

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6298

**Programm zur Untersuchung thermischer
Behandlungsanlagen für Siedlungsabfall –
Evaluation Program for Municipal
Solid Waste Incineration Plants**

U. Richers, J. Vehlow, H. Seifert

Institut für Technische Chemie
Bereich thermische Abfallbehandlung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1999

Kurzfassung

Die Bewertung der derzeit eingesetzten Verfahren zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen kann nicht auf der Basis eines Vergleichs der vom Gesetzgeber und den Aufsichtsbehörden vorgegebenen und folglich immer einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte oder Reststoffqualitäten erfolgen. Von entscheidender Bedeutung sind Stoff- und Energiebilanzen, die die Rückstandsmengen und deren Qualität beschreibenden, den Verbleib einzelner Schadkomponenten im Abfall nachvollziehbar machen und eine Information über den Prozeßaufwand im Vergleich zu den erzielten Ergebnissen liefern.

Auf der Basis kurzer Prozeßbeschreibungen anhand existierender Anlagen wird dargestellt, welche Prozeßgrößen für die Bewertung der einzelnen Verfahren benötigt werden und wie diese Parameter repräsentativ an großtechnisch verfügbaren oder in Kürze in Betrieb gehenden Anlagen zu ermitteln sind. Ein Beispiel einer Stoffbilanz wird anhand von Literaturdaten für eine Rostanlage vorgestellt.

Der Bericht betrachtet deutsche Anlagen, kann aber auf die Situation in anderen Ländern adaptiert werden. Die zu beachtenden Standards und rechtlichen Regelungen sind für Deutschland und einige ausgewählte Länder in einem Anhang aufgeführt.

Abstract

An assessment of processes for thermal treatment of municipal solid waste needs to consider more information on the respective process than the compliance with legislative standards of air emission or residue quality. Especially material and energy balances are of decisive importance since they do not only supply detailed information about residue streams and their quality but they do also elucidate the fate of pollutants present in the waste. Such balances are needed to evaluate the efforts and expenses in relation to the benefits of a process.

Short descriptions of the single technologies using existing facilities are the basis to identify the process parameters which are needed for an assessment in the given case and the methodology to obtain representative information at full scale plants. A material balance for a grate system is included as an example.

The report reflects the situation in Germany but its recommendations can be adapted to the conditions in other countries, too. The most important legislative regulations and standards for Germany and other selected countries are found in an annex.

Vorwort

In den letzten Jahren werden zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen neben der bisher dominierenden Verbrennung von Abfällen auf dem Rost alternative Verfahren angeboten, die auf anderen Technologien - Verbrennung in der Wirbelschicht, Pyrolyse, Vergasung - oder auf Kombinationen verschiedener Technologien basieren. Etliche dieser Verfahren sind mittlerweile der Erprobungsphase entwachsen und in großtechnischem Maßstab in ersten Anlagen realisiert worden.

Ein Vergleich der heute verfügbaren Methoden zur Behandlung von Siedlungsabfällen im Sinne einer Inertisierung ist durch die zum Teil komplexen Technologien und durch die unterschiedlichen Produkte dieser Verfahren äußerst schwierig. Das Umweltbundesamt und das Institut für Technische Chemie - Bereich Thermische Abfallbehandlung - der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH haben daher gemeinsam den Versuch unternommen, Leitlinien für die Bewertung der konkurrierenden Verfahren zu erarbeiten.

Eine solche Bewertung bezieht sich vornehmlich auf prozeßtechnische, umweltrelevante und wirtschaftliche Aspekte, wird letztendlich aber immer lokale Randbedingungen berücksichtigen müssen. Zur Gewinnung der prozeß- und anlagenspezifischen Kenngrößen lassen sich allgemeingültige Empfehlungen erarbeiten, der lokale Einfluß entzieht sich naturgemäß einer generalisierenden Betrachtung.

Der vorliegende Bericht unternimmt den Versuch, die zu einer Prozeßbewertung heranzuziehenden Kenngrößen für alle derzeit auf dem deutschen Markt konkurrierenden und bereits im technischen Maßstab realisierten bzw. kurz vor der Realisierung stehenden Verfahren zu identifizieren. Er beinhaltet eine kurze Beschreibung der in Frage stehenden Verfahren anhand konkreter Anlagen. Es werden Angaben gemacht, welche Prozeßgrößen an welchen Positionen zu messen bzw. welche Proben aus welchen Prozeßströmen zur Informationsgewinnung heranzuziehen sind. Die Richtschnur für das Vorgehen sind gesetzliche Vorgaben, standardisierte Methoden und bewährte Praktiken.

Der Bericht enthält somit keine Bewertung einzelner thermischer Verfahren sondern er stellt vielmehr das Rüstzeug für eine solche Qualifizierung zusammen. Im Sinne eines Leitfadens beschreibt er, wie für die einzelnen Verfahren die zu deren Bewertung benötigten Informationen in entsprechenden Meß- und Beprobungskampagnen an laufenden technischen Anlagen zu ermitteln sind.

Es wäre zu wünschen, daß dieser Bericht die Basis darstellt für koordinierte Aktionen zu einer umfassenden Bewertung der in Deutschland und - daher die gleichzeitige Herausgabe in englischer Sprache - in anderen Ländern für die thermische Behandlung und/oder Verwertung ins Auge gefaßten Verfahren, um so eine Entscheidung im konkreten Falle unter Einbeziehung der lokalen Randbedingungen zu erleichtern.

Preface

The today by far predominant technology for thermal waste treatment in Europe and especially in Germany is the combustion in grate furnaces. During the last years a number of novel processes is emerging on the market basing on alternative technologies like fluidised bed combustion, pyrolysis, gasification or combinations of such technologies. Some processes have meanwhile left the test and demonstration state and first full scale installations have been built.

An assessment of the various technologies available today for thermal inertisation of waste, however, points out to be rather difficult due to the in parts complex technologies and the different products of the processes. Hence the Umweltbundesamt and the Institute for Technical Chemistry, Division Thermal Waste Treatment of the Forschungszentrum Karlsruhe have started a joint activity to develop guidelines for the assessment of the competing technologies.

Such assessment considers mainly technical, ecological and economical characteristics but local conditions can bias a final evaluation to a great extent. General rules to obtain reliable data of the process relevant parameters can be established, the influence of local conditions, however, cannot be judged universally.

This report tries to identify the fundamental parameters and process data to assess all technologies competing today on the German market and having been realised in technical scale or being brought into operation during the next time. The report comprises a short description of each technology using flow sheets of existing facilities. It defines the process parameters of concern and the positions where these have to be measured. Furthermore it identifies the material flows which have to be sampled and describes the sampling strategies. The basis for all recommendations are legislative standards, standardised methods and tried and tested practices.

Hence the report does not assess single processes but it offers and evaluates the tools to get relevant information for an assessment. It resembles a guideline how to obtain specific data in adequately designed measuring and sampling campaigns at technical plants.

It is to be hoped that this report encourages coordinated activities for a comprehensive assessment of all processes implemented or being soon implemented for thermal waste treatment in Germany and - hence the parallel English version - in other countries to support decision makers by supplying them with objective technical information.

INHALTSVERZEICHNIS – TABLE OF CONTENTS

I	Programm zur Untersuchung thermischer Behandlungsanlagen für Siedlungsabfall.....	1
I-1	Einleitung.....	1
I-2	Problemstellung	2
I-3	Das Untersuchungsprogramm	4
I-3.1	Umfang der Stoffbilanz	4
I-3.2	Umfang der Energiebilanz.....	8
I-3.3	Auswahl der Rückstandseigenschaften.....	9
I-3.4	Zeitlicher Rahmen	9
I-4	Kriterien für den Verfahrensvergleich.....	10
I-4.1	Rückstandsmengen	10
I-4.2	Rückstandseigenschaften.....	10
I-4.3	Stoffbilanzen.....	12
I-4.4	Energiebilanzen	13
I-4.5	Kosten	15
I-4.6	Einhaltung rechtlicher Auflagen.....	15
I-4.7	Entsorgungssicherheit.....	16
I-4.8	Anwendung im Ausland	16
I-4.9	Auswahl der Kriterien.....	17
I-5	Techniken zur thermischen Abfallbehandlung.....	18
I-5.1	Abgasreinigung.....	18
I-5.2	Thermische Abfallbehandlungsverfahren.....	21
I-5.2.1	Die Rostfeuerung.....	21
I-5.2.2	Die Wirbelschicht	22
I-5.2.3	Das Recycled Clean Products-Verfahren	24
I-5.2.4	Das Schwel-Brenn-Verfahren.....	26
I-5.2.5	Das Themoselect-Verfahren	27
I-5.2.6	Das Noell Konversionsverfahren.....	29
I-5.2.7	Das Sekundärrohstoffzentrum Schwarze Pumpe.....	31
I-5.2.8	Die Mitverbrennung in Kraftwerken	33
I-6	Beispiel einer Bilanz (Rostfeuerung).....	34
I-6.1	Beschreibung der Anlage.....	34
I-6.2	Datenquellen und Stoffbilanzen	35

II	Evaluation Program for Municipal Solid Waste Incineration Plants.....	38
II-1	Introduction.....	38
II-2	Problem.....	39
II-3	Measurement Program.....	41
II-3.1	Scope of Material Balancing	41
II-3.2	Scope of Energy Balancing	45
II-3.3	Selection of the Residue Properties	46
II-3.4	Time Schedule	46
II-4	Criteria for the Comparison of the Processes	47
II-4.1	Amounts of Residues	47
II-4.2	Residue Properties	47
II-4.3	Material Balances	48
II-4.4	Energy Balances	50
II-4.5	Costs	51
II-4.6	Compliance with the Legal Requirements.....	52
II-4.7	Disposal Safety	52
II-4.8	Export to Other Countries.....	52
II-4.9	Selection of the Criteria	53
II-5	Thermal Waste Treatment Technologies.....	54
II-5.1	Flue gas Cleaning	54
II-5.2	Thermal Waste Treatment Processes.....	57
II-5.2.1	Grate System.....	57
II-5.2.2	Fluidized-bed System	58
II-5.2.3	The Recycled Clean Products Process.....	60
II-5.2.4	Thermal Waste Recycling Process	62
II-5.2.5	Thermoselect.....	63
II-5.2.6	The Noell Conversion Process.....	65
II-5.2.7	Secondary Raw Material Center Schwarze Pumpe	67
II-5.2.8	Co-incineration	69
II-6	Example of a Balance (Grate Incineration)	70
II-6.1	Description of the Plant	70
II-6.2	Data Sources and Material Balances	71

III	Anhang - Annex	74
III-1	Vorarbeiten zum Meßprogramm	74
III-2	Planning of the Measurement Program	75
III-3	Probenahme	76
III-4	Sampling	77
III-5	Analytik und Bericht.....	79
III-6	Analysis and Report.....	80
III-7	Gesetze Richtlinien Normen Laws, Regulations and Standards	81
III-7.1	Allgemeine Bemerkungen	81
III-7.2	General remarks.....	82
III-7.3	Bundesrepublik Deutschland	83
III-7.3.1	Gesetze und Verordnungen.....	83
III-7.3.2	Schriften der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)	83
III-7.3.3	Schriften der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) .	83
III-7.3.4	Sonstige Merkblätter.....	84
III-7.3.5	Normen	84
III-7.4	Österreich.....	85
III-7.5	Niederlande.....	85
III-7.6	Europäische Gemeinschaft	86
III-7.7	Schweiz.....	87
III-8	Literatur - Literature	88

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung I-1:	Wege zur Berechnung eines Stoffstroms.....	12
Abbildung I-2:	Entstaubungsaggregate	19
Abbildung I-3:	Schema einer quasitrockenen Rauchgasreinigung.....	19
Abbildung I-4:	Schema einer nassen Rauchgasreinigung	20
Abbildung I-5:	SCR-Verfahren	20
Abbildung I-6:	Kohleabsorber	21
Abbildung I-7:	Rostfeuerung zur thermischen Abfallbehandlung	22
Abbildung I-8:	Die Wirbelschichtanlage in Berlin-Ruhleben	23
Abbildung I-9:	Das RCP-Verfahren	25
Abbildung I-10:	Schema für das Schwel-Brenn-Verfahren	26
Abbildung I-11:	Thermoselect-Verfahren	28
Abbildung I-12:	Das Noell-Konversionsverfahren	30
Abbildung I-13:	Blockschaltbild der Vergasung und Gasverwertung in der SVZ-Anlage ..	32
Abbildung I-14:	Längsschnitt MHKW Bamberg	34
Abbildung I-15:	Chlorbilanz MHKW Bamberg, Angaben in kg/t Abfall	35
Abbildung I-16:	Schwefelbilanz MHKW Bamberg, Angaben in kg/t Abfall	36
Abbildung I-17:	Cadmiumbilanz MHKW Bamberg, Angaben in g/t Abfall	37
Abbildung III-1:	Probenahme aus einem Stoffstrom	76

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle I-1:	Kriterien zur Einteilung thermischer Abfallbehandlungsanlagen nach Reifegrad	3
Tabelle I-2:	Kriterien für einen Vergleich thermischer Abfallbehandlungsverfahren	4
Tabelle I-3:	Zusammenstellung der zu bilanzierenden Elemente.....	5
Tabelle I-4:	Meßgrößen für gasförmige Komponenten.....	6
Tabelle I-5 :	Meßprogramm für eine Verbrennungsanlage	7
Tabelle I-6:	Meßprogramm für eine Vergasungsanlage.....	8
Tabelle I-7:	Daten für eine Enthalpiebilanz.....	9
Tabelle I-8:	Parameter zur Charakterisierung von Rückständen.....	10
Tabelle III-1:	Inhalt der Berichte für eine Anlage.....	79
Tabelle III-2:	Grenzwerte für die thermische Abfallbehandlung	81

List of Figures

Fig. II-1:	Methods of calculating a material flow	49
Fig. II-2:	Dedusting systems	54
Fig. II-3:	Schematic representation of a semi-wet flue gas cleaning process	55
Fig. II-4:	Schematic representation of a wet flue gas cleaning process	55
Fig. II-5:	SCR process	56
Fig. II-6:	Carbon adsorber	57
Fig. II-7:	Grate incineration system for thermal waste treatment	58
Fig. II-8:	Fluidized-bed system at Berlin Ruhleben	59
Fig. II-9:	The RCP process	61
Fig. II-10:	Schematic representation of the Thermal Waste Recycling Process	62
Fig. II-11:	Thermoselect Process	64
Fig. II-12:	The Noell conversion process	66
Fig. II-13:	Gasification at Schwarze Pumpe	68
Fig. II-14:	Longitudinal section of the MSWI Bamberg	70
Fig. II-15:	Chlorine balance of the MSWI Bamberg, values given in kg Cl/t waste	71
Fig. II-16:	Sulfur balance of the MSWI Bamberg, values given in kg S/t waste	72
Fig. II-17:	Cadmium balance of the MSWI Bamberg, values given in g Cd/t waste	73
Fig. III-1:	Sampling from a material flow	78

List of Tables

Table II-1:	Criteria for the classification of thermal waste treatment plants in accordance with their technical maturity	40
Table II-2:	Criteria for the comparison of thermal waste treatment processes	41
Table II-3:	Survey of elements to be balanced	42
Table II-4:	Gaseous components to be measured	43
Table II-5:	Measurement program for an incineration plant	44
Table II-6:	Measurement program for a gasification plant	45
Table II-7:	Data for an enthalpy balance	46
Table II-8:	Parameters for the characterization of residues	47
Table III-1:	Contents of the reports for a plant	80
Table III-2:	Emission limits for the thermal waste treatment	82

I Programm zur Untersuchung thermischer Behandlungsanlagen für Siedlungsabfall

I-1 Einleitung

Die thermische Behandlung von kommunalen Abfällen hat in der Bundesrepublik Deutschland vor dem Hintergrund neuerer gesetzlicher Regelungen an Bedeutung gewonnen. Die wichtigste Vorschrift ist in diesem Zusammenhang die "Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall)". Im Anhang wird für Abfälle, die zukünftig auf Deponien abgelagert werden, ein Glühverlust von weniger als 5 Gew.-% vorgeschrieben.

Nach dem heutigen Wissensstand ist dies nur durch eine thermische Behandlung der Abfälle zu erreichen. Eine Tendenz zu einem verstärkten Einsatz thermischer Abfallbehandlungsverfahren ist nicht auf die Bundesrepublik Deutschland beschränkt, sondern auch im Ausland zu beobachten.

In den letzten Jahren wurden aufgrund der oben genannten Vorgaben und der zu erwartenden Entwicklung am Markt von Anlagenherstellern die etablierten Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung, wie z.B. Rostfeuerung oder Drehrohrofen, um ergänzende Verfahrensstufen erweitert, oder es wurden neue Verfahren entwickelt. Ein weiterer Antrieb zu dieser Entwicklung, bedingt durch das Interesse der Allgemeinheit, lag an einer möglichst weitgehenden Unterschreitung aller bestehender Grenzwerte.

Neben der Neuentwicklung oder Ergänzung von Verfahren kommt es aufgrund der im Kreislaufwirtschaftsgesetz festgelegten Anforderungen für eine energetische Verwertung (§ 6) zu einer verstärkten Mitverbrennung von bestimmten Abfallfraktionen in Kraftwerken, bei der Zementherstellung oder in anderen thermischen Prozessen. Zur Zeit werden in der Bundesrepublik Deutschland in mehreren Kraftwerken und an einigen Standorten zur Zementherstellung bestimmte Abfallfraktionen aus dem Siedlungsabfall mitverbrannt.

Aufgrund dieser Entwicklungen entstand eine große Anzahl unterschiedlicher Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung, die allerdings (bis zum heutigen Zeitpunkt) nicht immer bis zur großtechnischen Reife als Entsorgungsanlage weiterentwickelt wurden.

Außerdem werden zur Zeit Anlagen zur thermischen Behandlung von Restmüll gebaut bzw. in Betrieb genommen, die nicht nach dem Verfahren der etablierten Rostverbrennung (weltweit >1000 Anlagen) arbeiten. Es handelt sich dabei um das Schwel-Brenn-Verfahren der Firma Siemens, das Thermoselect-Verfahren, eine Rowitec[®]-Wirbelschichtanlage (Hölter ABT/Lurgi) und eine Anlage, die nach dem RCP-Verfahren (Recycled Clean Products) der Firma Von Roll arbeitet.

Für die angestrebten Umweltziele werden von den neuen Verfahren andere Schwerpunkte gesetzt. Im Mittelpunkt der Argumentation stehen z.B. eine weitgehende Separierung von Wertstoffen, extrem hohe Temperaturen bei der thermischen Behandlung, geringere Abgasströme oder ein verglastes Schlackegranulat als Rückstand. Um diese Ziele zu erreichen, ist eine aufwendige Verfahrenstechnik erforderlich. Dieser Mehraufwand führt in der Regel bei der Nutzung der im Abfall gespeicherten Energie zu einem geringeren Wirkungsgrad.

Für zukünftige Planungen muß folglich aus den heute am Markt angebotenen Verfahren für den jeweiligen Standort die optimale Technik in Verbindung mit den angestrebten Umwelt-

schutzziele ausgewählt werden. Entscheidungen für den Einsatz von thermischen Abfallbehandlungsverfahren sind nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland, sondern aufgrund von neueren Gesetzen auch im Ausland zu erwarten. Mit dieser Entwicklung sind Möglichkeiten zum Export deutscher Technik zur thermischen Abfallbehandlung verbunden. Ein Export dieser Techniken gelingt allerdings nur, wenn die Vorteile der neuen Verfahren sicher dokumentiert sind.

Die Entscheidung für den Einsatz einer Technologie, ob in der Bundesrepublik Deutschland oder im Ausland, setzt einen detaillierten Vergleich der verfügbaren Verfahren voraus. Mit belastbaren Daten und Informationen muß geprüft werden, ob die Anforderungen am geplanten Standort bei hoher Funktionalität und niedrigen Kosten erfüllt werden können.

Die in den letzten Jahren durchgeführten und zum Teil veröffentlichten Vergleiche für thermische Abfallbehandlungsverfahren (siehe z.B. [ARGE] [Barin] [Becker] [Haltiner] [Tauber] [Nottrodt]) sind unseres Erachtens nur mit Vorbehalt zu einer Entscheidung für ein Verfahren heranzuziehen, denn sie beruhen auf Daten und Informationen von unterschiedlicher Qualität. Während für die Rostfeuerung ausreichendes Datenmaterial aus dem langjährigen Entsorgungsbetrieb großtechnischer Anlagen existiert, wurden für die neueren Verfahren, wie das Schwel-Brenn-Verfahren der Fa. Siemens oder Thermoste, die in der Literatur publizierten Informationen aus Test- oder Demonstrationsanlagen mit zum Teil kurzen Meßkampagnen herangezogen. Wie eine Literaturarbeit über das Schwel-Brenn-Verfahren [Richers] gezeigt hat, ist auf der Basis dieser Informationen eine gesicherte Bewertung nicht zu erwarten.

Darüber hinaus kam bei den Verfahrensvergleichen in der Vergangenheit den Emissionen in die Atmosphäre und bestimmten Eigenschaften der Rückstände eine besondere Aufmerksamkeit zu. Die gesetzlich geforderten Emissionsgrenzwerte im Reingas können heute sicher eingehalten bzw. beliebig weit unterschritten werden und stellen deshalb für einen Vergleich keine ausreichende Bewertungsgrundlage dar. Außerdem werden Grenzwerte in der Regel als Konzentrationsangaben vorgegeben. Die Konzentrationsangaben enthalten keine Information über die Schadstoffmenge, die in die Umwelt gelangt. Dies bedeutet, daß die Einhaltung bzw. Unterschreitung der geforderten Grenzwerte nur begrenzte Aussagen über die Umweltverträglichkeit der verfahrenstechnischen Prozesse ermöglicht. Es ist eine Betrachtung der Frachten erforderlich.

I-2 Problemstellung

Aus den vorangegangenen Erläuterungen ergibt sich, daß für einen Vergleich und eine anschließende Bewertung der verschiedenen Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung vier wesentliche Voraussetzungen nicht erfüllt sind:

1. Es mangelt an geeigneten Kriterien, mit denen Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung verglichen und beurteilt werden können. Die ausschließliche Unterschreitung von Grenzwerten reicht nicht aus.
2. Es fehlen vergleichbare und belastbare Daten aus großtechnischen Anlagen der verschiedenen Verfahren als Grundlage für einen Vergleich.
3. Aufgrund von 2. kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht beurteilt werden, ob ein verfahrenstechnischer Mehraufwand bzw. ein geringerer energetischer Wirkungsgrad der neuen Verfahren ökologische Vorteile bringt.
4. Aussagen zur Exporteignung von thermischen Abfallbehandlungsverfahren sind zur Zeit, abgesehen von Rostfeuerungen, nicht möglich.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Kriterien, die für einen Vergleich der unterschiedlichen Techniken zur thermischen Abfallbehandlung herangezogen werden können, sollen im Rahmen dieser Arbeit die möglichen Bewertungsmaßstäbe in einem separaten Kapitel diskutiert und festgelegt werden. Neben den wenig aussagekräftigen Emissionswerten bieten sich u.a. Stoff- und Energiebilanzen und auch die Qualität der Rückstände an.

Die dafür notwendigen Daten und Informationen, die vor allem für die neuen Verfahren zum Großteil fehlen, sollen durch Messungen an großtechnischen Anlagen beschafft werden. Dabei müssen die für solche Messungen ausgewählten Anlagen die Anforderungen der Gruppen 4 und 5 aus Tabelle I-1 erfüllen. In einem separaten Kapitel dieser Arbeit werden einige Systeme zur thermischen Abfallbehandlung beschrieben, von denen die entsprechenden Bedingungen erfüllt werden.

Tabelle I-1: Kriterien zur Einteilung thermischer Abfallbehandlungsanlagen nach Reifegrad [Johnke]

- | | |
|----------|---|
| Gruppe 1 | Konzept einer Neuentwicklung in einer verfahrenstechnisch logischen Folge vor Inbetriebnahme einer Versuchsanlage, ggf. labortechnische Untersuchungen einzelner Verfahrenskomponenten. |
| Gruppe 2 | Betrieb einer Versuchsanlage in einer verfahrenstechnisch logischen Folge, d.h. mit allen Verfahrenskomponenten, kurzzeitiger Dauerbetrieb bei unterschiedlichen Betriebs- und Lastzuständen. |
| Gruppe 3 | Stationärer Betrieb der Versuchsanlage unter Nennlast über einen längeren Zeitraum, mindestens 4 Wochen, mit einem begleitenden Meß- und Analysenprogramm. |
| Gruppe 4 | Stationärer Betrieb einer großtechnischen Anlage im Entsorgungsmaßstab über 1 bis 2 Jahre mit etwa 10.000 Betriebsstunden. Fachgerechte Beurteilung der Betriebssicherheit, der Umweltrelevanz, der Verfügbarkeit und der Kosten des Behandlungsverfahrens. |
| Gruppe 5 | Großtechnische Anwendung und langjährige Dauerbetriebserfahrung als Entsorgungsanlage und eine Jahresverfügbarkeit von >80 % nachgewiesen. |

In Hinblick auf einen aussagekräftigen Vergleich müssen diese Messungen unter möglichst gleichen Randbedingungen durchgeführt werden. Als Grundlage für die durchzuführenden Messungen ist ein Meßprogramm erforderlich, das im Rahmen dieser Arbeit erstellt wird.

Das Untersuchungsprogramm ist für großtechnische Anlagen vorgesehen, die für eine thermische Behandlung von Siedlungsabfall ausgelegt sind. Als Siedlungsabfall sind die Abfälle aus privaten Haushalten aufzufassen, die nach Anwendung von Vermeidungs- und Verwertungsmaßnahmen noch zu beseitigen sind. Dazu gehören auch Gewerbeabfälle, die gemeinsam mit den Abfällen aus den privaten Haushalten beseitigt werden können. Weiter gehören dazu Sperrmüll, Marktabfall, Straßenkehrschutt und kommunaler Klärschlamm.

Außerdem soll das Meßprogramm in der Form erarbeitet werden, daß die unterschiedlichsten Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung anhand des Meßprogramms untersucht und verglichen werden können. Damit muß das Meßprogramm nicht nur für die unterschiedlichen Verbrennungsanlagen, die mit Rost-, Drehrohr-, Wirbelschicht-, oder anderen Ofensystemen ausgestattet sind, anwendbar sein, sondern auch auf die neueren Entwicklungen im Bereich der thermischen Abfallbehandlung. Zu diesen neueren Verfahren gehören z.B. das Schwel-

Brenn-Verfahren, Thermoselect, das RCP-Verfahren oder das Noell-Konversionsverfahren. Die thermische Behandlung wird bei diesen Neuentwicklungen in einzelnen Teilschritten in verschiedene Verfahrensstufen aufgeteilt. Bei dem Noell-Konversionsverfahren und bei Thermoselect kann ein (heizwertreiches) Nutzgas erzeugt werden, das auch für chemische Synthesen einsetzbar ist.

Die Ergebnisse des Meßprogramms sollen auch Aussagen zur Anwendbarkeit von Verfahren zur thermischen Behandlung von Abfällen in anderen Ländern liefern. Dazu sind genaue Kenntnisse über die gesetzlichen Auflagen und die Grenzwerte der entsprechenden Staaten beachten, die zum Teil im Rahmen dieser Arbeit zusammengestellt werden.

I-3 Das Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm für einen Vergleich verschiedener Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung wird entscheidend durch die Kriterien bestimmt, die für eine abschließende Bewertung benötigt werden. Eine Zusammenstellung von möglichen Kriterien zeigt Tabelle I-2.

Tabelle I-2: Kriterien für einen Vergleich thermischer Abfallbehandlungsverfahren

Rückstandsmengen	Rückstandseigenschaften
Stoffbilanzen	Kosten
Energiebilanzen	Entsorgungssicherheit
Erfüllung rechtlicher Auflagen (Deutschland, EU, international)	Anwendungsbreite für den Export ins Ausland

Eine ausführliche Diskussion dieser Kriterien im Abschnitt I-4 zeigt, daß aus einer umfassenden Untersuchung der Stoffströme, ergänzt durch eine Energiebilanz und Untersuchungen zu Rückstandseigenschaften, die besten Informationen für die Beurteilung eines thermischen Abfallbehandlungsverfahrens zu erhalten sind. Die dazu ebenfalls wichtige Analyse der Behandlungskosten oder der Verfügbarkeit ist nicht Bestandteil des Meßprogramms.

Für einen Vergleich mit einer anschließenden Bewertung der unterschiedlichen Verfahren muß der Bilanzraum die gesamte Anlage erfassen. Dazu gehören eventuelle Vorschaltanlagen zur Abfallaufbereitung, die eigentliche thermische Behandlung der Abfälle, die Abgasbehandlung und weitere Anlagenteile zur Behandlung der entstehenden Abfälle/Rückstände.

In diesem Abschnitt wird, ohne auf die einzelnen Kriterien näher einzugehen, das erforderliche Meßprogramm für eine großtechnische Anlage vorgestellt. Für die Durchführung eines Meßprogramms an einer großtechnischen Anlage reicht ein genauer Meßplan, wie er in diesem Kapitel vorgestellt wird, allerdings nicht aus. Es sind exakte Informationen über die Anlage erforderlich, die in Form einer Checkliste im Anhang zusammengefaßt sind.

I-3.1 Umfang der Stoffbilanz

Für die Stoffbilanz können, aufgrund der heute verfügbaren Analysemethoden, fast beliebig viele Substanzen erfaßt werden. Um die im Rahmen des Meßprogramms anfallenden Daten

auf einen sinnvollen Umfang zu reduzieren, ist eine gezielte Auswahl der zu untersuchenden Substanzen erforderlich. In Tabelle I-3 sind die Substanzen aufgeführt, die bilanziert werden sollten.

Tabelle I-3: Zusammenstellung der zu bilanzierenden Elemente

Metalle		Nichtmetalle	
genehmigungs-relevant	prozeß-relevant	genehmigungs-relevant	prozeß-relevant
Blei (Pb)	Aluminium (Al)	Fluor (F)	Brom (Br)
Cadmium (Cd)	Calcium (Ca)	Chlor (Cl)	Phosphor (P)
Chrom (Cr)	Kalium (K)	Schwefel (S)	
Kupfer (Cu)	Natrium (Na)		
Quecksilber (Hg)			
Zink (Zn)			

Für die ausgewählten Substanzen gibt es in den gesetzlichen Regelwerken Grenzwerte oder den einzelnen Elementen kommt aufgrund ihrer Eigenschaften -leichtflüchtig, amphoter usw.- eine Rolle als Indikatormaterial im Prozeß zu. Ergänzend zu den beiden Gruppen in Tabelle I-3 können durch eine zusätzliche Bilanz der Metalle Kalium, Natrium und Calcium die Zuverlässigkeit der Analytik und die Plausibilität der erhaltenen Daten überprüft werden.

Nach Ergebnissen aus früheren Messungen an Verbrennungsanlagen werden für einige Metalle, z.B. Kupfer oder Blei, die in metallischer Form im Abfall auftreten können, nicht immer geschlossene Bilanzen erhalten. Einen Hinweis auf die Güte einer Bilanz erhält man auch aus dem Vergleich berechneter Transferkoeffizienten einzelner Elemente mit Literaturdaten [Schachermayer] [Morf]. Eine Quecksilberbilanz ist besonders schwierig zu erstellen und erfordert vom Personal spezielle Erfahrungen in Hinblick auf Beprobung und Probenvorbereitung.

Eine Stoffbilanz der in Tabelle I-3 aufgeführten Substanzen läßt noch keine umfassende Beurteilung über die Fähigkeit der Aufkonzentrierung, Ausschleusung und Zerstörung von Schadstoffen einer thermischen Abfallbehandlungsanlage zu. Zusätzlich müssen im Rahmen des Vergleichs weitere gasförmige Stoffe erfaßt werden, mit denen der thermische Behandlungsprozeß zuverlässig beurteilt werden kann. Bilanzen für Kohlenstoff und Stickstoff über die gesamte Anlage sind aufgrund der hohen Konzentrationen im Abgas bzw. der möglichen thermischen Stickoxidbildung nicht sinnvoll durchzuführen.

Tabelle I-4: Meßgrößen für gasförmige Komponenten

alle thermischen Verfahren	zusätzlich bei Vergasungsverfahren
Kohlendioxid (CO ₂)	Schwefelwasserstoff (H ₂ S)
Kohlenmonoxid (CO)	Wasserstoff (H ₂)
Wasser (H ₂ O)	Methan (CH ₄)
Gasförmige organische Substanzen - FID	
Stickoxide (NO _x)	
Ammoniak (NH ₃)	

Die Konzentrationen von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasser und von gasförmigen organischen Substanzen müssen an allen Anlagen gemessen werden, denn diese Daten liefern wichtige Informationen zur Effektivität des thermischen Behandlungsprozesses.

Bei der thermischen Abfallbehandlung mit Verbrennungsanlagen, dazu gehören neben der konventionellen Rostfeuerung u.a. das Schwel-Brenn-Verfahren und das RCP-Verfahren, werden Stickoxide gebildet. Eine nennenswerte Stickoxidbildung tritt bei den Vergasungsverfahren (z.B. Thermoselect und Noell Konversionsverfahren) nur auf, wenn die entstehenden Gase nicht für Syntheszwecke genutzt, sondern zur Energiegewinnung verbrannt werden. Für den Grenzwert werden die Stickoxid-Konzentrationen in der Regel auf Stickstoffdioxid (NO₂) umgerechnet. Mit der Messung von NH₃ läßt sich bei Verbrennungsanlagen die Funktion der Entstickungsanlagen überprüfen (Schlupf).

Die in der rechten Spalte der Tabelle I-4 aufgeführten Verbindungen sind aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften und der oxidierenden Atmosphäre in Verbrennungsanlagen nur in sehr geringen Konzentrationen zu erwarten. Eine Messung muß nur bei Vergasungsverfahren durchgeführt werden.

Um die Konzentration der in Tabelle I-3 und Tabelle I-4 aufgeführten Substanzen in den einzelnen Stoffströmen der Anlage bestimmen zu können, ist eine repräsentative Beprobung jedes Stoffstroms erforderlich. Ergänzende Hinweise für eine Probenahme sind im Anhang in Kapitel III-3 aufgeführt.

Für die Berechnung der Stoffbilanzen an den unterschiedlichen Anlagen werden für das Meßprogramm in Tabelle I-5 und Tabelle I-6 eine bestimmte Anzahl von Proben bzw. Meßzeitintervalle vorgeschlagen, die sich in der Vergangenheit bei Versuchen im großtechnischen Maßstab bewährt haben. Tabelle I-5 enthält das Meßprogramm für Verbrennungsverfahren, Tabelle I-6 das für Vergasungsverfahren. Die Meßprogramme sind nur als Vorschläge aufzufassen, denn die Gegebenheiten an der Anlage oder spezielle Fragestellungen zu bestimmten Stoffen können Veränderungen erforderlich machen. Die Menge der zu entnehmenden Probe richtet sich nach den Eigenschaften der einzelnen Stoffströme und den zu untersuchenden Reststoffeigenschaften.

