



---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
Technik und Umwelt

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 5548

**Thermische Behandlung von  
Abfällen in Drehrohröfen**  
eine Darstellung anhand der  
Literatur

**U. Richers**

Institut für Technische Chemie  
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

September 1995

---



**Forschungszentrum Karlsruhe**

**Technik und Umwelt**

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5548

**Thermische Behandlung von Abfällen**

**in Drehrohröfen**

**- eine Darstellung anhand der Literatur**

U. Richers

Institut für Technische Chemie  
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
1995

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

## **Kurzfassung**

**U. Richers**

### **Thermische Behandlung von Abfällen in Drehrohröfen - eine Darstellung anhand der Literatur**

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Kenntnisse über die thermische Behandlung von Abfällen in Drehrohren anhand der Literatur zusammengefaßt. Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Sonderabfallverbrennung in Drehrohröfen mit Nachbrennkammer. Die Technik der Rauchgasreinigung wird nur kurz vorgestellt.

Die Betrachtung der Literatur hat gezeigt, daß über die Verbrennung in der Nachbrennkammer umfangreiche Daten vorliegen. Für die Prozesse im Drehrohr und über den Kessel wurden in der Literatur keine exakten Informationen gefunden.

Zusammengefaßt ergibt sich, daß Drehrohre mit Nachbrennkammer eine erprobte Technik zur Sonderabfallbehandlung darstellen. Für ein exaktes naturwissenschaftliches Verständnis der Vorgänge in solchen Anlagen sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

## **Abstract**

**U. Richers**

### **Thermal waste treatment in rotary kiln incinerators a study of the literature**

The scope of this work is the summarization of the knowledge about the thermal waste treatment in rotary kilns, as far as it is published in the scientific literature. The main focus was the incineration of hazardous waste in rotary kilns with afterburning chambers. The technology of flue gas cleaning is only described briefly.

The study of the literature has shown, that a lot of data concerning the incineration in the afterburning chamber is known. However, no detailed information about the processes in the rotary kiln and about the boiler were found.

In summary, the data in the literature show that the waste incineration in rotary kilns with afterburning chambers is a reliable technology. Nevertheless, for a scientific understanding of the processes in such plants further research work has to be done.

## **Vorwort**

Die vorliegende Literaturstudie ist Bestandteil der Entscheidungsvorbereitung zur Auslegung einer neuen halbtechnischen Versuchsanlage zur thermischen Entsorgung spezieller Abfälle, THERESA, im Forschungszentrum Karlsruhe, Projektbereich PSA. Es ging dabei vor allem um die Frage, ob die anvisierte Prozesskombination Drehrohr-Nachbrennkammer richtig ausgewählt wurde. Zusätzlich sollte hinterfragt werden, ob neue Vorschläge zur energetischen Versorgung solcher Anlagen durch vorgeschaltete Pyrolyseprozesse in das Anlagenkonzept einbezogen werden sollten.

Da im Forschungszentrum Karlsruhe aufgrund der aktuellen Personalentwicklung niemand für die Durchführung einer solchen Studie verfügbar war, mußten wir eine externe Lösung finden. Wir danken Herrn Prof. Schügerl, Herrn Prof. Hesse und Herrn Prof. Rotzoll vom Institut für Technische Chemie der Universität Hannover herzlich für ihren Vorschlag, Herrn Dr. Richers mit der Studiendurchführung zu beauftragen. Herr Richers ist zwischenzeitlich als Nachwuchswissenschaftler Mitarbeiter des FZK geworden.

Im Ergebnis hat die Studie gezeigt, daß in allgemein zugänglichen Veröffentlichungen über die Drehrohr-Nachbrennkammer-Technologie, den dazugehörigen Abhitzekeessel sowie über vorgeschaltete Pyrolyseprozesse weit weniger Informationen enthalten sind, als wir zuvor bereits in zahlreichen Gesprächen mit Anlageherstellern und -betreibern, sowie auf einschlägigen Fachtagungen gesammelt hatten.

Unbeschadet dieser Tatsache hat das Ergebnis unsere tentative Vorentscheidung für die Drehrohr-Nachbrennkammer-Technologie in den zwei wesentlichen Punkten bestätigt:

- Das große Einsatzpotential dieser Technologie für alle thermisch behandlungsbedürftigen Abfälle, die nicht in Rostfeuerungen gehandhabt werden können und
- den vorhandenen F+E-Bedarf für die Optimierung dieser Technologie - sowohl mit dem Ziel der Senkung der spezifischen Behandlungskosten, als auch mit den Zielen, bessere Grundkenntnisse über die Vorgänge im Drehrohr zu sammeln sowie die Technologie insgesamt für verschiedene Einsatzzwecke zu optimieren.

Auch unsere Überlegungen zu einer dem eigentlichen Abfallbehandlungsprozess vorgelegerten Pyrolyse energiereicher Abfälle zur energetischen Versorgung des Drehrohrs und vor allem der Nachbrennkammer mit Pyrolysegas wurden bestätigt.

Dr. Hartwig Blume  
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren  
August 1995

Karlsruhe,

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Einleitung und Problemstellung</b>	<b>9</b>
<b>2. Thermische Behandlung von Sonderabfall</b>	<b>13</b>
2.1.    Schachttöfen	14
2.2.    Etagenöfen	15
2.3.    Wirbelschichtöfen	16
2.4.    Rostfeuerungen	17
2.5.    Brennkammern	18
2.6.    Drehrohranlagen	18
2.6.1.    Allgemeines	18
2.6.2.    Gleich- und Gegenstrombetrieb von Drehrohranlagen	22
<b>3. Auswahl des Verbrennungssystems</b>	<b>24</b>
<b>4. Technische Anwendungen von Drehrohröfen</b>	<b>26</b>
4.1.    Nichtkatalytische Gas-Feststoffreaktionen	26
4.2.    Altlastensanierung	27
4.3.    Kombination von Rost und Drehrohr	28
4.4.    Schwenköfen	30
4.5.    Das Zepp-Drehrohr	33
<b>5. Weitere Verfahren zur thermischen Sonderabfallbehandlung</b>	<b>34</b>
5.1.    Thermo-Cycling-Prozeß	34
5.2.    Schwelbrennverfahren	35
5.3.    Thermoselect-Verfahren	37
<b>6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen</b>	<b>39</b>
6.1.    Drehrohrkonstruktion	39
6.1.1.    Allgemeine Konstruktionsmerkmale	39
6.1.2.    Drehzahl und Neigung des Drehrohres	41
6.1.3.    Drehrohrlängsschnitt	42
6.1.4.    Ausmauerung des Drehrohres	44
6.1.5.    Das Verhältnis von Länge zu Durchmesser	49

<b>6.2.</b>	<b>Vorgänge im Drehrohrofen</b>	<b>53</b>
6.2.1.	Grundlegende physikalische und chemische Vorgänge im Ofen	55
6.2.2.	Verweilzeiten und Luftüberschuß	58
6.2.3.	Temperaturen und Wärmebelastungen im Drehrohr	59
<b>6.3.</b>	<b>Konstruktion der Nachbrennkammer</b>	<b>63</b>
6.3.1.	Bauformen der Nachbrennkammer	66
6.3.2.	Ausmauerung der Nachbrennkammer	69
6.3.3.	Anordnung der Brenner	71
6.4.	Daten großtechnischer Nachbrennkammern	73
6.5.	Vorgänge in der Nachbrennkammer	76
6.5.1.	Verbrennungsreaktionen in der Nachbrennkammer	76
6.5.2.	Mischungsvorgänge und Verweilzeiten in der Nachbrennkammer	80
6.5.3.	Strömungsmodelle für die Nachbrennkammer	87
<b>7.</b>	<b>Betrieb von Sonderabfallverbrennungsanlagen (SVA)</b>	<b>91</b>
7.1.	Einförderung der Abfälle	91
7.1.1.	Verwendung von Pumpen	92
7.1.2.	Dickstoffpumpen	93
7.1.3.	Einlaufschurre	94
7.1.4.	Shredderanlagen	94
7.1.5.	Förderschnecken	94
7.2.	Praktische Erfahrungen	95
7.2.1.	Allgemeine Betriebserfahrungen	95
7.2.2.	Faßaufgabe	97
7.2.3.	Betriebstemperaturen der Nachbrennkammer	100
7.2.4.	Meßergebnisse aus Versuchen	101
7.3.	Regelung und Modellierung von Drehrohranlagen	103
<b>8.</b>	<b>Der Abhitzekeessel</b>	<b>105</b>
8.1.	Kesselbauformen	107
8.2.	Umlaufsysteme für Kessel	110
8.3.	Temperaturen im Kessel	111
8.4.	Reinigung der Kessel	112



8.5.	Beispiele von Abhitzekesteln	113
8.5.1.	Beschreibung von Horizontalkesteln	113
8.5.2.	Die Kessel der BASF AG	114
8.5.3.	Kessel der Hessischen Industriemüll GmbH (HIM)	115
8.5.4.	Das Kesselsystem am Standort Schwabach	117
8.5.5.	Der Kessel der Lonza AG in Visp	118
<b>9.</b>	<b>Eigenschaften und Verwertung der Schlacke</b>	<b>120</b>
9.1.	Meßverfahren zur Elution von Schlacken	120
9.2.	Inhaltsstoffe von Schlacken aus Sondermüllverbrennungsanlagen	121
9.3.	Entsorgung der Schlacken aus Sondermüllverbrennungsanlagen	123
<b>10.</b>	<b>Rauchgasreinigung</b>	<b>125</b>
10.1.	Einführung in die Problematik	125
10.2.	Neuere Verfahren zur Rauchgasreinigung	129
10.2.1.	Festbettadsorber	130
10.2.2.	Flugstromadsorber	132
10.2.3.	Wirbelschichtadsorber	133
10.2.4.	Katalytische Zerstörung von NO <sub>x</sub> und PCDD/F	133
10.2.5.	Nicht katalytische Entstickung	134
10.3.	Rauchgasreinigung an Drehrohranlagen	135
10.4.	Reststoffe	140
<b>11.</b>	<b>Beschreibung einer großtechnischen Drehrohranlage</b>	<b>144</b>
<b>12.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>148</b>
<b>13.</b>	<b>Ausblick</b>	<b>153</b>
	<b>Anhang I Literatur zur Rauchgasreinigung</b>	<b>155</b>
	<b>Anhang II Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>

## Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1:	Schachtofen der BASF AG	14
Abb. 2.2:	Etagenofen	15
Abb. 2.3:	Wirbelschichtofen	16
Abb. 2.4:	Rostofen	17
Abb. 2.5:	Schematisches Schnittbild für das Drehrohr einer Sonderabfallverbrennungsanlage	20
Abb. 4.1:	Schematische Darstellung einer aus Rostofen und Drehrohr aufgebauten Verbrennungsanlage	29
Abb. 4.2:	Längsschnitt durch den Verbrennungsofen	31
Abb. 4.3:	Schema der Schwenkofenversuchsanlage	32
Abb. 5.1:	Blockschaltbild für den Thermo-Cycling-Prozeß	35
Abb. 5.2:	Das Schwelbrennverfahren	36
Abb. 5.3:	Schematische Darstellung des Thermoselectverfahrens	37
Abb. 6.1:	Schnitt durch ein Drehrohr mit reduziertem Innendurchmesser am Eintrag	42
Abb. 6.2:	Schnitt durch ein Drehrohr mit reduziertem Durchmesser am Ein- und Austrag	42
Abb. 6.3:	Drehrohr für eine geplante dritte Verbrennungsstraße der HIM	43
Abb. 6.4:	Drehrohrofen-Innenwandtemperatur als Funktion der Wanddicke bei einer Feuerraumtemperatur von 1250 °C	46
Abb. 6.5:	Blick in den Ofen 8 der BASF AG	47
Abb. 6.6:	Darstellung der l/d-Werte für die Öfen der BASF AG. Die Zahl unter dem Balken entspricht der Nummer in Tabelle 6.2	51
Abb. 6.7:	Darstellung der l/d-Verhältnisse für weitere Anlagen. Die Zahl unter dem Balken entspricht der Nummer in Tabelle 6.2	52
Abb. 6.8:	Möglichkeiten des Wärmetransportes in einem Drehrohrofen	54
Abb. 6.9:	Schematische Darstellung der verschiedenen Abfallströme und der physikalischen und chemischen Vorgänge	55
Abb. 6.10:	Schematische Darstellung zu den Vorgängen im Drehrohr	56
Abb. 6.11:	Darstellung eines schematischen Temperaturprofils	60
Abb. 6.12:	Darstellung eines schematischen Temperaturprofils	61
Abb. 6.13:	Rauchgastemperaturen im Drehrohr	61
Abb. 6.14:	Feuerungstechnische Aufteilung der Drehrohranlage	65
Abb. 6.15:	Querschnitt durch die Nachbrennkammer in Biebesheim	67
Abb. 6.16:	Temperatur-, Geschwindigkeits- und Verweilzeitverlauf des Rauchgases	68
Abb. 6.17:	Wandaufbau in der Nachbrennkammer	70
Abb. 6.18:	Brenneranordnung in der Nachbrennkammer	72
Abb. 6.19:	Temperaturverteilung am Austritt der Nachbrennkammer der BASF-Ofenlinie 6	75
Abb. 6.20:	Temperaturverteilung in der Nachbrennkammer der BASF-Ofenlinie 6	75
Abb. 6.21:	Thermische Zerstörbarkeit von organischen Substanzen in Luft	77
Abb. 6.22:	PCB-Zerstörung und PCDF-Bildung in der Gasphase	78
Abb. 6.23:	Korngrößenverteilung des Flugstaubs in der Nachbrennkammer	79

Abb. 6.24:	Abhängigkeit des CO-Abbaus von der mittleren Verweilzeit und dem Mischungsverhalten des Reaktors	84
Abb.: 6.25:	Thermische Zersetzung von TCDD im idealen Strömungsrohr und im idealen Rührkessel	84
Abb. 6.26:	Profile verschiedener Strömungen	85
Abb. 6.27:	Tracerverteilungen am Eintritt am Austritt der Nachbrennkammer für den Ofen 6 der BASF AG	87
Abb. 6.28:	Gemessene und berechnete Grundströmung in der Nachbrennkammer	89
Abb. 7.1:	Sauerstoffeinsatz in Sondermüllverbrennungsanlagen	98
Abb. 7.2:	Labordrehrohranlage der University of Utah	102
Abb. 8.1:	Kesseltypen für Sondermüllverbrennungsanlagen	107
Abb. 8.2:	Abhitzekessel hinter einer Sonder- bzw. Chemiemüllverbrennungsanlage	109
Abb. 8.3:	Kesselaufbau und Temperatur- sowie Gasgeschwindigkeitsverlauf innerhalb des Kessels	109
Abb. 8.4:	Rückstandsverbrennungsanlage 6 der BASF AG	115
Abb. 8.5:	Dampfkesselsystem der Hessischen Industriemüll GmbH	116
Abb. 8.6:	Rauchgasdaten für die Anlagen der Hessischen Industriemüll GmbH	117
Abb. 8.7:	Schema der Sonderabfallverbrennungsanlage in Schwabach	118
Abb. 10.1:	Kreuzstrom-Festbettadsorber	131
Abb. 10.2:	Kombireaktor für NO <sub>x</sub> - und Dioxinabbau	134
Abb. 10.3:	Rauchgasreinigungsanlage in Herten	136
Abb. 10.4:	Verfahrensfließbild für eine Rückstandsverbrennungsanlage der Bayer AG	138
Abb. 10.5:	Rauchgasreinigung der BASF AG	140
Abb. 10.6:	Entstehungsort und Verbleib der Schadstoffe bei der Abfallverbrennung	141
Abb. 11.1:	Grundfließbild für die Anlage in Ebenhausen	146

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3.1:	Einsatzmöglichkeiten verschiedener Ofenkonstruktionen in Bezug auf unterschiedliche Abfallarten	24
Tabelle 6.1:	Angaben zur Neigung des Drehrohres	41
Tabelle 6.2:	Daten technischer Drehrohre	50
Tabelle 6.3:	Längenangaben zu den einzelnen Zonen im Drehrohr	57
Tabelle 6.4:	Verweilzeiten für feste Abfälle im Drehrohr	58
Tabelle 6.5:	Luftzahlen $\lambda$ aus Literaturangaben	59
Tabelle 6.6:	Temperaturen im Drehrohr	60
Tabelle 6.7:	Wärmebelastungen im Drehrohrföfen	63
Tabelle 6.8:	Daten für die Nachbrennkammer	74
Tabelle 6.9:	Reynoldszahlen für die Nachbrennkammer	86
Tabelle 8.1:	Kesselwirkungsgrade	106
Tabelle 8.2:	Zusammenstellung von Temperaturen am Kesselaustritt	112
Tabelle 8.3:	Daten für den Kessel einer Sondermüllverbrennungsanlage der Bayer AG (45000 t/a, 7200 h/a)	114
Tabelle 9.1:	Durchschnittliche Zusammensetzung der Schlacken	121
Tabelle 9.2:	Mittlere Konzentrationen einzelner Elemente in den Schlacken	122
Tabelle 9.3:	Schlackenzusammensetzung von drei verschiedenen Sonderabfallverbrennungsanlagen	122
Tabelle 10.1:	Typische Abgaskonzentration nach Kessel (Rohgas) von überregionalen Sonderabfallverbrennungsanlagen	125
Tabelle 10.2:	Vergleich der Emissionsgrenzwerte nach TA Luft und 17 BImSchV. Angaben in mg/m <sup>3</sup> i. N. trocken bezogen auf 11 % O <sub>2</sub>	126
Tabelle 10.3:	Reduktionsraten mit verschiedenen stickstoffhaltigen Abwässern	135
Tabelle 11.1:	Technische Daten für die Gesamtanlage	145
Tabelle 11.2:	Technische Daten für ein Drehrohr	145
Tabelle 11.3:	Technische Daten für eine Nachbrennkammer	145

### 1. Einleitung und Problemstellung

Seit dem Ende des zweiten Weltkrieges und mit dem Aufbau einer Wohlstandsgesellschaft wachsen die Müllberge ständig an. Betrachtet man die Abfälle selbst, so kann man diese in verschiedene Gruppen einteilen. In [Bilitevski] wird z. B. zwischen Hausmüll, Sperrmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen und produktionsspezifischen Abfällen unterschieden.

Die sogenannten Produktionsabfälle lassen sich in zwei große Gruppen einteilen. Die eine Gruppe umfaßt die Stoffe, die mit Hausmüll entsorgt werden können, wie z.B. Kunststoffabfälle oder mineralische Abfälle. Lösungsmittel, Farbschlämme, industrielle Syntheseabfälle, Rückstände aus Tankreinigungen oder infektiöse Abfälle werden dem anderen Block zugeordnet. Von dieser zweiten Gruppe, die allgemein auch als "Sonderabfall" bezeichnet wird, gehen vielfältige Gefahren aus.

In der Bundesrepublik existiert ein ständig wachsendes Netz von Gesetzen und Vorschriften, um eine sichere Entsorgung von Abfällen zum Schutz von Bevölkerung und Umwelt zu gewährleisten. Im Mittelpunkt steht das Abfallgesetz mit seinen Verordnungen. Außerdem gibt es Gesetze, die spezielle Abfälle erfassen, wie z.B. das Tierkörperbeseitigungsgesetz oder das Atomgesetz.

Eine wichtige Verwaltungsvorschrift für die Sonderabfallentsorgung stellt die zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, die Technische Anleitung Abfall (TA Abfall) dar, die auf § 4 Abs. 5 des Abfallgesetzes beruht. Die Organisation der Sonderabfallentsorgung wird maßgeblich durch diese Vorschrift bestimmt. Im Abfallartenkatalog, der Bestandteil der TA Abfall ist, werden den einzelnen Abfällen Schlüsselnummern zugeteilt und bestimmten Entsorgungswegen zugewiesen.

Als weitere Verwaltungsvorschrift zur Abfallentsorgung wurde 1993 die TA Siedlungsabfall verabschiedet. Diese Technische Anleitung bezieht sich in erster Linie auf Siedlungsabfälle. Für die Einhaltung der in der TA Siedlungsabfall festgelegten Grenzwerte, insbesondere für

den Glühverlust von auf Deponien abzulagernden Abfällen, ist nach dem heutigen Stand der Technik immer eine thermische Behandlung des Hausmülls erforderlich.

Das Abfallgesetz wurde 1994 durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz ersetzt, das aber erst nach einer Übergangszeit von zwei Jahren 1996 in Kraft tritt. In diesem Gesetz wird die Verantwortung für die Entsorgung verstärkt auf den Abfallerzeuger übertragen. Außerdem wird der Abfallbegriff neu definiert, so daß jetzt auch die sogenannten "Wirtschaftsgüter" oder "Reststoffe" dem Abfallbegriff unterliegen. Die Auswirkungen dieses neuen Gesetzes auf die bestehenden Verordnungen zum Abfallgesetz und damit auf die Sonderabfallentsorgung sind noch nicht vorabsehbar.

Die geltenden bundesdeutschen Gesetze, insbesondere das zur Zeit für die Abfallentsorgung maßgebliche Abfallgesetz, enthalten den Begriff "Sonderabfall" allerdings nicht, so daß aus den Gesetzestexten keine konkrete Definition zu entnehmen ist. Folglich existiert in der breiten Öffentlichkeit, den Medien und in der Politik in Bezug auf Sonderabfälle ein großes Informationsdefizit [Tabasaran]. Nach der allgemeinen Vorstellung wird unter "normalem Abfall" der "ungefährliche" Hausmüll verstanden. Sonderabfälle sind dagegen "giftig" und entstehen "nur" in der Industrie.

Eine Definition von Sonderabfällen gelingt z.B. unter Verwendung des Abfallgesetzestextes, und zwar mit § 2 Abs. 2 und § 3 Abs. 3 in Verbindung mit § 11 Abs. 2:

Als Sonderabfälle gelten Abfälle aus gewerblichen und sonstigen Unternehmen, an deren Überwachung und Beseitigung aufgrund ihrer möglichen schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt besonders hohe Anforderungen gestellt werden müssen und die wegen ihrer chemischen Zusammensetzung oder Konsistenz in der Regel nicht zusammen mit Hausmüll entsorgt werden können.

Eine ähnliche Definition findet man in [VDI 3640]. Damit gehören zum Sonderabfall u.a. das Altöl und der Ölfilter aus dem privaten Auto oder die Chemikalien zur Entwicklung der Urlaubsfilme. Außerdem können Sonderabfälle bei der Herstellung von Medikamenten, Farbstoffen oder anderer Produkte entstehen. Schon diese wenigen Beispiele zeigen, daß Sonderabfälle in sehr unterschiedlichen Bereichen anfallen können. Auch die privaten Haushalte sind entweder direkt oder indirekt Produzenten von Sonderabfall.

## 1. Einleitung und Problemstellung

---

Aufgrund einer unvollständigen Definition für Sonderabfälle sind für das Sonderabfallaufkommen keine exakten Mengenangaben möglich. Nach einer Auswertung der Begleitscheine, mit denen die Entsorgung umweltgefährdender Abfälle überwacht wird, ergab sich für 1983 eine Menge von 2,4 Mio t. Für 1987 werden 2,71 Mio t angegeben [Bilitevski]. Aufgrund neuer Bestimmungen oder aktueller Erkenntnisse ist damit zu rechnen, daß in Zukunft die Anzahl der überwachungsbedürftigen Abfälle und damit das Sonderabfallaufkommen ansteigen wird [Bilitevski].

Für die Entsorgung von Sonderabfällen sind im Prinzip verschiedene Wege denkbar, die in der Literatur (Siehe z.B. [Bilitevski]) diskutiert werden. Danach ist zwischen Deponierung, thermischer oder biologischer Behandlung und chemisch-physikalischen Verfahren zu unterscheiden.

Die thermische Behandlung von Sonderabfällen besitzt bei korrekter Durchführung die folgenden umweltrelevanten Vorteile (Siehe u.a.[Barniske-2], [Berghoff-1]):

- Durch die Zerstörung der organischen Verbindungen nimmt das Schadstoffpotential ab.
- Die Menge und das Volumen der Abfälle werden deutlich reduziert.
- Die anfallenden Abfälle können durch Aufarbeitung verwertet oder abgelagert werden.
- Flüssige und gasförmige Abfälle, die nicht oder nur begrenzt ablagerungsfähig sind, werden in eine umweltverträglichere Form überführt.
- Die bei der Verbrennung entstehende Wärme läßt sich nutzen.
- Komplexe chemische Reaktionen auf der Deponie werden vermieden.

Aufgrund dieser Vorteile gibt es zu der Verbrennung eigentlich keine Alternative [Dahlke]. Das wichtigste Ziel der Sonderabfallverbrennungstechnik ist die Überführung der Abfälle in ungefährliche Stoffe. Die früher wichtige Wärmeabgewinnung hatte zwischenzeitlich an Bedeutung verloren und wurde als nebensächlicher Vorteil betrachtet. Heute wird wieder verstärkt mit diesem Vorteil argumentiert. Wie bei jedem anderen Verbrennungsvorgang entstehen auch bei der Sondermüllverbrennung Reaktionsprodukte. Es fallen Schlacken, Filterstäube und Rauchgasreinigungsprodukte als zu entsorgende Reststoffe an.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die verschiedenen Ofentypen zur thermischen Behandlung von Abfällen kurz vorgestellt und verglichen. Anschließend wird der derzeitige Wissensstand über den Aufbau und den Betrieb von Drehrohranlagen mit angeschlossener Nachbrennkammer zur Verbrennung von Sonderabfällen anhand von Literaturquellen zusammengefaßt. Als Schwerpunkte sind die Feuerungstechnik, der Ausbrand der festen und gasförmigen Phasen und die Wärmenutzung im Kessel vorgesehen.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich ausdrücklich auf die Verbrennung von Sonderabfällen in Drehrohranlagen mit angeschlossener Nachbrennkammer. Andere Verfahren, bei denen nach einer thermischen Zersetzung der Abfallstoffe in einem Drehrohr eine Nachbehandlung in weiteren Verfahrensstufen erfolgt, werden nicht ausführlich diskutiert. Außerdem werden in dieser Arbeit keine physikalisch-chemischen Behandlungsmethoden für Abfälle betrachtet, auch wenn deren Kombination mit einer Drehrohrverbrennungsanlage sinnvoll oder erforderlich ist.

Eine ausführliche Diskussion von anderen wichtigen Themengebieten, wie der rechtlichen Grundlagen oder der Verfahren zur Rauchgasreinigung, würden den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Das Kapitel 10 über die Rauchgasreinigung dient der Einführung in diese Problematik.



### 2. Thermische Behandlung von Sonderabfall

In der Diskussion über die thermische Behandlung von Abfällen wird oft nur die Verbrennung betrachtet. Neben der Verbrennung ist eine thermische Behandlung von Abfällen auch durch eine Pyrolyse oder Vergasung möglich.

Bei einer Verbrennung laufen chemische Oxidationsreaktionen des Brennstoffs mit gasförmigem Sauerstoff ab. Der Sauerstoff wird dem Verbrennungsofen in der Regel in Form von Luft zugeführt, aber auch der Einsatz von reinem Sauerstoff oder von mit Sauerstoff angereicherter Luft ist möglich. Die bei der Oxidation freiwerdende Wärme kann zur Dampf- bzw. Stromerzeugung eingesetzt werden.

Die Pyrolyse oder Entgasung ist ein Verfahren zur Stoffumwandlung unter Sauerstoffausschluß. Durch die Erwärmung der Abfälle in Pyrolysereaktoren erhält man brennbare Gase, flüssige Öle und kohlenstoffhaltige Rückstände. Die Mengenverhältnisse dieser Stoffe sind von der Temperatur und der Verweilzeit der Abfälle im Pyrolysereaktor abhängig. Die gebildeten Gase und Öle können zur Energieerzeugung oder als Rohstoff verwertet werden. Allerdings ist für die stoffliche Verwertung noch eine Reinigung oder Aufarbeitung erforderlich, die sehr aufwendig sein kann.

Eine Vergasung liegt vor, wenn feste Brennstoffe mit einem Vergasungsmittel, meist Wasserdampf oder Luft, in ein Brenngas umgewandelt werden. Die erforderlichen Reaktionstemperaturen werden durch die Verbrennung kleiner Brennstoffmengen mit Luft oder Sauerstoff aufgebracht. Die chemischen Reaktionen einer Vergasung werden durch das Boudouard-Gleichgewicht zwischen Kohlenstoff und Kohlendioxid mit Kohlenmonoxid und durch das Wassergasgleichgewicht von Wasserdampf und Kohlenmonoxid mit Kohlendioxid und Wasserstoff bestimmt.

In diesem Kapitel werden die in der Literatur beschriebenen Ofentypen für die Verbrennung von Abfällen vorgestellt, wobei auf die Drehrohranlagen ausführlicher eingegangen wird. Die

## 2. Thermische Behandlung von Sonderabfall

neuen thermischen Verfahren, die auf Pyrolyse- oder Vergasungsprozessen beruhen, werden weiter unten im Text kurz erläutert.

### 2.1. Schachtöfen

Mit diesem Ofentyp begann 1956 die planmäßige Verbrennung von Sonderabfällen bei der BASF AG [Dorn-2]. Die Schachtöfen entsprechen im Prinzip einem Hochofen. Im Betrieb werden diese Öfen diskontinuierlich beschickt.

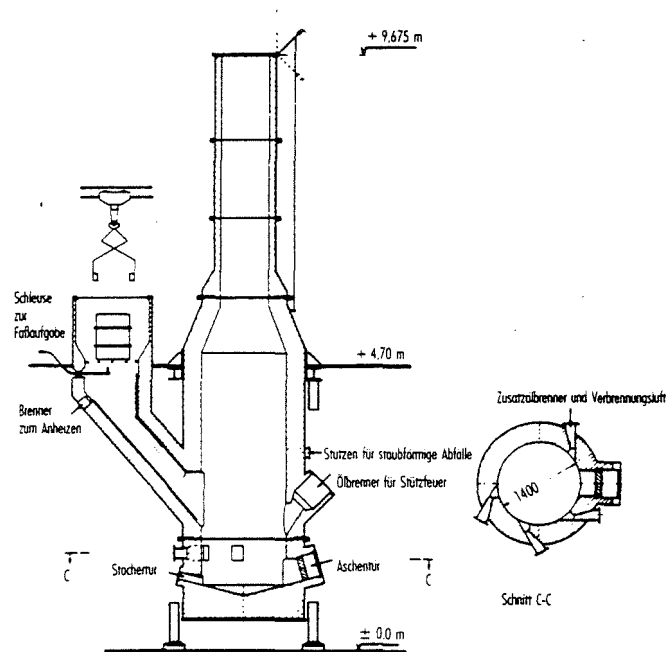


Abb. 2.1: Schachtöfen der BASF AG [Dorn-1]

Bei diesem Ofentyp kann die Verweilzeit der Brennstoffe nur schlecht beeinflusst werden. Die Aufgabe von Abfallchargen kann zu Schwelprozessen und zu einer unvollständigen Verbrennung führen. Außerdem lassen sich in der Gasphase keine anderen Betriebsbedingungen einstellen als im Feststoff. Der Schachtofen hat sich aufgrund dieser Nachteile und seiner geringen Durchsatzkapazität in der chemischen Industrie nicht durchsetzen können [Dorn-1].

### 2.2. Etagenöfen

Diese Ofentechnologie wurde für die Röstung von Erzen entwickelt. Heute werden Etagenöfen für Trocknungsprozesse und die Verbrennung von Klärschlamm eingesetzt. Ein Etagenofen besteht aus einem runden, stehenden Gehäuse, in dem innen mehrere waagerechte Böden eingebaut sind. Das aufzugebene Gut wird über Krählarne bewegt, die durch eine zentrale Achse angetrieben werden.

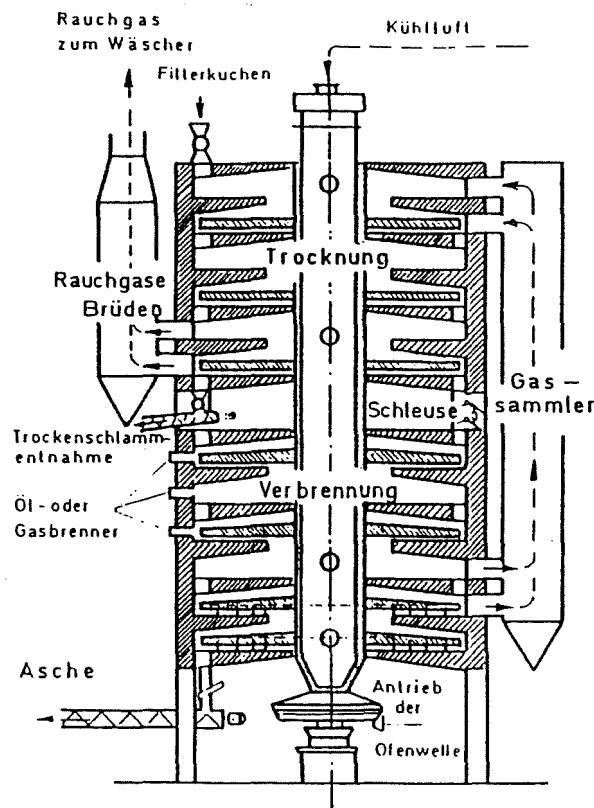


Abb. 2.2: Etagenöfen [Kunz]

In diesen Öfen können Klärschlamm und Müll gemeinsam verbrannt werden, aber im Gegensatz zu anderen Verbrennungsanlagen ist hier eine mechanische Aufbereitung der Abfälle erforderlich [Scholz-2]. Etagenöfen gelten vor allem wegen der Abgasseite als technisch überholt [Steier]. Die Anwendung der Etagenöfen für die Klärschlammverbrennung geht zurück [Zubiller].

### 2.3. Wirbelschichtöfen

Die Wirbelschichttechnologie wurde als Reaktor für chemische Prozesse und zur Kohleverbrennung entwickelt. Die eigentliche Wirbelschicht besteht aus einem inerten Material, das mit einem Luftstrom in einen wirbelnden oder fließbettartigen Zustand versetzt wird. Der Luftstrom wird von unten durch einen Anströmboden eingeblasen.

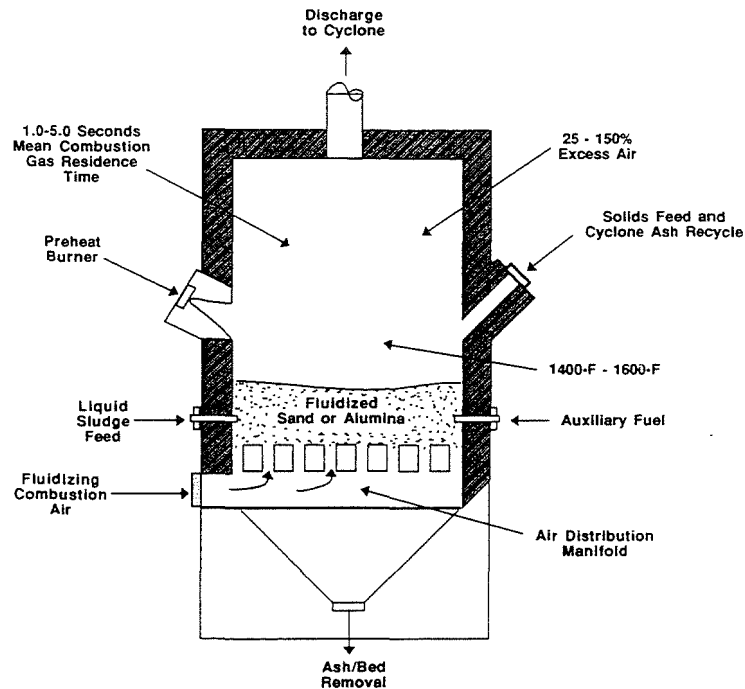


Abb. 2.3: Wirbelschichtofen [Dempsey]

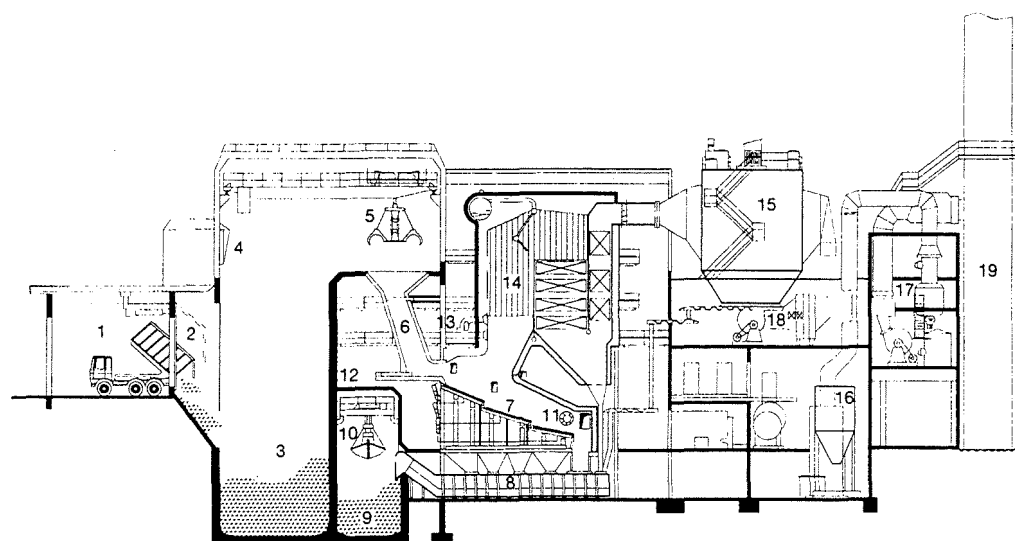
Wesentliche Vorteile der Wirbelschicht sind die kompakte Bauform, die gleichmäßige Temperaturverteilung und die gute Wärmeübertragung zum Brennstoff durch das Inertmaterial. Das An- und Abfahren eines Wirbelschichtofens ist relativ schnell durchführbar. Außerdem kann die thermische Leistung gut variiert werden.

Für die Verbrennung von Sonderabfällen ist die Wirbelschichttechnologie aufgrund der beschränkten Betriebstemperaturen weniger geeignet. Bei Temperaturen von über 900 °C kann aufgrund von Schmelzvorgängen der Aschepartikel der fließbettartige Zustand nicht mehr sicher aufrecht erhalten werden. Bei der Verbrennung von Hausmüll wird keine

gesinterte Schlacke, sondern nur eine Asche gebildet. Ein wichtiges Anwendungsgebiet von Wirbelschichtöfen ist heute die Klärschlammverbrennung.

### 2.4. Rostfeuerungen

Rostfeuerungen werden vorwiegend bei der Hausmüllverbrennung eingesetzt. Sie sind relativ billig und im Durchsatz praktisch unbegrenzt. Dagegen sind Sonderabfälle für die Verbrennung auf einem Rost weniger geeignet, denn im Gegensatz zum festen Hausmüll liegt der Sonderabfall oft in flüssiger oder pastöser Form vor oder dieser Aggregatzustand wird vor der Zündung des Abfalls erreicht. Diese Eigenschaft des Sondermülls führt zu einer Verstopfung der Luftzuführungen des Rostes, so daß die Feuerung nicht mehr einwandfrei arbeitet. Ein vollständiger Ausbrand der Abfälle ist dann in Frage gestellt. Ein weiteres Problem stellt die Konstruktion des Rostes selbst dar. Flüssige Bestandteile des Mülls können durch den Rost tropfen. Das kann eine erneute Kontamination der Schlacken mit Schadstoffe zur Folge Entsprechende Erfahrungen führten bei der BASF AG zu einer Abkehr von diesem Feuerungstyp. Aktuelle Literatur zur Hausmüllverbrennung findet man in [Reimann-1], [Reimann-2] u. [VDI 2114].



- |                |                         |                           |                                |
|----------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1 Entladehalle | 6 Aufgabe               | 11 Zünd- und Stützbrenner | 16 Wäscherstufe 1              |
| 2 Bunkertore   | 7 Gegenschub-Umwälzrost | 12 Schlammaufstreuer      | 17 Wäscherstufe 2              |
| 3 Müllbunker   | 8 Naßentascher          | 13 Nachbrenner            | 18 Rauchgas-Luft-Wärmetauscher |
| 4 Krankanzel   | 9 Aschebunker           | 14 Abhitzekegel           | 19 Kamin                       |
| 5 Krananlage   | 10 Aschekran            | 15 Elektrofiter           |                                |

Abb. 2.4: Rostofen [Babcock]

### 2.5. Brennkammern

Unter einer Brennkammer werden hier einfache Ofenkonstruktionen verstanden, in denen gasförmige, flüssigen oder staubförmige Abfälle mit geeigneten Brennern verbrannt werden. Brennkammern gibt es in sehr unterschiedlichen Größen und Bauformen, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Ein Spezialgebiet für den Einsatz von Brennkammern ist die Verbrennung von Abwässern, die mit organischen Schadstoffen belastet sind.

### 2.6. Drehrohranlagen

#### 2.6.1. Allgemeines

In der Praxis können für Drehrohranlagen zwei große Anwendungsbereiche unterschieden werden. In großen chemischen Industriebetrieben (z.B. Bayer AG, Hoechst AG, BASF AG) erfolgt die Sonderabfallverbrennung in eigenen Anlagen. Neben diesen betriebseigenen Entsorgungsanlagen gibt es öffentliche Anlagen für die überregionale Entsorgung, in denen die Sonderabfälle aus mittelständischen Unternehmen, kleinen Gewerbebetrieben oder den privaten Haushalten entsorgt werden. Als Beispiele seien die Standorte in Biebesheim, Herten, Schwabach und Ebenhausen genannt. Die Drehrohranlagen für innerbetriebliche und überregionale Entsorgung arbeiten nach dem gleichen Prinzip. Eine solche Verbrennungsanlage läßt sich in mehrere Funktionsgruppen gliedern, die sich am besten mit dem Weg des Abfalls durch die Anlage beschreiben lassen.

Die erste Gruppe umfaßt den Anlieferungs- und Lagerbereich. Neben einem Bunker für die Aufnahme von Massenabfällen gibt es weitere abfallspezifische Lagereinrichtungen. Sowohl für die Lagerung als auch für die Verbrennung müssen die Mengen und die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Abfälle bekannt sein [Hünig]. Diese Notwendigkeit hat für öffentliche Sondermüllverbrennungsanlagen eine sehr große Bedeutung und führt zu einem großen logistischen Aufwand [Erbach-5] [Schneider] [Suchomel]. Ein Beispiel für ein entsprechendes Blockschema findet man in [Muckenheim]. Es sind eine Eingangskontrolle und ein Labor erforderlich, die in vielen Fällen mit einem vernetzten EDV-System ausgerüstet sind. Bei einigen Sonderabfallverbrennungsanlagen werden an die angelieferten Abfälle

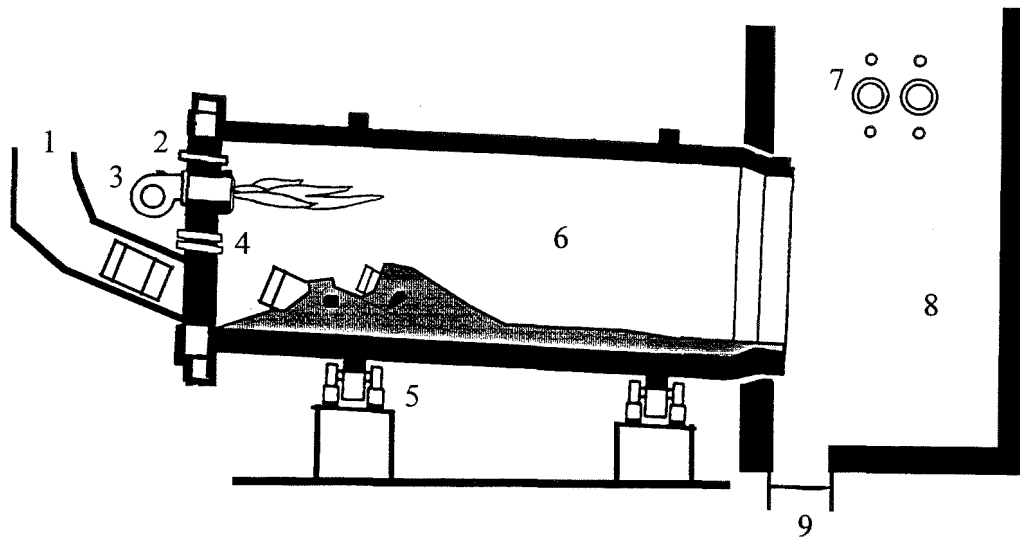
## 2. Thermische Behandlung von Sonderabfall

---

genaue Anforderungen gestellt, nach denen bestimmte Abfälle von der Annahme ausgeschlossen werden können [Muckenheim].

Für die unterschiedlichen Abfälle müssen entsprechende Lager vorgehalten werden. Das umfangreichere Spektrum der angelieferten Abfälle bei den überregionalen Anlagen erfordert eine sehr flexible Auslegung der Lagerkapazitäten. Schon für den Heizwert der Sonderabfälle wird ein sehr großer Bereich angegeben. Er schwankt zwischen 0 und 80 MJ/kg. Der Heizwert von Heizöl beträgt 40 MJ/kg [Schlierf]. In [Hüning] werden die verschiedenen Probleme bei der Handhabung von gasförmigen, flüssigen und festen Abfällen erläutert. Am Standort Herten gibt es neben einem Bunker und den Tanklagern ein gekühltes Lager für Krankenhausabfälle [Möller]. Informationen zu den Lagereinrichtungen von Sonderabfallverbrennungsanlagen findet man auch in [Gottschling].

Mit Hilfe der Kenntnisse über die Abfalleigenschaften wird für die Anlage ein Verbrennungsplan erstellt und die ausgewählten Abfälle werden der Anlage zugeführt. Die folgende Abbildung zeigt ein Schnittbild durch ein Drehrohr:



- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1. Faßbeschickung                          | 5. Rollenlager u. Antrieb           |
| 2. Primärluftzuführung                     | 6. Brennraum                        |
| 3. Ölburner                                | 7. Sekundärluftzuführung u. Brenner |
| 4. Zuführung flüssiger u. pastöser Abfälle | 8. Nachbrennkammer                  |
|  | 9. Entschlackungssystem             |

Abb. 2.5: Schematisches Schnittbild für das Drehrohr einer Sonderabfallverbrennungsanlage

Der Abfall wird an der Stirnseite durch die verschiedenen Aufgabevorrichtungen in das Drehrohr eingebracht. Diese Einrichtungen sind so konzipiert, daß Stoffe mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften aufgegeben werden können.

Die festen Abfälle werden in einen Einförderungstrichter aufgegeben, der mit einem Kran oder einer ähnlichen Einrichtung beschickt wird. Durch eine Doppeldeckelschleuse und über eine Schurre gelangen die festen Abfälle in das Drehrohr. Für Fässer gibt es in der Regel ein Faßaufzug. Pastöse Reststoffe werden über spezielle Pumpen zugeführt und über Lanzen eingefördert. Für flüssige Abfälle sind verschiedene Brennerkonstruktionen installiert.

Das Drehrohr selbst besteht aus einem Stahlzylinder, der innen feuerfest ausgemauert ist. Die Länge des Drehrohres beträgt 8 bis 12 m und der Durchmesser 1 bis 5 m. In Abhängigkeit von



der Größe können 0,5 bis 10 t/h an Abfällen verbrannt werden, wobei die mittleren Heizwerte dann bei 10 bis 20 MJ/kg liegen [Schöner-2]. Am Ende des Drehrohres wird die meist flüssige Schlacke über einen Naßentschlacker ausgetragen. Die gasförmigen Verbrennungsprodukte gelangen in die angeschlossene Nachbrennkammer, für die eckige und runde Grundrisse bekannt sind. Hier sollen die aus dem Drehrohr entweichenden Rauchgase vollständig ausgebrannt werden. Zur Erzeugung der dafür erforderlichen Strömungszustände und der entsprechend hohen Temperaturen in der Nachbrennkammer werden weitere flüssige Abfälle bzw. Heizöl dort installierten Brennern zugeführt. Die Temperaturen in dem Drehrohr und der Nachbrennkammer liegen zwischen 900 °C und 1400 °C.

An die Nachbrennkammer schließt sich ein Abhitzekeessel an, in dem die Wärme der Rauchgase zur Dampferzeugung genutzt wird. Der entstehende Dampf kann zur Stromerzeugung, Wärmegewinnung oder als Prozeßdampf eingesetzt werden. Hinter dem Kessel ist die Rauchgasreinigungsanlage angeordnet, in der die in den Rauchgasen enthaltenen Schadstoffe entfernt werden. Die Rauchgase werden nach der Reinigung durch einen Abgaskamin in die Umgebung abgeleitet.

Neben den schon erwähnten Vorteilen für die Verbrennung der verschiedenen Abfallarten weisen Drehrohranlagen noch weitere Vorteile auf, die in verschiedenen Veröffentlichungen aufgelistet sind. Die ausführlichste Beschreibung der Vorteile findet man in [Erbach-5] (Zitat):

- die Verbrennung eines weiten Spektrums flüssiger, pastöser und fester Abfälle (lose sowie in Fässern und Gebinden),
- die Verbrennung hochchlorierter und stark schwefelhaltiger organischer Verbindungen,
- die Verbrennung von Abfällen, die eine Schmelzphase durchlaufen,
- die Verbrennung bei sehr hohen Temperaturen (bis 1200 °C),
- die Verbrennung unter Veraschungs- oder Verschlackungsbedingungen,
- der kontinuierliche Asche- und Schlackeaustrag,
- die gute Vermischung von Feststoff und Verbrennungsluft durch die Drehung des Drehrohrofens,
- die Anpassung der Verweilzeit für feste Substanzen durch Drehzahlregelung (u. Neigung),
- die direkte Aufgabe fester Abfälle ohne Aufheizung,
- die weite Variation der Verhältnisse der Verbrennungskapazität im Drehrohr und in der Nachbrennkammer,

## 2. Thermische Behandlung von Sonderabfall

---

- optimaler Ausbrand der Verbrennungsgase,
- Nachverbrennung der Schwelgase in einer Zone mit hoher Turbulenz und wirkungsvoller Sekundärluftzuführung (mit hoher Energie, Durchmischungs- und Verwirbelungseffekt) in die Nachbrennzone, so daß weitgehend auf Zusatzbrennstoffe verzichtet werden kann.

Diesen Vorteilen von Drehrohranlagen stehen allerdings einige Nachteile gegenüber, die z.B. in [Dillon] oder [Dorn-1] aufgelistet sind:

- hohe Investitionskosten,
- die Ausmauerung ist empfindlich und erfordert einen vorsichtigen Betrieb,
- an den wartungsaufwendigen Enden des Drehrohres kann es zum Eintritt von Falschluf kommen,
- Flugstaub kann vor der vollständigen Verbrennung aus dem Drehrohr ausgetragen werden,
- einzelne Zonen der Anlage werden sehr stark beansprucht,
- es kann zu Anbackungen oder Klumpenbildung kommen,
- eine Regelung des Drehrohrofens über die Länge ist nur eingeschränkt möglich.

Als weiteren Nachteil gibt Dillon [Dillon] an, daß runde Gegenstände aufgrund der Neigung des Drehrohres ohne vollständige Verbrennung durch den Ofen rollen können.

### 2.6.2. Gleich- und Gegenstrombetrieb von Drehrohranlagen

Wird ein Drehrohrofen im Gleichstrom betrieben, so werden die bei der Verbrennung entstehenden Rauchgase mit den brennenden Abfällen durch das Drehrohr bewegt. Das Gleichstromprinzip führt zu einer Strömung der Gase durch die heißen Ofenzonen. Ein Gegenstrombetrieb liegt vor, wenn die entstehenden Rauchgase und die Schlacke in entgegengesetzten Richtungen durch das Drehrohr geführt werden. Die Rauchgase werden in diesem Fall an der Aufgabeseite der Abfälle aus dem Drehrohr abgeleitet.

Die Drehrohröfen zur Abfallverbrennung werden nach dem Gleichstromprinzip betrieben, denn die Abfälle enthalten in den meisten Fällen größere Anteile an schwelbaren Stoffen. Diese Abfallbestandteile würden im Fall einer Gegenstromführung ohne Verbrennung aus dem Drehrohr austreten [Thomé-K.-1]. Bei Gleichstromführung verlassen die Abgase das

## 2. Thermische Behandlung von Sonderabfall

---

Drehrohr mit einer relativ gleichmäßigen Zusammensetzung [Comfère]. Nach [Tillmann] erschwert das Gegenstromprinzip zusätzlich die Handhabung der Materialströme und die Steuerung der Verbrennung.

