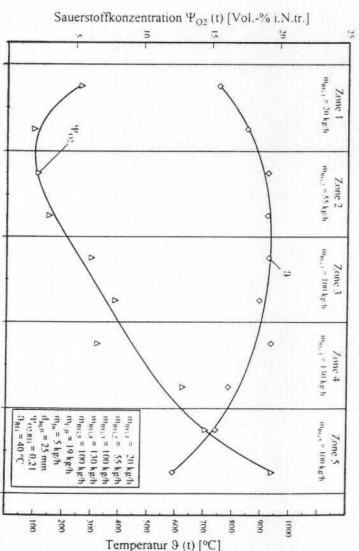
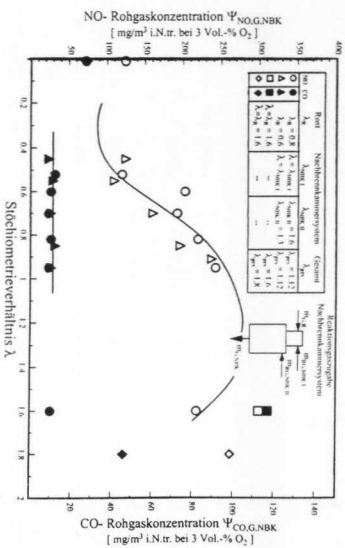
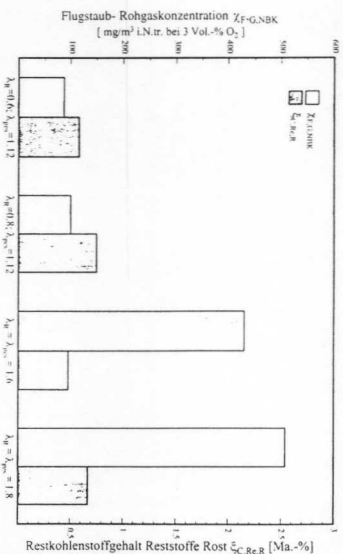
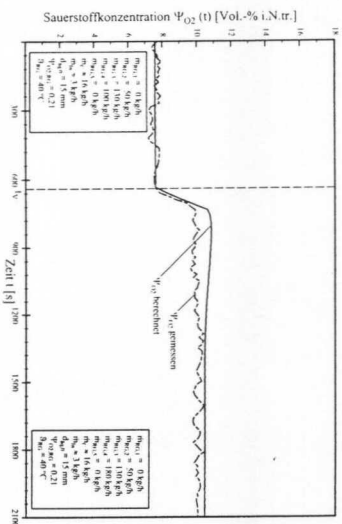
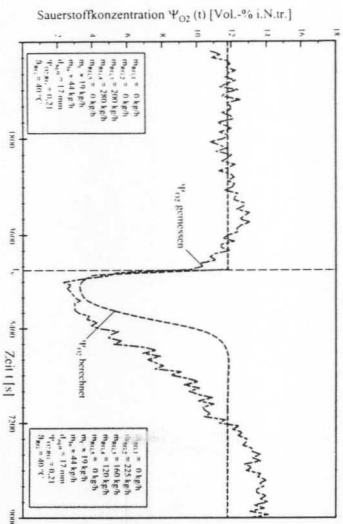


Bild 31: Berechnete Sauerstoffkonzentration und Temperatur über der Rostlänge im stationären Zustand [34]



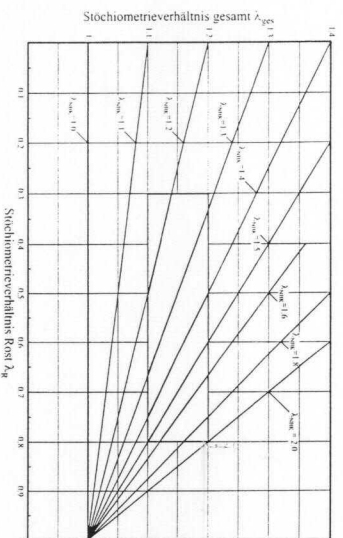


Bild 36. Abhängigkeit des Gesamtstöchiometrieverhältnisses von dem Stöchiometrieverhältnis im Rost- und im Nachbrennkammersystem [55]

Entscheidungskriterien für die Auswahl thermischer Abfallbehandlungsanlagen

– Fazit der FDBR-Symposien –

Dipl.-Ing. A. Schumacher, Geschäftsführer des FDBR

1 Zusammenfassung

Seit 100 Jahren werden thermische Abfallverwertungsanlagen betrieben – weltweit inzwischen ca. 3000. Auf der Basis dieser Erfahrungen und unter Mitwirkung der Wissenschaft ist inzwischen eine neue Generation von thermischen Abfallverwertungsanlagen entstanden, die die Kriterien

- Umweltverträglichkeit
- Entsorgungssicherheit
- Wirtschaftlichkeit

zuverlässig erfüllen. Daraus folgt: Die thermische Abfallverwertung ist heute – neben dem sinnvollen stofflichen Recycling – die geeignetste und wirksamste Maßnahme zur Energiegewinnung und Abfallentsorgung. Sie substituiert andere Brennstoffe und zerlegt Schadstoffe zu umweltneutralen Stoffen, sie entlastet Deponien und verhindert die Entstehung von Gefährdungspotentialen von morgen.

In der Bundesrepublik Deutschland (Ost und West) sind 52 thermische Abfallverwertungsanlagen mit einer Kapazität von ca. 10,5 Mio. t Abfall pro Jahr in Betrieb. Seröse Prognosen gehen davon aus, daß ab dem Jahr 2005 in der Bundesrepublik Deutschland weitere 8 – 10 Mio. t Abfall pro Jahr anfallen, die thermisch behandelt werden müssen. Zu diesem Zweck müssen noch weitere 25 bis 40 thermische Verwertungsanlagen rechtzeitig hinzugebaut werden, um Fehlkapazitäten zu vermeiden.

Angeichts des Bedarfs und des erreichten hohen technischen Niveaus der thermischen Abfallverwertungsanlagen ist es unerantwortlich, wie bestimmte politische und gesellschaftliche Gruppen die heute allgemein bekannten Fakten der ökologischen Kreislaufwirtschaft und des Standes der Technik mißachten. Dies sind Zeichen für eine Politik, die auf die Lahmung des Wirtschaftswachstums in der Bundesrepublik Deutschland hinausläuft und jede Planungssicherheit der Kommunen und Unternehmen untergräbt. Eine solche Politik kann nicht länger hingenommen werden. Es sollte endlich der wiederholt vorgelegene Lösungsvorschlag umgesetzt werden, im Bereich der thermischen Abfallverwertung überregionale Verbundsysteme einzurichten, die sowohl in ökologischer als auch in ökonomischer Hinsicht eine höhere Effizienz gewährleisten sowie Über- und Unterkapazitäten vermeiden.

An alle verantwortlichen Politiker und Entscheidungsträger richtet sich der Appell, die klaren Vorgaben des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes umzu-