Tabelle I-5: Meßprogramm für eine Verbrennungsanlage

Ort	Stoffstrom und Probenahme
Mechanische Vorschaltanlage Thermische Vorstufe	<p>Aussagen zum Bedarf in Hinblick auf die thermische Behandlung.</p> <p>An der Vorschaltanlage müssen der erforderliche Energiebedarf und alle Massenströme, Input und Output, bestimmt werden.</p> <p>Ob eine Probenahme zur Analyse durchgeführt werden muß, hängt von den entstehenden Stoffströmen am Standort ab.</p>
Feststoffaustrag nach der Verbrennung	<p>Als Produkte der Verbrennung fallen feste Rückstände an. Es sind die Massenströme und die Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe zu bestimmen. Werden bei dem Verfahren mehrere Rückstände erzeugt, so ist jeder Massenstrom zu bestimmen und zu proben.</p> <p>Zeitabstand: 0,5 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 17 Proben.</p>
Nach der Verbrennung / Kesselausgang	<p>Messung der gasförmigen Verbindungen für die Bilanz der Stoffe aus Tabelle I-3 als HCl, SO₂, HF, HBr und Hg sowie der Gaskonzentrationen nach Tabelle I-4</p> <p>Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.</p> <p>Eventuell Bestimmung der Staubmengen und der Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Substanzen. Zeitabstand: Abhängig von der erwarteten Staubkonzentrationen und dem eingesetzten Probenahmesystem.</p>
Stoffausgänge der Abgasbehandlung	<p>Für alle Produkte aus der Abgasreinigung, dazu gehören auch die mit Abscheidern abgetrennten Stäube, müssen die Massenströme und die Konzentrationen für die Stoffe aus Tabelle I-3 ermittelt werden. Die Probenahme wird maßgeblich durch den Aufbau der Abgasreinigung bestimmt.</p> <p>Zeitabstand: 1 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 9 Proben.</p>
Kamin	<p>Im gereinigten Abgas müssen die Konzentrationen der Schadstoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. für die Grenzwerte vorgegeben sind.</p> <p>Zeitabstand: entsprechend den gesetzlichen Auflagen bzw. Genehmigungsbescheid.</p>

Tabelle I-6: Meßprogramm für eine Vergasungsanlage

Ort	Stoffstrom und Probenahme
Mechanische Vorschaltanlage Thermische Vorstufe	<p>Aussagen zum Bedarf in Hinblick auf die thermische Behandlung.</p> <p>An der Vorschaltanlage müssen der erforderliche Energiebedarf und alle Massenströme, Input und Output, bestimmt werden.</p> <p>Ob eine Probenahme zur Analyse durchgeführt werden muß, hängt von den entstehenden Stoffströmen am Standort ab.</p>
Feststoffaustrag nach der Vergasung	<p>Als Produkte der thermischen Behandlung fallen bei den Verfahren feste Rückstände an. Es sind die Massenströme und die Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe zu bestimmen. Werden bei dem Verfahren mehrere Rückstände erzeugt, so ist jeder Massenstrom zu bestimmen und zu beproben.</p> <p>Zeitabstand: 0,5 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 17 Proben.</p>
nach der Vergasung	<p>Messung der gasförmigen Verbindungen für die Bilanz der Stoffe aus Tabelle I-3 als HCl, SO₂, HF, HBr und Hg sowie der Gaskonzentrationen nach Tabelle I-4</p> <p>Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.</p> <p>Eventuell Bestimmung der Staubmengen und der Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Substanzen. Zeitabstand: Abhängig von der erwarteten Staubkonzentrationen und dem eingesetzten Probenahmesystem.</p>
Stoffausgänge der Abgasbehandlung	<p>Für alle Produkte aus der Abgasreinigung, dazu gehören auch die mit Abscheidern abgetrennten Stäube, müssen die Massenströme und die Konzentrationen für die Stoffe aus Tabelle I-3 ermittelt werden. Die Probenahme wird maßgeblich durch den Aufbau der Abgasreinigung bestimmt.</p> <p>Zeitabstand: 1 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 9 Proben.</p>
Reingas bei Gasnutzung	<p>Es müssen die Konzentration der Stoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. die in Tabelle I-4 aufgeführt sind.</p> <p>Zeitabstand: online über den Meßzeitraum.</p>
Reingas bei Gasverbrennung Kamin	<p>Bei einer Verbrennung des erzeugten Gases zur Energiegewinnung ist die Zusammensetzung des Abgases zu messen.</p> <p>Im gereinigten Abgas müssen die Konzentrationen der Schadstoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. für die Grenzwerte vorgegeben sind.</p> <p>Zeitabstand: entsprechend den gesetzlichen Auflagen bzw. Genehmigungsbescheid.</p>

I-3.2 Umfang der Energiebilanz

Im Rahmen des Meßprogramms müssen auch die Daten für die Energiebilanz erarbeitet werden, die nach den Ausführungen in Kapitel I-4.4 auf der Basis einer Enthalpiebilanz durchgeführt werden soll. Als Bilanzraum ist in Analogie zu den Stoffbilanzen ebenfalls die gesamte Anlage vorgesehen.

Für eine Enthalpiebilanz müssen die in Tabelle I-7 aufgeführten Daten bekannt sein. Dazu müssen u.a. die zugeführten Abfallströme, die Luft- und Abgasmengen sowie die Dampfmengen aufgezeichnet werden.

Tabelle I-7: Daten für eine Enthalpiebilanz

Heizwert der Abfälle
an den Wasser/Dampfkreislauf abgegebene Wärme
Wärmeverluste durch Strahlung
Wärmeverluste über das Abgas
Wärmeverluste über die Reststoffe der thermischen Behandlung

Um eine Vergleichbarkeit der Vergasungsverfahren mit den Verbrennungsverfahren zu ermöglichen, bietet sich eine theoretische Berechnung der Wärme an, die bei einer Verbrennung des Nutzgases nach dem Stand der Technik in einer Brennkammer an den Wasser-/Dampfkreislauf abgegeben wird.

Darüber hinaus müssen die Aufwendungen für technische Hilfsanlagen berücksichtigt werden, die nicht für alle Verfahren gleichermaßen erforderlich sind. Dazu gehören Zerkleinerungsanlagen bei der Wirbelschicht oder der Energiebedarf für die Herstellung von Sauerstoff, der bei einigen Vergasungsverfahren erforderlich ist. Die Art und Weise, wie diese Informationen beschafft werden, hängt von den Gegebenheiten am Standort der Anlage ab.

I-3.3 Auswahl der Rückstandseigenschaften

Neben den bisher betrachteten Stoff- und Energiebilanzen sind ergänzende Messungen zu den Eigenschaften der unterschiedlichen Rückstände erforderlich, denn die Rückstandseigenschaften sind für die Ablagerung oder Verwertung der Rückstände entscheidend.

Zu den wichtigsten Rückstandseigenschaften, die in jedem Fall untersucht werden sollten, gehören der Kohlenstoffgehalt (Gehalt an nicht anorganisch gebundenem Kohlenstoff) und die Elutionsbeständigkeit. Mit dem Kohlenstoffgehalt der Rückstände aus der thermischen Behandlung erhält man Informationen über die Güte des Verfahrens. Aus der Elutionsbeständigkeit der Rückstände läßt sich ableiten, wie gut die einzelnen Schadstoffe in die Feststoffmatrix der Rückstände eingebunden werden. Für die Durchführung der entsprechenden Untersuchungen gibt es in Deutschland und anderen Staaten unterschiedliche Normen und Richtlinien. Eine Zusammenstellung der entsprechenden Normen und Richtlinien ist im Anhang (Kapitel III-7) zu finden. Im Rahmen des Meßprogramms sind die einzelnen Meßverfahren vorab exakt zu bestimmen.

I-3.4 Zeitlicher Rahmen

Abschließend ist noch die Dauer des Meßprogramms festzulegen. Aufgrund von möglichen Schwankungen im Müllinput ist bei der Bilanzierung technischer Anlagen ein relativ langes Meßprogramm mit Probenahmen über längere Zeiträume erforderlich. Eine Beprobung der Anlage sollte an 6 bis 8 Tagen erfolgen. Die Meßzeit ist mit etwa 8 h pro Tag anzusetzen.

Darüber hinaus sollte das Meßprogramm in zwei Kampagnen durchgeführt werden, die durch eine Pause von 1 oder 2 Wochen getrennt sind. Eine solche Teilung der Experimente ermöglicht Aussagen zur "Stabilität" der Anlage und zu den Streubreiten der einzelnen Parameter. Ein größerer Zeitabstand im Bereich von 2 oder 3 Monaten sollte aufgrund von möglichen saisonalen Schwankungen im Abfallinput vermieden werden. Aus den erhaltenen Informationen und den ermittelten Daten kann dann, eventuell unter Berücksichtigung von Mittelwerten, eine belastbare Bilanz der Anlage erstellt werden.

I-4 Kriterien für den Verfahrensvergleich

In diesem Kapitel werden die Kriterien, die bereits zu Beginn von Abschnitt I-3 in Tabelle I-2 vorgestellt worden sind, ausführlich erläutert. Dabei wird auch auf gegenseitige Einflüsse und die Bedeutung für eine Bewertung eingegangen.

I-4.1 Rückstandsmengen

Die thermische Abfallbehandlung führt zu unterschiedlichen Rückstandsgruppen. Es lassen sich die Rückstände aus der thermischen Behandlung und die Rückstände aus der Abgasbehandlung unterscheiden. Außerdem kann im Bereich der Abgasreinigung Abwasser anfallen.

Im allgemeinen sind geringe Rückstandsmengen als Vorteil anzusehen, denn die Umweltbelastungen und die Kosten für Beseitigung oder Verwertung sinken mit abnehmenden Rückstandsmengen. Ein möglichst geringer Anfall an Rückständen wird außerdem in verschiedenen rechtlichen Vorgaben, beispielsweise BImSchG, TA Siedlungsabfall, KrW-/AbfG, gefordert.

Die Rückstandsmengen gestatten keine Aussage über deren Schadstoffgehalt oder den Gesamtprozeß der thermischen Behandlung, sondern müssen in Verbindung mit anderen Kriterien bewertet werden.

I-4.2 Rückstandseigenschaften

Die Eigenschaften der Rückstände werden durch die chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften beschrieben. Die physikalischen Eigenschaften sind für die Entsorgung oder Verwertung der Rückstände von großer Bedeutung. Die Anwendung der einzelnen Parameter, die in Tabelle I-8 zusammengestellt sind, hängen unter anderem von der Rückstandsart ab.

Tabelle I-8: Parameter zur Charakterisierung von Rückständen

Chemische Zusammensetzung <ul style="list-style-type: none"> • PCDD/F-Konzentration • Kohlenstoffkonzentration • Schwermetallkonzentrationen 	Physikalische / mineralogische / bautechnische Eigenschaften
	Eluierbarkeit
	Vorgaben zur Verwertung

Die Parameter **Schwermetall-, Kohlenstoff-** und die **Dioxinkonzentration**, eigentlich Teil der **chemischen Zusammensetzung**, wurden in Tabelle I-8 aufgrund ihrer Umweltrelevanz als eigenständige Parameter aufgeführt. Weitere Unterteilungen der chemischen Zusammensetzung in separate Parameter wären möglich. Die Analytik der chemischen Zusammensetzung, einschließlich Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe (z.B. Dioxine und Furane) ist problemlos durchzuführen.

Zu der chemischen Zusammensetzung gehört auch der Kohlenstoffgehalt der Rückstände, der für eine Ablagerung auf einer Deponie von großer Bedeutung ist. In Deutschland ist der Kohlenstoffgehalt einer der maßgeblichen Parameter, die für eine mögliche Ablagerung und die Zuordnung zu einem Deponietyp (Deponieklasse I oder II nach [TASi]) entscheidend sind.

Für eine weitergehende Charakterisierung der Rückstände dienen die **Eluierbarkeit** und **physikalische, mineralogischen und bautechnische Eigenschaften**. Mit Untersuchungen zum Elutionsverhalten wird festgestellt, wie fest einzelne chemische Elemente in den Rückstand eingebunden sind. Zu den physikalischen und mineralogischen Eigenschaften gehören z.B. die Festigkeit oder bautechnische Parameter. Diese Eigenschaften sind gemeinsam mit der chemischen Zusammensetzung für Aussagen zur Ablagerung oder Verwertung der Rückstände ausschlaggebend. Sowohl in Deutschland, z.B. im Anhang B der TA Siedlungsabfall [TASi], als auch in anderen Staaten enthalten gesetzliche Regelungen zum Teil entsprechende Grenzwerte. Eine Liste der entsprechenden Parameter und Grenzwerte ist im Anhang (Kapitel III-7) zu finden.

Für Untersuchungen zur Eluierbarkeit oder zu den bautechnischen Eigenschaften gibt es in vielen Ländern genormte Tests und Prüfverfahren, die nicht immer speziell für die nähere Charakterisierung von Rückständen aus Abfallverbrennungsanlagen entwickelt worden sind. Eine Auswahl an Normen und Prüfvorschriften ist ebenfalls im Anhang (Kapitel III-7) zusammengefaßt.

Mit diesen genormten Untersuchungsmethoden werden Aussagen für die Beurteilung der Rückstände und ein Vergleich der Rückstandsqualitäten verschiedener Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung möglich, dagegen sind **keine** Informationen über das Langzeitverhalten auf einer Deponie abzuleiten.

Die Einhaltung bestimmter Grenzwerte bezüglich der umweltrelevanten und bautechnischen Parameter kann eine spezielle **Verwertung** der Rückstände ermöglichen. Die Berücksichtigung einer möglichen Verwertung als eigenständiges Kriterium ist jedoch nicht sinnvoll, denn für die Verwertung existieren unterschiedliche, rechtliche und auch politische z.T. unklare Definitionen. So kann z.B. der Rückstand aus der Rauchgasreinigung durch eine Aufarbeitung zu Gips bzw. Salzsäure in der Industrie verwertet werden. Andererseits liegt auch eine Verwertung vor, wenn der gleiche Rückstand ohne Aufarbeitung im Bergbau als Versatzmaterial eingesetzt wird. Zusätzlich sind die Verwertungsmöglichkeiten vom Standort der Anlage abhängig.

Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, die Rückstände nach den "harten" Parametern, wie chemische Zusammensetzung, Eluattests usw., zu beurteilen. Diese Eigenschaften lassen sich durch Prüfverfahren zuverlässig bestimmen und ermöglichen einen belastbaren Vergleich von unterschiedlichen Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung.

Es ist ferner zu beachten, daß die Rückstandseigenschaften in der Regel durch Konzentrationsangaben beschrieben werden, also erst über die Rückstandsmengen in Frachten umgerechnet werden müssen. Außerdem sind für zusätzliche Verfahrensstufen zur Erzeugung bestimmter Rückstandseigenschaften weitere Betriebsmittel und Energie erforderlich. Die

Rückstandseigenschaften müssen also in Verbindung mit den Mengen der Rückstände und den Energiebilanzen gesehen werden.

I-4.3 Stoffbilanzen

Mit Stoffbilanzen werden die Wege einzelner chemischer Elemente oder Verbindungen in einer Kette von technischen Prozessen verfolgt und transparent gemacht. Darüber hinaus ermöglichen Stoffbilanzen Aussagen über die Stoffströme, die in die entsprechende Behandlungsanlage hineingehen und sie wieder verlassen. Eine Stoffbilanz führt zu Informationen über die absoluten Stoffmengen (Frachten), die in die einzelnen Umweltmedien eingetragen werden.

Mit einer Stoffbilanz ergeben sich folglich auch Aussagen über die Einhaltung bestehender Grenzwerte, wie z.B. für die viel beachteten Emissionen in die Atmosphäre. Außerdem ist ein Nachweis über den Verbleib bestimmter Schadstoffe in entstehenden Produkten möglich.

Für eine Stoffbilanz muß im Vorfeld der Arbeiten der Bilanzraum, mit dem die Grenzen der Stoffbilanz bestimmt werden, eindeutig definiert und festgelegt werden. Der Bilanzraum kann die gesamte Fabrikationsanlage oder nur bestimmte Verfahrensstufen umfassen. Allgemein nehmen die Komplexität und der meßtechnische Aufwand für die Stoffbilanz mit dem Wunsch nach einer möglichst detaillierten Aufklärung der Prozesse zu.

Zusätzlich zum Bilanzraum müssen die zu bilanzierenden Stoffe festgelegt werden. Die Auswahl der zu bilanzierenden chemischen Elemente oder Verbindungen sollte die unterschiedlichen Schadstoffgruppen erfassen, die während der betrachteten Prozesse auftreten können. Sie wird u.a. durch den festgelegten Bilanzraum beeinflusst, denn nicht alle Stoffe oder Verbindungen treten überall im Prozeß auf.

Werden Stoffbilanzen für die Beurteilung von Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung herangezogen, so sind die folgenden Aspekte zu beachten. Die Erstellung einer Stoffbilanz setzt die Verfügbarkeit von Informationen und Daten voraus. Für alle betrachteten Elemente oder Stoffe müssen Massen bzw. Volumenströme **und** die entsprechenden Konzentrationen bekannt sein. Dies wird in Abbildung I-1 deutlich.

Abbildung I-1: Wege zur Berechnung eines Stoffstroms

$$\begin{array}{l}
 \boxed{\text{Stoffstrom [kg/s]}} = \boxed{\text{Volumenstrom [m}^3\text{/s]}} \times \boxed{\text{Dichte [kg/m}^3\text{]}} \times \boxed{\text{Konzentration [kg/kg]}} \\
 \boxed{\text{Stoffstrom [kg/s]}} = \boxed{\text{Volumenstrom [m}^3\text{/s]}} \times \boxed{\text{Konzentration [kg/m}^3\text{]}} \\
 \boxed{\text{Stoffstrom [kg/s]}} = \boxed{\text{Massenstrom [kg/s]}} \times \boxed{\text{Konzentration [kg/kg]}}
 \end{array}$$

Ein Meßprogramm als Grundlage für eine Stoffbilanz hat den besonderen Eigenschaften des Restabfalls Rechnung zu tragen. Der Restabfall ist ein nicht homogenes Verbrennungsgut, dessen chemische Zusammensetzung starken Schwankungen unterliegt. Aufgrund dieser Eigenschaft ist davon auszugehen, daß aus einer Analyse des Abfalleintrags i.a. nur wenig

verlässliche Informationen für die Stoffbilanzen zu erhalten sind. Eine geschlossene Bilanz **mit** Erfassung des Abfallinputs ist in der Regel nicht möglich. Während der thermischen Behandlung wirkt die Anlage als "Homogenisator", so daß die Inputströme besser aus den Analysen der Rückstandsströme errechnet werden können.

Der Bilanzraum muß eventuell vorhandene Vorschaltanlagen erfassen, in denen die angelieferten Abfälle aufbereitet werden. Zu den Arbeitsschritten in den Vorschaltanlagen gehören Prozesse zur Pelletierung oder Zerkleinerung der Abfälle. Außerdem besteht in den Vorschaltanlagen die Möglichkeit, bestimmte Abfallfraktionen, wie z.B. Metalle, abzutrennen. Durch die Abtrennung einzelner Fraktionen ändert sich der Input in die thermische Behandlungsanlage gegenüber dem angelieferten Abfall.

Aus diesen Sachverhalten ergibt sich, daß für einen Vergleich verschiedener Systeme zur thermischen Abfallbehandlung mittels Stoffbilanzen der Bilanzraum die gesamte Anlage umfassen muß. Die Summe der untersuchten Stoffströme, die aus der Anlage austreten, muß schließlich zu Informationen über die originale Abfallzusammensetzung, d.h. zu Aussagen über die Konzentrationen der bilanzierten Stoffe im Abfallinput, führen. Nur auf diesem Weg werden ein belastbarer Vergleich und eine abschließende Bewertung möglich.

Auf der anderen Seite ist es wenig sinnvoll, immer alle Teilschritte einer thermischen Abfallbehandlungsanlage vollständig zu bilanzieren. Für einen Vergleich verschiedener Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung stehen die Stoffströme im Blickpunkt, die aus der Anlage austreten. Bei den Kombinationsverfahren wie dem Schwel-Brenn-Verfahren oder dem RCP-Verfahren entstehen auch Stoffströme, die zwischen einzelnen thermischen Behandlungsstufen auftreten, die Anlage aber nicht verlassen. Eine Untersuchung dieser Stoffströme ist einerseits in Hinblick auf die Umwelteinflüsse nicht zwingend erforderlich und andererseits sehr aufwendig. Im Rahmen der Stoffbilanz sollten diese Stoffströme vernachlässigt werden. Dies gilt auch für separate Aufbereitungsanlagen für Gips und Salzsäure aus der Rauchgasreinigung, die unabhängig von dem eigentlichen thermischen Verfahren betrieben werden können. Die Stoffströme in diesen separaten Anlagenteilen können bei Bedarf zuverlässig errechnet werden.

Als Resultat erhält man aus Stoffbilanzen sehr gute und belastbare Aussagen über die Anlage, die Stoffströme, den erforderlichen Bedarf an Hilfschemikalien und die Rückstandsströme. Durch die Gegenüberstellung von Stoffbilanzen wird ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung möglich.

Aufgrund dieser Eigenschaften kommt den Stoffbilanzen auch im Zusammenhang mit Umweltmanagement-Systemen eine besondere Bedeutung zu. Stoffbilanzen sind u.a. Grundlage für eine Zertifizierung nach der Öko-Audit-Verordnung der EU oder dem Normensystem ISO 14000.

I-4.4 Energiebilanzen

Die Energiebilanz für einen technischen Prozeß gibt Auskunft darüber, wo die freigesetzte oder verbrauchte Energie im System verbleibt. Dabei müssen unterschiedliche Energieformen wie Wärme oder elektrische Energie berücksichtigt werden. Für eine Energiebilanz muß, in Analogie zu den Stoffbilanzen, ein Bilanzraum definiert werden, der die zu bilanzierenden Anlagenteile erfaßt.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß es in bestehenden Rechtsvorschriften Vorgaben zu Energiebilanzen gibt. In Deutschland muß nach den Anforderungen für genehmigungs-

bedürftige Anlagen im Bundes-Immissionsschutzgesetzes (§ 5, Satz 1, Nr. 4) die entstehende Wärme genutzt werden, soweit dies technisch möglich und zumutbar ist.

Geht man im Fall der thermischen Abfallbehandlung von der eigentlichen Zielsetzung aus, so steht allerdings die sichere Beseitigung der Abfälle im Mittelpunkt. Zusätzlich besteht aufgrund der gesetzlichen Vorgaben die Verpflichtung, die im Prozeß entstehende Wärme zu nutzen. Eine möglichst hohe Nutzung der entstehenden Wärmeenergie, die in Strom, Fernwärme oder Prozeßdampf umgewandelt werden kann, bringt wirtschaftliche Vorteile durch die Erlöse. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß durch eine Energienutzung aus Abfällen fossile Brennstoffe substituiert werden (CO₂ - Diskussion).

Eine Betrachtung von Energiebilanzen zur Beurteilung unterschiedlicher Verfahren der thermischen Abfallbehandlung ist demnach sinnvoll, allerdings stehen die Energiebilanzen aufgrund der eigentlichen Zielsetzung der thermischen Abfallbehandlung in ihrer Bedeutung hinter anderen Kriterien zurück.

Für eine Energiebilanz muß, genau wie bei der Stoffbilanz, der Bilanzraum die gesamte Anlage umfassen. In Verbindung mit den neueren Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung sind vorgeschaltete Anlagen zur Abfallzerkleinerung oder zur Abtrennung einzelner Abfallfraktionen besonders zu beachten. Außerdem sind nur bei einigen Anlagen zum Betrieb spezielle Hilfstoffe, - ein Beispiel ist reiner Sauerstoff - , erforderlich, zu deren Herstellung Energie eingesetzt werden muß. Im Hinblick auf einen nachvollziehbaren Vergleich sollte aus der Enthalpiebilanz hervorgehen, welche Zusatzanlagen berücksichtigt wurden.

Für eine Beurteilung der unterschiedlichen Verfahren muß darüber hinaus in einer separaten Zusammenstellung der Energiebedarf für die Abfallaufbereitung in Vorschaltanlagen und die Bereitstellung von speziellen Hilfsstoffen für den Anlagenbetrieb erfaßt werden.

Die Energiebilanzen führen zu energetischen Wirkungsgraden, die das eigentliche Vergleichskriterium zur Beurteilung eines Verfahrens darstellen. Ein Vergleich von energetischen Wirkungsgraden großtechnischer Abfallbehandlungsanlagen ist mit Schwierigkeiten verbunden. Ein Problem ist in diesem Zusammenhang die Art und Weise, wie die Energie genutzt wird. Abhängig von den Gegebenheiten vor Ort ist eine Gewinnung von Strom, Fernwärme oder Prozeßdampf möglich. Darüber hinaus wird bei einigen Verfahren ein heizwertreiches Gas produziert, das durch eine Verbrennung zur Energieerzeugung oder als Ausgangsstoff für Produktionsprozesse verwendet werden kann.

Unterschiedliche Annahmen über die Wärmenutzung oder Turbinenwirkungsgrade führen bei der Berechnung der energetischen Wirkungsgrade zwangsläufig zu unterschiedlichen Ergebnissen. Ebenso bietet die Erzeugung von heizwertreichen Abgasen mehrere Möglichkeiten zur Berechnung von Wirkungsgraden. Diese Vielfalt der Energierückgewinnungsmethoden macht einen nachvollziehbaren Vergleich unterschiedlicher thermischer Verfahren auf der Basis von energetischen Wirkungsgraden nahezu unmöglich.

Im Rahmen des Meßprogramms wird ein anderer Weg vorgeschlagen. Im Mittelpunkt der Energiebilanz sollte eine Enthalpiebilanz für die thermischen Abfallbehandlungsverfahren stehen, die den Verbleib der im Abfall gespeicherten Energie aufzeigt. Die im Abfall gespeicherte Enthalpie wird über den Heizwert und den Abfallmassenstrom errechnet. Die Energieverluste ergeben sich aus den spezifischen Wärmekapazitäten und den Massenströmen, die aus der thermischen Behandlungsanlage austreten. Zu den Verlusten gehören auch die Strahlungsverluste. Als nutzbare Energie bei den Verbrennungsverfahren ist die Enthalpie des im Kessel erzeugten Dampfes aufzufassen.

Um die Vergasungsverfahren mit den Verbrennungsverfahren vergleichen zu können, bietet sich eine Modellrechnung an, in der das Nutzgas der Vergasungsverfahren in einer Brennkammer nach dem Stand der Technik verbrannt wird.

I-4.5 Kosten

Die Kosten stellen für die Bewertung eines Verfahrens ein sehr wichtiges Kriterium dar, denn sie müssen über die Abfallgebühren oder Entsorgungspreise von den Bürgern oder der Industrie aufgewendet werden. Die finanziellen Aufwendungen für eine thermische Abfallbehandlungsanlage lassen sich nach [Horch] in Fixkosten und durchsatzabhängige (variable) Kosten unterteilen:

Fixkosten:	Kapitaldienst, Abschreibung, Personalkosten, Versicherungen, Wartung / Instandhaltung
durchsatzabhängige Kosten: (variable Kosten)	Betriebsmittelkosten, Rückstandsverwertung / -entsorgung, Verschleißteilkosten

Betrachtet man die finanziellen Aufwendungen für den Betrieb einer großtechnischen Abfall-entsorgungsanlage, die durch Einnahmen für Entsorgungsdienstleistungen gedeckt werden müssen, so erkennt man, daß Kapitaldienst und Abschreibung für die Investition den größten Anteil haben. Folglich müssen die Investitionskosten für eine kostengünstige Entsorgung möglichst niedrig sein und andererseits muß die Anlage möglichst gut ausgelastet sein.

Die Investitionskosten hängen entscheidend vom technischen Aufwand der Anlage ab. Mit der Forderung nach einer möglichst weitgehenden Unterschreitung der Grenzwerte und einer stofflichen Verwertung der Rückstände (als Salzsäure und Gips) steigt der verfahrenstechnische Aufwand und damit der Investitionsbedarf.

Eine genaue Analyse und ein Vergleich der Kosten sind für die verschiedenen Systeme der thermischen Abfallbehandlung nur mit relativ großen Unsicherheiten durchzuführen. Die Bau- und Betriebskosten werden sehr stark durch die Bedingungen und Vorgaben am Standort der Anlage beeinflusst. Zusätzlich sind die abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen im Entsorgungsgebiet und die Möglichkeiten zur Wärmenutzung zu berücksichtigen.

Weitere Probleme für die Kostenanalyse entstehen, wenn detailliertere Informationen für einen Kostenvergleich erforderlich sind. Bei großtechnischen Anlagen sind die Investitions- und Personalkosten für einzelne Anlagenteile nur unzureichend aufgeschlüsselt. Es sind nur die Kosten für die Gesamtanlage bekannt.

Die Belastbarkeit von Angaben zu den Investitionskosten sind auch davon abhängig, ob das entsprechende Abfallbehandlungsverfahren im großtechnischen Maßstab schon gebaut bzw. etabliert ist. Bei einem nicht großtechnisch erprobten Verfahren ist im Rahmen der Genehmigung aufgrund fehlender Erfahrungen mit höherem Aufwand zu rechnen. Erst wenn mehrere Anlagen nach dem gleichen Konzept errichtet worden sind, können über die Investitionskosten und damit über die Kosten der thermischen Behandlung sichere Angaben gemacht werden.

I-4.6 Einhaltung rechtlicher Auflagen

Der Bau und Betrieb von Anlagen zur thermischen Behandlung von Restabfall wird durch eine große Anzahl an rechtlichen Regelungen bestimmt. Die rechtlichen Vorgaben umfassen alle Bereiche der Anlage mit Auflagen zu Konstruktion, Bautechnik, Anlagensicherheit usw.

bis zu Grenzwerten für die Emissionen. Ohne die Einhaltung der entsprechenden Anforderungen ist ein Anlagenbetrieb nicht möglich.

Die rechtlichen Auflagen ergeben sich in Deutschland allerdings nicht nur aus den Gesetzen, die auf Bundesebene erlassen worden sind. Zu den Vorschriften für den Betrieb einer Anlage sind auch die auf Landesebene erlassenen Gesetze und das Satzungsrecht zu beachten.

Den rechtlichen Auflagen kam in der Vergangenheit für einen Vergleich verschiedener Abfallbehandlungsverfahren eine große Bedeutung zu, denn im Mittelpunkt standen die Emissionsgrenzwerte. Durch den technischen Fortschritt werden heute die Grenzwerte in der Regel sicher erreicht und meistens deutlich unterschritten.

Die Einhaltung oder Unterschreitung rechtlicher Auflagen macht aber keine Aussage über den eigentlichen Anlagenbetrieb. Grenzwerte können mit großem Überschuß oder nur mit einem kleinen Überschuß an Hilfschemikalien eingehalten werden. Außerdem werden die Grenzwerte in Konzentrationen gemessen, die keine Aussage zu den stofflichen Vorgängen in der Anlage machen.

Da die Emissionen und damit die Stoffströme, die aus der Anlage in die Umwelt gelangen, von Stoffbilanzen (siehe Abschnitt I-4.3) erfaßt werden, kommt der Einhaltung von rechtlichen Auflagen als Kriterium für eine Bewertung eigentlich nur eine untergeordnete Bedeutung zu.

I-4.7 Entsorgungssicherheit

Für die öffentlich rechtlichen Entsorgungsträger, die nach dem Gesetz für die Hausmüllentsorgung verantwortlich sind, ist die Entsorgungssicherheit von großer Bedeutung. Eine Anlagentechnik, die zuverlässig funktioniert, ermöglicht eine hohe Verfügbarkeit und damit eine sichere Entsorgung der vorgesehenen Abfallmengen. Außerdem gewährleistet eine zuverlässige Funktion die Einhaltung von Grenzwerten und anderen Genehmigungsauflagen. Durch diese beiden Aspekte werden finanzielle Risiken vermieden.

Für einen Vergleich der im Rahmen des Meßprogramms untersuchten thermischen Verfahren zur Abfallbehandlung müssen die Anlagenkapazität und die erreichte Verfügbarkeit erfaßt werden. Aus diesen Daten erhält man Aussagen über die Zuverlässigkeit der Anlage und zur Entsorgungssicherheit.

Dieses Kriterium darf allerdings nicht überbewertet werden. Es besteht sonst die Gefahr, daß der technische Fortschritt und die Einführung moderner Verfahren behindert werden. Im Bereich der thermischen Abfallbehandlung würden dann nur Rostfeuerungen gebaut, die sich in den vergangenen Jahrzehnten zur Restmüllentsorgung bewährt haben.

I-4.8 Anwendung im Ausland

Ein Export von deutscher Technik in andere Länder gelingt in der Regel nur, wenn im Exportland ein konkreter Bedarf besteht. Auf den Bedarf einer Technik zur Abfallentsorgung haben zunächst die vorhandenen rechtlichen Rahmenbedingungen einen sehr großen Einfluß. In der Regel stehen diese rechtlichen Rahmenbedingungen für die Abfallentsorgung und deren Umsetzung in einem direkten Zusammenhang mit der Einstellung des Staates zum Umweltschutz.

Wenn für die Abfallentsorgung ein Bedarf an thermischen Abfallbehandlungsanlagen besteht, müssen Informationen über die Abfallmengen und Abfalleigenschaften zusammengestellt werden. Die Mengen und Eigenschaften der Abfälle werden von den Lebensgewohnheiten der Bevölkerung und abfallwirtschaftlichen Maßnahmen in dem jeweiligen Land bestimmt.

Außerdem sind die Anforderungen im Exportland zu ermitteln, die z.B. bei den Emissionen oder einer Verwertung der Rückstände eingehalten werden müssen.

Aus den bisherigen Ausführungen ergibt sich, daß eine Beurteilung eines thermischen Behandlungsverfahrens in Hinblick auf seine Anwendung im Ausland nur auf der Basis von detaillierten örtlichen Kenntnissen möglich ist. Um den Rahmen dieser Studie nicht zu sprengen, sollen hier nur einige deutsche Nachbarländer betrachtet werden. Die entsprechenden Anforderungen für Emissionen, Eigenschaften der Rückstände und weitere Vorgaben sind im Anhang (Kapitel III-7) zusammengestellt.

I-4.9 Auswahl der Kriterien

Auf der Basis der auszuwählenden Kriterien soll ein Meßprogramm erarbeitet werden, das einen belastbaren Vergleich von verschiedenen Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung gewährleistet. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, was die Neuentwicklungen im Bereich der thermischen Abfallbehandlung im Hinblick auf die zu erfüllenden Anforderungen des Umweltschutzes, betrieblich und ökonomisch, leisten. Der Vergleich, der sich auf existierende Anlagen im großtechnischen Maßstab beschränkt, soll eine sichere Beurteilung der einzelnen Verfahren ermöglichen und später zu einer Entscheidung bei der Verfahrensauswahl für den Neubau einer Anlage im In- oder Ausland beitragen.