Nach Angaben in [Thomé-K.-1] wird das Gegenstromprinzip nur angewendet, wenn der Brennwert des Abfalls unterhalb von 8 MJ/kg liegt und aus den Abfällen keine Schwelgase entweichen. Dies bedeutet, daß der Gegenstrombetrieb insbesondere bei organisch kontaminierten Böden eingesetzt wird. Für die heizwertärmeren Abfälle hat dieses Verfahren einen weiteren Vorteil. Ein vollständiger Ausbrand wasserreicher Abfälle erfordert ein kürzeres Drehrohr, da die Brüden aus dem Trocknungsbereich schnell abgeleitet werden. Dieses Verfahren besitzt nach [Tillman] den Vorteil, daß ein hoher Stoff- und Wärmeaustausch zwischen der Gasphase und dem zugeführten Abfall auftritt.

Die Gleichstromführung bietet auch im Bereich der Hausmüllverbrennung mit Rostsystemen Vorteile [Christmann]. Gasförmige Müllbestandteile, die am Rostanfang aus dem Feststoff entweichen, werden aufgrund der Gleichstromführung durch die heiße Hauptbrennzone geleitet und ausgebrannt. Außerdem wird das Gut auf dem Rost durch diese Gasführung auf der ganzen Länge einer starken Temperaturstrahlung ausgesetzt. Es entstehen gut ausgebrannte Filterstäube und Schlacken.

### 3. Auswahl des Verbrennungssystems

Der wichtigste Gesichtspunkt bei der Wahl der Ofenkonstruktion ist die Eignung des Systems für die anfallenden Abfälle. Die verfahrenstechnische Anlage zur Sonderabfallverbrennung wird durch die Abfallmengen, deren Zusammensetzung und Eigenschaften bestimmt. Die grundsätzlichen Anforderungen an eine Sondermüllverbrennungsanlage sind vom Ofentyp unabhängig:

- Es ist ein möglichst vollständiger Ausbrand der Abfälle zu gewährleisten bei geringen Emissionen, Reststoffmengen und Abwasser.
- Von der Anlage wird eine hohe Verfügbarkeit erwartet.
- Die Unterhaltskosten und der Verschleiß sollen möglichst gering sein.

Aus dem folgenden tabellarischen Vergleich geht hervor, weshalb die Drehrohranlagen im Bereich der Sonderabfallverbrennung bevorzugt eingesetzt werden.

Tabelle 3.1: Einsatzmöglichkeiten verschiedener Ofenkonstruktionen in Bezug auf unterschiedliche Abfallarten [Barniske-2]

	Drehrohr m. Nachbrennkammer	Rostfeuerung	Wirbelschicht	Etagenofen	Brennkammer
Gase	+	-	+	-	++
Flüssige Abfälle: org. Lösemittel org. Halogenverb. org. bel. Wasser ölhaltige Rückstände	++	-	+	-	++
Pastöse Abfälle mit hoher Zähigkeit	++	-	+	-	-
Schlämme (wässrig, org. belastet)	++	-	++	+	-
Feste Abfälle: (organische Abfälle m. niedrig schmelzender Asche)	++	-	+	-	-
körnige, stückige Abfälle (aschereich)	++	-	++	++	-
sperrige Abfälle	++	++	-	-	-
Abfälle in Fässern u. Gebinden	++	+	-	-	-

### 3. Auswahl des Verbrennungssystems

---

Nach dieser Aufstellung ergibt sich, daß Drehrohranlagen optimal für die Verbrennung von sehr unterschiedlichen Abfällen geeignet sind. Eine ähnliche Tabelle mit der gleichen Schlußfolgerung findet man in [Dillon] und [Seifert-3]. Nach [Berghoff-1] stellt die Kombination von Drehrohr und Nachbrennkammer infolge des Entwicklungsstandes, der Flexibilität, der Kosten und weiterer Kriterien das geeignete Anlagenprinzip dar. Nach [Hunter] wird in Europa der Drehrohrföfen als die einzige Technologie angesehen, die die verschiedensten Abfälle verarbeiten kann. Ein älterer Vergleich [Anton], in dem nicht nur Verbrennungsverfahren berücksichtigt werden, ergibt ebenfalls deutliche Vorteile für die Drehrohrtechnologie. Eine allgemeine positive Bewertung der Drehrohrtechnik findet man auch in weiteren Stellen der Literatur (Siehe z.B. [Th. Am. Soc.], [Franke-1] u. [Berghoff-2]).

Bei der BASF AG begann die Verbrennung in Drehrohranlagen mit den Öfen 1 und 2 im Jahr 1963. Heute sind am Standort Ludwigshafen 8 Drehrohranlagen in Betrieb. Die Verbrennungskapazität für diese 8 Anlagen wird mit 175.000 Mg/a angegeben [Joschek-3]. Im Werk der Bayer AG wurden 1967 und 1976 zwei Drehrohranlagen errichtet [Capek]. Eine Liste von Standorten in der Bundesrepublik Deutschland findet man in [Barniske-2]. Die öffentlich zugänglichen Drehrohrverbrennungsanlagen mit Neu-, Ersatz- und Erweiterungsanlagen sind in [Erbach-1] zusammengestellt.

Die Leistungsfähigkeit der Drehrohranlagen zeigt auch die Entsorgung der 42 Fässer mit dioxinhaltigen Rückständen aus der italienischen Fabrik ICMESA. Diese komplizierte Aufgabe wurde in der Sonderabfallverbrennungsanlage der Ciba Geigy AG im Werk Basel gelöst. In dem Schlußbericht der Expertenkommission [BUWAL] sind die organisatorischen Vorgänge, die Durchführung der Verbrennung und Meßdaten beschrieben. Die ganze Problematik dieses Chemieunfalls wird deutlich, wenn man den Zeitraum zwischen dem Unfalldatum (10. Juli 1976) und dem Schlußbericht (7. Mai 1986) betrachtet. Für die sichere Beseitigung der 42 Fässer wurden fast 10 Jahre benötigt. Die eigentliche Verbrennung war daran nur mit wenigen Tagen beteiligt.

Eine neue großtechnische Drehrohranlage steht auf dem Werksgelände der Bayer AG in Dormagen [NN-4]. Die Anlage hat eine Verbrennungskapazität von 45.000 t/a und ist damit eine der größten Anlagen in Europa.

## 4. Technische Anwendungen von Drehrohröfen

Drehrohröfen sind nicht speziell für die Sonderabfallverbrennung entwickelt worden, so daß sich die Anwendung von Drehrohren nicht auf die thermische Behandlung von Abfällen beschränkt. Der Drehrohröfen ist ein vielseitiger Chemiereaktor, der in der Regel für nicht-katalytische Gas-Feststoffreaktionen eingesetzt wird. Ein weiteres Anwendungsgebiet für Drehrohre ist die Altlastensanierung.

In den beiden folgenden Kapiteln wird auf die Anwendung der Drehrohrtechnik in den beiden genannten Bereichen kurz eingegangen. Außerdem werden Spezialanwendungen von Drehrohröfen im Bereich der Abfallverbrennung vorgestellt. Diese Konstruktionen weichen allerdings von den in Kapitel 2.6 beschriebenen Anlagen deutlich ab.

### 4.1. Nichtkatalytische Gas-Feststoffreaktionen

Die Herstellung von Zement ist die wichtigste Anwendung von Drehrohröfen [Esch] [Enc. chem] [Grzella] [Baerns]. Diese Öfen sind bis zu 100 m lang. Daneben werden die Drehrohröfen auch bei der Calcinierung oder der Röstung von anorganischen Materialien eingesetzt. Weitere Anwendungen werden in [Esch] erläutert.

In [Helmrich] findet man eine gute Einführung in die Drehrohrtechnik. Danach herrscht in den oben erwähnten Einsatzgebieten die Gegenstromführung von Gas und Feststoff vor. Bei der Beschreibung der Transportvorgänge in der losen Schüttung kommen die Autoren zu dem Schluß, daß die Reibungskoeffizienten der Schüttung einen entscheidenden Einfluß auf die Bewegungsvorgänge in der Feststoffphase haben. Daneben sind auch Entmischungsvorgänge in Drehrohröfen bekannt.

Nach [Helmrich] ist der Stoffübergang zwischen der festen und der gasförmigen Phase für rieselfähige und feste Güter unproblematisch. Bei der Abgabe von Wasserdampf an die

Gasphase verweisen die Autoren auf die Literatur der Trocknung. Im Fall stark klebriger oder sogar schmelzender Produkte im Drehrohr, also Eigenschaften die bei der Verbrennung von Sondermüll zu erwarten sind, kann der Stoffübergang die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion bestimmen. In [Helmrich] wird auch auf die Wärmeübertragungsprozesse und Annahmen für die Modellbeschreibung von Drehrohranlagen eingegangen. Die Annahmen beschränken sich auf das Vorliegen fester Schüttgüter.

Der Drehrohrföfen besitzt im Gegensatz zum Wirbelschichtreaktor ein sehr gleichmäßiges Verweilzeitverhalten, das einem Strömungsrohrreaktor sehr ähnlich ist [Baerns]. Demgegenüber liegt in einem Wirbelschichtreaktor für den Feststoff aufgrund der starken Mischbewegung ein breites Verweilzeitspektrum vor. Ein weiteres charakteristisches Merkmal ist der geringe Füllungsgrad von Drehrohren. In Abhängigkeit von der durchgeführten Reaktion ist der Ofen nur zu 10 bis 20 % gefüllt. Im Anwendungsbereich der Calcinierung wird der Drehrohrföfen zunehmend von Wirbelschichtverfahren verdrängt, da in Wirbelschichtreaktoren die Wärme effizienter auf den Feststoff übertragen wird. Außerdem lassen sich Wirbelschichtreaktoren flexibler und einfacher betreiben [Baerns].

#### **4.2. Altlastensanierung**

Ein weiteres Anwendungsgebiet für Drehrohranlagen ist in den vergangenen Jahren mit der Altlastenproblematik entstanden. "Altlasten sind Altstandorte und Altablagerungen, sofern von ihnen Gefährdungen für die Umwelt, insbesondere die menschliche Gesundheit, ausgehen oder zu erwarten sind" [Fortmann]. Damit gehören zu den Altlasten nicht nur verfüllte Deponien und militärische Altlasten, sondern auch Produktionsstandorte, wo Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle oder andere Schadstoffe in das Erdreich eingedrungen sind. Weitere Informationen zum Altlastenbegriff findet man z.B. in [Thomé-K.-2].

Für die Sanierung kontaminierter Böden werden in der Praxis chemisch-physikalische, biologische oder thermische Verfahren eingesetzt, die sich jeweils durch spezifische Eigenschaften auszeichnen. Eine Zusammenstellung von Anbietern für die verschiedenen Bodensanierungsverfahren findet man in [Franzius] oder [Thomé-K.-2]. Nach einem Vergleich in [Fortmann]

#### 4. Technische Anwendungen von Drehrohröfen

---

sind thermische Behandlungsverfahren in Hinblick auf die Beseitigung von organischen Verunreinigungen den anderen Verfahren überlegen.

In [Fortmann] findet man eine kurze Beschreibung einer Drehrohranlage in den Niederlanden zur thermischen Bodenbehandlung. Das Drehrohr wird bei 450 bis 600 °C betrieben. Die entstehenden Rauchgase werden gereinigt und in einer separaten Nachbrennkammer bei ca. 950 °C nachverbrannt. Eine ähnliche Anlage ist für die Ruhrkohle Umwelttechnik vorgesehen, wobei die Rauchgasreinigung den deutschen Anforderungen angepaßt wird. Die Vorgaben hinsichtlich der Emissionsgrenzwerte für thermische Anlagen zur Bodensanierung werden in der Bundesrepublik Deutschland durch die 17. BImSchV geregelt. [Fortmann]

Für die thermische Bodenreinigung findet man in der Literatur Angaben zu mathematischen Modellrechnungen. In [Mellmann] wird ein eindimensionales Berechnungsverfahren für den Einsatz von Drehrohröfen entwickelt, das mehrere Teilmodelle für die unterschiedlichen Vorgänge enthält. Die geschilderten Annahmen, wie ein Kaskadenmodell für den Feststofftransport oder ein Plug-flow-Verhalten für den Gasstrom können auf die Sonderabfallverbrennung bei Gleichstrombetrieb wahrscheinlich nur bedingt übertragen werden.

Ein anderes Verfahren für die Reinigung von kontaminierten Böden wird in [Kiehne] vorgestellt. Dort wird über eine Anlage zur kontinuierlichen Reinigung kontaminierter Böden mit Mikroorganismen in einem Drehrohr berichtet. Der Transport in dem Drehrohr wird durch Einbauten gesteuert.

#### 4.3. Kombination von Rost und Drehrohr

Das Ziel einer in [Künstler-1] und [Künstler-2] vorgeschlagenen Entwicklung für die thermische Behandlung von Abfällen war eine sehr gut ausgebrannte und geschmolzene Schlacke. Obwohl die zu verbrennenden Abfälle in den genannten Veröffentlichungen nicht genau definiert werden, ist davon auszugehen, daß das geplante Verbrennungssystem für



#### 4. Technische Anwendungen von Drehrohröfen

Hausmüll vorgesehen ist. Die entsprechende Anlage besteht aus einer Kombination von Rostofen und Drehrohr und ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

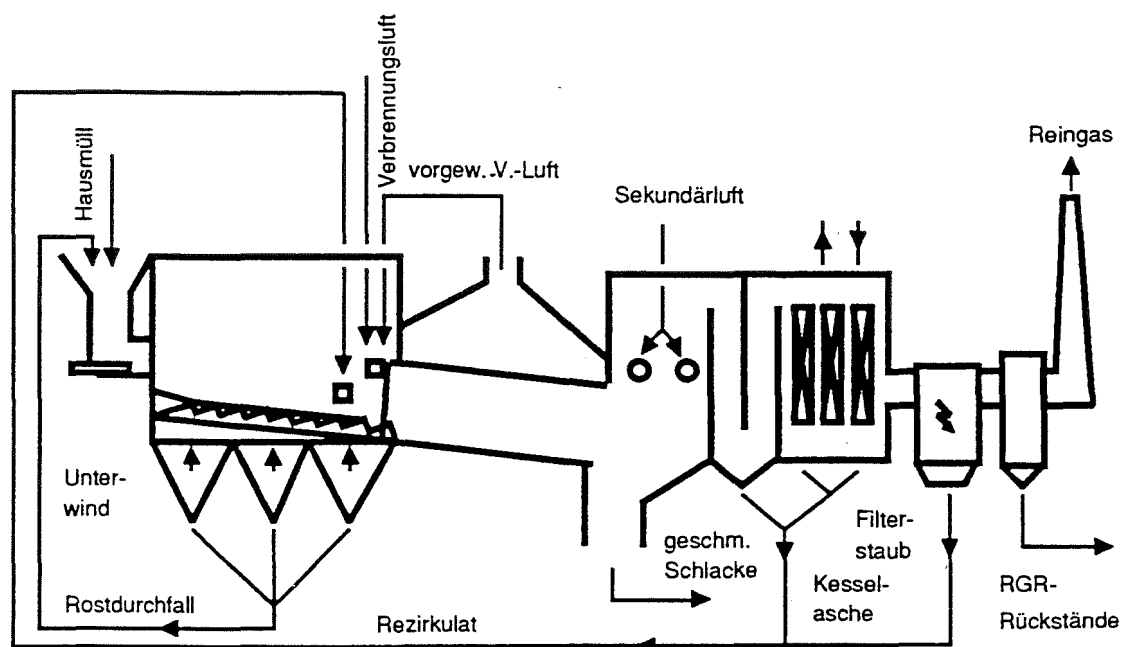


Abb. 4.1: Schematische Darstellung einer aus Rostofen und Drehrohr aufgebauten Verbrennungsanlage [Künstler-2]

Im Gegensatz zu den konventionellen Hausmüllverbrennungsanlagen wird bei dem hier vorgestellten Verfahren für das Rostsystem ein wesentlich kleinerer Luftüberschuß eingestellt. Die entstehenden Schwelgase und die festen Rückstände werden dann in dem nachfolgenden Drehrohr mit zusätzlicher Luft ausgebrannt. Die bei diesem Vorgang freiwerdende Wärmemenge führt zum Schmelzen der Schlacke, die dann am Ende des Drehrohres abfließt. Die Temperatur im Drehrohr liegt bei 1250 bis 1350 °C [Grotefeld].

Die Rauchgase entweichen aus dem Drehrohr in eine Nachbrennkammer, in der durch Zugabe von Sekundärluft ein vollständiger Ausbrand erreicht wird [Künstler-2]. Zusätzliche Brenner in der Nachbrennkammer werden nicht erwähnt. Die erzeugte Schlacke erfüllt die Anforderungen des schweizerischen Eluattests [Künstler-2].

Eine Verbrennungsanlage, die speziell nach dem von [Künstler-1] u. [Künstler-2] vorgeschlagenen Verfahren arbeitet, wurde bislang nicht erstellt. Allerdings existieren mehrere Hausmüllverbrennungsanlagen, die aus einer Kombination von Rostofen mit anschließendem Drehrohr aufgebaut sind [Vølund]. An einer derartigen Anlage in Basel wurden Verbrennungsversuche gefahren, die Daten sind in [Künstler-1] u. [Künstler-2] zusammengefaßt.

Aufgrund dieser speziellen Verbrennungstechnik wurden im Rauchgas  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen unterhalb von  $80 \text{ mg/Nm}^3$  gemessen, so daß auf eine Entstickungsanlage im Rauchgassystem verzichtet werden kann [Grotefeld]. An anderer Stelle [Künstler-2] werden für die  $\text{NO}_x$ -Emissionen höhere Werte genannt.

Ein solches Ofenkonzept, aufgebaut aus Verbrennungsrost und Drehrohr, mit der gleichen Betriebsweise wird auch in [Rüegg] beschrieben. Allerdings werden dort keine Meßdaten oder konkreten Anwendungsbeispiele mitgeteilt.

Der Vorteil von diesem Verfahren liegt in der Erzeugung einer flüssigen Schlacke ohne zusätzlichen Energieaufwand. Diesem Vorzug steht aber eine sehr kostenintensive Konstruktion der Verbrennungsanlage entgegen, die aus zwei Ofensystemen besteht. Über die erforderlichen Investitionskosten und Betriebskosten für so komplex aufgebaute Anlagen wurden in der Literatur keine Angaben gemacht.

#### 4.4. Schwenköfen

Von verschiedenen Herstellern wurden Öfen entwickelt, die für die Verbrennung kleinerer Abfallmengen vorgesehen sind. Diese kleinen Verbrennungseinheiten werden in der Literatur auch als Schwenköfen bezeichnet. Eine genauere Betrachtung der entsprechenden Öfen zeigt, daß mit der genannten Bezeichnung unterschiedliche Konstruktionen beschrieben werden.

Der in [Knoche] vorgestellte Schwenkofen besteht aus einem geneigten Zylinder mit einem aufgesetzten Kegel. Der Ofenquerschnitt ist in der Abbildung unten dargestellt.

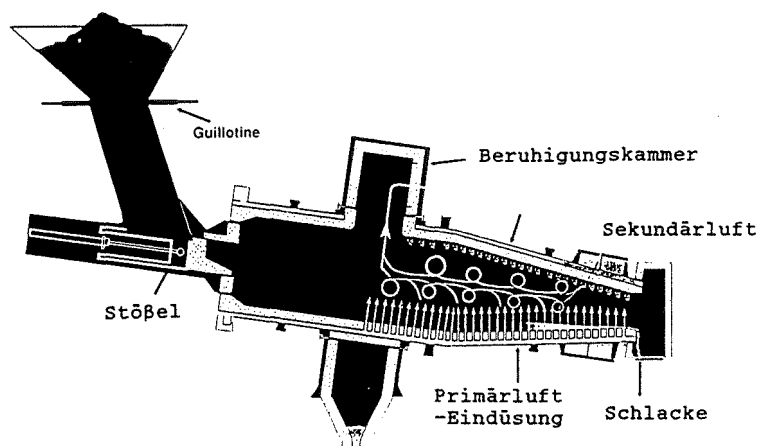


Abb. 4.2: Längsschnitt durch den Verbrennungsofen [Knoche]

Die Abfälle werden am oberen Ende des Ofens eingefördert, die entstehende Schlacke wird an der Spitze des Kegels ausgetragen. Die Verbrennungsluft wird am Kegelende und durch den doppelwandigen Ofenmantel in Kanälen in den Brennraum eingedüst. Nach den vorliegenden Informationen dreht sich dieser Ofen nicht vollständig um die Längsachse, sondern wird nur in einem Winkel von  $105^\circ$  in beiden Richtungen aus der Ruhelage ausgelenkt. Durch diese begrenzte Drehung ist es möglich, die entstehenden Rauchgase in die Beruhigungskammer einzuleiten. Die Verweilzeit der Rauchgase in der Nachbrennkammer wird mit mehr als 2 s angegeben. Die Temperaturen liegen dort über  $900^\circ\text{C}$  [Knoche].

Mehrere Verbrennungseinheiten dieses Ofentyps mit einer Verbrennungskapazität von mehr als 3 t/h sind bisher gebaut worden, größere Einheiten mit einem Durchsatz von 10 t/h sind möglich. Eine Anlage mit 7 t/h besitzt eine Zylinderlänge von 7 m, eine Kegellänge von 7,6 m und einen Durchmesser von 4,4 m [Knoche].

In [Knoche] werden keine Angaben über die Eigenschaften der einsetzbaren Abfälle mitgeteilt. Eine Genehmigung zur Sonderabfallverbrennung könnte in der Bundesrepublik an der Forderung nach mehr als  $1200^\circ\text{C}$  in der Nachverbrennungszone scheitern. Ein weiterer Schwachpunkt ist die Abdichtung des Schwenkrohres zur Beruhigungskammer [Knoche].

#### 4. Technische Anwendungen von Drehrohröfen

Die Entwicklung eines weiteren Schwenkofens, der nach einem anderen Funktionsprinzip arbeitet, wird in [Lemann] und [Rüegg] geschildert. Das Ziel war der Bau einer Verbrennungseinheit für weniger als 5600 kW, in der ganze Fässer bei frei wählbaren Verweilzeiten verbrannt werden können. Im Jahr 1983 wurde eine entsprechende Versuchsanlage mit einer Leistung von 1400 kW in Betrieb genommen.

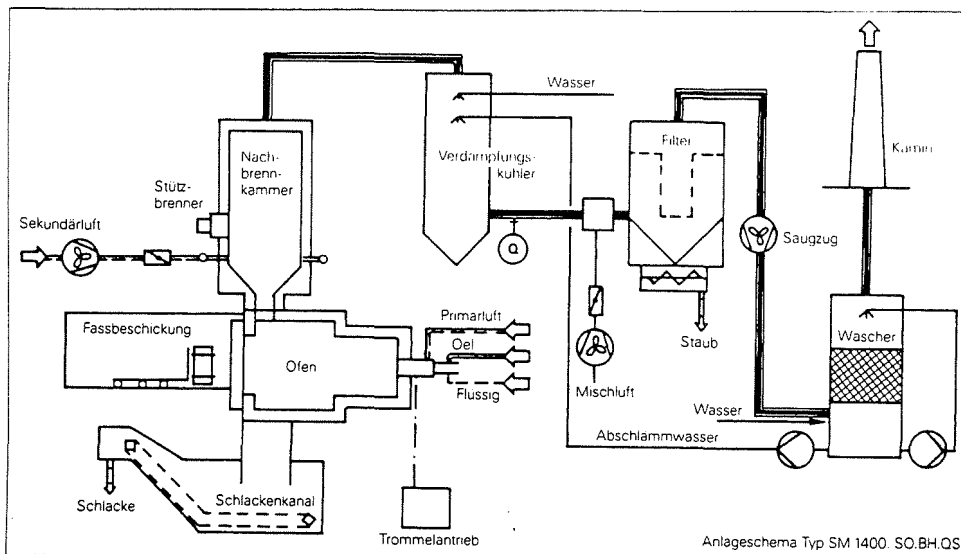


Abb. 4.3: Schema der Schwenkofenversuchsanlage [Lemann]

Die liegend angeordnete und ausgemauerte Schwenktrommel wird während der Verbrennungsphase um die Längsachse in beide Richtungen geschwenkt. Die Rauchgase entweichen durch eine Öffnung in der Trommel in die darüber angeordnete Nachbrennkammer. Am Ende der Verbrennungsphase gelangt die Schlacke durch eine Drehung um 180° in einen Naßentschlacker [Lemann].

Mit diesem Funktionsprinzip entspricht dieser Schwenkofen einer Drehrohranlage, die im Batchbetrieb gefahren wird. Nach [Lemann] werden diese Öfen in verschiedenen Größen angeboten. Der Autor beschreibt auch ein Beispiel für eine Anlage in den USA.

Der in [Ringel-1] u. [Ringel-2] für Technikumsversuche eingesetzte Schwenkofen besteht aus zwei hintereinander angeordneten Brennkammern, in denen eine zweistufige Verbrennung

erfolgt. Der Durchmesser der ausgemauerten Brennkammern beträgt jeweils 0,5 m, die Länge 1 m. Die Anlage wird mit reinem Sauerstoff und einem Abfalldurchsatz von ca. 10 kg/h betrieben. Genauere Angaben zur Konstruktion werden nicht mitgeteilt. Ohne eine kontinuierliche Abfallaufgabe und Regelung der O<sub>2</sub>-Zufuhr wurden Temperaturen von 1350 °C erreicht, so daß in Eluattests von der Schlacke eine hohe Auslaugfestigkeit festgestellt werden konnte.

#### 4.5. Das Zepp-Drehrohr

Das von Zepp entwickelte Drehrohr ist für Abfallmengen vorgesehen, die in kleinen und mittleren Betrieben anfallen. Der prinzipielle Aufbau einer Drehrohranlage mit einem derartigen Drehrohr entspricht weitgehend den in Kapitel 2.6 beschriebenen Anlagen. [Thomas].

Dieses Drehrohr besitzt keine feuerfeste Ausmauerung [Thomas]. Der äußere Stahlmantel ist innen mit einer Isolierschicht ausgerüstet, auf der ein Feuerfestbeton aufgebracht wird. Der Feuerfestbeton wird dann durch speziell geformte Stahlplatten geschützt. Im Auslaufbereich können diese Stahlplatten relativ leicht ausgetauscht werden. Ein solches Drehrohr kann relativ einfach angefahren werden und beim Abkühlen platzen die Anbackungen auf den Stahlplatten ab. Die maximale Feststofftemperatur wird mit 1100 °C angegeben [Zepp]. In [Thomas] werden drei ausgeführte Anlagen zitiert.. Der Durchsatz dieser Anlagen beträgt 1,5 bis 4 t/h.

In [Thomas] (1989) wird auch kurz auf die Rauchgasreinigung eingegangen, ohne daß erreichbare Grenzwerte mitgeteilt werden. Die vorgeschlagenen Kombinationen erreichen die in der Bundesrepublik Deutschland geforderten Abgasgrenzwerte (Siehe Kapitel 10) wahrscheinlich nicht. Wenn eine wesentlich aufwendigere Rauchgasreinigung erforderlich wird, stellt sich die Frage, ob solche Drehrohranlagen von kleinen und mittleren Firmen noch wirtschaftlich betrieben werden können.

### 5. Weitere Verfahren zur thermischen Sonderabfallbehandlung

In den letzten Jahren sind neue Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung entwickelt worden, die auch als Kombinationsverfahren bezeichnet werden. Bei diesen Verfahren laufen die einzelnen Prozesse einer thermischen Behandlung, Trocknung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung, in verschiedenen Anlagenteilen ab. In diesem Kapitel werden solche Verfahren, bei denen auch Drehrohrkonstruktionen eingesetzt werden, kurz beschrieben und erläutert.

#### 5.1. Thermo-Cycling-Prozeß

In den letzten Jahren wurden insbesondere die heizwertreichen Abfälle verstärkt einer Verwertung zugeführt, so daß der Heizwert der zur Verbrennung verbliebenen Abfälle immer weiter abnahm. Vor diesem Hintergrund wurde der Thermo-Cycling-Prozeß entwickelt, der auf dem konventionellen Verfahren mit einer Drehrohranlage aufbaut. Der Thermo-Cycling-Prozeß ist durch die folgenden Merkmale gekennzeichnet [Teller-1] u. [Teller-2]:

- Die Verbrennung in Drehrohr und Nachbrennkammer erfolgt nicht mit Luft, sondern mit zurückgeführten und mit reinem Sauerstoff angereicherten Rauchgasen. Dies führt zu einer deutliche Reduzierung des Abgasvolumenstroms.
- Der Verbrennung im Drehrohr wird eine Pyrolysestufe vorgeschaltet. Auf diesem Weg können Metalle und andere nicht brennbare Abfallstoffe abgetrennt werden. Außerdem können flüssige oder gasförmige Stützenergieträger für die Drehrohrverbrennung und für die Nachbrennkammer gewonnen werden.
- Es erfolgt eine Aufarbeitung der Abfälle vor der Verbrennung bzw. Pyrolyse.

Die folgende Abbildung zeigt ein Blockschaltbild für den Thermo-Cycling-Prozeß:

## 5. Weitere Verfahren zur thermischen Sonderabfallbehandlung

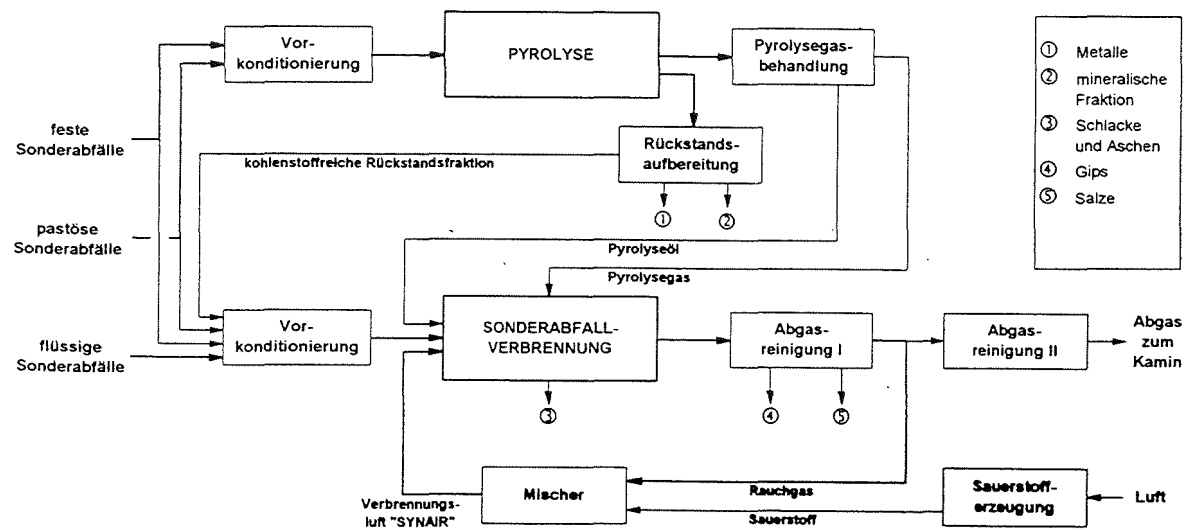


Abb. 5.1: Blockschaltbild für den Thermo-Cycling-Prozeß [Teller-2]. Anmerkung: Die Sonderabfallverbrennung umfaßt in dieser Abbildung das Drehrohr, die Nachbrennkammer und den Abhitzekessel.

In [Teller-1] und [Teller-2] wird über halbtechnische Erprobungsversuche berichtet. Eine großtechnische Anwendung für den Thermo-Cycling-Prozeß wird nicht erwähnt.

### 5.2. Schwelbrennverfahren

Die Entwicklungsgeschichte des Schwelbrennverfahrens der Fa. Siemens beginnt in der Mitte der 80er Jahre mit der Übernahme der entsprechenden Aktivitäten von der Energieversorgung Schwaben (EVS) [Berwein]. Das für die thermische Behandlung von Hausmüll bestimmte Verfahren wurde unter der Zielvorgabe entwickelt, möglichst gut verwertbare Reststoffe zu erzeugen [Berwein]. Den prinzipiellen Aufbau des Schwelbrennverfahrens zeigt die folgende Abbildung.

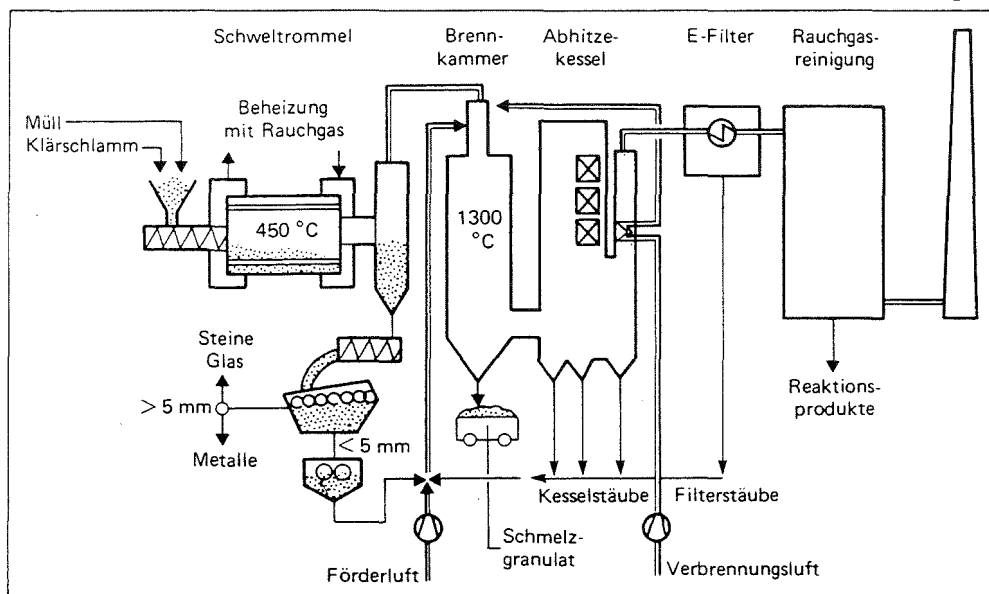


Abb. 5.2: Das Schmelzbrennverfahren [Berwein]

Die angelieferten Abfälle werden zunächst auf eine Stückgröße von ca. 200 mm zerkleinert und anschließend in die Schweltrommel eingefördert. Genauere Angaben zum Aufbau der Schweltrommeln findet man z.B. in [Baumgärtel]. In der Trommel erfolgt eine pyrolytische Zersetzung der Abfälle bei ca. 450 °C und es entsteht ein Konversionsgas und ein kohlenstoffhaltiger Feststoff.

Nach Aufarbeitung des kohlenstoffhaltigen Feststoffs entstehen vier Fraktionen. Neben einer Inertfraktion, die aus Steinen, Glas, Keramik usw. besteht, können eine Eisenmetallfraktion und eine Nichteisenmetallfraktion relativ sauber abgetrennt werden. Die vierte Fraktion enthält ca. 30 bis 35 Gew.-% Kohlenstoff und wird auf eine Korngröße von < 0,1 mm aufgemahlen. [Berwein].

Das Konversionsgas und die aufgemahlene vierte Fraktion werden gemeinsam in einer Brennkammer verbrannt, aus der die Schlacke flüssig abgezogen wird. Bei Temperaturen von 1300 °C wird eine schmelzflüssige Schlacke gebildet. Die Gestaltung der Brennkammer und die Konstruktion der Brenner führen zu einem sehr guten Ausbrand und zu einer sicheren



## 5. Weitere Verfahren zur thermischen Sonderabfallbehandlung

Zerstörung organischer Verbindungen. Die Energie der heißen Rauchgase wird dann in einem nachfolgenden Kessel genutzt. Anschließend werden die Rauchgase in einer Reinigungsanlage von Schadstoffen befreit. [Berwein].

Zur Zeit gibt es in der Bundesrepublik Deutschland nur eine kleine Demonstrationsanlage in Ulm-Wiblingen mit einem Durchsatz von 250 kg/h. Mehrere großtechnische Anlagen sind in Bau oder in Planung.

### 5.3. Thermoselect-Verfahren

Im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Verfahrensbeschreibungen nimmt das Thermoselect-Verfahren eine Sonderstellung ein, denn in den verschiedenen Prozessschritten dieses Kombinationsverfahrens wird kein Drehrohr eingesetzt. Das Thermoselect-Verfahren wurde nur aus Gründen der Aktualität in diese Arbeit mit aufgenommen.

Das von Thermoselect angewendete Verfahren ist eine Kombination aus Pyrolyse mit anschließender Hochtemperaturvergasung. Das Grundprinzip ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

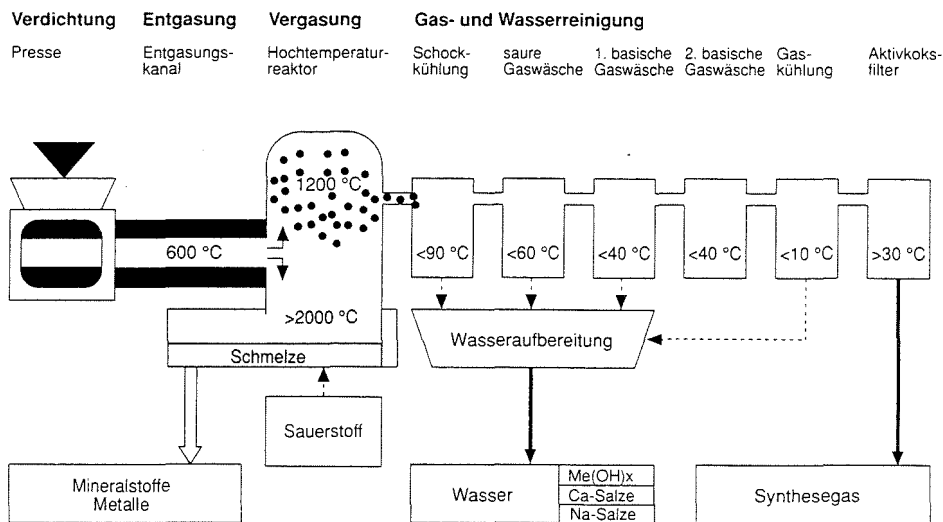


Abb. 5.3: Schematische Darstellung des Thermoselectverfahrens [Stahlberg-1]

## 5. Weitere Verfahren zur thermischen Sonderabfallbehandlung

---

In einer Presse werden die zugeführten Abfälle verdichtet und dann dem Entgasungskanal zugeführt. Hier erfolgt bei 600 °C eine Trocknung und pyrolytische Zersetzung der Abfälle. Die im Entgasungskanal gebildeten Produkte, überwiegend kohlenstoffhaltiger Feststoffe und Gase, werden durch die Einföderung weiterer Abfälle direkt anschließend dem Hochtemperaturreaktor zugeführt. Bei Temperaturen bis zu 2000 °C erfolgt eine unterstöchiometrische Umsetzung mit reinem Sauerstoff, und es entsteht ein Synthesegas und eine flüssige Schlacke. Im oberen Teil des Hochtemperaturreaktors stellt sich bei Temperaturen um 1200 °C das Wassergasgleichgewicht ein.

Das Synthesegas verläßt den Hochtemperaturreaktor am oberen Ende und wird dann in einer mehrstufigen Rauchgasreinigungsanlage von Schadstoffen befreit. Das gereinigte Gas kann dann für Synthesezwecke, Gasmotoren oder Dampferzeugern eingesetzt werden. [Stahlberg-1].

Die unten aus dem Hochtemperaturreaktor abgezogene Schmelze wird in einem Wasserbad granuliert, und es entsteht eine Metallfraktion und eine Mineralstoff. Die Trennung erfolgt aufgrund von Viskositäts-, Dichte- und Oberflächenspannungsunterschieden [Stahlberg-2]. Aus der zur Verfügung stehenden Literatur ist nicht zu entnehmen, wie dieser Trennprozeß großtechnisch genau abläuft.

Nach der vorliegenden Literatur ist davon auszugehen, daß das Thermoselect-Verfahren auch für die Entsorgung bestimmter Sonderabfälle vorgesehen war. Nach Angaben in [Stahlberg-1] können dem Entgasungskanal auch flüssige und pastöse Abfälle zugeführt werden. Allerdings werden über die erforderlichen Abfalleigenschaften und die Mengen keine Angaben gemacht.

Eine erste Anlage nach diesem Prinzip wird vom Badenwerk in Karlsruhe erstellt und an die Stadt Karlsruhe zur Behandlung von Hausmüll vermietet.

### 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

Im folgenden Text soll die Konstruktion und die Auslegung einer Sonderabfallverbrennungsanlage, bestehend aus Drehrohr und Nachbrennkammer, näher beschrieben werden. Bei der Konstruktion ist immer zu bedenken, daß Drehrohr, Nachbrennkammer und Kessel in der Auslegung eine Einheit bilden [Vollhardt-3]. Außerdem müssen vor der Auslegung die Abfallströme mit ihren Eigenschaften möglichst genau ermittelt werden.

In der Richtlinie [VDI 3640] für das Verbrennen von Sonderabfällen in ortsfesten Anlagen werden die grundsätzliche Technologie der Sonderabfallverbrennung, die Emissionsproblematik und die Entsorgung der Reststoffe beschrieben. Diese Richtlinie beschränkt sich allerdings nicht ausdrücklich auf Drehrohranlagen, sondern verwendet diesen Anlagentyp als Beispiel. Genaue Angaben über die Auslegung und Konstruktion des Verbrennungsteils der Anlage enthält die Richtlinie nicht. Entsprechende Daten werden nur in Bandbreiten angegeben.

#### 6.1. Drehrohrkonstruktion

##### 6.1.1. Allgemeine Konstruktionsmerkmale

Eine Beschreibung über den Aufbau des Drehrohres findet man bei [Comfère]. Danach besteht das Drehrohr aus einem zylindrischen Stahlrohr, das innen mit hochtemperaturbeständigem Material ausgekleidet ist. Als Steg- und Flanschringe bezeichnete Elemente stützen die Ausmauerung an den Enden des Drehrohres ab und tragen zur Rundheit des Ofens bei. [Mitterbacher] erwähnt eingeschweißte Halteringe für das Abfangen von Horizontalkräften des Mauerwerks. Nach [Vollhardt-1] und [Womann] hat die Durchbiegung des Ofens in Längsrichtung einen Einfluß auf die Standzeit der Ausmauerung, so daß sich aus diesem Aspekt Forderungen an die Blechmantelkonstruktion ergeben. [Womann] und [Fürmaier] geben für den Blechmantel großtechnischer Drehrohre eine Stärke von 30 mm an.

Der Ofen trägt außen einen Zahnkranz und Laufringe. Den Drehantrieb besorgt ein Elektromotor, der seine Antriebsleistung über ein Getriebe und ein Ritzel auf den Zahnkranz des Drehrohrofens überträgt. Für Notfälle ist ein zweiter Elektromotor, ein Dieselaggregat oder ein Luftmotor vorhanden. [Vollhardt-1].

Die Laufringe übertragen das Gewicht des Ofens über die Laufrollen auf das Fundament. Für die Konstruktion dieser Laufringe nennt [Comfère] zwei verschiedene Möglichkeiten. Im ersten Fall ist der Laufring mit dem Drehrohrmantel verschweißt. Im anderen Fall bilden das Drehrohr und der Laufring getrennte Elemente, die erst bei der hohen Betriebstemperatur gegeneinander gepreßt werden. Für beide Konstruktionen gibt der Autor Vor- und Nachteile an.

Eine besondere Bedeutung in Zusammenhang mit der Ofenlagerung haben Vorrichtungen, die eine kontrollierte Bewegung des Ofens in axialer Richtung ermöglichen [Vollhardt-1] [Comfère] [Mitterbach]. Durch diese sogenannte Zwangsofenlängsführung (Abk.: Zwolf) werden die Axialkräfte aufgenommen und eine Hin- und Herbewegung des Drehrohres erzwungen. Der Zwangsofenlängsführung kommt mit Blick auf die Verfügbarkeit der Anlage eine besondere Bedeutung zu. Diese fast wartungsfreie Konstruktion verhindert ein Einlaufen der Laufringe in die Laufrollen. Ein Austausch der Lager in den Laufrollen ist nach etwa 40.000 h erforderlich. Der 185 t schwere Drehrohrofen 6 der BASF AG wird in 12 h um ca. 50 mm hin und her bewegt [Womann].

Ein weiteres Konstruktionsmerkmal in einigen technischen Drehrohranlagen ist die bewegliche Stirnwand [Comfère] [Mitterbacher] [Hünig]. Die Stirnwand des Drehrohres mit den Aufgabevorrichtungen für die Abfälle wird auf einem sogenannten Verfahrweg montiert, so daß ein bequemer Zugang zum Drehrohr für Wartungsarbeiten möglich ist.

Zwischen dem Drehrohrofen und den ruhenden Teilen, Stirnseite und Nachbrennkammer, ist eine wirkungsvolle Abdichtung erforderlich, die einen größeren Falschlufteintritt in das Ofensystem verhindert. Bei der BASF AG sind seit der Inbetriebnahme der ersten Drehrohranlage verschiedene Dichtsysteme verwendet worden. Es werden "schleifend am Drehrohrumfang montierte Blechsegmente", "Schleifringdichtungen mit gewichtsbelastetem Seilzug" oder als

neueste Entwicklung eine "Labyrinth-Abdichtung" erwähnt, ohne das nähere Angaben gemacht werden [Joschek-1]. Der Falschluffanteil an der Verbrennungsluftmenge betrug bei den älteren Dichtungssystemen etwa 10 %, bei der Labyrinth-Abdichtung reduzierte sich der Anteil auf unter 5 % [Joschek-1]. Weitere Informationen zur Abdichtung von Drehrohranlagen findet man in [Drexler].

### 6.1.2. Drehzahl und Neigung des Drehrohres

Nach [VDI 3640] ist der Transport der Abfälle durch das Drehrohr von der Drehzahl um seine Längsachse und von der Neigung des Ofens abhängig. An andere Stelle [Joschek-1] wird nur die Länge der Drehrohres als Einflußgröße auf die Verweilzeit der festen Abfälle angegeben.

Die Drehzahl des Ofens ist durch den Antrieb auf den Zahnkranz in weiten Bereichen einstellbar. Für den Ofen 6 der BASF AG gibt z.B. [Dorn-2] eine Drehzahl von 0,06 bis 0,26 Umdrehungen pro Minute an. [Thomé-K.-1] erwähnt 0,05 bis 2 U/min. An anderen Stellen findet man Angaben von etwa 1 U/min [NN-2], 0,5 bis 1 U/min [Dempsey], 0,07 bis 0,6 U/min [Girovich] oder 0,05 bis 2 U/min [Schöner-2].

Die Neigung des Ofens kann im Betrieb nicht verändert werden. Über die Ofenneigung des findet man in der Literatur nur sehr wenige Angaben, die in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind:

Tabelle 6.1: Angaben zur Neigung des Drehrohres

[Comfère]	2-5%
[Dorn-1]	etwa 3%
[Hüning]	3 %
[Möller]	4 %
[DPA]	keine Angabe

Einflüsse der Drehrohrneigung auf das Verhalten und die Eigenschaften der Schlacke sowie Gründe für die angegebene Größenordnung der Neigung werden in der Literatur nicht

beschrieben. Die Neigung des Drehrohres stellt vermutlich einen Erfahrungswert dar dem der axiale Transport der Drehrohrfüllung (Verweilzeitverhalten) zugrunde liegt.

### 6.1.3. Drehrohr längsschnitt

Das Drehrohr wurde in den vorherigen Kapiteln immer als ein zylindrisches Rohr beschrieben. Nach genauer Betrachtung der Längsschnitte ergibt sich jedoch ein differenzierteres Bild. Der innere Radius kann am Anfang und in vielen Fällen am Ende des Drehrohres kleiner als im Mittelteil sein. Dies zeigen auch die beiden folgenden Bilder:

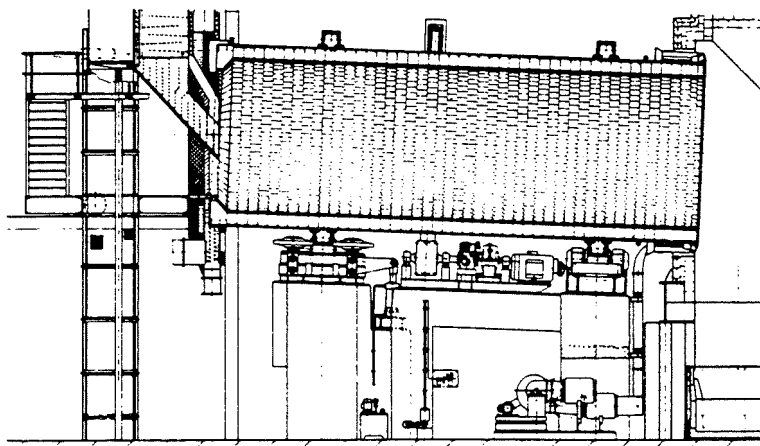


Abb. 6.1: Schnitt durch ein Drehrohr mit reduziertem Innendurchmesser am Eintrag [Comfère]

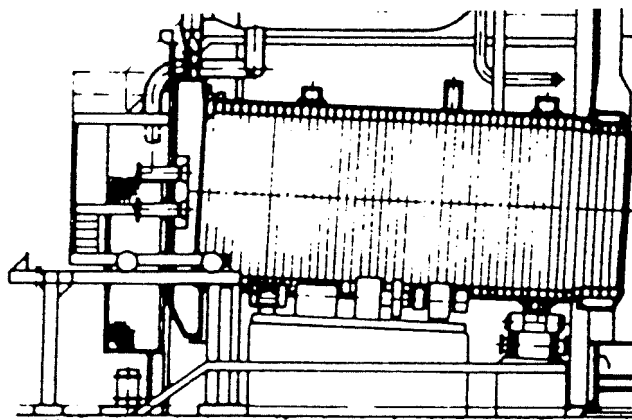


Abb. 6.2: Schnitt durch ein Drehrohr mit reduziertem Durchmesser am Ein- und Austrag [Womann] (Ausschnitt)

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

Am Drehrohrende, wo die Schlacke ausgetragen wird, sind von einem verringerten Durchmesser Einflüsse auf die Verbrennung der Abfälle vorstellbar. Wenn der Durchmesser am Drehrohrende wie in Abbildung 6.2 reduziert wird, so wird die Schlacke vor einem kleinen "Wall" aufgestaut. Durch die Rotation des Ofens wird die i.a. flüssige Schlacke dann in dem entstehenden "See" durchmischt, so daß eine homogenere Zusammensetzung zu erwarten ist. Auf Vorteile für die Schlackebildung durch einen konischen Einzug des Drehrohrendes wird auch bei [Mitterbacher] hingewiesen. Bei dem in Abbildung 6.1 dargestellten Ofen wird dagegen die Schlacke ohne weitere Durchmischung aus dem Ofenende ausgetragen.

Die größte Abweichung von der zylindrischen Ofenform zeigt das Drehrohr für eine geplante dritte Verbrennungsstraße der Hessischen Industriemüll GmbH (HIM) in Biebesheim. Hier wird der vordere Teil des Drehrohres im Durchmesser von 4 auf 3,5 m reduziert [Erbach-5].

