

VERGASUNG VON ABFÄLLEN IN ROSTSYSTEMEN

DR.-ING. MICHAEL BECKMANN, PROF. DR.-ING. REINHARD SCHOLZ,
CUTEC-INSTITUT GMBH, CLAUSTHAL-ZELLERFELD

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Prozessführung in Rostsystemen	3
2.1 Allgemeines	3
2.2 Feststoffumsatz in Rostsystemen	5
2.3 Nachverbrennungsprozess	8
3 Vergasungs-Nachverbrennungskonzept	11
3.1 Allgemeines	11
3.2 Pilotanlagen	12
3.3 Vergasung auf dem Rost	14
3.4 Eigenständige, getrennte Nachverbrennung der Brenngase	17
4 Zusammenfassung	20
5 Danksagung	21
6 Symbolverzeichnis	22
7 Schrifttum	22

VERGASUNG VON ABFÄLLEN IN ROSTSYSTEMEN

DR.-ING. MICHAEL BECKMANN, PROF. DR.-ING. REINHARD SCHOLZ,
CUTEC-INSTITUT GMBH, CLAUSTHAL-ZELLERFELD

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Prozessführung in Rostsystemen	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Feststoffumsatz in Rostsystemen	5
2.3	Nachverbrennungsprozess	8
3	Vergasungs-Nachverbrennungskonzept	11
3.1	Allgemeines	11
3.2	Pilotanlagen	12
3.3	Vergasung auf dem Rost	14
3.4	Eigenständige, getrennte Nachverbrennung der Brenngase	17
4	Zusammenfassung	20
5	Danksagung	21
6	Symbolverzeichnis	22
7	Schrifttum	22

1 Einleitung

Im Bereich der thermischen Behandlung von Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen werden derzeit verschiedene Verfahren mit Pyrolyse-, Vergasungs- und Verbrennungsgrundbausteinen eingesetzt oder erprobt. Die thermischen Hauptverfahren lassen sich jeweils in eine

- erste Einheit zur Umwandlung der festen und pastösen Abfälle und in eine
- zweite Einheit zur Behandlung der aus der ersten Einheit stammenden Gase, Flugstäube oder von Pyrolysekoks (Bild 1)

aufteilen.

	1. Stufe	2. Stufe	Verfahren
A.	Verbrennung ¹⁾	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. klassische Müllverbrennung [1-8])
B.	Thermolyse ²⁾	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Schwel-Brenn-Verfahren nach Siemens KWU [10])
C.	Vergasung ³⁾	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (weiterentwickelte klassische Müllverbrennung [9,11])
D.	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Konversionsverfahren nach NOELL [12], Thermoselect-Verfahren [13] usw.)
E.	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach LURGI [14])

CUTEK / NE / 1-auftr.xls / 07.02.1997

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

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

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

Bild 1. Systematische Aufteilung für thermische Hauptverfahren.

Rostsysteme werden überwiegend bei den "klassischen" Verfahren eingesetzt und stellen eine lang erprobte und bewährte Technik dar. In den letzten Jahren wurde bei den "klassischen" Verfahren insbesondere die Abgasreinigungstechnik (sog. Sekundärmaßnahmen) weiterentwickelt und damit der Aufwand der thermischen Abfallbehandlung wesentlich erhöht. Die entsprechend dem Stand der Technik ausgerüsteten Anlagen erfüllen die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für das Einleiten bzw. Deponieren von Schadstoffen in Luft, Wasser und Boden. Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung, Modellierung und Optimierung der Prozeßführung (sog. Primärmaßnahmen) des thermischen Hauptverfahrens. Hier zeigt sich, daß noch ein erhebliches Entwicklungspotential insbesondere im Bereich des Rostes und der Nachverbrennung vorhanden ist, um beispielsweise

- die Abgasmassenströme (Abgasreinigungsanlagen) zu verkleinern,
- die Energienutzung zu verbessern und
- die Reststoffigenschaften zu beeinflussen.

Diesbezüglich sind bei den "klassischen" Verfahren mit Rostsystemen, – u.a. auch durch die "neuen" Verfahren mit ausgelöst –, bereits erhebliche Entwicklungsschritte durchgeführt worden. Erwähnt seien hier beispielsweise Optimierung der Feuerraumgestaltung [1,2], Abgasrückführung [3,4], Sauerstoffanreicherung der Primärluft [5], wassergekühlte Rostelemente [6], Weiterentwicklung der Regelung (z.B. IR-Kamera) [7,8] usw..

Darüber hinaus werden im Pilotmaßstab für künftige Entwicklungen auch neue, veränderte Prozeßführungen mit Rostsystemen, wie z.B.:

- die Vergasung mit Luft auf dem Rost und damit zusammenhängend
- die eigenständige Nachverbrennung der erzeugten Gase

erprobt [9]. Die mit den vorstehend genannten Zielstellungen angestrebten Verbesserungen treten dabei noch deutlicher hervor.

Im folgenden werden hierzu zunächst kurz allgemeine Gesichtspunkte der Prozeßführung in Rostsystemen und davon abgeleitet der mehrstufigen Prozeßführung des Vergasungs-Nachverbrennungsverfahrens erläutert. Danach wird anhand von Versuchsergebnissen näher auf den Vergasungsprozeß auf dem Rost eingegangen. Im Vordergrund stehen dabei insbesondere die Beeinflussung der erzeugten Brenngaszusammensetzung in Abhängigkeit der Luftstufung entlang des Rostweges, der Glühverlust der verbleibenden Reststoffe, die Freisetzung von Schwermetallen und der Flugstaubaustrag. Im Zusammenhang mit der getrennten Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Brenngase wird weiter auf die Möglichkeit einer Luftstufung im Hinblick auf die Minimierung von NO_x -Emissionen bei gleichzeitig niedrigen CO -Emissionen eingegangen.

2 Prozessführung in Rostsystemen

2.1 Allgemeines

Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung können grundsätzlich aufgeteilt werden in den Teil des sogenannten Thermischen Hauptverfahrens und den Teil zusätzlicher Verfahrensschritte wie Abgasreinigung, elektrische Stromerzeugung usw.. Beide Teile zusammen stellen dann das Gesamtverfahren dar. Die Leistungsfähigkeit eines Verfahrens wird maßgeblich zunächst durch die Prozeßführung des Thermischen Hauptverfahrens bestimmt. Hier müssen die vorhandenen Möglichkeiten zur Reduzierung von Schadstoffen und Abgasmassenströmen durch Primärmaßnahmen ausgeschöpft werden. Danach entscheidet sich, welcher Aufwand im Bereich der Sekundärmaßnahmen beispielsweise zur Abgasreinigung erforderlich ist. Vor diesem Hintergrund wird hier besonders auf das Thermische Hauptverfahren eingegangen.

Um prozeßtechnische Möglichkeiten erörtern zu können, müssen zunächst die Haupteinflußgrößen:

- Einsatzstoffe,
- Sauerstoffangebot,
- Reaktionsgase
- Reaktorverhalten,
- Art der Stoffzufuhr,

- Verweilzeit,
- Temperatur,
- Druck und
- Zusatzstoffe

näher betrachtet werden (Bild 2). Dabei ist nicht nur das jeweilige Niveau, sondern auch die Verteilung der Haupteinflußgrößen längs des Reaktionsweges zu beachten. An dieser Stelle sei zunächst auf das Sauerstoffangebot eingegangen, die anderen Einflußgrößen werden später im Zusammenhang mit Möglichkeiten zur Steuerung der Prozeßbedingungen speziell bei Rostsystemen behandelt.

Einsatzstoffe	physikalische Eigenschaften gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stückig)		
	chemische Eigenschaften Zusammensetzung (Problemstoffe)		
Sauerstoffangebot	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
Reaktionsgase	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff), Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.		
Temperatur	Nieder- $\vartheta < 600 \text{ }^\circ\text{C}$	bis	Hochtemperatur $\vartheta > 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (ggf. bis $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ u. höher)
Druck	Nieder- $p \ll 0,1 \text{ MPa}$	Umgebungs- $p \approx 0,1 \text{ MPa}$	Hochdruck $p \gg 0,1 \text{ MPa}$
Reaktorverhalten	Rührkessel (RK) $Pe = 0$	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) $Pe \rightarrow \infty$
Stoffzufuhr	Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, usw. <small>für z.B. Einsatzstoffe, Reaktionsgas, Zusatzstoffe</small>		
Verweilzeit	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
Zusatzstoffe	Additiv (z.B. Schadstoffeinbindung, Beeinflussung des Schmelzverhaltens) Zusatzbrennstoff Bett (z.B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung)		

CITEC / Nr. 8/MBGT+CDR / 20.08.1998

Bild 2. Maßgebliche Haupteinflußgrößen bei thermischen Behandlungsverfahren [15].