Von den Kriterien, die in den Kapitel I-4.1 bis I-4.8 vorgestellt und diskutiert worden sind, bieten umfassende **Stoffbilanzen** der unterschiedlichen Anlagen die beste Basis für einen Vergleich. Ein Meßprogramm muß eine umfassende Stoffbilanz, die den Weg einzelner Stoffe und deren Verbleib beim Verlassen der Anlage aufzeigt, zum Ziel haben. Außerdem führen Stoffbilanzen zu detaillierten Aussagen über den Bedarf an Hilfsstoffen, die insbesondere für die thermische Behandlung und die Abgasreinigung von Bedeutung sind. Die Stoffbilanzen schließen darüber hinaus weitere Kriterien wie **Rückstandsmengen** oder die chemische Zusammensetzung der Rückstände ein.

Die **Rückstandseigenschaften** wirken sich insofern auf das Meßprogramm aus, als im Rahmen der Probenahme aus den unterschiedlichen Massenströmen eine ausreichende Menge an Probenmaterial für eine spätere Untersuchung der Rückstandseigenschaften zu Verfügung gestellt werden muß. Im Rahmen der späteren Bewertung der einzelnen Verfahren kommt den Rückstandseigenschaften dann eine große Bedeutung zu, denn die möglichen Wege für eine Verwertung oder eine Beseitigung werden durch die Rückstandseigenschaften maßgeblich bestimmt.

Als weiteres Kriterium für einen Vergleich sind die **Energiebilanzen** heranzuziehen, die aber aufgrund der Aufgabenstellung der thermischen Abfallbehandlung eine geringere Bedeutung haben. Für einen aussagekräftigen Vergleich sollten im Rahmen der Energiebilanz die Enthalpieströme der Anlagen erfaßt werden. Zusätzlich ist der Energiebedarf für Vorschaltanlagen oder die Bereitstellung von verfahrensspezifischen Betriebsmitteln wie Sauerstoff zu erfassen. Bei den Energiebilanzen muß außerdem ein geeigneter Weg zum Vergleich von Vergasungs- und Verbrennungsverfahren gefunden werden. Eine Möglichkeit ist die Verbrennung des Nutzgases in einer Brennkammer nach dem Stand der Technik bzw. die Berücksichtigung der chemisch gebundenen Energie.

Zwei weitere Kriterien, die **Kosten** und die **Entsorgungssicherheit**, sind für das Meßprogramm weniger von Bedeutung. Diese Kriterien müssen aber in eine abschließende Bewertung mit einfließen, denn für einen weiteren Einsatz im In- und Ausland sind diese beiden Aspekte sehr wichtig. Im Fall der Kosten ist zu beachten, daß sich die an einer

bestehenden Anlage ermittelten Kosten nur unter Berücksichtigung lokaler Randbedingungen auf einen anderen Standort übertragen lassen.

Die **Einhaltung rechtlicher Auflagen** ist für den Betrieb großtechnische Anlagen, die im Rahmen des Meßprogramms untersucht werden, zwingend erforderlich. Dieses Kriterium bietet damit keine bedeutende Erkenntnisse für den Vergleich oder eine abschließende Bewertung. Die Emissionen, die in diesem Zusammenhang immer wieder für Diskussionen sorgen, werden mit den Stoffbilanzen erfaßt.

Für eine Empfehlung eines Verfahrens zur **Anwendung im Ausland** muß eine Beschränkung auf ausgewählte Länder erfolgen. Um die Möglichkeiten für einen Export zu untersuchen, müssen insbesondere die Reststoffe mit den Tests untersucht werden, die im Exportland vorgesehen sind.

I-5 Techniken zur thermischen Abfallbehandlung

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Verfahren zur thermischen Behandlung von Hausmüll bzw. Restabfall kurz vorgestellt. Die Auswahl beschränkt sich auf Techniken, die bereits heute oder in naher Zukunft im großtechnischen Maßstab eingesetzt werden. Damit ist eine Anwendung des Meßprogramm auf die beschriebenen Verfahren möglich.

Ergänzend wird zu mehreren der vorgestellten Verfahren ein Meßprogramm entsprechend den Ausführungen in Kapitel I-3 vorgeschlagen. Die Vorschläge für die Meßprogramm beschränken sich weitgehend auf die Probenahme für die Stoffbilanzen. Für die Planung eines Meßprogramms sind die Hinweise in Abschnitt III zu beachten. Außerdem basieren die vorgeschlagenen Meßprogramme auf Informationen aus der Literatur, so daß eventuell Veränderungen erforderlich sind.

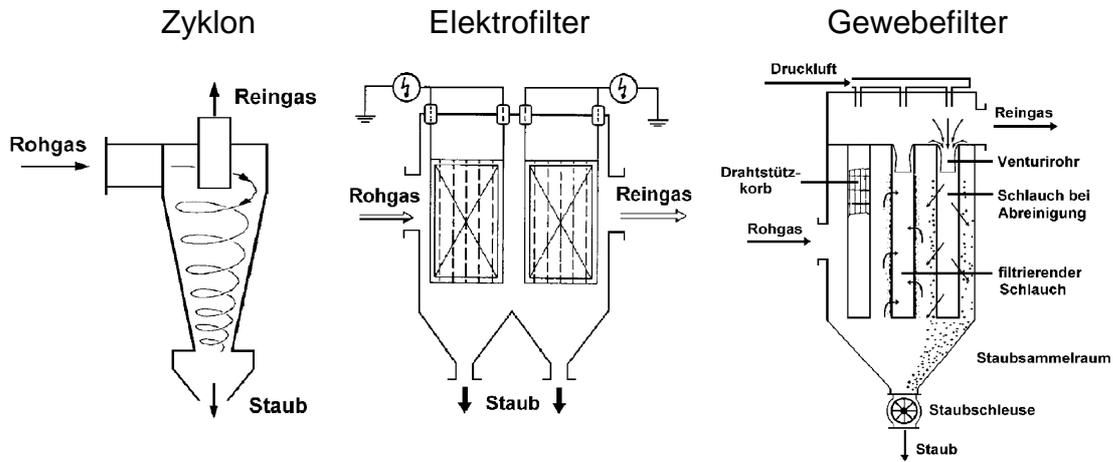
Bei allen Vergasungs- und Verbrennungsverfahren ist nach der thermischen Behandlung eine Abgasreinigung erforderlich. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, zunächst kurz auf die unterschiedlichen Techniken zur Abgasbehandlung einzugehen.

I-5.1 Abgasreinigung

Die Abgasreinigungsanlagen beruhen auf einer Reihenschaltung von mechanischen und thermischen Trennverfahren der Verfahrenstechnik. Die möglichen Kombinationen der einzelnen Trennverfahren führen zu sehr unterschiedlich aufgebauten Abgasreinigungsanlagen.

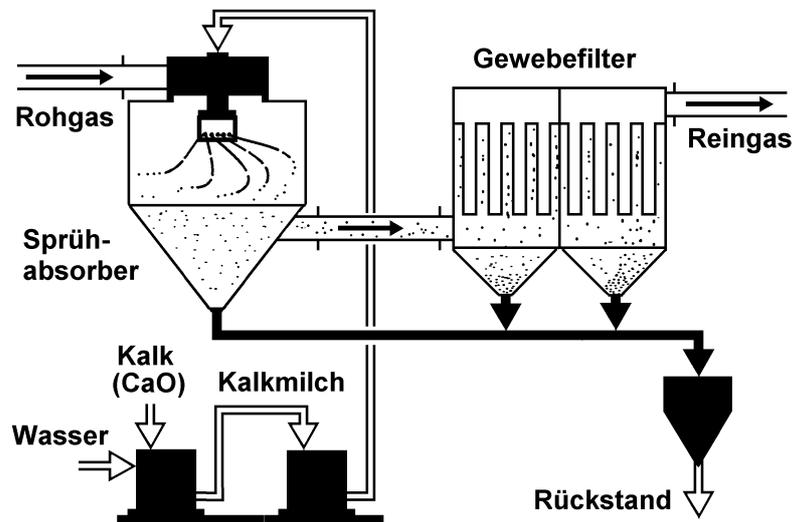
In der Regel wird nach der thermischen Behandlung aus dem Rohgas zunächst der Staub abgetrennt. Für die Staubabscheidung werden Gewebefilter, Elektrofilter oder Zyklone eingesetzt. Aufgrund der begrenzten Abscheideleistung werden Zyklone heute nur noch als Vorabscheider verwendet. Die beste Abscheideleistung hat der Gewebefilter.

Abbildung I-2: Entstaubungsaggregate



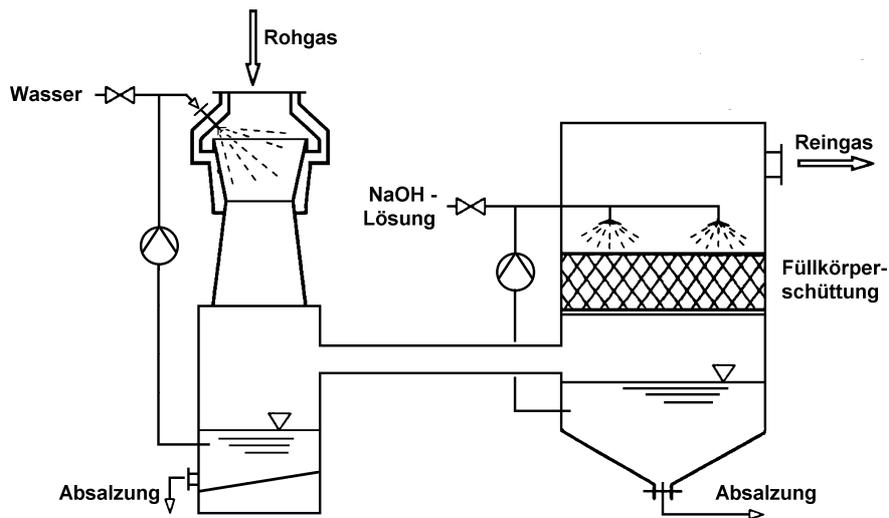
Für die Abscheidung der sauren Schadstoffe, HCl, HF und SO₂ sind trockene, quasitrockene und nasse Arbeitsweisen zu unterscheiden, die den Einsatz von Hilfschemikalien erfordern. Bei den trockenen und quasitrockenen werden Calciumhydroxid oder Calciumcarbonat in den z.T. angefeuchteten Abgasstrom als Pulver oder Suspension eingedüst und reagieren mit den sauren Schadstoffen zu den entsprechenden Calciumsalzen. Der verfahrenstechnische Prozeß unterscheidet sich nur in der Art und Weise, wie die Hilfschemikalien zugeführt werden. Die Reaktionsprodukte werden in einem Staubabscheider, an modernen Anlagen in der Regel ein Gewebefilter, aus dem Rauchgas abgetrennt.

Abbildung I-3: Schema einer quasitrockenen Rauchgasreinigung



Die nasse Arbeitsweise zur Abscheidung der sauren Schadstoffe arbeitet nach einem anderen Prinzip. Die Schadstoffe werden in Wäschern von einer Waschflüssigkeit absorbiert. Bei dieser Arbeitsweise werden mit Hilfschemikalien der pH-Wert der Waschflüssigkeit eingestellt und die Abwässer aus den Wäschern neutralisiert.

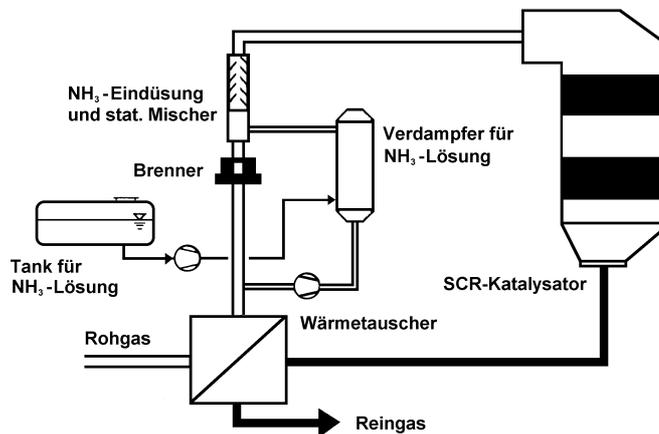
Abbildung I-4: Schema einer nassen Rauchgasreinigung



Der Bedarf an Hilfschemikalien, bezogen auf die Schadstoffkonzentrationen im Rohgas, ist bei der trockenen Arbeitsweise sehr groß. Es ist ein zwei- bis dreifacher Überschuß erforderlich. Im Fall der nassen Arbeitsweise wird nur ein geringer Überschuß in der Größenordnung von ca. 20 % benötigt.

Waschverfahren dienen auch zur Abscheidung von Schwefelwasserstoff (H_2S), das nur im Abgas von Vergasungsanlagen enthalten ist. Am Standort Karlsruhe wird für die Thermo-select-Anlage das Sulferox-Verfahren eingesetzt [Schrickel]. Mit Eisen-Komplexverbindungen entstehen elementarer Schwefel und Wasserstoff.

Abbildung I-5: SCR-Verfahren



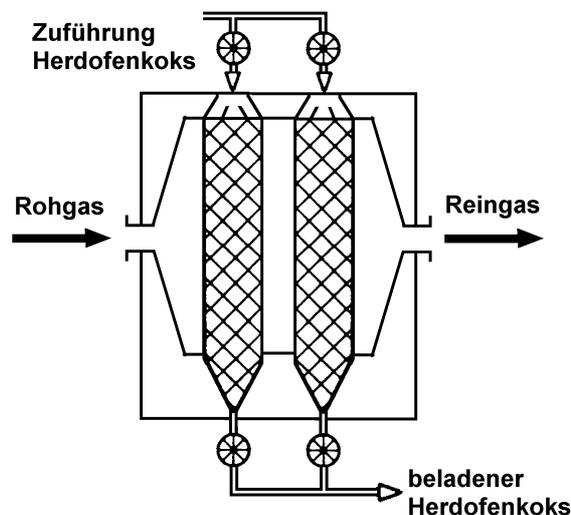
Aufgrund der Emissionsgrenzwerte müssen in vielen Ländern aus den Abgasen der Abfallverbrennungsanlagen die Stickoxide entfernt werden. Im technischen Maßstab haben sich das SCR- (Selectiv Catalytic Reduction) und das SNCR-Verfahren (Selectiv Non Catalytic Reduction) durchgesetzt. Die im Rauchgas enthaltenen Stickoxide, überwiegend Stickstoffmonoxid, reagieren bei diesen Verfahren mit Ammoniak zu Wasser und Stickstoff.

Die chemische Reaktion verläuft bei dem SCR-Verfahren an einem Katalysator bei Temperaturen um $250\text{ }^\circ\text{C}$. Aufgrund des fehlenden Katalysators sind für die reine Gasphasenreaktion des SNCR-Verfahrens Temperaturen von etwa $900\text{ }^\circ\text{C}$ und ein Ammoniaküberschuß erforderlich.

Zur Abscheidung von Quecksilber, organischen Substanzen (Dioxine, Furane) und geringen Restkonzentrationen der sauren Schadstoffe dienen Flugstromadsorber. Bei diesem Verfahren wird ein Gemisch aus Aktivkohle und Calciumhydroxid in den Abgasstrom eingeblasen, an das die Schadstoffe adsorbiert werden. Der Adsorptionsvorgang verläuft im Rauchgasweg und im Filterkuchen des Gewebefilters, mit dem das eingebrachte Reagenz wieder aus dem Abgasstrom entfernt wird. Der Rückstand aus dem Gewebefilter wird entweder in die thermische Behandlungsstufe zurückgeführt oder deponiert.

Eine weitere Technik zur Reinigung von Abgasen sind Kohlefestbettadsorber, die Quecksilber und organische Schadstoffe aus dem Abgas abtrennen.

Abbildung I-6: Kohleadsorber



Das Abgas durchströmt eine Aktivkohleschicht, an der die Schadstoffe adsorbiert werden. Die beladene Aktivkohle wird aus dem Adsorber abgezogen und durch unbeladenes Adsorbens ersetzt. Der beladene Aktivkoks wird in die thermische Behandlung zurückgeführt, wenn eine entsprechende Senke, z.B. Wäscher, in der Rauchgasreinigung vorhanden ist.

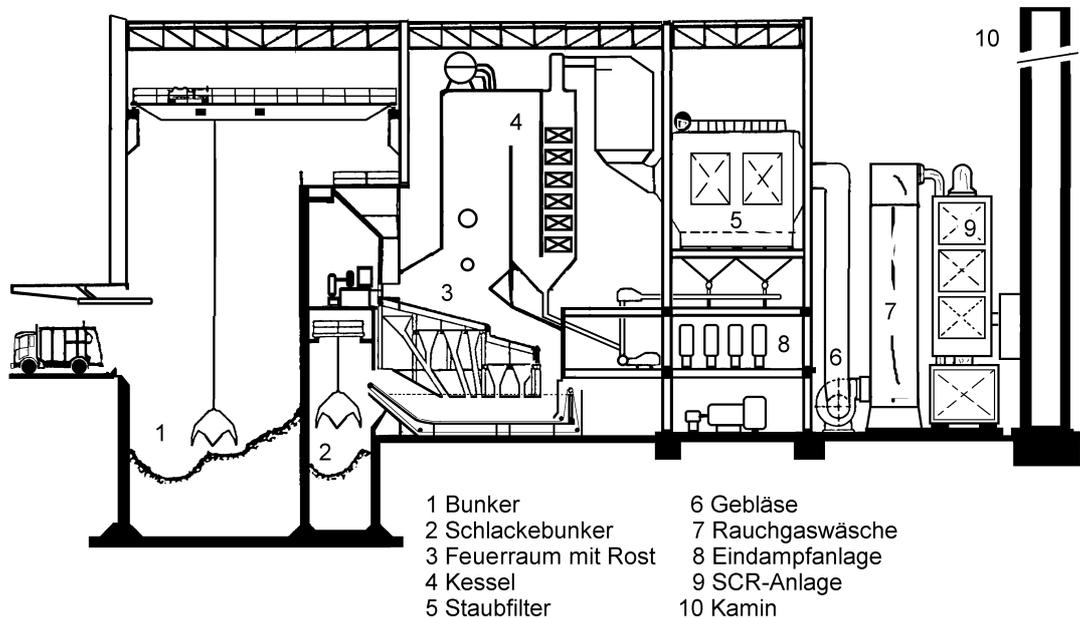
I-5.2 Thermische Abfallbehandlungsverfahren

I-5.2.1 Die Rostfeuerung

Das Prinzip der heute gebräuchlichen Rostfeuerung gehört nach der offenen Verbrennung auf der Deponie zu den ältesten Verfahren der thermischen Abfallbehandlung. Bei dieser Technologie bewegt ein als Rost bezeichnetes Fördersystem den Abfall durch den Brennraum. Verschiedene Typen derartiger Roste (Vorschubrost, Rückschubrost, Walzenrost usw.) wurden entwickelt und sind weltweit in Betrieb. Auf dem Rost laufen nacheinander und teilweise simultan die einzelnen Stufen einer heterogenen Verbrennung - Trocknung, Entgasung, Vergasung, Verbrennung - ab. Die Primärluft für die Verbrennung wird dem Rost von unten zugeführt. Für einen vollständigen Ausbrand der Verbrennungsgase ist eine Sekundärluftzuführung vorgesehen. Die entstehenden Verbrennungsgase verlassen den Feuerraum nach oben und geben ihre Wärmeenergie an den Kessel ab. Die verschiedenen Schadstoffe im Abgas müssen vor der Abgabe an die Atmosphäre in einer Abgasreinigung entfernt werden.

Die Abbildung I-7 zeigt den schematischen Aufbau einer Abfallverbrennungsanlage mit Rostfeuerung.

Abbildung I-7: Rostfeuerung zur thermischen Abfallbehandlung



Meßprogramm:

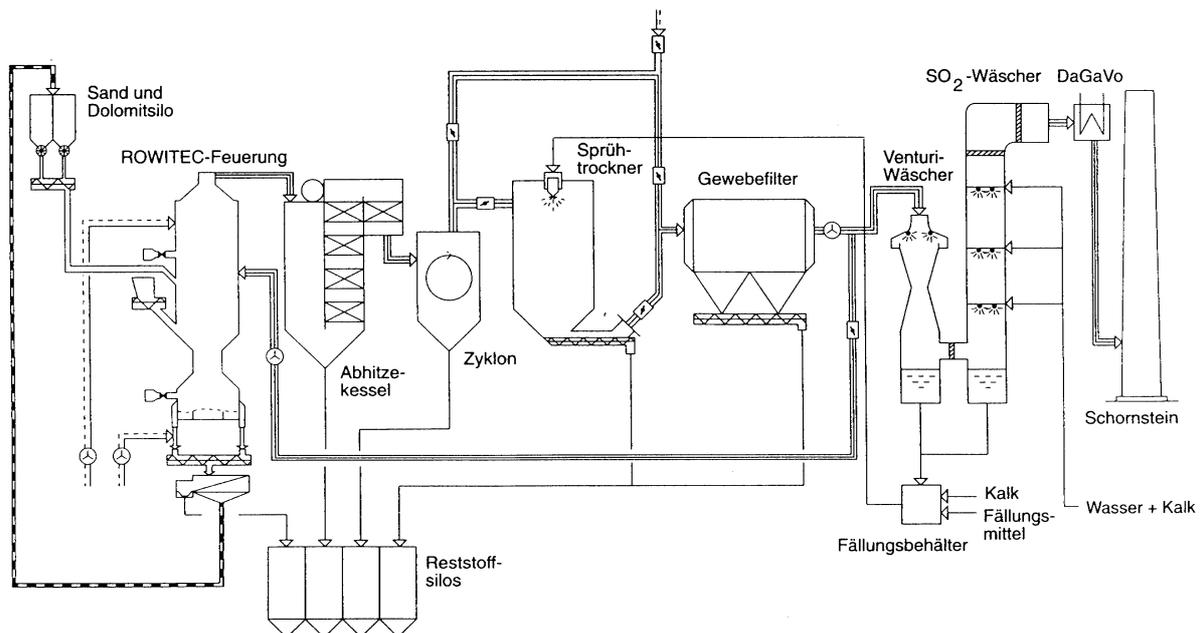
Nach unseren Erkenntnissen ist ein Untersuchungsprogramm für eine Rostfeuerung, die im Aufbau den üblichen Anlagen in Deutschland entspricht, nicht erforderlich. Über die Stoffströme und die Eigenschaften der entstehenden Rückstände liegen sehr umfangreiche Informationen vor.

Von größerem Interesse sind die Auswirkungen einer Vorschaltanlage, die eine Abtrennung von bestimmten Abfallfraktionen ermöglicht. Am Standort Köln wurde eine konventionelle Rostfeuerung mit einer Sortieranlage zur Abtrennung von Wertstoffen ausgerüstet [AVG].

I-5.2.2 Die Wirbelschicht

Im Ausland, insbesondere in Japan, hat die Wirbelschicht für die thermische Behandlung von Abfällen eine große Bedeutung. In der Bundesrepublik Deutschland wurde die Wirbelschichttechnologie im Abfallbereich bisher überwiegend zur Klärschlammverbrennung eingesetzt. Zur Zeit gibt es nur am Standort Berlin-Ruhleben eine Wirbelschichtanlage zur thermischen Restabfallbehandlung, auf die sich die folgende Beschreibung bezieht.

Abbildung I-8: Die Wirbelschichtanlage in Berlin-Ruhleben [nach Wiegandt]



Eine Wirbelschicht ist eine Schicht aus Sand oder einem anderen Inertmaterial, die durch die Primärluft, von unten durch einen Düsenboden zugeführt, in Bewegung gehalten wird. Der zu verbrennende Abfall wird direkt in die Sandschicht zugeführt, teilweise auch oberhalb der Sandschicht im Feuerraum zugegeben. Durch die gute Wärmeübertragung von dem heißen Sand auf Abfall kommt es zur schnellen Zündung und der Abfall verbrennt in der Wirbelschicht. Durch die Zuführung von Sekundärluft wird auch im Gasraum oberhalb der Wirbelschicht ein vollständiger Ausbrand der entstehenden Abgase erreicht.

Die Rowitec[®]-Wirbelschicht am Standort Berlin-Ruhleben, entwickelt von den Firmen Hölter ABT und Lurgi, unterscheidet sich von einer normalen Wirbelschicht durch eine gezielte Bewegung des Inertmaterials. Durch einen geneigt eingebauten Düsenboden und eine Verteilung der Primärluft wird die aufgelockerte Sandschicht in Form einer rotierenden Walze bewegt. Die Anlage ist für einen Durchsatz von 8,5 Mg Abfall pro Stunde ausgelegt.

Zur Verbrennung von Siedlungsabfällen in der Wirbelschicht muß der Restmüll immer aufbereitet werden. Am Standort Berlin-Ruhleben werden die Abfälle mit einem Schredder zerkleinert und Metallfraktionen abgetrennt.

Bei Wirbelschichtanlagen wird, wie bei anderen Verbrennungstechniken, die Abgaswärme in einem Kessel zur Dampferzeugung genutzt und das Abgas in einer Reinigungsanlage von Schadstoffen befreit. Der Aufbau der Wirbelschichtanlage einschließlich Abgasreinigung ist der Abbildung I-8 zu entnehmen.

Meßprogramm

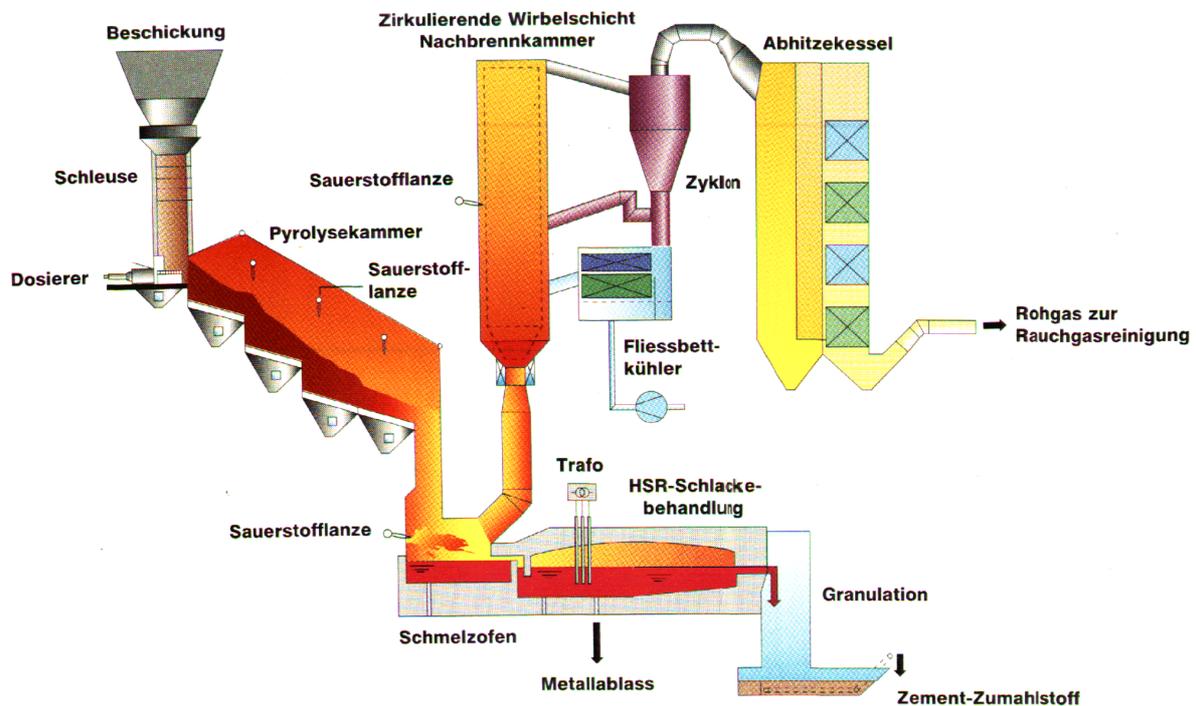
Ort	Stoffstrom und Probenahme
Mechanische Vorschaltanlage	An der Vorschaltanlage müssen der erforderliche Energiebedarf für den Shredder und alle Massenströme, Input und Output, bestimmt werden. Außerdem müssen die Konsistenz und die Bandbreite der Partikelgrößen ermittelt werden.
Feststoffaustrag aus dem Brennraum	Als Rückstand der Verbrennung entsteht nur Bettasche aus der Wirbelschicht. Es sind die Massenströme und die Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe zu bestimmen. Zeitabstand: 0,5 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 17 Proben.
Nach der Verbrennung / Kesselausgang	Messung der gasförmigen Verbindungen für die Bilanz der Stoffe aus Tabelle I-3 als HCl, SO ₂ , HF, HBr und Hg sowie der Gaskonzentrationen nach Tabelle I-4. Bestimmung der Staubmengen und der Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Substanzen. Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.
Stoffausgänge der Abgasbehandlung	Probenahme für Stäube aus Kessel, Zyklon und Gewebefilter. Bestimmung der Massenströme und Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe. Zeitabstand: 1 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 9 Proben.
Kamin	Im gereinigten Abgas müssen die Konzentrationen der Schadstoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. für die Grenzwerte vorgegeben sind. Zeitabstand: entsprechend den gesetzlichen Auflagen bzw. Genehmigungsbescheid.

I-5.2.3 Das Recycled Clean Products-Verfahren

Die Fa. Von Roll hat das Recycled Clean Products-Verfahren (RCP) entwickelt, um einen möglichst hohen Anteil an verwertbaren Stoffen zu gewinnen [Von Roll]. Die Anlagentechnik in Abbildung I-9 ähnelt zwar der Rostfeuerung, aber bei dem RCP-Verfahren handelt es sich um ein Kombinationsverfahren mit völlig anders verlaufenden thermischen Prozessen.

Die thermische Behandlung der Abfälle ist in vier Teilbereiche gegliedert. In den von Fa. Von Roll als Pyrolysekammer bezeichneten Raum werden die Abfälle auf einem Rost entgast. Die für diesen Prozeß notwendige Energie wird durch Teiloxidation der entstehenden Pyrolysegase mit Sauerstoff erzeugt. Der Pyrolysekoks und das Gas werden in der zweiten Stufe, dem Schmelzofen, durch die Zuführung von Sauerstoff verbrannt. Der Einsatz von Sauerstoff führt hier zu einer Temperatur von über 1400 °C, so daß eine schmelzflüssige Schlacke entsteht. Aus dem Schmelzofen wird die Schlacke der Schlackebehandlung zugeführt. Hier werden eine Kupfer-Eisen-Legierung und ein granulierter Feststoff erzeugt.

Abbildung I-9: Das RCP-Verfahren [Von Roll] [Brunner]



Die entstehenden Gase aus der Pyrolysekammer, dem Schmelzofen und der Schlackebehandlung werden in die Nachbrennkammer, die als zirkulierende Wirbelschicht mit Sandbett arbeitet, abgeleitet [Engweiler]. In der Wirbelschicht werden die Rauchgase vollständig ausgebrannt und auf Temperaturen unterhalb von 1000 °C abgekühlt. Ein Teil der Energie wird durch den Sand auf einen Fließbettkühler übertragen. Von der zirkulierenden Wirbelschicht gelangen die Abgase zu einem Abhitzekessel und dann in die Abgasreinigung.

In Bremerhaven wird zur Zeit eine großtechnische RCP-Anlage mit einer Kapazität von 6 t/h in Betrieb genommen [Brunner]. Diese Anlage besitzt allerdings keine eigenständige Abgasreinigung, sondern die Abgase werden in den Reinigungsanlagen der bestehenden Rostfeuerungen von Schadstoffen befreit [Capitaine].

Während der Betriebsperioden im September/Oktober und November 1997 war ein 24 h-Schichtbetrieb mit 60 % der geplanten Durchsatzleistung möglich. Durch konstruktive Änderungen am Übergang vom Schmelzofen zur Nachbrennkammer soll die Durchsatzleistung erhöht werden. [Capitaine]

Der folgende Vorschlag für das Meßprogramm ist für die Anlage in Bremerhaven vorgesehen.

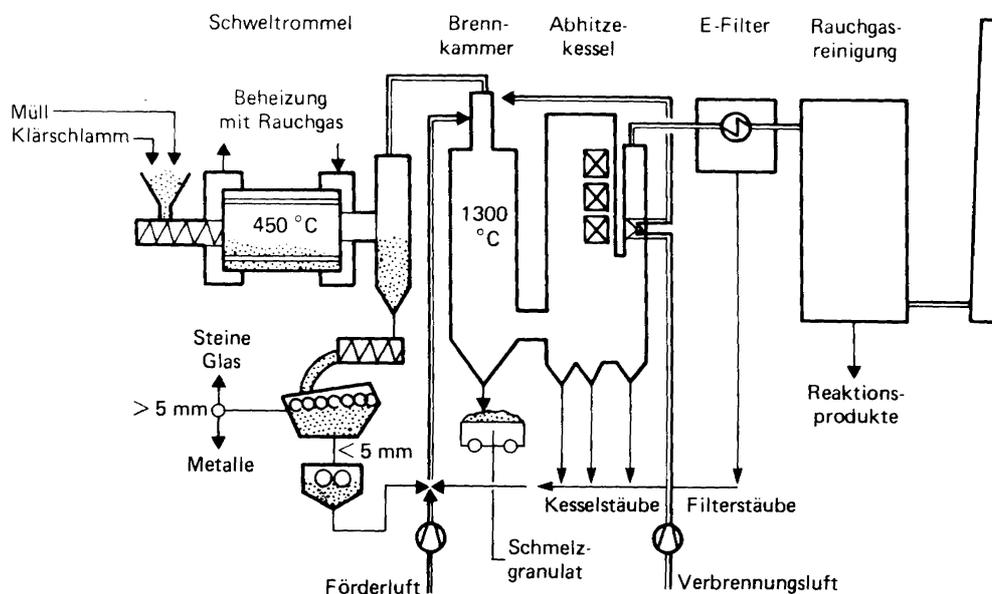
Meßprogramm

Ort	Stoffstrom und Probenahme
Feststoffaustrag nach der thermischen Behandlung	Als Produkte der Verbrennung müssen die Kupfer-Eisen-Legierung und der granulierten Feststoff untersucht werden. Es sind die Massenströme und die Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe zu bestimmen. Zeitabstand: 0,5 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 17 Proben.
Nach der Verbrennung / Kesselausgang	Messung der gasförmigen Verbindungen für die Bilanz der Stoffe aus Tabelle I-3 als HCl, SO ₂ , HF, HBr und Hg sowie der Gaskonzentrationen nach Tabelle I-4. Bestimmung der Staubmengen und der Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Substanzen. Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.

I-5.2.4 Das Schwel-Brenn-Verfahren

Das Schwel-Brenn-Verfahren gehört ebenfalls zu der Gruppe der sogenannten Kombinationsverfahren, in denen der Prozeß der thermischen Behandlung auf verschiedene verfahrenstechnische Stufen verteilt wird. Dieses Verfahren, das heute von der Fa. Siemens am Markt angeboten wird, geht in seiner Entwicklung auf die Kiener-Pyrolyse-Anlage der 70er Jahre zurück. Eine Technikumsanlage für das heutige Schwel-Brenn-Verfahren nahm 1988 in Ulm-Wiblingen den Betrieb auf.