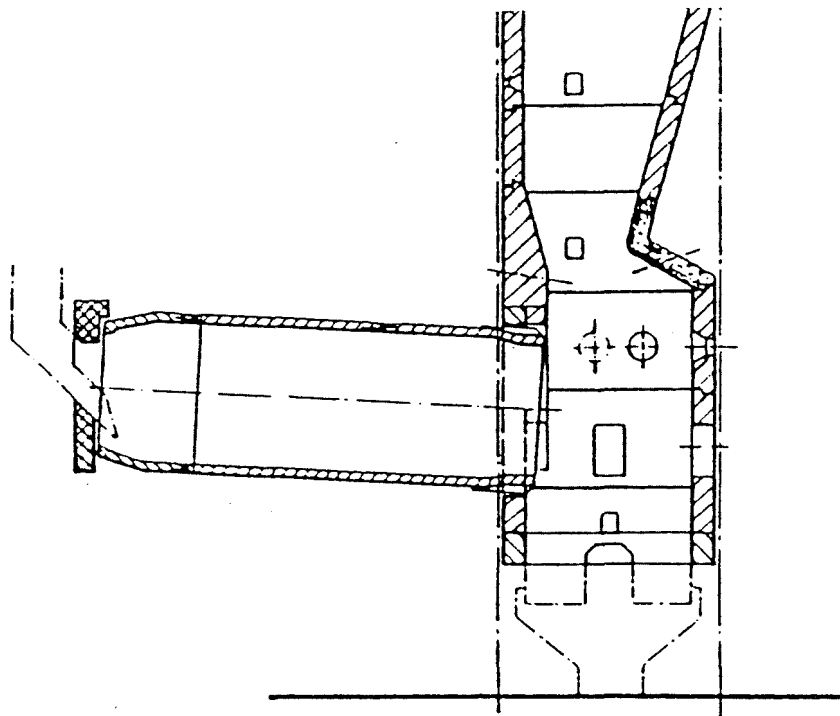


Abb. 6.3: Drehrohr für eine geplante dritte Verbrennungsstraße der HIM [Schöner-2]

Durch diese konische Erweiterung des Drehrohres im Eintragsbereich ergibt sich ein größeres Gefälle für die aufgegebenen Abfälle als im restlichen Ofenbereich. Mit dieser Drehrohr-

konstruktion soll ein Kontakt der aufgegebenen Abfälle mit der Stirnwand vermieden werden [Erbach-5]. Die Abfälle können dann nicht in den Dichtungsbereich zwischen Frontplatte und Drehrohrfen eindringen [Schöner-2]. Einen ähnlichen Querschnitt des Drehrohres findet man auch bei der Anlage am Standort Riihimäki (Finnland) [Widmer].

Nach Aussagen in [Tackie] hängt der Feststoffaustrag aus dem Drehrohr mit dem Gasstrom neben anderen Faktoren von der Geometrie am Drehrohrende ab.

### 6.1.4. Ausmauerung des Drehrohres

Die Wandungen und die Stirnwand des Drehrohrfens müssen zum Schutz der Stahlkonstruktion mit feuerfesten Materialien ausgekleidet werden. Diese Ausmauerung wird im Betrieb durch wechselnde Spannungszustände stark beansprucht, so daß ein ständiger Verschleiß auftritt. Der Verschleiß an der Ausmauerung wird durch die folgenden Gesichtspunkte bestimmt [Stein-1] [Stein-2]:

- Temperatur (und Temperaturwechsel)
- Viskosität der Schlacke
- Chemische Zusammensetzung der Schlacke (Chemischer Angriff)
- Mechanischer Verschleiß (z.B. Abrasion durch Stahlfässer)
- Stabilität und Form des Stahlmantels

Die mechanische Belastung ist im Aufgabebereich durch harte und stückige Abfälle am größten [Kuchta-2]. Der Schwerpunkt der Gesamtbeanspruchung der Ausmauerung liegt dagegen am Ende des Drehrohres [Comfère]. Nach [Vollhardt-1] ändert sich die Zusammensetzung der Feststoffe mit der Fortbewegung, so daß am Drehrohrende die Belastung des Mauerwerks ein Maximum erreicht. Auch die in Kapitel 6.1.3 beschriebene Verringerung des Ofenquerschnittes am Ofenende beeinflußt diese Hauptverschleißzone [Kuchta-1].

Ein sehr großer Verschleiß an der Ausmauerung durch chemischen Angriff ist zu erwarten, wenn die Schlacke stark saure Eigenschaften ( $\text{CaO/SiO}_2 < 0,3$ ) aufweist und bei Temperaturen von 1150 °C bereits sehr dünnflüssig ist [Stein-1].



Als Material werden feuerfeste Steine und an einigen Stellen auch feuerfeste Stampfmassen verwendet [Comfère]. Nach [Kuchta-2] ist die Verkleidung der Ofenstirnwand aufgrund der verschiedenen Durchbrüche mit einer Stampfmasse vorteilhaft. [Thomé-K.-1] rät von Stampfmassen ab, da sie als weniger dichtes Material leichter von aggressiven Schlacken chemisch angegriffen werden.

Nach [Stein-1] sind aufgrund praktischer Erfahrungen niedrige Porositäten und hohe Festigkeiten des Ausmauerungsmaterials vorteilhaft, wenn über lange Zeiträume ein bestimmtes Temperaturniveau gefahren wird. Je kleiner die Porosität des Steins, also je größer die Dichte ist, um so geringer ist der mechanische und chemische Angriff durch die flüssige Schlacke [Schöner-2]. Bei schwankenden Temperaturen entstehen in einem solchen Ausmauerungsmaterial aber sehr große Spannungen, die zu einem schnellerem Verschleiß führen [Stein-1].

Die Hersteller von feuerfesten Auskleidungen stellen den Betreibern heute eine ganze Palette unterschiedlicher Materialien zur Verfügung, so daß die Ausmauerung entsprechend der Betriebsbedingungen und der eingebrachten Abfälle individuell gestaltet werden kann. Die Kenntnis über die im Drehrohr vorherrschenden Temperaturen ist für die Auswahl der Steinqualität von entscheidender Bedeutung [Eschner]. Es werden auch unterschiedliche Materialien für die Ausmauerung in einem Drehrohr verwendet. Entsprechende Beispiele findet man bei [Stein-1] [Stein-2] u. [Kuchta-2].

Die verwendeten Materialien enthalten als Hauptbestandteile  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (45 bis 85 %) und  $\text{SiO}_2$  (10 bis 50 %) [Stein-1] [Kuchta-2]. Der prozentuale  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Anteil in den Steinen steigt mit der chemischen und thermischen Belastung an. Werden verschiedene Materialien zur Auskleidung eines Drehrohres eingesetzt, so nimmt der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt von der Aufgabeseite in Richtung zur Nachbrennkammer zu [Stein-1] [Stein-2]. Die Beimengungen von  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  und  $\text{ZrO}_2$  im Steinmaterial beeinflussen die Temperaturwechselbeständigkeit und das Benetzungsverhalten positiv [Kuchta-2]. Durch Phosphorverbindungen wird die Benetzung zwischen Schlacke und Ausmauerungssteinen reduziert [Eschner]. Mit  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  werden ferner die Korundkörner des Steinmaterials vor einem chemischen Angriff durch Schlackekomponenten geschützt [NN-7]. Weitere Aussagen zu den Eigenschaften bestimmter Ausmaue-

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

rungsmaterialien findet man in [Eschner]. Es gibt allerdings kein keramisches Material, das allen Anforderungen gerecht wird, so daß jede Ausmauerung einen Kompromiß darstellt [Thomé-K.-1] [Schöner-2].

In [Comfère] und [Thomé-K.-1] wird sowohl über einschichtige Mauerwerke als auch über zweischichtige Ausmauerungen berichtet. Im Fall des zweilagigen Mauerwerkes, das eventuell aus wärmetechnischen Gründen erforderlich ist, werden Schamottsteine für die Hintermauerung eingesetzt.

Über die Schichtdicke der Ausmauerung werden nur wenige konkrete Angaben mitgeteilt. Kriterien für die Feuerfestauskleidung sind der Wärmeverlust durch Abstrahlung und eine akzeptable Temperatur an der äußeren Oberfläche des Drehrohres. In der Regel ist die Ausmauerung 250 bis 500 mm dick [VDI 3640]. Für die neuen Anlagen in Ebenhausen ist eine 300 mm dicke Ausmauerung vorgesehen [Fürmaier]. Nach [Stein-1] werden z.B. die Drehrohröfen der BASF AG mit einem zweischichtigen Mauerwerk ausgestattet. Die Verschleißschicht ist 250 mm stark. Zwischen dem Stahlmantel und der Verschleißschicht ist eine Isolierschicht aus "Schamottelplättchen" (25 mm) eingebaut. Die folgende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf durch eine ausgemauerte Wandung eines Drehrohres.

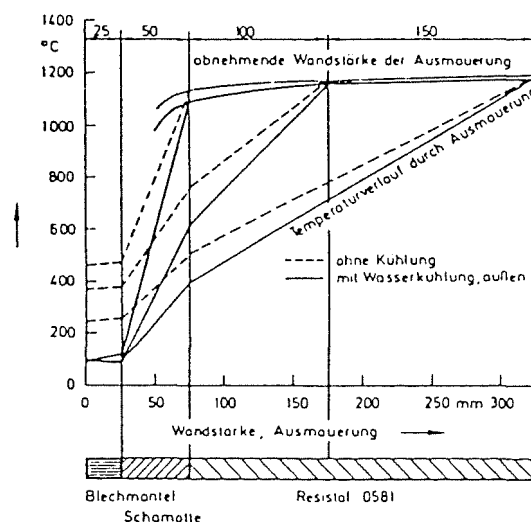


Abb. 6.4: Drehrohröfen-Innenwandtemperatur als Funktion der Wanddicke bei einer Feuerraumtemperatur von 1250 °C [Thomé-K.-1].

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

---

Weitere Angaben zum Wärmedurchgang für unterschiedliche Wandaufbauten und Kühlverfahren der Drehrohre findet man auch in [Stein-1]. Mit fortschreitender Abzehrung der Ausmauerung im Betrieb erhöht sich der Wärmedurchgang durch die Mantelfläche des Drehrohrofens. Die Temperaturen auf der Innenseite des Stahlmantels steigen deutlich an [Kuchta-2].

Nach [Comfère], [Kuchta-1] u. [Kuchta-2] ist bei der Anordnung der einzelnen Steine zwischen "Ringmauerwerk" und "Verbundmauerwerk" zu unterscheiden. Für beide Anordnungen gibt es Vor- und Nachteile. Bei dem Ringmauerwerk können einzelne Teile der Ausmauerung relativ einfach ausgetauscht werden. Durch eine Auskleidung mit Verbundmauerwerk wird eine Beschädigung der umlaufenden Fugen vermieden.

Neben der Auswahl der Materialien gibt es noch weitere Möglichkeiten zur Gestaltung der Ausmauerung. Das folgende Bild zeigt einen Blick in den Ofen 8 der BASF AG, in dem die Oberfläche der Ausmauerung zu beachten ist:



Abb. 6.5: Blick in den Ofen 8 der BASF AG [Halstenberg]

Die innere Oberfläche der Ausmauerung ist gestuft. Die Strukturierung kann vermutlich die Mitnahmebedingungen der Feststoffphase und damit die radiale Ausbreitung begünstigen

Bei der Gestaltung der Ausmauerung ist die Ausdehnung des Stahlmantels und der Steinmaterialien zu beachten. In Längsrichtung sind Dehnfugen für die feuerfeste Auskleidung erforderlich. Die Ausmauerung muß im Umfang unter Spannung stehen, um Relativbewegungen zwischen dem Stahlmantel des Ofens und der Ausmauerung zu vermeiden [Kuchta-2].

Dem komplexen Aufbau der Ausmauerung muß beim Anfahren der Anlage Rechnung getragen werden. Hier sind die Vorschriften der Hersteller zu beachten. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Sonderabfallverbrennungsanlage nach einem Austausch der Ausmauerung wieder in Betrieb geht.

In [Thomé-K.-1] befindet sich ein Hinweis auf die Wiedermann-Trommel. Hier wird die Auflockerungswirkung durch eine Ausmauerung aus zwei gegeneinander laufenden Halbspiralen verstärkt. Diese Einrichtung soll den Ausbrand der Abfälle verbessern. Eine Literaturangabe oder eine Zeichnung wird nicht angegeben.

Informationen über den Glühverlust der Ausmauerungssteine findet man in [Womann]. Eine genaue Untersuchung der Reaktionszone zwischen der Schlacke und dem Steinmaterial mit verschiedenen Methoden zeigt eine deutliche Ausbildung einer Grenzschicht zwischen den genannten Zonen [NN-7]. Auf eine Übergangszone zwischen dem Ausmauerungsmaterial und der Schlacke wird auch an anderer Stelle [Eschner] hingewiesen.

Der technische Fortschritt läßt sich aus den Standzeiten der Ausmauerung ablesen. In den 60er Jahren, als die Anwendung der Drehrohrtechnik zur Sondermüllverbrennung bei der BASF AG begann, mußte die Ausmauerung nach 2000 bis 3000 h ausgewechselt werden. Durch die Verwendung spezieller Steinmaterialien und aufgrund von Betriebserfahrungen, die auch das Aufbringen eines Schlackepelzes einschließen, sind heute bei der BASF AG 6000 bis 15000 Betriebsstunden ohne Austausch der Ausmauerung möglich [Stein-1].

[Hunter] gibt Informationen zu der Haltbarkeit der Ausmauerung in Abhängigkeit von der Drehrohrtemperatur an. Die Gesellschaft zur Beseitigung von Sondermüll in Bayern (GBS) betreibt Drehrohröfen (keine Standortangabe) bei einer Temperatur von 900 bis 1000 °C; sie muß die Auskleidung nach ca. 8000 h erneuern. Die Hessische Industriemüll GmbH (HIM) gibt 5000 Betriebsstunden für die Ausmauerung bei einer Temperatur von 1200 °C an. Die Anlage der SAKAB in Schweden verbrennt die Abfälle bei 1400 °C. Dort muß die Ausmauerung bereits nach 3000 h erneuert werden.

### 6.1.5. Das Verhältnis von Länge zu Durchmesser

Allgemein wird zum Vergleich von verschiedenen Reaktoren oder verfahrenstechnischen Apparaten die Ähnlichkeitstheorie, in der verschiedene Parameter zu dimensionslosen Kennzahlen zusammengefaßt werden, angewandt. Im vorliegenden Fall ist das Verhältnis von Drehrohrlänge  $l$  zu (innerem) Drehrohrdurchmesser  $d$ , also ein Verhältnis aus zwei Längenangaben, von Interesse. Das  $l/d$ -Verhältnis stellt einen dimensionslose Kennzahl dar. Sie beschreibt die geometrische Ähnlichkeit. Zwei Drehrohre sind also geometrisch ähnlich und vergleichbar, wenn das  $l/d$ -Verhältnis den gleichen Wert aufweist.

Eine Zusammenstellung und Interpretation der  $l/d$ -Verhältnisse anhand von Literaturangaben ist allerdings problematisch. Im Gegensatz zu der Drehrohrlänge ist die Angabe des Drehrohrdurchmessers nicht immer eindeutig, denn diese Angabe kann sich auf den äußeren Durchmesser des Stahlmantels oder auf den inneren Durchmesser des eigentlichen Verbrennungsraumes beziehen. Durch die 0,25 bis 0,50 m starke Ausmauerung ergibt sich zwischen dem äußeren und dem inneren Durchmesser eine beträchtliche Differenz. So werden z.B. in [Womann] und [Dorn-1] verschiedene Werte für den Durchmesser einer Anlage angegeben.

Außerdem bezieht sich die Angabe des Drehrohrdurchmessers auf eine neue Ausmauerung, die im Betrieb einem bestimmten Verschleiß unterliegt. Mit der Betriebszeit nimmt also das  $l/d$ -Verhältnis langsam ab. Zur Vermeidung von Mißverständnissen wird im folgenden Text der innere, lichte Durchmesser als "Durchmesser" bezeichnet.

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

Für eine genaue Betrachtung der l/d-Werte werden verfügbaren Daten bestehender Anlagen in der folgende Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle 6.2: Daten technischer Drehrohre

Nr.	Standort/Betreiber	Länge [m]	Innendurchmesser [m]	l/d [ ]	Quelle
1	BASF AG, Ofen 1	10,0	2,5	4,00	[Joschek-1]
2	BASF AG, Ofen 2	10,0	2,5	4,00	[Joschek-1]
3	BASF AG, Ofen 3	10,0	3,1	3,23	[Joschek-1]
4	BASF AG, Ofen 4	10,0	3,1	3,23	[Joschek-1]
5	BASF AG, Ofen 5	10,0	3,1	3,23	[Joschek-1]
6	BASF AG, Ofen 6	10,0	3,8	2,63	[Joschek-1]
7	BASF AG, Ofen 7	10,0	3,8	2,63	[Joschek-1]
8	BASF AG, Ofen 8	10,0	3,8	2,63	[Joschek-1]
9	Bayer AG	13,5	3,0	4,50	[Hünig]
10	Dow Chemical USA	10,7	3,2	3,34	[Cundy-1]
11	DuPont (de Nemours)	9,0	1,4	6,43	[Schaub]
12	Ebenhausen (neu)	12,0	4,47	2,68	[Fürmaier]
13	Ebenhausen (alt)	12,0	3,6	3,33	[Blume]
14	Biebesheim 1,2	11,0	3,5	3,14	[Blume]
15	Biebesheim 3	12,0	4,0	3	[Erbach-5]
16	AVG Hamburg	12,0	3,6	3,33	[Blume]
17	Duisburg	12,0	3,8	3,16	[Stock]
18	Circleville, Ohio	11,2	3,4	3,29	[Girovich]
19	Bayer AG	12,0	3,5 b	3,42	[Mischer-2] [Capek]
20	Wien	12,0	4,5 b	2,67	[Diekmann]
21	RZR Herten	12,0	4,4 a	2,72	[Möller]

- a: Außendurchmesser, Innendurchmesser unbekannt  
b: Durchmesserangabe nicht genau bezeichnet

Die Interpretation dieser Daten erfolgt anhand einer graphischen Darstellung in Abbildung 6.6.

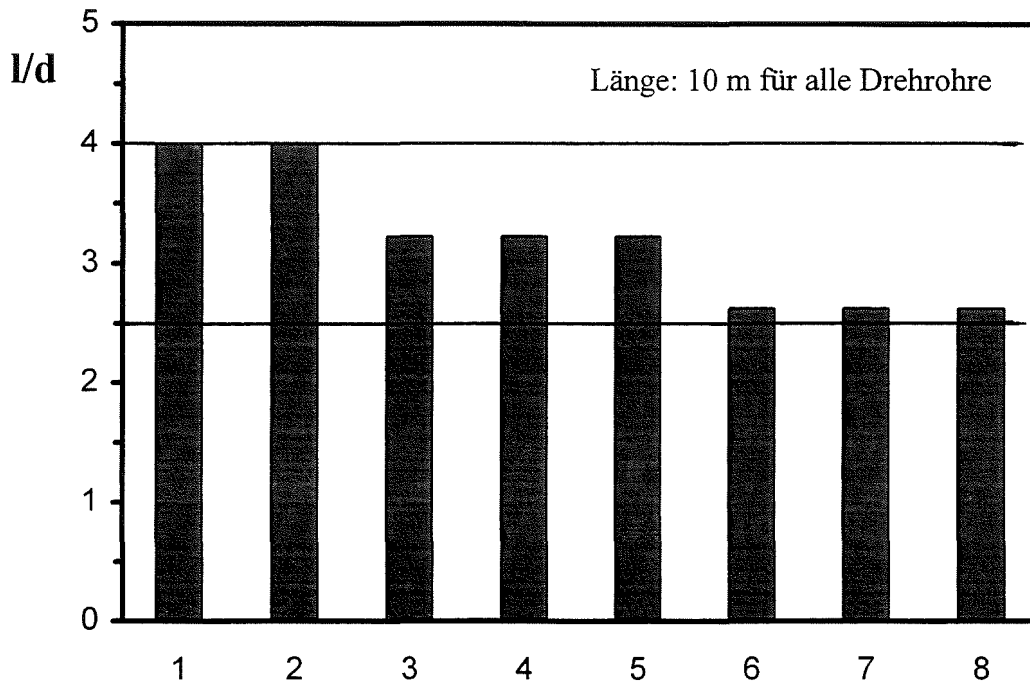


Abb. 6.6: Darstellung der  $l/d$ -Werte für die Öfen der BASF AG. Die Zahl unter dem Balken entspricht der Nummer in Tabelle 6.2

Die Abbildung 6.6 zeigt, daß die  $l/d$ -Verhältnisse sehr stark variieren. Die eingezeichneten Linien beschreiben die oberen und unteren Grenzwerte für das  $l/d$ -Verhältnis, die in [Seifert-3] mit 2,5 und 4 angegeben werden. Aus der Abbildung ist zu erkennen, daß sich die Daten nur auf die betriebseigenen Drehrohröfen der BASF AG beziehen. Weitere Erkenntnisse ergeben sich aus der Betrachtung der Baujahre der verschiedenen Öfen. Diese Daten sind in [Dorn-2] aufgeführt und zeigen, daß seit dem Bau der Öfen 1 und 2 im Jahr 1963 das  $l/d$ -Verhältnis für die später errichteten Anlagen in Stufen verkleinert wurde.

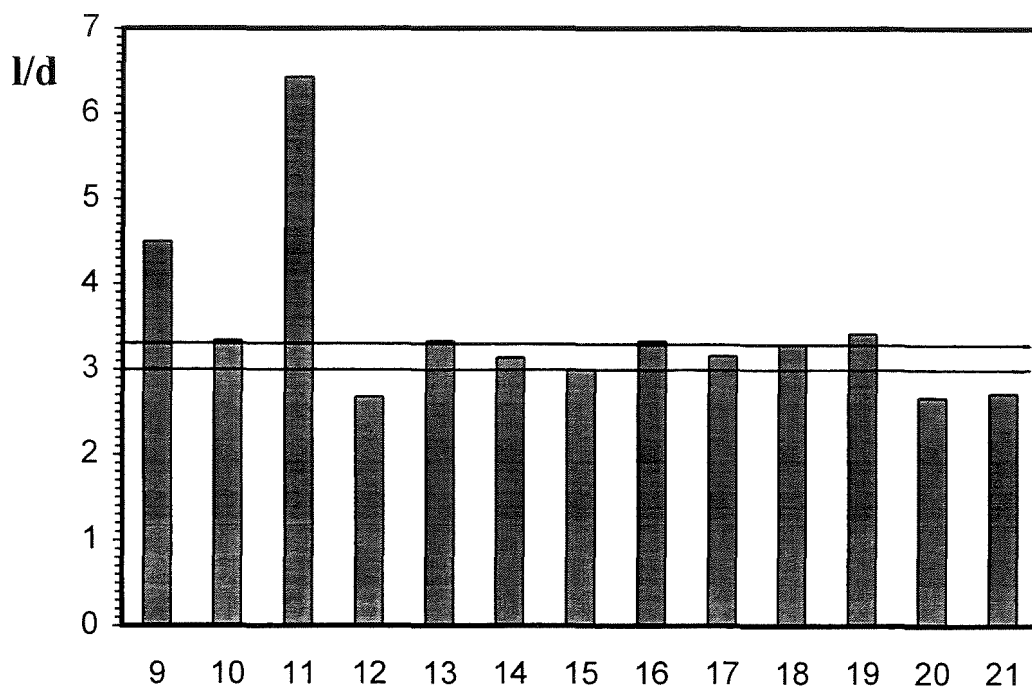


Abb. 6.7: Darstellung der  $l/d$ -Verhältnisse für weitere Anlagen. Die Zahl unter dem Balken entspricht der Nummer in Tabelle 6.2

Die Abbildung 6.7 enthält neben den  $l/d$ -Werten für verschiedene technische Anlagen ebenfalls zwei waagerechte Linien für den  $l/d$ -Verhältnsbereich, der sich aus [VDI 3640] ergibt. Die  $l/d$ -Verhältnisse der betrachteten technischen Anlagen liegen dicht beieinander und stimmen sehr gut mit den engen Grenzen der VDI-Richtlinie überein. Ausnahmen bilden nur die Abmessungen für die Anlage 9 der Bayer AG und die Anlage 11 von DuPont.

Aus einem Vergleich der Abbildungen 6.6 und 6.7 erkennt man, daß die  $l/d$ -Werte in Abbildung 6.7 wesentlich geringere Schwankungen aufweisen als die Angaben für die Öfen der BASF AG. Außerdem ist der  $l/d$ -Verhältnsbereich der VDI-Richtlinie wesentlich schmaler als der von [Seifert-3] angegebene Bereich.

Das bisher beschriebene  $l/d$ -Verhältnis macht allerdings keine Aussagen über die Ofengröße und die absoluten Maße. Für die genaue Auslegung werden in der Literatur keine Berech-



nungen veröffentlicht. Die Maße werden aufgrund bestimmter Kriterien ermittelt. Wichtigster Parameter für die Berechnung ist eine spezifische Leistung ein Wärmeeintrag von 150 kW pro  $\text{m}^3$  Drehrohrvolumen [Seifert-3]. Dieser Richtwert gilt allgemein und wird als unabhängig von der Ofengröße bezeichnet.

Mit der Kenntnis über die bei der Verbrennung frei werdende Wärmemenge kann das Volumen des Feuerraumes errechnet werden. Aus den Aspekten der Feuerungstechnik, die ein l/d-Verhältnis von 2,5 bis 4 erfordern, ergibt sich die Länge des Drehrohres. Der Durchmesser des Drehrohres wird zusätzlich durch den Platzbedarf der geplanten Aufgabevorrichtungen beeinflusst [Seifert-3]. Folglich gibt es keine beliebig kurzen Drehrohre. Bestimmte Mindestlängen sind einzuhalten.

In [Kubisa-1] wird für die Auslegung des Drehrohres ein ähnlicher Weg beschritten. Danach wird der Durchmesser des Drehrohres durch die Öffnungen für die Faßaufgabe und die weiteren Aufgabevorrichtungen bestimmt. Die thermische Belastung des Ofens und die Verweilzeit des Feststoffs sind dann die entscheidenden Parameter für die Bestimmung der Drehrohrlänge und des Drehrohrvolumens.

In [Comfère] wird als Grundlage für die Auslegung die auf Volumen, Oberfläche und Rohrquerschnitt bezogene thermische Belastung angegeben. Die Eigenschaften der Abfälle bestimmen die Länge der Drehrohres.

### **6.2. Vorgänge im Drehrohrföfen**

Im Kapitel 6.1.5 wurde dargelegt, daß die Drehrohrabmessungen vom Wärmeeintrag in das Drehrohr und der Verweilzeit der festen Rückstände bestimmt werden. Es ist allerdings zu beachten, daß in dem Drehrohr sehr viele verschiedene Vorgänge gleichzeitig ablaufen. Dazu gehören auch die möglichen Wege des Wärmetransports.

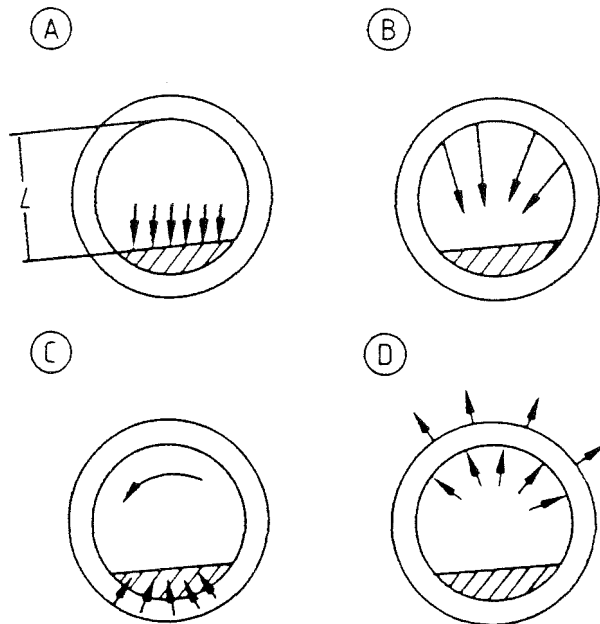


Abb. 6.8: Möglichkeiten des Wärmetransportes in einem Drehrohrföfen, siehe Text [Grzella]

Nach Abbildung 6.8 kann im Drehrohr Wärme durch Konvektion und Strahlung von der Gasphase auf den Feststoff bzw. die Schlacke übertragen werden (A). Die Skizze (B) beschreibt den Wärmeübergang durch Strahlung von Wandungen des Drehrohres auf das Gut. Ferner ist durch Wärmeleitung ein Wärmetransport von der Ausmauerung auf die zu verbrennenden Abfälle möglich (C). Das Bild (D) in Abbildung 6.8 beschreibt den Wärmetransport durch Strahlung auf die Wandungen und den Wärmeverlust an den Außenwänden.

Neben diesen Wärmeübertragungsprozessen laufen im Drehrohr sehr unterschiedliche chemische und physikalische Prozesse ab, die aus der folgenden Abbildung 6.9 zu entnehmen sind.

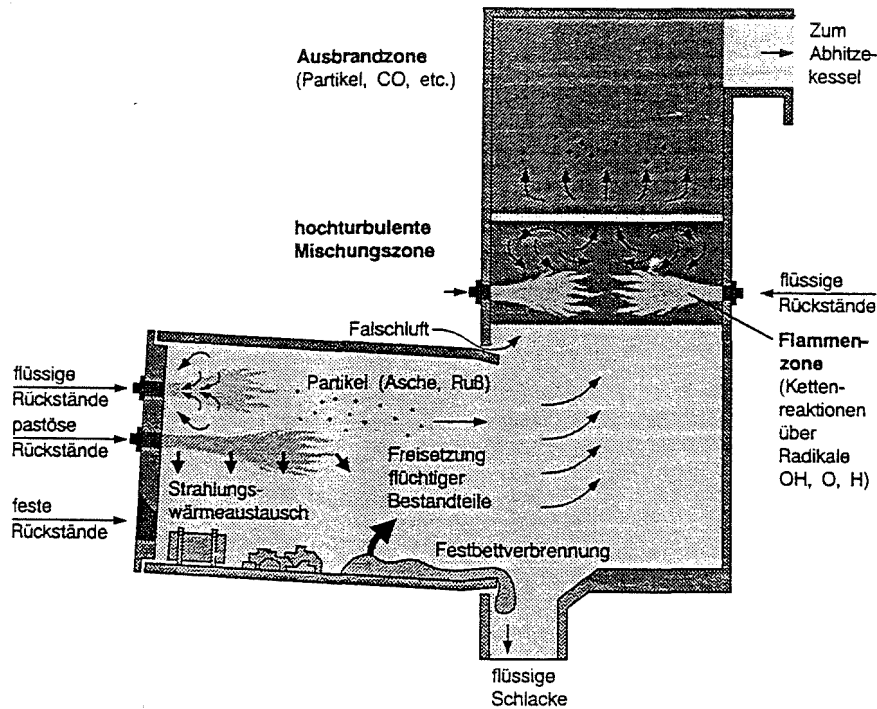


Abb. 6.9: Schematische Darstellung der verschiedenen Abfallströme und der physikalischen und chemischen Vorgänge [Hasberg-2]

Nach dieser Abbildung gibt es einen zusätzlichen Strahlungsaustausch zwischen den Brennerflammen in der Drehrohrstirnwand und den festen Abfällen. Aus den festen Abfällen werden verschiedene Bestandteile aufgrund von exothermen oder endothermen Vorgängen freigesetzt. Neben der Feuchte entweichen aus dem Abfall Pyrolyse- und Vergasungsprodukte. Im folgenden Text wird auf diese Prozesse im Drehrohr genauer eingegangen.

### 6.2.1. Grundlegende physikalische und chemische Vorgänge im Ofen

Nach [Comfère] durchlaufen feste Abfallstoffe nach der Aufgabe in das Drehrohr vier verschiedene Zonen, die in der Abbildung 6.10 zu erkennen sind. Als Folge der sehr großen Schwankungen bei der Abfallzusammensetzung und der Aufgabe variieren die entsprechen-

den physikalischen und chemischen Prozesse im Drehrohr sowohl örtlich als auch zeitlich sehr stark [Hünig].

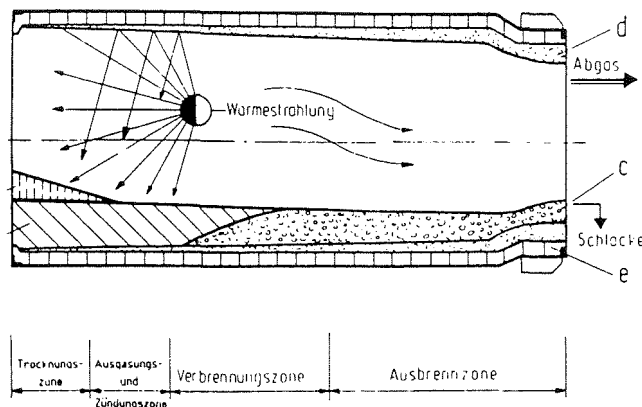


Abb. 6.10: Schematische Darstellung zu den Vorgängen im Drehrohr [Comfère]

In der ersten Phase, die den Temperaturbereich bis etwa 400 °C umfaßt, wird der Feststoff getrocknet. Anschließend folgt eine Ausgasungs- und Zündzone. Die hier entweichenden Schwelgase zünden bei etwa 200 bis 400 °C, da in den Schwelgasen relativ viel Sauerstoff enthalten ist. Die Zündung der Abfälle wird durch den Kontakt mit der heißen Ofenwandung und durch die Wärmestrahlung der brennenden Schwelgase gefördert. Der Feststoff erreicht in dieser Zone Temperaturen bis 900 °C. In der anschließenden Verbrennungszone verbrennt der Abfall und wird in dem folgenden Bereich vollständig ausgebrannt.

Die Feststoffverweilzeit liegt häufig bei ca. 60 min. Je nach Feuerraumtemperatur, die zwischen 800 und 1400 °C schwanken kann, tritt die Schlacke flüssig oder gesintert aus dem Drehrohr aus. Die Temperaturgrenzen in den Drehrohren werden nach unten durch die Forderung von Mindesttemperaturen bei der Genehmigung und nach oben durch die thermische Stabilität der Ausmauerung begrenzt [Schneider]. Die Temperaturen und Verweilzeiten werden später ausführlicher diskutiert.

Das in Abbildung 6.10 gezeigte Bild ist mit leicht veränderten Beschriftungen auch an weiteren Stellen [Schneider] [Thomé-K.-1] in der Literatur zu finden. In [Thomé-K.-1] wird

die Trocknungszone als Einlaufphase und die Ausgasungs-/Zündzone als Schmelz- und Verdampfungszone bezeichnet. Zusätzlich zu der Abbildung oben sind in [Thomé-K.-1] den einzelnen Zonen Längenangaben zugeordnet:

Tabelle 6.3: Längenangaben zu den einzelnen Zonen im Drehrohr [Thomé-K.-1]]

Einlaufzone	1/7 der Drehrohrlänge
Schmelz- und Verdampfungszone	1/7 der Drehrohrlänge
Verbrennungszone	2/7 der Drehrohrlänge
Ausbrennzone	3/7 der Drehrohrlänge

An anderer Stelle wird das Drehrohr für die unterschiedlichen Belastungen der Ausmauerung in die gleichen Zonen mit annähernd den gleichen Längenanteilen gegliedert [Kuchta-2]

Die gleiche Aufteilung in vier Zonen findet man auch bei [Tillman], wobei allerdings keine Angaben über die Länge der verschiedenen Zonen gemacht werden. In einer schematischen Darstellung nehmen alle Bereiche die gleiche Länge ein.

Die bisherigen Ausführungen enthielten keine Aussagen zu den eigentlichen Verbrennungsvorgängen und den entsprechenden chemischen Reaktionen. Die Verbrennungszeiten der Abfälle werden durch die Brennraum- und Oberflächenbelastungen in  $\text{GJ/m}^3$  bzw.  $\text{GJ/m}^2$  beeinflusst. Diese thermische Belastung des Ofens steuern die endotherme Verdampfung und Vergasung, die vor der eigentlichen Verbrennung ablaufen [Womann].

Angaben zum Abbrand von körnigen und grobdispersen Feststoffen mit größeren Abmessungen (kein Staub) wurden in der betrachteten Literatur nicht gefunden. Nach [Seifert-3] existieren für die Verbrennung fester Abfälle zur feuerungstechnischen Berechnung von Drehrohren nur unzureichende Informationen. Für Vorgänge in der Gasphase, als Beispiele seien die thermische Zersetzung oder der Tropfen- bzw. Partikelabbrand genannt, liegen dagegen Erkenntnisse vor. Auf diese Sachverhalte wird in Kapitel 6.5.1. näher eingegangen.

Auch für die Verbrennung von Abfällen mit Brennern existieren in der Literatur keine detaillierten Aussagen. Nach [Hasberg-1] laufen in der Flammenzone der Brenner sehr

komplizierte Vorgänge ab. Neben Zerstäubung und Verdampfungsprozessen sind auch Stoff- und Wärmetransportvorgänge zu berücksichtigen. Für diese Prozesse gibt es erste mathematische Ansätze, die allerdings praktisch fast nicht anwendbar sind [Hasberg-1].

In [Kolb-1] wird ein einfaches Modell zur Simulation der Schüttgutverbrennung im Drehrohr erwähnt, das auch die Abbrandrate des Feststoffs berücksichtigt. Genaue Angaben zu dem Modell oder mathematische Ansätze werden nicht angegeben.

### 6.2.2. Verweilzeiten und Luftüberschuß

Die Verweilzeit der Feststoffe wird durch den Drehrohrdurchmesser, die Neigung des Drehrohres, die Länge, den Füllungsgrad und die Drehzahl beeinflusst. Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung der in der Literatur angegebenen Werte.

Tabelle 6.4: Verweilzeiten für feste Abfälle im Drehrohr

[Vollhardt-1]	0,5 bis 2 h an.
[Thomé-K.-1]	1 h
[Erbach-4]	1 h.
[VDI 3640]	mehr als 0,5 h .
[Fürmaier]	0,5 bis 1 h
[Schneider]	0,5 bis 1,5 h
[Girovich]	0,75 bis 1 h

Bei der Angabe der Verweilzeit ist zwischen Drehrohren mit flüssigem oder festem Schlackeaustrag zu unterscheiden [Tillman]. Für den ersten Fall wird eine Verweilzeit von 1 bis 2 h angegeben, für den zweiten Fall 0,5 bis 1 h. Nach [Diekmann] beträgt die Verweilzeit für die Gase im Drehrohr mehr als 2 s, die Feststoffe verbleiben mindestens 30 min im Drehrohr.

Die Angaben über die Feststoffverweilzeit zeigen untereinander eine sehr gute Übereinstimmung. Die in der Literatur genannten Werte liegen in einem Bereich von 1 h, aber Aussagen über den Bestimmungsweg der angegebenen Zahlenwerte erfolgen nicht. Alle Werte werden ohne Hinweise auf konkrete Meßdaten oder Literaturzitate angegeben.

Für die Gasverweilzeiten im Drehrohr sind in der Literatur nur sehr wenige direkte Angaben zu finden. In [Vollhardt-1] wird eine Gasgeschwindigkeiten im Drehrohr von ca. 5 m/s erwähnt. Bei einer Drehrohrlänge von etwa 10 m ergibt sich eine Verweilzeit von etwa 2 s. Dieser Zahlenwert wird in [Erbach-4] bestätigt. In [Girovich] wird eine Rauchgasverweilzeit von annähernd 1,5 s genannt. Eine deutlich längere Verweilzeit errechnet sich aus den Angaben in [Fürmaier]. Eine Rauchgasgeschwindigkeit von 2 m/s für 1050 °C ergibt für ein 12 m langes Drehrohr eine mittlere Verweilzeit von 6 s.

Die Luftzahlen für die Verbrennung im Drehrohr sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Die entsprechenden Zahlenwerte werden von den Autoren ohne weitere Quellennachweise angegeben. Es handelt sich vermutlich um Erfahrungswerte.

Tabelle 6.5: Luftzahlen  $\lambda$  aus Literaturangaben

[Vollhardt-1]	1,6 bis 2,5	
[Thomé-K.-1]	2,0 bis 3,0	
[Schneider]	1,9 bis 2,5	(feste Abfälle)
	1 bis 1,4	(flüssige Abfallstoffe)
[Kubisa-2]	1,3	(Flüssigkeiten)
	1,8 bis 2,3	(Feststoffe u. Gebinde)
	1,8	(Mittelwert)
[Seifert-1]	2,5	(feste und pastöse Rückstände)
	1,5	(flüssige Abfälle)

Im Gegensatz zu den Rostfeuerungen der Hausmüllverbrennung ist in den Drehrohren der Sonderabfallverbrennungsanlagen keine Luftstufung möglich. Ein Eingriff auf die Feuerungs-führung über die Drehrohrlänge ist fast unmöglich [Scholz-2].

### 6.2.3. Temperaturen und Wärmebelastungen im Drehrohr

Die Temperaturen im Drehrohr und in der Nachbrennkammer beeinflussen den Ausbrand der Abfälle und somit die Emissionen der Anlage. Wird ein konstanter Abfallstrom mit gleichen

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

Heizwerten und Zusammensetzungen zugeführt, so gelingt eine Temperatursteuerung nur über die Luftzufuhr [Schlierf]. Für die Temperaturen im Drehrohrföfen werden in der Literatur von verschiedenen Autoren Zahlenwerte angegeben, die in der folgenden Tabelle enthalten sind. Nach [Erbach-4] hat das Schmelzverhalten der Schlacke einen großen Einfluß auf die Temperatur im Drehrohr.

Tabelle 6.6: Temperaturen im Drehrohr

[Hüning]	Verbrennungstemperatur 800-1200 °C
[Thomé-K.-1]	Verbrennungstemperatur 800-1400 °C
[Vollhardt-1]	Verbrennungstemperatur 1200 °C Fallweise bis 1400 °C
[Dorn-1]	Verbrennungstemperatur bis 1200 °C
[VDI 3640]	Verbrennungstemperatur bis 1350 °C
[Fürmaier]	Auslegungstemperaturbereich 900-1400 °C Dauerbetriebstemperatur 1000-1100 °C
[Kubisa-2]	Temperaturen von 900-1200 °C
[Erbach-4]	Schlackebadtemperatur 1200-1300 °C
[Stein-1]	Einlaufbereich 600 °C Flambereich 1600 °C
[Hasberg-3]	Flammenzone 1600 °C

Im Gegensatz zu der Bezeichnung "Schlackebadtemperatur" sind die Benennungen "Verbrennungstemperatur" und "Betriebstemperatur" nicht eindeutig. Es erfolgen keine Angaben darüber, ob die Temperatur für die Feststoffphase oder für die Gasphase gilt. Wie die folgenden Abbildungen zeigen, sind die Temperaturen im Drehrohr zusätzlich ortsabhängig.

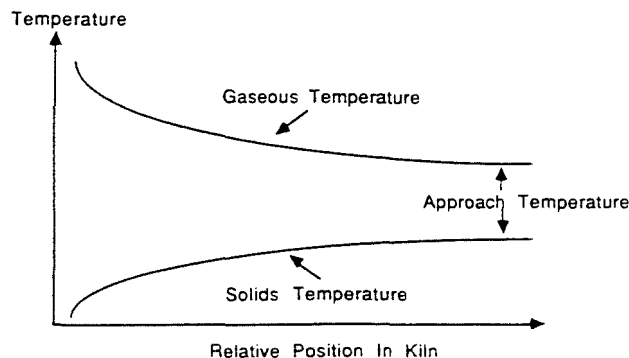


Abb. 6.11: Darstellung eines schematischen Temperaturprofils nach [Tillman]



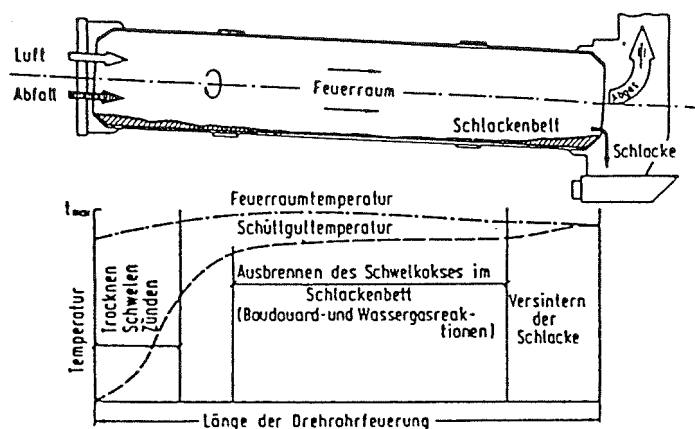


Abb. 6.12: Darstellung eines schematischen Temperaturprofils nach [Thomé-K.-1]

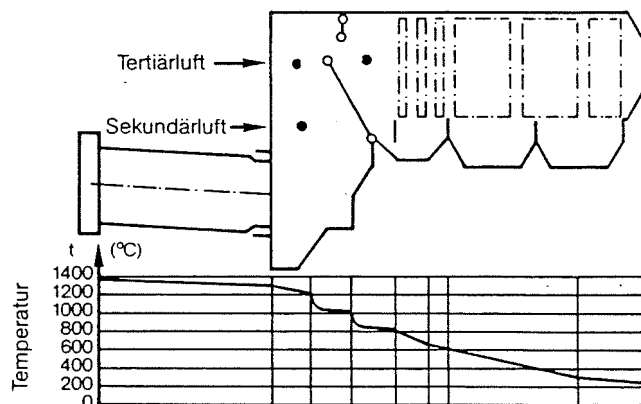


Abb. 6.13: Rauchgastemperaturen im Drehrohr [Erbach-3]

In den Abbildungen 6.11 und 6.12 werden die Temperaturänderungen in Abhängigkeit von der Ofenlänge nur qualitativ ohne eine genaue Einteilung der y-Achse dargestellt. Aus der Abbildung 6.13 ist nicht zu entnehmen, ob Meßwerte für die gesamte Ofenlänge aufgenommen worden sind, oder ob die Meßpunkte am Drehrohranfang und Drehrohrende nur miteinander verbunden worden sind.

Vergleicht man diese drei Abbildungen, so sind größere Unterschiede festzustellen. Für die Temperatur im Feststoff bzw. in der Schlacke erscheint die Abbildung 6.12 als zutreffend.

Nach der Aufgabe des Abfalls steigt dessen Temperatur an und bleibt in der Ausbrandphase fast konstant. Der entsprechende Kurvenverlauf für die Feststofftemperatur in Abbildung 6.11 wirkt dagegen sehr schematisch.

Die Kurvenverläufe für die Feuerraumtemperatur in den Abbildungen 6.11 und 6.13 entsprechen eher den Erwartungen als der Graph in Abbildung 6.12. Durch den Einbau der Brenner in die Frontplatte des Drehrohres sollten die Temperaturen in der Gasphase von der Aufgabeseite zum Drehrohrende abfallen. In [Hasberg-1] wird im Gasraum des Drehrohres zwischen der Flammenzone der Brenner und einer sich anschließenden Zersetzungszone unterschieden. Für die eigentliche Flammenzone der Brenner (nicht ges. Gasraum) werden Temperaturen von 1600 bis 2000 °C angegeben. In Abbildung 6.12 zeigt dagegen die Feuerraumtemperatur ein Maximum in der Mitte des Drehrohres.

Zu den Temperaturen in Abbildung 6.11 werden in [Tillman] weitere Angaben gemacht. Danach ist die Temperaturdifferenz zwischen der Gasphase und dem Feststoff am Ende des Drehrohres von den Betriebsbedingungen abhängig. Wenn die Schlacke flüssig anfällt, so tritt keine Temperaturdifferenz auf. Wird die Schlacke dagegen als Granulat abgeführt, so kann eine Temperaturdifferenz von 570 bis 930 °C auftreten.

Nach Aussagen von [Andreyuk] gibt eine genaue Messung der Schlackentemperaturen im Drehrohr regelungstechnische Hinweise. Dadurch werden zusätzliche Betriebsdaten erhalten, die eine genauere Überwachung der Prozesse im Drehrohr ermöglichen und zu einer Senkung der Betriebskosten führen.

Berücksichtigt man alle Vorgänge im Drehrohr, so sind bei der Feuerraumtemperatur zwei Maxima zu erwarten. Das erste Temperaturmaximum entsteht aufgrund der hohen Temperaturen in der Brennerflamme an der Aufgabeseite. Das zweite Maximum wird aufgrund der verbrennenden Abfälle etwa in der Mitte des Drehrohres vorliegen.

Für die Wärmebelastung der Anlagen werden in verschiedenen Quellen Zahlenwerte angegeben, die vereinzelt auf geometrische Daten des Drehrohres bezogen werden. Die Wärmebelastung ist eine maßgebliche Größe für die Dimensionierung des Drehrohres (Siehe

Kapitel 6.1.5). Bei einem Bezug auf die Oberfläche, den Querschnitt und das Volumen wird nur in [VDI 3640] ausdrücklich erwähnt, daß die inneren Abmessungen betrachtet werden.

Tabelle 6.7: Wärmebelastungen im Drehrohröfen

Thermische Feuerraumbelastung	0,4-0,6 GJ/m <sup>3</sup> h	[Vollhardt-1]
Volumenbezogene Wärmebelastung	150 kW/m <sup>3</sup> (=0,54 GJ/m <sup>3</sup> h)	[Seifert-3]
Volumenbelastung	< 1,0 GJ/m <sup>3</sup> h	[VDI 3640]
	0,5 GJ/m <sup>3</sup> h	[Fürmaier]
Thermische Querschnittsbelastung	6-8 GJ/m <sup>2</sup>	[Vollhardt-1]
Oberflächenbelastung	< 1,0 GJ/m <sup>2</sup> h	[VDI 3640]
Wärmeleistung (Dauerlast)	75 GJ/h	[Fürmaier]
(Spitzenlast)	105 GJ/h	[Fürmaier]

Die angegebenen Daten für die Volumenbelastung zeigen nach der Umrechnung auf die gleichen Einheiten eine sehr gute Übereinstimmung. [Meininger] nennt für Sonderabfallverbrennungsanlagen mit einem Durchsatz von 30 bis 50.000 t/a eine Feuerungsleistung von 100 GJ/h.

An anderen Stellen in der Literatur werden weitere Daten zu dieser Thematik angegeben, die allerdings nicht erläutert werden [Stock] [Erbach-3] [Hünig]. So lassen sich aus den Wärmemengen der jährlich verbrannten Abfälle ohne die Angabe der Betriebsstunden und der Abfallaufteilung zwischen Drehrohr und Nachbrennkammer die Wärmebelastungen nicht errechnen. Auf eine Diskussion dieser Daten wird daher an dieser Stelle verzichtet.

### 6.3. Konstruktion der Nachbrennkammer

Die Nachbrennkammer im Anschluß an das Drehrohr hat mehrere Aufgaben zu erfüllen. Hier soll der vollständige Ausbrand der aus dem Drehrohr abströmenden Rauchgase und der Schlackeaustrag erfolgen. Außerdem werden hier die verflüssigten Stäube ausgetragen, die an den Wänden der Nachbrennkammer nach unten ablaufen (Siehe Abb. 6.14).

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

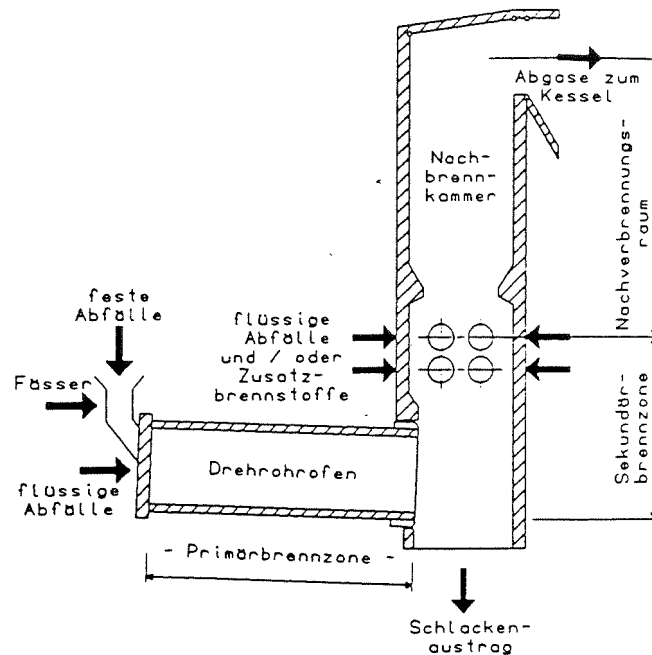
---

Der Schlackeaustrag ist unterhalb der Drehrohrreinmündung installiert. In der Regel fällt die Schlacke aus dem Drehrohr in ein Wasserbad, wird dort granuliert und mit einer Transporteinrichtung ausgetragen. Das Wasserbad dient auch der Unterdruckregelung in der Anlage und stellt eine Entlastungsvorrichtung bei schnellem Druckanstieg im System dar [Schöner-2].

Der Ausbrand der Rauchgase als wesentliche Aufgabe der Nachbrennkammer ist hinsichtlich der Emissionen der Gesamtanlage von sehr entscheidender Bedeutung. Infolge der schwankenden Abfallzusammensetzung und der sich ändernden Rauchgasmengen sind unterstöchiometrische Verbrennungsvorgänge im Drehrohr auch bei einem hohen Luftüberschuß möglich. Die aus dem Drehrohr in die Nachbrennkammer einströmenden Rauchgase enthalten folglich verschiedene Schadstoffe, die durch eine weitere Verbrennung zerstört bzw. umgesetzt werden müssen.