Mittels des Sauerstoffangebots lassen sich die wichtigen Grundbausteine 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 unterstöchiometrische Bedingungen einstellen. Bei der Verbrennung führt die Sauerstoffzufuhr zu stöchiometrischen bzw. überstöchiometrischen Bedingungen.

Thermische Hauptverfahren zur Behandlung von stückigen und pastösen Abfällen lassen sich wie eingangs erwähnt allgemein in zwei Einheiten aufteilen (Bild 1). Die erste Einheit dient der Behandlung stückiger, pastöser Abfälle durch Thermolyse (Pyrolyse), Vergasung oder Verbrennung. Dabei werden

- die Erzeugung eines inerten Reststoffes (Asche, Schlacke),
- die Stofftrennung bei Verbundwerkstoffen bzw. die Wertstoffrückgewinnung angestrebt. In der nachfolgenden zweiten Einheit werden dann durch Verbrennung (Nachverbrennung) oder Vergasung
- die aus der ersten Einheit stammenden Gase (Abgas, Pyrolysegas, Vergasungsgas), einschließlich des Flugstaubes und

- die in der ersten Einheit erzeugten koksartigen Rückstände (ggf. nach zwischengeschalteter Aufbereitung)

weiter umgesetzt. Im Sinne dieser Aufteilung kann die klassische Restmüllverbrennung als ein Verbrennungs-Nachverbrennungskonzept eingeordnet werden. In der ersten Einheit erfolgt eine Verbrennung auf dem Rost. Anschließend werden in der zweiten Einheit die vom Rost kommenden Gase und Flugstäube in der Nachverbrennungszone nachverbrannt. Aufgrund der unterschiedlichen Aufgabenstellung in der ersten und zweiten Einheit werden die Teilschritte des Feststoffumsatzes auf dem Rost (erste Einheit) und die Nachverbrennung der Gase (zweite Einheit) im folgenden getrennt weiter behandelt.

2.2 Feststoffumsatz in Rostsystemen

Der Feststoffumsatz auf einem Rost läßt sich entlang des Reaktionsweges mehr oder weniger deutlich in die Teilvergänge:

- Trocknung,
- Entgasung,
- Vergasung und
- Restausbrand

aufteilen (Bild 3).

Es kann hier deshalb zusammengefaßt von "Verbrennung auf dem Rost" gesprochen werden, weil der insgesamt dem Rost mit dem Reaktionsgas (in der Regel Luft) zugeführte Sauerstoff, bezogen auf den zugeführten Abfall, zu überstöchiometrischen Verhältnissen (z.B. $\lambda \approx 1,3$) führt. Bei Rostsystemen sind sehr vielfältige Möglichkeiten zur Steuerung der o.g. Haupteinflußgrößen und damit zur gezielten Beeinflussung der einzelnen Teilvergänge entlang des Reaktionsweges vorhanden (Bild 4), von denen in dem hier gesteckten Rahmen nur einige wesentliche erwähnt werden können.

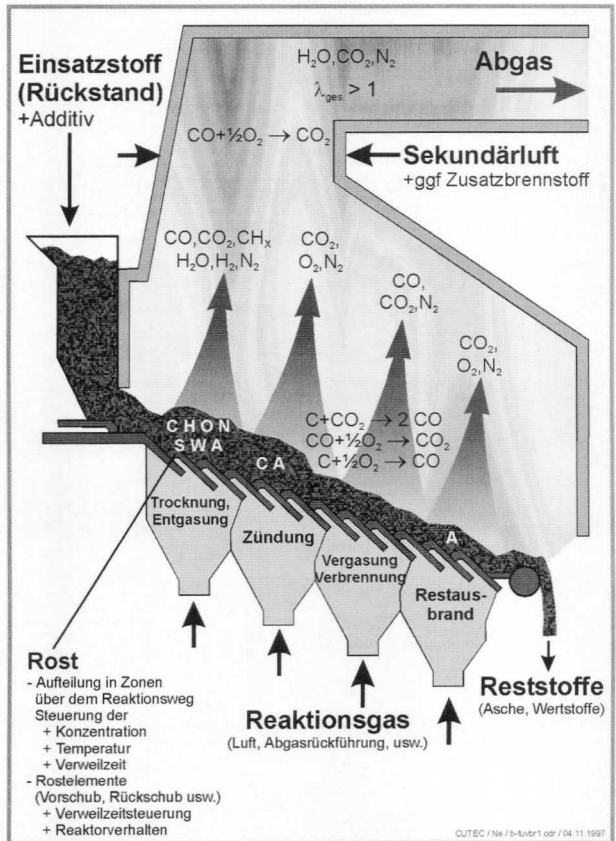


Bild 3. Schematische Darstellung des Feststoffumsatzes in Rostanlagen bei Verbrennungsbetrieb.

Von Vorteil sind diese Steuerungsmöglichkeiten insbesondere bei sich aufgrund von Schwankungen in der Abfallzusammensetzung ergebenden Veränderungen des Reaktionsverhaltens. Die nachfolgenden Darstellungen der verfahrenstechnischen Möglichkeiten werden durch die Übersicht in Bild 4 und das Fließschema in Bild 5 ergänzt.

Vorangestellt sei bemerkt, daß Quenchreaktionen an Wandoberflächen zu vermeiden sind und deshalb in beiden Einheiten (Rost und Nachverbrennung) entsprechend hohe Wandtemperaturen durch geeignete Feuerfestauskleidung anzustreben sind. Das bedeutet gleichzeitig, daß die Wärmeübertragung weitgehend vom Feststoffumsatz und der Nachverbrennung getrennt erfolgen muß, d.h., Verbrennung und Wärmeauskopplung sind wie in Bild 5 schematisch dargestellt in Reihe zu schalten.

Weiter wird aus Bild 5 deutlich, daß die beiden Verbrennungseinheiten in Reihe und getrennt eingezeichnet sind. Damit soll deutlich gemacht werden, daß sich die verschiedenen Teilaufgaben

- Feststoffumsatzes auf dem Rost und
- Nachverbrennungsprozess

um so leichter optimieren lassen, je besser die Entkopplung der beiden Einheiten ist. Hierfür ist allerdings nicht allein eine geometrische Trennung, sondern wie im Zusammenhang mit dem Nachverbrennungsprozess noch erläutert wird, auch eine strömungstechnische Entkopplung möglich. Bei der Beurteilung der Steuerungsmöglichkeiten bei Rostsystemen ist zunächst die Aufteilung der Rostfläche in mehrere Rostzonen, die hinsichtlich der Reaktionsgaszufuhr voneinander getrennt sind, zu erwähnen. Damit kann entlang des Reaktionsweges durch unterschiedliche Zufuhr von Reaktionsgas das Sauerstoffangebot und die Temperatur im Bett so gesteuert werden, so daß die einzelnen Teilschritte bis zum Restausbrand abgestimmt auf die Eigenschaften der Einsatzstoffe, auch bei Schwankungen in der Zusammensetzung, ablaufen können.

Apparat Rostsystem	
Einsatzstoffe	
stückig, in Verbindung mit einem Feststoff- oder Inertbett auch pastös	
Sauerstoffangebot	
Niveau	überstöchiometrisch üblich (Verbrennung); unterstöchiometrisch (Vergasung) möglich, dadurch eigenständige Nachverbrennung möglich; Sauerstoffabschluß (Pyrolyse) nicht üblich
Steuerung längs des Reaktionsweges	getrennt in einzelnen Zonen sehr gut einstellbar (z.B. Luft-/Sauerstoffstufung, Abgasrückführung, usw.); in Verbindung mit Temperatursteuerung sind die Teilschnitte Trocknen, Entgasen, Vergasen, Restausbrand des Feststoffes beeinflussbar
Temperatur	
Niveau	Bettoberflächentemperatur bis ca. 1000°C und höher; mittlere Betttemperaturen niedriger
Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einteilung in mehrere Zonen auch sehr gute ausreichende Möglichkeiten, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftvorwärmung, Abgasrückführung, Wasser-/Dampfkuhlung)
Druck	
bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck	
Reaktorverhalten	
Feststoff	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer RK-Charakteristik (z.B. Rückschubrost) oder eine KS-Charakteristik (z.B. Wanderrost) angenähert werden; über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angenähert eine KS-Charakteristik
Gas	a) Oxidationsmittel usw. strömt zwangsweise durch das Bett und wird gleichmäßig über der Bettoberfläche verteilt, damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich, Gasbehandlung im nachfolgenden Verfahrensschritt notwendig (z.B. Nachverbrennung)
Verweilzeit	
Niveau (mittlere Verweilzeit)	im Bereich von mehreren Minuten bis Stunden; durch Rostgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar und bei Projektierung durch Gesamtlänge und Breite beeinflussbar
Steuerung längs des Reaktionsweges	durch getrennte Geschwindigkeitseinstellungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich; falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Ausbrandes am Rostende Steuerung durch Austragwalze
Zusatzstoffe	
Additive zur Schadstoffbindung in den Feststoff und Beeinflussung der Eigenschaften der verbrennenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke); Inertbet z.B. Trägermatrix für event. leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoff)	
Einsatzbereiche (Beispiele)	
für den Feststoffumsatz in der 1. Stufe bei Hausmüllverbrennungsanlagen; Separieren von Metallen aus Verbundstoffen bei niedrigen Temperaturen und gleichzeitig unterstöchiometrischen Verhältnissen	

CUTEK / No / 1+Hepgleb.xls / 10.02.1997

Bild 4. Charakterisierung von Rostsystemen [16].