Abbildung I-10: Schema für das Schwel-Brenn-Verfahren [Berwein-1]



Der zu beseitigende Abfall wird zunächst auf eine Stückgröße von 200 bis 300 mm zerkleinert [Berwein-2]. Anschließend wird in der Schweltrommel unter Luftausschluß eine Pyrolyse bei ca. 450 °C durchgeführt. Als Produkte dieser Verfahrensstufe entstehen ein fester Pyrolyserückstand und ein Pyrolysegas.

Der feste Rückstand wird mit einem Sieb (Maschenweite 5 mm) in zwei Fraktionen aufgeteilt. Der Siebüberlauf enthält Metalle und eine inerte Grobfraction. Der Siebdurchgang besteht aus einem kohlenstoffreichen Feststoff, der in einer Mühle auf eine Korngröße von ca. 0,1 mm zerkleinert wird.

In einer Brennkammer, der zweiten thermischen Behandlungsstufe, werden das Pyrolysegas und der gemahlene, kohlenstoffreiche Feststoff gemeinsam verbrannt. Zur Nutzung der Wärmeenergie der heißen Rauchgase ist der Brennkammer ein Abhitzekeessel nachgeschaltet. In einer Rauchgasreinigungsanlage werden die Schadstoffe aus dem Rauchgas entfernt.

Auf der Basis der Technikumsanlage wurde in Fürth eine großtechnische Anlage errichtet, die sich zur Zeit in der Inbetriebnahme befindet. An diesem Standort wurden zwei Verbrennungslinien gebaut, die zusammen für eine jährliche Abfallmenge von 100.000 Mg Abfall ausgelegt sind. Abweichend von der Demonstrationsanlage in Ulm-Wiblingen sind in Fürth einer Brennkammer zwei Schweltrommeln zugeordnet.

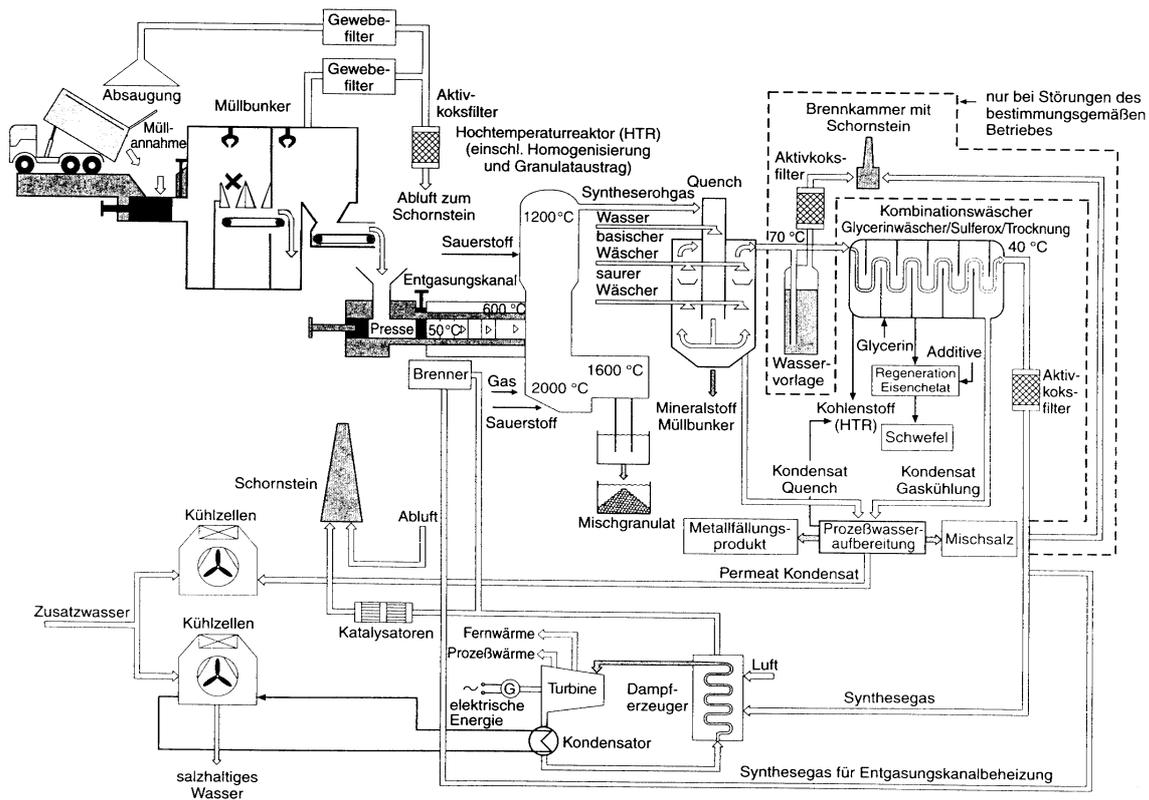
Meßprogramm

Ort	Stoffstrom und Probenahme
Mechanische Vorschaltanlage	An der Zerkleinerungsanlage muß der erforderliche Energiebedarf für die Zerkleinerung bestimmt werden.
Feststoffaustrag nach der Verbrennung	Als Produkte der Pyrolyse entstehen eine Inertfraktion und Metalle. In der Brennkammer fällt zusätzlich ein Schmelzgranulat an. Für die drei Rückstände sind die Massenströme erforderlich. Im Schmelzgranulat sind die Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe zu bestimmen. Zeitabstand: 0,5 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 17 Proben.
Nach der Verbrennung / Kesselausgang	Messung der gasförmigen Verbindungen für die Bilanz der Stoffe aus Tabelle I-3 als HCl, SO ₂ , HF, HBr und Hg sowie der Gaskonzentrationen nach Tabelle I-4. Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.
Stoffausgänge der Abgasbehandlung	Für alle Produkte aus der Abgasreinigung, dazu gehören auch die mit Abscheidern abgetrennten Stäube, müssen die Massenströme und die Konzentrationen für die Stoffe aus Tabelle I-3 ermittelt werden. Zeitabstand: 1 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 9 Proben.
Kamin	Im gereinigten Abgas müssen die Konzentrationen der Schadstoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. für die Grenzwerte vorgegeben sind. Zeitabstand: entsprechend den gesetzlichen Auflagen.

I-5.2.5 Das Themoselect-Verfahren

Die Entwicklung des Verfahrens begann 1989. Eine Demonstrationsanlage wurde 1992 in Italien mit einer genehmigten Kapazität von 4,2 t/h in Betrieb genommen [Stahlberg]. Das Themoselect-Verfahren ist ein zweistufiges Verfahren, das aus einer Pyrolysestufe und einem Vergasungsteil aufgebaut ist.

Abbildung I-11: Thermoselect-Verfahren [Schricketl]



Der Abfall wird mit einer hydraulischen Presse in den Entgasungskanal eingebracht, der von außen mit gereinigtem Synthesegas geheizt wird [Schricketl]. In diesem Kanal durchläuft der Abfall zunächst eine Trocknungszone und anschließend einen Pyrolysebereich. Die Maximaltemperatur bei der Pyrolyse wird mit 600 °C angegeben.

Die bei der Pyrolyse gebildeten Stoffströme, Pyrolysegas und Pyrolyserückstand, werden von dem Entgasungskanal direkt dem Hochtemperaturreaktor zugeführt. Hier erfolgt eine Vergasung mit reinem Sauerstoff als Vergasungsmittel. In dem Hochtemperaturreaktor entsteht ein heizwertreiches Prozeßgas, das am oberen Ende aus dem Hochtemperaturreaktor abgeführt wird. Außerdem wird eine flüssige Schlacke gebildet, die unten aus dem Hochtemperaturreaktor in ein Wasserbad abfließt. Die Schlacke wird dort granuliert und in eine Metallfraktion und ein glasartiges Inertmaterial aufgeteilt.

Das Prozeßgas aus dem Hochtemperaturreaktor enthält Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasser und Wasserstoff und kann für Synthesezwecke, in Gasmotoren oder zur Dampferzeugung genutzt werden. Für alle Einsatzgebiete muß das Prozeßgas vorher von Schadstoffen befreit werden.

Die Gasreinigung für das Thermoselectverfahren unterscheidet sich von der bei Verbrennungsverfahren gebräuchlichen. Es besteht aus einer Quenche, Gaswäsche, Entschwefelungsstufe, Gastrocknung und einem Aktivkoksfilter [Stahlberg].

Zur Zeit existiert in Deutschland am Standort Karlsruhe eine großtechnische Thermoselect-Anlage, die sich zur Zeit in der Inbetriebnahme befindet. Der Vorschlag für das Meßprogramm orientiert sich an dieser Anlage.

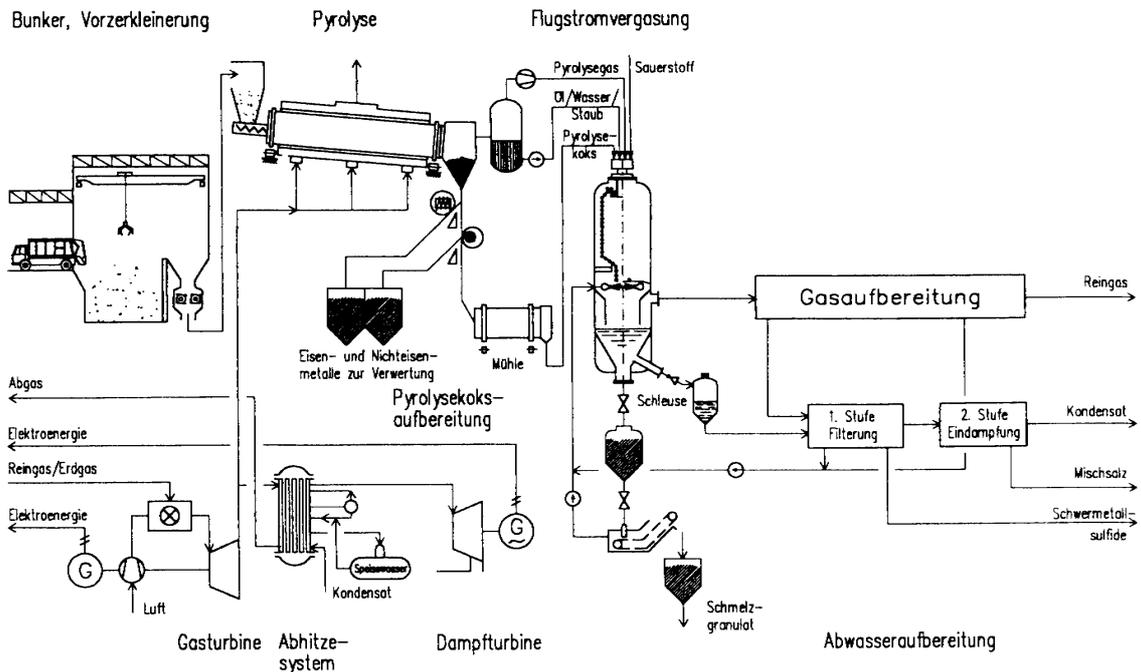
Meßprogramm

Ort	Stoffstrom und Probenahme
Mechanische Vorschaltanlage	An der hydraulischen Presse muß der erforderliche bestimmt werden.
Feststoffaustrag nach der thermischen Behandlung	Als Produkte der thermischen Behandlung fallen ein mineralisches und ein metallisches Granulat an. Es sind die Massenströme und die Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe zu bestimmen. Zeitabstand: 0,5 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 17 Proben.
Nach der Vergasung	Messung der gasförmigen Verbindungen für die Bilanz der Stoffe aus Tabelle I-3 als HCl, SO ₂ , HF, HBr und Hg sowie der Gaskonzentrationen nach Tabelle I-4. Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum. Bestimmung der Staubmengen und der Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Substanzen. Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.
Stoffausgänge der Abgasbehandlung	Für alle Produkte aus der Abgasreinigung, dazu gehören auch die mit Abscheidern abgetrennten Stäube, müssen die Massenströme und die Konzentrationen für die Stoffe aus Tabelle I-3 ermittelt werden Zeitabstand: 1 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 9 Proben.
Reingas bei Gasnutzung Zwischen Abgasbehandlung und Gasnutzung	Es müssen die Konzentration der Stoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. die in Tabelle I-4 aufgeführt sind. Zeitabstand: online über den Meßzeitraum.
Reingas bei Gasverbrennung Kamin	Im Abgas müssen die Konzentrationen der Schadstoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. für die Grenzwerte vorgegeben sind. Zeitabstand: entsprechend den gesetzlichen Auflagen.

I-5.2.6 Das Noell Konversionsverfahren

Das Konversionsverfahrens der Fa. Noell beruht auf der Kombination verschiedener Verfahrensstufen, die von der Fa. Noell früher entwickelt wurden: Pyrolyseanlagen mit Drehrohrtechnik und der Flugstromvergasung [Noell] [Schingnitz]. Das Schema des Noell-Konversionsverfahrens zeigt Abbildung I-12.

Abbildung I-12: Das Noell-Konversionsverfahren [Schingnitz]



Der angelieferte Restmüll wird zerkleinert und einem Drehrohr zugeführt, in dem unter Luftabschluß eine Pyrolyse bei ca. 550 °C durchgeführt wird. Das Drehrohr wird von außen beheizt. Als Pyrolyseprodukte entstehen ein fester Rückstand und ein Pyrolysegas, das überwiegend aus Wasserdampf, Kohlendioxid und Kohlewasserstoffen besteht. [Schingnitz]

Das Pyrolysegas wird in einer folgenden Kondensationsanlage in eine Gasfraktion und ein staubhaltiges Wasser/-Ölgemisch aufgeteilt. Aus dem festen Rückstand werden die Metallbestandteile separiert. Anschließend wird der verbleibende Feststoff gemahlen.

Alle drei Fraktionen werden dann im Flugstromvergaser mit Sauerstoff vergast. Der Druck in dieser Verfahrensstufe wird mit 2 bis 50 bar [Schingnitz] angegeben. Die Temperaturen liegen im Bereich von 2000 °C [Noell]. Die hohe Temperatur führt zur Bildung einer flüssigen Schlacke, die in einem Wasserbad granuliert wird.

Das bei der Vergasung gebildete Gas, das als Hauptbestandteile Kohlenmonoxid und Wasserstoff enthält, wird abgekühlt und von Schwefelkohlenstoff und anderen Schadstoffen befreit. Anschließend kann das Gas zur Energieerzeugung in verschiedenen Prozessen oder als Synthesegas zur Herstellung von Methanol oder anderen Stoffen eingesetzt werden.

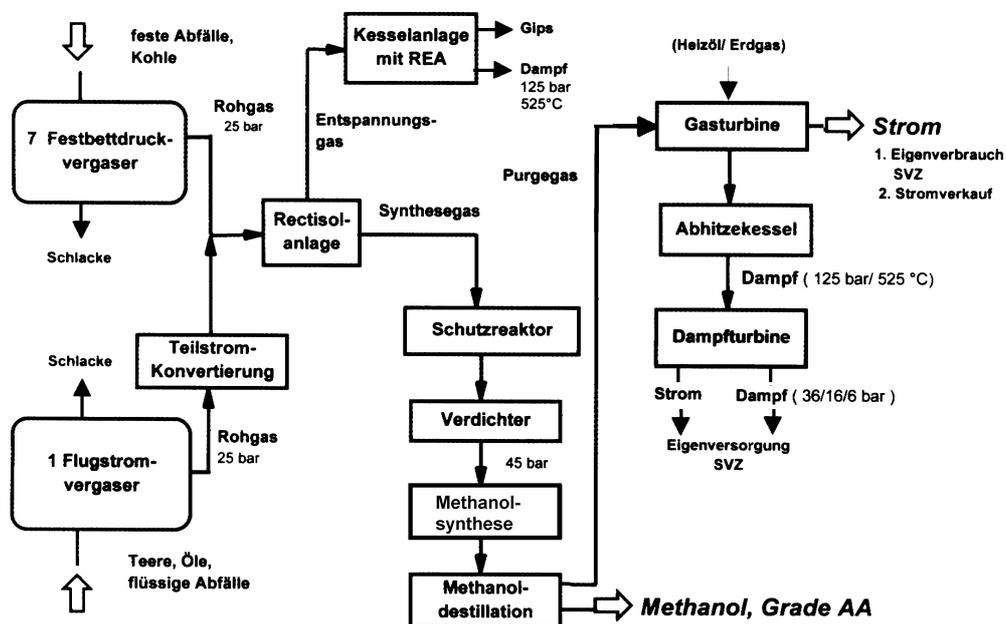
Meßprogramm:

Ort	Stoffstrom und Probenahme
Mechanische Vorschaltanlage	An der Vorzerkleinerung muß der erforderliche Energiebedarf bestimmt werden.
Feststoffaustrag nach der thermischen Behandlung	<p>Als Produkte der Pyrolyse entstehen Metallfraktionen. In der Flustromvergasung fällt zusätzlich ein Schmelzgranulat an.</p> <p>Für die Rückstände sind die Massenströme erforderlich. Im Schmelzgranulat sind die Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe zu bestimmen.</p> <p>Zeitabstand: 0,5 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 17 Proben.</p>
Rohgas nach der Vergasung	<p>Messung der gasförmigen Verbindungen für die Bilanz der Stoffe aus Tabelle I-3 als HCl, SO₂, HF, HBr und Hg sowie der Gaskonzentrationen nach Tabelle I-4.</p> <p>Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.</p> <p>Bestimmung der Staubmengen und der Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Substanzen.</p> <p>Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.</p>
Stoffausgänge der Abgasbehandlung	<p>Für alle Produkte aus der Abgasreinigung, dazu gehören auch die mit Abscheidern abgetrennten Stäube, müssen die Massenströme und die Konzentrationen für die Stoffe aus Tabelle I-3 ermittelt werden.</p> <p>Zeitabstand: 1 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 9 Proben.</p>
Reingas bei Gasnutzung Zwischen Abgasbehandlung und Gasnutzung	<p>Es müssen die Konzentration der Stoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. die in Tabelle I-4 aufgeführt sind.</p> <p>Zeitabstand: online über den Meßzeitraum.</p>
Reingas bei Gasverbrennung Kamin	<p>Im Abgas müssen die Konzentrationen der Schadstoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. für die Grenzwerte vorgegeben sind.</p> <p>Zeitabstand: entsprechend den gesetzlichen Auflagen.</p>

I-5.2.7 Das Sekundärrohstoffzentrum Schwarze Pumpe

Am Industriestandort Schwarze Pumpe wurde zu Zeiten der DDR Braunkohle zu verschiedenen Produkten verarbeitet. Unter anderem wurde in Vergasungsanlagen Stadtgas erzeugt. Die zurückgehende Nachfrage an den bisherigen Produkten führte zu einer Neuorientierung und einem Einstieg in die thermische Abfallbehandlung [Buttker]. Heute werden von der Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe GmbH (SVZ) die Festbettdruckvergasung und die Flugstromvergasung zur thermischen Abfallbehandlung eingesetzt [Seifert]. Dabei können einige Anlagenteile der früheren Stadtgasversorgung - modernisiert oder angepaßt - weiterbetrieben werden [SVZ]. Die Abbildung I-13 zeigt das Blockschaltbild.

Abbildung I-13: Blockschaltbild der Vergasung und Gasverwertung in der SVZ-Anlage [Seifert]



In den Festbettdruckvergäsern werden aufbereitete und pelletierte Gemische aus Abfallstoffen mit Kohle eingesetzt. Als Abfallstoffe werden Altkunststoffe, Klärschlämme, Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall, Altgummi, Shredderleichtgüter, Altholz, Elektronikschrott, Lack- und Farbreste und andere kohlenwasserstoffhaltige Abfälle eingesetzt [Seifert]. Flüssige oder pastöse Abfälle werden einem Flugstromvergaser zugeführt. Ein Gemisch aus Ölen und Teer, das während der Festbettvergasung entsteht, wird dem Flugstromvergaser zugeführt [Seifert].

Die entstehenden Gase aus den Festbettdruckvergäsern und dem Flugstromvergaser werden separat über mehrere Stufen auf Umgebungstemperatur abgekühlt und anschließend einer gemeinsamen Gasreinigung zugeführt. In der Gasreinigung werden in einer Tieftemperaturwäsche mit Methanol unerwünschte Gasbestandteile ausgewaschen, so daß ein Gas in Synthesegasqualität entsteht. In dieser Reinigungsstufe wird zusätzlich ein Entspannungsgas frei, das in einer separaten Kesselanlage mit Rauchgasreinigung verbrannt wird. Das aufbereitete Synthesegas wird einer Anlage zur Herstellung von Methanol bzw. einer GuD-Anlage zur Energiegewinnung zugeführt. [Seifert]

Meßprogramm:

Für den Standort Schwarze Pumpe wird an dieser Stelle aus verschiedenen Gründen kein Meßprogramm vorgeschlagen. Der Anlagenaufbau ist in der Realität komplizierter als in Abbildung I-13 dargestellt. Dies gilt insbesondere für die Abfallaufbereitung, denn die Festbettvergaser werden aus 5 Aufbereitungsanlagen für unterschiedliche Abfälle beschickt. Außerdem werden flüssige Vergasungsprodukte von der Festbettvergasung der Flugstromvergasung zugeführt.

Nach den vorliegenden Informationen ist davon auszugehen, daß die Abgase der Festbettvergaser über eine Sammelschiene vor der Gaskühlung zusammengeführt werden. Zusätzlich werden die gekühlten Abgase aus den Festbettvergäsern und dem Flugstromvergaser vor der Gasreinigung zusammengeführt.

Aufgrund dieser Gegebenheiten muß zunächst nach einer Besichtigung vor Ort ein Bilanzraum sinnvoll bestimmt werden. Erst danach kann ein Meßprogramm erarbeitet werden.

I-5.2.8 Die Mitverbrennung in Kraftwerken

Die Mitverbrennung von Abfällen ist eine Sammelbezeichnung für Techniken, die vorhandene thermische Anlagen zur Abfallbehandlung nutzen. Eine Mitverbrennung von Abfällen wird u.a. in Kohlekesseln und Zementwerken durchgeführt.

Zur Mitverbrennung wird kein Siedlungsabfall eingesetzt, sondern es werden nur spezielle Abfallfraktionen verbrannt. Die Eignung eines Abfallstoffs zur Mitverbrennung hängt von den Abfalleigenschaften und verfahrenstechnischen Gegebenheiten an der Anlage ab, in der die Mitverbrennung durchgeführt werden soll.

Die Mitverbrennung von Klärschlamm wird in einigen Kraftwerken bereits praktiziert. In einem Braunkohlekraftwerk, das nach dem Prinzip der zirkulierenden Wirbelschicht arbeitet, verläuft die Mitverbrennung von Klärschlamm ohne Probleme [Bierbaum]. Der Klärschlamm wird von einem speziellen Bunker mit Feststoffpumpen der Feuerung zugeführt. Für die Feinreinigung der entstehenden Abgase wurde ein Flugstromverfahren nachgerüstet.

Meßprogramm:

Das folgende Meßprogramm bezieht sich auf die Mitverbrennung von Abfallstoffen in Kraftwerken, die im Aufbau und in der Abgasreinigung mit thermischen Abfallbehandlungsanlagen vergleichbar sind.

Ort	Stoffstrom und Probenahme
Vorschaltanlage	Der Bedarf an Energie und Hilfschemikalien zur Vorbereitung der Abfallfraktionen für die thermische Behandlung muß ermittelt werden.
Feststoffaustrag nach der Verbrennung	Als Rückstand der Verbrennung entsteht nur Asche aus der Feuerung. Es sind die Massenströme und die Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe zu bestimmen. Zeitabstand: 0,5 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 17 Proben.
Nach der Verbrennung / Kesselausgang	Messung der gasförmigen Verbindungen für die Bilanz der Stoffe aus Tabelle I-3 als HCl, SO ₂ , HF, HBr und Hg sowie der Gaskonzentrationen nach Tabelle I-4. Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum. Bestimmung der Staubmengen und der Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Substanzen. Zeitabstand: Messung online über den gesamten Meßzeitraum.
Stoffausgänge der Abgasbehandlung	Probenahme für Stäube aus Kessel, Zyklon und Gewebefilter und die weiteren Rauchgasreinigungsrückstände. Bestimmung der Massenströme und Konzentrationen der in Tabelle I-3 genannten Stoffe. Zeitabstand: 1 h zwischen zwei Probenahmen, insgesamt ca. 9 Proben.
Kamin	Im gereinigten Abgas müssen die Konzentrationen der Schadstoffe ermittelt werden, die für die Bilanz der Stoffe in Tabelle I-3 erforderlich sind, bzw. für die Grenzwerte vorgegeben sind. Zeitabstand: entsprechend den gesetzlichen Auflagen.

I-6 Beispiel einer Bilanz (Rostfeuerung)

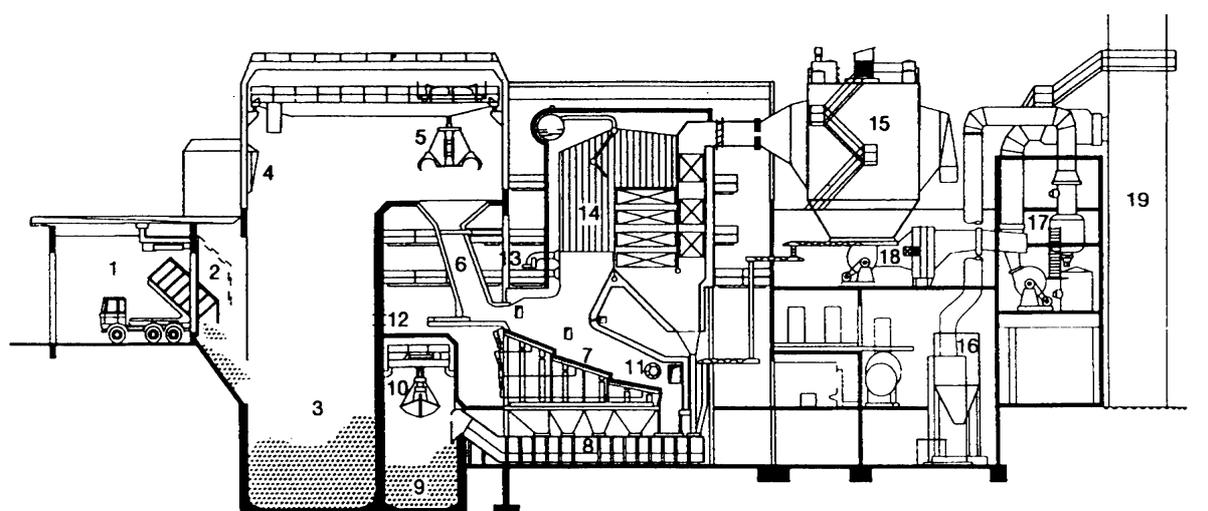
In diesem Kapitel wird beispielhaft auf Bilanzen für eine konventionelle Rostfeuerung eingegangen. Die im folgenden Text vorgestellten Bilanzen für das MHKW Bamberg wurden einer Arbeit [Achternbosch] entnommen, in der Stoffstromanalysen für abwasserfreie und abwassererzeugende Rauchgasreinigungsanlagen erstellt worden sind. Weiter unten im Text wird auf den Bilanzraum und die zur Verfügung stehenden Daten näher eingegangen.

Dieser Abschnitt enthält nur die wichtigsten Informationen zu der Anlage und die Stoffbilanzen für die Elemente Chlor, Schwefel und Cadmium. Eine umfassende Auswertung und Interpretation der vorliegenden Daten ist nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit.

I-6.1 Beschreibung der Anlage

Die Abfallverbrennungsanlage am Standort Bamberg nahm 1978 den Betrieb mit zwei Verbrennungslinien auf. Im Rahmen einer Erweiterung wurde 1981 eine dritte Verbrennungslinie errichtet [Thomé-Kozmiensky]. Jede Verbrennungslinie hat eine Verbrennungskapazität von 6 t/h und ist mit einer separaten Rauchgasreinigung ausgerüstet [Thomé-Kozmiensky]. Eine Optimierung der Feuerungen und eine Erweiterung der Rauchgasreinigung um eine zweite Wäscherstufe erfolgte 1990 [Babcock].

Abbildung I-14: Längsschnitt MHKW Bamberg [Thomé-Kozmiensky]



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

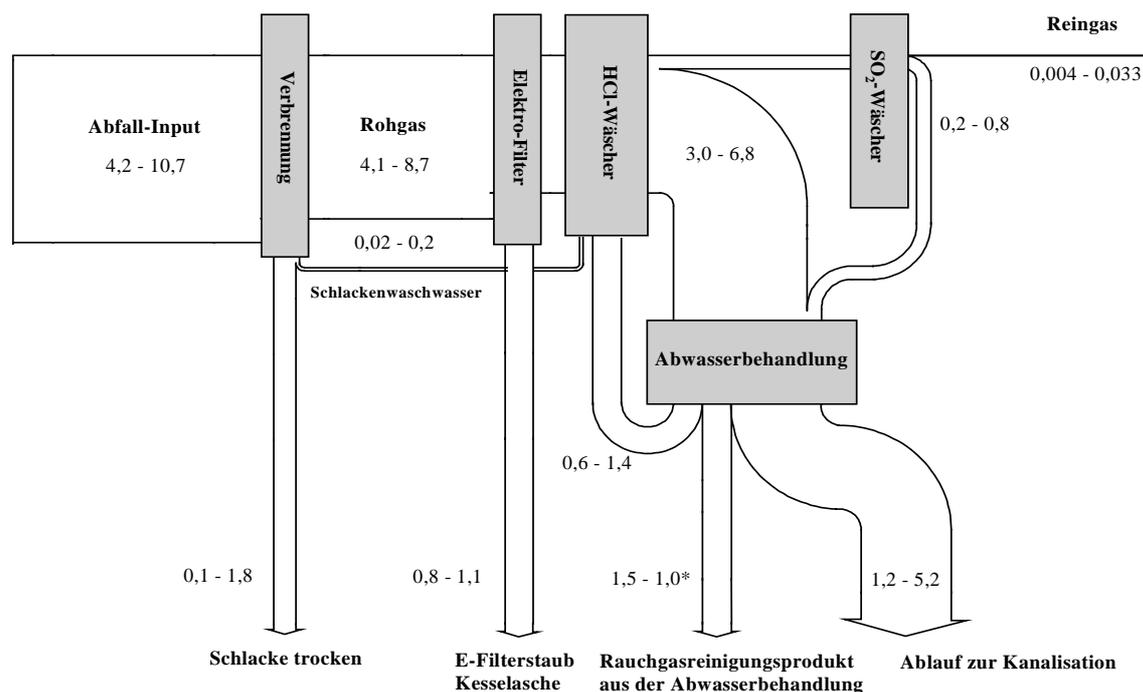
Die Rauchgasreinigung, dargestellt in Abbildung I-14, besteht aus einem Elektrofilter und einem zweistufigen Wäschersystem. Die nachgerüsteten Anlagenteile zur Einhaltung der Grenzwerte der 17. BImSchV, Flugstromverfahren und SCR-Anlage [ABB], sind in Abbildung I-14 nicht dargestellt. Weitere Informationen und technische Angaben über das MHKW Bamberg findet man in [Thomé-Kozmiensky].

I-6.2 Datenquellen und Stoffbilanzen

Die Anlage am Standort Bamberg ist in der Literatur durch zahlreiche Publikationen zu verschiedenen Themen über viele Jahre sehr gut dokumentiert. Die Stoffbilanzen, auf die im folgenden Text näher eingegangen wird, wurden aus [Achternbosch] entnommen. Diese Stoffbilanzen basieren überwiegend auf [Reimann-1]. Die Daten in dieser Arbeit beruhen auf einer großen Anzahl von Analysen der einzelnen Stoffströme. Die Abfallzusammensetzung wurde allerdings nicht analysiert, sondern aus den Daten der anderen Stoffströme errechnet. Für die Berechnung der Stoffströme in der Abwasserbehandlung standen für die Bilanzen ergänzende Informationen zur Verfügung [Reimann-2].

Die Stoffbilanzen für die Anlage am Standort Bamberg in [Achternbosch] erfassen allerdings nicht die gesamte Anlage. In der erwähnten Arbeit standen Stoffbilanzen für abwasserfreie und abwassererzeugende Rauchgasreinigungssysteme im Mittelpunkt. Die nachgerüsteten Rauchgasreinigungsaggregate zur Einhaltung der 17. BImSchV, die keinen Einfluß auf die Abwasserzusammensetzung haben, wurden von dem festgelegten Bilanzraum nicht erfaßt. Der in den Bilanzen als Reingas bezeichnete Stoffstrom gelangt **nicht** in die Atmosphäre, sondern wird dem Flugstromadsorber und einer nachfolgenden SCR-Anlage zur Reduzierung der Stickoxidkonzentrationen zugeführt. Als erste Stoffbilanz wird in Abbildung I-15 die Bilanz für das Element Chlor vorgestellt.

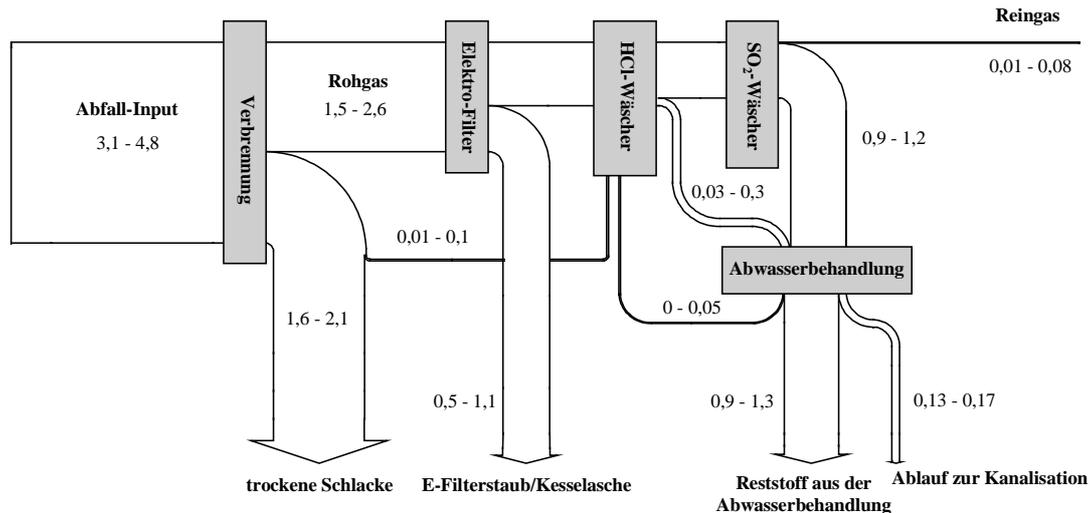
Abbildung I-15: Chlorbilanz MHKW Bamberg, Angaben in kg/t Abfall [Achternbosch]



Die Chlorfracht im Abfallinput schwankt zwischen 4,2 und 10,4 kg/t Abfall, der Mittelwert liegt bei 6,8 kg/t Abfall. Nur ein kleiner Teil, ca. 13 % des Inputs gelangen, in die Schlacke, der überwiegende Teil gelangt als HCl oder als Staubbestandteil in das Rohgas. Das im Staub enthaltene Chlor, 0,8 bis 1,1 kg/t Abfall, wird im Elektrofilter aus dem Rauchgas abgetrennt. Im nachfolgenden HCl-Wäscher werden 3 bis 6,8 kg/t Abfall an Chlor aus dem Rauchgas entfernt. Der zweite Wäscher scheidet mit 0,2 bis 0,8 kg/t Abfall nur kleine Mengen ab. Das Rauchgas wird mit einer sehr geringen Chlorfracht dem nachfolgenden Flugstromverfahren zugeleitet.