Es handelt sich hierbei um organische Schadstoffe, Kohlenmonoxid, Rußpartikel und den in den Stäuben vorhandene Restkohlenstoff. Außerdem enthält das Rauchgas noch  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  und  $\text{NO}_x$ . Alle Maßnahmen in Hinblick auf einen vollständigen Ausbrand haben einen großen Einfluß auf die Neubildung von Dioxinen und Furanen [Vollhardt-2].

Diese Aufgaben der Nachbrennkammer sind allerdings nicht auf das im Drehrohr gebildete Rauchgas begrenzt; sie gelten auch für die meist flüssigen Abfälle, die der Nachbrennkammer über zusätzliche Brenner zugeführt werden können [Vollhard-3]. Aus dieser Notwendigkeit ergibt sich, daß die Nachbrennkammer in zwei verschiedene Zonen einzuteilen ist. In Hinblick auf den gesamten Verbrennungsprozeß sind dann drei Bereiche zu unterscheiden, die in Abbildung 6.14 eingezeichnet sind:



Verbrennungsraum (Primärbrennzone)	Drehrohr
Brenn/Mischbereich (Sekundärbrennzone)	Unterer Teil der Nachbrennkammer, in dem die flüssigen Abfälle zugeführt und verbrannt werden
Nachbrennzone	Oberer Teil der Nachbrennkammer zum vollständigen Ausbrand der Rauchgase.

Abb. 6.14: Feuerungstechnische Aufteilung der Drehrohranlage [Schneider]

Eine definitive Aufteilung in diese drei verfahrenstechnisch zu unterscheidenden Bereiche erfolgt in der Literatur z.B. in [VDI 3640], [Meininger], [Schneider] u. [Fürmaier]. Allerdings wird nicht in jeder Veröffentlichung so deutlich zwischen den verschiedenen Zonen unterschieden.

Aus dieser Einteilung ergibt sich für die folgende Betrachtung der Nachbrennkammer ein Problem. Die eigentliche Nachbrennzone beginnt erst oberhalb der letzten Brennerebene bzw. der letzten Sekundärluftzuführung in die Nachbrennkammer [VDI 3640] [Comfère]. In der Literatur fehlt bei den Längenangaben für die Nachbrennkammer oft der Hinweis, ob sich die

angegebenen Daten auf die Gesamtlänge der Nachbrennkammer oder nur auf die Nachbrennzone im oberen Teil beziehen. Die für den vollständigen Ausbrand der Rauchgase erforderliche Verweilzeit bezieht sich auf die Nachbrennzone oberhalb der letzten Sauerstoffzugabe bzw. Brennerebene [Vollhard-2] [Schneider].

### 6.3.1. Bauformen der Nachbrennkammer

Die Nachbrennkammern sind in der Regel einstufig stehend hinter dem Drehrohr angeordnet und werden von unten nach oben durchströmt. Eine grundlegende Unterscheidung der Bauformen findet man in [Kubisa-3], [Comfère] u. [Schneider]. Danach werden Nachbrennkammern mit rundem und rechteckigem Grundriß gebaut. Die runde Bauform ist vorteilhaft für die Stabilität der Ausmauerung [VDI 3640] [Kubisa-3] [Comfère]. Eine umfangreichere Liste von Vorteilen für die runde Ausführung findet man bei [Fürmaier] (Zitat):

- bessere Vermischung der Rauchgase (Minimierung der Strähnenbildung) durch tangentielle Anordnung der Brenner
- optimale Strömungsverhältnisse (keine "toten Ecken")
- günstige Fugenanordnung
- keine Halterungen für Isoliersteine

Nach [Vollhardt-3] gibt es für die Abmessungen und die Form der Nachbrennkammer noch weitere Varianten. Der Drehrohrdurchmesser kann größer oder kleiner als der Durchmesser der Nachbrennkammer sein. Neben den einstufigen, stehenden Nachbrennkammern gibt es zweizügige (d.h. in Serie geschaltete) und liegende Konstruktionen. Für die zweizügigen Konstruktionen, die bei der BASF AG für die Anlagen 1 und 2 gebaut worden sind, werden folgende Nachteile angegeben [Joschek-1]:

- Strömungszustände sind im rechteckigen Umlenkungsquerschnitt problematisch
- die ungekühlte Mittelwand ist thermisch hoch belastet

Außerdem wurden Anlagen mit eckigen Nachbrennkammern mit in Strömungsrichtung veränderlichen Querschnitten gebaut. Durch zusätzliche Schotten entstehen so ungewöhnliche Querschnitte. Die folgende Abbildung enthält ein Beispiel.

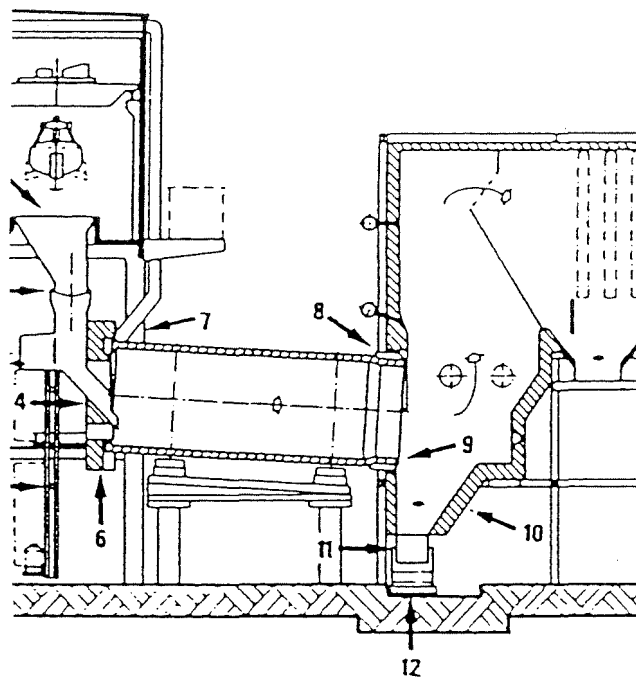


Abb. 6.15: Querschnitt durch die Nachbrennkammer in Biebesheim [Erbach-6]

Einen ähnlichen Querschnitt weisen die Nachbrennkammern an den Standorten Rijnmond (Niederlande) und Riihimäki (Finnland) auf [Widmer].

Ein weiterer Aspekt für die Form der Nachbrennkammer ist die Ausbildung des Kammerbodens. Nach [Vollhardt-1] ist ein waagerechter Boden für die spätere Zuführung eines homogenen Gasmisches in den Kessel erforderlich. Außerdem bietet der flache Boden in der Nachbrennkammer Vorteile durch geringere Schlacke- und Ascheablagerungen. Alle in einer weiteren Arbeit [Vollhardt-3] erwähnten Nachbrennkammern sind mit waagerechten Böden ausgerüstet. Die Schnittbilder für den Ofen 6 der BASF AG [Dorn-1] und für eine Anlage in Herten [Kubisa-2] zeigen ebenfalls ebene Böden. Außerdem wird die Nachbrennkammer so ausgelegt, daß für die aus dem Drehrohr abströmenden Rauchgase zunächst expandieren [Vollhardt-1]. Die Gasgeschwindigkeiten sind im Drehrohr wesentlich höher als in der Nachbrennkammer. Eine deutliche Verzögerung erfolgt beim Übergang vom Drehrohr in die Nachbrennkammer, wie in Abbildung 6.16 gezeigt.

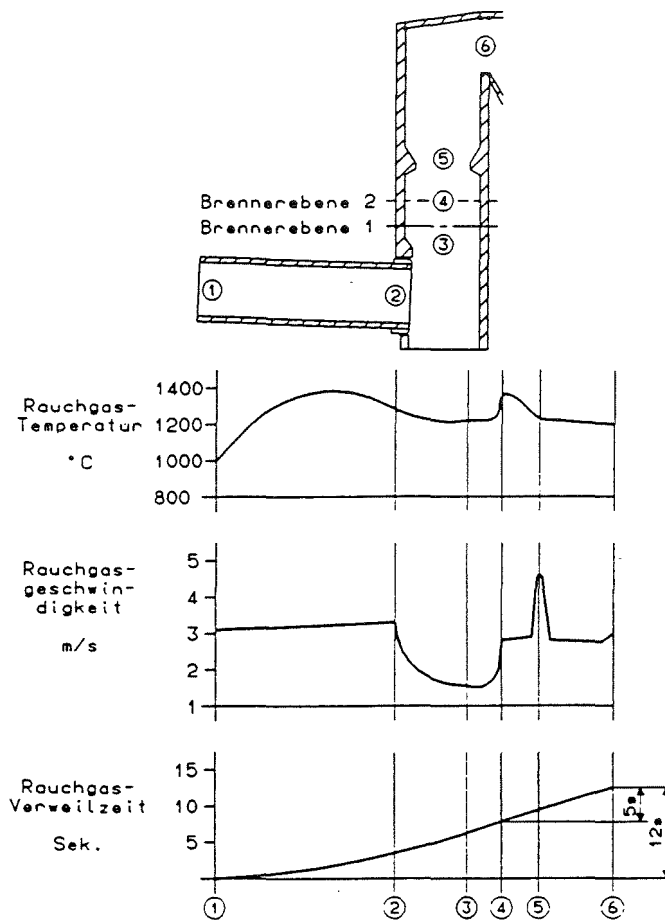


Abb. 6.16: Temperatur-, Geschwindigkeits- und Verweilzeitverlauf des Rauchgases [Schneider]

Danach sinkt die Gasgeschwindigkeit von etwa 3 m/s am Drehrohrende auf etwa 1,5 m/s ab. Interessant ist der Einfluß der Einschnürung oberhalb der zweiten Brennebene (Pos.5), die wiederum zu einer deutlichen Steigerung der Rauchgasgeschwindigkeit auf ca. 5 m/s führen soll. Eine derartige Einschnürung ist in der Nachbrennkammer für die dritte Verbrennungsstraße der Hessischen Industriemüll GmbH in Biebesheim vorgesehen [Erbach-5] (Siehe Abbildung 6.3). Zum Temperaturverlauf wurden bereits in Kapitel 6.2.3. Anmerkungen gemacht.

Verwirbelungseinbauten in der Misch/Brennzone der Nachbrennkammer werden auch von [Comfère] zur besseren Rauchgasdurchmischung angeführt. Für den gleichen Zweck werden von [Thomé-K.-1] keramische Mischgitter vorgeschlagen. Beide Autoren geben allerdings



keine genaueren Erläuterungen an. Bei allen Einbauten in die Nachbrennkammer besteht die große Gefahr der Verschlackung.

Die Verbrennungsvorgänge in der Nachbrennzone werden entscheidend von den Eigenschaften der Gasströmung beeinflusst, die unter anderem auch von den Abmessungen der Nachbrennkammer abhängen. Für vertikale, durchgehend zylindrische und runde Nachbrennkammern wird in [Vollhardt-3] ein optimales Längen/Durchmesser-Verhältnis von 6 angegeben.

Zu beachten sind ferner die Übergänge von der Nachbrennkammer zum Drehrohr und dem angeschlossenen Kessel. Es müssen sowohl ein Falschlufteintritt als auch ein Abgasaustritt vermieden werden. Das Ende der Nachbrennkammer ist entsprechend dem nachgeschalteten Kessel auszulegen [Comfère].

### 6.3.2. Ausmauerung der Nachbrennkammer

Die Nachbrennkammer ist wie das Drehrohr innen mit feuerfesten Materialien ausgekleidet. Die Ausmauerung wird hier in mehreren Schichten ausgeführt. Durch einen solchen Wandaufbau werden die Wärmeverluste reduziert, so daß näherungsweise ein adiabatisches Verhalten erreicht wird [Vollhardt-3]. Außerdem dient die Ausmauerung der Wärmespeicherung. Temperaturveränderungen durch kurzzeitige Betriebsstörungen werden dadurch abgefangen.

[Comfère] unterscheidet bei der Ausmauerung zwischen Isolier- und Verschleißschichten, ohne eine Anzahl der verschiedenen Schichten zu nennen. Für die Steine in den Verschleißzonen ist ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt von etwa 65 % erforderlich. In den Brennerbereichen, wo auch Stampfmassen eingesetzt werden, beträgt der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt bis zu 85 %. Die Steine in den höheren, geringer belasteten Zonen enthalten nur noch 50 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Für die Standzeit der Ausmauerung werden mehr als 25000 Betriebsstunden angegeben [Thomé-K.-1].

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

Für die innere Auskleidung ist nach [Kuchta-1] aufgrund der aggressiven Rauchgase ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt von 55 bis 65 % erforderlich. Im Bereich der Brenner, wo die Temperaturen deutlich über  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  liegen können, kann Material mit einem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt von 80 % eingebaut werden [Kuchta-2].

Die Auswahl der Steine für die Ausmauerung wird auch davon bestimmt, ob die Blechverkleidung der Nachbrennkammer mit einer Isolierschicht versehen ist [Kuchta-1]. Eine solche Isolierschicht erhöht das Temperaturprofil in den einzelnen Steinlagen. Die innere Ausmauerung kann aus bis zu vier Schichten bestehen [Kuchta-2].

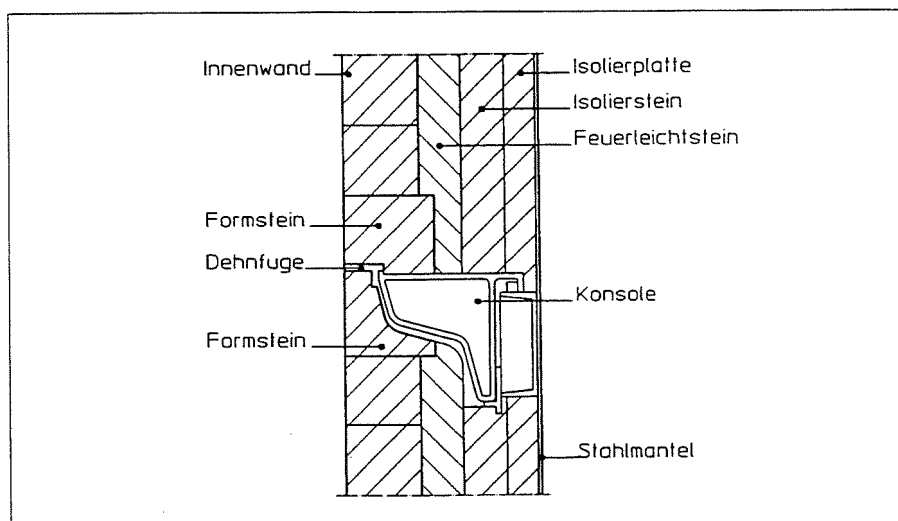


Abb. 6.17: Wandaufbau in der Nachbrennkammer [Kuchta-2]

Die vertikale Ausdehnung der Ausmauerung wird durch Dehnfugen ausgeglichen. Am äußeren Stahlmantel befestigte Konsolen stützen die Ausmauerung ab [Kuchta-2]. Die in einigen Nachbrennkammern eingebaute Einschnürung des Querschnitts kann durch spezielle Formsteine ausgebildet werden [Kuchta-2].

Die Decke der Nachbrennkammer kann nach [Kuchta-2] durch drei unterschiedliche Konstruktionen gestaltet werden. Neben einer Ausbildung als Gewölbe ist eine Formsteinhängendecke oder die Auskleidung durch eine feuerfesten Masse mit Haltesteinen möglich.

[Thomé-K.-1] erwähnt hohe chemische Belastungen der Ausmauerung in der Nachbrennkammer im Bereich des Drehrohreintritts. Diese Einwirkungen entstehen durch Schlacketröpfchen, die von den Rauchgasen aus dem Drehrohr mitgerissen werden. Der untere Teil der Nachbrennkammer muß danach mit qualitativ besseren Steinen ausgemauert werden.

### 6.3.3. Anordnung der Brenner

Die in der Nachbrennkammer installierten Brenner haben verschiedene Aufgaben. Durch sie erfolgt eine Verbrennung von flüssigen Abfällen, die zu einer gewünschten Steigerung der Temperaturen für den vollständigen Ausbrand der Rauchgase und der darin enthaltenen Partikel führen [Comfère]. Für die Verbrennungsvorgänge in der Nachbrennzone sind außerdem die Auswirkungen der Brenner auf die Gasströmung von großer Bedeutung, denn der vollständige Ausbrand der Rauchgase wird entscheidend durch die Vermischung, der verschiedenen Rauchgasströme, d.h. durch die Turbulenz, beeinflusst. Die Brenneranordnung, ggf. in Verbindung mit zusätzlichen Einbauten (Siehe Kapitel 6.3.1), beeinflusst turbulente Vermischungsvorgänge, die für den Ausbrand wichtiger sind als der Grundriß der Nachbrennkammer [Comfère].

Detailliertere Informationen zu dieser Thematik findet man in [Vollhardt-3]. Danach wird durch die Konstruktion der Nachbrennkammer und die Positionierung der Brenner in der Nachverbrennungszone eine "leicht verdrallte Kolbenströmungscharakteristik mit guter Nachvermischungswirkung und enger Verweilzeitverteilung" [Vollhardt-3] erzeugt. Die Brenner werden so eingestellt, daß die Flammen auf einen virtuellen Innenkreis, nicht aber gegen die Ausmauerung treffen. Der Autor gibt für die Positionierung der Brennerachsen eine Ausrichtung auf einen Innenkreis an, dessen Durchmesser 10 bis 15 % des Nachbrennkammerdurchmessers beträgt. Die folgende Abbildung verdeutlicht diese spezielle Anordnung in einer runden Nachbrennkammer.

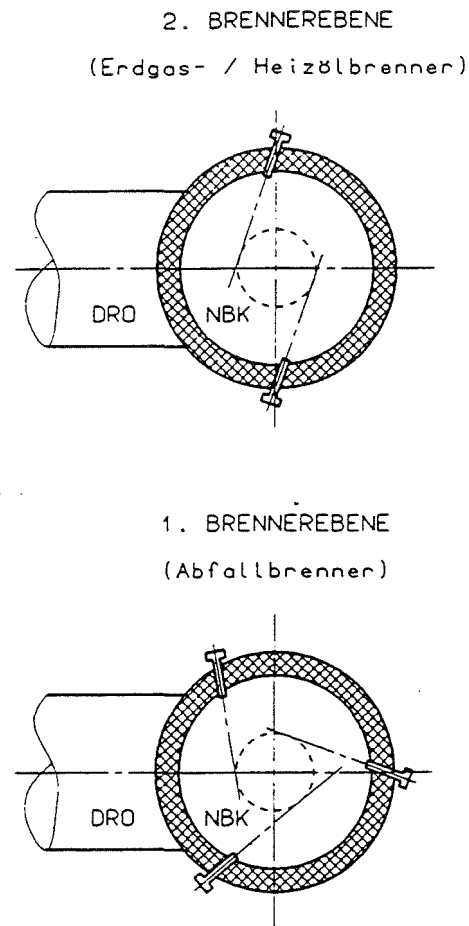


Abb. 6.18: Brenneranordnung in der Nachbrennkammer [Schneider]

Der Durchmesser des hier eingezeichneten Tangentialkreises übersteigt allerdings deutlich die oben genannte Angabe. Diese Form der Brenneranordnung und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Durchmischung und den Ausbrand werden von anderen Autoren bestätigt (Siehe z.B. [Joschek-1]). [Meininger] erwähnt nur einen leicht tangentialen Eintritt der Flammen in die Nachbrennkammer.

Durch an den Wänden der Nachbrennkammer nach unten fließende Schlacke können die Brennerdüsen verstopft werden. Diese Gefahr ist besonders groß, wenn der Brenner nicht in Betrieb ist. Aus diesem Grund sind die Brenner leicht nach unten geneigt eingebaut [Vollhardt-3].

Bei [Kubisa-2] findet man ähnliche Informationen über die Ausrichtung der Brenner. Im Fall einer runden Nachbrennkammer werden vier Brenner auf den virtuellen Innenkreis ausgerichtet. Durch den Querimpuls der Brenner entsteht im Gasstrom eine Drallströmung, die durch die Brennereinstellung geregelt werden kann. Die eckige Nachbrennkammer wird mit "Seitenwandbrennern in Boxerstellung" ausgerüstet. Die Mischung der Rauchgase erfolgt durch den eingetragenen Impuls, die Umlenkung und durch Veränderung der Strömungsquerschnitte. Eine genauere Beschreibung der Brennerausrichtung erfolgt nicht.

Der Einbau der Brenner in die Nachbrennkammer erfolgt nach [Comfère] für runde und eckige Grundrisse in einer gegenüberliegenden und versetzten Anordnung.

Außerdem müssen aufgrund gesetzlicher Vorschriften seit 1987 in die Nachbrennkammer Stützbrenner eingebaut werden. Diese Brenner werden bei der BASF AG mit Erdgas betrieben und zum Anfahren der Anlage sowie zur Einhaltung der Mindesttemperatur eingesetzt [Joschek-1].

### 6.4. Daten großtechnischer Nachbrennkammern

Die Abmessungen und die Temperaturen können bei der Auslegung der Nachbrennkammer nicht völlig frei gewählt werden. Der Gesetzgeber schreibt für die Nachbrennkammer bestimmte Temperaturen und Verweilzeiten vor. Nach der 17. BImSchV werden für die Rauchgase Verweilzeiten von mindestens 2 s bei 1200 °C in der Nachbrennkammer nach der letzten Luftzugabe gefordert.

In [Vollhardt-3] findet man die unten aufgeführten Betriebsdaten. An einer anderen Stelle [Vollhardt-1] werden für die Auslegung etwas andere Werte genannt, die in Klammern angegeben werden.

Tabelle 6.8: Daten für die Nachbrennkammer [Vollhardt-1] u. [Vollhardt-3]

vorgegebene Verbrennungstemperatur je nach Einsatz der verschiedenen Abfälle	900-1200 °C	(1200-1400 °C)
Sauerstoffgehalt der Rauchgase	mindestens 6 %	
Verweilzeit der Rauchgase	ca. 4 s	(4 - 6 s)
Re-Zahl	50000 bis 60000	
Gasgeschwindigkeit	2 - 5 m/s	(2 -4 m/s)
Querschnittsbelastung	4 - 6 GJ/m <sup>2</sup> h	(4 - 6 GJ/m <sup>2</sup> h)
Volumenbelastung	0,4 - 1,2 GJ/m <sup>3</sup> h	(0,4 - 1,2 GJ/m <sup>3</sup> h)

In der Literatur werden auch an anderen Stellen Temperaturen für die Nachbrennkammer angegeben, die in dem oben genannten Bereich liegen. Für die neuen Sondermüllverbrennungsanlagen in Ebenhausen wurde bei der Auslegung ein Temperaturbereich von 900 bis 1400 °C geplant. Die Dauerlasttemperatur beträgt zunächst 1200 °C und soll auf 1050 °C abgesenkt werden. Für diese Maßnahme muß jedoch nachgewiesen werden, daß sich dadurch die Emissionen von Dioxinen, Furanen und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen nicht erhöht [Fürmaier].

Genauere Angaben über die Temperaturen in der Nachbrennkammer findet man in Form einer Temperaturverteilung über den Nachbrennkammerquerschnitt in [Hasberg-2]. Dort ist die Temperaturverteilung für den Ofen 6 der BASF AG über einen Querschnitt am oberen Ende der Nachbrennkammer angegeben. Danach liegen die Temperaturen bei ca.  $1100 \pm 50$  °C [Seifert-3].

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

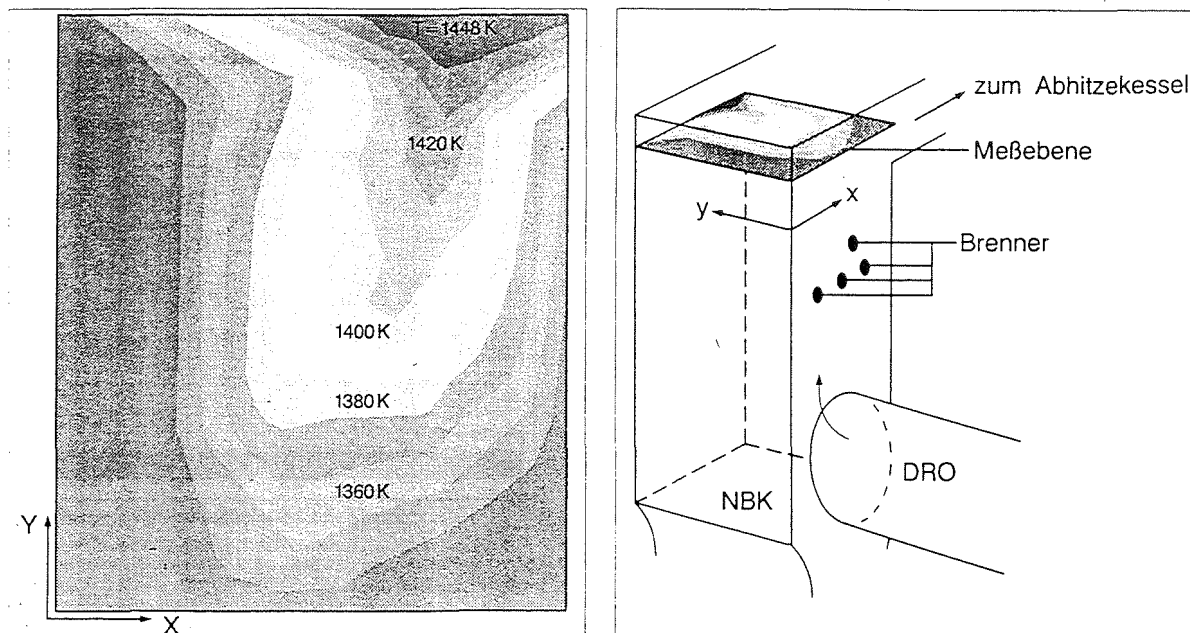


Abb. 6.19: Temperaturverteilung am Austritt der Nachbrennkammer der BASF-Ofenlinie 6 [Hasberg-2]

An anderer Stelle [Seifert-3] wird ebenfalls über Temperaturprofile in der Nachbrennkammer dieses Ofens berichtet.

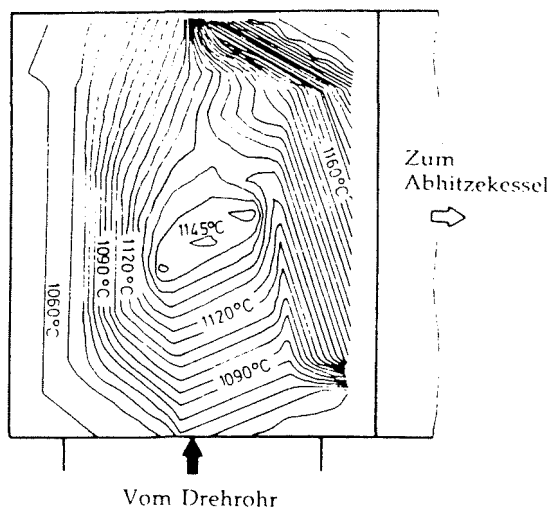


Abb. 6.20: Temperaturverteilung in der Nachbrennkammer der BASF-Ofenlinie 6 [Seifert-3]

Vergleicht man die beiden Abbildungen 6.19 und 6.20, so sind deutliche Unterschiede festzustellen. Die Abbildung 6.19 zeigt im Gegensatz zur Abbildung 6.20 eine unsymmetrische

Temperaturverteilung über den Querschnitt. Wie aus Abb. 6.19 hervorgeht, wurde die entsprechende Temperaturverteilung am oberen Ende der Nachbrennkammer untersucht. Es ist vorstellbar, daß die Temperaturverteilung in Abb. 6.20 auf einer tieferen Meßebe in der Nachbrennkammer bestimmt worden ist.

Die in Tabelle 6.8 angegebene Größenordnung der Verweilzeit der Rauchgase in der Nachbrennkammer wird an anderen Stellen in der Literatur bestätigt. Es werden ca. 5 s [Dillon] genannt; eine Verweilzeit von 4 s wird in der Regel nicht überschritten [Comfère]. Nach Erbach-4] ist aus Erfahrungswerten bekannt, daß bei 900 °C und einer Verweilzeit von 4 bis 5 s alle organischen Schadstoffe, einschließlich thermisch sehr stabiler Verbindungen wie polychlorierte Biphenyle, zersetzt werden. [Schöner-3] nennt für die Verweilzeit in der Nachbrennkammer 2 bis 4 s. Nach [Thomé-K.-1] ist eine Mindestverweilzeit von 5 s bei 800 °C erforderlich. Die Abmessungen der Nachbrennkammer ergeben sich nach [Meininger] aus der Forderung nach einer Verweilzeit von 4 s in der Nachverbrennungszone. In [Schneider] wird eine Verweilzeit von mindestens 3 s in der Nachbrennzone genannt.

### 6.5. Vorgänge in der Nachbrennkammer

#### 6.5.1. Verbrennungsreaktionen in der Nachbrennkammer

In der Nachbrennkammer sollen die Kohlenwasserstoffe zerstört und die Rauchgaspartikel vollständig ausgebrannt werden. Für eine Beseitigung dieser Schadstoffe ist sowohl die Reaktionskinetik von organischen Molekülen in der Gasphase als auch das Abbrandverhalten von Tropfen und Feststoffpartikeln von Bedeutung. Eine vollständige Zersetzung der Kohlenwasserstoffe ist der wichtigste Faktor zur Vermeidung der de-Novo-Synthese von Dioxinen [Vollhardt-2]. Genauere Informationen zu der de-Novo-Synthese findet man z.B. in [Vogg-2], [Vogg-3] u. [Vogg-4].

In den Publikationen zur Thematik der Sondermüllverbrennung werden die oben genannten Vorgänge an einigen relevanten Beispielverbindungen diskutiert, wobei die konkreten Daten



## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

und Meßwerte oft der Literatur entnommen werden. Im Folgenden werden die in [Hasberg-2] u. [Hasberg-1] diskutierten Vorgänge zusammengefaßt.

Danach ergibt sich aus verschiedenen Laboruntersuchungen zur thermischen Stabilität von organischen Verbindungen in der Gasphase, daß ein Großteil dieser Stoffe bei Temperaturen unterhalb 700 °C mit Verweilzeiten von 2 s zerstört werden. Chlorierte Substanzen wie Hexachlorbenzol, Dioxine oder Tetrachlorkohlenstoff erfordern dagegen Temperaturen von 950 bis 1000 °C bei einer Verweilzeit von 0,5 s [Hasberg-2]. Es ist zu beachten, daß für Methan ebenfalls diese hohen Temperaturen erforderlich sind. Die Effizienz der Zerstörung in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt die folgende Abbildung.

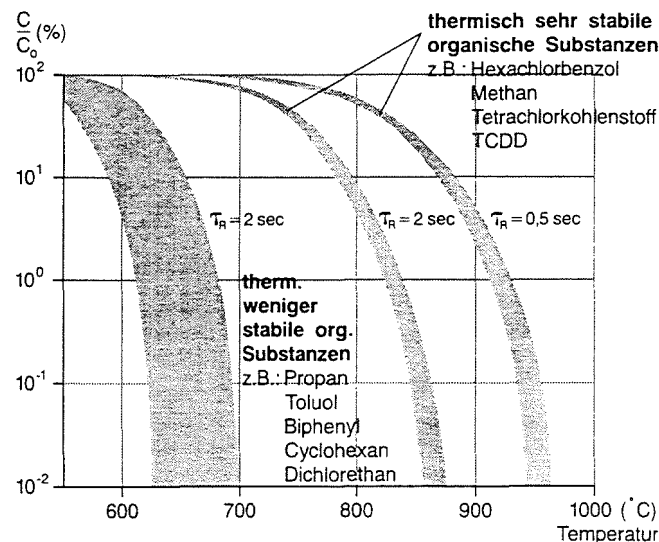


Abb. 6.21: Thermische Zerstörbarkeit von organischen Substanzen in Luft [Hasberg-2]

Aus dieser Abbildung ist auch zu erkennen, daß im Fall längerer Verweilzeiten für die sehr stabilen organischen Substanzen geringere Temperaturen ausreichend sind. Wird die Verweilzeit von 0,5 auf 2 s erhöht, so kann die Temperatur um etwa 100 °C gesenkt werden.

Bei der Verbrennung von polychlorierten Biphenylen können neue Schadstoffe gebildet werden. Bei Temperaturen oberhalb 750 °C werden Dibenzofurane gebildet. Erst bei Temperaturen von ca. 1000 °C werden die PCB und PCDF zerstört.

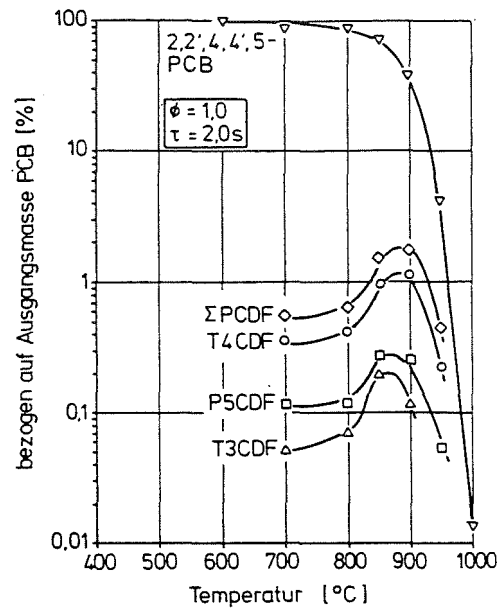


Abb. 6.22: PCB-Zerstörung und PCDF-Bildung in der Gasphase [Hasberg-1]

Der vollständige Ausbrand von kohlenstoffhaltigen Partikeln in der Nachbrennkammer ist ein weiteres Anliegen. Die Geschwindigkeit dieses Partikelabbrandes kann durch den Sauerstofftransport zur Oberfläche der Partikel oder durch die eigentliche Verbrennungsreaktion bestimmt werden. Eine Bedeutung der Partikeleigenschaften zeigt sich an dem im Vergleich zur Verbrennung von Rußteilchen 100 mal schnelleren Koksabbrand [Hasberg-3].

Der Zeitraum für die Verbrennung hängt auch von den Partikelabmessungen ab. [Hasberg-2] gibt in einem Diagramm für die Größenverteilung von Partikeln Meßwerte an, die an einer Rückstandsverbrennungsanlage der BASF AG ermittelt worden sind.

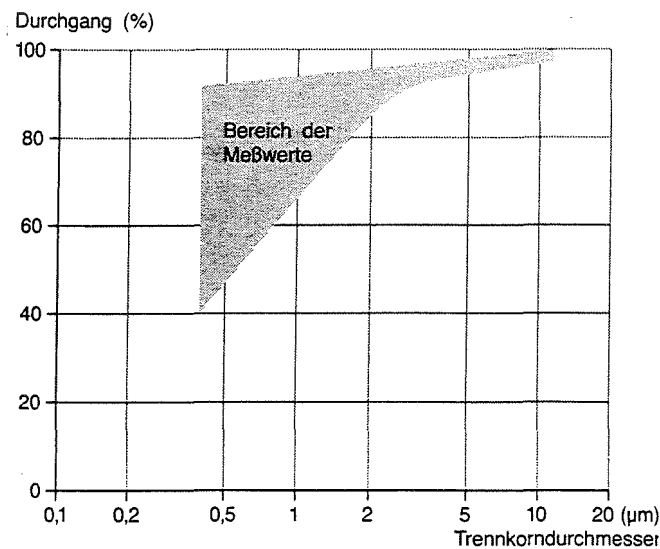


Abb. 6.23: Korngrößenverteilung des Flugstaubs in der Nachbrennkammer [Hasberg-2]

Danach haben die größten Teilchen einen Durchmesser von 10 µm. Etwa 90 % der Teilchen sind kleiner als 2 bis 3 µm. Für die Ausbrennzeit wird in [Hasberg-2] angegeben, daß bei 1000 °C alle Kohlenstoffpartikel mit einem Durchmesser bis 10 µm nach ca. 1 s ausgebrannt sind

In [Hasberg-3] wird auf die Verbrennungsprozesse und entsprechende mathematische Ansätze für verschiedene Verbrennungsvorgänge eingegangen. Die entsprechenden Informationen sind teilweise der Literatur entnommen und werden an dieser Stelle nicht weiter beschrieben. Außerdem treten zwischen den Meßergebnissen aus verschiedenen Laboratorien größere Abweichungen auf [Hasberg-2] [Hasberg-3]. Die angegebenen Zahlenwerte spiegeln folglich nur die Größenordnungen für die verschiedenen Parameter wie Verweilzeit oder Temperatur wider.

Nach [Hasberg-2] müßten bei Temperaturen von 950 bis 1000 °C und Verweilzeiten von 1 bis 2 s alle chlorierten Substanzen zerstört und Partikel ausgebrannt werden können. Dieser Zeitraum wird von [Vollhardt-3] bestätigt. Weitere Informationen zu den chemischen Vorgängen findet man bei [Kolb-2].

Für Vorgänge in der Gasphase und über mögliche Reaktionswege von Dioxinen liegen noch weitere Informationen vor, die von [Dransfeld] zusammengestellt wurde. In der Arbeit, die auch ein umfangreiches Literaturverzeichnis enthält, wird auf die Kinetik verschiedener Prozesse näher eingegangen.

Die hier vorgestellten Erläuterungen über Verbrennungsreaktionen in der Nachbrennkammer zeigen, daß für die Prozesse dort relativ genaue Informationen vorliegen. Dies gilt insbesondere für das Verhalten von Dioxinen und Furanen. Damit existieren für die Vorgänge in der Nachbrennkammer sehr genaue Erkenntnisse. Auf eine genaue Diskussion und Angabe der mathematischen Formeln wird verzichtet und auf die entsprechende Originalliteratur z.B. in [Hasberg-1] u. [Hasberg-3] verwiesen. Im Gegensatz dazu stehen über das Abbrandverhalten der festen Abfälle im Drehrohr nur unzureichende Informationen zu Verfügung (Siehe oben im Text).

### 6.5.2. Mischungsvorgänge und Verweilzeiten in der Nachbrennkammer

Aus den beiden letzten Kapiteln ergibt sich ein Widerspruch in Hinblick auf die Verweilzeit. Während bei Technischen Anlagen die Verweilzeiten bei etwa 4 s liegen, (Kapitel 6.4.) führte eine genauere Betrachtung der Zersetzungsvorgänge im Labor zu wesentlich kürzeren Verweilzeiten (Kapitel 6.5.1.). Das Auftreten von Schadstoffen bei realen Verbrennungsprozessen, die die oben genannten Anforderungen erfüllen oder deutlich überschreiten, sind nach [Hasberg-2] auf Probleme bei der Vermischung von Brennstoff und Sauerstoff zurückzuführen.

Wie bei jedem Verbrennungsprozeß müssen auch in der Nachbrennkammer die Rauchgase als Brennstoff mit dem Sauerstoff vermischt werden. Daneben wird eine Verbrennungsreaktion wie alle anderen Reaktionen durch die Verweilzeit der Reaktanden im Reaktor und die Temperatur beeinflusst. Im folgenden Text wird zunächst auf die Mischungsvorgänge eingegangen und anschließend das Verweilzeitverhalten diskutiert.

In der chemischen Reaktionstechnik tritt neben dem Begriff der "Vermischung" zweier Fluide auch die Vorstellung von einem "Mischungszustand" für ein Fluid auf. Diese sehr ähnlichen Begriffe haben sehr unterschiedliche Bedeutungen.

Der "Mischungszustand" beschreibt Eigenschaften eines Fluids. Für den Begriff "Mischungszustand" wird oft auch nur von "Mischung" gesprochen. Es sind dabei Makro- und Mikromischungen zu unterscheiden. Mit der gleichen Bedeutung werden auch die Bezeichnungen "Makrofluid" und "Mikrofluid" verwendet.

Im Fall des Makrofluids liegen in der fluiden Phase keine einzelnen Moleküle, sondern Molekülaggregate vor, die aus  $10^{10}$  bis  $10^{12}$  Molekülen bestehen können. Die einzelnen Moleküle können sich nur innerhalb dieser Aggregate mischen (und reagieren). Es entstehen örtliche Konzentrationsdifferenzen. Dieser Zustand wird auch als Segregation bezeichnet. Bei einem Mikrofluid hingegen erfolgt eine Vermischung der Moleküle in der Reaktionsmasse bis in die molekularen Bereiche. Örtliche Inhomogenitäten in den Konzentrationen treten in einem Mikrofluid nicht auf.

Flüssigkeiten mit geringen Viskositäten und Gase, ausgenommen Flammen (zähe Gase), sind allgemein in die Gruppe der Mikrofluide einzuordnen [Baerns]. In der Nachbrennzone dürfte folglich ein im molekularen Bereich vermishtes Mikrofluid (ohne Segregation) vorliegen.

Der Begriff der "Vermischung" bezieht sich dagegen auf die Gleichverteilung von verschiedenen Stoffströmen in einem Reaktor. Nach [Vauk] können auch Mischprozesse in zwei Gruppen eingeteilt werden. Der Vorgang des "Makromischens" erfasst die Verteilung der verschiedenen Stoffströme mit Hilfe von Rührwerkzeugen in Schlieren oder Wirbel. Als "Mikromischen" sind dagegen die Vermischungsvorgänge im molekularen Bereich zu verstehen.

In der Literatur erfolgt allerdings keine deutliche und getrennte Anwendung dieser Begriffe. In [Vollhardt-3] unterscheidet man zwischen einer "turbulenten Makro-Vermischung" vor der Nachverbrennungszone und einer anschließenden "mikroturbulenten und molekularen Verbrennungsgas-Homogenisierung" in der Nachbrennzone. Die "turbulente Makro-

Vermischung" beschreibt danach Mischvorgänge in der Brenn-/Mischzone der Nachbrennkammer mit den Brennern als Mischwerkzeugen. Der zweite Begriff umfaßt vermutlich die Vorgänge der Mikrovermischung durch Diffusion in der Nachverbrennungszone.

Auf die genauen strömungstechnischen Vorgänge in der Nachbrennkammer zur Vermischung der verschiedenen Gasströme soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Es muß allerdings festgehalten werden, daß für einen guten Ausbrand der Rauchgase eine gute Durchmischung der verschiedenen Gasströme in der Nachbrennkammer extrem wichtig ist. (Siehe z.B. [Hünig], [Vollhardt-1], [Franke-1], [Comfère] u. [Thomé-K.-1]). Eine strähnenfreie und homogene Mischung der verschiedenen Gasströme ist danach für eine erfolgreiche Nachverbrennung geboten. Nach [VDI 3640] ist neben der Temperatur, dem Sauerstoffgehalt und der Verweilzeit die Vermischung als ein wesentlicher Parameter für die Ausbrandqualität anerkannt.

Nach der Vermischung in der Brennerzone erfolgt die eigentliche Reaktion in der Ausbrennzone der Nachbrennkammer. Es ist die Frage zu stellen, wie der "Reaktor Nachbrennzone" genau funktioniert. Damit verbunden ist zunächst die Frage nach dem grundsätzlichen Reaktortyp, der der Nachbrennzone zugrunde gelegt werden kann. Mit dem Reaktortyp verbunden ist auch das Problem der Verweilzeitverteilung. Aus der Reaktionstechnik sind hier zwei Reaktoren als idealisierte Grenzfälle zu betrachten:

Der Plug-Flow-Reaktor (PFR) ist ein Rohrreaktor, der eine Kolbenströmung realisiert. Die Strömungsgeschwindigkeit ist über den gesamten Rohrquerschnitt konstant, so daß alle Fluidelemente die gleiche Verweilzeit im Reaktor haben. Dieser Reaktor wird auch als ein ideales Strömungsrohr bezeichnet.

Der Continuous Stirred Tank Reaktor (CSTR) ist ein Rührkessel, der als ideal durchmischt angesehen wird. Die in den CSTR einfließenden Reaktanden werden sofort vollständig mit dem Reaktorinhalt durchmischt. Die Konzentrationen der verschiedenen Komponenten im Reaktor sind mit den Konzentrationen am Reaktorausgang identisch. In der Literatur werden auch die Bezeichnungen idealer Rührkessel oder Well-Stirred-Reaktor (WSR) verwendet.

## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

---

Diese beiden Reaktoren lassen sich mit dem axialen Dispersionskoeffizienten  $D_{AX}$  und der Bodensteinzahl  $Bo$  näher beschreiben. Der Dispersionskoeffizient berücksichtigt drei verschiedene Effekte:

- konvektive Vermischung durch Turbulenz und Verwirbelung
- verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten im Reaktor
- molekulare Diffusionsvorgänge

Der Dispersionskoeffizient  $D_{AX}$ , der diese Vorgänge charakterisiert, ist danach mit dem Diffusionskoeffizienten  $D$  nicht identisch, obwohl er die gleiche Dimension ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) hat. Neben der eigentlichen Diffusion erfaßt der Dispersionskoeffizient noch weitere Transportmechanismen, so daß  $D_{AX}$  wesentlich größere Werte annehmen kann als  $D$ .

Die Bodensteinzahl  $Bo$  ist eine dimensionslose Kennzahl und dient zur Beschreibung des Mischungsverhaltens von Reaktoren. Sie ist definiert als:

$$Bo = \frac{uL}{D_{AX}}$$

In dieser Gleichung bezeichnet  $u$  die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids,  $L$  den Strömungsweg und  $D_{AX}$  den Dispersionskoeffizienten. Für die beiden Modellreaktoren ergeben sich die folgenden Werte für die Bodensteinzahl:

PFR:	$Bo$	=	unendlich
CSTR:	$Bo$	=	0

Das ideale Strömungrohr (PFR) und der ideale Rührkessel (CSTR) stellen ideale Modellreaktoren dar. Reaktoren in der Technik zeigen in Ihrem Verhalten immer Abweichungen von diesen idealisierten Reaktoren, denn das Mischungsverhalten realer Reaktoren liegt zwischen diesen beiden Modellen. Für kinetische Berechnungen und grundlegende Betrachtungen zur Auslegung sind diese Modelle allerdings sehr wichtig.

Ein Vergleich der beiden idealisierten Reaktortypen für die gleiche Reaktion unter identischen Betriebsbedingungen zeigt, daß mit einem PFR höhere Umsätze erzielt werden [Fitzer]. Diese Eigenschaft des idealen Rohrreaktors läßt sich mit den folgenden Abbildungen belegen:

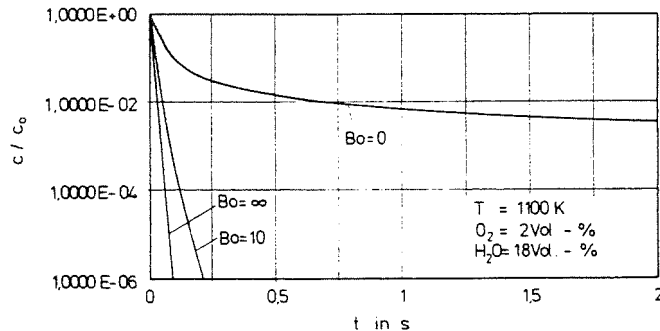


Abb. 6.24: Abhängigkeit des CO-Abbaus von der mittleren Verweilzeit und dem Mischungsverhalten des Reaktors [Scholz-2]

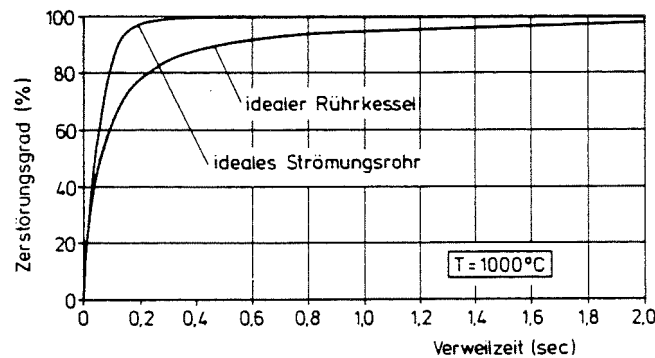


Abb.: 6.25: Thermische Zersetzung von TCDD im idealen Strömungsrohr und im idealen Rührkessel [Hasberg-3]

Sowohl für die Oxidation von CO als auch für die Zerstörung des Dioxins sind die erforderlichen Verweilzeiten bei gleichem Umsatz im Fall des idealen Strömungsrohres deutlich geringer. Dieser Sachverhalt macht es verständlich, daß bei der Auslegung der Anlage für die Nachbrennzone der Charakter eines idealen Strömungsrohres angestrebt wird [Hasberg-3] [Scholz-2].

Die Strömungsverhältnisse im idealen Strömungsrohr können allerdings in einem realen Reaktor nicht erreicht werden. Bei realen Rohrströmungen hat man zwischen einer laminaren und einer turbulenten Strömung zu unterscheiden. Die folgende Abbildung enthält die



## 6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen

---

Geschwindigkeitsprofile der beiden Strömungsarten im Vergleich mit der Kolbenströmung des idealen Strömungsrohres.

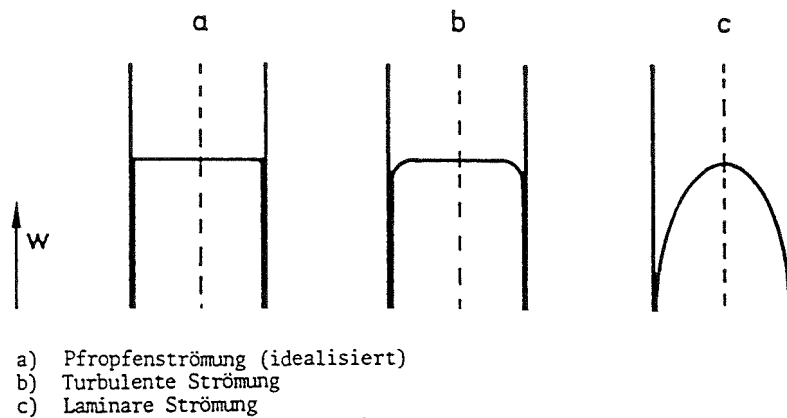


Abb. 6.26: Profile verschiedener Strömungen

Das Geschwindigkeitsprofil für die laminare Strömung zeigt danach größere Abweichungen von der angestrebten Kolbenströmung als die turbulente Rohrströmung. Die verschiedenen Flüssigkeitsschichten der laminaren Strömung bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch das Rohr, so daß sehr unterschiedliche Verweilzeiten für die einzelnen Schichten resultieren.

Der Zustand einer Rohrströmung wird durch die dimensionslose Reynolds-Kennzahl ( $Re$ ) beschrieben. Für Werte unterhalb von 2320 ist die Strömung laminar, für größere Werte ist die Strömung turbulent. Die  $Re$ -Zahl ist definiert als:

$$Re = \frac{u d \rho}{\eta}$$

In dieser Gleichung beschreiben  $u$  die Strömungsgeschwindigkeit,  $d$  den Rohrdurchmesser,  $\rho$  die Dichte des Fluids und  $\eta$  die dynamische Viskosität des Fluids. Die in der Literatur angegebenen Werte für die Reynolds-Kennzahl weisen für die Nachbrennkammer eine turbulente Strömung aus:

Tabelle 6.9: Reynoldszahlen für die Nachbrennkammer

[Hasberg-2] [Hasberg-3]	$10^5$ bis $10^6$
[Vollhardt-3]	50.000 bis 80.000

Bei der Kolbenströmung des idealisierten Strömungsrohres war davon ausgegangen worden, daß alle Fluidelemente die gleiche Verweilzeit im Reaktor aufweisen. Wie das Strömungsprofil der turbulenten Strömung in Abbildung 6.26 zeigt, bewegt sich das zähe Gas an den Wandungen mit geringerer Geschwindigkeit. Außerdem entsteht in der Nachbrennkammer durch die Ausrichtung der Brenner eine verdrallte Strömung, deren Strömungsprofil von der Darstellung in Abbildung 6.26 Abweichungen zeigen dürfte.

Diese Eigenschaften der Strömung in der Nachbrennkammer führen dazu, daß keine feste Verweilzeit für die Fluidelemente vorliegt, sondern eine Verweilzeitverteilung. Die mittlere Verweilzeit eines Reaktors, die sich aus dem Reaktorvolumen und der Strömungsgeschwindigkeit ergibt, reicht für eine genauere Beschreibung von technischen Reaktoren in der Regel nicht aus [Hasberg-3].