Rost die Reaktionsgasverteilung, -sauerstoffkonzentration und -temperatur in einem breiteren Variationsbereich ohne Rücksicht auf die Rostkonstruktion (Kühlung) eingestellt werden kann. Die o.g. Maßnahmen und zugehörigen Vorteile können dann noch deutlicher umgesetzt werden. Die Luftzahl, die Abgas- und Flugstaubströme können gesenkt werden. Die Temperaturen in der Ausbrandstufe können soweit erhöht werden, daß die Asche in einem gesinterten Zustand anfällt, was im Hinblick auf das Eluatverhalten bei Restmüll zu einer deutlichen Verbesserung führt [17]. Darüber hinaus ergeben sich bei einem wassergekühlten Rost eine niedrigere Verschleißgefahr durch thermische Einflüsse insbesondere bei heizwertreichen Abfallstoffen und ein geringerer Rostdurchfall (geringere thermische Ausdehnung gestattet engere Spielräume zwischen den Rostelementen).

Abschließend sei in Verbindung mit der Regelung des Verbrennungsprozesses auf dem Rost der Einsatz von Infrarotkameras zur Erfassung der Temperaturen der Brennbettoberfläche erwähnt. Durch die Ausmessung von Temperaturfeldern läßt sich beispielsweise die Lage der Hauptreaktionszone erkennen. Diese kann dann z.B. durch Umverteilung der Primärluft je nach Erfordernis

mehr zum Rostanfang oder Rostende (geregelt) verschoben werden. Durch gezielte Veränderung der Primärluft (Reaktionsgaszugabe) ist eine schnelle Anpassung an Schwankungen der Restmüllzusammensetzung, eine Vermeidung von Durchbläsern und von Strahlenbildungen, eine Verbesserung des Reststoffausbrands und eine Vermeidung von Emissionsspitzen zu erwarten.

2.3 Nachverbrennungsprozess

Im Zusammenhang mit dem Nachverbrennungsprozess ist insbesondere auf die Haupteinflußgrößen und die zugehörigen Steuerungsmöglichkeiten:

- Reaktor- bzw. Verweilzeitverhalten (Durchmischung),
- Verweilzeit,
- Temperatur und
- Sauerstoffkonzentration.

einzugehen. Eine Übersicht hierzu ist in **Bild 6** enthalten.

Apparat Brennkammer	
Einsatzstoffe	
gasförmig, flüssig, 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, Wassereindüsung usw. möglich; indirekte Wärmein- bzw. -auskopplung durch entsprechende Heiz- bzw. Kühlsysteme; viele Möglichkeiten
Druck	
bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pascal Unterdruck; Hochdruckverbrennung selten; Druckvergasung häufiger	
Reaktorverhalten	
Staub/Gas	strömungstechnisch können sowohl Rührkessel- als auch Kolbenströmer-Charakteristiken für Staub und Gas angenähert 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 Reaktorverhalten steuerbar
Zusatzstoffe	
Additive insbesondere über Rührkessellemente einbringen, sowohl zur Schadstoffeinbindung (z.B. Schwefeldioxid, Stickstoffoxide) als auch zur Beeinflussung der Schlackeeigenschaften und Schmelztemperaturen der Stäube	
Einsatzbereiche (Beispiele)	
Verbrennung von flüssigen Rückständen; Nachverbrennung von Gas und Stäuben in der 2. Stufe von thermischen Behandlungsverfahren; Hochtemperatur-Vergasung von Rückständen zur Erzeugung von Prozeßgas (Nieder- und Hochtemperaturen); bestimmte Verbrennungsverfahren (z.B. Rückführung von Chlor als Salzsäure in den Produktionskreislauf usw.)	

CLUTEC / Nr 1-Hegibds.xls / 10.02.1997

Bild 6. Charakterisierung von Brennkammersystemen [16].

Zunächst sei das Verweilzeitverhalten in Verbindung mit Bildungs- und Abbaureaktionen von Schadstoffen betrachtet. In der chemischen Verfahrenstechnik unterscheidet man hinsichtlich des Verweilzeitverhaltens zwei Grenzfälle, den idealen Rührkesselreaktor und den idealen Rohrreaktor [18]. In **Bild 7** ist für diese Grenzfälle das Abbauverhalten für CO in Abhängigkeit von der Verweilzeit dargestellt. Es zeigt sich, daß der ideale Rohrreaktor für den Abbaugrad zunächst die günstigere Reaktorcharakteristik aufweist. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, daß ein einheitliches Temperatur- und Konzentrationsprofil über dem Reaktionsquerschnitt vorliegt. Für die Verhältnisse in dem Nachverbrennungsprozeß bedeutet das wiederum die Vorschaltung eines Rührkessel-elementes zur Durchmischung (**Bild 5**, zweite Einheit).

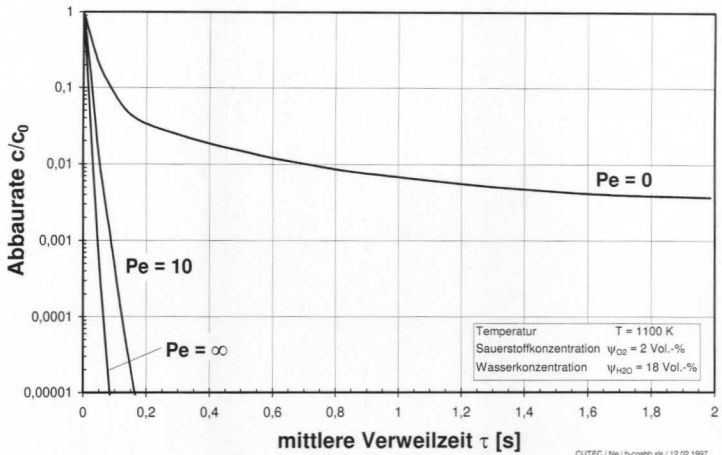


Bild 7. Abhängigkeit des CO-Abbaus von der mittleren Verweilzeit und dem Mischungsverhalten des Reaktors [19]

Im Zusammenhang mit einem möglichst einheitlichen Temperaturniveau sei an dieser Stelle wiederholt, daß eine verstärkte Wärmeauskopplung, verbunden mit Queneffekten an kalten Wänden, im Verbrennungsraum vermieden werden sollte. Für die Vermischung im Bereich der Nachverbrennung scheiden aufgrund des hohen Temperaturniveaus, der Korrosion usw. mechanische Einbauten in der Regel aus. Es bieten sich im wesentlichen nur zwei fluiddynamische Rührmechanismen an:

- sogenannte überkritische Drallströmungen mit interner Rückführung bzw. Rückvermischung heißer Gase [20, 21] bei Anlagen kleinerer Leistung oder aber
- einzelne oder mehrfach über- bzw. nebeneinander angeordnete Freistrahlen, die als Injektoren das umgebende Medium ansaugen und umwälzen [3, 22].

Die Einrichtung einer solchen intensiven Durchmischungszone (Rührkessellement) am Eintritt der Nachverbrennung führt wie in **Bild 5** schematisch dargestellt zu der vorangestellt erwähnten strömungstechnischen Trennung. Unterstützend wirkt, wenn die Durchmischungszone in einem

eingezogenen Querschnitt angeordnet wird. Oberhalb der Mischungszone schließt sich dann eine Beruhigungsstrecke (Rohrreaktor als geeignetere Reaktorcharakteristik für den Abbau) an.