Ein Teil der Absalzungen aus den Wäschern wird von der Abwasserbehandlung in den HCl-Wäscher zurückgeführt. Außerdem entsteht bei der Abwasserbehandlung ein Rauchgasreinigungsprodukt, das eine Chlorfracht von 1 bis 1,5 kg/t Abfall enthält. Bei der Berechnung durch Differenzbildung war die Differenz der Minimalwerte größer als die Differenz der Maximalwerte (Siehe * in Abbildung I-15). Aus der Anlage wird mit dem Abwasser eine Chlorfracht im Bereich zwischen 1,2 und 5,2 kg/t Abfall der Kanalisation zugeführt.

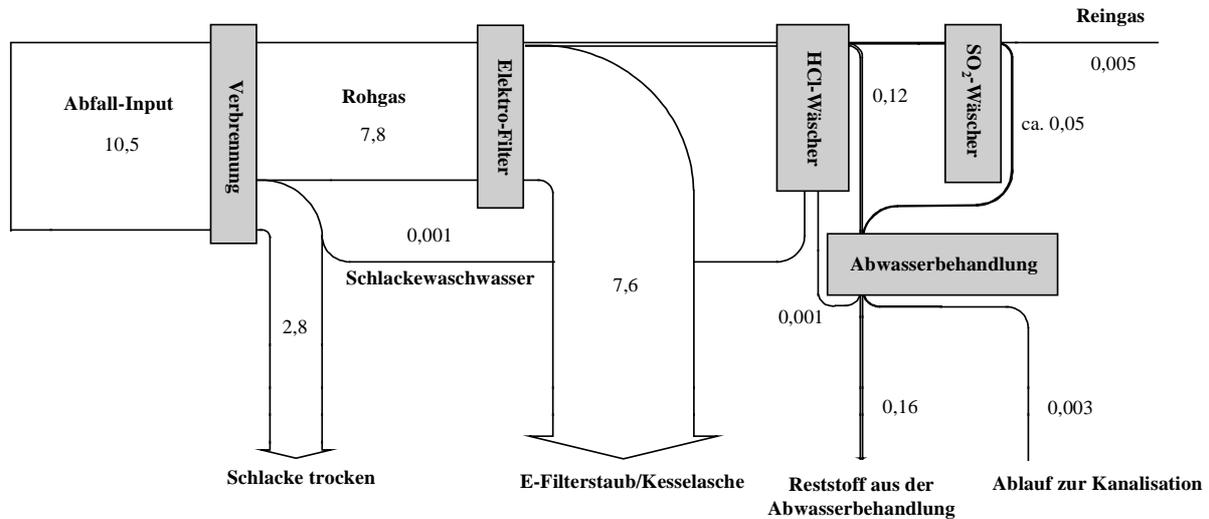
Abbildung I-16: Schwefelbilanz MHKW Bamberg, Angaben in kg/t Abfall [Achternbosch]



Entsprechend der Abbildung I-16 treten für den Schwefelgehalt im Abfall Schwankungen im Bereich zwischen 3,1 und 4,8 kg auf. Ein großer Teil des Schwefelinputs, 1,6 bis 2,1 kg/t Abfall, verbleibt bei der Verbrennung in der Schlacke. Der im Elektrofilter abgetrennte Filterstaub enthält 0,5 bis 1,1 kg Schwefel pro t Abfall. Während der HCl-Wäscher nur wenig Schwefel aus dem Rauchgas abtrennt, werden im SO₂-Wäscher 0,9 bis 1,2 kg/t Abfall aus dem Rauchgas entfernt. Das Reingas aus den Wäschern tritt in den nachfolgenden Flugstromadsorber mit einer sehr geringen Schwefelfracht ein.

Bei der Abwasserbehandlung erfolgt eine Umsalzung, so daß der Schwefel überwiegend als schwerlöslicher Gips mit 0,9 bis 1,3 kg/t Abfall anfällt und in das Rauchgasreinigungsprodukt gelangt. Im Abwasser, das der Kanalisation zugeführt wird, sind nur noch 0,13 bis 0,17 kg Schwefel pro t Abfall enthalten.

Abbildung I-17: Cadmiumbilanz MHKW Bamberg, Angaben in g/t Abfall [Achternbosch]



Im angelieferten Abfall sind nach Abbildung I-17 10,5 g/t Abfall an Cadmium enthalten. Davon gelangen 2,8 g/t Abfall in die Schlacke und 7,6 g/t Abfall in den Filterstaub. Die verbleibende, sehr geringe Cadmiumfracht verteilt sich dann auf den Reststoff aus der Abwasserbehandlung (0,16 g/t Abfall), Ablauf zur Kanalisation (0,003 g/t Abfall) und die Restmenge im Rauchgas (0,005 g/t Abfall), die den nachfolgenden Rauchgasreinigungsstufen zugeleitet wird.

Ein Vergleich von Daten aus anderen großtechnischen Rostfeuerungen mit diesen Stoffbilanzen zeigt, daß an den anderen Standorten der Abfallinput ähnliche Mengen Chlor, Schwefel und Cadmium enthält. Auch die Stoffströme der betrachteten Elemente in der Schlacke und die Abscheidung in den entsprechenden Rauchgasreinigungsstufen weisen zu den oben dargestellten Bilanzen keine großen Abweichungen auf.

II Evaluation Program for Municipal Solid Waste Incineration Plants

II-1 Introduction

Due to the new legislative regulations adopted recently, the thermal treatment of domestic waste has gained importance in the Federal Republic of Germany. In this respect, the most important regulation is the “Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall)” (Technical Directive for Recycling, Treatment and Other Management of Residential Wastes). In their annex, a loss on ignition of less than 5 wt.% is specified for waste that will have to be disposed of on landfill in the future.

According to our current knowledge, this can only be achieved by thermal treatment of the waste. The tendency towards an enhanced use of thermal waste treatment is not only limited to the Federal Republic of Germany, but can also be noticed abroad.

With the above regulations and the development expected on the market, the already established processes for the thermal treatment of waste, such as grate furnaces or rotary kilns, were extended by further process steps or entirely new processes were developed by the plant designers in the past years. This development was also driven by the desire to remain far below existing emission limits, which was mainly due to the growing public interest.

The recycling requirements as outlined in the Kreislaufwirtschaftsgesetz (Art. 6) (Waste Avoidance, Recycling, and Disposal Act) do not only lead to the new development or extension of processes, but also to an enhanced co-incineration of certain waste fractions in power plants, during cement production or other thermal processes. Presently, certain fractions of the domestic waste are being co-incinerated in several power plants and some cement production plants in the Federal Republic of Germany.

This resulted in a large number of various thermal waste treatment processes with only some of them having been further developed to a technical scale waste management plant (up to date).

Moreover, plants for the thermal treatment of residual waste are constructed or taken into operation, which are not based on the already established principle of grate incineration (worldwide > 1000 plants). Instead, the Thermal Waste Recycling Process of the Siemens company, the Thermoselect process, the Rowitec[®] fluidized bed plant (Hölter ABT/Lurgi) and a plant based on the RCP process (Recycled Clean Products) developed by the Von Roll company are employed.

These new processes focus on modified ecological objectives. Emphasis is put among others on a large separation of reusable materials, extremely high temperatures during the thermal treatment, reduced flue gas flows or a vitrified granulate as residue. To reach these objectives, an extensive process engineering is required. Usually, these increased efforts have to be paid for by a reduced energy efficiency of the process.

For future planning, the best technology has to be chosen for the respective location and the envisaged ecological objectives from the methods currently available on the market. Decisions in favor of the use of thermal waste treatment are not only expected to be taken in the Federal Republic of Germany, but also abroad due to the presently existing legislation. German Industry is well known for the standards of respective technologies. Chances of exporting German thermal waste treatment technologies, however, will only be successful, if

the advantages of the processes will have been documented properly and the processes are competitive on the world market.

The decision in favor of the use of a technology, whether it is taken in the Federal Republic of Germany or elsewhere, first requires a detailed comparison. On the basis of reliable data and information, it has to be verified, whether the requirements will be fulfilled at the planned site with high functionality and low costs.

In our opinion, the comparisons published in the past years with regard to thermal waste treatment processes (see e.g. [ARGE] [Barin] [Becker] [Haltiner] [Tauber] [Nottrodt]) can hardly be used for taking a decision, as they are based on data and information of variable quality. While sufficient data have been obtained for grate incineration from the long-term operation of technical scale plants, the data available for the novel methods, such as the Siemens Thermal Waste Recycling Process or Thermoselect Process, were determined from the operation of test or demonstration facilities with sometimes short measurement campaigns. As obvious from a publication on the Thermal Waste Recycling Process [Richers], this information does not allow a thorough evaluation to be made.

In addition, previous comparisons of processes focused on the emissions into the atmosphere and certain properties of the residues. Today, the legislative emission limits can be met without any problems, i.e. the currently measured values remain far below the emission limits. Therefore, the latter do not represent an adequate evaluation criteria. Moreover, emission limits are usually given in the form of concentration values. They do not contain any information with regard to the pollutant loads released into the environment. This means that the observation or the remaining below the required emission limits allows very limited statements to be made with regard to the environmental compatibility of the processes. An analysis of the loads is required.

II-2 Problem

As evident from the above explanations, several major requirements for a comparison and a subsequent evaluation of the various thermal waste treatment processes are not fulfilled:

1. Suitable criteria, on the basis of which thermal waste treatment plants might be compared and evaluated, are lacking. The compliance with the emission limits is not sufficient.
2. There is a lack of reliable data which have been obtained from technical scale plants and might serve as a basis for a comparison.
3. Due to this lack of data, it is impossible to assess, whether an increased technical expenditure or a reduced energy efficiency of the new processes will bring ecological advantages.
4. Except for grate furnaces, it is impossible to make any statements with regard to chances of exporting the thermal waste treatment technologies.

Due to the multitude of criteria that might be used for a comparison of the various thermal waste treatment technologies, suitable criteria shall be identified and discussed in the present work. Besides the hardly informative emission data, substance and energy balances as well as the quality of the residues may be employed.

The necessary data which are still lacking especially for the new processes shall be obtained by measurements in technical scale plants. The plants selected for such measurements have to comply with the requirements defined in groups 4 and 5 of Table II-1. Some thermal waste

treatment systems which comply with these requirements shall be described in a separate section.

Table II-1: Criteria for the classification of thermal waste treatment plants in accordance with their technical maturity [Johnke]

Group 1	Conception of a new development in a technically logical sequence prior to the commissioning of the test facility; if applicable, laboratory studies of individual process components.
Group 2	Operation of a test facility in a technically logical sequence, i.e. with all process components, short-term permanent operation under varying operation and load conditions.
Group 3	Stationary operation of a test facility under nominal load conditions for a longer term, at least four weeks, with an accompanying measurement and analysis program.
Group 4	Stationary operation of a technical scale plant for one to two years with about 10,000 operating hours. Competent assessment of the operation safety, the environmental relevance, the availability and the costs of the treatment process.
Group 5	Technical scale use and long-term permanent operation experience, annual availability of >80%.

A reliable comparison can only be made with the measurements being performed under more or less the same conditions. For the measurements to be performed a measurement program is required. It shall be drawn up within the framework of the present work.

The investigation program concentrates on technical scale plants which are designed for the thermal treatment of municipal solid waste. Municipal waste is understood to include all waste from private households that remains to be disposed of after having applied all avoidance and recycling principles. This also includes industrial waste that may be disposed of together with the waste generated by the private households. In addition, bulky waste, market waste, and street sweepings belong to this group.

Another objective of the present work consists in setting up a measurement program which allows to investigate and compare completely different thermal waste treatment processes. Hence, the measurement program does not only have to be applicable to the various incineration plants which are equipped with grate, rotary kiln, fluidized bed or other furnace systems, but also to recent developments made in the field of thermal waste treatment. These recent developments include the Siemens Thermal Waste Recycling Process, Thermoselect, the RCP process or the Noell conversion process. They are characterized by the thermal treatment being divided into individual partial steps and several process stages. In the Noell conversion process and Thermoselect, a synthesis gas can be generated, which may also be used for chemical syntheses.

The results of the measurement program are expected to yield information with regard to the application of thermal waste treatment processes in other countries. For this purpose, a very detailed knowledge of the legislation and emission limits adopted in the respective countries is necessary. A survey shall be presented in the present work.

II-3 Measurement Program

The measurement program for the comparison of various thermal waste treatment processes is determined decisively by the final evaluation criteria. A survey of possible criteria is given in Table II- 2.

Table II- 2: Criteria for the comparison of thermal waste treatment processes

Amounts of residues	Compliance with legal requirements (Germany, EU, international)
Properties of residues	Costs
Substance balances	Disposal safety
Energy balances	Suitability for export to other countries

It is obvious from the detailed discussion of these criteria in section II-4 that an extensive investigation of the material flows together with an energy balance and the investigation of the residue properties provide the best information for the assessment of a thermal waste treatment process. The analysis of the treatment costs or the availability, which is of crucial importance for the assessment, are not part of the measurement program.

For a comparison with a subsequent evaluation of the various processes, balancing has to cover the entire plant. This includes, if necessary, preliminary waste processing systems, the actual thermal treatment of the waste, the flue gas treatment and further components for the treatment of the residues.

Without explaining the individual criteria in detail, the measurement program required for a technical scale plant shall be presented in this section. For the performance of a measurement program at a technical scale plant, an measurement plan as presented in this section, however, is not sufficient. Exact information on the plant is required. It is summarized in the form of a check list in the Annex.

II-3.1 *Scope of Material Balancing*

Due to the variety of analytical methods currently available, substance balancing may cover almost any number of substances. To reduce the amount of data arising within the framework of the measurement program to a reasonable volume, the substances to be analyzed have to be selected thoroughly. Elements proposed to be balanced are listed in Table II-3.

Table II-3: Survey of elements to be balanced

Metals		Non-metals	
license-relevant	process-relevant	license-relevant	process-relevant
Lead (Pb)	Aluminum (Al)	Fluorine (F)	Bromine (Br)
Cadmium (Cd)	Calcium (Ca)	Chlorine (Cl)	Phosphorus (P)
Chromium (Cr)	Potassium (K)	Sulfur (S)	
Copper (Cu)	Sodium (Na)		
Mercury (Hg)			
Zinc (Zn)			

For some of the selected elements, emission limits are specified in legislative regulations. Moreover, individual elements may represent indicator substances due to their properties - highly volatile, amphoteric, etc. - . The reliability of the analysis and the plausibility of the data obtained may be verified by an additional balancing of the metals of potassium, sodium and calcium.

As obvious from previous measurements performed in incineration plants, it is not always possible to obtain closed balances for some metals like Cr, Cu or Pb, since these metals are present in the form of metal particles in the waste. An indication of the reliability of obtained balances is received by a comparison of transfer coefficients for single elements with data from literature [Schachermayer] [Morf].

Reliable mercury balancing is difficult and requires the respective sampling and analysis to be carried out by well-trained personnel.

Balancing of the substances listed in Table II-3, however, does not yet allow any comprehensive evaluation with regard to the accumulation capacity, removal efficiency and destruction in a thermal waste treatment plant. Within the framework of the comparison to be made, further gaseous substances have to be covered, on the basis of which the thermal treatment process may be assessed in a reliable manner. Balancing of carbon and nitrogen over the entire plant does not appear to be reasonable due to the high concentrations in the flue gas and the possible thermal nitrogen oxide formation.

Table II-4: Gaseous components to be measured

All thermal processes	In addition for gasification processes
Carbon dioxide (CO ₂)	Hydrogen sulfide (H ₂ S)
Carbon monoxide (CO)	Hydrogen (H ₂)
Water (H ₂ O)	Methane (CH ₄)
Gaseous organic substances - FID	
Nitrogen oxides (NO _x)	
Ammonia (NH ₃)	

The concentrations of carbon monoxide, carbon dioxide, water and gaseous organic substances have to be measured in all plants, as these data provide important information with regard to the efficiency of the thermal treatment.

Thermal waste treatment by combustion results in the generation of nitrogen oxides. This does not only apply to conventional grate furnaces, but also to the Siemens Thermal Waste Recycling Process and the RCP process. In gasification processes (e.g. Thermoselect and Noell conversion process) considerable amounts of nitrogen oxide are formed only when the gases generated are not used for synthesis purposes, but incinerated for energy generation.

The limit value for nitrogen oxide is usually expressed as nitrogen dioxide concentration. Measurement of NH₃ allows to check the efficiency of the denitrification systems in incineration plants (slip).

Due to the chemical properties and the oxidizing atmosphere prevailing in incineration plants, the compounds listed in the right column of Table II-4 are expected to exist in very small concentrations only. A measurement is only required for gasification processes.

To determine the concentrations of the substances listed in Table II-3 and Table II-4 in the individual material flows in a specific plant, a representative sampling of each material flow is required. Further details with regard to sampling are given in the Annex, Section III-4.

For the calculation of the substance balances in the different plants, a certain number of samples and measurement intervals is proposed for the measurement program, as indicated in Table II-5 and Table II-6. They already proved to be very useful during past experiments performed on a large technical scale. The measurement program to be applied to incineration processes is presented in Table II-5, while that of gasification processes is obvious from Table II-6. These measurement programs are understood to be proposals only, as modifications may be required due to specific features of the plant. The volume of a sample to be taken depends on the properties of the individual material flow and the residue properties to be investigated.

Table II-5: Measurement program for an incineration plant

Location	Material flow and sampling
Mechanical processing system thermal pretreatment system	Statement with regard to the technical necessity. The required energy supply and all mass flows, input and output have to be determined at the system. Whether or not sampling has to be performed for an analysis depends on the material flows generated at this location.
Discharge of solid residues	Solid residues are generated as incineration products. The mass flows and concentrations of the substances mentioned in Table II-3 have to be determined. If several residues are generated by the process, each mass flow has to be determined and sampled. Time interval: 0.5 h between two samplings, in total about 17 samples.
boiler outlet	Measurement of the concentration of gaseous compounds for balancing of the substances listed in Table II-3 measured as HCl, SO ₂ , HF, HBr, Hg, and the gas concentrations according to Table II-4. Time interval: Online measurement over the entire measurement period. If possible, determination of the dust load and the concentrations of the substances mentioned in Table II-3. Time interval: Depending on the expected dust concentrations and the sampling system used.
discharge from the flue gas cleaning system	The mass flows and concentrations of the substances named in Table II-3 have to be determined for all products generated by flue gas cleaning. This also includes the dusts separated by the dedusting devices. Sampling is determined decisively by the installed flue gas cleaning system. Time interval: 1 h between two samplings, in total about 9 samples.
Stack	In the cleaned flue gas, the concentrations of those pollutants have to be determined, which are relevant for the balancing of the substances named in Table II-3 or for which emission limits are given. Time interval: According to the legislative regulations or license.

Table II-6: Measurement program for a gasification plant

Location	Material flow and sampling
Mechanical processing system Thermal pretreatment system	Statement with regard to the technical necessity. The required energy supply and all mass flows, input and output have to be determined at the system. Whether or not sampling has to be performed for an analysis depends on the material flows generated at this location.
Discharge of solids following gasification	Solid residues are generated as thermal treatment products. The mass flows and concentrations of the substances mentioned in Table II-3 have to be determined. If several residues are generated by the process, each mass flow has to be determined and sampled. Time interval: 0.5 h between two samplings, in total about 17 samples.
Downstream of gasification	Measurement of the concentration of gaseous compounds for balancing of the substances listed in Table II-3 measured as HCl, SO ₂ , HF, HBr, Hg, and the gas concentrations according to Table II-4. Time interval: Online measurement over the entire measurement period. If possible, determination of the dust load and the concentrations of the substances mentioned in Table II-3. Time interval: Depending on the expected dust concentrations and the sampling system used.
Substance discharge from the gas treatment system	The mass flows and concentrations of the substances named in Table II-3 have to be determined for all products generated by flue gas cleaning processes. This also includes the dusts separated by the separators. Sampling is determined decisively by the installed flue gas cleaning system. Time interval: 1 h between two samplings, in total about 9 samples.
Cleaned gas during gas utilization	The concentration of those substances has to be determined, which are relevant for the balancing of the substances listed in Table II-3 or which are indicated in Table II-4. Time interval: Online over the measurement duration.
Cleaned gas during gas incineration Stack	When incinerating the gas for energy generation, the composition of the gas has to be measured. In the flue gas, the concentrations of those pollutants has to be determined, which are relevant for the balancing of the substances in Table II-3 and for which emission limits values have been specified. Time interval: According to the legislative regulations or license.

II-3.2 Scope of Energy Balancing

The measurement program also serves to determine the data required for energy balancing which is to be accomplished on the basis of an enthalpy balance according to Section II-4.4. In analogy to the substance balances, energy balancing has to cover the entire plant, too. For an enthalpy balance, the data listed in Table II-7 need to be known. In addition, the waste flows supplied, the amounts of air and flue gas as well as the amounts of steam have to be recorded.

Table II-7: Data for an enthalpy balance

Calorific value of the waste
Heat transfer to the water/steam circuit
Heat loss by radiation
Heat loss via the flue gas
Heat loss via the residues of the thermal treatment

To ensure the comparability between gasification and incineration processes, a theoretical calculation of the heat released to the water/steam circuit in a combustion chamber during the incineration of the synthesis gas according to the current state of the art is recommended.

Furthermore, the use of technical support systems has to be taken into account. They may not be equally necessary for all processes and consist e.g. of crushing systems for the fluidized bed plant or the production of the oxygen required for gasification. The way of determining this information depends on the circumstances at the plant site.

II-3.3 Selection of the Residue Properties

In addition to the material and energy balances referred to above, further measurements of the properties of the various residues are required, as the residue properties are of crucial importance for landfill disposal or recycling.

Among the most important residue properties which should be analyzed in any case are the carbon content (concentration of non inorganic bound carbon) and the leaching stability. The carbon content yields information on the quality of the thermal process. The leaching stability of the residues allows conclusions to be drawn with regard to how well the individual pollutants are bound into the matrix of the solid residues. The carrying out of these investigations is governed by various standards and regulations in the Federal Republic of Germany and abroad. A survey of the respective standards and regulations is given in the Annex (Section III-7). Within the framework of the measurement program, the individual test methods have to be determined exactly.

II-3.4 Time Schedule

Finally, the duration of the measurement program remains to be specified. Due to possible fluctuations of the waste input, a relatively long measurement program with sampling over longer terms is required for plant balancing. Sampling of the plant should take place over six to eight days. The measurement should be in the range of 8 hours per day. Furthermore, the measurement program is to be run in two campaigns with an interval of one or two weeks. Such a division of the experiments allows statements to be made with regard to the "stability" of the plant and the scattering of the individual parameters. Based on the information and data obtained, a reliable balance may be derived for the plant, if necessary with the mean values taken into consideration.

II-4 Criteria for the Comparison of the Processes

In the present section, the criteria presented at the beginning of Section II-3 in Table II- 2 shall be explained in further detail. Doing this, mutual influences and their significance for an evaluation shall also be dealt with.

II-4.1 Amounts of Residues

Thermal waste treatment results in two groups of residues. It is distinguished between residues from the thermal treatment and residues from the flue gas treatment. Furthermore, sewage may be generated in the wet process gas cleaning.

Generally, small amounts of residues are considered to be advantageous, as the environmental impact and the costs incurred by the disposal or reuse decrease with decreasing amounts. Furthermore, a minimization of residues is required in accordance with the existing regulations (e.g. BImSchG, TA Siedlungsabfall, KrW-/AbfG).

However, the amount of residues does not allow any statements to be made with regard to the environmental compatibility of the process. An evaluation can only be accomplished together with other criteria.

II-4.2 Residue Properties

The quality of the residues is described by the chemical composition and the physical properties. The physical properties are of major importance for the disposal or reuse of the residues. Application of the parameters listed in Table II-8 among others depends on the type of residues.

Table II-8: Parameters for the characterization of residues

Chemical composition <ul style="list-style-type: none"> • PCDD/F concentrations • Carbon concentration • Heavy metal concentration 	Physical/mineralogical/ constructional properties
	Leaching stability (tests)
	Possibilities of reuse

The parameters of heavy metal content, carbon content and dioxin concentration, which are actually part of the chemical composition, are listed separately in Table II-8 due to their ecological relevance. Further distinction of parameters making up the chemical composition is possible. Analyses of the chemical composition, including heavy metals and hydrocarbons (e.g. dioxins and furans), can be carried out easily.

The chemical composition also comprises to the carbon content of the residues, which is of crucial importance for the disposal on a landfill. In Germany, the carbon content is considered one of the major criteria for disposal and as such for the classification according to the disposal types (disposal class I or II according to [TASi]).

Further characterization of the residues can be accomplished on the basis of the leaching behavior and the physical or mineralogical properties. Investigations with regard to the

elution potential are aimed at finding out, how well the individual chemical elements are fixed in the residue and these properties allow conclusions to be drawn with regard to the disposal or reuse of the residues. Both, in Germany, e.g. in Annex B of the [TASi] and in other countries, the corresponding emission limits are given in the legislative regulations. A list of the respective parameters and emission limits is given in the Annex (Section III-7).

In many countries, standardized tests and analytical procedures have been developed for the investigation of the leaching behaviour or the constructional properties. However, they have not always been conceived especially for the characterisation of residues from waste incineration plants. A selection of standards and analytical procedures is also given in the Annex (Section III-7).

Based on these standardized investigation methods, an evaluation of the residues and a comparison of the residue qualities of various thermal waste treatment processes can be made. It must be noted, however, that these analytical methods do not allow any information to be derived with regard to the long-term behaviour on the landfill.

Another criterion used for the evaluation of residues is the technical possibility to utilize the residues generated, e.g. possibilities of recycling. This criterion is difficult to handle since there is no clear legal and political definition. Flue gas cleaning residues, for instance, may be processed to gypsum or hydrochloric acid for reuse in industry. Another type of reuse consists in the same residue being used as a filling material in mining industry without prior processing. Furthermore, the possibilities of recycling are dependent on the technical conditions prevailing at the site of the plant.

Therefore it seems to be reasonable to evaluate the residues on the basis of other parameters, such as the chemical composition, leaching tests etc. These properties may be determined reliably by the test methods available and allow the different thermal waste treatment processes to be compared.

Furthermore, it must be noted that the residue properties are usually described by concentration values. To obtain the ecologically more relevant loads these have to be combined with the mass streams. The generation of certain residue properties requires additional process steps which means additional operating materials and energy. Consequently, the residue properties have to be seen in connection with the amounts of residues and the energy balances.

II-4.3 *Material Balances*

The material balances serve to pursue and illustrate the paths of the individual chemical elements or compounds in a sequence of technical processes. Furthermore, material balances allow statements to be made with regard to the material flows entering and leaving the treatment plant. A material balance yields information on the total load of substances that are released into the environment.

Consequently, a material balance also provides information regarding the observation of existing emission limits, e.g. for the much-discussed emissions into the atmosphere. Furthermore, the whereabouts of certain pollutants in the products can be demonstrated.

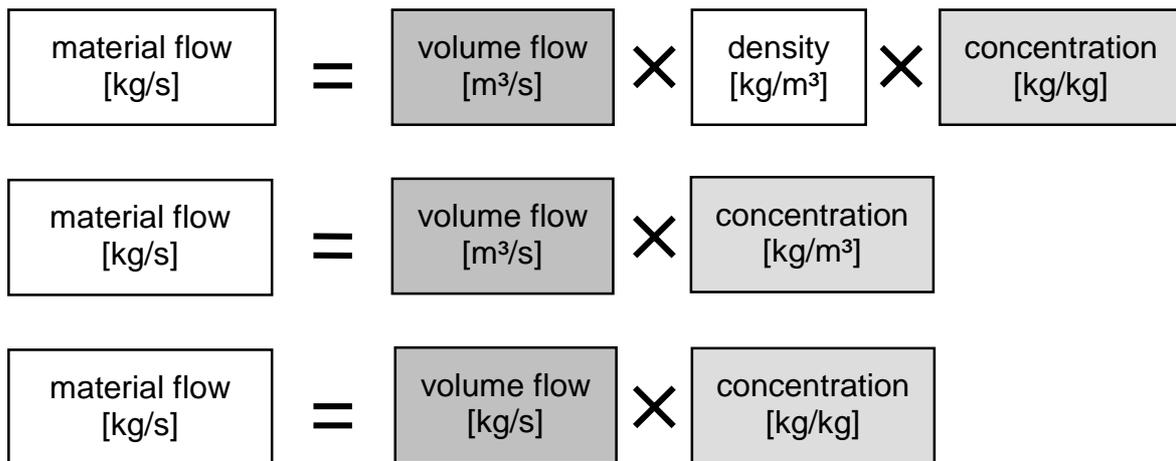
Prior to the work, the balancing scope determining the limits of the material balance has to be defined clearly. The balancing scope may comprise the entire production plant or certain process stages only. In general, the complexity and the measurement expenditure required for the material balance increase when a very detailed identification of the processes is desired.

In addition to the balancing scope, the substances to be balanced have to be specified. Selection of the chemical elements or compounds to be balanced should cover all groups of

pollutants that may occur in the course of the processes studied. The selection is influenced among others by the balancing scope specified, as not all substances or compounds are encountered anywhere in the process.

If material balances are used for the evaluation of thermal waste treatment plants, certain aspects have to be considered. A material balance of a thermal waste treatment plant requires a lot of information and data. For all elements or substances considered, the mass and volume flows and the respective concentrations have to be known. This is illustrated in Fig. II-1.

Fig. II-1: Methods of calculating a material flow



A measurement program underlying the material balance has to take into account the special properties of the residual waste. This residual waste does not represent a homogeneous fuel, its chemical composition is subject to strong fluctuations. Consequently, it must be assumed that no information for the substance balance can be obtained from the waste input analysis. During incineration, the plant acts as a “homogenizer” such that the waste input can be better calculated by using the residue analysis data.

The balancing scope has to cover possibly existing preliminary treatment systems where the waste is processed. These preliminary systems are e.g. systems for crushing the waste. Furthermore, certain waste fractions, e.g. metals, are separated by these systems. Due to the separation of certain fractions, the waste input into the thermal treatment process is changed.

It may therefore be concluded that a comparison of different thermal waste treatment plants using material balances requires a balancing scope which covers the entire plant. The sum of material flows leaving the plant provides information on the original waste composition, i.e. concentrations of the balanced substances in the waste input. This is the only way to achieve a reliable comparison and a final evaluation.

On the other hand, it is hardly reasonable to completely balance all partial steps of a thermal waste treatment plant. Comparison of different thermal waste treatment processes focuses on the material flows leaving the plant. In the combination processes, such as the Siemens Thermal Waste Recycling Process and the RCP process, certain material flows only occur between certain thermal treatment stages, but do not leave the plant. An investigation of these material flows with regard to their environmental impacts may not be necessary and requires a high expenditure. In substance balancing, these material flows should be neglected. This also

applies to separate plants for the processing of gypsum and hydrochloric acid from flue gas cleaning residues, which may be operated independently of the thermal process. The material flows in these separate plant sections may be calculated, if required.

Hence, the substance balances yield very good and reliable statements with regard to the plant, the material flows, the need of auxiliary chemicals and the residue flows. Based on the substance balances, different thermal waste treatment processes can be compared.

Due to these features, the substance balances also play an important role in connection with environmental management systems. Substance balances among others serve as a basis for the certification according to the EU Eco-Audit Regulations or the ISO 14000 standard system.

II-4.4 Energy Balances

The energy balance of a technical process shows where the released or consumed energy remains in the system. The different forms of energy, such as heat or electrical energy, have to be taken into account. In analogy to the substance balances, a scope has to be defined for the energy balance, which covers all plant components to be balanced.

Interestingly, requirements with regard to energy balances are outlined in the existing legal regulations. According to the German Federal Immission Control Act (Art. 5, clause 1, no. 4) the heat generated by operation of plants requiring a license has to be utilized as far as this is technically possible and economically feasible.

A high utilization of the generated thermal energy for conversion into electricity, district heating or process steam brings economic advantages due to the revenues. It must also be taken into consideration that fossil fuels may be substituted by the use of the energy stored in the waste (CO₂ discussion).

Hence, an analysis of energy balances for the evaluation of different thermal waste treatment processes appears reasonable. However, the energy balances are less significant than other criteria, as the basic objective of the thermal waste treatment is slightly different.

Like the substance balance, the energy balance has to cover the entire plant. As far as novel methods for the thermal treatment of waste are concerned, preliminary systems for the crushing of the waste or the separation of individual waste fractions play an important role. Moreover, special auxiliary agents, such as pure oxygen, are required for the operation of some plants. To produce these agents, energy is required.

For an evaluation of the different processes, the energy needed for the processing of the waste in the preliminary systems and the production of special auxiliary agents required for plant operation has to be indicated separately.

The energy balances yield energetic efficiencies which represent the actual criteria to be applied when comparing and evaluating the processes. A comparison of energetic efficiencies of technical scale waste treatment plants leads to a number of problems, one of them being the way the energy is used. Depending on the local conditions, a generation of electricity, district heating or process steam may be possible. In addition, some processes produce a synthesis gas, which can be burnt for energy generation, or used for the production of basic materials.

Various assumptions with regard to the utilization of the heat or the efficiencies of the turbines are found to yield different results when calculating the energetic efficiencies. In addition, the generation of synthesis gas offers several possibilities to calculate the efficiencies. This multitude of energy regeneration methods hardly allows a plausible comparison of the different thermal processes on the basis of energetic efficiencies.

Within the framework of the measurement program, another method is proposed. The energy balance is to be based on an enthalpy balance for the thermal waste treatment process. It serves to illustrate the whereabouts of the energy stored in the waste. The enthalpy stored in the waste is calculated from the calorific value and the waste mass flow. The energy losses are derived from the specific heat capacities and the mass flows leaving the thermal treatment plant. These losses also include the radiation losses. The energy that may be used in the incineration processes represents the enthalpy of the steam generated in the boiler.

To compare gasification and incineration processes, a model calculation may be performed, where the usable gas produced by the gasification processes is incinerated in a burning chamber according to the current state of the art.

II-4.5 Costs

The costs represent a major criterion for the evaluation of a process, as they have to be paid by the citizens or the industry in the form of waste disposal fees or waste management prices. The financial expenditures for a thermal waste treatment plant may be divided into fixed costs and throughput-dependent (variable) costs according to [Horch]:

Fixed costs:	Capital costs, depreciation, personnel costs, insurances, maintenance/repair
Throughput-dependent costs: (variable costs)	Costs of consumables, reuse/disposal of residues, costs of wearing parts

Considering the financial expenditures required for the operation of a technical scale waste management plant, which have to be covered by the fees obtained from the waste disposal services, it can be noticed that capital costs and the depreciation of the investments make up the largest proportion. Consequently for an economic combustion cost, the investment should be low and the plant design should be use to capacity.