Über eine Möglichkeit zur Messung von Verweilzeiten mit Radioisotopen berichtet [Seher]. Die Arbeit enthält eine Einführung in diese spezielle Meßtechnik und drei Anwendungsbeispiele. Im Fall der Sondermüllverbrennung wurden Messungen an einer älteren Anlage der BASF AG durchgeführt. Aufgrund der angegebenen Maße des Drehrohres handelt es sich um den Ofen 3,4 oder 5 (Siehe Tabelle 6.2). Zur Markierung der Rauchgase wurde an der Drehrohrstirnwand Argon-41 zugeführt. Für die Messung der Verweilzeitverteilung waren in der Anlage 8 Detektoren installiert, deren Position aus einer Zeichnung in [Seher] zu entnehmen ist. Für den Verbrennungsteil der Anlage aus Drehrohr und Nachbrennkammer ergab sich eine mittlere Verweilzeit von 7 s. An einer anderen Stelle findet man in der Literatur einen Wert von 8 bis 10 s angegeben [Hasberg-1]. Die folgende Abbildung zeigt die zeitlichen Tracerverteilungen am Ein- und Austritt der Nachbrennkammer.

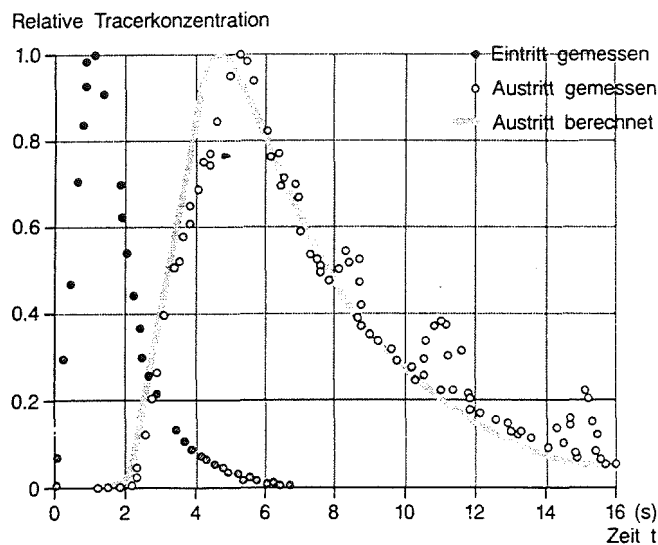


Abb. 6.27: Tracerverteilungen am Eintritt am Austritt der Nachbrennkammer für den Ofen 6 der BASF AG [Hasberg-2]

Nach Abbildung 6.27 liegt die mittlere Verweilzeit für die Nachbrennkammer bei 4,5 bis 5 s. Dieser Wert ist für Nachbrennkammern typisch und wird von vielen Autoren in der Literatur angeführt (Siehe Kapitel 6.4.). Die Übereinstimmung zwischen dem Experiment und der Berechnung ist relativ gut. Die minimale Verweilzeit beträgt allerdings nur 2 s und liegt damit im Bereich der Zeiten, die für die Verbrennung der Schadstoffe im Labormaßstab erforderlich waren (Siehe Kapitel 6.5.1.).

Eine weitere interessante Aussage ergibt sich aus dem Vergleich der mittleren Verweilzeiten, die für die komplette Anlage und für die Nachbrennkammer gemessen worden sind. Danach beträgt die mittlere Verweilzeit der Gase im Drehrohr 2 bis 3 s. Dieser Wert wird aber nur erreicht, wenn die Gase an der Stirnwand in das Drehrohr eintreten. Werden die Gase erst in den mittleren Bereichen des Drehrohres freigesetzt, so ist die Verweilzeit deutlich kürzer. Ein vollständiger Ausbrand ist dann aufgrund der zu geringen Verweilzeit nicht mehr möglich.

### 6.5.3. Strömungsmodelle für die Nachbrennkammer

Aus den vorangegangenen Kapiteln ergibt sich, daß die Auslegung einer Nachbrennkammer mit den komplizierten Strömungsverhältnissen eine sehr anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Für die Konstruktion oder Optimierung werden daher Strömungsversuche und Modellrechnungen durchgeführt.

In [Williams] werden Experimente an einem Plexiglasmodell für eine Nachbrennkammer erläutert. Die Abmessungen des Modells betragen  $1/6$  der technischen Anlage. Eine Optimierung der Nachbrennkammerform auf diesem Weg wird auch von [Thomé-K.-1] erwähnt.

In [Seifert-3] werden isotherme Modellversuche und Modellrechnungen für runde und eckige Nachbrennkammerformen erwähnt. Außerdem wurden verschiedene Brenneranordnungen untersucht. Das Verweilzeitspektrum wurde an verschiedenen Plexiglasmodellen im Maßstab 1:10 mit einem radioaktiven Tracergas (Ar-41) gemessen. Für die mathematische Behandlung der Probleme erfolgt der Einsatz des Programmsystems PHOENICS (Cham Ltd., London). Mit dem isothermen Rechenmodell konnten die gemessenen Verweilzeiten mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben werden.

Auch in einer neueren Arbeit [Straßburger] wird über Messungen an einem Modell im Maßstab 1:10 berichtet. Aus der folgenden Abbildung ist ein Vergleich zwischen der berechneten und gemessenen Grundströmung in der Nachbrennkammer zu entnehmen.

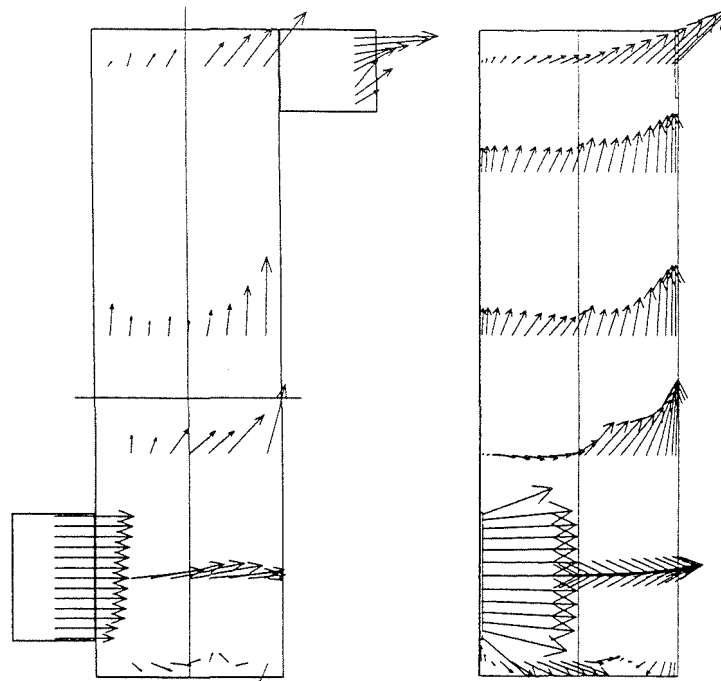


Abb. 6.28: Gemessene und berechnete Grundströmung in der Nachbrennkammer [Straßburger]

Als Ergebnis aus den Modellbetrachtungen und Berechnungen wird in [Seifert-3] festgestellt, daß eine runde Nachbrennkammer gegenüber einem eckigen Grundriß Vorteile aufweist. Das beste Resultat ergibt sich für eine schlanke Nachbrennkammer, deren Länge etwa dreimal so groß wie der Durchmesser ist. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Anlagen 7 und später 8 der BASF mit runden Nachbrennkammern gebaut [Joschek-1]. Nach Angaben von [Schneider] werden auch die neuen Anlagen von der Fa. Babcock aufgrund stömungstechnischer Vorteile mit rundem Grundriß und ohne Einschnürung gebaut.

Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu einer Aussage aus [Kubisa-3]. Nach Aussage der Autoren ist Strömungsmodellen und Verweilzeitexperimenten an ausgeführten Anlagen zu entnehmen, daß beide Bauformen über alle Betriebszustände betrachtet als verfahrenstechnisch gleichwertig zu beurteilen sind.

Die unterschiedlichen Ergebnisse aus den Betrachtungen von [Seifert-3] (1989) und den Angaben von [Kubisa-3] (1989) zeigen, daß die Vorgänge in der Nachbrennkammer noch

## **6. Konstruktion und Auslegung von Drehrohranlagen**

---

nicht vollständig beschrieben werden können. Nach einem Bericht von 1990 [Klauer] müssen die Modelle der BASF AG zur Auslegung der Nachbrennkammer weiterentwickelt werden.

Auch wenn durch die heute zur Verfügung stehenden Modelle noch kein exaktes Verständnis aller Prozesse in der Nachbrennkammer gelingt, so ergeben sich dennoch Vorteile für Nachbrennkammern mit rundem Grundriß. Bei Planungen neuer Verbrennungsanlagen werden heute in der Regel runde Nachbrennkammern vorgesehen.

### 7. Betrieb von Sonderabfallverbrennungsanlagen (SVA)

#### 7.1. Einförderung der Abfälle

Der Abfalleintrag in eine Drehrohranlage kann entweder in das Drehrohr (alle Abfallarten) oder in die Nachbrennkammer (nur Flüssigkeiten) erfolgen. Für die Einförderung der Abfälle, die in verschiedenen Aggregatzuständen und sehr unterschiedlichen Konsistenzen vorliegen, existieren verschiedene Verfahren und Einrichtungen.

Die Art und Weise der Abfallaufarbeitung und der Aufgabe beeinflussen die Emissionen der Verbrennungsanlage [Hasberg-3]. Mit einer guten Durchmischung und kontinuierlichen Aufgabe der Abfälle in das Drehrohr kann eine Minimierung der Dioxin- und Furanbildung erreicht werden [Vollhardt-2]. Nach [Thomé-K.-1] ist für einen störungsfreien Betrieb eines Drehrohrofens eine gleichmäßige Abfalldosierung erforderlich.

Flüssige und pastöse Reststoffe werden dem Drehrohr über Düsen, Brenner oder Lanzen zugeführt. Die Zerstäubung erfolgt mit Luft, Stickstoff oder Dampf. Auch eine Zerstäubung mit Ultraschall wird erwähnt [Kamelreiter].

Nach [Vollhardt-1] können Druckzerstäuber als Brenner eingesetzt werden, während Rotationszerstäuber weniger geeignet sind. Konstruktionszeichnungen für Brenner findet man z.B. in [Thomé-K.-1] und [Seifert-3]. Die Brennerkonstruktion beeinflusst die  $\text{NO}_x$ -Bildung entscheidend, so daß dieses Bauteil auf die Emissionen der Anlage große Auswirkungen hat.

Ein interessantes Beispiel für einen Zusatzbrennstoff wird in [NN-1] erwähnt. In der SVA Schöneiche kann das Deponiegas der nahegelegenen Deponie zur Einhaltung der hohen Verbrennungstemperaturen genutzt werden.

Die Verbrennung von Abfällen mit niedrigem Heizwert erfolgt in sogenannten Mehrstoffbrennern. Diese speziellen Brenner werden sowohl im Drehrohr als auch in der Nachbrennkammer eingebaut. Die Abfälle werden zusammen mit Heizöl oder einem heizwertreichen Abfall aufgegeben. Auch bei diesen Brennern wird Dampf oder Preßluft zur Zerstäubung eingesetzt

[Vollhardt-1]. Einen kurzen Vergleich verschiedener Mehrstoffbrenner für flüssige Abfälle mit geringem Heizwert findet man in [Steinebrunner]. Es zeigt sich, daß ein speziell konstruierter "Flammenverdampfungsbrenner" eine bessere Leistung erreicht als ein entsprechend der Aufgabenstellung angepaßter Gasbrenner.

Mit Hilfe sogenannter Dickstoffanlagen werden pastöse Abfälle in das Drehrohr eingefördert. In den Abfällen können Feststoffpartikel bis zu einem Durchmesser von 20 mm enthalten sein, ohne daß eine Filtration erforderlich ist [Vollhardt-1].

Im folgenden Text werden weitere Schwerpunkte zur Thematik der Einföderung in einzelnen Kapiteln zusammengefaßt. Die entsprechenden Einrichtungen werden in der Literatur meist nur im Text beschrieben, ohne daß Zeichnungen oder Betriebsdaten angegeben werden.

### 7.1.1. Verwendung von Pumpen

Für die Einföderung von flüssigen Abfällen werden allgemein Pumpen eingesetzt. In der Literatur sind nur sehr wenige Informationen über die verwendbaren Pumpentypen angeführt. [VDI 3640], [Vollhardt-1] u. [Kubisa-3] enthalten keine Hinweise auf die einsetzbaren Pumpentypen. Bei der BASF AG wird für schlammförmige Abfälle eine hydraulisch angetriebene Doppelkolbenpumpe eingesetzt [Kolb-1].

In den Anlagen der Hessischen Industriemüll GmbH in Biebesheim hat man anfängliche Schwierigkeiten mit den abfallfördernden Pumpen gelöst [Erbach-2]. Danach haben sich druckluftbetriebene Membranpumpen und hydraulisch betriebene Kolbenpumpen am besten bewährt. Die Bezeichnung "hydraulisch betriebene Kolbenpumpe" ist in diesem Zusammenhang etwas irreführend, denn es kann entweder eine normale Kolbenpumpe (Siehe z.B. [Vauk]) oder eine Dickstoffpumpe (Siehe Kapitel 7.1.2) gemeint sein.

Nach [Thomé-K.-1] bilden Schrägrotorpumpen eine weitere Möglichkeit zur Aufgabe von zähflüssigen Abfällen. Kleine Festkörper im Medium führen hier zu keinen Beschädigungen in der Mechanik der Pumpe.



### 7.1.2. Dickstoffpumpen

Mit Dickstoffpumpen können Schlämme höherer Viskosität über die Stirnwand dem Drehrohrofen zugeführt und über Dickstoffbrenner verbrannt werden [Comfère]. Dickstoffpumpen besitzen den entscheidenden Vorteil, daß sie auch sehr zähflüssige Abfälle gleichmäßig befördern können. Sie arbeiten nach dem Verdrängerprinzip und können auch stichfeste, tixotrope Schlämme mit einem Feststoffanteil von bis zu 50 % fördern. Die maximalen Förderdrücke betragen bis 120 bar. Der Volumenstrom kann Werte bis zu 250 m<sup>3</sup>/h, der maximale Partikeldurchmesser bis zu 80 mm betragen [Schuster].

Über die Anwendung von Dickstoffpumpen in der französischen Sondermüllverbrennungsanlage in Salaise (südl. Lyon) wird in [NN-3] berichtet. Durch die Anwendung dieser speziellen Pumpen ließ sich eine gleichmäßige Einföderung des Abfalls in den Drehrohrofen erreichen, so daß in den Emissionsmeßwerten die Schwankungsbreiten deutlich reduziert wurden. Die Temperatur im Drehrohrofen wird über den Flüssigkeitsanteil im Abfall gesteuert. Durch den Einbau der Dickstoffpumpen konnte die Verbrennungskapazität gesteigert werden. Zusätzlich wurde die Schlackenqualität positiv beeinflusst, denn es konnten keine unverbrannten Bestandteile mehr nachgewiesen werden.

Die gute Qualität der Schlacke ist vermutlich auf die Aufbereitung des Abfalls mit Rotorscheeren zurückzuführen. Diese Zerkleinerung und die anschließende Mischung mit brennbaren, flüssigen Abfällen dürfte die Verbrennung positiv beeinflussen. Daneben werden in [NN-3] für den Einsatz von Dickstoffpumpen weitere Vorteile angegeben:

- durch abgeschlossenes Rohrsystem kein Materialverlust und keine Gasemissionen
- individuelle Anpassung der Förderstrecke
- geringer Verschleiß

Bei der Hessischen Industriemüll GmbH in Biebesheim werden bei den ersten beiden Verbrennungsstraßen Dickstoffpumpen zur Förderung pastöser Abfälle von einem Vorratssilo in die Drehrohre eingesetzt [Erbach-5]. Die Verwendung einer Dickstoffpumpe war auch für die dritte Verbrennungsstraße vorgesehen [Erbach-5]. Die Annahme und Lagerung der pastösen Abfälle soll in einem geschlossenen, stickstoffüberlagerten System erfolgen. Mit der

Dickstoffpumpe werden dann die Abfälle direkt in das Drehrohr eingefördert. Weitere Anwendungsbeispiele in Abfallverbrennungsanlagen sind in [Schuster] aufgeführt, weitere Informationen über Dickstoffpumpen findet man in [Vetter].

### **7.1.3. Einlaufschurre**

Die Einlaufschurre dient u.a. zur Aufgabe von Gebinden und Fässern und stellt das empfindlichste Aufgabesystem dar [Thomé-K.-1]. Durch die thermische Beanspruchung und die Aufgabe der Abfälle kommt es zu verschiedenen Verschleißerscheinungen. Bei mehreren technischen Anlagen wird die Einlaufschurre mit Wasser gekühlt, soweit sie sich im Drehrohr befindet.

### **7.1.4. Shredderanlagen**

Gebinde, auch mit brennbaren Inhaltsstoffen, können in Shredderanlagen zerkleinert werden. Durch eine Schutzgasatmosphäre und geeignete Materialien (z.B. Bronze) können Brände Explosionen vermieden werden. Mit Hilfe einer Stopfschnecke kann dann eine gleichmäßige Beschickung des Drehrohrofens erfolgen [Piechura]. Ein ähnliches System wird bei der BASF AG geplant [Joschek-1].

Die Abfallgesellschaft Ruhr (AGR) hat einen speziellen Shredder entwickelt, der mit einer Stickstoff-Schutzgasatmosphäre bei 5-6 bar betrieben wird [Winkler]. Diese Anlage wird für die Aufbereitung von Spraydosen aus privaten Haushalten eingesetzt, die bei der Sonderabfallverbrennung ein Problem darstellen. Explosive Treibgase wie Propan und Butan, die als Ersatz für die ozonschichtschädigenden FCKW eingesetzt werden, können kritische Verpuffungen verursachen.

### **7.1.5. Förderschnecken**

Der Einsatz von Förderschnecken ist als eine weitere Möglichkeit zur Förderung von Abfällen zu sehen. Das meist feste Fördergut wird mit der Schnecke, einem sich drehenden schraubenähnlich geformten Stahl, von einem Vorlagebehälter kontinuierlich einem Reaktor oder anderen Verfahrensstufen zugeführt. Diese Fördertechnik eignet sich gut für kurze Entfernungen und waagerechte Förderstrecken.

Sollen Abfälle mit einer Förderschnecke in den Drehrohrofen eingebracht werden, so sind die Gasdichtigkeit des Systems kritisch zu beurteilen. Aufgrund des Unterdrucks im Ofen kann Falschluf Luft angesaugt werden. Außerdem besteht die Gefahr eines Flammenrückschlags in den Vorlagebehälter. Durch Schnecken, die das Aufgabegut verdichten, könnte dieses Problem gelöst werden.

## **7.2. Praktische Erfahrungen**

### **7.2.1. Allgemeine Betriebserfahrungen**

Für die Inbetriebnahme einer Sondermüllverbrennungsanlage müssen neben den Betriebsvorschriften alle Maßnahmen zur Sicherheit und die Vorgaben der Aufsichtsbehörden beachtet werden. Wird eine Anlage zum ersten Mal angefahren, so muß die Trocknung der Ausmauerung berücksichtigt werden [Comfère].

In [Thomé-K.-1] wird über allgemeine Betriebserfahrungen mit Drehrohröfen berichtet, allerdings ohne Quellenangaben. Danach soll ein "häufiges An- und Abfahren" das Mauerwerk "nicht sehr beeinflussen" haben. Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen einer Drehrohranlage ist diese Aussage nicht zu verstehen. Außerdem wird in [Thomé-K.-1] auf einen starken Verschleiß am Drehrohrende hingewiesen.

Wie in Kapitel 6.1.4 beschrieben, ist die feuerfeste Auskleidung des Drehrohres großen Belastungen ausgesetzt. Mit einem Schlackenpelz lassen sich diese vielfältigen Beanspruchungen der Ausmauerung deutlich herabsetzen [Heitmann].

Ein optimaler Ausbrand der Schlacke wird durch die Erzeugung einer schmelzflüssigen Schlacke erreicht [Erbach-4]. [Womann] berichtet über eine Beobachtung der Verbrennung im Drehrohr mit einer Farbfernsehkamera.

Eine ausführliche Beschreibung für die Bildung und den Erhalt des Schlackenpelzes findet man in [Comfère]. Bei einer Temperatur von 950 °C am Drehrohrende wird der Schlackenpelz durch Zugabe von Sand, Glasbruch, Lackrückständen und geringen Mengen Kalkhydrat aufgebaut. Die Manteltemperatur des Drehrohrofens dient im Normalbetrieb als Maß für die Schlackeschicht. Für weitere Informationen wird auf den Originaltext verwiesen. Auch in [Vollhardt-1] gibt es Hinweise zum Aufbau des Schlackenpelzes. Hohe Temperaturspitzen sollten nicht auftreten, und eine bei 1200 °C zähflüssige Schlacke läßt sich durch die Aufgabe von Sand in das Drehrohr erreichen. Die Zuführung von Sand zur besseren Bildung des Schlackenpelzes wird auch in anderen Veröffentlichungen erwähnt [Heitmann], [Womann].

In [Thomé-K.-1] sind Betriebserfahrungen der BASF AG zusammengefaßt. Danach ist die Standzeit der Ausmauerung entscheidend von der Fahrweise des Ofens und weniger von der Qualität der Ausmauerungssteine abhängig. Der Schlackenpelz erreicht in den Öfen der BASF AG eine Stärke von bis zu 0,5 m. Durch eine vorsichtige Steigerung der Temperatur kann eine Reduzierung der Schichtstärke erreicht werden.

Nach [Womann] hängt die Stärke des Schlackenpelzes von der Feuerraumbelastung, der Ofentemperatur und der Schlackenschmelztemperatur ab. Mit der gewählten Leistung der Brenner an der Drehrohrstirnseite kann der Schlackenfluß über die volle Drehrohlänge gesteuert werden. Der Aufbau und der Erhalt des Schlackenpelzes ist allerdings nicht einfach.

Werden größere, nur teilweise gefüllte Gebinde in das Drehrohr aufgegeben, so kann das restliche Behältervolumen mit Sand aufgefüllt werden. Der erforderliche Zeitraum für die Verdampfungsvorgänge im Ofen wird so vergrößert [Heitmann]. Die Schmelztemperatur der

Schlacke steigt in Richtung zum Ofenende an [Womann]. Wenn der Heizwert der zugeführten Abfallstoffe sinkt, so verlagert sich die Zündzone zum Ofenende. Durch den Einsatz von Zusatzbrennern kann die Zündzone wieder in Richtung zur Aufgabeseite verlagert werden [Thomé-K.-1].

Mit den sehr unterschiedlichen Abfällen können in einem Drehrohrofen auch Klärschlämme verbrannt werden. Allerdings ist nur eine begrenzte Zuführung mit einem Anteil von 10 bis 15 % möglich, da folgende Probleme auftreten können:

- Die Entstehung von Klumpen im Drehrohr beeinträchtigt die Strömungsverhältnisse und den Schlammausbrand negativ.
- Aufgrund der hohen Temperaturen kann sich eine feste Schale am Schlamm-partikel bilden, so daß ein vollständiger Abbrand des Partikels nicht mehr möglich ist.

Für die Klärschlammverbrennung werden aus diesen Gründen in der Technik Etagen- und Wirbelschichtöfen eingesetzt [Bierbach].

Nach [Vollhardt-1] existiert in der Nachbrennkammer im Bodenbereich ein Gleichgewicht zwischen Schlackefluß und Ablagerung von Schlacke. Dieses Gleichgewicht regelt sich in Abhängigkeit von der Nachbrennkammertemperatur von selbst.

### **7.2.2. Faßaufgabe**

Die Faß- oder Gebindeaufgabe erfolgt über die Einlaufschurre (Siehe Kapitel 7.1.3.) in der Stirnseite der Drehrohrofens. Die Verbrennung dieser Gebinde erfolgt allerdings nicht wahllos, sondern ist Bestandteil eines sogenannten Verbrennungsmenus. Dabei werden die spezifischen Eigenschaften der Gebinde berücksichtigt. Die Verbrennungszeit für Gebinde schwankt zwischen wenigen Minuten und mehr als einer Stunde [Womann].

Die Aufgabe von Faßware führt zu verschiedenen Nachteilen. Es können große Temperaturschwankungen und Spitzenwerte in den Emissionen, insbesondere von CO, auftreten, die sich

eventuell bis in die Nachbrennkammer auswirken. Durch Explosionen werden Druckstöße verursacht, die den Betrieb der gesamten Anlage beeinflussen. Außerdem besteht die Gefahr, daß nicht ausgebrannte Feststoffe in der Schlacke zurückbleiben [Seifert-1]. Die gewünschte gleichmäßige Verbrennung wird durch die Faßaufgabe gestört [Muckenheim].

Diese Probleme entstanden auch bei der Hessischen Industriemüll GmbH. Die gebildeten CO-Spitzenwerte waren so groß, daß in der Nachbrennkammer die vollständige Umsetzung zu CO<sub>2</sub> nicht mehr gelang [Franke-1]. Die Ursache für dieses Verhalten liegt nach Meinung der Autoren in den zu geringen Strömungsimpulsen der Sekundär- und Tertiärluft, die zu einer unzureichenden Durchmischung der Rauchgase mit der zugeführten Luft führten. Zur Lösung dieser Probleme wird eine besondere Technik vorgeschlagen, die in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt ist.

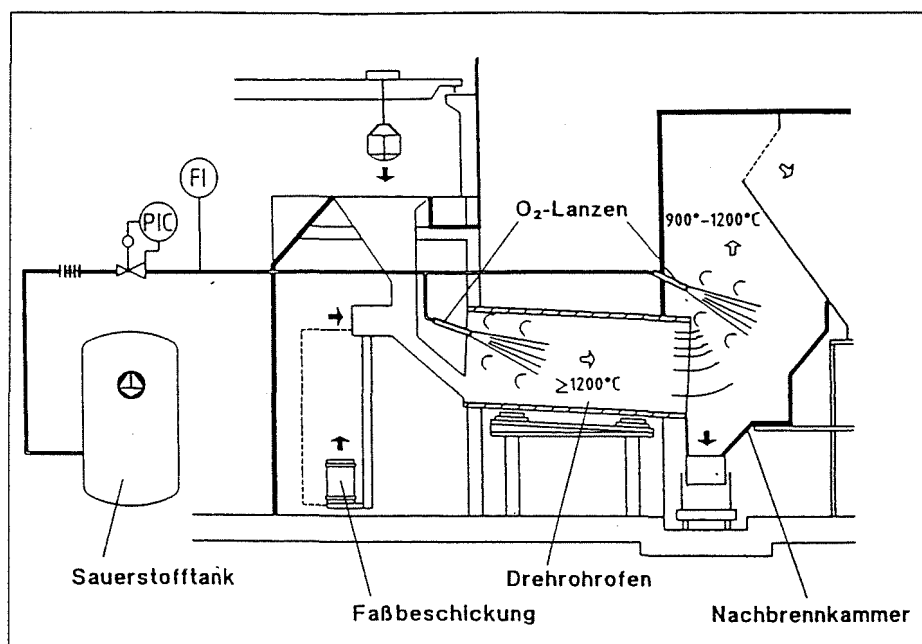


Abb. 7.1: Sauerstoffeinsatz in Sondermüllverbrennungsanlagen [Franke-2].

In das Drehrohr und die Nachbrennkammer wird Sauerstoff mit einer hohen Geschwindigkeit eingedüst, so daß die erforderlichen Vermischungsvorgänge ablaufen. Unter Berücksichtigung einer Verzögerungszeit erfolgte eine Kopplung der Sauerstoffzugabe mit dem Betrieb des Faßaufzugs. In [Franke-1] u. [Franke-2] werden die Vorteile und die Versuchsdurchführung

## 7. Betrieb von Sonderabfallverbrennungsanlagen (SVA)

---

für dieses Verfahren genauer beschrieben. Der Aufwand an Meß- und Regeltechnik wird als gering bezeichnet.

Aus den durchgeführten Versuchen ergaben sich bessere CO-Tagesmittelwerte, die bei gleichzeitiger Steigerung der Verbrennung von Faßware erzielt wurden. Die beschriebene Verwendung von Sauerstoff stellt danach eine sinnvolle Möglichkeit der Verfahrensführung dar. Bei durchschnittlichen Entsorgungskosten von 1000 DM/t kann dieses Verfahren in der Sondermüllverbrennung nach Meinung der Autoren auch wirtschaftlich betrieben werden. Der Einsatz der hier vorgestellten Sauerstofftechnologie war in der geplanten neuen Anlage in Biebesheim allerdings nicht vorgesehen [Erbach-5].

Die Probleme mit der Faßaufgabe werden bei den bestehenden Anlagen der Hessischen Industriemüll GmbH (HIM) auf einem anderen Weg gelöst. Eine Anlieferung in Fässern und Gebinden wird vermieden, sofern es die Eigenschaften der Abfälle zulassen [Erbach-5]. Aufgrund der Erfahrungen werden 200 l-Fässer nur noch in Sonderfällen angenommen. Die meisten Gebinde wiegen 30 bis 100 kg und werden direkt in die Feuerung aufgegeben [Erbach-2]. Es wird ein EDV-System aufgebaut, das den logistischen Aufwand für die Entsorgung von Fässern vereinfachen soll [Erbach-5].

Nach [Schneider] sollten große Fässer entleert und die Leergebinde eventuell zerkleinert in den Drehrohrofen eingefördert werden. Eine direkte Verbrennung sollte auf kleine Fässer mit bis zu 50 kg und max. 1 GJ begrenzt werden. Einen Hinweis auf ähnliche Daten findet man auch an anderer Stelle [Thomé-K.-1].

Die Aufgabe von Fässern in die Drehrohranlagen wird auch bei der BASF AG reduziert. Zur Steigerung des Durchsatzes von festen und flüssigen Abfällen wurde die Faßaufgabe durch eine kontinuierliche Aufgabe mit einer Doppelkolbenpumpe ersetzt [Seifert-2]. Mit diesem neuen Weg der Abfallzuführung konnte der Durchsatz von hochkalorischen Rückständen deutlich erhöht werden.

Ein Konzept für eine Drehrohranlage in Nordrhein-Westfalen sieht eine Anlieferung von Fässern nicht mehr vor [Muckenheim]. Die Abfälle werden bei den Abfallerzeugern entsprechend aufbereitet.

### 7.2.3. Betriebstemperaturen der Nachbrennkammer

Durch die 17. BImSchV sind bei der Verbrennung von Sonderabfällen in der Nachbrennkammer Temperaturen von 1200 °C und Verweilzeiten von mehr als 2 s nach der letzten Luftzugabe vorgeschrieben. Wenn allerdings nachgewiesen ist, daß durch eine entsprechend lange Verweilzeit keine erhöhten Emissionen auftreten, ist auch der Betrieb bei 1000 °C zulässig. Für die Temperaturerhöhung von 1000 auf 1200 °C sind nach [Berghoff-1] die folgenden Nachteile zu erwarten:

- Pro Tonne verbrannten Abfalls sind 800 l Brennstoff zusätzlich erforderlich.
- es entsteht etwa die doppelte Abgasmenge pro Tonne verbranntem Abfall, die abgeleitet werden muß.
- durch hohe Temperaturen entsteht mehr thermisches NO<sub>x</sub>.
- die Anlage wird stärker beansprucht.

Eine ähnliche Liste für die Nachteile der hohen Temperaturen findet man in [Barniske-2]. Die Temperatur sollte nach Meinung der Autoren so niedrig wie möglich, aber für eine optimale Verbrennung ausreichend hoch gewählt werden. Für Zweifelsfälle werden Testprogramme vorgeschlagen. Eine ähnliche Aussage findet man in [Hasberg-2]. Bei einer Steigerung der Temperatur von 1000 ° auf 1300 °C in der Nachbrennkammer sinkt die Verbrennungskapazität der Anlage sehr stark ab.

Nach [Schlierf] kommt es durch höhere Temperaturen im Rauchgas zu einer stärkeren Verschmutzung der Kesselwandungen, denn der Schmelz- oder Erweichungspunkt der Flugasche wird erreicht. Es entstehen Anbackungen in den ersten Kesselzügen.

In [Erbach-3] wird über ein Meßprogramm zur Ausbrandqualität der Rauchgase in der Nachbrennkammer berichtet. Die Verbrennungsqualität hängt danach nicht nur von den



Temperaturen ab, sondern auch von der Verweilzeit, der Verbrennungsluftmenge und von der Durchmischung. In dem durchgeführten Meßprogramm wurden bei 1000, 1100 und 1200 °C keine Unterschiede im Ausbrand der Rauchgase festgestellt.

Aus experimentellen Untersuchungen ergibt sich, daß die Auslegung der Nachbrennkammer in Hinblick auf den Rauchgasausbrand viel wichtiger ist als hohe Temperaturen [Schöner-2].

### 7.2.4. Meßergebnisse aus Versuchen

In [Waterland-1] und [Waterland-2] wird das Verhalten von neun Metallen (Arsen, Barium, Wismut, Cadmium, Chrom, Kupfer, Blei, Magnesium, Strontium) in einer Drehrohranlage im Technikumsmaßstab erläutert. Die verschiedenen Metalle wurden einem genau definierten Müll zugemischt. Dieser synthetische feste Müll bestand aus einer Mischung von Ton und organischen, chlorierten Flüssigkeiten. Bei den Messungen wurden die Temperatur im Drehrohr und in der Nachbrennkammer verändert. In den Versuchsergebnissen spiegelt die Verteilung der Metalle zwischen der Schlacke und dem Gasstrom die Dampfdruckabhängigkeit der Metallverbindungen von der Temperatur wider. Je höher der Dampfdruck des betrachteten Metalls bzw. seiner Verbindungen, um so geringere Konzentrationen wurden in der Schlacke gefunden. Eine Ausnahme bildete Arsen, das als zu erwartende Verbindung ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) ebenfalls sehr stark flüchtig ist. Es wurde bei allen Analysen hauptsächlich in der Asche gefunden. Als mögliche Ursache geben die Autoren das Vorliegen einer anderen Arsenverbindung oder starke Adsorptionskräfte an.

Eine zusammenfassende Darstellung eines Gemeinschaftsprojektes zwischen der Louisiana State University, der University of Utah und der Firma Dow Chemical USA findet man in [Cundy-1]. Dieses Projekt läßt sich in drei Bereiche unterteilen:

Im ersten Teil des Forschungsprogramms werden Untersuchungen an einer industriellen Verbrennungsanlage durchgeführt. Dieser 10,7 m lange Drehrohrofen mit einem inneren Durchmesser von 3,2 m der Firma Dow Chemical USA wurde für die Untersuchungen mit

## 7. Betrieb von Sonderabfallverbrennungsanlagen (SVA)

nur zwei Sonden zur Probenahme ausgerüstet. An der Anlage wurden dann Messungen zur Verbrennung von  $\text{CCl}_4$  unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt.

Der zweite Teil umfaßt Laboruntersuchungen und Messungen an der Drehrohranlage der University of Utah. Den prinzipiellen Aufbau zeigt die folgende Zeichnung

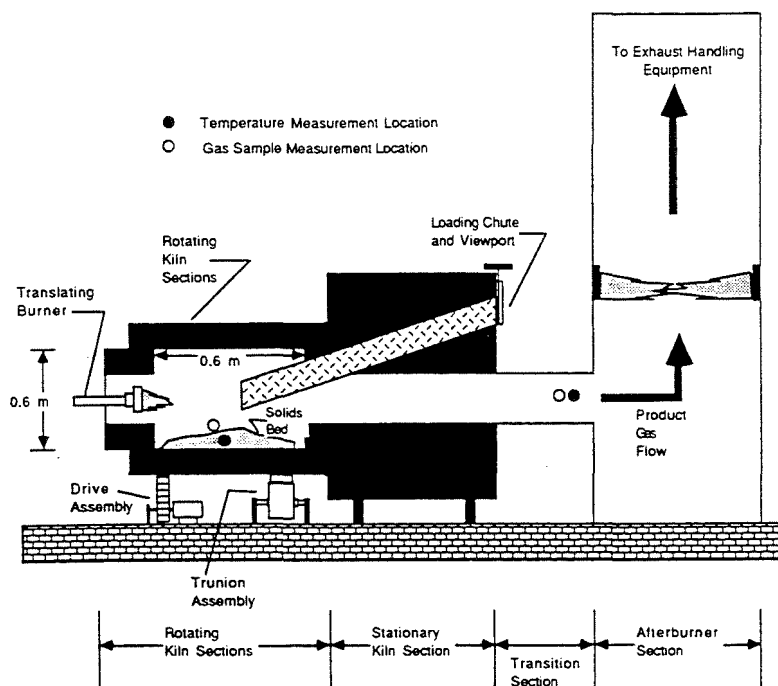


Abb. 7.2: Labordrehrohranlage der University of Utah [Cundy-1]

Der Aufbau und Betrieb dieser Anlage unterscheidet sich deutlich von den zuvor beschriebenen industriellen Drehrohranlagen. Die Autoren berichten über einen Batch-Betrieb, in dem sie den räumlichen Stofftransport einer industriellen Anlage durch das zeitliche Verfolgen verschiedener Parameter nach eine Abfallaufgabe simulieren.

Das dritte Teilprogramm beschäftigt sich mit der mathematischen Modellierung im Drehrohr-Ofen. Die Autoren dieser Arbeit wollen durch weitere Forschungsarbeiten und Kombination der Ergebnisse eine genaue Vorstellung über die Zerstörung von chlorierten Kohlenwasserstoffen in industriellen Drehrohren entwickeln.

In einer anderen Arbeit [Owens] werden Berechnungen und praktische Untersuchungen von Wärmetransportprozessen in einem Drehrohr erläutert. Bei diesen Messungen zeigt sich unter anderem, daß die Verdampfung von Wasser das Temperaturprofil der Feststoffe im Drehrohr beeinflusst. Weitere Informationen zu diesem Gemeinschaftsprojekt findet man in [Cundy-2], [Cundy-3], [Cundy-4], [Silcox] u. [Lighty].

In [Geiger-2] und [Geiger-1] sind Ergebnisse zur Verbrennung von Shredderleichtmüll zusammengefaßt, der bei der Entsorgung verbrauchter Kraftfahrzeuge entsteht. Danach kann Shredderleichtmüll in Drehrohröfen und Wirbelschichtanlagen verbrannt werden. Die Einstufung der Shredderabfälle als Sonderabfall kann allerdings auch bei dem Einsatz einer Wirbelschichtanlage eine Nachverbrennung bei 1200 °C erforderlich machen [Geiger-2]. Für beide Ofensysteme erwarten die Autoren keine deutlichen Unterschiede bei den Verbrennungskosten, aber für das Drehrohr spricht die größere Flexibilität. Weitere Informationen zum Vergleich von Drehrohranlagen und Wirbelschichtöfen werden in [Mullen] gegeben.

Einen Bericht über Messungen an einer Sonderabfallverbrennungsanlage in den Niederlanden findet man in [Buijtenhek]. Durch verschiedene Meßinstitute wurde nachgewiesen, daß die Anlage die gesetzlichen Auflagen erfüllt. Allerdings ist das Rauchgasreinigungssystem nur mit einem Elektrofilter und nur einer Waschstufe für HCl und Hg sehr einfach gestaltet. Die von der Genehmigung geforderten Emissionswerte liegen teilweise noch über den Grenzwerten der TA Luft 86.

### **7.3. Regelung und Modellierung von Drehrohranlagen**

Im Zusammenhang mit der Aufgabe von Faßware ist eine Beschreibung des Kontrollsystems der Fa. von Roll interessant. Bei der Aufgabe von Fässern mit heizwertreichem Inhalt kommt es zu einer Schwankung der thermischen Belastung des Ofens. Bei dem vorgestellten Kontrollsystem werden diese Schwankungen durch entsprechende Zudosierung einer Flüssigkeit mit hohem Heizwert ausgeglichen. Eine Beschreibung dieses Kontrollkonzeptes mit Erläuterungen über die Steuerungsmöglichkeiten findet man in [Sigg].

Ein interessantes Modell für den Betrieb einer Drehrohranlage wird in [Behmanesh] vorgestellt. Das Modell geht dabei von einer existierenden Anlage aus, für die es eine Genehmigung mit verfahrenstechnischen Vorgaben und Grenzwerten gibt. Diese Anlage wird allerdings nicht konkret beschrieben. In das Rechenmodell können acht definierte Stoffströme mit unterschiedlichen Eigenschaften entweder in das Drehrohr oder in die Nachbrennkammer aufgegeben werden. Für diese Stoffströme sind zusätzliche Faktoren in dem Modell enthalten, die Schwankungen oder Abweichungen in den physikalischen Eigenschaften erfassen. Das Modell selbst beruht auf 34 angegebenen mathematischen Gleichungen, die die verschiedenen Stoff- und Wärmebilanzen beschreiben. Die Auslegungsdaten der Anlage werden von 17 Gleichungen erfaßt, die restlichen Gleichungen beschreiben die Genehmigungsaufgaben. Für den Lösungsweg werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt und kurz erläutert. Für fünf genau definierte Schwankungen in den Abfallströmen werden die Stoffströme berechnet und die Einflüsse diskutiert.

### 8. Der Abhitzekessel

Die heißen Rauchgase treten nach Verlassen der Nachbrennkammer in den Abhitzekessel ein. Ein Kessel besteht im wesentlichen aus begrenzenden Wänden zur Führung der Rauchgase und Wärmetauscherflächen. Die Wärmetauscherflächen werden von einem Rohrsystem gebildet, in dem Wasser zirkuliert. Die Wärmeenergie der Rauchgase wird zur Verdampfung des Wassers und Überhitzung des gebildeten Wasserdampfes in dem Rohrsystem genutzt. Die Temperaturen der Rauchgase nehmen im Kessel folglich ab.

Das Rohrsystem eines Kessels läßt sich in drei verschiedene Funktionsbereiche unterteilen. Im Economiser wird das Kesselspeisewasser auf Siedetemperatur erwärmt. Im Verdampferteil des Kessels wird dann Wasserdampf erzeugt. Für diesen Vorgang ist die größte Wärmemenge erforderlich. Die Wasserdampf Temperatur wird anschließend im Überhitzerbereich weiter erhöht.

Für die Verwendung des erzeugten Dampfes gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Prinzip ist die Erzeugung elektrischer Energie mit Turbinen, ein Einsatz als Heizdampf oder eine Kombination (Kraftwärmekopplung) möglich. Die Entscheidung richtet sich nach den Möglichkeiten vor Ort [Erbach-4].

In der Bundesrepublik Deutschland ist bei den hier vorgestellten Drehrohranlagen der Bau eines Kessels aufgrund der gesetzlich geforderten Wärmeverwertung nach § 8 der 17. BImSchV immer notwendig. In der Literatur werden auch Anlagen an Standorten in anderen europäischen Staaten beschrieben, an denen kein Kessel vorhanden ist (Siehe z.B. [Piechura] o. [Schaub]).

Wie schon oben im Text erwähnt, muß die Konstruktion und Auslegung des Kessels im direkten Zusammenhang mit der Nachbrennkammer und dem Drehrohr erfolgen. Die Kesselgröße und die Bauart wird von den folgenden Parametern bestimmt [Schlierf]:

- maximal geforderte Spitzenlast
- Lastbereich mit geregelter Frischdampf­temperatur (= Festlegung der Kleinstlast)
- mögliche Rauchgaseintrittstemperaturen
- zulässige Rauchgasaustrittstemperaturen für alle Lastfälle, bei verschmutztem und sauberem Kessel
- Reisezeit und Verfügbarkeit (Wahl der Heizflächeneinrichtungen)

Auf die Kenntnisse aus dem Kesselbau von Kraftwerken usw. kann nur eingeschränkt zurückgegriffen werden [Vollhardt-1], denn bei der Konstruktion von Abhitzekesseln an Abfallverbrennungsanlagen sind mögliche Laständerungen, andersartige Korrosionsvorgänge und Verschmutzungen der Heizflächen zu beachten. Die Auslegung der Kessel unterscheidet sich auch von den Kesseln in Hausmüllverbrennungsanlagen, denn bei der Sonderabfallverbrennung gelangen mit den Flugstäuben und dem Rauchgas größere Stoffmengen mit niedrigem Schmelzpunkt oder korrosiven Eigenschaften in den Kessel [Schneider]. Folglich sind stärkere Verschmutzungen möglich [Paczkowski]. Im Rauchgas können bis zu  $10 \text{ g/m}^3$  Staub enthalten sein, wobei als kurzzeitige Spitzen auch doppelt so hohe Werte erreicht werden [Schlierf]. Außerdem liegen in Sonderabfallverbrennungsanlagen die Verbrennungs- und Kesseleintrittstemperaturen höher als bei Hausmüllverbrennungsanlagen. Einen Vergleich von Kesseln modernster Bauarten zeigt die folgende Tabelle:

Tabelle 8.1: Kesselwirkungsgrade [Joschek-2]

Anlagentyp	Kraftwerk	Rostofen	Drehrohrofen
Abgasverluste	6 %	14 %	17 %
Sonstige Verluste	11 %	12 %	9 %
Energienutzungsgrad	ca. 83 %	ca. 74 %	ca. 74 %

Mit dem Energiewirkungsgrad ist der Wirkungsgrad des Kessels gemeint. Die in Tabelle 8.1 aufgeführten Daten dürften nicht mehr aktuell sein, denn von Kraftwerken sind heute höhere Wirkungsgrade bekannt. Für das Kesselkonzept gibt es keine allgemeine Lösung. Verfahrenstechnische und betriebliche Bedingungen, Kosten und bautechnische Vorgaben erfordern individuelle Lösungen [Kubisa-2] [Vollhardt-1]. In [Schlierf] werden mögliche Änderungen in den Betriebsparametern des Kessels und deren Auswirkungen aufgezeigt.

### 8.1. Kesselbauformen

Für Sondermüllverbrennungsanlagen werden mehrere Kesseltypen eingesetzt, für die in der Literatur unterschiedliche Bezeichnungen verwendet werden. In diesen Kesseln sind für die Übertragung der Wärme vom Rauchgas auf die Kesselwandungen zwei verschiedene Prozesse zu unterscheiden. In dem vorderen Teil wird die Wärme durch Strahlung an die Kesselwände und die dahinter liegenden Wärmetauscherflächen abgegeben. Hier werden die Rauchgase auf Temperaturen von ca. 1200 °C auf etwa 600 °C abgekühlt. Im Bereich von 600 °C liegt die Erweichungstemperatur der Flugasche. In der anschließenden Kesselsektion, wo der Flugstaub in fester Form vorliegt, herrscht eine Wärmeübertragung durch Konvektion vor. Das Rauchgas als fluides Medium muß für diese Art der Wärmeübertragung zu den Wärmeübertragungsflächen transportiert werden. Die unterschiedlichen Wärmeübertragungsprozesse haben damit einen sehr großen Einfluß auf die Verschmutzung der Kesselwandungen.

Nach [Schneider] werden bei der Sonderabfallverbrennung in der Regel Gassen- oder L-Form-Kessel eingesetzt. Der L-Form-Kessel wird auch als Dackelkessel bezeichnet.

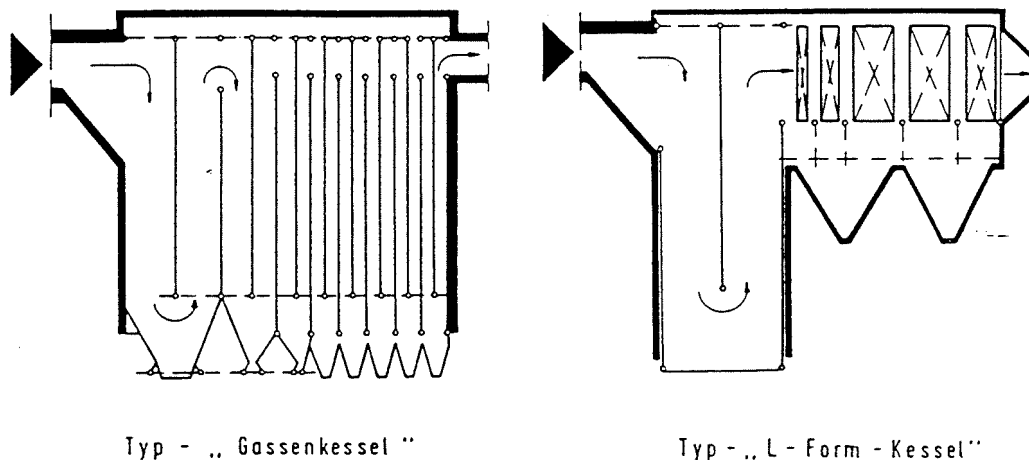


Abb. 8.1: Kesseltypen für Sondermüllverbrennungsanlagen [Schneider]

Bei dem Gassenkessel entstehen durch senkrechte Schotten mehrere vertikale Züge, die abwechselnd von oben nach unten und von unten nach oben durchströmt werden. Der

konvektive Wärmeübergang erfolgt im hinteren Kesselteil, in dem eventuell zusätzlich einzelne Rohrbündel eingehängt werden können.

Der L-Form-Kessel zeichnet sich dagegen durch eine deutliche räumliche Trennung der verschiedenen Wärmeübertragungsprozesse aus. Im Gegensatz zu dem vertikal durchströmten Strahlungsteil enthält der horizontal durchströmte Konvektionsteil in den Rauchgasstrom eingehängte quer angeströmte Rohrbündel.

In [Kubisa-3] wird dagegen zwischen Horizontalzug-, Vertikalzug und Leerzugkessel unterschieden. Nach einem Vergleich mit [Schneider] entspricht der L-Form-Kessel dem Horizontalzugkessel. Vermutlich ist mit der Bezeichnung Leerzugkessel der Gassenkessel gemeint. Vertikalzugkessel, die von den Autoren nicht näher beschrieben werden, weisen eine kompaktere Bauform als horizontal durchströmte Kessel [Steinmüller] auf. Nach [Thomé-K.-1] sind für Müllverbrennungsanlagen sowohl horizontale als auch vertikale Kesselzüge möglich.

Ein L-Form-Kessel baut kleiner als ein Gassenkessel [Schlierf] und kann sehr gut durch Klopferwerke gereinigt werden. Aus diesem Grund ergeben sich Vorteile für diesen Kesseltyp bei Sonderabfallverbrennungsanlagen [Paczkowski]. Der gleiche Grund wird auch in [Schneider] für eine bevorzugte Verwendung dieses Kesseltyps bei öffentlichen Sonderabfallverbrennungsanlagen angeführt.

In den Arbeiten [Vollhardt-4] u. [Vollhardt-2] sind Informationen Schottenkessel (Gassenkessel) veröffentlicht, allerdings ohne direkte Hinweise auf technische Anlagen. Ein interessanter Vergleich ergibt sich durch eine Betrachtung der folgenden Abbildungen.