Im Hinblick auf einen möglichst hohen Ausbrand (CO, Kohlenwasserstoffe, Flugasche) muß eine hohe Intensität in der Durchmischungszone angestrebt werden. Bei Anlagen mit größerer Leistung werden in der Regel Injektorstrahlen vorgesehen. Dabei muß durch die richtige Auslegung der Düsengeometrie, Düsenanzahl und -anordnung sowie Eintrittsimpuls eine gute Überdeckung des Querschnittes, eine hinreichende Eindringtiefe der Injektorstrahlen und ein ausreichendes Ansaugen des zu vermischenden Grundstromes (Abgasstrom vom Rost) erreicht werden.

Maßnahmen zur Steuerung des Sauerstoffangebotes entlang des Reaktionsweges sind beispielsweise:

- Luftstufung,
- Brennstoffstufung,
- Abgasrückführung,
- Sauerstoffzufuhr
- usw..

Mit den Gesichtspunkten zur Steuerung der o.g. Haupteinflußgrößen stehen ausreichend Möglichkeiten zur Verfügung, um die Prozeßführung im Hinblick auf die Schadstoffbildungs- und Abbaumechanismen zu optimieren. An dieser Stelle sei auf die umfangreichen Erfahrungen und Kenntnisse, insbesondere zur Reduzierung von Stickstoffoxiden und zur Verbesserung des Ausbrandes bei gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Brennstoffen verwiesen. Diese Erfahrungen sind bei der Nachverbrennung entsprechend zu übertragen. Beispielhaft ist der Einfluß der Abgasrückführung in den Nachverbrennungsprozeß einer Müllverbrennungsanlage in Bild 8 dargestellt [4].

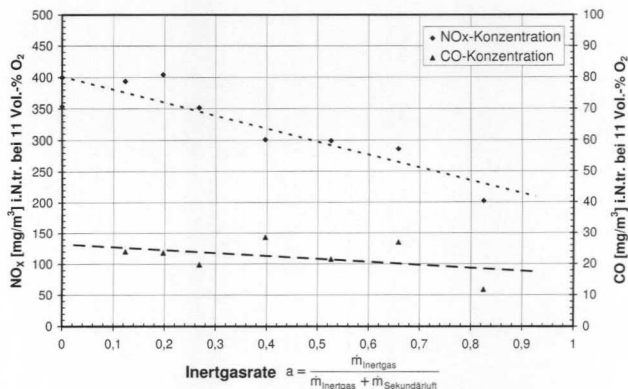


Bild 8. NO- und CO-Rohgaskonzentration in Abhängigkeit von der Inertgasrate [4].

Dabei wurde die Abgasrückführung durch die Zufuhr von Stickstoff (Inertgas) simuliert. Die Durchmischung der vom Rost kommenden Abgase erfolgt bei einem hohen Inertgasverhältnis mit Injektorstrahlen, die kaum Sauerstoff enthalten. Damit können hohe Temperaturspitzen vermieden

werden. Insgesamt erhält man so eine Absenkung der NO_x -Konzentration. Die über dem Inertgasverhältnis gleichbleibend niedrige CO -Konzentration zeigt, daß bei einer entsprechend ausgelegten Durchmischungsleistung der CO -Umsatz im vorliegenden Fall nicht unmittelbar von dem Sauerstoffangebot abhängt.

3 Vergasungs-Nachverbrennungskonzept

3.1 Allgemeines

Bei der thermischen Behandlung von stückigen Abfällen hat man wie bereits erwähnt zunächst prinzipiell zwischen Teilaufgaben die den Feststoffumsatz und solchen, die den Umsatz in der Gasphase betreffen zu unterscheiden. Für die Optimierung der einzelnen Teilaufgaben sind jeweils unterschiedliche Prozeßbedingungen, die durch das Niveau der wesentlichen Haupteinflußgrößen Sauerstoffkonzentration, Temperatur, Verweilzeit und Verweilzeitverhalten eingestellt werden, erforderlich. Es ist deshalb naheliegend, je nach Erfordernis, einzelne Teilprozesse in getrennten Prozeßstufen unabhängig voneinander zu optimieren. Weiter sollten in den einzelnen Stufen ausreichend Möglichkeiten zur Steuerung der Haupteinflußgrößen entlang des Reaktionsweges vorhanden sein. Diese Steuerungsmöglichkeiten sind eng mit der jeweils eingesetzten Aparatetechnik verbunden.

Die bei Rostsystemen vorhandenen Möglichkeiten zur Steuerung der Einflußgrößen (Bild 4) können insbesondere dann wirkungsvoll im Sinne von Primärmaßnahmen eingesetzt werden, wenn man im Vergleich zu der derzeit üblichen klassischen Prozeßführung die Verfahrensschritte

- Feststoffumsatz auf dem Rost,
- Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Gase und
- Wärmeauskopplung

deutlicher voneinander trennt. Mit dieser getrennten Prozeßführung (Bild 5) kann man in einem nächsten Schritt dazu übergehen, den Feststoffumsatz auf dem Rost stark unterstöchiometrisch im Bereich von $\lambda_R \approx 0,4$ bis $\lambda_R \approx 0,8$ zu betreiben. Dieses gegenwärtig zunächst im Pilotmaßstab untersuchte Vergasungs-Nachverbrennungskonzept mit Rostsystemen erscheint deshalb sehr aussichtsreich, weil über die Vorteile einer getrennten Prozeßführung hinaus zusätzlich u.a.

- Abgasmassenströme deutlich reduziert werden,
- Brenngase erzeugt werden, die einen eigenständigen Nachverbrennungsprozeß ermöglichen,
- der Nachverbrennungsprozeß selbst mit bekannten Primärmaßnahmen im Hinblick auf NO_x -Minderung bei gleichzeitig hohen Ausbrand, unabhängig vom Rostprozeß, optimiert werden kann,
- Emissionsfrachten erheblich herabgesetzt werden
- usw. [9, 16].

Auf diese Gesichtspunkte wird im Zusammenhang mit Versuchsergebnissen einer Pilotanlage im folgenden noch näher eingegangen.

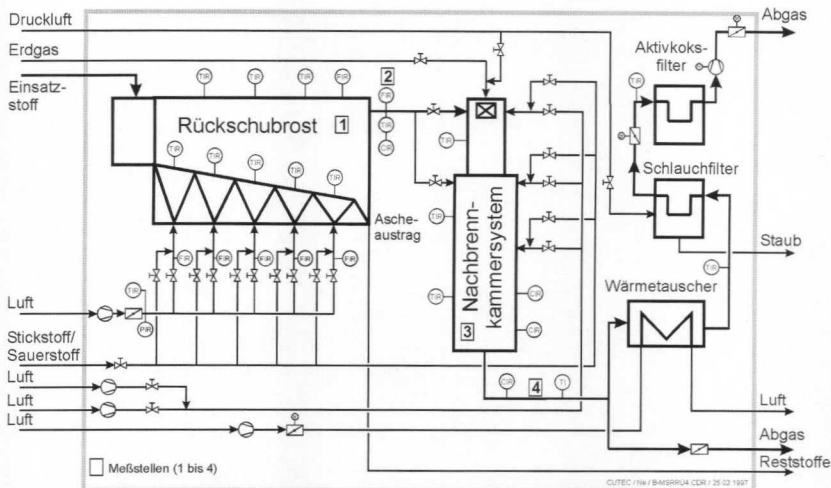


Bild 9. Verfahrenstechnisches Fließbild der Rückschubrost-Pilotanlage mit MSR-Schema.

3.2 Pilotanlagen

Das verfahrenstechnische Fließbild der Pilotanlage(n) einschließlich des zugehörigen MSR-Schemas ist in Bild 9 dargestellt. Die Anlage setzt sich aus den Hauptkomponenten

- 5-Zonen Rückschubrost bzw. 3-Zonen Vorschubrost (wahlweise),
- Brennkammersystem,
- Wärmetauscher und
- Abgasreinigung

zusammen [16]. Die Bilder 10a bis c zeigen Detailansichten der Rostsysteme und des Brennkammersystems.

In dem hier gesteckten Rahmen seien nur die wesentlichen Gesichtspunkte stichpunktartig erwähnt (Beispiel Rückschubrost), weitere Angaben zur Anlagentechnik, zur Meßwerterfassung und Analytik sind in [16] beschrieben.

- Der feste Modellbrennstoff/ Abfall wird diskontinuierlich durch einen Stößel am unteren Ende des Füllschachtes der ersten Rostzone zugeführt.
- Die Geschwindigkeit der Rostelemente kann in den fünf Rostzonen unabhängig einstellen werden.
- Das Reaktionsgas (in der Regel Luft; Rückführung eines Abgasteilstromes oder Sauerstoffanreicherung möglich) wird unterhalb des Rostes zugeführt und kann ebenfalls in den fünf Rostzonen hinsichtlich Massenstrom und Sauerstoffkonzentration variiert werden.