The investment costs largely depend on the design of the plant. The requirement of remaining far below the limit values and reusing the residues produced (as hydrochloric acid and gypsum) results in an increased technical expenditure and, hence, an increase in the investments.

The detailed analysis and comparison of the costs for the different thermal waste treatment systems are subject to relatively large uncertainties. The construction and operation costs are strongly influenced by the local conditions and requirements to be complied with at the site of the plant. In addition, the additional conditions in the waste management area and the possibilities of utilization of the heat are to be taken into account.

Further problems in the cost analysis are encountered, when a more detailed information is necessary for cost comparison. In technical scale plants, the investments and personnel costs can hardly be assigned to individual plant components. Only the costs for the entire plant are known.

The reliability of the available data with regard to the investment costs depends on whether the respective waste treatment process has already been implemented on a technical scale. In case of a process that has not yet been tested on a technical scale, an increased licensing expenditure is expected due to the lack of experience. Several plants based on the same concept will have to be constructed for reliable investment costs.

II-4.6 Compliance with the Legal Requirements

The construction and operation of plants for the thermal treatment of residual waste are governed by a large number of legal regulations. The legal requirements refer to all sections of the plant and extend from the design, construction technology and plant safety to the emission limits. Plant operation is impossible without these requirements being complied with.

In Germany, the legal requirements to be complied with do not only originate from federal laws. Also the requirements made by state laws and local authorities have to be taken into consideration.

In the past, the legal requirements played an important role for the comparison of different waste treatment processes, as they focused on the emission limits. Due to the technical progress achieved, observation of the emission limits today does no longer represent a major problem.

The observation or the remaining below certain limits required by law, however, does not allow any statements to be made with regard to the actual plant operation. Emission limits may be observed with a large or a small excess of auxiliary chemicals. Moreover, the emission limits are measured in concentrations which do not provide any information on the chemical processes in the plant.

As the emissions and, hence, the material flows released from the plant into the environment are covered by material balances (see Section II-4.3), the compliance with legal requirements is of minor importance as a criterion to be used for a final evaluation.

II-4.7 Disposal Safety

Disposal safety is of high significance for the public waste disposal institutions which are responsible for the domestic waste management according to the law. A plant technology that works reliably guarantees a high availability and, hence, the safe handling of the planned amounts of waste. Moreover, a reliable function of the plant components provides the observation of the limit values and licensing requirements. Thus, financial risks can be avoided.

For comparing the thermal waste treatment processes studied with the framework of the measurement program, the plant capacity and the plant availability have to be determined. From these data, statements may be derived with regard to the reliability of the plant and the disposal safety.

However, this criterion must not be overrated. Otherwise, the technical progress and the introduction of modern methods might be obstructed. In the field of thermal waste treatment only grate incinerators would be constructed, as they already proved to be very suitable for the residual waste management in the past decades.

II-4.8 Export to Other Countries

As a rule, German technology is only exported to other countries, if these countries have a concrete need. This need of waste management technology is determined above all by the existing legal boundary conditions. Usually, these legal boundary conditions for the waste management and their implementation are directly connected with the ecological awareness of the country's population.

If thermal waste treatment plants are needed, data have to be collected with regard to the amounts of waste arising and the waste properties. The amounts and properties of the waste are determined by the habits of the population and the waste management measures taken in

this respective country. Moreover, the requirements to be complied with in this country have to be determined, e.g. emission limits or requirements with regard to the utilization of residues.

Consequently, an evaluation of a thermal treatment process with regard to its application abroad can only be made on the basis of detailed knowledge of the local conditions. The present study shall be restricted to some neighboring countries of Germany only. The requirements existing with regard to the emissions, the properties of the residues and other regulations are listed in the Annex (Section III-7).

II-4.9 Selection of the Criteria

Based on the criteria to be selected, a measurement program is to be conceived, which shall ensure a reliable comparison of different thermal waste treatment methods. Particular attention is paid to the operational and economic efficiency of the novel techniques developed in terms of compliance with the ecological requirements. The comparison which shall be restricted to existing technical scale plants shall allow an evaluation of the individual processes and help in taking the later decision in favor of a certain process for a new plant to be constructed in Germany or abroad.

Based on the criteria presented and discussed in Sections II-4.1 through II-4.8, comprehensive substance balances of the different plants appear to be the best basis for a comparison of the processes. The measurement program must be aimed at setting up a comprehensive substance balance, thus illustrating the paths of the individual substances and their whereabouts after leaving the plant. In addition, substance balances lead to detailed statements with regard to the need of auxiliary agents which are of particular importance for the thermal treatment and the flue gas cleaning. Substance balances also include other criteria, such as the amounts of residues or the chemical composition of the residues.

The residue properties affect the measurement program only indirectly, since the sample volume to be taken from the different mass flows has to have a sufficient size for the later investigation of the residue properties. During later evaluation of the individual processes, the residue properties play an important role, as they considerably influence the possible paths of utilization or disposal.

Another criterion are the energy balances. Due to the objective of thermal waste treatment, however, they are of minor importance. Comparison using the energy balances should be based on the enthalpy flows of the plant. In addition, the energy needed by preliminary systems or for the production of specific operating agents, e.g. oxygen, has to be considered. Comparison of gasification and incineration processes using energy balances may be accomplished on the basis of a combustion of the usable gas in a combustion chamber according to the current state of the art. An alternative is the determination of the chemically bound energy.

Two other criteria, the costs and the disposal safety, are of minor importance for the measurement program. Nevertheless, these criteria have to be incorporated in the final evaluation, as both aspects are very important for the further use of the technology in Germany and abroad. It must be noted that the costs determined for a certain existing plant may only be transferred to another site when the local conditions are taken into account.

The compliance with legal requirements is indispensable for the operation of the technical scale plants covered by the measurement program. Hence, this criterion does not allow any relevant findings to be obtained for the comparison and the final evaluation. The emissions which are frequently discussed in this connection are part of the substance balances.

When recommending a process for an export to other countries, a restriction to selected countries is necessary. To study the possibilities of exporting a certain technology, the tests which are required in the respective country have to be carried out.

II-5 Thermal Waste Treatment Technologies

In the present section, the different methods for the thermal treatment of municipal solid waste shall be presented briefly. The selection shall be restricted to technologies that are already employed today or will be used on a technical scale in the near future. Thus, the processes described can be included in the measurement program.

In addition, a measurement program shall be proposed for some technologies presented in accordance with Section II-3. These proposals are largely limited to the sampling for the substance balances. As far as the planning of a measurement program is concerned, it is referred to the instructions given in Section III-2. The measurement programs proposed are also based on literature information. Hence, modifications may be required.

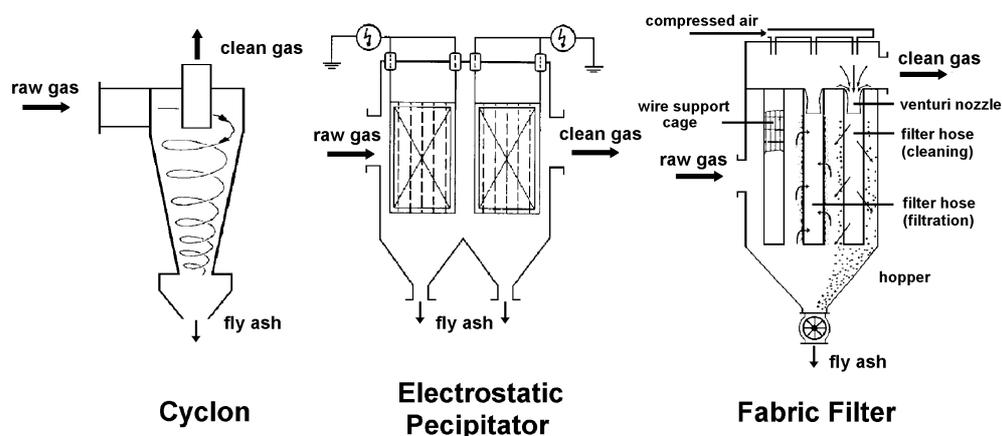
In all gasification and incineration processes, a cleaning of the flue gas is necessary after the thermal treatment. It is therefore reasonable to deal with the various technologies for flue gas cleaning first.

II-5.1 Flue gas Cleaning

The flue gas cleaning systems are based on mechanical and thermal separation processes which are connected in series. The possible combinations of the individual separation systems lead to completely different setups of the flue gas cleaning systems.

Usually, the thermal treatment is followed by the separation of the dust from the raw gas. To separate the dust, fabric filters, electric filters or cyclones are applied. Due to their limited efficiency, today cyclones are used as pre-separators only. The best separation efficiency is achieved by fabric filters.

Fig. II-2: Dedusting systems



For the separation of acid pollutants, HCl, HF and SO₂, dry, semi-wet and wet processes are applied. In this case, auxiliary chemicals are required. The dry and semi-wet processes are characterized by the injection of calcium hydroxide or calcium carbonate powder or suspension into the partly humidified flue gas. These additives react with the acid pollutants to the respective calcium salts. The technical process only differs in the way the auxiliary

chemicals are added. The reaction products are separated from the flue gas in a dust separator, i.e. fabric filters in modern plants.

Wet separation of acid pollutants is based on another principle. The pollutants are absorbed by a scrubbing liquid in scrubbers. Auxiliary chemicals are used to adjust the pH value of the scrubbing liquid and to neutralize the sewage generated by the scrubbers.

Fig. II-3: Schematic representation of a semi-wet flue gas cleaning process

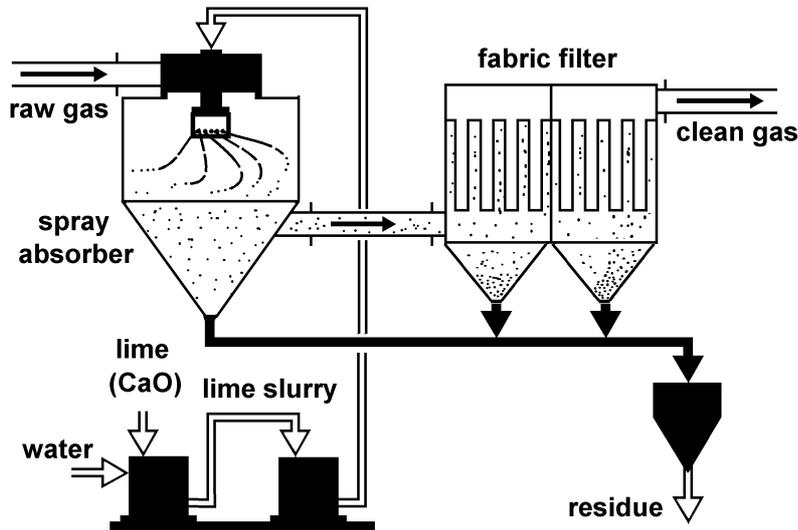
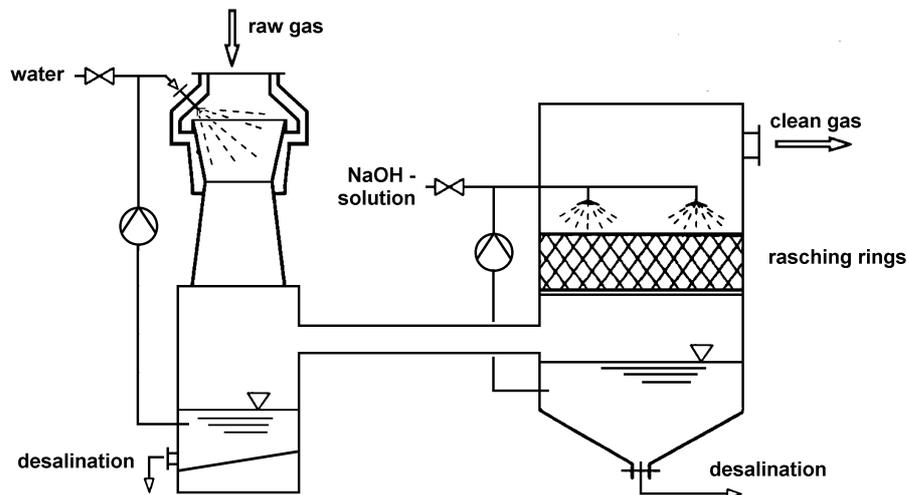


Fig. II-4: Schematic representation of a wet flue gas cleaning process



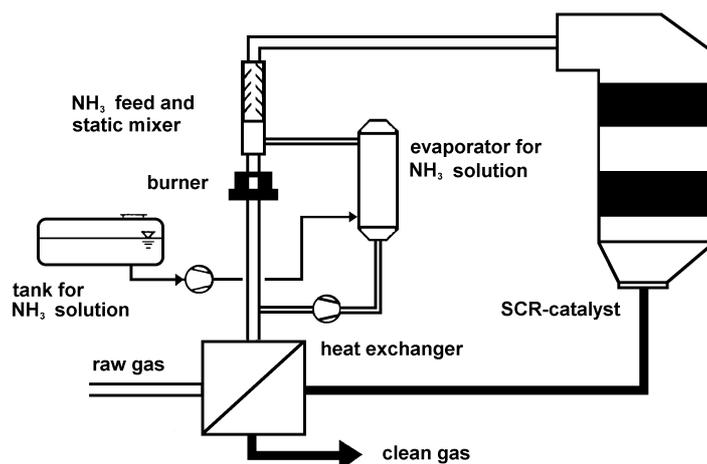
The need of auxiliary chemicals, in relation to the pollutant concentration in the raw gas, is very large for the Calcium bases dry process. A stoichiometric factor of 2 to 3 is typically applied. In case of the wet process, only a slight excess of reagent in the range of about 20% is required.

Scrubbing processes are also applied for the separation of hydrogen sulfide (H_2S) which is contained in the off gas of gasification plants, exclusively. In the Karlsruhe Thermoselect

plant, the sulferox process is employed [Schrickel]. Using iron complexing compounds, elementary sulfur and hydrogen are produced.

Due to the emission limits adopted, the nitrogen oxides have to be removed from the flue gases or waste incineration plants in many countries. Here, the SCR (Selective Catalytic Reduction) and the SNCR process (Selective Non-catalytic Reduction) proved to be successful on the technical scale. The nitrogen oxides contained in the flue gas, mainly nitrogen monoxide, react with ammonia to water and nitrogen.

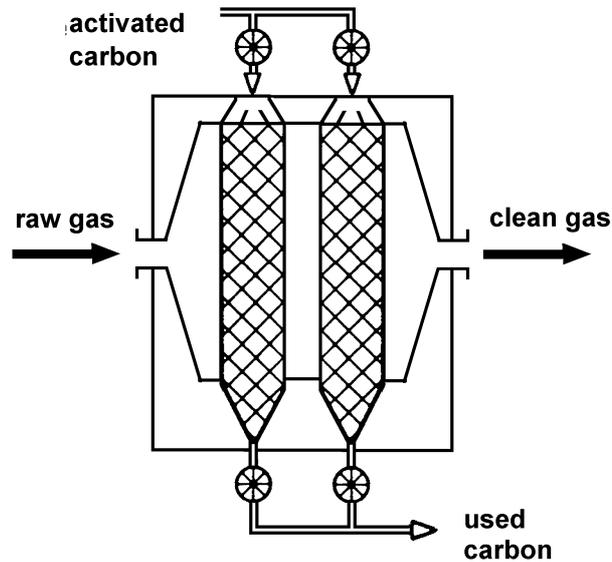
Fig. II-5: SCR process



In the SCR process, the chemical reaction takes place in a catalytic converter at temperatures of about 250°C. Due to the lacking catalytic converter, the gas-phase reaction of the SNCR process requires temperatures of about 900°C and an excess of ammonia.

Carbon entrainment adsorbers are applied for the separation of mercury, organic substances (dioxins, furans) and small residual concentrations of acid pollutants. During this process, a mixture of activated carbon and calcium carbonate or calcium hydroxide is injected into the flue gas flow. Pollutant adsorption takes place in the flue and in the filter cake of the fabric filter. The residues from the fabric filters are either fed back into the thermal treatment stage or disposed of.

Another technology for the cleaning of flue gases is the moving bed carbon adsorber, by means of which mercury and organic pollutants are separated from the flue gas.

Fig. II-6: Carbon adsorber

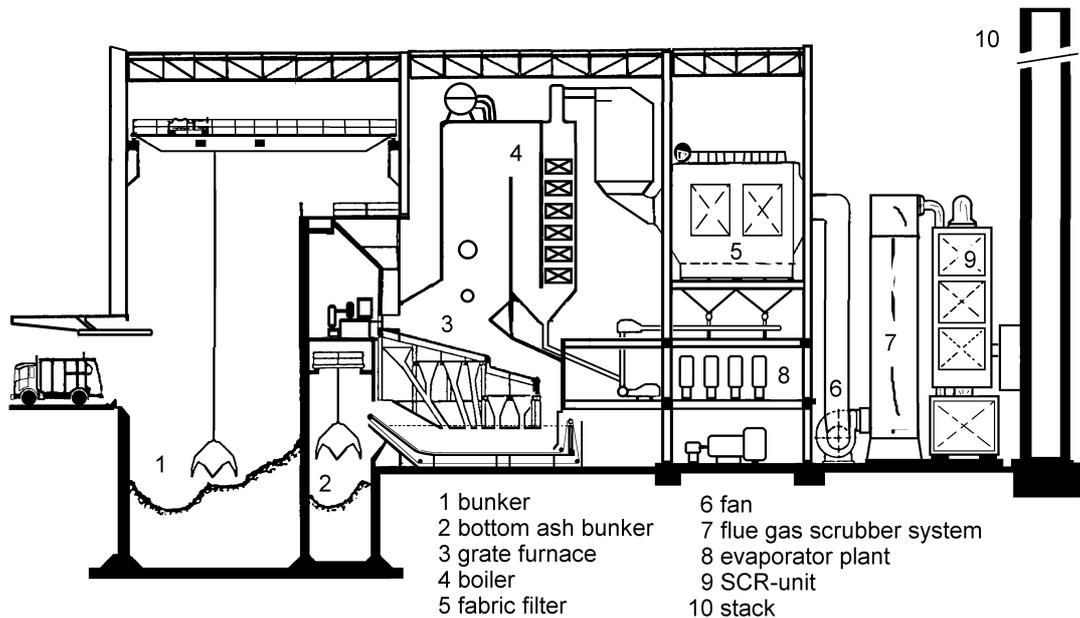
The flue gas passes an activated carbon layer, where pollutant adsorption takes place. The loaded activated carbon is removed from the adsorber and replaced by fresh adsorbent. The loaded activated carbon is fed back into the thermal treatment stage, provided that a respective sink, e.g. scrubber, is available in the flue gas cleaning system.

II-5.2 Thermal Waste Treatment Processes

II-5.2.1 Grate System

The principle of grate incineration as used today belongs to the oldest thermal waste treatment processes after the open incineration on the dump. In this case, a feeding system which is referred to as the grate moves the waste through the combustion chamber. Various types of grates (feeder grate, reciprocating grate, roller grate etc.) have been developed and are currently in operation all over the world. The individual stages of a heterogeneous incineration – drying, degasification, gasification, incineration – take place successively and partly simultaneously on the grate. The primary air for the incineration is supplied to the grate from below. For the complete burn-out of the incineration gases, secondary air must be ensured. The generated incineration gases leave the combustion chamber, their thermal energy is extracted in the boiler. Prior to the release into the atmosphere, the various pollutants in the flue gas have to be subjected to an flue gas cleaning system. The setup of a combustion plant is represented schematically below.

Fig. II-7: Grate incineration system for thermal waste treatment



Measurement Program:

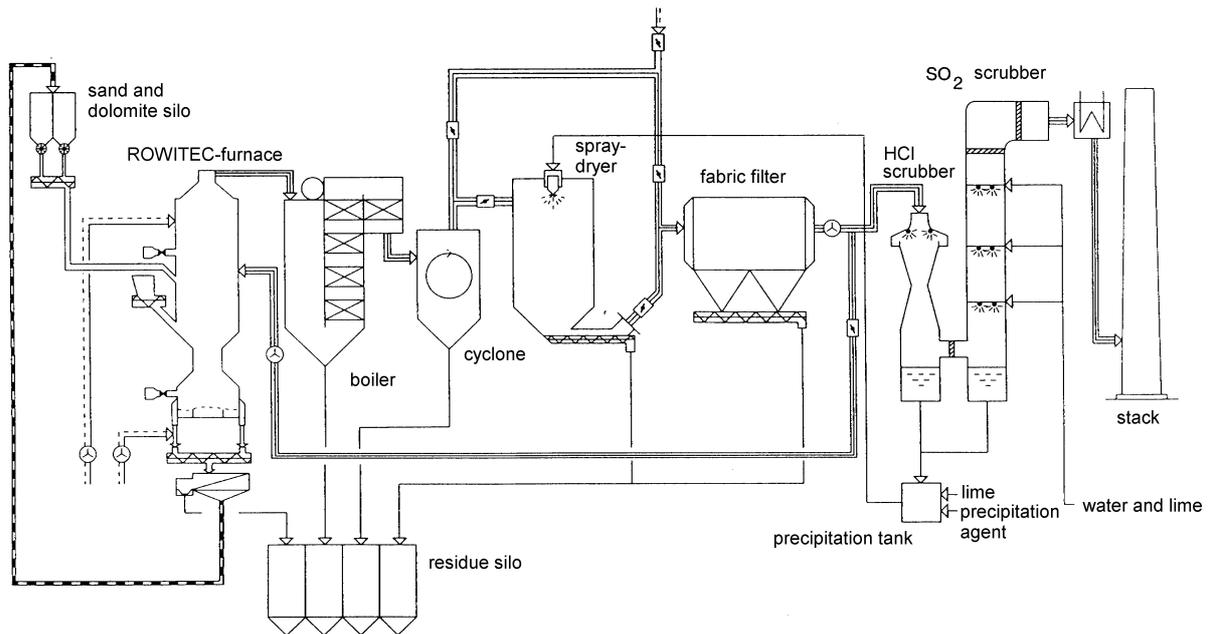
According to our present knowledge, it is not necessary to conceive an measurement program for a grate combustion plant, the setup of which corresponds to conventional plants in Germany. Comprehensive information is available with regard to the material flows and the properties of the residues generated.

The consequences of preliminary systems for the separation of certain waste fractions are of higher importance. At Cologne, a conventional grate incineration system is equipped with a sorting facility for the separation of reusable materials [AVG].

II-5.2.2 Fluidized-bed System

In other countries and in particular in Japan, the fluidized bed plays an important role in thermal waste treatment. In the Federal Republic of Germany, the fluidized-bed technology is used mainly for the incineration of sewage sludge. At the moment, the only fluidized bed system for the thermal treatment of waste is located at Berlin Ruhleben.

Fig. II-8: Fluidized-bed system at Berlin Ruhleben [Wiegandt]



The fluidized bed represents a layer of sand or another inert material which is kept in motion by the primary air supplied through nozzles from below. The waste to be incinerated is directly supplied to the sand layer and sometimes also fed into the furnace chamber above the sand layer. Due to the good heat transfer from the hot sand to the waste, rapid ignition takes place and the waste is incinerated in the fluidized bed. By the addition of secondary air, a complete burn-out of the generated flue gases is achieved in the gas plenum above the fluidized bed.

The Rowitec[®] fluidized bed at Berlin Ruhleben, which was developed by the companies Hölter ABT and Lurgi, differs from a conventional fluidized-bed system by the specific motion of the inert material. By an inclined nozzle floor and the distribution of the primary air, the sand layer is moved in the form of a rotating roll. The plant is designed for a throughput of 8.5 Mg waste per hour.

For the incineration of domestic waste in the fluidized bed, processing of the residual wastes is required. At Ruhleben, the wastes are crushed with a shredder and the metal fractions are separated.

In analogy to other incineration technologies, the fluidized-bed technology is characterized by the heat of the flue gas being used in a boiler for steam generation and the pollutants being removed from the flue gas in a cleaning system. The setup of the exhaust cleaning system at Ruhleben is obvious from Fig. II-8.

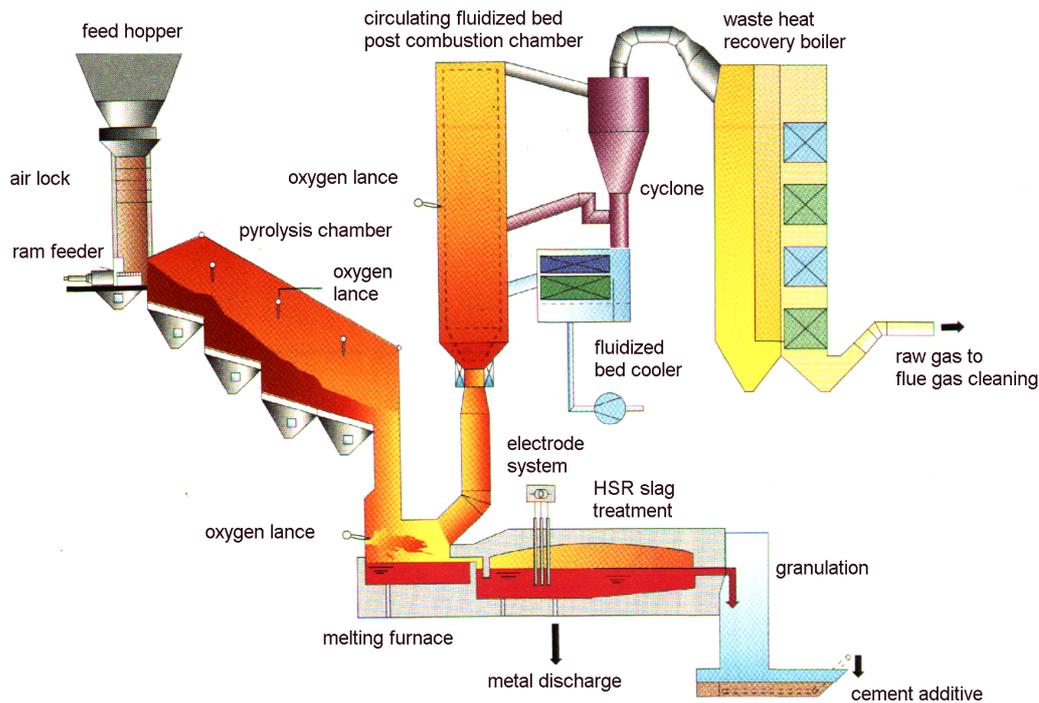
Measurement program:

Location	Material flow and sampling
Mechanical processing system	The required energy supply and all mass flows, input and output have to be determined at the system. The particle size range has to be measured.
Discharge of solid residues	A solid residue is generated as incineration product. The mass flows and concentrations of the substances mentioned in Table II-3 have to be determined. Time interval: 0.5 h between two samplings, in total about 17 samples.
Boiler outlet	Measurement of the concentration of gaseous compounds for balancing of the substances listed in Table II-3 measured as HCl, SO ₂ , HF, HBr, Hg, and the gas concentrations according to Table II-4. Determination of the dust load and the concentrations of the substances mentioned in Table II-3. Time interval: Online measurement over the entire measurement period.
Discharge from the flue gas cleaning system	The mass flows and concentrations of the substances named in Table II-3 have to be determined for boiler ash, cyclone ash, and filter ash. Time interval: 1 h between two samplings, in total about 9 samples.
Stack	In the cleaned flue gas, the concentrations of those pollutants have to be determined, which are relevant for the balancing of the substances named in Table II-3 or for which emission limits are given. Time interval: According to the legislative regulations or license.

II-5.2.3 The Recycled Clean Products Process

The Recycled Clean Products Process (RCP) was developed by the Von Roll company with the objective to obtain a maximum fraction of reusable materials [Von Roll]. The plant technology shown in Fig. II-9 is similar to grate incineration. The RCP process, however, represents a combined process with completely different thermal processes taking place.

Fig. II-9: The RCP process [Von Roll] [Brunner]



Thermal treatment of the waste is divided into four sections. In the pyrolysis chamber, the waste is first subjected to degasification on a grate. The energy required for this process is generated by the partial oxidation of the pyrolysis gases with oxygen. The pyrolysis coke and the gas are incinerated in the second stage, the melting furnace, under the addition of oxygen. The use of oxygen leads to a temperature of above 1400°C. As a result, a molten slag is generated. This slag is discharged from the melting furnace and transferred to slag treatment. Here, a copper-iron alloy and a granulated solid are generated.

The produced gases are released from the pyrolysis chamber, the melting furnace and the slag treatment system into the afterburning chamber, i.e. a circulating fluidized bed with a sand bed [Engweiler]. In the fluidized bed, the flue gases are burned out completely and cooled down to temperatures below 1000°C. Part of the energy is transferred via the sand to a fluidized bed cooler. The flue gases are led from the circulating fluidized bed to a waste heat boiler and a downstream flue gas cleaning system.

At Bremerhaven, a technical scale RCP plant with a capacity of 6 t/h is taken into operation [Brunner]. This plant is not equipped with an flue gas cleaning system. Instead, the flue gases are passed on to the already existing cleaning systems of the grate combustion plant for pollutant removal [Capitaine].

During the operating periods of September/October and November 1997, a 24 h shift operation at 60% of the plant throughput was achieved. By means of constructional modifications at the transition from the melting furnace to the afterburning chamber, the throughput shall be further increased [Capitaine].

For the plant in Bremerhaven, the following measurement program is proposed.

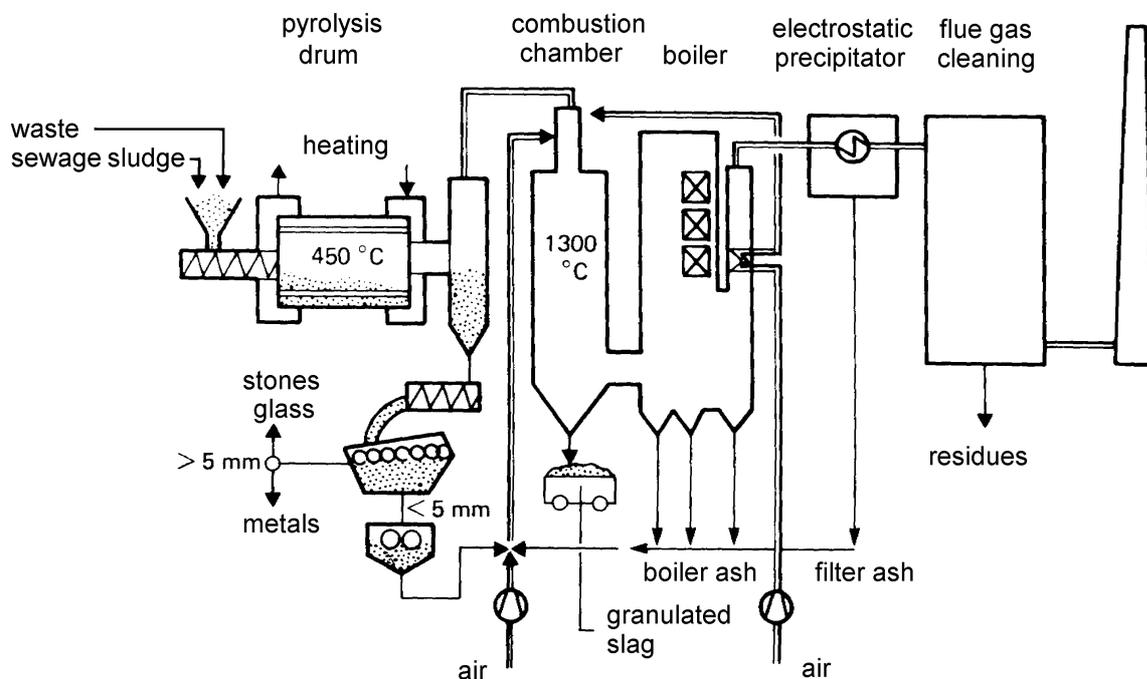
Measurement program:

Location	Material flow and sampling
Discharge of solid residues	A copper-iron alloy and a granulated solid are generated as incineration products. The mass flows and concentrations of the substances mentioned in Table II-3 have to be determined. Time interval: 0.5 h between two samplings, in total about 17 samples.
Boiler outlet	Measurement of the concentration of gaseous compounds for balancing of the substances listed in Table II-3 measured as HCl, SO ₂ , HF, HBr, Hg, and the gas concentrations according to Table II-4. Determination of the dust load and the concentrations of the substances mentioned in Table II-3. Time interval: Online measurement over the entire measurement period.

II-5.2.4 Thermal Waste Recycling Process

The Thermal Waste Recycling Process also belongs to the group of combined processes with the thermal treatment being divided into various technical stages. This process that is currently offered on the market by the Siemens company dates back to the Kiener pyrolysis plant of the 1970s. A pilot plant was taken into operation in Ulm-Wiblingen in 1988.

Fig. II-10: Schematic representation of the Thermal Waste Recycling Process [Berwein-1]



The waste to be disposed of is first crushed to a particle size of 200 to 300 mm [Berwein-2]. After this, pyrolysis takes place at about 450°C in the carbonization drum with no air being supplied. The products generated in this stage are a solid pyrolysis residue and a pyrolysis gas.

The solid residue is divided into two fractions using a screen (mesh width 5 mm). The screen overflow contains metals and an inert coarse fraction. The material passing the screen consists of a carbon-rich solid which is crushed to a grain size of about 0.1 mm in a mill.

In a combustion chamber, the second thermal treatment stage, the pyrolysis gas is incinerated together with the ground, carbon-rich solid. To use the thermal energy of the hot flue gases, a waste heat boiler is installed downstream of the burning chamber. The pollutants are removed by the flue gas cleaning system.

Based on the pilot plant, a technical scale plant was built in Fürth and is being commissioned at the moment. The plant consists of two incineration lines which are designed for an annual capacity of waste of 100,000 Mg. In contrast to the demonstration plant at Ulm-Wiblingen, two carbonization drums are used. For the time being the plant in Fürth has been shut down.