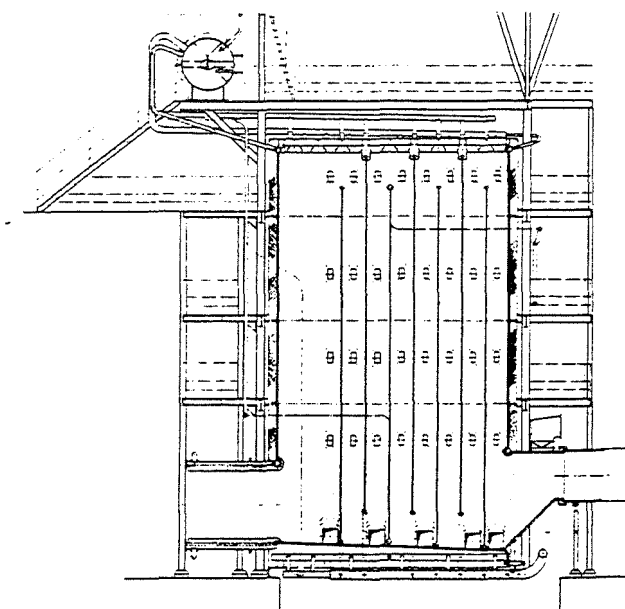


Abb. 8.2: Abhitzekeessel hinter einer Sonder- bzw. Chemiemüllverbrennungsanlage [Vollhardt-4]

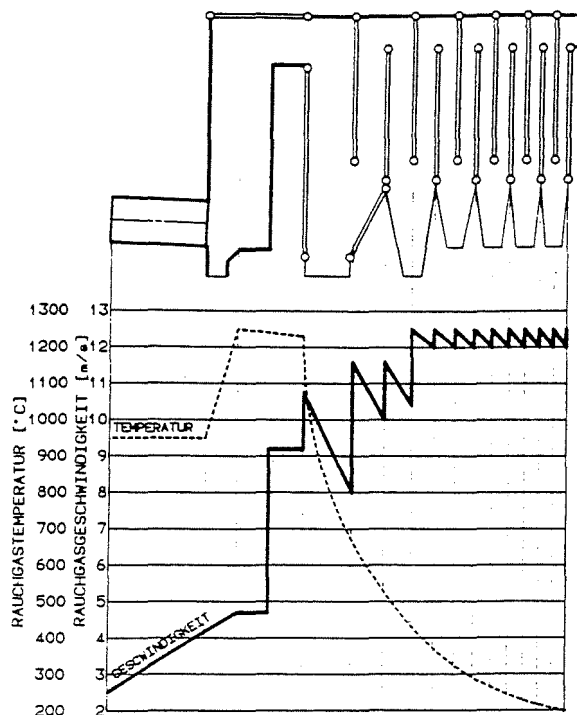


Abb. 8.3: Kesselaufbau und Temperatur- sowie Gasgeschwindigkeitsverlauf innerhalb des Kessels [Vollhardt-2]

Der Abstand der Schotten im Kessel ist in der Abbildung 8.2 konstant. Die Breite zwischen den Schotten in der Abbildung 8.3 nimmt dagegen ab. Das Diagramm in der Abbildung 8.3 zeigt die Abnahme der Rauchgastemperatur beim Durchlaufen des Kessels. Diese Abnahme ist mit einer Reduzierung des Gasvolumens verbunden. Diese Volumenreduzierung und die gleichzeitige Verringerung der Strömungsquerschnitte durch Verkleinerung der Schottenabstände führen zu einer fast konstanten Gasgeschwindigkeit im Kessel. In einem Kessel mit konstanten Schottenabständen, wie in Abbildung 8.2 dargestellt, fällt die Rauchgasgeschwindigkeit zum Kesselende ab. Die geringere Rauchgasgeschwindigkeit kann dann zu Staubablagerungen führen. Durch die geringere Geschwindigkeit vergrößert sich auch die Verweilzeit der Rauchgase, so daß von einer größeren Dioxinbildung auszugehen ist.

Nach [Schlierf] treten in einem Schottenkessel geringere Erosionsprobleme auf als bei anderen Kesseltypen. Die Ursache liegt in den geringeren Rauchgasgeschwindigkeiten. Bei einigen Konstruktionen von Schottenkesseln ist die Decke abnehmbar, so daß eine bequeme und schnelle Reinigung und Revision möglich ist. Aufgrund von Erfahrungen ist die Reinigung eines Schottenkessels im Betrieb schwieriger [Schlierf].

### 8.2. Umlaufsysteme für Kessel

Bei der Wasser/Dampfbewegung in den Rohren eines Kessels wird zwischen Naturumlaufsystemen, Zwangsumlaufsystemen und Zwangsdurchlaufsystemen unterschieden.

- Im Naturumlaufsystem erfolgt die Bewegung aufgrund der Dichteunterschiede zwischen dem Dampf und dem heißen Wasser. Durch eine entsprechende Ausbildung des Rohrsystems muß ein störungsfreier Wasserumlauf ermöglicht werden.
- In den Kreislauf des Zwangsumlaufkessels sind Pumpen eingebaut, die eine freiere Gestaltung der Rohrsysteme gestatten. Diese Kessel erfordern im Vergleich zu den Naturumlaufkesseln höhere Investitionskosten.
- Der Zwangsdurchlaufkessel unterscheidet sich deutlich von den beiden anderen Typen. Die Vorwärmung des Wassers, die anschließende Verdampfung und Überhitzung erfolgen in einem durchgehenden Rohr. Ein Zwangsdurchlaufkessel besitzt keine Trommel als Vorlagegefäß.

In einer frühen Arbeit von [Vollhardt-4] (1974) wird ein Abhitzeessel mit Zwangsdurchlauf für eine Sondermüllverbrennungsanlage beschrieben. Der Zwangsdurchlauf wird aufgrund der schwankenden Belastungen für erforderlich gehalten. Nach Meinung des Autors besteht durch die Entfernung der Schmutzschicht an den Kesselwänden bei Naturumlaufkesseln die Gefahr, daß Kesselrohre reißen. Für einen ähnlichen Kessel der gleichen Art wird in [Vollhardt-1] (1987) eine Kombination aus Natur- und Zwangsumlaufsystem erwähnt.

Nach [Thomé-K.-1] können für Sondermüllverbrennungsanlagen alle drei beschriebenen Umlaufsysteme eingesetzt werden, denn die befürchteten Probleme mit dem Wasserkreislauf aufgrund der schwankenden Wärmemengen traten nicht auf. Auch ein Naturumlaufkessel kann die auftretenden Schwankungen der Wärmeentwicklung verkraften. Die Entwicklung der Kessel geht nach [Heitmann] vom Zwangsumlaufkessel über gemischte Bauarten zu Naturumlaufkesseln.

### 8.3. Temperaturen im Kessel

Die Rauchgastemperaturen am Kesseleingang werden durch die Temperaturen in der Nachbrennkammer bestimmt. Die Eintrittstemperatur in den Kessel kann aber durch Zugabe von Luft, Rauchgasrezirkulation oder Wasserkühlung gesenkt werden [Schlierf].

Für die Konstruktion eines Kessels sind mögliche Korrosionsvorgänge zu beachten, die die Rohrwandtemperatur bestimmen. Nach [Vollhardt-1] sind Tief- und Hochtemperaturkorrosion zu unterscheiden. Unter 150 °C kann eine Säurekorrosion durch Taupunktunterschreitung auftreten. Die Hochtemperaturkorrosionsvorgänge laufen oberhalb von 350 °C ab.

In [Schneider] wird für die Abkühlung im Strahlungsbereich eine Temperatur von 650 oder besser 550 °C vorgeschlagen. Für das Kesselende werden in der Literatur von verschiedenen Autoren Temperaturen angegeben. Es ergibt sich ein Temperaturbereich von 180 bis 360 °C. Die einzelnen Angaben sind in der folgenden Tabelle enthalten:

Tabelle 8.2: Zusammenstellung von Temperaturen am Kesselaustritt

[Heitmann]	250-350 °C
[Hüning]:	280 °C
[Vollhardt-4]	ca. 300 °C
[Berghoff-1]	250-300 °C
[Seher]	300 °C
[Seifert-1]	300 °C
[Egger]	250-350 °C
[Dorn-2]	300-360 °C
[Meininger]	>180 °C
[Schlierf]	250-350 °C

### 8.4. Reinigung der Kessel

Für einen konstanten Wirkungsgrad des Kessels müssen die Verschmutzungen an den Heizflächen entfernt werden. Nach [Heitmann] und [Hüning] sind zur Reinigung mechanische Klopfer, Kugelregen, Schallabreiner und mit Wasser, Luft oder Dampf betriebene Bläser einsetzbar. In [Thomé-K-1] werden Rußbläser erwähnt, die mit Dampf, Luft oder Wasser arbeiten. Die Auswahl erfolgt in Abhängigkeit von den Ablagerungen [Heitmann].

[Schneider] unterscheidet für die Auswahl des Reinigungssystems nach der Art der Kesselzüge. Pneumatische oder elektrische Klopfer werden für Strahlungszüge, automatische Klopferwerke vorteilhaft für Konvektionszüge eingesetzt. Dampf- oder Druckluftbläser werden für Bündelheizflächen im hinteren Teil von Gassenkesseln eingesetzt.

Alle Systeme haben Vor- und Nachteile. Die mit Wasser oder Dampf betriebenen Blaseinrichtungen erhöhen die Korrosionsgefahr durch Unterschreitung der Taupunkte. Die Luftbläser erfordern im Gegensatz zu den dampfbetriebenen Bläsern zusätzliche Kosten für die Druckluftanlage. Der Betrieb von Rußbläsern verursacht große Staubmengen im Rohgas. Das mechanische Klopferwerk kann zur Spannungsrißkorrosion führen. Mechanische Einflüsse treten auch beim Kugelregen auf. [Heitmann], [Thomé-K.-1].

In [Kubisa-3] werden weitere Angaben zur Reinigung mit mechanischen Klopfwerken gemacht. Als Vorteile werden der geringe Energieaufwand für den Betrieb und der fehlende Einfluß auf die Rauchgasmenge genannt.

Über die Reinigung der Schotten in Schottenkesseln wird in [Vollhardt-1] berichtet. Die Schotten werden hydraulisch angehoben und auf ein spezielles Widerlager aufgestoßen.

### 8.5. Beispiele von Abhitzeesseln

In den folgenden Kapiteln werden die Kessel von verschiedenen Sonderabfallverbrennungsanlagen beschrieben. Die Kessel für die neuen Anlagen in Ebenhausen werden in Kapitel 11 erläutert.

#### 8.5.1. Beschreibung von Horizontalkesseln

Für zwei Anlagen in Herten und Leverkusen beschreiben [Kubisa-2] den dort eingesetzten Kesseltyp. Die Anlagen wurden jeweils mit einem Horizontalzugkessel ausgerüstet. In den Strahlungszügen wird die Temperatur auf 600 bis 650 °C gesenkt. Die Konvektionsheizflächen bestehen aus hängenden, schwingungsfähigen Rohrbündeln, die über mechanische Klopfer gereinigt werden. Die Heizflächen erlauben eine Austrittstemperatur von weniger als 300 °C.

Eine relativ ausführliche Beschreibung für einen Horizontalzugkessel findet man bei [Hüning]. Der Kessel für eine Anlage der Bayer AG besteht aus zwei vertikal durchströmten Strahlungszügen und einem horizontalen Konvektionsteil. Die Heizflächen werden durch Klopfen gereinigt. Weitere Daten sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle 8.3: Daten für den Kessel einer Sondermüllverbrennungsanlage der Bayer AG (45000 t/a, 7200 h/a) [Hüning]

Dampfmenge:	36,8 t/h
Heißdampf-temp.:	340 °C
Heißdampfdruck:	39 bar
Wirkungsgrad Kessel	78 %
Rauchgasvolumen:	72000 Nm <sup>3</sup> /h
Temp. vor Konvektionsteil:	600 °C
Temp. Austritt:	280 °C
Flugstaub:	200 kg/h

### 8.5.2. Die Kessel der BASF AG

Über die Konstruktion und Betriebserfahrungen von Kesseln im Anschluß an die Nachbrennkammer wird von verschiedenen Autoren der BASF AG berichtet. Die erste Kesselkonstruktion für die Öfen 1 und 2 führte zu großen Problemen durch schnelle Verschmutzung.

Für eine neue Kesselkonstruktion waren dann gute Reinigungsmöglichkeiten von großer Bedeutung. Es entstand ein Gassenkessel mit 8 Zügen und einer vorgeschalteten Strahlungskammer in dichtgeschweißter Rohr-Steg-Rohr-Konstruktion. Die einzelnen Züge sind 675 mm breit [Dorn-2]. Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau für eine der bei der BASF AG betriebenen Anlagen. Es ist anzunehmen, daß es sich bei der in Abbildung 8.4 gezeigten Verbrennungsanlage nicht, wie in [Dorn-1] angegeben, um die Anlage 6 der BASF AG handelt, denn dort sind Drehrohr und Kessel winklig angeordnet.

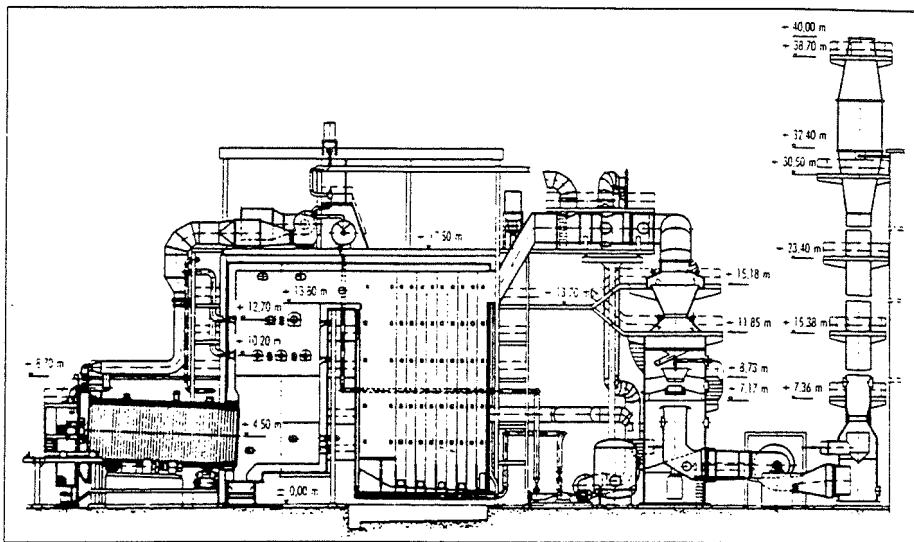


Abb. 8.4: Rückstandsverbrennungsanlage 6 der BASF AG [Dorn-1]

In den Kessel des Ofens 6 sind 9 Schotten eingebaut, die 10 Züge bilden [Dorn-2]. Der Abstand der einzelnen Schotten ist anscheinend konstant.

Das Umlaufsystem besteht aus einer Kombination von Natur- und Zwangsumlaufkessel. Die Außenwände weisen ein Naturumlaufsystem auf, die Schotten besitzen ein Zwangsumlaufsystem. Das dritte Schott ist als Überhitzer konstruiert. Die durch eine Faßaufgabe entstehenden Wärmespitzen werden durch einen Laständerungsgradienten von 10 %/min bei der Konstruktion berücksichtigt. Die Auslegung der Gassenbreite verhindert ein Verschließen der Züge durch anbackende Aschepartikel und gestattet ein Befahren für Reparaturen. [Womann].

Die Reinigung des Kessels erfolgt selbständig durch ein Abbrechen der Anbackungen. Zusätzlich kann der Kessel mit Druckluft, auch im Betrieb, gereinigt werden. Diese Kesselkonstruktion bewirkt auch eine Staubabscheidung [Womann].

### 8.5.3. Kessel der Hessischen Industriemüll GmbH (HIM)

Die Kesselkonstruktionen der Hessischen Industriemüll GmbH in Biebesheim stellen einen Sonderfall dar, denn hier gibt es keinen deutlich abgesetzten Strahlungsteil. Am Ende der Nachbrennkammer werden die Rauchgase von 1200 °C durch das Einblasen von Tertiärluft auf 800 °C abgekühlt. Durch diese Maßnahme werden die Klebeeigenschaften der Flugasche reduziert, so daß es zu einer deutlichen Minderung der Kesselverschmutzung kommt [Erbach-3]. Für Kessel dieser Art wird in [Schlierf] angegeben, daß die Abgasmenge und damit auch der Abgasverlust ansteigt. Durch eine Rezirkulation von Rauchgas kann dieser Nachteil beseitigt werden. Die folgende Abbildung zeigt schematisch den Aufbau der Kesselanlage.

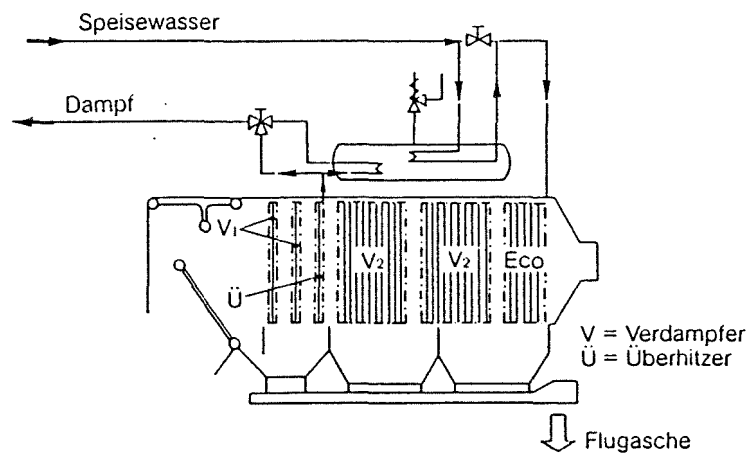


Abb. 8.5: Dampfkesselsystem der Hessischen Industriemüll GmbH [Erbach-3]

Die Kesselanlage besitzt ein Naturumlaufsystem. Die Dampfparameter werden mit 25,5 bar und 280 °C angegeben. Die Heizflächen werden durch automatische Klopfen gereinigt. Die Temperaturen am Kesselende betragen 250 bis 280 °C [Erbach-3] (290 °C [Greil]). In [Jachimowski] wird dieser Kesseltyp als "nachgeschalteter Kessel" bezeichnet, bei dem der Form des Rauchgaseintritts eine besondere Beachtung geschenkt werden muß. Die folgenden Abbildung zeigt die Veränderungen von Temperatur, Verweilzeit und Gasgeschwindigkeit im Kessel.



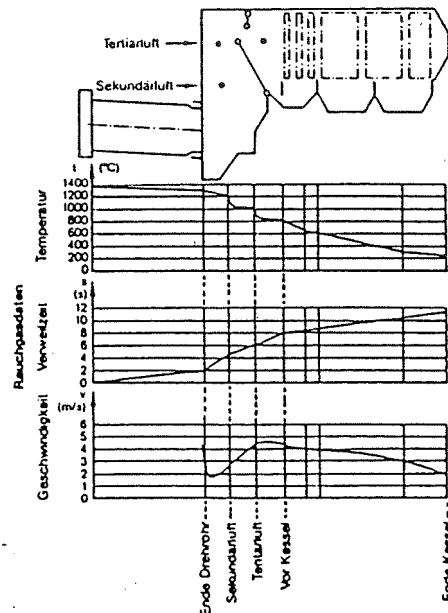


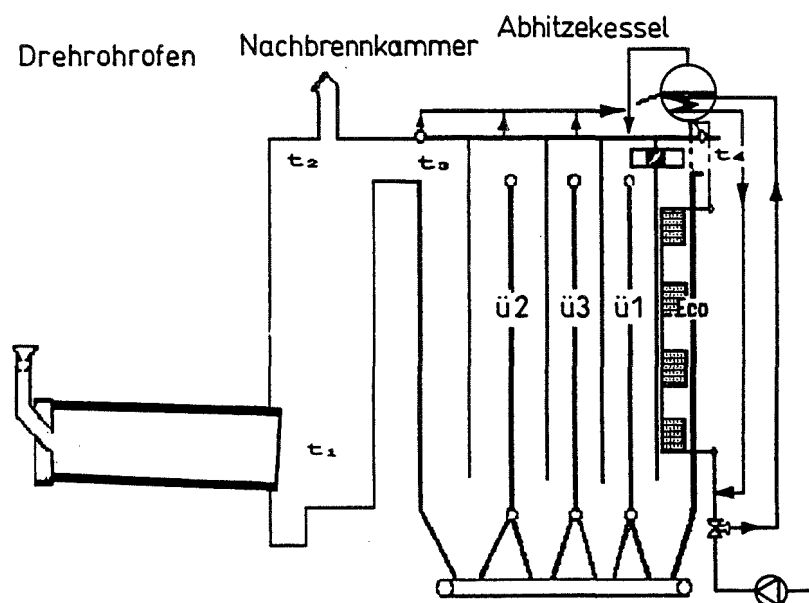
Abb. 8.6: Rauchgasdaten für die Anlagen der Hessischen Industriemüll GmbH [Erbach-3]

Während die Rauchgase den Kessel durchströmen, nimmt die Temperatur und damit auch das Volumen ab. Interessant sind in der Abbildung 8.6 die Veränderungen der Verweilzeit und der Gasgeschwindigkeit. Die Verweilzeit ist direkt proportional zu der Kessellänge in Strömungsrichtung. Dieses Verhalten ist bei gleichzeitiger Abnahme der Gasgeschwindigkeit nur durch eine Veränderung der Strömungsquerschnitte für die Rauchgase im Kessel zu erreichen. Genauere Informationen zur Kesselkonstruktion werden allerdings nicht mitgeteilt.

Die geplante dritte Verbrennungsstraße der Hessischen Industriemüll GmbH sollte mit einem ähnlichen Kesselkonzept ausgerüstet werden [Erbach-3]. Die Temperaturen am Kesselende werden auf 350 °C angehoben. In der ersten Stufe der Rauchgasreinigung werden die Rauchgase dann schnell auf 180 °C abgekühlt und so der Zeitraum für die de novo-Synthese der Dioxine begrenzt.

### 8.5.4. Das Kesselsystem am Standort Schwabach

Der Zweckverband Sondermüllentsorgung Mittelfranken (ZVSMM) betreibt in Schwabach eine Sonderabfallverbrennungsanlage. Der Abhitzekessel ist als Gassenkessel mit 8 Zügen ausgeführt. Die Kesseleintrittstemperatur hängt von der Betriebsweise der Anlage, Normalbetrieb oder PCB-Verbrennung, ab und liegt im Bereich zwischen 950 und 1250 °C.



ü1, ü2, ü3: Überhitzerschotten  
Eco Economiser

Abb. 8.7: Schema der Sonderabfallverbrennungsanlage in Schwabach [Schlierf]

Die Kesselaustrittstemperatur beträgt 300 °C. Es werden 17,4 t/h Dampf bei 320 °C und 27 bar Überdruck erzeugt.

### 8.5.5. Der Kessel der Lonza AG in Visp

Der Kessel im Werk Visp der Lonza AG ist als Naturumlaufkessel konstruiert [Egger]. Nach einer schematischen Darstellung besteht der Kessel aus drei vertikal angeordneten Zügen, wobei der letzte Zug als Konvektionsteil ausgelegt ist. Der Kesselarbeitsdruck wird mit 80 bar so gewählt, daß eine Kopplung an die zentrale Dampfanlage des Werkes möglich ist. Das Rauchgas verläßt den Kessel in Abhängigkeit von der Verschmutzung mit 250 bis 350 °C. Zur Reinigung der Kesselflächen erwies sich die vorgesehene Klopfeinrichtung als nicht ausreichend. Eine Schallabreinigungsanlage, zur Probe eingebaut, führte zu keinen wesentlichen Verbesserungen.

### 9. Eigenschaften und Verwertung der Schlacke

#### 9.1. Meßverfahren zur Elution von Schlacken

Für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Schlacken ist die Eluierbarkeit mit Wasser die entscheidende Größe, so daß das entsprechende Untersuchungsverfahren näher betrachtet werden muß. Als Meßverfahren wird in der Literatur oft das "Deutsche Einheitsverfahren S4" (DEV S4) oder [DIN 38414] zitiert. Beide Angaben sind identisch, denn die Einheitsverfahren wurden in die deutschen Normen eingegliedert.

Die oben genannte Norm beschreibt die Eluierbarkeit der gemahlener Schlacke mit Wasser und ist für feste, pastöse und schlammige Materialien geeignet. Der Zweck dieser Untersuchung ist die Erfassung der Gewässergefährdungen, wenn die Stoffe nach der Ablagerung oder Deponierung mit Wasser in Kontakt kommen. Für eine Bewertung des Verfahrens S4 ist ein Zitat aus der Norm von Bedeutung:

"Zur Beurteilung des voraussichtlichen Deponieverhaltens und der zum Schutz des Grund- und Oberflächenwassers zu fordernden Ablagerungsbedingungen sind weitere Kriterien zu berücksichtigen."

Danach reichen die Untersuchungen nach DIN 38414 nicht aus, um die Umweltverträglichkeit der Schlacken aus Sondermüllverbrennungsanlagen zu gewährleisten. Außerdem sind aus den Meßergebnissen keine Aussagen über das Langzeitverhalten der Schlacken zu entnehmen. Die Versuchsdauer beträgt nur 24 Stunden.

Über die Nachteile der deutschen Norm wird auch in [Faulstich] berichtet. In einem Vergleich zwischen dem DEV S4-Verfahren und dem Schweizer Auslaugtest (TVA) werden im Fall der deutschen Meßmethode deutlich geringere Schwermetallgehalte gefunden. Bei dem DEV-S4-Test mit Wasser kommt es verfahrensbedingt zu geringeren Löslichkeiten der Schwermetalle. Der Schweizer Auslaugtest wird mit CO<sub>2</sub>-gesättigtem Wasser durchgeführt. Aufgrund des niedrigeren pH-Wertes und zusätzlicher Lösungsgleichgewichte mit Hydrogencarbonationen sind im Eluat höhere Schwermetallgehalte nachweisbar. Nach Meinung der Autoren ist das

Deutsche Einheitsverfahren S4 für die Charakterisierung von Rückständen aus der Müllverbrennung nicht ausreichend.

Zur Beschreibung von Wassergefährdungen durch Schlacken existieren für die Analyseverfahren und Grenzwerte keine bundesweiten oder europäischen Normen. Die bestehenden Richtlinien wurden nicht für die Schlacke aus Verbrennungsanlagen geschaffen, sondern sie stammen aus dem Bereich der Abwasserbehandlung [Hoberg].

### 9.2. Inhaltsstoffe von Schlacken aus Sondermüllverbrennungsanlagen

Der auf die verbrannte Abfallmasse bezogene Schlackenstrom ist in Abhängigkeit vom Abfallinput bei einer Sondermüllverbrennungsanlage nur etwa halb so groß wie bei einer Hausmüllverbrennungsanlage [Demmich]. Für die beiden neuen Drehrohranlagen in Ebenhausen wird bei einem spezifischen Durchsatz von 15 t/h ein Schlackeanfall von 3,4 t/h erwartet [Fürmaier]. Die folgende Tabelle enthält Informationen zu den Inhaltsstoffen von Schlacken aus Sondermüllverbrennungsanlagen:

Tabelle 9.1: Durchschnittliche Zusammensetzung der Schlacken [Eschner]

SiO <sub>2</sub>	34-42	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ca. 10	%
TiO <sub>2</sub>	ca. 6	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20-40	%
CaO	6-11	%
MgO	2-3	%
K <sub>2</sub> O	ca. 1	%
Na <sub>2</sub> O	3-6	%
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BaO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	geringe Anteile	

In [Neukirchen] findet man für Haus- und Sondermüllverbrennungsanlagen in Hertens Angaben über die Feststoffe. Für Schlacken und Filterstäube aus beiden Anlagentypen sind die Inhaltsstoffe und die Eluatwerte nach DEV S4 aufgeführt. Die folgende Tabelle zeigt die mittlere Konzentration einzelner Elemente für die Schlacken.

## 9. Eigenschaften und Verwertung der Schlacke

Tabelle 9.2: Mittlere Konzentrationen einzelner Elemente in den Schlacken [Neukirchen]

	Schlacke der Siedlungsabfall- verbrennung	Schlacke der Sonderabfall- verbrennung
Pb	1349 [mg/kg]	1039 [mg/kg]
Cd	2 [mg/kg]	17 [mg/kg]
Cr	35 [mg/kg]	634 [mg/kg]
Zn	4103 [mg/kg]	2282 [mg/kg]
Cu	1063 [mg/kg]	2071 [mg/kg]
Ni	66 [mg/kg]	665 [mg/kg]
Fe	55019 [mg/kg]	91032 [mg/kg]
Hg	< 0.5 [mg/kg]	< 0.5 [mg/kg]
As	12 [mg/kg]	18 [mg/kg]
Tl	< 10 [mg/kg]	< 10 [mg/kg]
Be	< 2 [mg/kg]	< 2 [mg/kg]
V	< 100 [mg/kg]	< 100 [mg/kg]

In [Schmidt] werden die Inhaltsstoffe der Schlacken genauer untersucht. Die Zusammensetzung der Schlacken zeigt im Vergleich zu Hausmüllverbrennungsschlacken keine deutlichen Unterschiede. In der folgenden Tabelle sind die Daten für die Schlacken aus drei Sondermüllverbrennungsanlagen zusammengefaßt.

Tabelle 9.3: Schlackenzusammensetzung von Sonderabfallverbrennungsanlagen [Schmidt]

	Anlage 1 in %		Anlage 2 in %		Anlage 3 in %		Mittelwerte %
	DW	SA	DW	SA	DW	SA	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,8	0,04	KA	KA	0,4	0,01	0,6
SO <sub>3</sub>	1,0	0,4	KA	KA	1,9	0,2	1,5
Cl	0,7	0,004	KA	KA	1,6	1,0	1,2
Br	0,01	0,005	KA	KA	KA	KA	
Na <sub>2</sub> O	KA	KA	2,5	5,2	2,9	2,9	2,7
K <sub>2</sub> O	1,2	0,05	1,3	1,2	1,8	0,3	1,4
MgO	1,8	0,07	1,31	2,6	2,0	1,2	1,7
CaO	15,0	0,2	6,5	2,5	10,3	3,2	10,6
SiO	17,5	0,2	12,7	3,2	14,6	2,9	14,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,4	0,1	8,6	3,2	7,3	1,9	7,1
TiO <sub>2</sub>	9,1	0,1	KA	KA	0,5	0,03	
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3	0,03	0,06	KA	KA	KA	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,3	0,06	0,20	0,036	0,9	0,01	
MnO	0,4	0,03	0,20	0,04	0,6	0,02	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,2	0,2	16,0	8,2	19,2	6,9	21,5
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,1	0,02	KA	KA	KA	KA	
NiO	0,2	0,02	0,08	0,04	0,08	0,01	
CuO	0,8	0,04	0,28	0,122	0,32	0,13	
ZnO	4,2	0,1	0,59	0,03	2,5	0,02	2,5
SrO	0,3	0,03	KA	KA	KA	KA	
Ag <sub>2</sub> O	0,05	0,01	KA	KA	KA	KA	
CdO	0,1	0,02	< 0,05	KA	0,2	KA	
SnO <sub>2</sub>	0,3	0,03	KA	KA	KA	KA	
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,02	KA	KA	KA	KA	
Cs <sub>2</sub> O	0,03	0,009	KA	KA	KA	KA	
BaO	4,5	0,1	KA	KA	KA	KA	
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,005	KA	KA	KA	KA	
WO <sub>3</sub>	0,1	0,02	KA	KA	KA	KA	
PbO	3,3	0,09	0,31	0,39	0,8	0,01	

DW = Durchschnittswert  
 SA = Standardabweichung  
 KA = keine Angaben

Zusammenfassend ist festzustellen, daß über Schlacken aus Sonderabfallverbrennungsanlagen nur sehr wenige Informationen vorliegen. In der Literatur wurden keine Angaben zum Glühverlust oder Restkohlenstoffgehalt der entsprechenden Schlacken gefunden. Es ist anzunehmen, daß der Glühverlust oder Restkohlenstoffgehalt 1 % nicht überschreitet.

### **9.3. Entsorgung der Schlacken aus Sondermüllverbrennungsanlagen**

Über die derzeitige Verwertung oder Entsorgung der Schlacken enthält die Literatur nur sehr wenige Angaben. Konkrete Aussagen zu dem Verbleib der Schlacken fehlen oft. Eine Verwertung der Schlacke scheitert vor allem an der Akzeptanz dieser Materialien. Nach [Demmich] bleibt dann nur die Deponierung auf Sonderabfalldeponien, auch wenn eine Verwertung im Straßenbau aufgrund nachgewiesener Umweltverträglichkeit und guter Materialeigenschaften möglich wäre.

Nach Einschätzung in [Muckenheim] ist die Schlacke, die den Drehrohfen bei 1200 bis 1300 °C verläßt, verglast. Der Einsatz im Straßenbau sollte möglich sein. Für eine Verwertung industrieller Reststoffe oder Schlacken als Baumaterial müssen die entsprechenden bodenmechanischen Daten bekannt sein. Einige dieser ingenieurgeologischen Kenndaten werden in [Kiefer] genannt und für einige Reststoffe aus dem Kraftwerksbereich bestimmt.

Nach [Berghoff-1] erfolgt die Entsorgung der Schlacke in Abhängigkeit von der Drehrohrbetriebsweise. Wenn die Schlacke flüssig aus dem Drehrohr abgezogen wird, so entsteht nach der Erstarrung ein Feststoff mit glasartigen Eigenschaften, die zu einer sehr niedrigen Eluierbarkeit führen. Diese Schlacken können unter geringeren Anforderungen abgelagert werden. Entsteht im Drehrohr eine teilweise feste Schlacke, so sind an die Deponie schärfere Bedingungen zu stellen. Eine genauere Definition der Bedingungen erfolgt in der genannten Veröffentlichung nicht.

Nach [Hüning] erlaubt die Qualität der Schlacke aus der Drehrohranlage der Bayer AG eine Ablagerung auf Hausmülldeponien. Der Anteil wasserlöslicher Schadstoffe wird als unbedenklich beschrieben.

Das Werk Uerdingen der Bayer AG betreibt zur Behandlung von Abfällen zwei Drehrohranlagen. Die Kesselaschen und Filterstäube werden wieder in das Drehrohr aufgegeben und in die flüssig abgezogene Schlacke eingebunden. Die geringe Eluierbarkeit dieser Schlacken macht eine Ablagerung auf Bauschuttdeponien möglich [Mischer-1].

Die Schlacken aus den Drehrohröfen der BASF AG werden auf einer firmeneigenen Industriemülldeponie abgelagert. Dort existiert eine Monodeponie für Stäube und Schlacken [Dorn-1].

Im Rohstoffrückgewinnungszentrum Ruhr in Herten werden die Schlacken aus Haus- und Sondermüllverbrennungsanlagen auf einer Zentraldeponie für "deponietechnische Zwecke" verwendet [Neukirchen]. Dieser Weg der Verwendung wird nicht näher erläutert. Für die neuen Verbrennungsanlagen der Gesellschaft zur Beseitigung von Sondermüll in Bayern mbH ist eine Ablagerung der Schlacken auf einer eigenen Sondermülldeponie vorgesehen [Fürmaier].

Die Schlacken aus den Anlagen der Hessischen Industriemüll GmbH werden mit 1200 °C aus den Drehrohren abgezogen, so daß ein guter Ausbrand gewährleistet ist. Nach [Erbach-5] könnten diese Materialien einer Reststoffverwertung zugeführt werden. In einer früheren Arbeit [Erbach-3] gibt der Autor an, daß die Schlacken auf einer Sonderabfalldeponie abgelagert werden können. Eine Verwertung der Schlacken im Straßenbau wäre auch möglich [Erbach-4]. Eine eindeutige Aussage zum Verbleib der Schlacken findet man dann in [Erbach-2]. Die Schlacken aus den Drehrohröfen der Hessischen Industriemüll GmbH werden auf einer Sonderabfalldeponie abgelagert. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß die Schlacken jetzt zur Verwertung zugelassen sind [Blume].



## 10. Rauchgasreinigung

### 10.1. Einführung in die Problematik

Die Rauchgase aus Verbrennungsprozessen werden heute weitgehend von Schadstoffen befreit. Maßnahmen zur Abgasreinigung sind nicht nur bei Haus- und Sondermüllverbrennungsanlagen, sondern auch in Kraftwerken, Produktionshallen, Autos usw. eingeführt worden.

Als Schadstoffe sind in den Abgasen organische Verbindungen, Feststoffpartikel mit Schwermetalle und anorganische Schadgase zu erwarten. Bei den anorganischen Schadgasen handelt es sich um CO, HCl, SO<sub>2</sub>, HF und NO<sub>x</sub>. Bei den organischen Verbindungen stehen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (PCB) und vor allem die polychlorierte Dioxine und Furane (PCDD/F) im Mittelpunkt. Die genannten organischen Verbindungsklassen und die Schwermetalle können sowohl gasförmig als auch adsorbiert an Feststoffpartikeln vorliegen. Für das Rohgas nach dem Kessel werden in [VDI 3460] durchschnittliche Schadstoffkonzentrationen angegeben:

Tabelle 10.1: Typische Abgaskonzentration nach Kessel (Rohgas) von überregionalen Sonderabfallverbrennungsanlagen [VDI 3460]

Komponente	Bandbreite			Einheit
Staub	1000	bis	10.000	mg/m <sup>3</sup>
Anorg. Cl- Verbindungen, gerechnet als HCl	3000	bis	10.000	mg/m <sup>3</sup>
Anorg. F- Verbindungen, gerechnet als HF	50	bis	550	mg/m <sup>3</sup>
Summe von SO <sub>2</sub> und SO <sub>3</sub> , gerech- net als SO <sub>2</sub>	1500	bis	5000	mg/m <sup>3</sup>
Stickoxide, gerechnet als NO <sub>2</sub>	100	bis	300	mg/m <sup>3</sup>
Wasserdampf	6	bis	20	Vol-%

## 10. Rauchgasreinigung

Weitere Daten zur Rohgasbelastung findet man z.B. in [Muckenheim]. Von großer Bedeutung für die Anforderungen an die Rauchgasreinigung ist die 17. BImSchV, die im Dezember 1990 in Kraft getreten ist. Diese Verordnung betrifft als "Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche Stoffe" speziell Verbrennungsanlagen für Klärschlamm, Haus- und Sondermüll. In der 17. BImSchV werden für verschiedene Stoffe Emissionsgrenzwerte festgesetzt, die deutlich unter den Vorgaben der TA Luft 86 liegen. Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Grenzwerte zwischen der TA Luft 86 und der 17. BImSchV. Grenzwerte in der Größenordnung der 17. BImSchV werden heute auch in anderen europäischen Ländern gefordert [Schaub].

Tabelle 10.2: Vergleich der Emissionsgrenzwerte nach TA Luft und 17 BImSchV.  
Angaben in mg/m<sup>3</sup> i. N. trocken bezogen auf 11 % O<sub>2</sub> (zitiert aus [Liss])

	Grenzwerte TA Luft		Grenzwerte nach 17. BImSchV	
	Tages- mittelwerte	Halbstd- Mittelwert	Tages- mittelwerte	Halbstunden- mittelwerte
Gesamtstaub	30	60	10	30
Σ C <sub>org</sub>	20	40	10	20
CO	100	200	50	* 100
HCl	50	100	10	60
HF	2	4	1	4
SO <sub>2</sub> (SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> )	100	200	50	200
NO <sub>x</sub>	500	1000	200	400
Schwermetalle	Klasse 1: Σ 0,2 (Hg, Cd, Tl) Klasse 2: Σ 1,0 (As, Co, Ni, Se, Te) Klasse 3: Σ 5,0 (Pb, Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn)		Cd, Tl: Σ 0,05 Hg: 0,05 Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn Σ 5,00	
Dioxine/Furane	nicht berücksichtigt (Minimierungsgebot)		0,0000001 mg/m <sup>3</sup> (0,1 ng/m <sup>3</sup> )	

\* Stundenmittelwert

Zusätzlich werden Grenzwerte für Dioxine und Furane sowie bestimmte Meßverfahren vorgegeben. Diese Verordnung greift auch in die Feuerung ein, indem bestimmte Verweilzeiten, Temperaturen usw. gefordert werden. Damit gelten für Abfallverbrennungsanlagen wesentlich schärfere Grenzwerte als z.B. für Kraftwerke, die fossile Brennstoffe verbrennen.

Die einzelnen Verfahren zur Abtrennung dieser Schadstoffe wurden allerdings nicht speziell für die Reinigung von Abgasen entwickelt. Es handelt sich vielmehr um Verfahren, die auf den allgemeinen mechanischen, thermischen und chemischen Grundoperationen der Verfahrenstechnik aufbauen. Aus dem Kraftwerkssektor, der Hausmüll- und Sondermüllverbrennung sowie anderen Bereichen der Technik liegen heute umfangreiche Erfahrungen vor. Entscheidend für die Auswahl eines Verfahrens sind nach [VDI 3460] die folgenden Kriterien (Zitat):

- abfallspezifische Stoffe im ungereinigten Abgas,
- Art, Massenstrom sowie Änderungen von Massenstrom und Massenkonzentration der Abgasinhaltsstoffe,
- zulässiger Restgehalt an luftfremden Stoffen nach bestehenden Regelwerken,
- Abwasservermeidung, Abwasserminimierung, Abwasserreinigung,
- Verfügbarkeit (Korrosion, Verschleiß, Verschmutzung),
- Abgastemperatur am Schornsteinende,
- Vermeidung, Verwertung und Entsorgung von Reststoffen,
- Verfügbare Flächen, insbesondere in Hinblick auf weitere erforderliche Reinigungsanlagen (z.B. NO<sub>x</sub>-Minimierung).

Für die Konstruktion von Systemen zur Rauchgasreinigung sind neben den Rauchgasdaten auch örtliche Gegebenheiten und Auflagen der Behörden zu beachten. Von den Vorschriften der Behörden hängt es unter anderem ab, ob das Rauchgasreinigungssystem abwasserfrei ausgelegt werden muß oder nicht. Bei Neuanlagen muß die Rauchgasreinigung abwasserfrei konzipiert werden.

Die verschiedenen Verfahren zur Abtrennung von SO<sub>2</sub>, HCl und HF sind in trockene, quasitrockene und nasse Verfahren einzuteilen. Trockene und quasitrockene Verfahren erfordern eine überstöchiometrische Zugabe der Sorptionsmittel zur Abtrennung der verschiedenen Schadgase. Dies führt zu größeren Rückstandsmengen aus der Rauchgasreinigung, die entsorgt oder aufgearbeitet werden müssen.

Heute werden überwiegend nasse Absorptionsverfahren angewendet [Hofmann]. Diese Naßabsorptionsverfahren sind für Sondermüllverbrennungsanlagen besser geeignet, denn die sich verändernden Abgaszusammensetzungen erfordern eine Regelung der Rauchgasreinigungsanlagen [Berghoff-1].

Im Fall der Entstickungsverfahren sind zwei grundlegende Verfahrenswege zu unterscheiden. Bei dem SNCR-Verfahren erfolgt die Entstickung durch eine nicht-katalysierte Reduktion mit Ammoniak oder anderen Stickstoffverbindungen im Bereich von 900 bis 980 °C. Der Minderungsgrad für die Stickoxide liegt in der Größenordnung von 50 % bei stöchiometrischer Zugabe von Ammoniak [Greil]. Deutlich höhere Umsetzungsraten lassen sich nur mit einem Ammoniaküberschuß erreichen. Im Fall des katalysierten Verfahrens (SCR) liegen die Temperaturen mit 300 bis 320 °C deutlich niedriger. Es wird ein Metalloxidkatalysator verwendet, der überwiegend aus  $\text{TiO}_2$  besteht. Mit diesem Verfahren können bei stöchiometrischer Ammoniakdosierung etwa 90 % der Stickoxide entfernt werden. Umfangreiche Informationen zu dem SCR-Verfahren findet man in [Köser].

Die scharfen gesetzlichen Auflagen für die Rauchgasgrenzwerte können heute nicht mehr durch ein einziges Verfahren erfüllt werden. Es sind Kombinationen verschiedener Prozesse erforderlich [Haji] [Thomé]. Außerdem werden aufgrund der eingeschränkten Abscheidung von Partikeln unterhalb von 2  $\mu\text{m}$  im Elektrofilter in Neuanlagen verstärkt Gewebefilter eingesetzt. Ein weiteres Argument für die Anwendung von Gewebefiltern ist eine geringere Dioxinbildung. Es muß in diesem Zusammenhang angemerkt werden, daß Gewebefilter bei deutlich niedrigeren Temperaturen betrieben werden als Elektrofilter. Die geringere Dioxinbildung im Gewebefilter könnte folglich nur aus der geringeren Betriebstemperatur resultieren. Für eine Vorhersage des Betriebsverhaltens von Staubabscheideverfahren sind zusätzliche Grundlagenuntersuchungen erforderlich [Denzer].

In [Haji] findet man Aussagen zur Wirtschaftlichkeit eines Rauchgasbehandlungssystems für zwei verschiedene Verbrennungsanlagen. Neue Verfahrensstufen, wie die Entstickung und die Adsorption an Aktivkoks bzw. Flugstromverfahren zur Einhaltung der aktuellen Grenzwerte nach der 17. BImSchV, werden in dieser Arbeit berücksichtigt. Im Fall der Sondermüllver-

brennungsanlage ist für die Rauchgasreinigung ein Betrag von 348 DM je Tonne Abfall erforderlich. Die Kosten bei der Verbrennung von Hausmüll belaufen sich auf etwa 119 DM/t.

Die verschiedenen Aspekte der Abgasreinigung machen deutlich, daß dieses Themengebiet sehr umfangreich ist. Einen guten Überblick über die Reinigung von Rauchgasen aus Sondermüllverbrennungsanlagen erhält man aus [VDI 3460]. Dort werden auch die aktuellen Probleme der Rauchgasreinigung wie die Entstickung und die geringen Grenzwerte für Dioxine (17. BImSchV) erfaßt. Ein weiteres Kapitel enthält eine umfangreiche Anleitung zur Messung von Emissionen mit Literaturangaben zu den einzelnen Verfahren. Eine Übersicht über die einzelnen Möglichkeiten und Verfahren findet man auch in [Stegmann-1], [Stegmann-2] u. [Hackl]. Möglichkeiten zur Reduzierung von Dioxinemissionen werden von [Vogg-1] erläutert. Im Anhang der vorliegenden Arbeit ist ein zusätzliches Literaturverzeichnis zu finden, in dem aktuelle Literaturstellen zur Rauchgasreinigung zusammengefaßt sind.

Im folgenden Text werden neue Verfahrensstufen kurz vorgestellt, die zur Einhaltung der strengen Grenzwerte der 17. BImSchV zusätzlich eingesetzt werden können. An einigen Beispielen werden dann die Veränderungen im Rauchgasreinigungssystem durch diese neuen Apparate aufgezeigt. Außerdem wird kurz auf die Problematik der anfallenden Reststoffe eingegangen. Für die genauen Vorgänge und Abscheideleistungen der einzelnen Rauchgasreinigungsstufen sei auf die Literatur verwiesen.

### 10.2. Neuere Verfahren zur Rauchgasreinigung

Die bisherigen Einrichtungen zur Rauchgasreinigung umfaßten in der Regel einen Elektrofilter zur Staubabscheidung und eine meist zweistufige Rauchgaswäsche. In der ersten Waschstufe wird bei niedrigen pH-Werten HCl aus dem Rauchgas entfernt. Außerdem wird hier HF und HgCl<sub>2</sub> absorbiert. Die Abscheidung von SO<sub>2</sub> erfolgt überwiegend in dem zweiten Wäscher, der im neutralen bis alkalischen Bereich betrieben wird.

Neben diesen Verfahrensstufen, die für eine Rauchgasreinigung nach TA Luft 1986 ausreichend sind, werden für die Erfüllung der strengeren Grenzwerte aus der 17. BImSchV in der Literatur die folgenden Verfahren diskutiert:

Verfahren	Schadstoffe
Adsorption der Schadstoffe im Kohlefestbett	saure Schädgase, Restorganika und Hg
Flugstromadsorber	
Adsorption in einer Wirbelschicht	
Katalytische und nicht katalytische Prozesse	NO <sub>x</sub> und Dioxine/Furane

Mit den ersten drei Verfahren können die Emissionen an sauren Schädgasen, restlichen organischen Bestandteilen und Quecksilber reduziert werden. Die zulässigen Abgaskonzentrationen werden durch verschiedene Adsorptionsvorgänge an Ca-Verbindungen, Herdofenkoks oder Aktivkohle erreicht. Der Herdofenkoks/Aktivkohlegehalt liegt im Bereich von 5 %. Für das Gemisch aus Ca(OH)<sub>2</sub> und Herdofenkoks bzw. Aktivkohle werden neben "Sorbalit" auch andere Handelsnamen verwendet.. Weitere Informationen zu diesem Material findet man z.B. in [Nethe].

Mit den katalytischen Prozessen können nur die Konzentrationen von NO<sub>x</sub> und den organischen Schädstoffen im Rauchgas reduziert werden. Die nicht katalytischen Verfahren eignen sich nur zur Absenkung der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen.

### 10.2.1. Festbettadsorber

In solchen Apparaten werden gasförmige Schädstoffe in einem Kohlefestbett adsorbiert, wobei neben Aktivkohle auch Koks eingesetzt wird. In [Löser] wird z.B. ein Kreuzstrom-Festbett-Filter vorgestellt, der sich von den herkömmlichen Festbettadsorbern unterscheidet.

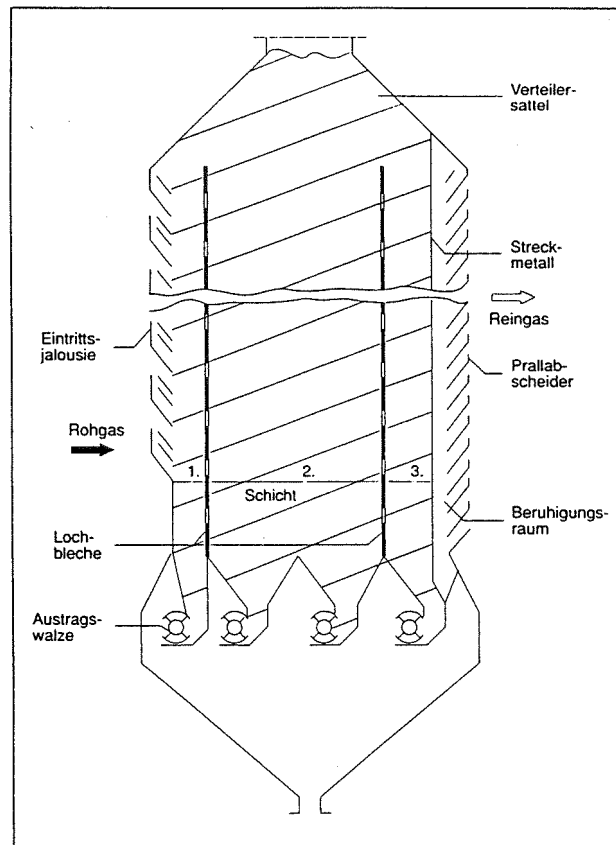


Abb. 10.1: Kreuzstrom-Festbettadsorber [Löser]

In diesen speziellen Adsorbern befindet sich der Feststoff in Bewegung. Der Adsorber selbst ist in drei Zonen aufgeteilt, in denen sich die Kohle bewegt. Durch die Konstruktion des Austragssystems läßt sich die Verweilzeit der Aktivkohle in den verschiedenen Zonen steuern. Diese Steuerung ist als ein wesentlicher Vorteil im Vergleich zu den normalen Festbettadsorbern anzusehen.

Bei nicht gleichmäßiger Durchströmung von Festbettadsorbern besteht die Gefahr, daß die freiwerdende Adsorptionswärme nicht schnell genug abgeführt wird. Es können sich Glutnester bilden, die zur Selbstentzündung der Feststoffschüttung führen. Die Selbstentzündungstemperaturen für entsprechende Kokssorten werden in [Ritter] mit 200 bis 300 °C angegeben. Die Glimmnestbildung führt allerdings nicht zu einer Freisetzung der adsorbierten Schadstoffe. Die in Glimmnestern freigesetzten Stoffe werden in den folgenden Koks-schichten wieder adsorbiert [Modolo]. Trotzdem werden als Sicherheitsmaßnahmen Einrichtungen zur Stickstoffflutung vorgesehen.

### 10.2.2. Flugstromadsorber

Das Konzept der Flugstromadsorber beruht auf einem einfachen Prinzip. In das Rauchgas wird ein festes Reagenz aus Calciumhydroxid und Herdofenkoks oder Aktivkohle zugemischt. Die Schadstoffe aus dem Rauchgas lagern sich auf der Oberfläche an oder reagieren mit dem Feststoff. Das beladene Adsorptionsmittel wird anschließend in einem Filtrationsapparat, meist ein Gewebefilter, abgeschieden. Der entstehende Filterkuchen trägt zu einer weiteren Abscheidung von Schadstoffen aus dem Rauchgas bei.

In [Mosch] werden für das Flugstromverfahren und die Adsorption im Koksbed die gleichen Emissionswerte angegeben. Für die Kriterien Druckverlust, Reagenzhandhabung, Sicherheit, Platzbedarf und Kosten hat nach Meinung des Autors das Flugstromverfahren Vorteile. Weitere Informationen über dieses System findet man in [Jungmann], [Gottschalk-1] u. [Gottschalk-2]. Die Müllverbrennungsanlage in Zirndorf wird für die wirtschaftliche Beseitigung des kontaminierten Reststoffs hervorgehoben, die durch Rückführung in den Müllöfen erfolgt.

Ein ähnlicher Verfahrensweg wird bei der Rauchgasreinigung der Sondermüllverbrennungsanlage Schöneiche angewendet [Mosch]. Entsprechende Daten über die Emissionen findet man in [NN-1].

Eine Abwandlung des Flugstromverfahrens wird in [Vicus] vorgestellt, dessen Anwendung sich auf die quasitrockene Rauchgasreinigung beschränkt. Der Herdofenkoks oder die Aktivkohle werden nicht in einer separaten Reaktionsstrecke in den Rauchgasstrom eingeführt, sondern werden bei der Aufbereitung der flüssigen Absorberphase zudosiert. Die Abscheidung der beladenen Sorbenzien erfolgt dann in einem nachgeschalteten Gewebefilter.