- Das bei unterstöchiometrischer Betriebsweise des Rostprozesses (Vergasung) erzeugte Brenngas wird dem Brennkammersystem zur eigenständigen, mehrstufigen Verbrennung zugeführt.
- Abhängig von den zu untersuchenden Primärmaßnahmen im Bereich der Brennkammeranlage kann man zur Einstellung gewünschter Temperatur-, Konzentrations- und Verweilzeitverhältnisse entlang des Reaktionsweges eine Luftstufung und, falls erforderlich, eine Brennstoffstufung sowie eine Abgasrückführung vorsehen.
- Die Zuführung der Verbrennungsluft bzw. des rückgeführten Abgases erfolgt radial und/oder tangential. Einer besseren Übersichtlichkeit wegen sind im Anlagenschema (Bild 9) nur drei Zugabestellen für die Verbrennungsluft und eine für rückgeführtes Abgas eingezeichnet.
- Einen Überblick über die während des Versuchsbetriebes erfaßten Meßgrößen gibt zunächst das MSR-Schema in dem verfahrenstechnischen Fließbild in Bild 9.

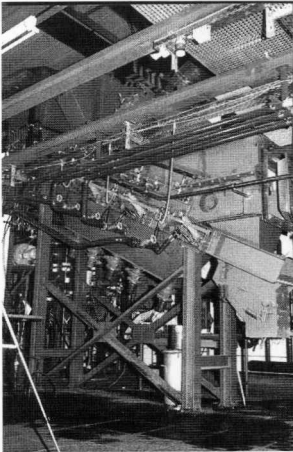


Bild 10a. Pilotanlage Rückschubrost.

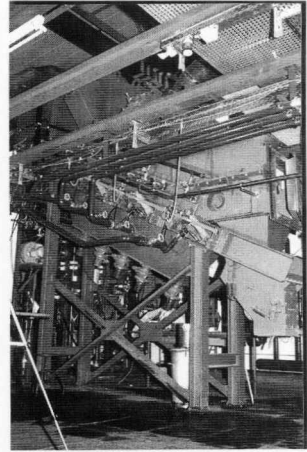


Bild 10b. Pilotanlage Brennkammersystem.

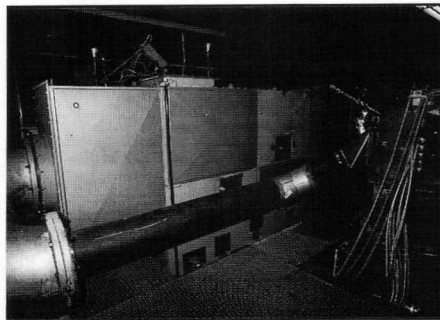


Bild 10c. Pilotanlage Vorschubrost.

3.3 Vergasung auf dem Rost

In der ersten Prozeßstufe, der Vergasung auf dem Rost, werden zunächst insbesondere zwei wesentliche Teilaufgaben angestrebt:

- möglichst niedriger Restkohlenstoffgehalt der verbleibenden Reststoffe und
- Einstellung einer geeigneten Brenngaszusammensetzung, mit möglichst hohen Anteil brennbarer Komponenten.

Zur Steuerung dieser Aufgaben kann man dabei z.B. auf die Maßnahmen:

- Einstellung des absoluten (integralen) Stöchiometrieverhältnisses λ_R über den insgesamt zugeführten Luftmassenstrom bzw. in Verbindung mit entsprechend veränderten Sauerstoffkonzentrationen über den Reaktionsgasmassenstrom,
- Einstellung der lokalen Stöchiometrieverhältnisse durch entsprechende Luft- bzw. Reaktionsgasstufung entlang des Rostweges,
- Beeinflussung der Verweilzeit und des Verweilzeitverhaltens durch die Bewegung der Rostelemente

zurückgreifen.

Bei Vergasungsverhältnissen lassen sich ebenso wie bei einer Verbrennung Restkohlenstoffgehalte um 1 Ma.-% und niedriger erreichen; koksartige Rückstände werden damit vermieden. Das [Bild 11](#) zeigt beispielhaft für den Einsatz von mit Steinkohlenteerpech behandelten Eisenbahnschwellen (kontaminiertes und damit nicht weiter verwendbares Abfallholz) hierzu Ergebnisse von unterschiedlichen unter- und überstöchiometrischen Einstellungen des Rostprozesses. Im Zusammenhang mit dem Restausbrand der Asche sei an dieser Stelle angemerkt, daß bei einer insgesamt unterstöchiometrischen Betriebsweise des Rostprozesses (Vergasung), im Bereich der Aschebrandzone, falls erforderlich, durchaus lokal überstöchiometrische Bedingungen bezogen auf den Restkohlenstoff eingestellt werden können.

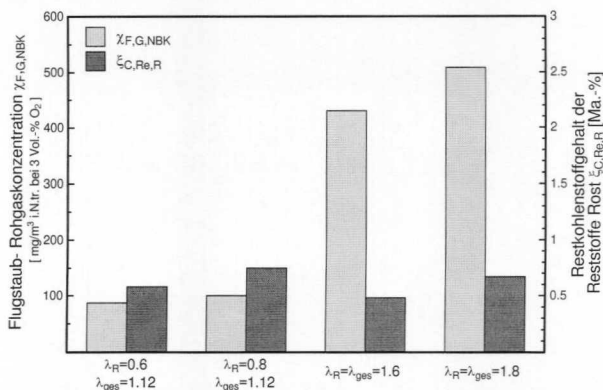


Bild 11. Staubkonzentration im Rohgas und Glühverlust der Reststoffe bei verschiedenen Stöchiometrieverhältnissen in der Rostanlage [16].

Ausgeprägte Unterschiede zwischen der Vergasungs- und Verbrennungsfahrweise ergeben sich hinsichtlich der Flugstaubbildung. Die im Vergleich zu der überstöchiometrischen Fahrweise bei Vergasungsbetrieb deutlich niedrigeren Luft- bzw. Reaktionsgasmassenströme haben entsprechend abgesenkte Durchströmungsgeschwindigkeiten durch das Brennbett zur Folge. Die erwartete Tendenz, daß sich mit abnehmenden Stöchiometrieverhältnissen auch die Flugstaubbildung vermindert, wird durch die Ergebnisse in Bild 11 bestätigt.

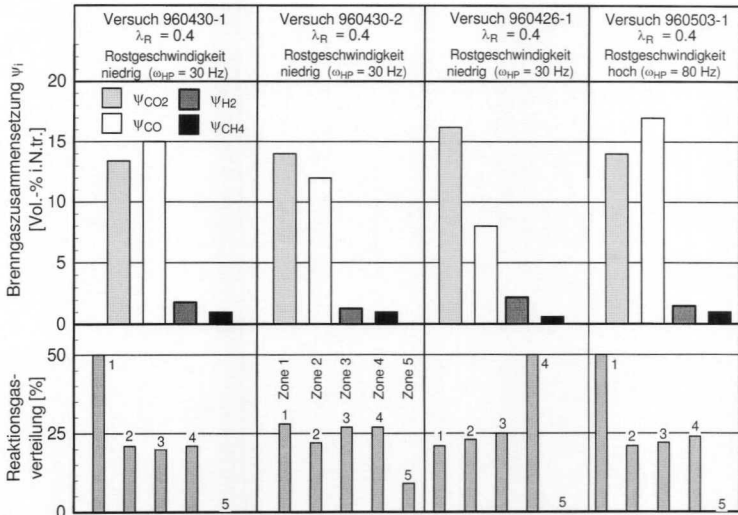


Bild 12. Vergleich der Brenngaszusammensetzung bei Variation der Luftverteilung entlang des Rostweges und der Roststabgeschwindigkeit [9].