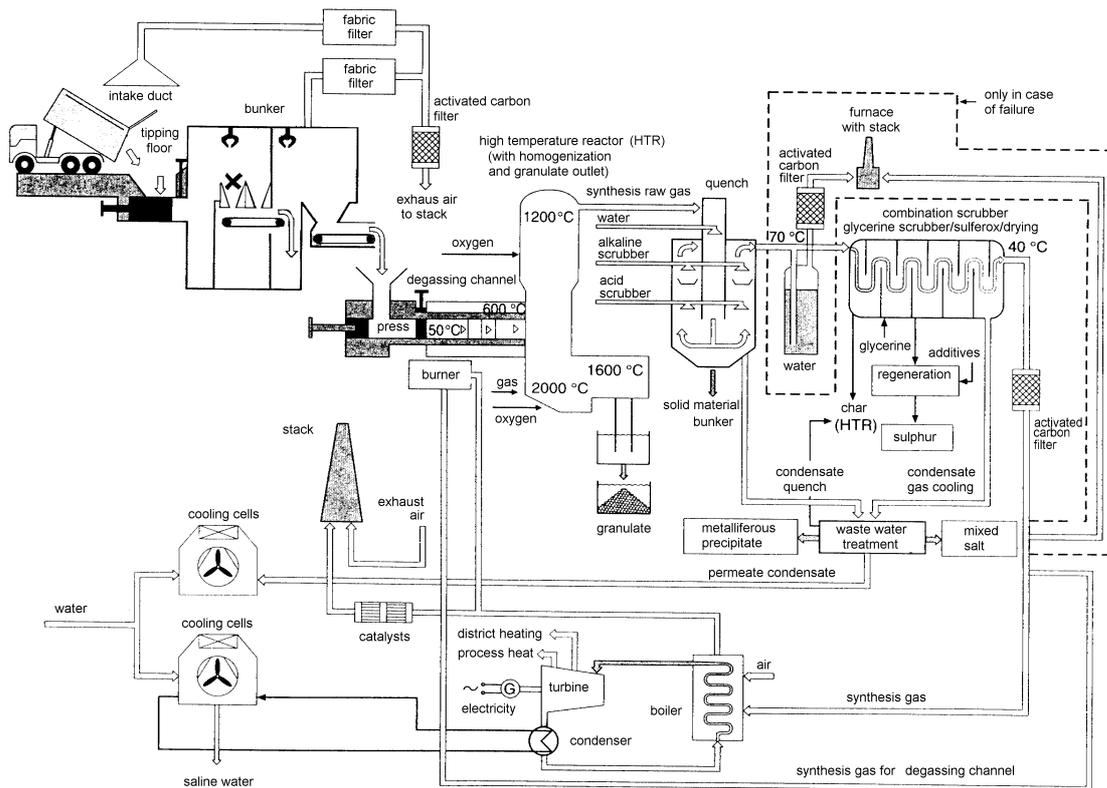
Measurement program:

Location	Material flow and sampling
Mechanical processing system	The required energy supply have to be determined at the system.
Discharge of solid residues	A metal fraction and an inert coarse fraction are generated as pyrolysis products. A granulated slag is generated in the combustion chamber. The mass flows of the three residues have to be determined. The concentrations of the substances mentioned in Table II-3 have to be measured. Time interval: 0.5 h between two samplings, in total about 17 samples.
Boiler outlet	Measurement of the concentration of gaseous compounds for balancing of the substances listed in Table II-3 measured as HCl, SO ₂ , HF, HBr, Hg, and the gas concentrations according to Table II-4. Time interval: Online measurement over the entire measurement period.
Discharge from the flue gas cleaning system	The mass flows and concentrations of the substances named in Table II-3 have to be determined for all products generated by flue gas cleaning. This also includes the dusts separated by the dedusting devices Time interval: 1 h between two samplings, in total about 9 samples.
Stack	In the cleaned flue gas, the concentrations of those pollutants have to be determined, which are relevant for the balancing of the substances named in Table II-3 or for which emission limits are given. Time interval: According to the legislative regulations or license.

II-5.2.5 Thermoselect

Development of this process started in 1989. A demonstration plant with a licensed capacity of 4.2 t/h was taken into operation in 1992 in Italy [Stahlberg]. The Thermoselect process is a two-stage process, consisting of a pyrolysis stage and a gasification stage.

Fig. II-11: Thermostelect Process [Schricketl]



Using a hydraulic press, the waste is fed into the degasification channel which is heated from outside by means of a cleaned synthesis gas [Schricketl]. In this channel, the waste first enters a drying zone and then a pyrolysis zone. Maximum temperature during pyrolysis is 600°C.

The material flows generated during pyrolysis, the pyrolysis gas and pyrolysis residues, are passed from the degasification channel directly to the high-temperature reactor. Here, gasification takes place with pure oxygen. In the high-temperature reactor, a process gas of high calorific value is generated and released at the top. Furthermore, liquid slag is produced and discharged into a water bath at the bottom of the reactor. Then, the slag is granulated and divided into a metal fraction and a glassy inert material.

The process gas leaving the high-temperature reactor contains carbon dioxide, carbon monoxide, water and hydrogen and may be used for synthesis purposes, in gas motors or for steam generation. In any case, the process gas has to be subjected to prior cleaning for pollutant removal.

Gas cleaning of the Thermostelect process differs from that of incineration processes. The gas cleaning system consists of a quencher, a gas scrubber, a desulfurization stage, a gas drying system and an activated carbon filter [Stahlberg].

In Germany, one technical scale Thermostelect plant has been built in Karlsruhe, which is set in operation at the moment. The proposed measurement program is based on this plant.

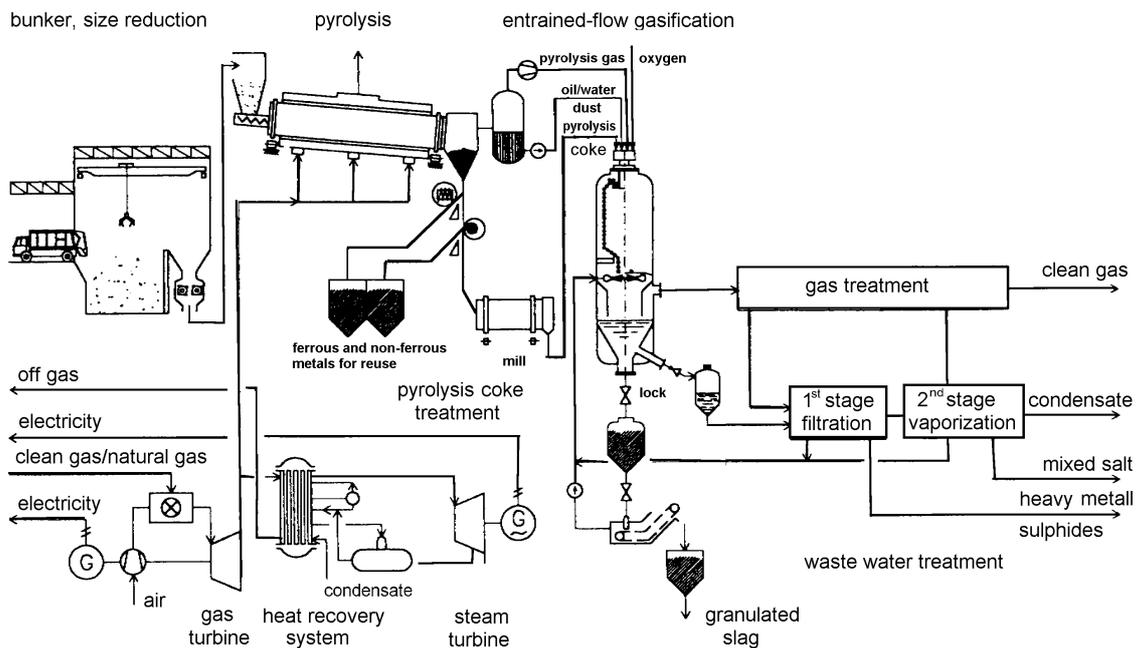
Measurement program:

Location	Material flow and sampling
Mechanical processing system	The required energy supply have to be determined at the hydraulic press.
Discharge of solids following thermal treatment	The mass flows and concentrations of the substances mentioned in Table II-3 have to be determined for the metal fraction and the glassy inert material. Time interval: 0.5 h between two samplings, in total about 17 samples.
Downstream of gasification	Measurement of the concentration of gaseous compounds for balancing of the substances listed in Table II-3 measured as HCl, SO ₂ , HF, HBr, Hg, and the gas concentrations according to Table II-4. Time interval: Online measurement over the entire measurement period. Determination of the dust load and the concentrations of the substances mentioned in Table II-3. Time interval: Online measurement over the entire measurement period.
Substance discharge from the gas treatment system	The mass flows and concentrations of the substances named in Table II-3 have to be determined for all products generated by flue gas cleaning processes. This also includes the dusts separated by the separators. Time interval: 1 h between two samplings, in total about 9 samples.
Cleaned gas during gas utilization	The concentration of those substances has to be determined, which are relevant for the balancing of the substances listed in Table II-3 or which are indicated in Table II-4. Time interval: Online over the measurement duration.
Cleaned gas during gas incineration Stack	In the flue gas, the concentrations of those pollutants has to be determined, which are relevant for the balancing of the substances in Table II-3 and for which emission limits values have been specified. Time interval: According to the legislative regulations or license.

II-5.2.6 The Noell Conversion Process

The conversion process developed by the Noell company is based on the combination of various process stages previously developed: Pyrolysis plants with rotary kiln technology and entrainment gasification [Noell] [Schingnitz]. The Noell conversion process is represented schematically in Fig. II-12.

Fig. II-12: The Noell conversion process [Schingnitz]



The waste delivered is crushed and supplied to a rotary kiln, where pyrolysis takes place at about 550°C under air exclusion. This rotary kiln is heated from outside. The pyrolysis products include a solid residue and a pyrolysis gas which mainly consists of steam, carbon dioxide and hydrocarbons [Schingnitz].

The pyrolysis gas is then divided into a gas fraction and a dust containing water/oil mixture in the downstream condensation system. The metal fractions are separated from the solid residues. The remaining solid is subjected to grinding.

After this, gasification of all three fractions with oxygen takes place in the entrained-flow gasifier. The pressure in this stage is set to 2 to 50 bar [Schingnitz]. The temperatures are in the range of 2000°C [Noell]. The high temperature leads to the formation of a liquid slag which is granulated in a water bath.

The gas generated during gasification and containing carbon monoxide and hydrogen as major constituents is cooled down. Carbon disulfide and other pollutants are removed. Subsequently, the gas may be used for the generation of energy in other processes or as a synthesis gas for the production of methanol or other substances.

Measurement program:

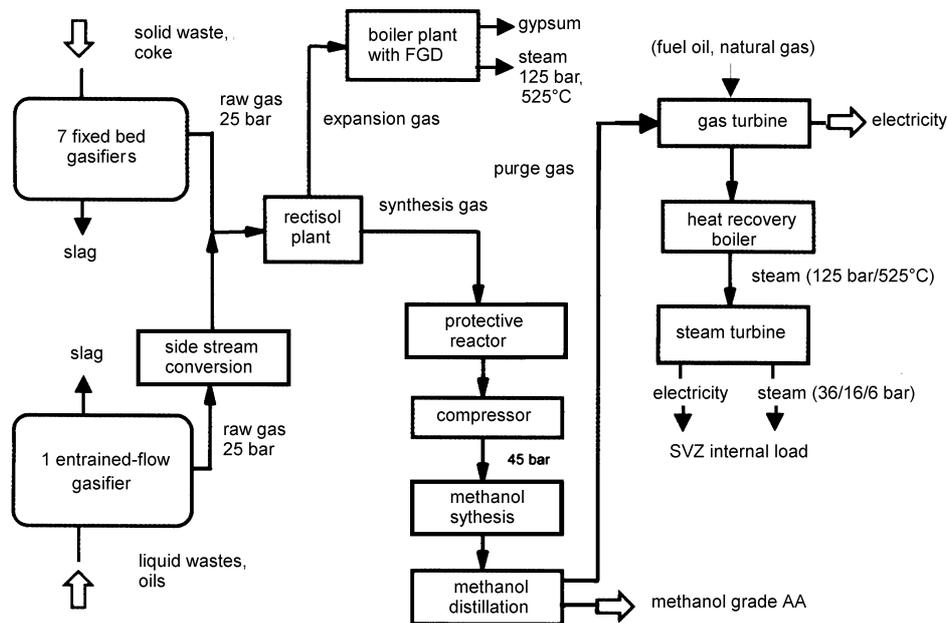
Location	Material flow and sampling
Mechanical processing system	The required energy supply have to be determined at the system.
Discharge of solids following gasification	<p>Metal fractions are generated as pyrolysis products. A granulated slag is generated in the entrained-flow gasifier.</p> <p>The mass flows of the residues have to be determined. The concentrations of the substances mentioned in Table II-3 have to be measured for the granulated slag.</p> <p>Time interval: 0.5 h between two samplings, in total about 17 samples.</p>
Downstream of gasification	<p>Measurement of the concentration of gaseous compounds for balancing of the substances listed in Table II-3 measured as HCl, SO₂, HF, HBr, Hg, and the gas concentrations according to Table II-4.</p> <p>Time interval: Online measurement over the entire measurement period.</p> <p>Determination of the dust load and the concentrations of the substances mentioned in Table II-3.</p> <p>Time interval: Online measurement over the entire measurement period.</p>
Substance discharge from the gas treatment system	<p>The mass flows and concentrations of the substances named in Table II-3 have to be determined for all products generated by flue gas cleaning processes. This also includes the dusts separated by the separators.</p> <p>Time interval: 1 h between two samplings, in total about 9 samples.</p>
Cleaned gas during gas utilization	<p>The concentration of those substances has to be determined, which are relevant for the balancing of the substances listed in Table II-3 or which are indicated in Table II-4.</p> <p>Time interval: Online over the measurement duration.</p>
Cleaned gas during gas incineration Stack	<p>In the flue gas, the concentrations of those pollutants has to be determined, which are relevant for the balancing of the substances in Table II-3 and for which emission limits values have been specified.</p> <p>Time interval: According to the legislative regulations or license.</p>

II-5.2.7 Secondary Raw Material Center Schwarze Pumpe

At the industrial site of Schwarze Pumpe in the former GDR, lignite was processed to various products. Among others, gas for the municipal gas supply was produced by the gasification plants. The decreasing demand for these products led to a reorientation of the business and the taking up of the thermal waste treatment [Buttker] [SVZ].

Based on the existing technology, in particular existing fixed-bed and entrained-flow gasification plants, a gasification process was developed for special waste fractions. The concept is obvious from Fig. II-13.

Fig. II-13: Gasification at Schwarze Pumpe [Buttker]



Briquetted or crumbly wastes mixed with coal are treated in a fixed-bed gasification system. Plastic Waste, sewage sludge, rubber, wood, shredder residues and electronic waste can be gasified. Liquid or pasty wastes are supplied to an entrained-flow gasification system. The mixture of oil and tar produced by the fixed-bed gasifier is subjected to gasification in the entrained-flow gasifier.

The gases produced by the entrained-flow and fixed-bed gasifiers were separately cooled down to ambient temperature and processed for further use in a common gas cleaning system. Undesirable gas components were washed out with methanol in the gas cleaning system and a gas with the quality of synthesis gas is generated. An additional expansion gas is the result of this cleaning step, which is incinerated in a separate boiler with flue gas cleaning system. The processed gas may be used for energy production in a gas turbine with bottoming steam turboset, for the production of methanol or as a process gas in a gypsum production plant [Seifert].

Measurement Program:

For various reasons, no measurement program is proposed for Schwarze Pumpe. In reality, the plant is more complex than demonstrated in Fig. II-13. The fixed-bed gasifiers were fed by five pretreatment systems used for different wastes. Additionally, liquid gasification products generated by the fixed-bed gasifiers were supplied to the entrained-flow gasifier.

The information available on this location shows that the exhaust gas produced by the fixed-bed gasifiers were combined upstream the gas cooling device. Moreover, the gases from the fixed-bed gasifiers and the entrained-flow gasifier were combined upstream the gas cleaning device.

Due to these facts, the boundaries for the material balances have to be defined after an inspection at site. Then an investigation program may be developed.

II-5.2.8 Co-incineration

Co-incineration of waste refers to all technologies that are based on the use of the already existing thermal processes for the purpose of waste treatment. Co-incineration of waste is mainly carried out in power plants and cement production plants.

No domestic waste is used for the co-incineration. Instead only special waste fractions are incinerated. Suitability of a waste material for co-incineration depends on the waste properties and the technical conditions of the plant, where this co-incineration is taking place.

The co-incineration of sewage sludge has already been performed in various power plants. In a lignite power plant based on the principle of the circulating fluidized bed, co-incineration of sewage sludge takes place without any problems [Bierbaum]. The sewage sludge is supplied to the furnace from a special container using solid-state pumps. For the fine cleaning of the flue gases produced, the plant was backfitted with a carbon entrainment system.

Measurement Program:

The measurement program below refers to the co-incineration of wastes in power plants with setup and flue gas cleaning system similar to thermal waste treatment plants.

Location	Material flow and sampling
Mechanical processing system	The required energy supply and auxiliary chemicals have to be determined.
Discharge of solid residues	A solid ash is generated as incineration product. The mass flows and concentrations of the substances mentioned in Table II-3 have to be determined. Time interval: 0.5 h between two samplings, in total about 17 samples.
Boiler outlet	Measurement of the concentration of gaseous compounds for balancing of the substances listed in Table II-3 measured as HCl, SO ₂ , HF, HBr, Hg, and the gas concentrations according to Table II-4. Time interval: Online measurement over the entire measurement period. Determination of the dust load and the concentrations of the substances mentioned in Table II-3. Time interval: Online measurement over the entire measurement period.
Discharge from the flue gas cleaning system	The mass flows and concentrations of the substances named in Table II-3 have to be determined for all products generated by flue gas cleaning. This also includes the dusts separated by the dedusting devices. Time interval: 1 h between two samplings, in total about 9 samples.
Stack	In the cleaned flue gas, the concentrations of those pollutants have to be determined, which are relevant for the balancing of the substances named in Table II-3 or for which emission limits are given. Time interval: According to the legislative regulations or license.

II-6 Example of a Balance (Grate Incineration)

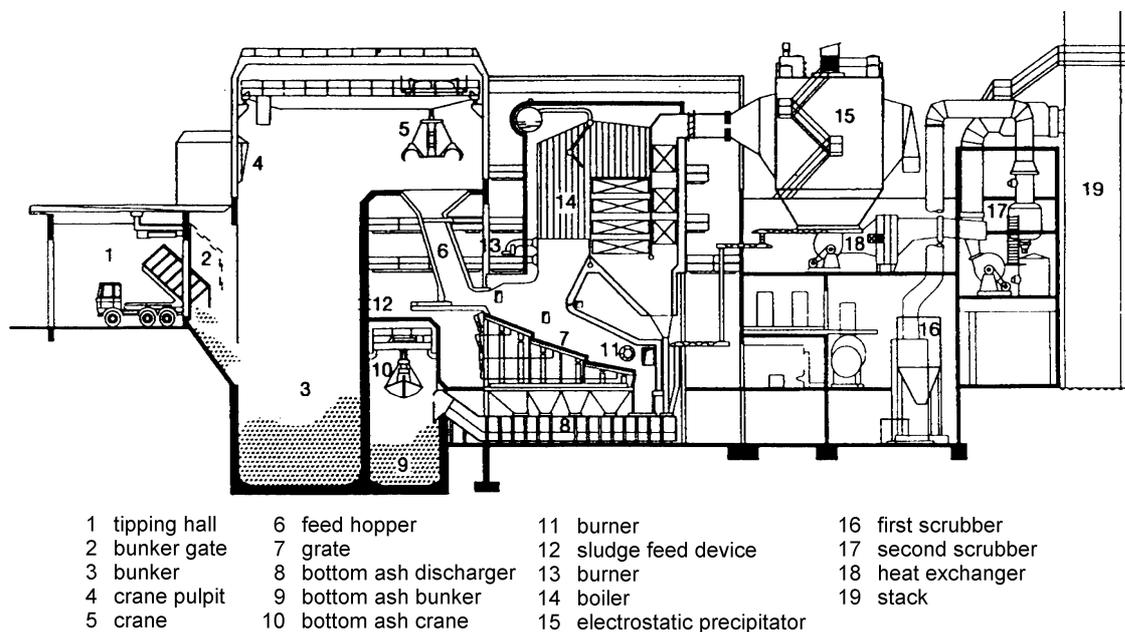
In the present section, examples of balances for conventional grate combustion plants shall be explained. The balances presented below for the municipal solid waste incinerator of Bamberg were taken from the paper of [Achternbosch], where the material flows had been analyzed in sewage-free and sewage-generating flue gas cleaning systems. The boundaries of balancing and the data available shall be described in more detail below.

This section contains only the major information on the plant and the balances for the elements chlorine, sulfur and cadmium. An overall evaluation and interpretation of the available data is not the objective of the present work.

II-6.1 Description of the Plant

The waste incineration plant at Bamberg took up operation in 1978 with two incineration lines. The plant was then extended in 1981 by a third incineration line [Thomé-Kozmiensky]. Each incineration line has an incineration capacity of 6 t/h and is equipped with a separate flue gas cleaning system [Thomé-Kozmiensky]. In 1990, the furnaces were optimized and the air pollution control system was extended by a second scrubber stage [Babcock].

Fig. II-14: Longitudinal section of the MSWI Bamberg [Thomé-Kozmiensky]



The flue gas cleaning system as represented in Fig. II-14 consists of an electric filter and a two-stage scrubbing system. The plant components backfitted for compliance with the emission limits given by the 17th Federal Immission Control Act (BImSchV), the carbon entrainment system and the SCR facility [ABB], are not shown in Fig. II-14. Further information and technical data on the Bamberg municipal solid waste incineration plant can be found in [Thomé-Kozmiensky].

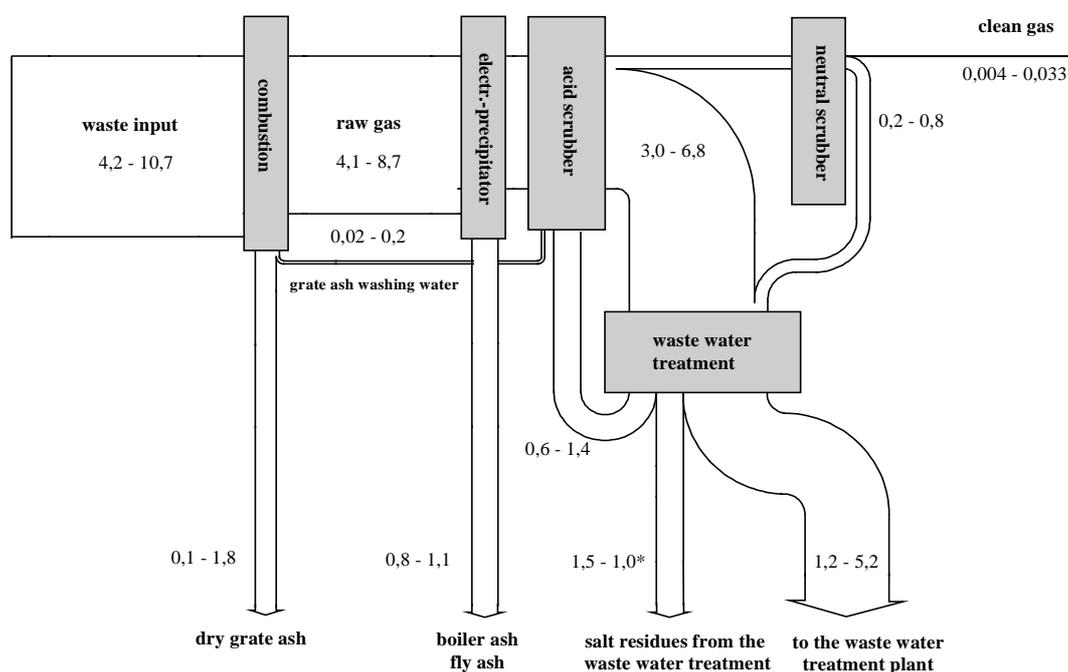
II-6.2 Data Sources and Material Balances

The municipal waste incineration plant at Bamberg has been documented well in a number of publications focussing on various issues for many years now. The material balances that shall be dealt with in detail below were taken from [Achternbosch]. These material balances are mainly based on [Reimann-1]. The data presented here have been obtained from numerous analyses of the individual material flows. However, the waste composition was not analyzed, but calculated from the data of the other material flows. For calculating the material flows in sewage treatment, supplementary information was taken from [Reimann-2].

The material balances presented for the municipal solid waste incineration plant at Bamberg in [Achternbosch] do not cover the entire plant. This work focussed rather on sewage-free and sewage-generating flue gas cleaning systems. The flue gas cleaning units backfitted for compliance with the 17th Federal Immission Control Act, which do not have any influence on the sewage composition, were not covered by the given boundaries for balancing. The material flow that is referred to as clean gas in the balances does **not** enter the atmosphere, but is passed on to the carbon entrainment adsorber and a downstream SCR system for reduction of the nitrogen oxide concentrations.

As the first material balance, the balance for the element of chlorine is presented in Fig. II-15.

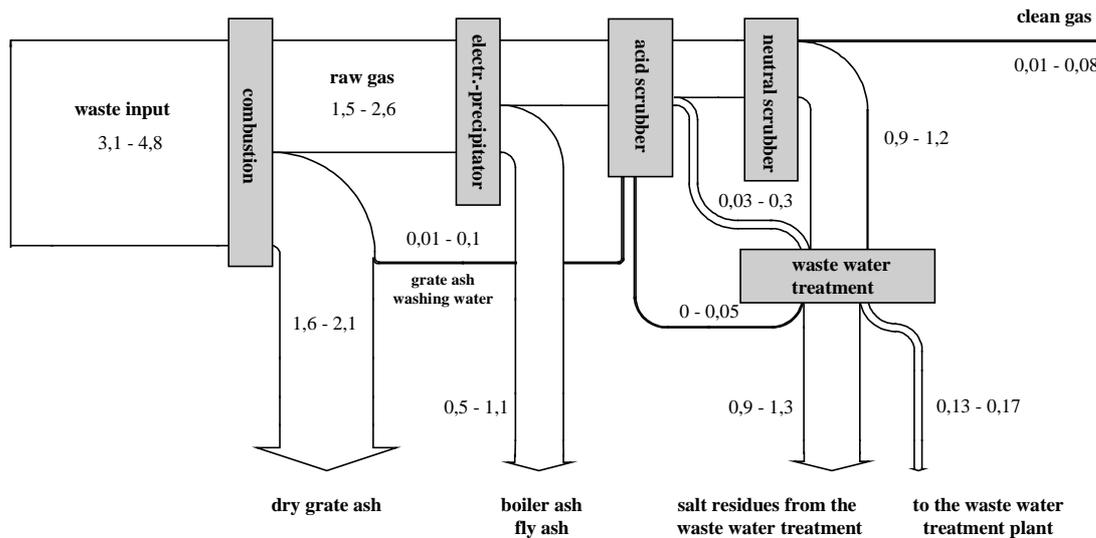
Fig. II-15: Chlorine balance of the MSWI Bamberg, values given in kg Cl/t waste [Achternbosch]



The chlorine load of the waste input varies between 4.2 and 10.4 kg/t waste, the mean value amounts to 6.8 kg/t waste. Only a small fraction, about 13% of the input, enters the grate ash, the predominating fraction is released into the raw gas as HCl or dust constituent. The chlorine contained in the dust, 0.8 to 1.1 kg/t waste, is separated from the flue gas in the electrostatic precipitator. In the downstream HCl scrubber, 3 to 6.8 kg chlorine/t waste are removed from the flue gas. Only small amounts in the order of 0.2 to 0.8 kg/t waste are separated by the second scrubber. Then, the flue gas with a very small chlorine load is passed on to the carbon entrainment system.

Part of the desalination from the scrubbers is returned to the HCl scrubber by the wastewater treatment. In addition, the wastewater treatment gives rise to a flue gas scrubbing product with a chlorine load of 1 to 1.5 kg/t waste. According to the calculation, the difference of the minimum values exceeded the difference of the maximum values (see * in Fig. II-15). Wastewater with a chlorine load of 1.2 to 5.2 kg/t waste is discharged from the plant to the wastewater treatment plant.

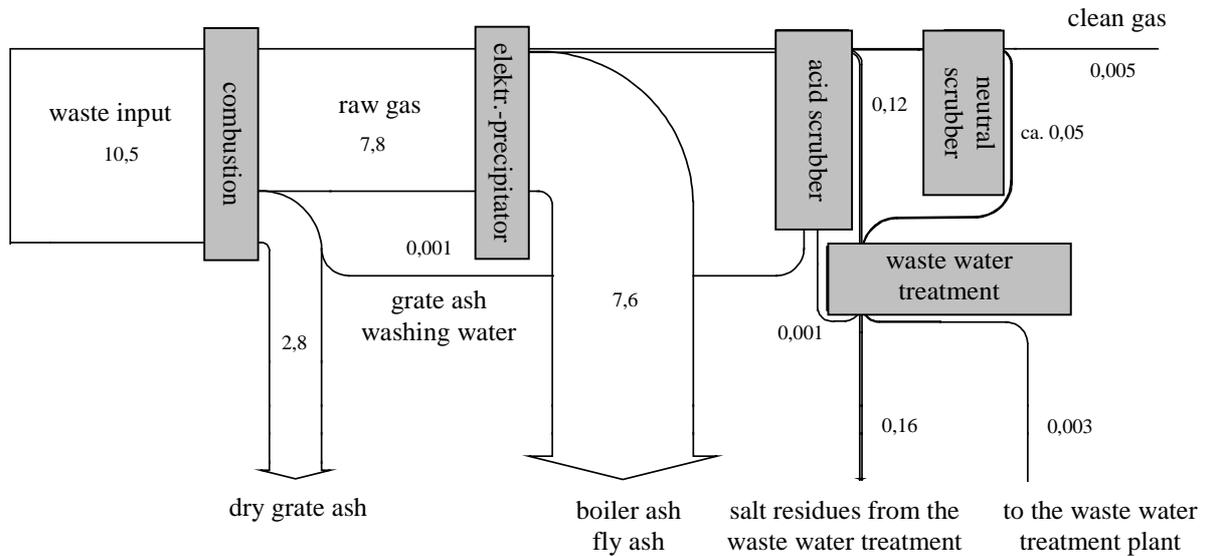
Fig. II-16: Sulfur balance of the MSWI Bamberg, values given in kg S/t waste [Achterbosch]



According to Fig. II-16, sulfur content of the waste varies between 3.1 and 4.8 kg/t waste. A large part of the sulfur input, 1.6 to 2.1 kg/t waste, remains in the grate ash during incineration. The filter dust separated in the electrostatic precipitator contains 0.5 to 1.1 kg sulfur per ton waste. While the HCl scrubber separates a small amount of sulfur only from the flue gas, about 0.9 to 1.2 kg sulfur/t waste are removed from the flue gas by the SO₂ scrubber. The pure gas leaving the scrubbers contains a very small load of sulfur only when entering the downstream carbon entrainment adsorber.

During sewage treatment, a resalification takes place, as a result of which the sulfur mainly exists as low-soluble gypsum in the amount of 0.9 to 1.3 kg/t waste and enters the flue gas scrubbing residue. The waste water discharged to the waste water treatment plant contains 0.13 to 0.17 kg sulfur per t waste only.

Fig. II-17: Cadmium balance of the MSWI Bamberg, values given in g Cd/t waste [Achterbosch]



According to Fig. II-17, the waste supplied contains 10.5 g cadmium/t waste. Of this amount, 2.8 g cadmium/t waste enters the slag, while 7.6 g/t waste is contained in the filter dust. The remaining small cadmium load spreads over the sewage treatment residues (0.16 g/t waste), the discharge to the sewerage (0.003 g/t waste) and the flue gas (0.005 g/t waste) which is passed on to the downstream flue-gas purification systems.

Comparison of these balances with data from other large-scale grate incineration plants demonstrates that the waste input at other sites contains similar amounts of chlorine, sulfur and cadmium. Even the flows of the elements studied in the grate ash and their separation in the respective flue-gas purification systems do not differ considerably from the balances presented above.

III Anhang - Annex

III-1 Vorarbeiten zum Meßprogramm

Für eine genaue Planung des Meßprogramms sind detaillierte Informationen über die Anlage erforderlich, so daß die Gegebenheiten der zu untersuchenden Anlage berücksichtigt werden können. In diesem Abschnitt werden wichtige Punkte in Form einer Checkliste aufgeführt.

- Es müssen Kenntnisse über Besonderheiten am Standort vorliegen, wie z.B. über eine Abgassammelschiene oder besondere Anforderungen in der Genehmigung.
- Zu den weiteren Vorarbeiten gehört eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten und Informationen. Mit Hilfe von Auslegungsdaten, Abnahmemessungen, Jahresbilanzen für Abfallinput, verbrauchten Hilfschemikalien und anderen Informationen können die Größenordnungen der zu erwartenden Meßdaten abgeschätzt werden.
- Die Funktion und Regelung der einzelnen Anlagenteile müssen bekannt sein. In der Rauchgasreinigung werden zum Teil einzelne Anlagenteile diskontinuierlich gefahren oder es gibt komplizierte Kreisläufe, die nur schwierig zu beproben sind.
- Insbesondere für die Stoffbilanzen kommt den einzelnen Massen- und Volumenströmen eine besondere Bedeutung zu. Hier müssen die Dimension und der Bezug, wie z.B. Druck, Temperatur oder Sauerstoffgehalt, genau bekannt sein. Wenn die Daten nicht verfügbar sind und keine Möglichkeit zur Messung besteht, muß das Meßprogramm geändert werden.
- Um die ausgewählten Stoffströme bilanzieren zu können, müssen entsprechende Probenahmestellen vorhanden sein. Nicht alle Probenahmestellen sind problemlos zugänglich. Eine Überprüfung vor Ort mit einer Probenahme als Test ist notwendig.
- Die Bereitstellung von Daten aus dem Prozeßleitsystem muß geklärt werden. Dies gilt z.B. für den Abfallstrom (Waage im Greifer) oder für Temperaturen in der Anlage. Die Möglichkeiten hängen u.a. von der eingesetzten Hard- und Software des Betriebsleitsystems ab.
- Eine sichere Bilanzierung einer Anlage mit einer belastbaren Interpretation gelingt nur, wenn die Proben unter normalen Betriebsbedingungen der thermischen Anlage gezogen worden sind. Besondere Betriebszustände, die zu Veränderungen der einzelnen Stoffströme führen (Rußblasen usw.), sind im Rahmen des Meßprogramms zu berücksichtigen.
- Aufgrund der bisherigen Betriebserfahrungen an der Anlage sind die Bedingungen für Abbruch oder Unterbrechung der Probenahme festzulegen.
- Um einen möglichst einfachen Vergleich der verschiedenen Systeme zu ermöglichen, soll das Meßprogramm eine Blockbildung von Feuerungsteil und Rauchgasreinigung ermöglichen. Damit soll eine spätere Übertragbarkeit auf neuere Verfahren erleichtert werden.

III-2 Planning of the Measurement Program

For the detailed planning of the measurement program, exact information on the plant is required such that special features of the plant to be studied may be taken into account. In the present section, some major aspects shall be listed in the form of a check list.

- Information must be available on special features of the site, such as a range flue gas system or special requirements made in the license.
- The preparatory work also includes a survey of the major data and information. The orders of magnitude of the measurement data expected may be estimated on the basis of design data, acceptance measurements, annual data of the waste input, need of auxiliary chemicals and other information.
- The function and control of the individual plant components must be known. In the flue gas cleaning system, some plant components are operated intermittently. Furthermore, the circuits may be so complicated that sampling is hardly possible.
- The individual mass and volume flows are of particular importance for the material balances to be obtained. In this case, the dimension and reference, such as e.g. the pressure, temperature or oxygen content, must be known. If these data are not available and if there is no possibility to measure them, the measurement program has to be modified.
- To balance the selected material flows, respective sampling points have to be available. Not all sampling points can be accessed easily. Verification on the spot by a sampling as a test appears to be quite reasonable.
- Supply of data from the process control system must be ensured. This applies to the waste flow (scales in the crane) or to the temperatures in the plant. The possibilities among others depend on the hardware and software of the control system used.
- Proper balancing of a plant and a reliable interpretation can only be accomplished when the samples have been taken under normal operating conditions of the thermal plant. Special operating conditions which cause changes of the individual material flows (soot blowing etc.) have to be taken into account by the measurement program.
- Based on the experience already gained from the operation of the plant, the conditions for the termination of sampling have to be specified.
- To facilitate the comparison of different systems, the measurement program is to allow the measurement of the furnace part and the flue gas cleaning system as a block. Thus, later transferability to other thermal processes shall be improved.