In [Morun] wird ein weiteres Verfahren zur Einhaltung der Grenzwerte nach der 17. BImSchV beschrieben. Das modifizierte und konditionierte Trockensorptionsverfahren erreicht die geforderten Restkonzentrationen durch eine Zweistufensorption. In der ersten Stufe erfolgt durch Sprühsorption größtenteils die Abscheidung der sauren Schadgase. Die zweite Stufe ermöglicht dann durch Zugabe eines speziellen trockenen Sorptionsmittels die



Abtrennung der restlichen sauren Bestandteile sowie der Dioxine und relevanten Schwermetalle.

### 10.2.3. Wirbelschichtadsorber

Der Einsatz einer zirkulierenden Wirbelschicht im halbtechnischen Maßstab zur Rauchgasreinigung wird in [Hefni-O.] erläutert. Als Adsorbens wird ein Gemisch aus Herdofenkoks und Kalk eingesetzt und anschließend in einem Gewebefilter abgeschieden. Der Feststoff wird dann der Verbrennung zugeführt, wobei die Dioxine thermisch zersetzt und das Quecksilber im Wäscher abgeschieden werden. Die sehr gute Durchmischung von Gasphase und Feststoff in der Wirbelschicht ist nach Aussage der Autoren der Grund für die besonders hohen Abscheideleistungen.

Eine vergleichende Gegenüberstellung zwischen dem Festbett, dem Flugstromadsorber und dem Wirbelschichtverfahren ist in [Vicinus] zu finden. Aufgrund der verschiedenen Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren gibt es keine allgemein anwendbare optimale Lösung.

### 10.2.4. Katalytische Zerstörung von $\text{NO}_x$ und PCDD/F

Einen Beitrag über die weiter fortschreitende Anwendung der Katalyse stellt die Entwicklung der BASF AG in Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen dar. Es wurde ein Katalysatorsystem entwickelt und zur Anwendungsreife gebracht, das zur Entstickung und zur Zersetzung von Dioxinen eingesetzt werden kann [NN-5] [Spahl]. Die Abbildung unten gibt den schematischen Aufbau einer solchen Reinigungsstufe wieder.

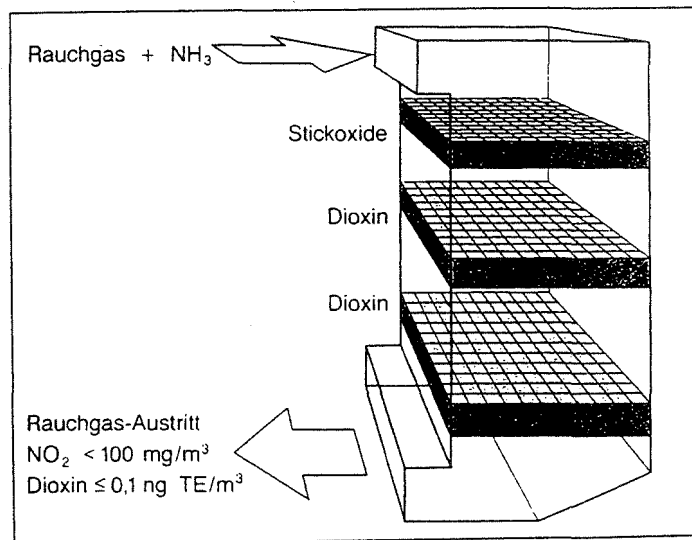


Abb. 10.2: Kombireaktor für NO<sub>x</sub>- und Dioxinabbau [Spahl]

Im ersten Schritt wird nach der SCR-Technologie mit einem Oxidationskatalysator das NO<sub>x</sub> aus dem Rauchgas entfernt. In der zweiten Stufe erfolgt eine katalytische Zerstörung der Dioxine und Furane. Bei dem Katalysator handelt es sich um einen weiterentwickelten SCR-Kontakt [Spahl].

Im Gegensatz zu anderen Verfahren erfolgt hier eine oxidative Zerstörung der Dioxine, ohne daß zusätzliche Adsorptionsmittel benötigt werden. Dieser Oxidationskatalysator ist allerdings nur für die Zerstörung von Dioxinen und NO<sub>x</sub> geeignet, nicht für andere, anorganische Bestandteile.

### 10.2.5. Nicht katalytische Entstickung

Für die Absenkung der rauchgasseitigen NO<sub>x</sub>-Emissionen unter die Werte der 17. BImSchV kann auch das SNCR-Verfahren eingesetzt werden, wo NH<sub>3</sub> oder andere Stickstoffverbindungen bei ca. 900 °C direkt dem Rauchgas beigemischt werden. Als Produkte entstehen Stickstoff und Wasser. In der MVA Bremerhaven und der KVA Emmenspitz wird dieses

Verfahren erfolgreich eingesetzt [Greil]. Zusätzlich wird durch die Zudosierung von Ammoniak auch die Dioxinbildung reduziert.

Durch die Zuführung von Ammoniak in das Rauchgas entstehen in der Anlage keine Schwierigkeiten. Probleme mit Geruch, Einwirkungen auf den Kessel oder Mehrbelastungen des Filterstaubs wurden nicht beobachtet. Die nicht umgesetzten Ammoniakmengen werden in der nachgeschalteten Rauchgaswäsche entfernt und können zurückgewonnen werden [Greil].

An Stelle von Ammoniak können auch andere Stickstoffverbindungen oder auch stickstoffhaltige Abwässer eingesetzt werden. Über entsprechende Versuche an einer technischen Drehrohranlage wird in [Keller-R.] berichtet. Die stickstoffhaltigen Abwässer wurden in die Nachbrennkammer bei Temperaturen von etwa 1000 °C eingedüst. Neben einer ausreichenden Stickstoffkonzentration von möglichst nur einer Verbindungsform im Abwasser dürfen keine unerwünschten Nebenprodukte gebildet werden [Keller-R.]. Die Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen ist von den eingesetzten Abwasserinhaltsstoffen abhängig.

Tabelle 10.3: Reduktionsraten mit verschiedenen stickstoffhaltigen Abwässern [Keller-R.]

Reduktionsmittel	NO <sub>x</sub> -Reduktionsgrad %	Stöchiom. Faktor
NH <sub>3</sub> -Wasser	21,4 - 23,6	3,0
Cyanid	13,1 - 15,2	1,8
Amine	12,9 - 14,6	5,6

Der geringe Effekt im Fall des aminhaltigen Abwassers wird mit dem hohen Temperaturniveau von über 1000 °C am Ort der Eindüsung begründet [Keller-R.].

### 10.3. Rauchgasreinigung an Drehrohranlagen

In diesem Kapitel erfolgt eine kurze Beschreibung von realisierten Rauchgasreinigungsanlagen. Zunächst wird der Verfahrensweg für eine Anlage in Herten genauer betrachtet.

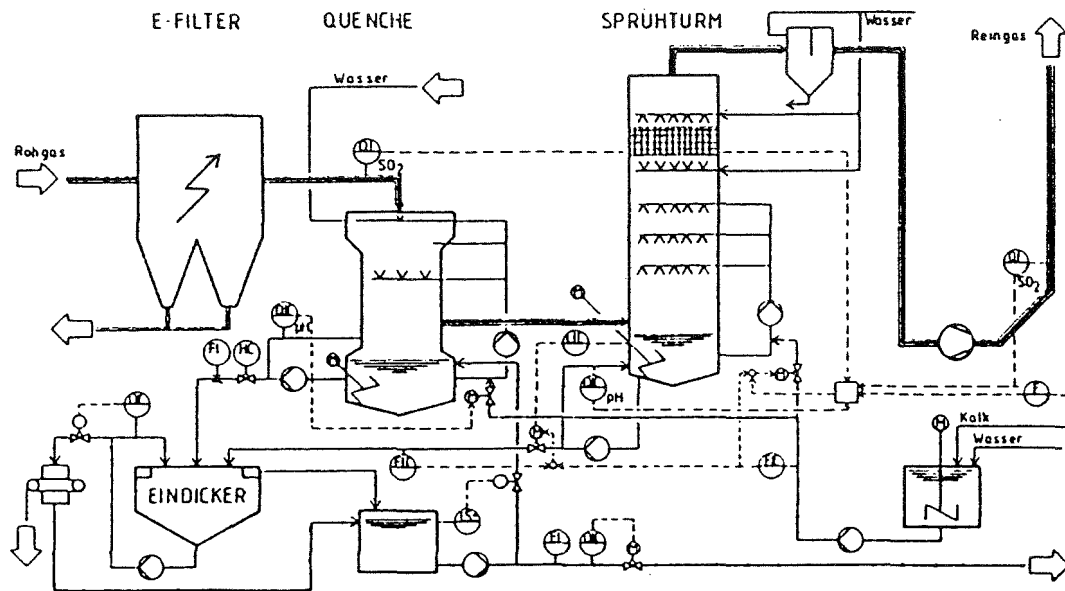


Abb. 10.3: Rauchgasreinigungsanlage in Herten [Kubisa-2] (1988/89)

Das Rauchgas durchströmt hier zunächst einen Elektrofilter und anschließend zwei Waschstufen. In der ersten, sauer betriebenen Stufe erfolgt auch eine Abkühlung der Rauchgase auf die Kühlgrenztemperatur. Die nachfolgende alkalische Waschstufe ist als Sprühturm mit drei Ebenen konzipiert. Zur Neutralisation der Absatzung aus der ersten Stufe und als Absorptionsmittel in der zweiten Stufe wird Kalkmilch verwendet. Aus den entstehenden Abwässern werden Feststoffe mit den Hauptkomponenten Gips und Calciumchlorid abgetrennt.

Die Veränderungen im Rauchgasreinigungssystem der Anlage in Herten durch die 17. BImSchV mit den im Vergleich zur TA Luft verschärften Grenzwerten werden in [Liss] erläutert. Danach wird die bisherige Rauchgasreinigung der Industriemüllverbrennungsanlage IM1, bestehend aus Elektrofilter und zweistufigem Wäscher, um ein zweistufiges Adsorptionsverfahren erweitert. In einem Kreuzstromadsorber wird zunächst eine Schicht aus Herdofenkoks durchströmt. Hier werden die organischen Bestandteile (Dioxine, Furane, Kohlenwasserstoffe) und die Reste der anorganischen Schadgase aus dem Abgasstrom entfernt. In der zweiten Adsorptionsschicht werden am Aktivkoks mit Ammoniak die Stickoxide zerstört. Bei der anderen Verbrennungsstraße für Sondermüll (IM2) wird der

Kreuzstromadsorber mit nur einer Adsorptionsstufe (Herdofenkoks) ausgeführt. Die anschließende Reduktion der Stickoxide erfolgt mit einem Metalloxidkatalysator.

Die Entfernung der organischen Stoffe und der Schwermetalle mit Herdofenkoks in dem Festbettreaktor der IM1 hat sich sehr gut bewährt. Die Reduktion von Stickoxiden an der mit Aktivkoks gefüllten zweiten Schicht erwies sich dagegen als nicht optimal. Der Reduktionsgrad lag im Bereich von nur 60 %, außerdem wurde eine CO-Entwicklung festgestellt. Aus diesen Gründen wurde für die andere Anlage in Herten (IM2) einem Metalloxidkatalysator der Vorzug gegeben [Glinka]. Weitere Informationen über die Rauchgasreinigung dieser Anlagen sind in [Hofmann] zu finden.

In [Kubisa-1] und [Kubisa-2] wird 1988/89 auch die Rauchgasreinigung für eine Drehrohr-ofenanlage in Leverkusen bei einem Chemiewerk beschrieben, die aus den gleichen Verfahrenskomponenten wie die Anlage in Herten aufgebaut ist. Allerdings erfolgt die Wäsche in insgesamt drei Stufen mit einem nachgeschalteten Naß-Elektrofilter. Für diese Anlage dürfte aufgrund der veränderten Grenzwerte ebenfalls eine Optimierung der Rauchgasreinigung erforderlich sein.

In [Reher] wird für den Standort Leverkusen der Bayer AG ein modernes Konzept für die Rauchgasreinigung einer Sonderabfallverbrennungsanlage vorgestellt. Das Konzept entspricht dem im vorangegangenen Absatz beschriebenen System, allerdings mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe. Eine gesicherte Zuordnung ist aufgrund der Informationen in der Literatur nicht möglich.

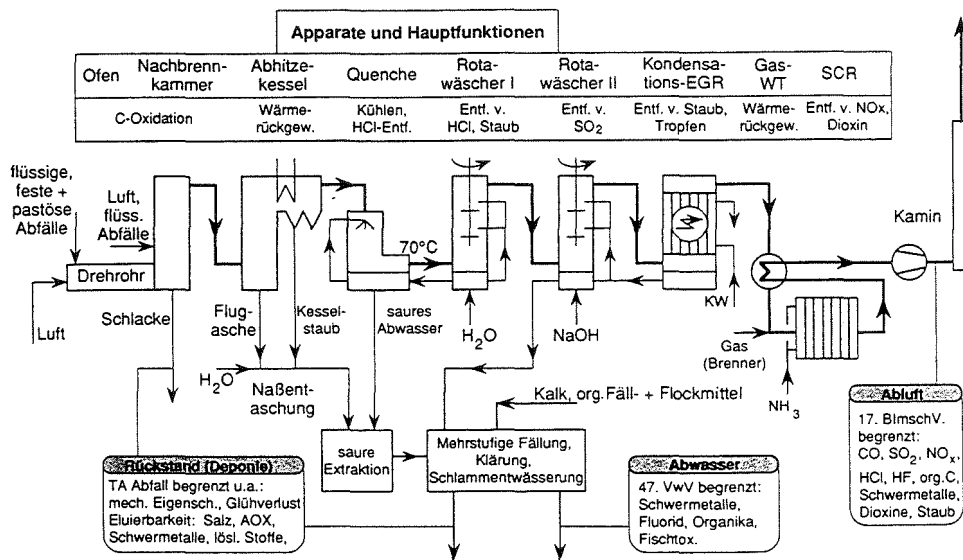


Abb. 10.4: Verfahrensfliessbild für eine Rückstandsverbrennungsanlage der Bayer AG [Reher]

Dieses System besteht aus einem dreistufigen Wäschersystem (Quenche u. zwei Rotawäscher) mit einem anschließenden Elektrofilter zur Entstaubung. Die Grenzwerte für NO<sub>x</sub> und Dioxine werden durch eine nachgeschaltete Katalysatorstufe eingehalten [Reher]. Eine ähnliche Rauchgasreinigungsanlage ist auch für die neue Drehrohranlage am Standort Dormagen der Bayer AG vorgesehen [NN-4].

Die Entwicklung der Rauchgasreinigungsanlagen bei der Hessischen Industriemüll GmbH in Biebesheim sind in [Schöner-1] zusammengefasst. Danach bestand das Rauchgasreinigungssystem 1982 aus den folgenden Baugruppen:

- Sprühturm für die Flüssigkeiten aus den nachgeschalteten Waschstufen
- Zyklon
- Quenche zur Rauchgasabkühlung auf 65 °C
- Zweistufige Wäsche zur Abscheidung von HCl/HF und SO<sub>2</sub>/Aerosolen.

Probleme mit diesem Rauchgasreinigungssystem erforderten einen Umbau, der zu einer weiteren externen Wäscherstufe für SO<sub>2</sub> führte. Im Jahr 1988 wurden Verschleißerscheinungen an der Rauchgasreinigungsanlage deutlich. Außerdem war eine weitere Verschärfung der

Grenzwerte abzusehen. Im Zuge der Renovierung wurde der Zyklon gegen einen Elektrofilter ausgetauscht und die Wäscher erneut umgebaut [Schöner-1] [Greil]. Mit diesem Rauchgasreinigungssystem ist die Einhaltung der Grenzwerte nach der 17. BImSchV, bis auf die Vorgaben für Dioxin- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen, gesichert [Greil].

Zur Reduzierung der Dioxinmissionen wurde ein Flugstromverfahren nachgerüstet. Diese Verfahrensstufe ist direkt hinter dem Wäschersystem angeordnet und wird bei einer Rauchgastemperatur von  $110\text{ °C}$  betrieben. Zur Adsorption wird eine Mischung aus 65 % Kalkhydrat und 35 % Aktivkohle verwendet [Greil].

Durch eine Beimischung von Aktivkohle in das Rauchgas vor dem Sprühtrockner ist eine Reduzierung der Quecksilberemissionen um etwa 90 % möglich. Außerdem kann durch eine Zugabe von Ammoniak in die Tertiärluft der Nachbrennkammer der  $\text{NO}_x$ -Ausstoß von 200 bis  $230\text{ mg/Nm}^3$  auf etwa  $60\text{ mg/Nm}^3$  begrenzt werden (SNCR-Verfahren, vergl. Kapitel 8.5.3) [Greil].

Ein interessantes Verfahren ist in das Rauchgasreinigungssystem der Sondermüllverbrennungsanlage bei der Fa. DOW in Stade integriert. Hier besteht in einer zusätzlichen Absorberstufe vor dem Kamin die Möglichkeit, mit Natronlauge aus dem Rauchgas  $\text{CO}_2$  auszuwaschen. Das entstehende Natriumcarbonat wird als Rohstoff im Unternehmen eingesetzt. Außerdem wird im Rauchgasreinigungssystem Salzsäure gewonnen [DOW].

Das neue, in drei Linien zusammengefaßte Rauchgasreinigungssystem für die Anlagen der BASF AG unterscheidet sich in einem wesentlichen Punkt von dem Konzept anderer Betreiber. Die folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau:

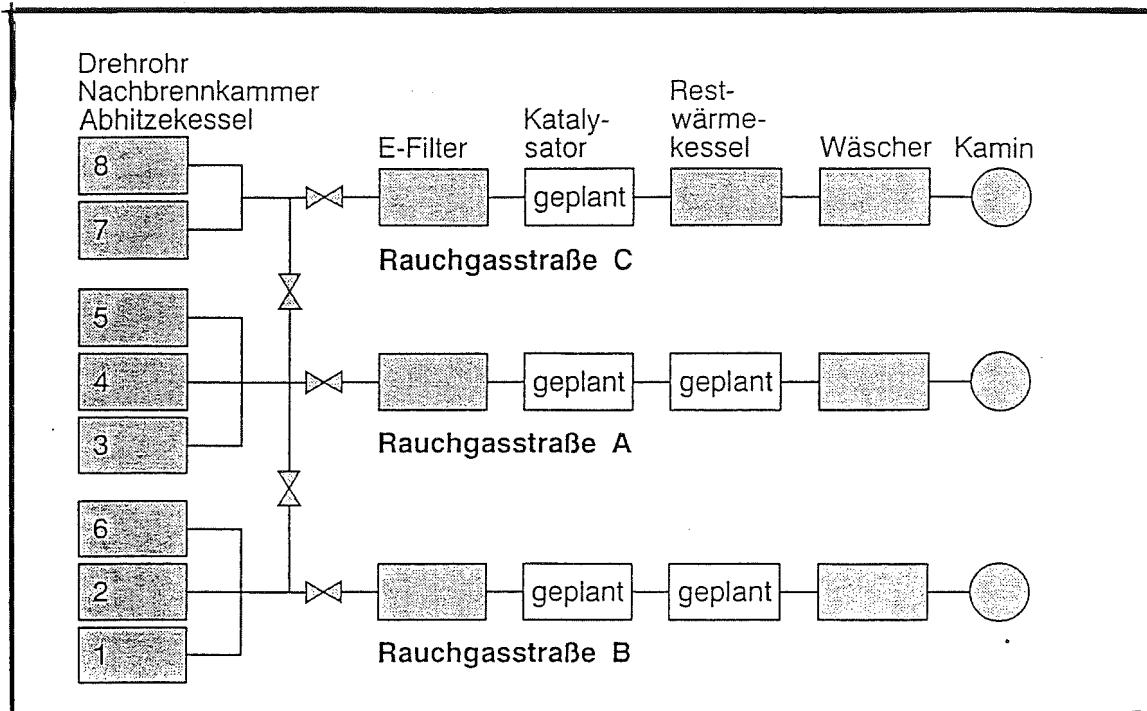


Abb. 10.5: Rauchgasreinigung der BASF AG [Joschek-1]

Den einzelnen Verbrennungsanlagen ist keine separate Rauchgasreinigung nachgeschaltet. Für die acht Verbrennungsanlagen der BASF AG gibt es drei Rauchgasreinigungsstraßen, in denen die Rauchgase von 2 oder 3 Drehrohranlagen gereinigt werden.

Außerdem ist in den einzelnen Rauchgasreinigungsstraßen ein zusätzlicher Restwärmekessel eingebaut bzw. geplant. Die Rauchgase verlassen den Elektrofilter mit einer Temperatur von 290 bis 320 °C, die für den Betrieb der Katalysatorstufe ausreichend ist. Die bei dieser Temperatur im Elektrofilter gebildeten Dioxine und Furane werden dann in der nachgeschalteten Katalysatorstufe wieder zerstört. Eine zusätzliche Erwärmung der Rauchgase für den Betrieb der Katalysatorstufe ist bei diesem Konzept nicht erforderlich [Joschek-1].



10.4. Reststoffe

Die Rauchgasreinigung ist mit zunehmenden Problemen der Reststoffentsorgung verbunden. Neben den Produkten aus der Reinigung der Wäscherabwässer fallen in verschiedenen Filtereinrichtungen Feststoffe an.

Eine Einführung in die Problematik der Reststoffentsorgung findet man in [Vehlow-1], [Vehlow-2] oder [Reimann-3], entsprechende Daten für Hausmüllverbrennungsanlagen sind in [Barniske-1] aufgeführt. Für die Rückstände aus der Abfallverbrennung sind in der folgenden Abbildung die möglichen Kontaminationen mit Schadstoffen und die anschließenden Entsorgungswege zusammengefaßt.

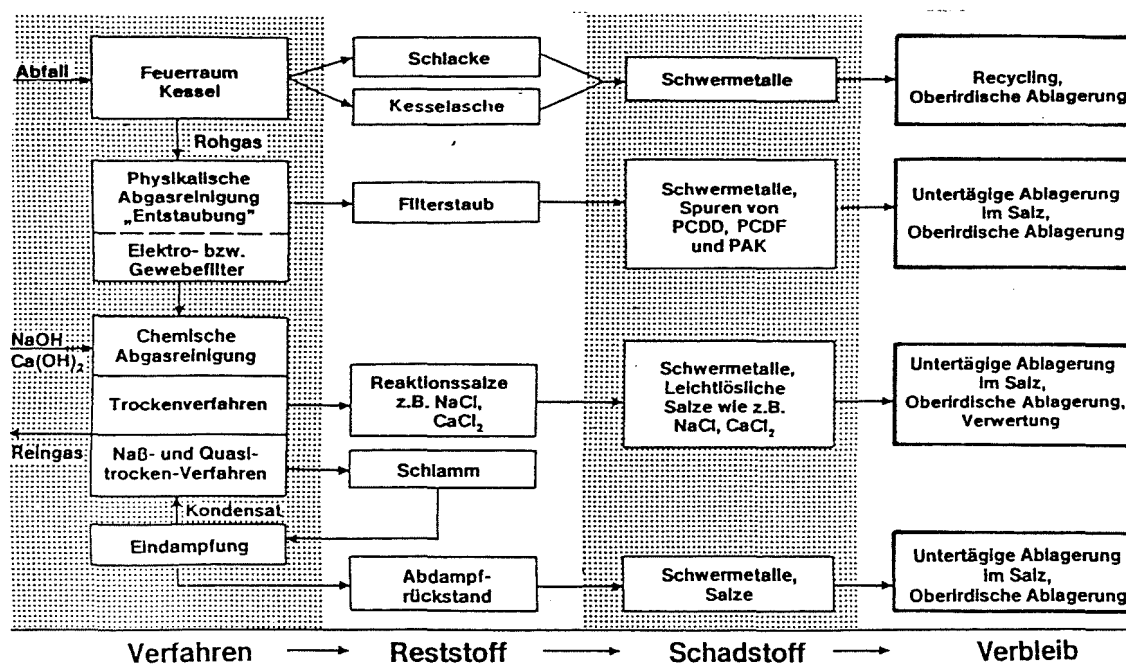


Abb. 10.6: Entstehungsort und Verbleib der Schadstoffe bei der Abfallverbrennung [Jakob]

Die Kesselasche und Schlacken sind in der Regel auch mit Spuren von Dioxinen (PCDD), Furanen (PCDF) und polyzyklischen Kohlenwasserstoffen (PAK) belastet. Außerdem erscheint eine oberirdische Ablagerung nur für die Schlacken möglich. Insbesondere die Reaktionssalze aus der Rauchgasreinigung (Trockenverfahren) und der Abdampfrückstand

der Eindampfung (Naß- und quasitrockene Verfahren) sind sehr gut in Wasser löslich und müssen deshalb Untertage deponiert werden.

In der Abbildung 10.6 sind die Reststoffe der neueren Rauchgasreinigungsverfahren nicht aufgeführt. Es fehlen die Reststoffe aus den Flugstromverfahren und die beladenen Aktivkohlen aus den Fest- und Wanderbettadsorbern. Diese Reststoffe können dem Drehrohrofen zugeführt werden. Im Fall der Neuanlagen am Standort Ebenhausen ist dieser Entsorgungsweg für den Rückstand aus dem Flugstromverfahren vorgesehen [Fürmaier].

Im Elektrofilter hinter dem Kessel fallen bei den Altanlagen in Ebenhausen etwa 5 % der 70.000 t/a [Nikolai] verbrannten Sonderabfallmenge als Filterstaub an, der abgelagert wird. In [Hundesrügge] wird über qualitative und quantitative Untersuchungen an Rückständen aus Verbrennungsanlagen berichtet. In den Filteraschen aus der Sondermüllverbrennungsanlage in Biebesheim wurden sehr hohe Konzentrationen an leichtlöslichen Salzen gefunden. Der Grund für diese hohen Salzanteile liegt im Aufbau der entsprechenden Rauchgasreinigungsanlage, denn an der Anlage in Biebesheim ist direkt nach dem Kessel ein Sprühtrockner in die Rauchgasreinigungsanlage installiert. Die Filteraschen müssen in Untertagedeponien abgelagert werden. Verwertungs- oder Behandlungsmöglichkeiten gibt es nach Aussage des Autors nicht.

Das NaCl aus den Rauchgasreinigungsanlagen ist nach Untersuchungen in [Enders] in der Chlor-Alkalielektrolyse nicht einsetzbar. Es muß mit dem normalerweise eingesetzten Natursalz vermischt oder aufgearbeitet werden.

Eine interessante Beurteilung der Absorbenzien für die Rauchgasreinigung wird von [Kürzinger] durchgeführt. Während früher Chlor das Zielprodukt der Chloralkalielektrolyse darstellte, ist heute die Natronlauge der Wertstoff. Der Autor nennt als Alternative für die Beseitigung von HCl aus den Rauchgasen die Gewinnung von Salzsäure. Dieser Überlegungen werden auch von [Thomé] angeführt. Es ist zu beachten, daß die Nachfrage nach Chlor oder Natronlauge vom aktuellen Bedarf der chemischen Industrie abhängt. Dies kann bedeuten, daß die Produktion von Chlor wieder an Bedeutung gewinnt.

[Mischer-1] berichtet über die Einbindung der im Kessel und Elektrofilter anfallenden Rückstände in die Schlacke des Drehrohres. Die Rückstände werden zu diesem Zweck dem Drehrohr zugeführt, wobei diese Rückstandsmenge vermutlich ca. 12 % der gesamten Feststoffabfälle beträgt. Aus der sehr kurzen Beschreibung des Verfahrens zeichnen sich außerdem Probleme mit Schwermetallen aufgrund dieser Art der Rückführung ab.

### 11. Beschreibung einer großtechnischen Drehrohranlage

In den bisherigen Ausführungen wurden die Drehrohranlagen allgemein betrachtet. Anhand eines Beispiels wird in diesem Kapitel eine großtechnische Anlage genauer erläutert. Die folgende Beschreibung der neuen Verbrennungsstraßen der Gesellschaft zur Entsorgung von Sondermüll in Bayern (GSB) beruht auf Informationen aus [Fürmaier], [Ramke] und [Piechura].

Die GSB betreibt an verschiedenen Standorten mehrere Entsorgungsanlagen. Die hier vorgestellte zweistraßige Anlage in Ebenhausen ist als Ersatz für eine im Jahre 1975 am gleichen Standort in Betrieb genommene Drehrohrofenanlage vorgesehen, die ebenfalls aus zwei Straßen aufgebaut ist. Im Vergleich zu den alten Anlagen wurde für die beiden neuen Verbrennungsstraßen die jährliche Gesamtkapazität von 60.000 t/a (max. 75000-80000 t/a) auf 100.000 t/a erhöht. Den Zeitplan für die Planung und den Bau zeigt die folgende Zusammenstellung:

1987	Planfeststellungsauftrag an Energieconsulting München
1988	Einreichung der Genehmigungsunterlagen
Juni 1990	Öffentlicher Anhörungstermin mit zwei Einwendungen
Nov. 1990	Genehmigung nach § 7a AbfG zum vorzeitigen Baubeginn für den Rohbau des Bunkergebäudes.
Jan. 1992	Planfeststellungsbeschluß nach § 7 AbfG
1995	Inbetriebnahme

Es werden zwei baugleiche Verbrennungslinien mit Drehrohröfen von MAN GHH zu einem Gesamtpreis von 215 Mio. DM errichtet. Die Rauchgasreinigung wird von der Fa. Lurgi geliefert. Die Gesamtinvestition für die neuen Öfen wird einschließlich der Gutachten und Infrastrukturmaßnahmen auf 250 Mio DM beziffert. Die Anlage für die Behandlung des Waschwassers aus der Rauchgasreinigung wird von der Fa. Lurgi Umwelt- und Energietechnik gebaut und kostet zusätzlich 28 Mio DM.

## 11. Beschreibung einer großtechnischen Drehrohranlage

Tabelle 11.1: Technische Daten für die Gesamtanlage

Gesamtwärmeleistung	220	GJ/h
mittlere Jahresdurchsatzleistung	100.000	t
maximale Jahresdurchsatzleistung	120.000	t
spezifischer Durchsatz	15	t/h
davon fest/pastös,	40	%
schlammförmig	16	%
flüssig,	30	%
Gebindeaufgabe	5	%
Bunkervolumen	2000	m <sup>3</sup>

Tabelle 11.2: Technische Daten für ein Drehrohr

Länge	12	m
Außendurchmesser	4,80	m
Innendurchmesser	2,47	m
l/D-Verhältnis	4,9	
Wandstärke (Stahlmantel)	30	mm
Dicke der Ausmauerung	300	mm
Volumenbelastung	0,5	GJ/m <sup>3</sup> h
Wärmebelastung (Dauerlast)	75	GJ/h
Wärmebelastung (Spitzenlast)	105	GJ/h
Dauerbetriebstemperatur	1000-1100	°C
Auslegungstemperaturbereich	900-1400	°C
Mauerwerksauslegungstemperatur	1450	°C

Tabelle 11.3: Technische Daten für eine Nachbrennkammer

Höhe	20,0	m
Außendurchmesser	7,0	m
Innendurchmesser	5,8	m
Gesamtvolumen	550	m <sup>3</sup>
Brennraumvolumen	211	m <sup>3</sup>
Nachbrennraumvolumen	399	m <sup>3</sup>
Rauchgasverweilzeit		
Drehrohr Austritt bis Brennkammer	2,4	s
Brennerebene bis Austritt	3,7	s
Rauchgasgeschwindigkeit	3,3	m/s
Rauchgasmenge (1050 °C)	65.000	m <sup>3</sup> /h
Dauerlasttemperatur	1050 - 1200	°C
Auslegungstemperaturbereich	900 - 1400	°C
Mauerwerksauslegungstemperatur	1450	°C

## 11. Beschreibung einer großtechnischen Drehrohranlage

Das Gesamtvolumen der Nachbrennkammer teilt sich in zwei Bereiche auf. Im "Brennraumvolumen" werden die Rauchgase durch die Flammen der installierten Brenner auf die gewünschten Temperaturen aufgeheizt und durchmischt. Der eigentliche Ausbrand der Rauchgase erfolgt dann im "Nachbrennraumvolumen". Durch Messungen an der neuen Anlage soll belegt werden, daß auch bei 1050 °C eine vollständige Zerstörung der Schadstoffe in der Nachbrennkammer erreicht wird. Die Herabsetzung der Temperatur wirkt sich nicht nur auf den Anlagenverschleiß, sondern auch auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen positiv aus.

Entgegen früherer Ausführungen [Ramke] werden die Kessel für die beiden baugleichen Linien als Schottenkessel mit 14 Zügen ausgeführt. Das Umlaufsystem des Kessels besteht aus einer Kombination von Zwangs- und Naturumlauf. Die Rauchgasgeschwindigkeit im Kesselbereich wird mit 12 m/s angegeben. Im Gegensatz zu früheren Konstruktionen wird hier nicht der Abstand der Schotten verringert, sondern der Kessel wird seitlich eingezogen.

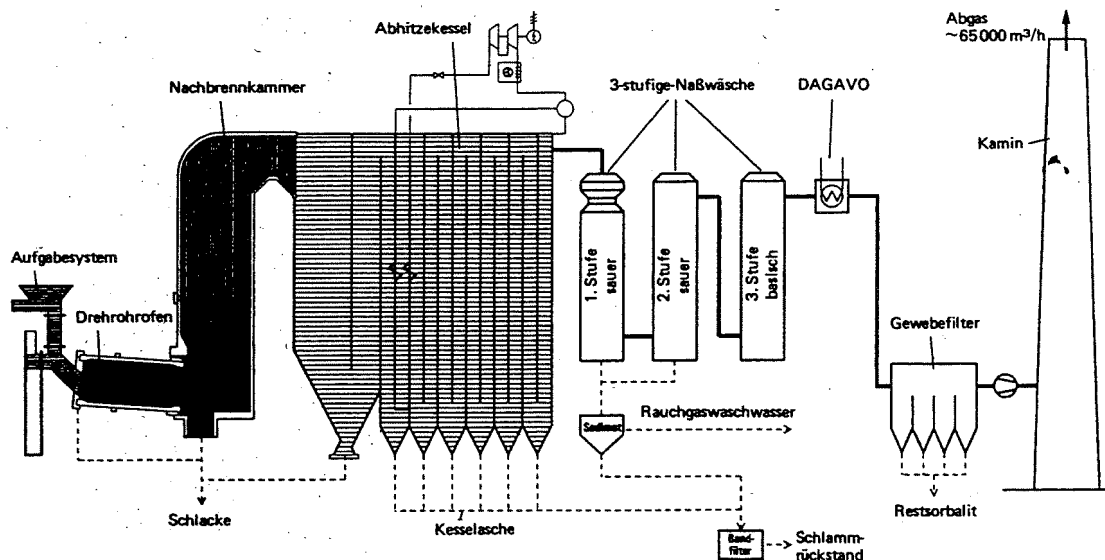


Abb. 11.1: Grundfließbild für die Anlage in Ebenhausen [Fürmaier]

Zur Kesselreinigung werden die Schotten etwa 10 bis 15 mm angehoben und auf ein Widerlager fallen gelassen. Die Kesseleintrittstemperatur der Rauchgase beträgt 1050 °C, die Austrittstemperatur in Abhängigkeit von der Verschmutzung 250 bis 300 °C. Es werden pro Stunde 30 t Dampf mit 30 bar und 280 °C in jedem Kessel produziert.

## 11. Beschreibung einer großtechnischen Drehrohranlage

---

Die Rauchgasreinigungsanlage mußte während des Genehmigungsverfahrens geändert werden, denn es war eine Anpassung an die 17. BImSchV erforderlich. Die ursprüngliche Konzeption nach TA Luft 86 wird in [Ramke] beschrieben. Nach [Piechura und [Fürmaier] wird die Rauchgasreinigungsstrecke, für die eine Einhaltung der entsprechenden Grenzwerte garantiert wird, wie folgt aufgebaut:

Im Anschluß an den Kessel folgt eine dreistufige Naßwäsche. In den Wäscherstufen 1 und 2 wird mit Hilfe von Natriumhypochlorid ( $\text{NaOCl}$ ) die  $\text{SO}_2$ -Konzentration verringert. Durch  $\text{SO}_2$  kann bereits absorbiertes  $\text{Hg}^{\text{II}}$  zu  $\text{Hg}^{\text{I}}$  reduziert werden. Aus  $\text{Hg}^{\text{I}}$  kann dann durch Disproportionierung  $\text{Hg}^0$  gebildet werden, das in den Wäscherstufen nicht zurückgehalten werden kann. Im Anschluß an die Rauchgaswäsche erfolgt eine Feinreinigung mit einem Flugstromverfahren (Kalkhydrat mit 10 % Herdofenkoks) und einem nachgeschalteten Gewebefilter. Das Adsorbens wird im Kreislauf gefahren, wobei etwa 10 % kontinuierlich aus dem Kreislauf entnommen und dem Drehrohr zugeführt werden.

Auf eine Verfahrensstufe zur Reduzierung der Stickoxidemissionen wird zunächst verzichtet, da der Grenzwert der 17. BImSchV bei den Altanlagen ohne zusätzliche Maßnahmen eingehalten werden kann. Eine Möglichkeit zur Nachrüstung ist allerdings vorgesehen. Für weitere Angaben zu der Rauchgasreinigung, insbesondere zu der Waschwasserbehandlung, sei auf [Fürmaier] verwiesen.

### 12. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte eine Darstellung des Kenntnisstandes im Bereich der Abfallverbrennung in Drehrohranlagen anhand der verfügbaren Literatur zum Ziel. Die Schwerpunkte der Interessen lagen im Verbrennungsteil und dem anschließenden Kessel. Die rechtlichen Grundlagen und die viel diskutierten Rauchgasreinigungsverfahren wurden nur am Rande behandelt.

Die Thematik der Sonderabfallverbrennung beschränkt sich jedoch nicht allein auf die chemische Verfahrenstechnik der Verbrennung. Die allgemeine Abfallproblematik, alle denkbaren Umweltschutzaspekte und rechtliche Themen sind mit der Verbrennung von Sondermüll verbunden. Als Konsequenz dieser Situation wurde die Literaturlauswahl auf den oben genannten Fachbereich beschränkt.

Für eine Übersicht über die zur Abfallverbrennung einsetzbaren Verbrennungsverfahren wurde zunächst ein kurzer Vergleich der verschiedenen Systeme durchgeführt, die in größerer Anzahl technisch angewendet werden. Danach sind die Drehrohrsysteme mit Nachbrennkammern als sehr universell einsetzbare Anlagen anzusehen. Die unterschiedlichsten Abfälle können in diesen Anlagen verbrannt, Schadstoffe sicher zerstört und Reststoffe umweltneutral entsorgt werden. Ferner gilt dieses Anlagenkonzept allgemein als gut beherrschbar, denn für die Sonderabfallverbrennung in Drehrohranlagen liegen etwa 30 Jahre an praktischen Betriebserfahrungen vor.

Die Drehrohrtechnik stellt allerdings keine spezielle Entwicklung für die Abfallverbrennung dar. In der chemischen Technik werden Drehrohre für vielfältige Gas-Feststoff-Reaktionen eingesetzt. Die entsprechenden Grundlagen und Prozeßmodelle können wahrscheinlich, wenn überhaupt, nur in einem sehr begrenzten Maß auf die Abfallverbrennung angewendet werden. Außerdem werden Drehrohranlagen im Bereich der Altlastensanierung eingesetzt. Großtechnische Anwendungen von Schwenköfen oder anderen Verbrennungssystemen, die von der Drehrohröfen abgeleitet worden sind, werden nur selten zur Abfallverbrennung eingesetzt. Hier liegen in der Literatur sehr wenige Arbeiten vor.



Drehrohre werden auch bei Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung eingesetzt, für die noch keine großtechnische Anlage existiert. Bei dem Schwel-Brenn-Verfahren erfolgt in dem Drehrohr, das auch als Schweltrommel bezeichnet wird, eine Pyrolyse der Abfälle bei ca. 450 °C unter Luftausschluß. Im Thermo-Cycling-Prozeß werden im Drehrohr die Abfälle nicht mit Luft, sondern mit einem Gemisch aus reinem Sauerstoff und Rauchgasen verbrannt. Im Vergleich zur konventionellen Sonderabfallverbrennung wird der Thermo-Cycling-Prozeß um weitere vorgeschaltete Prozeßstufen ergänzt.

In den nachfolgenden Kapiteln der vorliegenden Arbeit wurden die Informationen zusammengefaßt, die in der Literatur über die Sonderabfallverbrennung in Drehrohranlagen zu finden sind. Es zeigte sich, daß alle Anlagen sehr ähnlich konzipiert sind mit Drehrohröfen und Nachbrennkammer, einem Kessel zur Wärmerückgewinnung und einem Rauchgasreinigungssystem.

Die Drehrohre sind feuerfest ausgemauerte Stahlzylinder, deren Durchmesser am Anfang und (bzw. oder) am Ende in einigen Fällen leicht reduziert ist. Für die Verbrennung im Drehrohr wird an mehreren Stellen in der Literatur auf eine Betriebsweise mit einem Schlackepelz zum Schutz der Ausmauerung im Drehrohr hingewiesen.

Es erfolgt eine Abkehr von der bisher praktizierten Gebindeaufgabe. Für die Aufgabe dieser Abfälle wurden andere Methoden entwickelt, die eine tendenziell gleichmäßigere Verbrennung gewährleisten.

Bei der Gestaltung der Nachbrennkammer sind größere Unterschiede zu beobachten. Die Grundrisse sind entweder rund oder viereckig. Auch ein-, zwei-, und mehrstufige Konstruktionen sind bekannt. Der Trend bei neuen Anlagen geht eindeutig zu runden, einstufigen Nachbrennkammern, in denen eine sehr gute Durchmischung der Rauchgasströmung durch die Wirkung der Tangentialbrenner (Rührkessel) möglich ist.

Obwohl der Verbrennungsteil äußerlich aus den beiden Baugruppen "Drehrohr" und "Nachbrennkammer" besteht, sind verfahrenstechnisch drei Bereiche zu unterscheiden. Der erste Bereich umfaßt das Drehrohr. Im zweiten Bereich, der Nachbrennkammer werden zwei

funktionelle Zonen unterschieden. Eine erste, in der flüssige Abfälle verbrannt und gleichzeitig die Rauchgase aus dem Drehrohr besser durchmischt werden. Die zweite Zone bildet dann den eigentlichen Nachverbrennungsraum, in dem die Rauchgase vollständig ausgebrannt werden. Es gilt heute als sicher, daß ein guter Ausbrand nicht nur durch hohe Temperaturen von 1200 °C, sondern auch durch einer sehr gute Durchmischung der Rauchgase bei etwa 1000 °C mit einer gleichmäßigen Verweilzeit in der Nachbrennkammer erreicht wird. Die Verbrennungsvorgänge in der Nachbrennkammer bestimmen maßgeblich die Qualität des Rohgases vor Eintritt in den Abhitzeessel.

Die in der Literatur zur Sonderabfallverbrennung gefundenen Informationen über die Konstruktion und Auslegung des Kessels blieben deutlich hinter den Erwartungen zurück. Die Aussagen zum Kesselbau sind sehr allgemein abgefaßt und beschränken sich in der Regel auf die Kesselbauart, die Temperaturen und die Dampfparameter.

In dem Kapitel über die Reinigung der Rauchgase wurden die neuen Verfahrensstufen vorgestellt, die zur Einhaltung der strengen Grenzwerte der 17. BImSchV eingesetzt werden können. Für bestehende technische Anlagen wurden dann die durchgeführten oder geplanten Veränderungen im Rauchgasreinigungssystem zusammengestellt. Eine sichere Einhaltung der vorgegebenen Emissionswerte kann danach immer gewährleistet werden, allerdings mit einem sehr großen verfahrenstechnischen und finanziellen Aufwand. Eine Rückgewinnung von verschiedenen "Wertstoffen" aus der Rauchgasreinigung ist möglich.

Über die bei der Verbrennung anfallende Schlacke liegen sehr wenige Daten zu deren Eigenschaften und ihren Inhaltsstoffen vor. Der Ausbrand ist allgemein bei hohen Temperaturen besser. Quantitative Angaben über die Zusammenhänge von Temperaturen im Drehrohr und der Eluierbarkeit der Schlacke wurden in der Literatur nicht gefunden. Die Schlacken werden in der Regel ohne eine Verwertung deponiert.

Eine genauere Betrachtung der Literatur vermittelt den Eindruck, daß großtechnische Angaben unvollständig und nicht nachvollziehbar sind. So lassen z.B. die Beschreibungen zur Gestaltung der Nachbrennkammer sehr deutlich erkennen, daß der Kenntnisstand bei Herstellern und Betreibern von Sondermüllverbrennungsanlagen über die veröffentlichten Daten

hinausgeht. In der Literatur werden Berechnungen und Untersuchungen an Strömungsmodellen zwar erwähnt, die Grundlagen der entsprechenden Modelle oder die Ergebnisse aber fast vollständig zurückgehalten. Für den Bau der Kessel trifft dies in noch viel größerem Maße zu.

Aus der verfügbaren Literatur mit dem dort vermittelten Kenntnisstand ist folgendes zu sagen:

Die Konstruktion des Drehrohres erfolgt aufgrund von Erfahrungswerten aus dem praktischen Betrieb und weniger auf der Basis theoretischer Betrachtungen. Die Drehrohrdurchmesser wurden, wie die zeitliche Entwicklung der BASF-Anlagen verdeutlicht, bei gleicher Rohrlänge größer. Dies bedeutet, daß die  $l/d$ -Werte für die Anlagen der BASF AG mit der Zeit abnahmen. Das Volumen des Drehrohres hängt von den Heizwerten der zu verbrennenden Abfälle ab, wobei die obere Grenze für die thermischen Belastbarkeit einen Erfahrungswert darstellt.

Über den Ausbrand fester Abfälle werden in der Literatur zur Thematik der Sonderabfallverbrennung kaum Angaben gemacht. Sehr wenige Informationen liegen auch über die Eigenschaften der Schlacke vor. Es entsteht der Eindruck, daß die Vorgänge und Prozesse im Drehrohr aus naturwissenschaftlicher und verfahrenstechnischer Sicht nur unvollständig bekannt sind. So werden z.B. die festen Abfälle in das Drehrohr eingegeben, ohne genaue Kenntnisse über den Zünd- und Verbrennungsvorgang zu haben. Dieses Informationsdefizit umfaßt auch die Auswirkungen der Drehrohrbetriebsbedingungen auf die genauen Eigenschaften der Schlacke.

Demgegenüber ist die Auslegung der Nachbrennkammer sowohl durch umfangreiche Betriebserfahrungen als auch durch strömungsmechanische Berechnungen gestützt. Mit den zugrunde gelegten Modellen dürfte eine exakte Beschreibung der dort ablaufenden Prozesse jedoch noch nicht möglich sein; sie liefern aber wichtige und ergänzende Informationen für die Konzepterstellung.

Die Verbrennungsvorgänge in der Nachbrennkammer wurden außerdem im Labormaßstab näher untersucht. So liegen für einige Verbindungen, auch für umweltrelevante Stoffe wie

CKW, chlorierte Dioxine und Furane, bereits exakte Informationen über die Reaktionskinetik und die erforderlichen Verweilzeiten bei verschiedenen Temperaturen vor. Diese Kenntnisse fließen ebenfalls in die Auslegung von Nachbrennkammern ein. Der Ausbrand der Rauchgase in der Nachbrennkammer ist damit als gut untersucht zu bezeichnen.

Der in der Literatur dokumentierte Kenntnisstand zur Kesselauslegung ist für eine fachgerechte Beurteilung unzureichend. Die Rauchgasreinigungsverfahren, die in dieser Arbeit nur am Rande behandelt wurden, sind in der Literatur umfangreich dokumentiert.

### 13. Ausblick

Für die Zukunft lassen Anlagenkonzepte für die Sondermüllverbrennung, die auf Drehrohröfen und Nachbrennkammer aufbauen, keine großen Modifikationen erwarten. Mit diesem großtechnisch vielfach erprobten und technisch ausgereiften Verfahren lassen sich Sonderabfälle weiterhin umweltverträglich behandeln.

Ein Problem für die Zukunft stellt die Prognose über die Mengen an Sonderabfällen dar. So wird z.B. über die Einstellung des Genehmigungsverfahrens für eine weitere Verbrennungsstraße bei der Hessischen Industriemüll GmbH (HIM) in Biebesheim berichtet [NN-6]. Als Grund werden rückläufige Sonderabfallmengen angegeben. Es bleibt die Frage, ob mit einem wirtschaftlichen Aufschwung in der Bundesrepublik Deutschland und der vollen Auswirkung der neuen Verordnungen und Gesetze (TA Abfall, TA Siedlungsabfall, Kreislaufwirtschaftsgesetz) in den nächsten Jahren das thermisch zu behandelnde Sonderabfallaufkommen nicht wieder ansteigt. Außerdem wird der derzeitige Export von Sonderabfällen zunehmend eingeschränkt werden.

Gesetzliche Veränderungen und Verknappung von Deponieraum werden aber weitere Veränderungen in bestehenden und neuen Sondermüllverbrennungsanlagen bewirken. Während in der Vergangenheit die Minimierung der rauchgasseitigen Emissionen im Vordergrund stand, wird in Zukunft eine verstärkte Verwertung der Reststoffe erforderlich sein. Durch eine Optimierung der Prozesse in der gesamten Anlage muß die notwendige Reinheit der Feststoffe erzielt werden, so daß die Reststoffe aus dem Rauchgasreinigungssystem als marktfähige Produkte aus dem Prozeß ausgeschleust werden können. Dies bedeutet, daß die Schadstoffe aus dem Rauchgas möglichst selektiv in den einzelnen Verfahrensstufen der Rauchgasreinigung abgeschieden werden müssen. In Zukunft werden die gewünschten Produkte aus der Rauchgasreinigung die Verfahrenswege stärker beeinflussen.

Eine Verwertung der Schlacke z.B. im Straßenbau wird nur gelingen, wenn dieser Reststoff genau charakterisiert ist. Um diesbezüglich Eigenschaften im Drehrohrprozeß positiv beeinflussen zu können, sind grundlegende F + E -Arbeiten notwendig.

Die Optimierung der Anlagentechnik in Hinblick auf die Qualität der Reststoffe muß in Zukunft auch verstärkt vor dem Hintergrund der entstehenden Kosten gesehen werden. Wie bei der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen ist auch bei der Sonderabfallverbrennung die Senkung der spezifischen Entsorgungskosten heute die wichtigste Aufgabe, wenn die zunehmende Nutzung von ökologisch weniger günstigen Entsorgungswegen gestoppt werden soll [Horch].

Die Verbrennungsvorgänge im Drehrohr und in der Nachbrennkammer sind durch bessere u. lernfähige Prozeßleitsysteme in Verbindung mit mathematischen Modelle weiter zu optimieren. Insbesondere wird künftig der Anteil an festen Abfällen bei insgesamt sinkenden Heizwerten zunehmen.

Es ist abschließend festzustellen, daß Drehrohranlagen zur Sonderabfallverbrennung ohne Zweifel technisch beherrscht werden. Die vorliegende Arbeit hat aber auch den Eindruck erweckt, daß in vielen Bereichen die einzelnen Vorgänge und Prozesse noch nicht exakt verstanden werden, so daß für die Zukunft ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht, um vor allem niedrigere spezifische Entsorgungskosten bei Erhaltung der erreichten Umweltstandards zu ermöglichen.

## Anhang I Literatur zur Rauchgasreinigung

In diesem Abschnitt ist Literatur zur Thematik der Luftreinhaltung zusammengestellt. Die verschiedenen Verfahren zur Rauchgasreinigung beruhen auf den Grundoperationen der Verfahrenstechnik, so daß eine Entwicklung neuer Trennverfahren speziell für die Abfallverbrennung nicht erforderlich war. Folglich können die Grundlagen für die Trennoperationen der Rauchgasreinigung den entsprechenden Lehrbüchern entnommen werden, die im folgenden Verzeichnis allerdings nicht aufgeführt sind.

Daneben existieren in der Literatur verschiedene Werke, die sich speziell auf die Problematik der Luftreinhaltung und Rauchgasreinigung beziehen. Zum Teil enthalten diese Lehrbücher, auch wenn sie mehrere Jahre alt sind, eine ausführliche Behandlung der einzelnen Trennoperationen. Dies gilt insbesondere für die Literatur zur Rauchgasreinigung von Kraftwerken.