Der Einfluß von Luftstufung und Bewegung der Rostelemente auf die Brenngaszusammensetzung, d.h., auf die o.g. zweite Teilaufgabe, sei im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Untersuchungen mit Holz als Modellbrennstoff in [Bild 12](#) diskutiert. Zur Erläuterung des Einflusses der Luftstufung sind drei deutlich verschiedene Luftverteilungen, bei jeweils gleichem Brennstoffmassenstrom und Gesamtluftmassenstrom gewählt worden. Bei der ersten Einstellung wird die Hauptluft in Zone 1, bei der zweiten Einstellung in Zone 4 zugeführt. Bei der dritten Einstellung liegt eine annähernd gleichmäßige Verteilung über die Rostzonen 1 bis 4 vor. Aus Bild 12 ist zu erkennen, daß sich die Wasserstoff- und die Methankonzentrationen weitgehend unabhängig von der gewählten Luftstufung einstellen. Dabei liegen die Wasserstoffkonzentrationen mit $\psi_{H_2} \approx 2$ Vol.-% weit unterhalb der sich aus Gleichgewichtsberechnungen ergebenden Werte. Wie bereits an anderer Stelle diskutiert [16], ist dies insbesondere darauf zurückzuführen, daß der Wasseranteil des Brennstoffes bereits am Rostanfang in die Gasphase übergeht und damit eine Zersetzung des Wasserdampfes an einem heißen Koksbed, entsprechend der heterogenen Reaktion von Kohlenstoff mit Wasserdampf, in Rostsystemen wenig wahrscheinlich ist. Den höchsten Anteil der brennbaren Komponenten nimmt Kohlenmonoxid ein. Geht man davon aus, daß die CO-Bildung im Brennstoffbett eines Rostes im wesentlichen über die heterogene Vergasungsre-

aktion von Kohlenstoff mit Sauerstoff und, bei entsprechenden Betthöhen, zusätzlich über die sogenannte Boudouard-Reaktion abläuft, so sollte nach erfolgter Zündung des Brennstoffes zunächst ein entsprechend heißes Koksbett erzeugt werden. In den nachfolgenden Rostzonen wird wegen des abnehmenden Kohlenstoffgehaltes entlang der Rostlänge entsprechend weniger Reaktionsluft für die Vergasung benötigt. Dieser Sachverhalt wird durch die Ergebnisse in Bild 12 bestätigt. Das als Modellbrennstoff eingesetzte Holz zündet bereits in der ersten Roststufe. Bei Verschieben der Hauptluftzufuhr vom Rostanfang zum Rostende nimmt der CO-Anteil im Brenngas ab. Eine Erhöhung der Roststabgeschwindigkeit hingegen, die zu einer intensiveren Durchmischung und Schürung im Brennbett führt, bewirkt im vorliegenden Beispiel eine Zunahme des CO-Anteils (Bild 12). Bei diesem Beispiel ist jedoch zu beachten, daß in den Zonen 2 bis 4 annähernd gleiche Luftmassenströme zugeführt werden.

Eine weitere wichtige Fragestellung bei der Optimierung der Prozeßbedingungen in der Roststufe ist die Mobilisierung oder die Einbindung insbesondere von Schwermetallspezies. Hierzu liegen zunächst Hinweise vor, die sich aus Untersuchungen mit Mischungen aus Shredderleichtfraktionen (Abfälle aus Shredderanlagen mit Mischschrott) und Holz ergeben. Das Bild 13 zeigt die Ergebnisse der Schwermetallkonzentrationen im Abgas gegenüberstellend für die Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise mit $\lambda_R \approx 0,6$ und $\lambda_{ges} \approx 1,2$ und für die Verbrennungsfahrweise mit $\lambda_{ges} \approx 1,8$. Die Gesamtkonzentrationen für die Vergasungsfahrweise betragen ca. 40 % der Konzentrationen der Verbrennungsfahrweise. Hauptsächlich ist diese Reduzierung auf die Verminderung des Flugstaubaustrages zurückzuführen. Interessant erscheint die Frage, wie sich die Vergasungsbedingungen auf die Mobilisierung von Schwermetallen auswirkt.

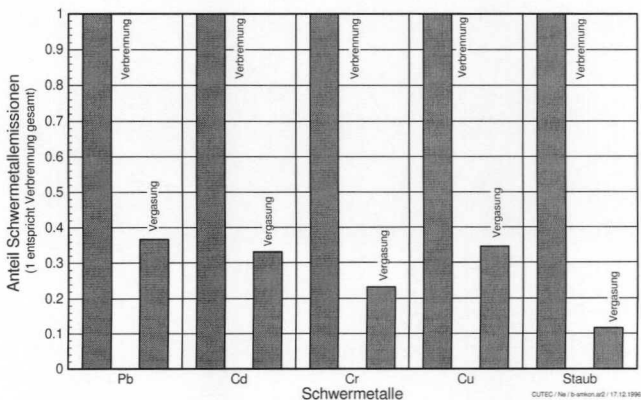


Bild 13. Schwermetallemissionen vom Rost im Vergasungs- und Verbrennungsbetrieb.

Die Mobilisierung wird wesentlich durch die Temperaturverhältnisse, die Verweilzeit und die Chlorgehalte im Gutbett beeinflusst. Die Temperatur und die Verweilzeit lassen sich durch die Prozeßführung steuern, der Chlorinput ist durch die Abfallzusammensetzung bestimmt. Bei einem Vergleich der Vergasungs- und Verbrennungsfahrweise ist hinsichtlich des Einflusses von Chlor zu beachten, daß wegen der geringeren Gasmassenströme bei der unterstöchiometrischen Fahrweise sowohl höhere Chlorkonzentrationen als auch längere Verweilzeiten der Gase im Bett vor-

liegen. Daraus könnte man schließen, daß bei der Vergasungsfahrweise mit einer zunehmenden Verflüchtigung aufgrund der höheren Chorkonzentrationen und der längeren Verweilzeiten im Brennbett vergleichsweise höhere, nicht an die Partikeln gebundene Anteile auftreten. Hierzu ergeben sich aus den bisherigen Untersuchungen zunächst erste Hinweise, die in weiteren Versuchsfahrten näher untersucht werden. In diesem Zusammenhang müssen auch zur Klärung der Eluatverfügbarkeit noch eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt werden.

3.4 Eigenständige, getrennte Nachverbrennung der Brenngase

Die Nachverbrennung der im Rostprozeß erzeugten Brenngase erfolgt in einer eigenständigen Feuerung. Die Brenngase weisen einen Heizwert von $h_{u,G,R} \approx 2000$ kJ/kg auf und werden dem Nachverbrennungsprozeß mit Temperaturen von $\vartheta_{G,R} \approx 750$ °C bis $\vartheta_{G,R} \approx 850$ °C zugeführt. Die getrennte Prozeßführung (Bilder 5 und 9) gestattet eine unabhängige Optimierung des Nachverbrennungsprozesses im Hinblick auf die Reduzierung von Schadstoffen, wie z.B. Kohlenmonoxid, organische Verbindungen und Stickoxide. Die dabei in Frage kommenden Primärmaßnahmen sind im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Prozeßführung von gasförmigen, flüssigen und staubförmigen Brennstoffen bereits sehr umfangreich untersucht worden, daher sei hier auf das entsprechende Schrifttum [23 bis 27] verwiesen.

Im Zusammenhang mit der Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise wird in dem hier gesteckten Rahmen insbesondere auf die Möglichkeit zur Minimierung von Stickstoffoxiden bei gleichzeitig hohem Ausbrand (CO) eingegangen. Dabei stammen die vorgestellten Ergebnisse wiederum aus Untersuchungen mit kontaminierten Abfallhölzern.

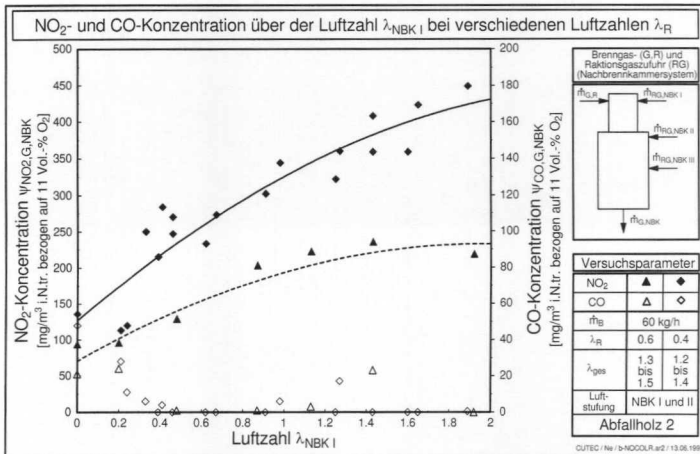


Bild 14. NO₂- und CO-Konzentration über der Luftzahl λ_{NBK1} bei verschiedenen Luftzahlen λ_R [9].