III-3 Probenahme

Die Entnahme von Proben aus den verschiedenen Stoffströmen dient zur Bestimmung der Konzentration der ausgewählten Substanzen durch analytische Meßverfahren. Allgemein wird das Ergebnis einer chemischen Analyse wesentlich durch die Probenahme bestimmt. Die Entnahme einer Probe, **repräsentativ für den Stoffstrom**, bildet die Grundlage für eine belastbare Stoffbilanz.

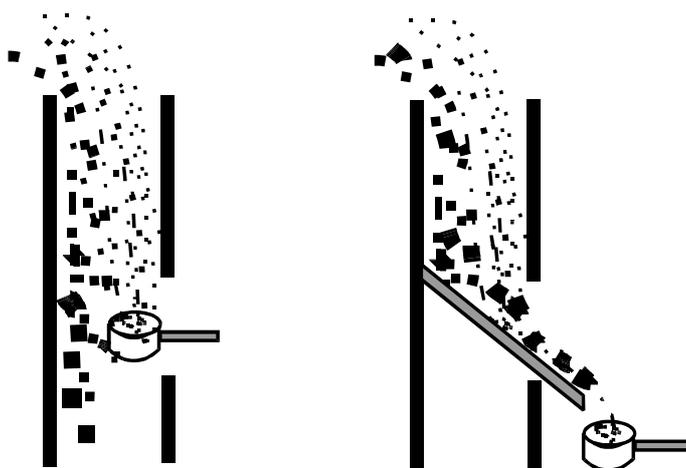
An einer großtechnischen Anlage ist die Entnahme einer repräsentativen Probe aus Gasströmen relativ einfach möglich. Es ist davon auszugehen, daß in den Gasströmungen die einzelnen Komponenten gut durchmischt sind. Um eine Kondensation von Gaskomponenten zu vermeiden, ist nur die Temperatur der Gasströmung zu beachten. Die Analytik der gasförmigen Komponenten wird in der Regel mit handelsüblichen Meßinstrumenten durchgeführt, die eine Konzentrationsmessung über lange Zeiträume ermöglichen.

Bei der Entnahme von Proben aus flüssigen oder festen Stoffströmen, die für die notwendigen Untersuchungen an Rückständen aus der thermischen Behandlung oder der Rauchgasreinigung erforderlich sind, ist die Entnahme einer repräsentativen Probe schwieriger durchzuführen. Umfassende Informationen zu diesem Thema findet man in [IAWG].

Bei der Entnahme von Flüssigkeiten ist die Diffusion und damit der Ausgleich von Konzentrationsveränderungen nicht zu vernachlässigen. Insbesondere bei Feststoffen führen unterschiedliche Dichten, Partikelgrößen und Partikelformen zu einer Entmischung der Feststoffe.

Aufgrund der genannten Feststoffeigenschaften kann eine repräsentative Probe aus Haufwerken kaum erhalten werden. Aus den gleichen Gründen muß bei der Entnahme einer Probe aus Feststoffströmen der gesamte Querschnitt des Stoffstroms erfaßt werden. Die Abbildung III-1 zeigt dazu ein einfaches Beispiel.

Abbildung III-1: Probenahme aus einem Stoffstrom



Die Anordnung auf der linken Seite in Abbildung III-1 führt zu einer Anreicherung der Fein- oder der Grobfraction in der Probe. Nur die rechte Anordnung gewährleistet die Entnahme einer repräsentativen Probe.

Für die Entnahme von Feststoffproben muß auch die Größe des Probennehmers berücksichtigt werden. Die Abmessungen des Probenahmegerätes müssen mindestens 3 mal so groß sein wie die Abmessungen der größten Teile in der Probe.

Bei festen Stoffströmen hängt die Menge der Probe von der Homogenität oder genauer von der Partikelgrößenverteilung ab. Näherungsweise läßt sich die minimale Probenmenge nach der folgenden Formel berechnen [LAGA]:

$$P \text{ [kg]} = 0,06 d \text{ [mm]}$$

In dieser Formel beschreibt P die minimale Probenmasse und d den Durchmesser der größten Partikel.

Im Rahmen der Probenahme ist außerdem darauf zu achten, daß für alle weiteren Untersuchungen eine ausreichende Menge an Probenmaterial zur Verfügung steht. Die Probenmenge wird von den durchzuführenden Analysen, insbesondere von vorgesehenen Untersuchungen zu den Reststoffeigenschaften bestimmt. Die Mengen müssen vor der Durchführung des Meßprogramms mit den beteiligten Laboratorien abgesprochen werden.

Für die Analytik der Feststoffe müssen zur Konzentrationsbestimmung teilweise unterschiedliche Analysenverfahren angewendet werden. Die Teilung der Proben muß die gleichen Anforderungen erfüllen wie die Probenahme und muß mit geeigneten Werkzeugen durchgeführt werden. Nähere Angaben dazu enthält z.B. [DIN EN 932-1]

Außerdem ist zu beachten, daß sich die Probe nach der Entnahme auf verschiedene Weise verändern kann. Dies gilt z.B. für die Feuchte von Rückständen aus der thermischen Behandlung. Außerdem besitzen die Rückstände zum Teil hygroskopische Eigenschaften. Für bestimmte Fragestellungen ist folglich eine Analyse vor Ort erforderlich. Ferner dürfen während der Probenahme keine flüchtigen Verbindungen entweichen.

III-4 Sampling

Sampling from various material flows serves for the determination of the concentration of the substances selected using analytical measurement processes. Generally, the result of a chemical analysis is strongly determined by sampling. The taking of a sample which is representative for the entire material flow represents the basis of reliable balancing.

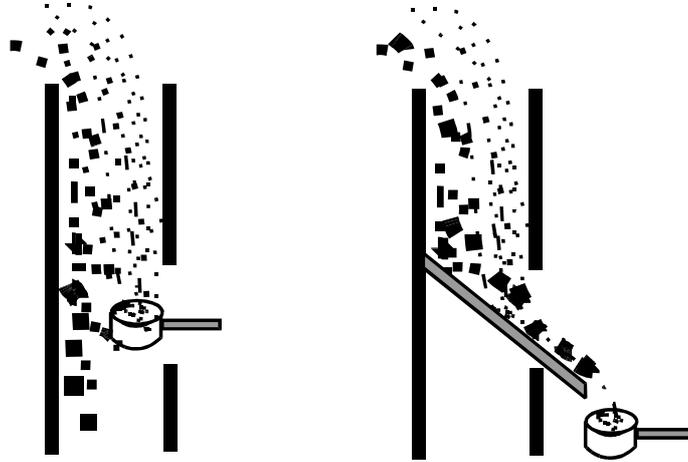
In a technical scale plant, the taking of a representative sample from gas flows is relatively easy. It must be assumed that the individual components are well mixed in the gas flows. To avoid a condensation of the gas components, the temperature of the gas flows must be observed. Analysis of the gaseous components is usually accomplished by means of commercially available measurement instruments that allow a concentration measurement over a long term. Sampling of gases with high dust loads require an isokinetic sampling device.

Sampling from liquid or solid material flows, which is required for the investigations of residues from the thermal treatment or the flue gas cleaning system, is much more difficult. Detailed information can be obtained from [IAWG].

When sampling liquids, the diffusion and, hence, the compensation of concentration changes must not be neglected. Especially as far as solids are concerned, varying densities, particle sizes and particle forms cause a demixing of the solids.

Due to the solid properties mentioned above, beds can hardly be sampled representatively. For the same reasons, sampling from solid flows has to cover the entire cross-section of the flow. This is illustrated by a simple example in Fig. III-1.

Fig. III-1: Sampling from a material flow



The setup on the left of Fig. III-1 causes the fine or the coarse fraction to be enriched in the sample. Only the setup shown on the right ensures representative sampling.

When taking solid samples, the size of the sampling unit has to be taken into account. The dimensions of the sampling unit have to be at least three times as large as the dimensions of the largest parts of the sample.

In case of solid material flows, the amount of the sample depends on the homogeneity or, to be more exact, on the particle size distribution. The minimum sample amount can be calculated approximately using the following formula [LAGA]:

$$P \text{ [kg]} = 0.06 d \text{ [mm]}$$

In this formula, P denotes the minimum sample amount and d the diameter of the largest particles.

During sampling, particular attention must be paid to a sufficient amount of sample material being available for all subsequent investigations. The sample amount is determined by the analysis to be performed and in particular by the investigations planned to be carried out with regard to the residue properties. The amounts have to be agreed upon with all laboratories prior to the performance of the measurement program.

When analyzing the solids, determination of the concentration is partly done by various analytical methods. Division of the samples has to fulfill the same requirements as sampling and suitable tools have to be used. For further information, see e.g. [DIN EN 932-1].

In addition, it must be borne in the mind that the sample may change in various ways after sampling. This applies e.g. to the humidity of the thermal treatment residues. Furthermore, the residues partly possess hygroscopic properties. For certain tasks, an immediate in situ analysis is required. Release of volatile compounds during sampling must be avoided.

III-5 Analytik und Bericht

Die an der Anlage entnommenen Proben müssen vor der chemischen Analyse aufbereitet werden. Zu der Aufbereitung gehört z.B. eine Vorsortierung oder Zerkleinerung der Feststoffe. Darüber hinaus ist der Transport der Proben zu den Laboratorien zu organisieren. Auch die Lagerung bis zur Analyse bedarf teilweise besonderer Vorkehrungen um Veränderungen zu verhindern (z.B. Verflüchtigung von Quecksilber). Hier ist im Rahmen der Vorbereitung für das Meßprogramm zu klären, wer diese Aufgaben übernimmt.

Aus den bisherigen Überlegungen lassen sich drei Teilbereiche für eine untersuchte Anlage sinnvoll zusammenfassen. Diese Aufteilung und die Inhalte enthält Tabelle III-1.

Tabelle III-1: Inhalt der Berichte für eine Anlage

Bericht Probenahme	Alle Informationen zu der Anlage Geplantes Meßprogramm Durchgeführtes Meßprogramm Alle Angabe zu Massen-/Volumenströmen Protokoll über Störungen
Bericht Analytik	Vorbehandlung der Proben Aufschluß der Proben Angewendete Meßverfahren Ergebnisse der einzelnen Analysen Informationen zu Fehlerbereichen
Bericht Bilanz	Bericht "Probenahme" Bericht "Analytik" Stoff- und Energiebilanz der Anlage Modulartiger Aufbau der Bilanzen

Der eigentliche Vergleich der unterschiedlichen Anlagen zur thermischen Behandlung von Abfällen ergibt sich aus der Auswertung der Berichte "Bilanz", die über jede Anlage erstellt werden.

III-6 Analysis and Report

Prior to chemical analysis, the samples taken from the plant have to be processed. Processing includes e.g. the sorting or crushing of solids. Furthermore, transport of the samples to the laboratories has to be organized. The sample storage requires special precaution to avoid alteration to the samples (vaporization of mercury). When preparing the measurement program, it must be clarified, who is in charge for each task.

Three reports may be distinguished for a plant. The respective contents are obvious from Table III-1.

Table III-1: Contents of the reports for a plant

Report on sampling	All information on the plant Planned measurement program Measurement program performed All information on mass/volume flows Listing of plant disturbances
Report on analysis	Pretreatment methods Digestion methods Measurement methods applied Results of the individual analyses Information on the disturbances
Report on balancing	Report "Sampling" Report "Analysis" Material and energy balancing of the plant Modular setup of the balances

The actual comparison of the individual plants for the thermal treatment of wastes results from the evaluation of the "balancing" reports which are issued for every plant.

III-7 Gesetze Richtlinien Normen Laws, Regulations and Standards

III-7.1 Allgemeine Bemerkungen

Die thermische Behandlung von Abfällen wird in der Bundesrepublik Deutschland und anderen europäischen Staaten durch Gesetze, Richtlinien und Normen geregelt. Die nationalen Vorgaben werden außerdem durch die Europäische Gemeinschaft beeinflusst, deren Richtlinien von den Mitgliedsstaaten umgesetzt werden müssen.

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Vorschriften von ausgewählten Staaten zusammengestellt. Dabei werden auch Richtlinien der EU, Normen und Merkblätter berücksichtigt. Eine vollständige Auflistung ist aufgrund der großen Anzahl von Gesetzen, Richtlinien und Normen nicht möglich. In Hinblick auf die Vollständigkeit ist zu beachten, daß nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland auch die Bundesländer eine Kompetenz zur Gesetzgebung im Abfallbereich haben. Die Vorschriften der Länder werden nicht gesondert aufgeführt.

Die Vorgaben der EU-Richtlinien für die thermische Behandlung von Abfällen orientieren sich an den Grenzwerten der deutschen 17. BImSchV. In anderen europäischen Staaten liegen die vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte zum Teil im Bereich der Vorgaben der 17. BImSchV. Ein Vergleich von Grenzwerten für verschiedene Staaten zeigt die Tabelle III-2.

Außerdem ist ein Trend zu neuen Regelungen bei der Ablagerung von Abfällen zu erkennen. Auf der Basis von EU-Richtlinien wurden in einigen Staaten zur besseren Charakterisierung von Abfallstoffen neue Normen für die Elution aufgestellt. In Österreich existiert eine Deponieverordnung, bei deren Ablagerungskriterien der TOC-Gehalt im Mittelpunkt steht.

Tabelle III-2: Grenzwerte für die thermische Abfallbehandlung [Sakai], [Vehlow]

Schadstoff	Deutschland (1991)	Niederlande	Österreich (1991)	EU (94/67/EEC) Sonderabfall	EU-Entwurf (1998) Hausmüll	Japan (1995)
Staub [mg/Nm ³]	10	5	15	10	10	10-50
SO ₂ [mg/Nm ³]	50	40	50	50	50	10-30
NO _x [mg/Nm ³]	200	70	100	-	200	30-125
HCl [mg/Nm ³]	10	10	10	10	10	15-50
HF [mg/Nm ³]	1	1	0,7	1	1	-
CO [mg/Nm ³]	50	50	-	100	50	50
HC [mg/Nm ³]	10	10	-	20	10	
Dioxine [ng/Nm ³]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5

III-7.2 General remarks

In the Federal Republic of Germany and other European countries, thermal treatment of wastes is governed by laws, regulations and standards. In addition, the national requirements are influenced by the European Community regulations which have to be implemented by the member states.

The present section gives a survey of the regulations existing in selected countries. In addition, regulations of the EU, standards and guidelines are taken into account. A complete list cannot be given due to the large number of laws, regulations and standards. As far as completeness is concerned, it must be noticed that not only in Germany the federal government but also federal states have a competence to issue regulations in the field of waste management. The regulations of the states are not indicated separately.

The requirements made by the EU for the thermal treatment of wastes are based on the emission limits of the German 17th BImSchV (Federal Immission Control Ordinance). In other European countries, the emission limits adopted are partly found to be in the range of those indicated in the 17th BImSchV. The emission limits of various countries are compared in Table 9.

Furthermore, a tendency towards the adoption of new regulations governing the disposal of wastes can be noticed. Based on the EU regulations, new elution standards were specified in some countries for a better characterization of the waste materials. In Austria, a Waste Disposal Ordinance exists, according to which the TOC content is the major waste disposal criterion.

Table III-2: Emission limits for the thermal waste treatment [Sakai], [Vehlow]

Schadstoff	Deutschland (1991)	Niederlande	Österreich (1991)	EU (94/67/EEC) Sonderabfall	EU-Entwurf (1998) Hausmüll	Japan (1995)
Staub [mg/Nm ³]	10	5	15	10	10	10-50
SO ₂ [mg/Nm ³]	50	40	50	50	50	10-30
NO _x [mg/Nm ³]	200	70	100	-	200	30-125
HCl [mg/Nm ³]	10	10	10	10	10	15-50
HF [mg/Nm ³]	1	1	0,7	1	1	-
CO [mg/Nm ³]	50	50	-	100	50	50
HC [mg/Nm ³]	10	10	-	20	10	
Dioxine [ng/Nm ³]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5

III-7.3 Bundesrepublik Deutschland

III-7.3.1 Gesetze und Verordnungen

- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. (Kreislaufwirtschaftsgesetz).
- Verordnungen zum Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/ AbfG).
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge.
- Siebzehnte Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (17. BImSchV), Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe.
- Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. (TA Luft).
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts.
- Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. (TA Siedlungsabfall).

III-7.3.2 Schriften der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)

- "Bestimmung des Cyanids in Abfällen". (Stand 12/83), CN 2/79 [MH 1858].
- "Grundregeln für die Entnahme von Proben aus Abfällen und abgelagerten Stoffen". (Stand 12/83), PN 2/78 K [MH 1859].
- "Bestimmung von Schwermetallen in festen und schlammigen Abfällen". (Stand 12/83), SM 2/79 [MH 1861].
- "Darstellung von Untersuchungsergebnissen aus der Untersuchung von Abfällen". UP 2/80 [MH 1862].
- "Bestimmung leicht verdampfbarer organischer Lösungsmittel in Abfällen". (Stand 4/1986), LM/84 [MH 1863].
- "Bestimmung der Ausbrandgüte von festen Rückstände aus der thermischen Behandlung von Abfällen". (Stand 4/86), AGR/84 [MH 1864].
- "Bestimmung des Gehaltes an Kohlenwasserstoffen in Abfällen". (Stand 13.3.93), KW/85 [MH 1867].
- Technische Regeln, "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Rückständen/Abfällen".
- Merkblatt, "Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle". 1. März 1994 [MH 7055].

III-7.3.3 Schriften der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV)

- "Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau. Teil: Müllverbrennungasche (MV Asche)" Ausgabe 1986 [MH 8667].
- "Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau TP Min-StB, Teil 2,3,1/2: Probenvorbereitung von Kies, Schotter, Splitt und Sand". Köln 1993.

- "Richtlinie für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau (RG Min-StB 93) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen". Köln 1993.
- "Technische Lieferbedingungen für Hausmüllverbrennungssasche im Straßenbau (TL HMVA-StB)". Köln Entwurf 1995.

III-7.3.4 Sonstige Merkblätter

- Hessische Landesanstalt für Umwelt: "Merkblatt über die Verwertung von Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen". Mai 1988 [MH 7056].
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: LWA Merkblatt 12. "Parameter und Analyseverfahren bei Abfall- und Altlastenuntersuchungen". Dezember 1992.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: LUA Materialie 42. "Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen". 1997.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: LUA Materialie 26. "Normierung und Konventionen in der Abfallanalytik - Aufgaben und Ziele". 1996.
- Abwassertechnische Vereinigung: ATV A 301. "Klärschlammeinbau in Deponien; Gemeinsame Ablagerung von Klärschlamm und Siedlungsabfällen". Oktober 1989.

III-7.3.5 Normen

- DIN 38406: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Kationen Gruppe E, Bestimmung des Quecksilbers (E12). Juli 1980.
- DIN 38414: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4). Oktober 1984.
- DIN 51700: Prüfung fester Brennstoffe; Allgemeines und Übersicht über Untersuchungsverfahren.
- DIN 51701: Prüfung fester Brennstoffe; Probenahme und Probeaufarbeitung von körnigen Brennstoffen.
- DIN 51705: Prüfung fester Brennstoffe; Bestimmung der Schüttdichte. August 1979.
- DIN 51730: Prüfung fester Brennstoffe; Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens. Mai 1984.
- DIN 38412-15: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L); Bestimmung der Wirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Fische, Fischtest (L 15). Juni 1982.
- DIN 38412-20: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L); Bestimmung der Giftwirkung von Abwässern auf Fische, Fischtest (L 20). Dezember 1980.
- DIN EN 634: Zellstoff, Papier und Pappe - Europäische Altpapier-Standardsorten-Liste; Deutsche Fassung EN 643:1994. August 1994.
- DIN EN 932-1: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen. November 1996.

- DIN EN 12457: Charakterisierung von Abfällen durch Auslaugung - Eluierung - Deklarationstest für die Auslaugung von körnigem Abfall - Bestimmung der ausgelaugten Bestandteile körniger Abfälle und Schlämme. Deutsche Fassung prEN 12457:1996. Oktober 1996.
- DIN EN 12506: Charakterisierung von Abfällen -Chemische Analyse von Eluaten - Bestimmung von pH, As, Cd, Cr VI, Cu, Ni, Pb, Cl⁻, NO₂, SO₄. Deutsche Fassung prEN 12506:1996.
- DIN V ENV 12920: Charakterisierung von Abfall - Methologie zur Bestimmung des Auslaugverhaltens von Abfall unter festgelegten Bedingungen. Deutsche Fassung ENV 1290:1997.
- VDI 2590: Emissionsminderung - Anlagen zur Verwertung und Beseitigung von Tierkörpern, Tierkörperteilen und tierischen Erzeugnissen. Dezember 1996.
- VDI 2301: Emissionsminderung; Verbrennen von Abfällen aus Krankenhäusern und sonstigen Einrichtungen. Januar 1993.

III-7.4 Österreich

- Abfallwirtschaftsgesetz AWG.
- Deponieverordnung (April 1996).
- Luftreinhaltegesetz.
- Luftreinhalteverordnung.
- ÖNORM S 2000: Abfall - Benennungen und Definitionen, 1. Oktober 1992.
- ÖNORM S 2001: Abfallwirtschaft - Benennungen und Definitionen, 1. Juli 1992.
- ÖNORM S 2005: Abfallwirtschaft - Deponie - Benennungen mit Definitionen, 1. Oktober 1997.
- ÖNORM S 2072: Eluatklassen, (Gefährdungspotential von Abfällen), 1. Dezember 1990.
- ÖNORM S 2075: Deponien, Zuordnung von Abfällen.
- ÖNORM S 2108: Zuordnung von Abfällen zur thermischen Behandlung, 1. Januar 1995.
- ÖNORM S 2110: Analytische Beurteilung von Abfällen, 1. Oktober 1991.
- ÖNORM S 2111: Probenahme von Abfällen, 1. Juni 1993.
- ÖNORM S 2113: Herstellung eines Schnelleluates zur Untersuchung von Abfällen, 1. Januar 1997.
- ÖNORM S 2115: Bestimmung der Eluierbarkeit von Abfällen mit Wasser, 1. Juli 1997.
- ÖNORM S 2116 Teil 1: Untersuchung verfestigter Abfälle, 1. Januar 1998.

III-7.5 Niederlande

- NVN 5860: Waste; Sampling of waste. Vornorm Februar 1996.
- NVN 5870: Waste; Determination of Waste; Sample pretreatment for determination of organic and inorganic parameters in waste. Vornorm April 1995.
- NEN 5880: Waste and waste disposal; General terms and definitions. November 1997.

- NEN 5883: Waste and waste disposal; Terms and Definitions for specific hospital waste. August 1990.
- NEN 5884: Waste and waste disposal; Terms and Definitions for waste from building and demolition processes. Oktober 1993.
- NVN 7300: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Sampling; General instructions. April 1997.
- NVN 7301: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Sampling; Sampling of granular materials from streams. April 1997.
- NVN 7310: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Sample Pretreatment; General instructions. Juni 1995.
- NVN 7320: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Analysis of inorganic components; General instructions. März 1997.
- NVN 7340: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Leaching tests; General instructions. Februar 1992.
- NVN 7341: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Leaching tests; Determination of the availability of inorganic components for leaching. Januar 1995.
- NVN 7343: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Leaching tests; Determination of the leaching of inorganic components from granular materials with the column test. Januar 1995.
- NVN 7345: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Leaching tests; Determination of the leaching of inorganic components from buildings and monolithic waste materials with the diffusion test. März 1995.
- NVN 7345: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials; Leaching tests; Determination of the leaching of inorganic components from granular materials with the cascade test. Februar 1995.

III-7.6 Europäische Gemeinschaft

- Richtlinie 75/442/EWG: Richtlinie des Rates über Abfälle (Rahmenrichtlinie).
- Richtlinie 89/369/EWG: Richtlinie der Rates vom 8. Juni 1989 über die Verhütung der Luftverunreinigung durch neue Verbrennungsanlagen für Siedlungsmüll.
- Richtlinie 89/429/EWG: Richtlinie des Rates vom 21. Juni 1989 über die Verringerung der Luftverunreinigung durch bestehende Verbrennungsanlagen für Siedlungsmüll.
- Verordnung 93/259/EWG: Verordnung zur Überwachung und Kontrolle der Verbringung von Abfällen in der, in die und aus der Europäischen Gemeinschaft.
- Richtlinie 94/67/EG: Richtlinie des Rates vom 16. Dezember 1994 über die Verbrennung gefährlicher Abfälle. Gültig ab 31. Dezember 1994. Die Richtlinie ist bis zum 31. Dezember 1996 in nationales Recht umzusetzen. Einschränkung des Geltungsbereiches in Artikel 2.
- Richtlinie 96/59/EG: Richtlinie des Rates vom 16. September 1996 über die Beseitigung polychlorierter Biphenyle und polychlorierter Terphenyle (BCB/PCT).

- Entscheidung der Kommission vom 21. April 1997 über harmonisierte Maßnahmen für die Festlegung der Massenkonzentration von Dioxinen und Furanen in den Emissionen gemäß Artikel 7 Absatz 2 der Richtlinie 94/67/EG über die Verbrennung gefährlicher Abfälle.

III-7.7 Schweiz

- Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG). Oktober 1983.
- Technische Verordnung über Abfälle (TVA). Dezember 1990.
- Luftreinhalte-Verordnung (LRV). 16. Dezember 1985, letzte Änderung: Januar 1992.
- Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV). Oktober 1988.
- Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (StoV). Juni 1986.

III-8 Literatur - Literature

- [ABB] Firmenprospekt ABB: "Müllheizkraftwerk Bamberg mit Klärschlammverbrennung".
- [Achternbosch] Achternbosch, M.; Richers, U.: "Stoffstromanalysen zur abwasserfreien und abwassererzeugenden Verfahrenskonzeption von "nassen" Rauchgasreinigungssystemen". Forschungszentrum Karlsruhe. Wissenschaftliche Berichte. FZKA 5773. Mai 1996.
- [ARGE] Arbeitsgemeinschaft Restmüllbehandlung Hessen (ITU GmbH, Öko-Institut e.V.): "Systemvergleich Restabfallbehandlung. Vergleichende Untersuchung zu den Umweltauswirkungen unterschiedlicher Verfahren der Restabfallbehandlung. Erstellt im Auftrag der Hessischen Landesanstalt für Umwelt. Dieburg/Darmstadt, Februar 1994.
- [AVG] Abfall- und Verwertungsgesellschaft Köln mbH: "Die Restmüllverbrennungsanlage Köln". Firmenschrift August 1995.
- [Babcock] Firmenprospekt der Deutschen Babcock Anlagen GmbH Krefeld.
- [Barin] Barin, I.; Igelbüscher, A.; Zenz, F.-R.: "Thermodynamische Modelle zur Analyse der Verfahren für die thermische Entsorgung von Müll". Chem.-Ing.-Tech. 58 (1996) Heft 12. S. 1562-1571.
- [Becker] Becker, J.; Schumacher, W.: "Überblick über die thermische Abfallverwertung". Vortragsveranstaltung vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz. "Moderne thermische Abfallverwertung". Wackersdorf, 8. Febr. 1994.
- [Berwein-1] Berwein, H.J.; Kanczarek, A.: "Müllentsorgung mit einer Schwel-Brenn-Anlage." Brennstoff Wärme Kraft 42 (1990) Nr. 10, S. r26-r36.
- [Berwein-2] Berwein, H.J. und Erlecke, J.: "Einsatzmöglichkeiten der Verschwelung als Homogenisierungsstufe in der thermischen Abfallverwertung". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Müllverbrennung und Umwelt 4". EF-Verlag Berlin 1990.
- [Bierbaum] Bierbaum, K.; Greif, H.G.: "Mitverbrennung von Produktionsrückständen und Klärschlamm in Braunkohlekesselanlagen". Brennstoff Wärme Kraft 48 (1996) Nr. 10, S. 20-26 (Spezialteil).

-
- [Brunner] Brunner, M.; Rosenast, B.:
"Eisen im Feuer".
Müllmagazin (1997) Heft 3 S. 67-69.
- [Buttker] Buttker, B.:
"Die Rückstandvergasung in der Energiewerke Schwarze Pumpe mit
den Verfahren Festbettdruckvergasung und Flugstromvergasung".
In: Thomé-Kozmiensky, K.J.:
"Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung."
EF-Verlag Berlin 1993.
- [Capitaine] Capitaine, P.; Engweiler, J.:
"Von Roll RCP-Verfahren. Erste Erfahrungen".
Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft. Technische
Universität München. Heft 137. 1998. 3. Fachtagung. "Thermische
Abfallbehandlung". Garching, 9.-11. Februar 1998.
- [DIN EN 932-1] Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen.
Teil 1: Probenahmeverfahren. November 1996.
- [Engweiler] Engweiler, J.:
"Von Roll RCP: Die vereinfachte Rauchgasreinigung und erste
Erfahrungen mit der Anlage in Bremerhaven". VDI Bildungswerk.
Seminar 43-59-09. "Primär- und Sekundärseitige Dioxin-/
Gesamtemissions-Minderungstechniken".
München, 18.-19. Sept. 1997.
- [Haltinger] Haltinger, E.W.:
"Energie aus Abfall: system- oder nutzungsabhängig ?".
Abfallwirtschaftsjournal 8 (1997) Heft 3 S. 29-31.
- [Horch] Horch, K.:
"Wege zur Minimierung der Kosten der thermischen
Abfallbehandlung". in: VDI (Hg.): "Thermische Abfallentsorgung:
Konzepte, Kosten, Verfahren". VDI Berichte 1192. S. 99-114. Tagung
in Veitshöchheim, 27.-28. Juni 1995, VDI Verlag Düsseldorf 1995.
- [IAWG] The International Ash Working Group
Chandler, A.J.; Eighmy, T.T.; Hartlén, J.; Hjelmar, O.; Kosson, D.S.
Sawell, S.E.; van der Sloot, H.A.; Vehlow, J.:
"Municipal Solid Waste Incinerator Residues".
Elsevier Science B.V. Amsterdam, 1997.
- [Johnke] Johnke, B.:
"Entwicklungstendenzen bei der thermischen Behandlung
von Abfällen". UTECH, Berlin 1996.

-
- [LAGA] "Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen und chemischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Beseitigung von Abfällen. PN 2/78 K - Grundregeln für die Entnahme von Proben aus Abfällen und abgelagerten Stoffen". Stand 12/83. Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA).
- [MH 0000] Müll-Handbuch. Erich Schmidt Verlag Berlin.
Die vierstellige Zahl beschreibt die Abschnittsnummer.
- [Morf] Morf, L.; Ritter, E.; Brunner, P.H.: "Güter- und Stoffbilanz der MVA Wels". Schulungsreihe für Steirische Abfallberaterinnen "Restabfall in der Steiermark". Teil 4. Restabfallbehandlung Thermische Verfahren. Graz, 3. April 1998.
- [Noell] Firmenschrift der Fa. Noell. "Das Noell-Konversionsverfahren". 1994.
- [Nottrodt] Nottrodt, A.:
"Rostfeuerung oder neue thermische Verfahren - Vergleich zur Restabfallbehandlung auf dem Standort Rugenberger Damm in Hamburg". Abfallwirtschaftsjournal 7 (1995) S.291 ff.
- [Reimann-1] Reimann, D.O.: "Aufteilung von Schadstoffen und Schwermetallen auf die feste und gasförmige Phase". VDI Bildungswerk. Seminar 43-59-06. München, 15.-16. September 1994.
- [Reimann-2] Reimann, D.O., persönliche Mitteilungen.
- [Richers] Richers, U.; Bergfeldt, B.: "Das Siemens Schwel-Brenn-Verfahren". Forschungszentrum Karlsruhe. Wissenschaftliche Berichte. FZKA 5826. November 1996.
- [Sakai] Sakai, S.; Sawell, E.; Chandler, A.J.; Eighmy, T.T.; Kosson, D.S.; Vehlow, J.; v.d.Sloot; H.A.; Hartlén, J.; Hjelmar, O.:
"World Trends in Municipal Solid Waste Management". Waste Management 16 (1996) Nos 5/6 p. 341-350.
- [Schachermayer] Schachermayer E., Bauer G., Ritter E., et al.: "Messung der Güter- und Stoffbilanzen einer Müllverbrennungsanlage". Umweltbundesamt Wien. Monographien; Band 56. März 1995.
- [Schingnitz] Schingnitz, M.; Fritz, P.:
"Integration von Abfall- und Energiewirtschaft durch Anwendung des Noell-Konversionsverfahren".
Chem.-Ing.-Tech. 69 (1997) Heft 6 S. 820-824.
- [Schrickel] Schrickel, J.; Wolf, T.P.; Dröscher, F.; Fleischhauer, M.:
"Umweltverträglichkeitsprüfung im Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz für eine thermische Müllbehandlungsanlage.
VGB Kraftwerkstechnik 78 (1998) Heft 3 S. 86-99.

- [Seifert] Seifert, W.; Buttker, B.:
"Brenn- und Synthesegas aus Abfall".
Umwelt 28 (1998) Heft 10 S. S14-S18.
- [Stahlberg] Stahlberg, R.; Feuerriegel, U.:
"Thermoselect - Energie- und Rohstoffgewinnung".
In: Häßler, G.: "Thermoselect - Der neue Weg, Restmüll
umweltgerecht zu behandeln". Verlag Karl Goerner 1995.
- [SVZ] Firmenschrift. Sekundärrohstoffzentrum-Verwertungszentrum
Schwarze Pumpe GmbH. "Wir schließen den Kreis".
- [TASi] Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung, und sonstigen
Entsorgung von Siedlungsabfällen. Dritte Allgemeine
Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. (TA Siedlungsabfall) 1993.
- [Tauber] Tauber, C.:
"Thermische Restmüllbehandlung heute".
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 45 (1995) Heft 6 S: 378-385.
- [Thomé-Kozmiensky] Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Thermische Abfallbehandlung".
EF-Verlag Berlin 1994.
- [Vehlow] Vehlow, J.:
"Thermal Treatment of Waste in Europe - Regulatory Framework and
Implemented Technology".
1st National Congress. "Valorization and Recycling of Industrial
Wastes". L'Aquila, 7.-10 Juli 1997.
- [Von Roll] Firmenschrift der Fa. Von Roll Umwelttechnik AG
"Abfälle thermisch verwerten. Wir kümmern uns darum".
- [Wiegandt] Wiegandt, H.:
"Rauchgasreinigung für Wirbelschichtverbrennungsanlagen am
Beispiel der zur Zeit in Bau befindlichen Anlagen in
Berlin-Ruhleben". Abfallwirtschaftsjournal 6 (1994) Heft 1, S. 44-45.