Es sei abschließend angemerkt, daß eine vollständige Erfassung der Literatur zur Rauchgasreinigung an dieser Stelle nicht möglich ist. Die genannten Literaturquellen sollen lediglich einen Einstieg in dieses Problemfeld ermöglichen.

Lahmann, E.:  
"Luftverunreinigung - Luftreinhaltung".  
Verlag Paul Parey Berlin und Hamburg 1990

Menig, H.:  
"Luftreinhaltung durch Adsorption, Absorption und Oxidation".  
Deutscher Fachschriften - Verlag Wiesbaden 1977

Menig, H.:  
"Abgasentschwefelung und Entstickung". (Nachtragsband zu "Luftreinhaltung durch Adsorption, Absorption und Oxidation" des gleichen Autors).  
Deutscher Fachschriften - Verlag Wiesbaden 1987

Baumbach, G.:  
"Luftreinhaltung".  
Springer-Verlag Berlin 1990

Löffler, F.; Dietrich, H.; Flatt, W.:  
"Staubabscheidung mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern".  
Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH Braunschweig 1991

Stieß, M.:

"Mechanische Verfahrenstechnik 1 u.2".  
Springer Verlag Berlin 1994

Müller, G.; Ulrich, M.:

"Abtrennung und Rückgewinnung von Stoffen aus Abluft- und Abgasströmen".  
Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) Nr. 8. S. 819 ff

Eigenberger, G.; Nieken, U.:

"Katalytische Abluftreinigung - Verfahrenstechnische Aufgaben und neue Lösungen".  
Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) Nr. 8. S. 781 ff

Kolar, J.:

"Stickoxide und Luftreinhaltung".  
Springer-Verlag Berlin 1990

Fritz, W.; Kern, H.:

"Reinigung von Abgasen".  
Vogel Buchverlag Würzburg 1990

Baum, F.:

"Luftreinhaltung in der Praxis".  
R. Oldenburgverlag München Wien 1988

Löffler, F.:

"Staubscheiden".  
Georg Thieme Verlag 1988

Egeler, R.:

"Sicherheitsfragen bei adsorptiver Rauchgasreinigung mit Aktivkoks".  
Müll und Abfall 25 (1993) Heft 3 S. 145-155

Jockel, W.:

"Stand der Emissionsmeßtechnik im Abgas der Rückstandsverbrennung".  
Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) Nr. 3 S. 223-230

Verschiedene Autoren:

"Rauchgasreinigung Meßtechnik in der Luftreinhaltung". Spezialteil in:  
Umwelt 23 (1993) Heft 3

VDI (Hrsg.):

"Fortschritte bei der thermischen, katalytischen, sorptiven und biologischen Abgasreinigung".  
VDI-Berichte 1034, Tagung in Mannheim, 3.-5. März 1993.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1993



VDI (Hrsg.):

"Schäden an Kraftwerkskomponenten".

VDI-Berichte 1027, Tagung in Köln, 23.-24. November 1992.

VDI-Verlag Düsseldorf 1992

Vogg, H.; Merz, A.; Stieglitz, L.; Vehlow, J.:

"Chemisch-verfahrenstechnische Aspekte der Dioxinreduzierung bei Abfallverbrennungsprozessen".

VGB Kraftwerkstechnik 69 (1989) Heft 8, S.795-802

Regler, H.:

"Flugstromverfahren mit Kalk-Aktivkoksgemischen".

in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:

"Müllverbrennung und Umwelt 5". S. 11-34.

EF-Verlag Berlin 1991

Lindbauer, R.; Wurst, F.; Prey, T.:

"Brennstoffmodifikation als Head-End Technik zur Dioxinreduktion bei der thermischen Behandlung von Abfällen".

in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:

"Müllverbrennung und Umwelt 5". S. 11-34.

EF-Verlag Berlin 1993

Nowitzki, B.:

"Dioxin-Abbau durch Wabenkatalysatoren - Katalytische Zerstörung polychlorierter Dibenz-p-dioxine und polychlorierter Dibenzofurane mit Hilfe von Wabenkatalysatoren in Abgasen aus Abfallverbrennungsanlagen".

VGB Konferenz. "Chemie im Kraftwerk 1993".

Essen, Oktober 1993

Cousin, R.:

"Möglichkeiten und Grenzen der Gewinnung und Verwertung von Salzsäure aus Abfallverbrennungsanlagen".

Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993) Heft 10, S. 759-768

Schaub, G.; Schelhaas, K.P.:

"Prozeßanalyse und Betriebsoptimierung von Absorptionsapparaten in Abfallverbrennungsanlagen".

in: VDI (Hrsg.):

"Fortschritte bei der thermischen, katalytischen, sorptiven und biologischen Abgasreinigung".

VDI-Bericht 1034. S. 249-261. Tagung in Mannheim, 3.-5. März 1993.

VDI-Verlag Düsseldorf 1993

Maier-Schwinning, G.; Knoche, R.; Schaub, G.:

"Abscheidung von Dioxinen, Furanen und Schwermetallen bei der thermischen Abfallverwertung".

in: VDI (Hrsg.):

"Fortschritte bei der thermischen, katalytischen, sorptiven und biologischen Abgasreinigung".

VDI-Bericht 1034. S. 249-261. Tagung in Mannheim, 3.-5. März 1993.

VDI-Verlag Düsseldorf 1993

Thomé, E.:

"Rauchgasreinigung nach Müllverbrennungsanlagen".

in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:

"Müllverbrennung und Umwelt 4". S. 279-298.

EF-Verlag Berlin 1990

VDI Bildungswerk. Seminar 43-59-04.

"Dioxin- und NO<sub>x</sub>-Minimierungstechniken".

München, 17.-18. Dezember 1991

Symposium 25 Jahre LIT - 5 Jahre TAMARA.

Forschung und Entwicklung im Kernforschungszentrum Karlsruhe zur Hausmüllverbrennung.

Karlsruhe, 7.-8. April 1992.

KfK-5000 (März 1992)

Dransfeld, P.; Hunsinger, H.; Vogg, H.:

"Die thermische NO<sub>x</sub>-Emissionsminderung mit Melamin und verwandten Verbindungen bei Müllverbrennungsanlagen".

VGB-Kraftwerkstechnik 72 (1992) S. 995 ff

## Anhang II Literaturverzeichnis

- [Andreyuk] Andreyuk, P.:  
"Rotary Kiln Ash Bed Temperature Measurement".  
Incineration Conference 1990.  
San Diego (California, USA), 14.-18. Mai 1990
- [Anton] Anton, P.; Hoffmann, P.; Schweiger, J.-W.:  
"Entsorgung von Sonderabfällen. Wahl der richtigen Technologie  
als Teil der Planung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Behandlung von Sonderabfällen 2". S. 777-816  
EF-Verlag Berlin 1988
- [Babcock] Fa. Babcock  
Informationsunterlagen zur MVA Bamberg
- [Baerns] Baerns, M.; Hofmann, H. und Renken, A.:  
"Chemische Reaktionstechnik".  
Georg Thieme Verlag: Stuttgart 1987
- [Barniske-1] Barniske, L.:  
"Entsorgung von Rückständen aus der Abgasreinigung von  
Abfallverbrennungsanlagen".  
in: VDI (Hrsg.):  
"Sondermüll - Thermische Entsorgung und Alternativen".  
VDI Bericht 664. Tagung in Saarbrücken, 7.-8. Oktober 1987.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1987
- [Barniske-2] Barniske, L.; Gleis, M.; Allbrecht, J.:  
"Thermische Behandlung von Sonderabfällen - gegenwärtiger  
Stand und Entwicklungsperspektiven".  
in Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Behandlung von Sonderabfällen 2". S. 728-740.  
EF-Verlag Berlin 1988
- [Barniske-3] Barniske, L.; Gleis, M.:  
"Die Sonderabfallverbrennung im Licht neuer rechtlicher  
Regelungen".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-08.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Mannheim, 27.-28. Januar 1993

- [Baumgärtel] Baumgärtel, G.; May, K.W.:  
"Das Siemens Schwel-Brenn-Verfahren".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung". S. 189-200.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Behmanesh] Behmanesh, N.; Manousiouthakis, V.; Allen, D.T.:  
"Optimizing the throughput of hazardous waste incinerators".  
AIChE Journal 36 (1990) Nr. 11, S. 1707-1714
- [Berghoff-1] Berghoff, R.; Friege, H.:  
"Sonderabfallverbrennung". LWA-Materialien Nr. 1/88.  
Herausgegeben vom Landesamt für Wasser und  
Abfall Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf 1988
- [Berghoff-2] Berghoff, R.:  
"Vergleich thermischer Verfahren zur Behandlung  
von Sonderabfällen".  
Umwelt 21 (1991) Nr. 10, S. V15-V21
- [Berghoff-3] Berghoff, R.:  
"Vergleich thermischer Verfahren zur Behandlung von  
Sonderabfällen".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-10.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Mannheim, 26.-27. Januar 1994
- [Berwein] Berwein, H.-J.; Kanczarek, A.:  
"Müllentsorgung mit einer Schwelbrennanlage".  
BWK 42 (1990) Heft 10, S. R26-R36
- [Bierbach] Bierbach, H.; Thomas, G.:  
"Verfahren zur thermischen Mischklärschlammbehandlung".  
in: VDI-Bildungswerk:  
"Klärschlammverbrennung I". S. 272-288.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1991
- [Bilitevski] Bilitevski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.:  
"Abfallwirtschaft".  
2. Aufl., Springer-Verlag Berlin: 1994
- [Blume] Blume, H.:  
Persönliche Mitteilung

- [Buijtenhek] Buijtenhek, H.S.; Suijkerbuijk, M; Veen, F. v.:  
"Umweltmessungen an einer neuen Sondermüllverbrennungsanlage bei der AVR-Chemie Rotterdam".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 3". S. 123-131.  
EF-Verlag Berlin 1989
- [BUWAL] Bundesamt für Umweltschutz, Bern, Baudepartement des Kantons Basel Stadt und Basel:  
"Verbrennung Dioxinhaltiger Abfälle aus Seveso".  
Schlußbericht der Expertenkommission vom 7. Mai 1986
- [Capek] Capek, K.:  
"Gemeinsame Verbrennung von Industrie-Klärschlamm und flüssigem Sonderabfall  
VGB Kraftwerkstechnik (1990) S.31-35
- [Christmann] Christmann, A.:  
"Zukünftiges Feuerungskonzept zur thermischen Restmüllbehandlung".  
in: VDI (Hrsg.):  
"Prozeßführung und Verfahrenstechnik der Müllverbrennung".  
VDI Bericht 895. S. 139-165. Tagung in Essen, 18.-19. Juni 1991.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1991
- [Comfère] Comfère, W.:  
"Verbrennungseinrichtung mit Drehrohrofen und Nachbrennkammer".  
in: Müllhandbuch, Abschnitt 8143, S. 1-17, 1990.  
Erich Schmidt-Verlag: Berlin
- [Cundy-1] Cundy, V.A.; Lester, T.W.; Leger, C. et al.:  
"Rotary Kiln Incineration - Combustion chamber Dynamics".  
Journal of Hazardous Materials 22 (1989) S. 195-219
- [Cundy-2] Cundy, V.A. et al.:  
"Rotary Kiln Injection I. An Indepth Study - Liquid Injection".  
JAPCA 39 (1989) Nr. 1, S. 63-75
- [Cundy-3] Cundy, V.A. et al.:  
"Rotary Kiln Incineration III. An Indepth Study - Kiln Exit/Afterburner/Stack Train and Kiln Exit Pattern Factor Measurements During Liquid CCl<sub>4</sub> Processing".  
JAPCA 39 (1989) Nr.7, S. 944-952
- [Cundy-4] Cundy, V.A. et al.:  
"Rotary Kiln Incineration IV. An Indepth Study - Kiln Exit, Transition and Afterburner Samplin During Liquid CCl<sub>4</sub> Processing".  
JAPCA 39 (1989) Nr. 8, S. 1073-1085

- [Dahlke] Dahlke, U.:  
"Abfalltechnik".  
Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) Nr. 11, S. 880-883
- [Demmich] Demmich, J.; Schulte, J.; Reimann, D.O.:  
"Art, Menge und Beschaffenheit von Rückständen von Haus- und  
Sondermüllverbrennungsanlagen".  
Thome-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 4". S. 323-337.  
EF-Verlag Berlin 1990
- [Dempsey] Dempsey, C.R.; Oppelt, E.T.:  
"Incineration of Hazardous Waste: A Critical Review Update".  
Air & Waste 43 (1993) 25-73
- [Denzer] Denzer, D.; Faulhaber, F.R.; Herrmann, E.:  
"Vergleich von Verfahrenskonzepten zur Rauchgasreinigung bei der  
Rückstandsverbrennung".  
Chem.-Ing.-Tech. 61 (1989) Nr. 7, S. 513-518
- [Diekmann] Diekmann, R.:  
"Wiener Sondermüll emissionsarm verbrannt".  
Umwelt 19 (1989) Nr. 11/12, S. 582-585
- [Dillon] Dillon, A.P.:  
"Hazardous waste incineration engineering".  
Noyes Data Corporation: Park Ridge, New Jersey USA 1981
- [DIN 38414] DIN 38414 Teil 4  
"Schlamm und Sedimente (Gruppe S)  
Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4)".  
Beuth Verlag GmbH Berlin Oktober 1984
- [Dorn-1] Dorn, H.I.:  
"Entwicklung der Thermischen Entsorgung in  
der Rückstandsverbrennung der BASF".  
wlb 33 (1989) Nr. 11/12, S. S12-S17
- [Dorn-2] Dorn, H.I.:  
"Entwicklung und Bedeutung des Drehrohrofenverfahrens für die  
Entsorgung von Sonderabfällen in der Chemischen Industrie".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-07-07.  
"Sondermüllentsorgung".  
Mannheim, 29.-30. Mai 1990  
auch in: VDI-Bildungswerk. Seminar 43-54-03.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Ratingen, 26-27. September 1990

- [DOW] DOW Deutschland:  
"Reststoffverwertung im Produktionsverbund".  
Firmenschrift
- [DPA] Deutsches Patentamt:  
Auslegungsschrift 1254801, 1963, BASF:  
"Verfahren und Anlage zum Verbrennen flüssiger oder teigiger  
Stoffe".
- [Dransfeld] Dransfeld, P.:  
"Mechanismen der Dioxinbildung und -zerstörung".  
VDI Seminar. Seminar-Nr. unbekannt.  
"Dioxin- und NO<sub>x</sub>-Minimierungstechniken".  
Düsseldorf, 3.-4. Juni 1991
- [Drexler] Drexler, R.L.:  
"Perpp Rotary Kiln Seals - Problem and Resolution".  
Incineration Conference 1990.  
San Diego (California, USA), 14.-18. Mai 1990
- [Egger] Egger, A. M.:  
"Die integrierte Sondermüllverbrennung in das Entsorgungskonzept  
eines Chemiewerkes".  
Schweizer Ingenieur und Architekt (1988) Nr. 3, S. 41-45
- [Enc. chem.] Encyclopedia of chemical technology Vol. 5 S. 260-266  
John Wiley & Sons New York 1979
- [Enders] Enders, R.; Vater, C.; Jekel, M.:  
"NaCl aus Abfallverbrennungsanlagen".  
Müll und Abfall 23 (1991) Nr. 8, S. 482-490
- [Erbach-1] Erbach, G.:  
"Zur Situation der Entsorgung organischer Sonderabfälle in  
Deutschland".  
Entsorgungspraxis 9 (1991) Heft 12, S. 766-769
- [Erbach-2] Erbach, G.; Schöner, P.:  
"Erfahrungen mit der Sonderabfallverbrennungsanlage  
in Biebesheim nach 7 Jahren Betrieb".  
Abfallwirtschaftsjournal 1 (1989) Nr. 12, S. 25-33
- [Erbach-3] Erbach, G.:  
"Verbrennung von Sonderabfällen in Biebesheim".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Behandlung von Sonderabfällen 2". S. 741-761  
EF-Verlag Berlin 1988

- [Erbach-4] Erbach, G.:  
"Thermische Behandlung von Sondermüll".  
in: VDI (Hrsg.):  
"Sondermüll - Thermische Entsorgung und Alternativen".  
VDI Bericht 664. Tagung in Saarbrücken, 7.-8. Oktober 1987.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1987
- [Erbach-5] Erbach, G.; Schöner, P.; Suchomel, H.; Conrady, K.:  
"Einsatz von Drehrohrofenanlagen zur Verbrennung von  
Sonderabfällen am Beispiel der Sondermüllverbrennungsanlage  
der Hessischen Industriemüll GmbH in Biebesheim".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 4". S. 173-191  
EF-Verlag Berlin 1990
- [Erbach-6] Erbach, G.; Schöner, P.:  
"Thermische Behandlung von Sonderabfällen".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Behandlung von Sonderabfällen 3". S. 449-458.  
EF-Verlag Berlin 1990
- [Esch] Esch, U. et al.:  
"Drehrohröfen".  
Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie. Band 3, S. 415-432.  
4. Auflage, Verlag Chemie Weinheim 1973
- [Eschner] Eschner; Shah, V.:  
"R&D for Optimization of Refractories for Special Refuse  
Incinerators".  
Incineration Conference 1990  
14.-18. Mai 1990 San Diego, (Kalifornien USA)
- [Faulstich] Faulstich, M.; Freudenberg, A.; Kley, G.; Köcher, P.:  
"Thermodynamische und mineralogische Überlegungen zur  
Inertisierung fester Rückstände aus der Abfallverbrennung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 4". S. 339-359.  
EF-Verlag Berlin 1990
- [Fitzer] Fitzer, E.; Fritz, W.:  
"Technische Chemie".  
Springer-Verlag Berlin 1982
- [Fortmann] Fortmann, J.:  
"Die thermische Bodenreinigung am Beispiel ausgewählter  
Sanierungsfälle".  
Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) Nr. 6, S. 548-554



- [Franke-1] Franke, H.; Conrady, K.:  
"Geregelte Sauerstoffzufuhr bei der Verbrennung von Faßware zur Minimierung der CO-Spitzen".  
Tagung der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC). "Entsorgung von Sonderabfällen".  
Baden-Baden, 4-6.Dezember 1989
- [Franke-2] Franke, H.:  
"Sauerstoffanwendung bei der Verbrennung von Faßware in Sonderabfall-Entsorgungsanlagen".  
wlb 34 (1990) Nr. 5, S. 74 ff
- [Franzius] Franzius, V.:  
"Möglichkeiten zur Bodensanierung".  
Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) Nr. 4, S. 348-358
- [Fürmaier] Fürmaier, B.:  
"Die neue Sonderabfallverbrennungsanlage in Ebenhausen".  
Umwelt 23 (1993) Heft 10, S. E19-E31
- [Geiger-1] Geiger, T.; Baumgartner, H.; Seifert, H.; Dorn, H.I.; Knopf, H.:  
"Möglichkeiten der thermischen Entsorgung von Shredderleichtmüll".  
Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Nr. 4., S. 444-446
- [Geiger-2] Geiger, T.; Baumgartner, H.; Dorn, H.I.; Knopf, H.; Seifert, H.:  
"Möglichkeiten der thermischen Entsorgung von Shredderleichtmüll".  
GVC-Tagung, Jahrestreffen der Verfahreningenieure.  
"Prozeß- und Umwelttechnik".  
Köln, 25.-27. September 1991
- [Girovich] Girovich, M.J.:  
"Performance of High-temperature Slagging Rotary Kiln".  
JAPCA 39 (1989) june, S. 884-888
- [Glinka] Glinka, U.:  
"Rauchgasreinigungsanlagen bei der Sonderabfallverbrennung".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-10.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Mannheim, 26.-27. Januar 1994
- [Gottschalk-1] Gottschalk, J.:  
"Flugstromverfahren - ein Verfahren der Kohlenstoff-adsorptionstechnik zur Minimierung der Restemissionen".  
Abfallwirtschaftsjournal 4 (1992) Nr. 12, S. 997-1001

- [Gottschalk-2] Gottschalk, J.:  
"Flugstromverfahren - ein Verfahren der Kohlenstoff-  
adsorptionstechnik zur Minimierung der Restemission".  
Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993) Nr. 1, S. 78-81
- [Gottschling] Gottschling, G. S.; Wohner, H.-J.:  
"Verbrennung von Sonderabfällen - Konzeptfindung und Planung  
des Tanklagers einer Sondermüllverbrennungsanlage".  
Chemie Anlagen Verfahren (1990) Nr. 9, S. 109-119
- [Greil] Greil, R. P.; Brunner, C.:  
"Rauchgasreinigung bei der thermischen Sonderabfallbehandlung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 565-587.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Grotefeld] Grotefeld, V.:  
"Hausmüll als Energieträger".  
VDI Nachrichten. Nr. 35. 3. September 1993. S. 31
- [Grzella] Grzella, J.; Sturm, P.; Krüger, J.; Reuter, M.A.; Kögler, C.; Probst, T.:  
"Metallurgical Furnaces".  
Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol. B4. S. 339 ff  
5. Auflage, VCH Weinheim 1992
- [Hackl] Hackl, A.E.:  
"Systeme zur Reinigung von Rauchgasen".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 5". S. 149-169.  
EF-Verlag Berlin 1991
- [Haji] Haji Javad, M.:  
"Techniken und Kosten der Abgasreinigung bei der  
Abfallverbrennung".  
Chem. Ing. Tech. 64 (1992) Nr. 7, S. 623-624
- [Halstenberg] Halstenberg, M.:  
"Ein Gesamtkonzept für den Umweltschutz".  
Chemische Rundschau, 4. November 1992, Nr. 45
- [Hasberg-1] Hasberg, W.; Römer, R.:  
"Organische Spurenschadstoffe in Brennräumen von Anlagen zur  
thermischen Entsorgung".  
Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) Nr. 6, S. 435-443

- [Hasberg-2] Hasberg, W.:  
"Drehrohrofen und Nachbrennkammer als chemischer Reaktor zur Rückstandsverbrennung".  
wlb 33 (1989) Nr. 11-12, S. S18-S24
- [Hasberg-3] Hasberg, W.:  
"Einfluß von Temperatur, O<sub>2</sub>-Konzentration und Verweilzeit auf die Schadstoffemissionen aus Sonderabfallverbrennungsanlagen".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-03.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Ratingen, 26-27. September 1990
- [Hefni-O.] Hefni-Omar, M.; Jury, E.:  
"Abscheidung von Schadstoffen aus den Rauchgasen einer Müllverbrennungsanlage in einem zirkulierenden Wirbelschichtreaktor".  
Chem. Ing. Tech. 64 (1992) Nr. 5, S. 442-446
- [Heitmann] Heitmann, A.:  
"Thermische Behandlung von Sonderabfällen".  
Chem.-Ing.-Tech. 55 (1983) Nr. 5, S. 335-341
- [Helmrich] Helmrich, H.; Schügerl, K.:  
"Drehrohrreaktoren in der Chemietechnik".  
Chem.-Ing.-Tech. 51 (1979) Nr. 8, S. 771-778
- [Hoberg] Hoberg, H.; König, T.:  
"Möglichkeiten der Schlackeverwertung".  
in: VDI (Hrsg.):  
"Prozeßführung und Verfahrenstechnik der Müllverbrennung".  
VDI-Bericht 895, S. 317-335. Tagung in Essen, 18.-19. Juni 1991.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1991
- [Hofmann] Hofmann, G.; Schmitz, R.; Jung, H.:  
"Betriebserfahrungen mit der Eindampfung von Waschwasser aus der Rauchgasreinigung bei der thermischen Behandlung von Industrieabfällen im RZR Herten".  
Abfallwirtschaftsjournal 4 (1992) Nr. 12, S. 948-993
- [Horch] Horch, K.:  
"Wege zur Minimierung der Kosten der thermischen Abfallbehandlung".  
in: VDI (Hg):  
"Thermische Abfallentsorgung".  
VDI Bericht 1192. S. 99-113. Tagung in Veitshöchheim, 27.-28. Juni 1995.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1995

- [Hünig] Hünig, W.; Reher, P.:  
"Verbrennungstechnik für den Umweltschutz".  
Chem.-Ing.-Tech. 61 (1989) Nr. 1, S. 26-36
- [Hundesrügge] Hundesrügge, T.:  
"Abfall - Verbrennung - und was dann ?".  
Müll und Abfall 23 (1991) Nr. 8, S. 500-510
- [Hunter] Hunter, D.:  
"Europe Opts for Incinerating Hazardous Waste".  
Chemical Engineering 95 (1988) Nr. 14, S. 33-39
- [Jachimowski] Jachimowski, A.:  
"Kessel für Abfallverbrennungsanlagen".  
Chemie-Technik 7 (1978) Nr. 9, S. 403-405
- [Jakob] Jakob, G.:  
"Thermische Abfallbehandlung - Entstehung schadstoffhaltiger  
Rückstände und deren Ablagerung".  
Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) Nr. 10, S. 929-930
- [Joschek-1] Joschek, H.-I.; Dorn, I.H.; Kolb, T.  
"Der Drehrohrofen. Die Chronik einer modernen Technik am  
Beispiel der BASF-Rückstandsverbrennung".  
Veröffentlichung in Vorbereitung
- [Joschek-2] Joschek, H.-I.; Fouquet, G.; Gärtner, D.; Knopf, H.J.; Srauß, G.:  
"Kein Vorrang der stofflichen vor der thermischen Verwertung".  
Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993) Nr. 6, S. 494-501
- [Joschek-3] Joschek, H.-I.:  
"Entsorgungskonzept eines Großbetriebes am Beispiel der  
BASF AG Ludwigshafen".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 187-198.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Jungmann] Jungmann, G.:  
"Nachrüstung von Müllverbrennungsanlagen".  
Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Nr. 2, S. 210-212
- [Kamelreiter] Kamelreiter, F.:  
"Universell einsetzbar. Ultraschallbrenner in der Abfalltechnik".  
Chemie Anlage Verfahren (1994) Januar, S. 80

- [Keller-R.] Keller-Reinsbach, H.W.; Fritz, U.  
"Reduktion von Stickoxiden in der Nachbrennkammer mit N-haltigem Abwasser". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 5". S. 261-271.  
EF-Verlag Berlin 1991
- [Kiefer] Kiefer, F.:  
"Bestimmung bodenmechanischer Kennwerte von industriellen Reststoffen".  
Abfallwirtschaftsjournal 1 (1989) Nr. 11, S. 30 ff
- [Kiehne] Kiehne, M.:  
"Kontinuierlicher Drehrohrreaktor zur Bodensanierung".  
Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) Nr. 9, S. 788-791
- [Klauer] Klauer, J.:  
"Entsorgung von Sonderabfällen durch Verbrennung".  
Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) Nr. 6, S. 518-524
- [Knoche] Knoche, M.; Poncelet, E.:  
"Der Schwenkofen und andere Feuerungstechniken für kleinere Verbrennungsanlagen".  
in: Reimann, D.O.:  
"Rostfeuerungsanlagen zur Abfallverbrennung". S. 481-495.  
EF-Verlag Berlin 1991
- [Köser] Köser, H. (Hrsg.)  
"SCR - DeNO<sub>x</sub> - Katalysatoren. Qualitätssicherung, Beurteilung und neue Entwicklungen".  
Fachbuchreihe Haus der Technik, Vulkan-Verlag Essen 1992
- [Kolb-1] Kolb, T.; Seifert, H.:  
"Untersuchungen zur Durchsatzsteigerung bei der Verbrennung von festen und schlammförmigen Rückständen im Drehrohr".  
Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) Nr. 9, S. 791
- [Kolb-2] Kolb, T.:  
"Auslegung einer Verbrennungsanlage für industrielle Reststoffe".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-10.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Mannheim, 26.-27. Januar 1994
- [Kubisa-1] Kubisa, R.; Pollack, H.:  
"Der Entwicklungsstand der Hochtemperatur-Verbrennung und Rauchgasreinigungstechnik - dargestellt an zwei laufenden Bauvorhaben".  
Unterlagen der Fa. Steinmüller, Gummersbach

- [Kubisa-2] Kubisa, R.; Pollack, H.:  
"Der Entwicklungsstand der Hochtemperatur-Verbrennung und der Rauchgasreinigungstechnik".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Behandlung von Sonderabfällen 2", S. 762-776  
EF-Verlag Berlin 1988
- [Kubisa-3] Kubisa, R.; Pollack, H.:  
"Der Entwicklungsstand der Hochtemperatur-Verbrennungstechnik - dargestellt für zwei laufende Vorhaben".  
Chem.-Ing.-Tech. 61 (1989) Nr. 4, S. 282-287
- [Kuchta-1] Kuchta, H.-D.:  
"Feuerfestzustellungen von Abfallverbrennungsanlagen".  
UTA 3 (1992) Nr. 5, S. 305-311
- [Kuchta-2] Kuchta, H.-D.:  
"Feuerfestzustellung von Drehrohrofenanlagen zur Sonderabfallverbrennung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 439-454.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Künstler-1] Künstler, H.J.; Klukowski, C.; Grotefeld, V.:  
"Combusting, Sintering and Melting in a VS-Reaktor".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Waste Management International". Vol. 2. S. 199-205.  
EF-Verlag Berlin 1992
- [Künstler-2] Künstler, H.J.; Klukowski, C.; Grotefeld, V.:  
"Das VS-Verfahren zum Einschmelzen von Abfällen und Verbrennungsrückständen".  
VDI Bildungswerk. Seminar-Nr. unbekannt.  
Vortrag Nr. BW 1388
- [Kürzinger] Kürzinger, K.:  
"Ökologische und ökonomische Bewertung der bei der Abgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen eingesetzten Absorbentien".  
in: VDI (Hrsg.):  
"Fortschritte bei der thermischen, katalytischen, sorptiven und biologischen Abgasreinigung".  
VDI Bericht (1993). Tagung in Mannheim, 3.-5. März 1993  
VDI-Verlag Düsseldorf 1993
- [Kunz] Kunz, P.:  
"Betrieb von Schlammbehandlungsanlagen".  
Expert-Verlag Ehningen 1990

- [Lemann] Lemann, M.:  
"Kleinverbrennungsanlagen".  
Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 3, 14. Januar 1988. S. 46-50
- [Lighty] Lighty, J.S. et al.:  
"Rotary Kiln Incineration II. Laboratory-Scale Desorption and Kiln-Simulator Studies - Solids".  
JAPCA 39 (1989) Nr.2, S. 187-193
- [Liss] Liss, U.; Reitz, P.; Smolka, A.:  
"Dioxinminderung an Abfallverbrennungsanlagen".  
Entsorgungspraxis 10 (1992) Heft 12, S. 876-879
- [Löser] Löser, T.:  
"Adsorptive Rauchgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen".  
Abfallwirtschaftsjournal 3 (1991) Nr. 10, S. 661-667
- [Meininger] Meininger, S.:  
"Die neue Sondermüllverbrennungsanlage Essen".  
VGB-Tagung 220. "Müllverbrennung".  
Essen, 28.-29. September 1988
- [Mellmann] Mellmann, J.; Hoyer, L.; Rensch, T.:  
"Mathematisches Modell und experimentelle Untersuchungen zur thermischen Bodenreinigung in Drehrohröfen"  
Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Nr. 9, S. 1102-1103
- [Mischer-1] Mischer, G.; Fischler, M.:  
"Einbindung von Kessel und Flugaschen in die Schlacke über Rückführung ins Drehrohr".  
Tagung der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC). "Entsorgung von Sonderabfällen".  
Baden-Baden, 4-6.Dezember 1989
- [Mischer-2] Mischer, G.; Moldenhauer, W.:  
"Verbrennung von Abfällen, Abwasserkonzentraten, Klär- und Industrieschlammern". VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-08.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Mannheim, 27.-28. Januar 1993
- [Mitterbacher] Mitterbacher, P.:  
"Drehrohrtechnologie zur thermischen Behandlung von Sonderabfällen".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 423-427.  
EF-Verlag Berlin 1993

- [Modolo] Modolo, G.; Brodla, B.G.; Dix, S.; Linse, G.:  
"Sicherheit von Braunkohlenkoksadsorbern zur Abgasreinigung  
von Abfallverbrennungsanlagen".  
Erdöl Erdgas Kohle 110 (1994) Heft 4, S. 174-178
- [Möller] Möller, H.; Severin, P.-J.:  
"Die Sonderabfall-Verbrennungsanlage des RZR Herten".  
BWK 42 (1990) Heft 10, S. R17-R25
- [Morun] Morun, B.; Stumpf, T.; Schmidt, P.-U.; Strodt, P.:  
"Die Nachrüstung von Rauchgasreinigungsanlagen zur Einhaltung  
der 17. BImSchV mit dem modifizierten, konditionierten  
Trockensorptionsverfahren (MKT-Verfahren) am Beispiel der  
Sprühsorption einer Müllverbrennungsanlage in NRW".  
Müll und Abfall 23 (1991) Nr. 8, S. 490-498
- [Mosch] Mosch, H.:  
"Das TCR-Verfahren von ABB Fläkt für die Rauchgasreinigung  
bei Haus- und Sondermüllverbrennung".  
Abfallwirtschaftsjournal 3 (1991) Nr. 10, S. 655-660
- [Muckenheim] Muckenheim, H.:  
"Konzept einer thermischen Sonderabfallbehandlung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 363-410.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Mullen] Mullen, J.F.:  
"Consider Fluid-Bed Incineration for Hazardous Waste Destruction".  
Chemical Engineering Progress 88 (1992) June, S. 50-58
- [Nethe] Nethe, L.P.:  
"Sorbalit - Modifiziertes Calciumhydroxyd zur Rauchgasreinigung  
hinter Abfallverbrennungsanlagen".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 4". S. 299-314.  
EF-Verlag Berlin 1990
- [Neukirchen] Neukirchen, B.:  
"Reststoffe aus der Verbrennung von Siedlungs-  
und Sonderabfall im RZR Herten".  
in: VDI (Hrsg.):  
"Reststoffe aus der thermischen Abfallbehandlung".  
VDI Bericht 753. S. 255-266. Tagung in Jülich, 15.-16. März 1989.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1989



- [Nikolai] Nikolai, U.; Luxenberg, P.; Krassow, K.:  
"Versuche zur Behandlung von Elektrofilter-Staub mit  
Rauchgaswaschwasser".  
Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993) Nr. 2, S. 144-147
- [NN-1] NN  
"Sonderabfälle verbrennen. Leistungsfähige Rauchgasreinigung  
in Berlin".  
Umweltmagazin (1990) August, S. 100-102
- [NN-2] NN  
"Abfallsituation in der Bundesrepublik Deutschland -  
Rückstandsverbrennungsanlage bei Hoechst".  
Verfahrenstechnik 24 (1990) Nr. 1-2, S. 35-36
- [NN-3] NN  
"Pumpen für schwierige Medien:".  
Chemie Anlagen Verfahren (1991) Nr. 12, S. 9-10
- [NN-4] NN  
"Grundsteinlegung zur Rückstandsverbrennungsanlage  
in Dormagen".  
wlb 36 (1992) Nr. 11/12, S. 26-27
- [NN-5] NN  
"Dioxine zerstören statt sammeln".  
Chemie Anlagen Verfahren (1993) Nr. 1, S. 3
- [NN-6] NN  
"Sonderabfallverbrennungsanlage Biebesheim".  
Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993) Nr.7, S. 530
- [NN-7] NN  
"Verschleißmechanismen sichtbar machen".  
Umwelt & Technik 11 (1988) S. 40-41
- [Owens] Owens, W.D.; Silcox, G.D.; Lighty, J.S. et al.:  
"Thermal Analysis of Rotary Kiln Incineration: Comparison of  
Theory and experiment".  
Combustion and Flame 86 (1991), S. 101-114
- [Paczkowski] Paczkowski, K.v.:  
"Tendenzen bei Kesseln in Müllverbrennungsanlagen".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Recycling International".  
EF-Verlag Berlin 1984

- [Piechura] Piechura, H.:  
"Moderne thermische Sondermüllentsorgung mit  
Energierückgewinnung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 411-420.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Ramke] Ramke, D.; Frank, D.:  
"Konzept der Sondermüllverbrennungsanlage in Ebenhausen".  
Tagung der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und  
Chemieingenieurwesen (GVC). "Entsorgung von Sonderabfällen".  
Baden-Baden, 4-6.Dezember 1989
- [Reher] Reher, P.; Melin, T.:  
"Moderne Konzepte zur Emissionsminderung bei Rückstands-  
verbrennungsanlagen".  
Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Nr. 9, S. 1101 ff
- [Reimann-1] Reimann, D.O.; Hämmerli-Wirth, H.:  
"Verbrennungstechniken - Bedarf Entwicklung  
Berechnung Optimierung". Teil 1  
Abfallwirtschaftsjournal 4 (1992) Nr. 8 S. 605-679
- [Reimann-2] Reimann, D.O.; Hämmerli-Wirth, H.:  
"Verbrennungstechniken - Bedarf Entwicklung  
Berechnung Optimierung". Teil 2  
Abfallwirtschaftsjournal 4 (1992) Nr. 12 S. 954-983
- [Reimann-3] Reimann, D.O.:  
"Reststoffe aus der Rauchgasreinigung von Abfall- und Sonderabfall-  
verbrennungsanlagen sowie von Kohlekraftwerken".  
Beiheft zu Müll und Abfall, Bd 29.  
Erich Schmidt Verlag Berlin 1990
- [Ringel-1] Ringel, H.; Herbermann, M.:  
"Abfallverbrennung mit reinem Sauerstoff unter Zerstörung oder  
Abtrennung der Schadstoffe".  
Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Heft 6, S. 745-747
- [Ringel-2] Ringel, H.:  
"Abfallverbrennung mit konzentriertem Sauerstoff unter Zerstörung  
bzw. Abtrennung der Schadstoffe".  
Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) 791-792
- [Ritter] Ritter, G.; Scharf, H.-J.; Wolfram, E. et al.:  
"Einsatz von Braunkohlenkoks in der Rauchgasreinigung".  
BWK 39 (1987) Heft 11, S. 467-472

- [Rüegg] Rüegg, H.:  
"Municipal Refuse Incineration With Integrated Slag Treatment".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Waste Management International". Vol. 2. S. 329-334.  
EF-Verlag Berlin 1992
- [Schaub] Schaub, M.; Chauderon, B.:  
"Fallbeispiel einer Drehrohrverbrennungsanlage für Rückstände aus  
der Herbizid- und Chemikalienproduktion".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 429-438.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Schlierf] Schlierf, H.:  
"Wärmenutzung bei der Verbrennung von Sonderabfällen am Beispiel  
der Anlage des ZVSMM Schwabach".  
Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen,  
Nr. 96 (1990), 13. Mülltechnisches Seminar. S. 189-219.
- [Schmidt] Schmidt, R.:  
"Behandlung von Reststoffen aus der Sonderabfallverbrennung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Behandlung von Sonderabfällen 3". S. 525-535  
EF-Verlag Berlin 1990
- [Schneider] Schneider, D.  
"Sonderabfallverbrennung mit Rückstandsbehandlung".  
in: Keller, E.; Schenkel, W.:  
"Abfallwirtschaft und Recycling". S. 154-162.  
Vulkan-Verlag Essen 1992
- [Schöner-1] Schöner, P.:  
"Improvement of the Emission Control System of a Hazardous Waste  
Incinerator Based on Nine Year Experience".  
Incineration Conference 1990  
14.-18. Mai 1990 San Diego, (Kalifornien USA)
- [Schöner-2] Schöner, P.:  
"Drehrohrfeuerung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 5". S. 87-94.  
EF-Verlag Berlin 1991
- [Schöner-3] Schöner, P.:  
"Sondermüllentsorgung - Organisation".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-16-10  
"Abfallwirtschaft und Entsorgung".  
Düsseldorf, 1.-2- März 1990

- [Scholz-1] Scholz, R. et al.:  
"Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen  
Verbrennung von schwierigen Brennstoffen".  
Tagung der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und  
Chemieingenieurwesen (GVC). "Entsorgung von Sonderabfällen".  
Baden-Baden, 4-6.Dezember 1989
- [Scholz-2] Scholz, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.:  
"Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen  
Verbrennung von Abfällen".  
Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) Nr. 11, S. 877-887
- [Schuster] Schuster, U.:  
"Sonderabfälle verpumpen".  
Umwelt 20 (1990) Nr. 9, 470-472
- [Seher] Seher, A.; Dorn, I.H. et al.:  
"Radioaktive Indikatormethode in der chemischen  
Verfahrenstechnik".  
Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) Nr. 9, S. 691-698
- [Seifert-1] Seifert, H.:  
"Planung einer Verbrennungsanlage für industrielle Reststoffe".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-03.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Ratingen, 26.-27. September 1990
- [Seifert-2] Seifert, H.; Dorn, H.I.; Hillemanns, R.; May, H.-O.:  
"Auslegung des Verbrennungsteils von Industriellen Rückstands-  
verbrennungsanlagen".  
Tagung der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und  
Chemieingenieurwesen (GVC). "Entsorgung von Sonderabfällen".  
Baden-Baden, 4-6.Dezember 1989
- [Seifert-3] Seifert, H.; Hasberg, W.; Dorn, H.I.:  
"Planung einer Verbrennungsanlage für industrielle Rückstände".  
Chem.-Ing.-Tech. 61 (1989) Nr. 4, S. 300-308
- [Sigg] Sigg, A.:  
"Improve Combustion Control in Rotary Kiln Incinerators".  
Chemical Engineering Progress 87 (1991) Nr. 1, S. 44-48
- [Silcox] Silcox, G.D.; Pershing, D.W.;  
"The Effects of Rotary Kiln Operating Conditions and Design on  
Burden heating Rates as Determined by a Mathematical Model of  
Rotary Kiln Heat Transfer".  
J. Air Waste Manage. Assoc. 40 (1990) S. 337-344

- [Spahl] Spahl, R.; Dorn, H.I.; Horn, H.C.; Hess, K.:  
"Katalytische Dioxinzerstörung für Abfallverbrennungsanlagen".  
Entsorgungspraxis 11 (1993) Heft 5, S. 328-331
- [Stahlberg-1] Stahlberg, R.:  
"Thermoselect - Energie- und Rohstoffgewinnung aus Restabfall".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 337-351.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Stahlberg-2] Stahlberg, R.:  
"Thermoselect - Energie- und Rohstoffgewinnung aus Restabfall".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung". S. 203-216.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Stegmann-1] Stegmann, B.; Knoche, R.:  
"Emissionsminderung in der thermischen Abfallverwertung.  
Verfahren und Möglichkeiten der Rauchgasreinigung und  
Rückstandsbehandlung. Teil 1"  
Staub - Reinhaltung der Luft 52 (1992) S. 179-185
- [Stegmann-2] Stegmann, B.; Knoche, R.:  
"Emissionsminderung in der thermischen Abfallverwertung.  
Verfahren und Möglichkeiten der Rauchgasreinigung und  
Rückstandsbehandlung. Teil 2"  
Staub - Reinhaltung der Luft 52 (1992) S. 225-229
- [Steier] Steier, K.:  
"Klärschlamm thermisch entsorgen".  
Umwelt 22 (1992) Nr. 5, S.291-292
- [Stein-1] Stein, H.:  
"Betriebserfahrungen mit feuerfesten Produkten in Müll- und  
Sonderabfall-Verbrennungsanlagen".  
Fortschritte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 7 (1992)  
Heft 2, S. 259-276
- [Stein-2] Stein, H.:  
"More than 20 Years of special Refuse Incineration".  
Incineration Conference 1990  
14.-18. Mai 1990 San Diego (Kalifornien USA)
- [Steinebrunner] Steinebrunner, K.; Dorn, H.I.; Kuczaty, M.; Seifert, H.:  
"Vergleich von Mehrstoff-Brennersystemen zur thermischen  
Entsorgung von heizwertarmen flüssigen Prozeßrückständen".  
Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Heft 9, 1100-1101

- [Steinmüller] Verbrennungsanlagen für Hausmüll  
Prospekt Fa. Steinmüller, Gummersbach
- [Stock] Stock, M.; Mensing, A.; Patzke, U.; Schweger, F.:  
"Thermische Verwertung von Sonderabfällen am Beispiel des  
Entsorgungszentrums Duisburg".  
Tagung der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und  
Chemieingenieurwesen (GVC). "Abfallbehandlung". S. 257-303.  
Dresden, 30.-31. Oktober 1990
- [Straßburger] Straßburger, R. Kolb, T., Mantel, R.; Seifert, H.; Dorn, I.H.:  
"Modellierung der Nachbrennkammer einer  
Rückstandsverbrennungsanlage".  
Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Heft 9, S. 1100
- [Suchomel] Suchomel, H.:  
"Vorbehandlung und Lagerung von Sonderabfällen".  
VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-08.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Mannheim, 27.-28. Januar 1993
- [Tabasaran] Tabasaran, O.:  
"Was ist Sondermüll, gestern, heute , morgen?"  
in: VDI (Hrsg.):  
"Sondermüll- Thermische Behandlung und Alternativen".  
VDI-Bericht 664. S. 1-16. Tagung in Saarbrücken, 7.-8. Oktober 1987.  
VDI-Verlag Düsseldorf 1987
- [Tackie] Tackie, E.N.; Watkinson, A.P.; Brimacombe, J.K.:  
"Experimental Study of the Elutriation of Particles  
from Rotary Kilns".  
The Canadian Journal of Chemical Engineering 67 (1989)  
Nr. 10, S. 806-817
- [Teller-1] Teller, M.; März, H.:  
"Thermolytische Behandlung von Sonderabfällen -  
Der Thermo-Cycling-Prozeß".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 303-320.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Teller-2] Teller, M.:  
"TCP: ein neues Verfahren der thermischen Abfallbehandlung  
vor der Anwendungsreife".  
Entsorgungspraxis 12 (1994) Heft 10, S. 53-56

- [Th.Am.Soc.] The American Society of mechanical Engineers:  
"Hazardous Waste Incineration - a recourse Document".  
The American Society of Mechanical Engineers: 1988
- [Thomas] Thomas, G.:  
"Drehrohrofenanlagen ohne keramische Auskleidung für  
mittlere und kleine Betriebe".  
Tagung der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und  
Chemieingenieurwesen (GVC). "Entsorgung von Sonderabfällen".  
Baden-Baden, 4-6.Dezember 1989
- [Thomé] Thomé, E.:  
"Rauchgasreinigung - Wertstoffrückgewinnung und  
Schadstoffminimierung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Müllverbrennung und Umwelt 5". S. 197-225.  
EF-Verlag Berlin 1991
- [Thomé-K.-1] Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Verbrennung von Abfällen".  
EF-Verlag Berlin 1985
- [Thomé-K.-2] Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Altlastensanierung in der Bundesrepublik Deutschland".  
Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) Nr. 4, S. 286-298
- [Thomé-K.-3] Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Organisation der Sonderabfallentsorgung".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Sonderabfallwirtschaft". S. 29-147.  
EF-Verlag Berlin 1993
- [Tillmann] Tillmann, D.A.; Rossi, J.A.; Vick, K.M.:  
"Rotary Incineration Systems for Solid Harzardous Wastes".  
Chemical Engineering Progress 86 (1990) Nr. 7, S. 19-30
- [Vauck] Vauck, W.R.A.; Müller H.A.:  
"Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik".  
8. Aufl., VCH Verlagsgesellschaft Weinheim 1990
- [VDI 2114] VDI Richtlinie 2114:  
"Thermische Abfallverbrennung. Verbrennung von Hausmüll  
und hausmüllähnlichen Abfällen".  
Juni 1992
- [VDI 3640] VDI Richtlinie 3460:  
"Thermische Abfallbehandlung, Verbrennung von Sonderabfällen".  
Dezember 1991

- [Vehlow-1] Vehlow, J.; Schneider, J.; Pfrang-Stotz, G.:  
"Reststoffe - Charakterisierung, Behandlung, Verwertung".  
in: "25 Jahre LIT, 5 Jahre TAMARA,  
Forschung und Entwicklung im Kernforschungszentrum Karlsruhe  
zur Hausmüllverbrennung". Symposium, 7.-8. April 1992 im  
Kernforschungszentrum Karlsruhe:  
veröffentlicht als KfK 5000
- [Vehlow-2] Vehlow, J.:  
"Residues from Waste Incinerators - Hazardous Waste  
or Valuable Materials".  
in: Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
"Waste Management International".  
EF-Verlag Berlin 1992
- [Vetter] Vetter, G.:  
"Pumpen".  
2. Aufl., Vulkan-Verlag Essen 1992
- [Vicinus] Vicinus, J.; Knoche, R.:  
"Abscheidung von Dioxinen, Furanen und Schwermetallen  
in einer Gasreinigung".  
Müll und Abfall 23 (1991) Nr. 4, S. 229-235
- [Vølund] Fa. Vølund, Dänemark,  
Informationsmaterial
- [Vogg-1] Vogg, H.  
"Technische Minderungsmaßnahmen für Dioxine/Furane in  
Abfallverbrennungsanlagen". VDI Bildungswerk. Seminar 43-54-08.  
"Verbrennungsanlagen für Sonderabfall".  
Mannheim, 27.-28. Januar 1993
- [Vogg-2] Vogg, H.:  
"Von der Schadstoffquelle zur Schadstoffsenke - neue Konzepte  
der Müllverbrennung".  
Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) Nr. 4, S. 247-255
- [Vogg-3] Vogg, H.; Stieglitz, L.:  
"Thermal Behavior of PCDD/PCDF in Fly Ash from  
Municipal Incinerators".  
Chemosphere 15 (1986) 9-12 S. 1373-1378



- [Vogg-4] Vogg, H.; Hunsinger, H.; Merz, A.; Stieglitz, L.; Vehlow, J.:  
"Headendtechniken zur Dioxinminimierung".  
in: VDI (Hg.):  
"Prozeßführung und Verfahrenstechnik der Müllverbrennung".  
VDI Bericht 895. Tagung in Essen, 18.-19. Juni 1991  
VDI-Verlag Düsseldorf 1991
- [Vollhardt-1] Vollhardt, F.:  
"Anlagen zur Sondermüllverbrennung".  
Chem.-Ing.-Tech. 59 (1987) Nr. 8, S. 622-628
- [Vollhardt-2] Vollhardt, F.:  
"Maßnahmen bei Sondermüllverbrennungsanlagen zur Reduzierung  
der De-Novo-Bildung von Dioxinen und Furanen".  
Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) Nr. 6, S. 621-622
- [Vollhardt-3] Vollhardt, F.:  
"Entwicklungsgeschichte der Nachbrennkammer für  
Sondermüllverbrennungsanlagen".  
Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) Nr. 8, S. 663-666
- [Vollhardt-4] Vollhardt, F.:  
"Abhitzanlagen als Energieerzeuger in Umweltschutzanlagen".  
Energie und Technik 26 (1974) Nr. 3, S. 69-73
- [Waterland-1] Waterland, L.R.; Fournier, D.J.; Lee, J.W.; Carroll, G.J.:  
"Trace metal fate in a rotary kiln incinerator with an  
ionizing wet scrubber".  
Waste Management 11 (1991), S. 103-109
- [Waterland-2] Waterland, L.R.; Fournier, D.J.; Lee, J.W.; Carroll, G.J.:  
"Trace Metal Fate in a Rotary Kiln Incinerator with an Ionizing  
Wet Scrubber".  
Incineration Conference 1990.  
San Diego (California, USA), 14.-18. Mai 1990
- [Widmer] Fa. Widmer & Ernst Umwelttechnik AG, Zürich  
(aufgegangen in ABB)  
Informationsmaterial
- [Williams] Williams, J.D.; Becker, A.R.; Girovich, M.J.:  
"3-D Flow Modeling".  
JAPCA 38 (1988) Nr. 8, S. 1050-1054
- [Winkler] Winkler, U.:  
"Engpass Sondermüll".  
Umwelt 19 (1989) Nr. 9, S. 460-464

- [Womann] Womann, H.:  
"Neue Rückstandsverbrennungsanlage mit naßchemischer  
Rauchgasreinigung".  
Chemie-Technik 8 (1979) Nr. 10, S. 487-492
- [Yang] Yang, W.-C.:  
"Dynamics of simulated municipal solid waste in  
a rotating device".  
Powder Technology 72 (1992), S. 139-147
- [Zepp] Zepp, H.J.:  
Vortrag im Forschungszentrum Karlsruhe.
- [Zubiller] Zubiller, C.-O.; Hahn, N.:  
"Bedingungen der Entsorgung von Klärschlamm aus der Behandlung  
industrieller Abwässer."  
Entsorgungspraxis Spezial 4 (1991) Heft 3, S. 18-20