Das Bild 14 zeigt NO-Konzentrationen im Rohgas (Ende Nachbrennkammer, angegeben als NO₂) in Abhängigkeit von der Luftzahl in der ersten Stufe der Nachbrennkammer (NBK I für zwei unterschiedliche Stöchiometrieverhältnisse in der Roststufe ($\lambda_R \approx 0,4$ und $\lambda_R \approx 0,6$). Zunächst ergibt

sich in beiden Fällen der bekannte Zusammenhang zwischen der Stöchiometriezahl λ_{NBKI} in der ersten Stufe der Brennkammer und der NO-Konzentration ψ_{NO_2} im Rohgas bei der Reduzierung von Brennstoff-NO. Darüber hinaus ist zu erkennen, daß die NO-Werte bei einer Primärluftzahl von $\lambda_R \approx 0,6$ deutlich niedriger sind als bei $\lambda_R \approx 0,4$. Das höhere Primärluftverhältnis in der Rostanlage bedeutet neben der Erhöhung des Sauerstoffangebotes im vorliegenden Fall einen Anstieg im Temperaturniveau von $\lambda_R \approx 700$ °C auf $\lambda_R \approx 1000$ °C. Damit ist bereits in der Roststufe eine höhere Abbaurate von flüchtigen Brennstoff-N-Komponenten wie HCN und NH₃ über NO und eine Reduktion von NO zu N₂ verbunden. Im vorliegenden Fall (Bild 14) ergibt sich, ausgehend von $\psi_{NO_2} \approx 450$ mg/m³ (i.N.tr. bei 11 Vol.-% O₂) bei $\lambda_R \approx 0,4$ und bei einer ungestuften Nachverbrennung mit $\lambda_{NBKI} \approx 1,8$, für eine annähernd gleiche Gesamtluftzahl $\lambda_{ges} \approx 1,3$ bei einer Fahrweise mit $\lambda_R \approx 0,6$ und einer gestuften Nachverbrennung mit $\lambda_{NBKI} \approx 0,4$ eine NO-Minderung auf $\psi_{NO_2} \approx 100$ mg/m³. Wie die zugehörigen CO-Konzentrationen in Bild 14 zeigen, wird dabei ein gleichbleibend niedriges Niveau von $\psi_{CO} < 10$ mg/m³ erreicht.

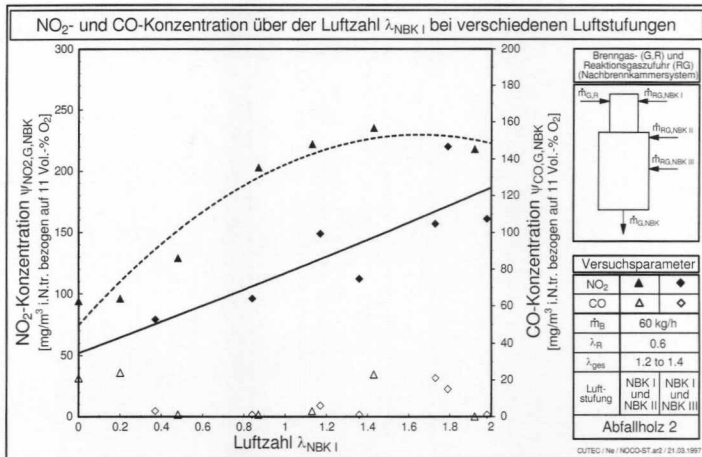


Bild 15. NO₂- und CO-Konzentration über der Luftzahl λ_{NBKI} bei verschiedenen Luftstufungen [9].

Ein weiterer Einfluß auf die NO-Konzentration ist mit dem Ort der Luftstufung in der Nachbrennkammer verbunden. Durch die Zugabe der Luft an den Stellen NBKI und NBKIII (Bild 15) wird eine weitere NO-Minderung auf $\psi_{NO_2} < 100$ mg/m³ erreicht. Die Verschiebung der Restausbrandluft in den unteren Bereich des Brennkammersystems (Zugabeort NBK III) führt zu einer Verlängerung der Verweilzeit im unterstöchiometrischen Bereich. Darüber hinaus ergeben sich veränderte Bedingungen in Bezug auf das Verweilzeitverhalten in der unterstöchiometrischen Zone. Im Fall Stufung NBKI und NBKII ist die unterstöchiometrische Zone nur im oberen Teil der Brennkammer, in der aufgrund der intensiven Durchmischung näherungsweise eine Rührkessel-Charakteristik vorliegt. In der folgenden Anschlußgeometrie (Zugabeort NBKII) geht die Strömung in eine Kolbenströmer-Charakteristik über [21]. Wie aus anderen Untersuchungen bekannt ist [27], ist eine hohe Verweilzeit im unterstöchiometrischen Bereich in Verbindung mit einer Kolbenströmer-Charakteristik für niedrige NO-Emissionen anzustreben (Bild 16).

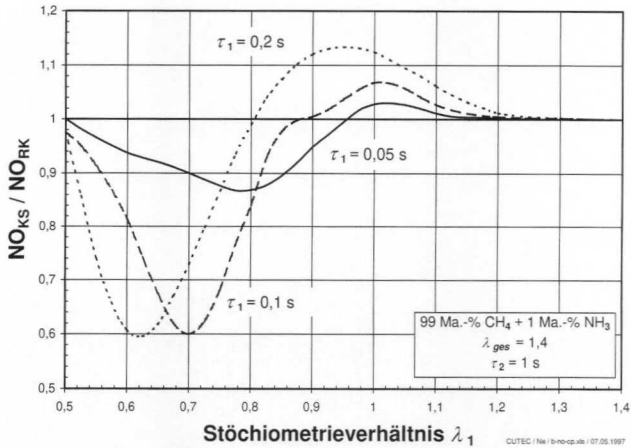


Bild 16. Verhältnis der NO-Bildungsraten für Kolbenströmer und Rührkessel über dem Luftverhältnis in der ersten Stufe bei verschiedenen Verweilzeiten in der ersten Stufe [27].

Als letztes Beispiel im Zusammenhang mit der NO-Minderung sei an dieser Stelle auf den Einfluß des Lastverhältnisses eingegangen. Das Bild 17 zeigt die Ergebnisse für drei Lastfälle bei $\lambda_R \approx 0,4$ in Abhängigkeit von (NBKI und bei nahezu gleichen Gesamtluftzahlen $\lambda_{ges} \approx 1,3$. Erwartungsgemäß ergeben sich bei höherer Last und ungestufter Fahrweise höhere NO-Konzentrationen. Durch eine Luftstufung (hier bei NBKI und NBKII) lassen sich aber auch in diesen Fällen die NO-Konzentrationen auf das Niveau der Normlast zurückführen wobei auch hier gleichbleibend niedrige CO-Konzentrationen mit $\psi_{CO} < 10 \text{ mg/m}^3$ erreicht werden.

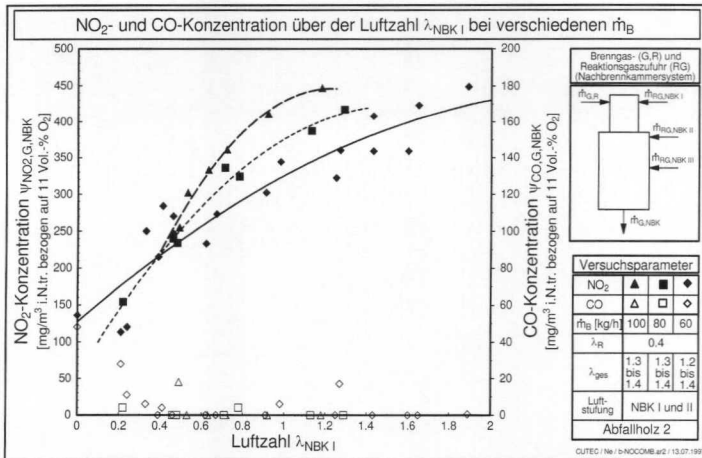
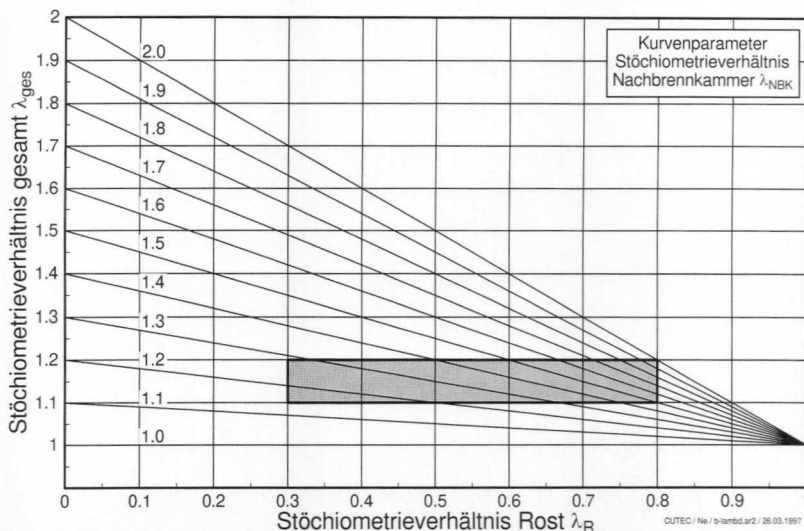


Bild 17. NO_2 - und CO -Konzentration über der Luftzahl λ_{NBK} bei verschiedenen Brennstoffmassenströmen [9].

Im Hinblick auf die Senkung der Abgasströme sei darauf hingewiesen, daß sich bei einer Primärluftzahl von $\lambda_R = 0,4$ bis $\lambda_R = 0,8$ Gesamtluftzahlen (einschließlich Sekundär- und ggf. Tertiärluft in dem Nachbrennkammersystem) von $\lambda_{\text{ges}} < 1,2$ erreichen (vgl. Bild 18) lassen, was im Vergleich zu den Verhältnissen konventioneller Anlagen eine erhebliche Reduzierung der Abgasströme und damit auch eine Reduzierung von Schadstofffrachten bedeutet. In Verbindung mit der Verminderung von Emissionen durch Primärmaßnahmen läßt sich damit u.a. der Aufwand in der Abgasreinigung senken, was dann wiederum zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades führt.

Bild 18. Abhängigkeit des Gesamtstöchiometrieverhältnisses λ_{ges} von dem Stöchiometrieverhältnis in Rost- und Nachbrennkammersystem [16].

4 Zusammenfassung

Die thermische Behandlung von Restmüll erfolgt überwiegend durch Verbrennung in Rostsystemen (klassische MVA). Um über die durch die Entwicklung von Sekundärmaßnahmen (z.B. Abgasreinigung) in den vergangenen 10 Jahren erzielten Schadstoffminderungen hinaus Ziele wie

- die Senkung der Abgasmassenströme und damit die Reduzierung der Emissionsfrachten,
- die Beeinflussung der Reststoffeigenschaften und
- die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades

zu erreichen, muß das zur Optimierung der Prozeßführung im thermischen Hauptverfahren (Primärmaßnahmen) vorhandene Potential weiter ausgeschöpft werden. Eine aussichtsreiche Entwicklung stellt die Vergasung auf dem Rost mit getrennter Nachverbrennung dar.

Im Gegensatz zur konventionellen Prozeßführung mit überlappenden Reaktionszonen ergibt sich durch die deutliche Trennung der Teilschritte:

- Feststoffumsatz auf dem Rost,
- Nachverbrennung der Gase und
- Wärmeübertragung

die Möglichkeit einer unabhängigen Optimierung der zugehörigen Teilaufgaben (Bild 5). Wird der Feststoff auf dem Rost stark unterstöchiometrisch (Vergasung) umgesetzt, so kann die Nachverbrennung der erzeugten Gase wie in einer eigenständigen Feuerung optimiert werden. An einer diesem Konzept entsprechenden Pilotanlage (Bilder 9 und 10) wurden für verschiedene Modellstoffe (Holz, Braunkohle) sowie für Restabfälle u.a. die Auswirkungen der Luftzahl und -stufung, Roststabgeschwindigkeit, usw. in der Vergasung und der Luftstufung und Abgasrückführung in der Nachverbrennung untersucht.

Durch die insbesondere bei Rostsystemen zahlreich vorhandenen Möglichkeiten zur Steuerung der Sauerstoffzufuhr, Temperatur und Verweilzeit entlang des Reaktionsweges lassen sich bei der Vergasung ebenso wie bei der Verbrennung sehr niedrige Glühverluste der Reststoffe erreichen. Über die Vorteile einer getrennten Prozeßführung hinaus werden bei der Vergasungs-Nachverbrennungsfahrweise zusätzlich u.a. Flugstaubkonzentrationen erheblich gesenkt (Bild 11).

Die Übertragung von bekannten Primärmaßnahmen auf den Nachverbrennungsprozeß führt zu deutlichen Reduzierungen von Stickoxiden bei gleichzeitig hohem Ausbrand (Bilder 14 bis 17). Die Gesamtluftzahlen sind mit $\lambda_{ges} \approx 1,2$ bis $\lambda_{ges} \approx 1,4$ gegenüber der konventionellen Fahrweise mit $\lambda_{ges} \approx 1,8$ erheblich niedriger (Bild 18). Die Senkung der Luftzahlen wirkt sich entsprechend auf die Reduzierung der Abgasströme, der Emissionsfrachten und letztlich auch auf die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades aus.

Derzeit werden weitere Untersuchungen zur Optimierung der Vergasungs- Nachverbrennungsfahrweise in Rostsystemen durchgeführt. Dabei sind insbesondere Fragestellungen im Zusammenhang mit der Beeinflussung des Eluatverhaltens der Asche oder die mathematische Modellierung von Interesse.

5 Danksagung

An dieser Stelle sei besonders der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, gedankt. Mit der finanziellen Unterstützung dieser Institution ist die Durchführung der hier dargestellten Versuche erst ermöglicht worden.

6 Symbolverzeichnis

SYMBOLE

a	Inertgasrate
h	Spezifische Enthalpie (Heizwert)
\dot{m}	Massenstrom
T	Temperatur [K]
ϑ	Temperatur [°C]
λ	Stöchiometrieverhältnis, Luftzahl
ξ	Konzentration (massenbezogen)
ψ	Konzentration (volumenbezogen)
ω	Frequenz
τ	Verweilzeit

INDICES

B	Brennstoff
C	Kohlenstoff
F	Flugstaub
G	Brenngas/Abgas
HD	Hydraulikzylinder
$i.N.tr.$	im Normzustand, trocken
NBK	Nachbrennkammer
R	Rost
Re	Reststoffe
RG	Reaktionsgas
ges	gesamt
u	unterer (Heizwert)

7 Schrifttum

- [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] Christmann, A.; Quitteck, G.: Die DBA-Gleichstromfeuerung mit Walzenrost. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [3] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI-Berichte Nr. 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.
- [4] 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)/ Tü/ Umwelt-Special 44 (1992) Nr. 10.
- [5] Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [6] Lautenschlager, G.: Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.
- [7] Martin, J.; Busch, M.; Horn, J.; Rampp, F.: Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen Schadstoffreduzierung. VDI-Berichte 1033, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.

- [8] Schäfers, W.; Limper, K.: Fortschrittliche Feuerungsleistungsregelung durch Einbeziehung der Fuzzy-Logik und der IR Thermografie.
In: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1993.
- [9] Beckmann, M.; Scholz, R.; Wiese, C.; Davidovic, M.:
Optimization of Gasification of Waste Materials in Grate Systems.
1997 International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, San Fransisco-Oakland Bay, California, 12.-16. May, 1997.
- [10] Berwein, H.-J.: Siemens Schwel-Brenn-Verfahren - Thermische Reaktionsabläufe.
In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95,
B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.
- [11] Scholz, R.; Schopf, N.: General Design Concept for Combustion Processes for Waste Fuels and Some Test Results of Pilot Plants. 1989 Incineration Conference, Knoxville, USA, 1989.
- [12] Göhler, P.; Schingnitz, M.: Stoff- und Wärmebilanzen bei der Abfallverwertung nach dem NOELL-Konversionsverfahren. In: Energie und Umwelt' 95 mit Energieverbrauchsminderung bei Gebäuden, TU Bergakademie Freiberg, 22.- 23. März 1995.
- [13] Stahlberg, R.; Feuerrigel, U.: Thermoselect - Energie und Rohstoffgewinnung.
In: Abfallwirtschaft Stoffkreisläufe, Terra Tec '95, B.G.
Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1995.
- [14] Albrecht, J.; Loeffler, J.; Reimert, R.: Restabfallvergasung mit integrierter Ascheverschlackung. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.
- [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] Beckmann, M.: Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung.
CUTEC-Schriftenreihe, 1995.
- [17] Hunsinger, H.; Merz, A.; Vogg, H.: Beeinflussung der Schlackequalität bei der Rostverbrennung von Hausmüll. GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.
- [18] Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering. John Wiley and Sons. New York, 1972.
- [19] Dryer, F.L.; Glasman, I.: 14th International Symposium On Combustion.
Combustion Institute Pittsburgh, 1973.
- [20] Leuckel, W.: Swirl Intensities, Swirl Types and Energy Losses of Different Swirl Generating Devices. IFRF Ijmuiden, November 1967, G 02/a/16.
- [21] Carlowitz, O.; Jeschar, R.: Entwicklung eines variablen Drallbrennkammersystems zur Erzeugung hoher Energieumsetzungsichten. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 32 (1980).

- [22] Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.: Zur Thermodynamik von Freistrahlen. Gas-Wärme-International 33 (1984) 1.
- [23] 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.
- [24] Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der NO_x- Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. TECFLAM- Seminar, Oktober 1990, Heidelberg, 1990.
- [25] Kolb, T.; Leuckel, W.: NO_x- Minderung durch 3-stufige Verbrennung – Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM- Seminar, Stuttgart, 1988.
- [26] Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der NO_x- Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985.
- [27] Klöppner, G.: Zur Kinetik der NO-Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991.