DE01GE080

Optimierte Nutzung bestehender Abfallverbrennungsanlagen durch Errichtung vorgeschalteter Reaktoren zur Behandlung heizwertreicher Abfälle

- HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen -

vom Fachbereich 13 - Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor der Ingenieurwissenschaften genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Mamoun El Labani
aus Darmstadt

Darmstadt
September 2000

El-Labani, Mamoun:

Optimierte Nutzung bestehender Abfallverbrennungsanlagen durch Errichtung vorgeschalteter Reaktoren zur Behandlung heizwertreicher Abfälle/Verein zur Förderung des Instituts *WAR* -Wasserversorgung · Abwassertechnik · Abfalltechnik · Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. -*WAR*-.

Darmstadt, Techn. Universität, Diss., 2000

Darmstadt: Eigenverlag, 2000

(Schriftenreihe *WAR* 125)

ISSN-Nr.: 0721/5282
ISBN-Nr.: 3-923518-20-9

Berichterstatter: Professor Dr. rer. nat. Johannes Jager
Mitberichterstatter: Professor Dr.-Ing. Manfred J. Hampe

Tag der Einreichung: 12.01.2000
Tag der mündlichen Prüfung: 04.05.2000

Alle Rechte vorbehalten. Wiedergabe nur mit Genehmigung des Vereins zur Förderung des Instituts *WAR* -Wasserversorgung · Abwassertechnik · Abfalltechnik · Umwelt- und Raumplanung- der Technischen Universität e.V., Wachtelweg 77, D-64291 Darmstadt.

Herstellung: Media World 2000 GmbH, 64846 Groß-Zimmern

Vertrieb: Bibliothek des Instituts *WAR*
Wasserversorgung · Abwassertechnik · Abfalltechnik · Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt,
Petersenstraße 13, D-64287 Darmstadt.

Telefon: 06151 / 16 3659, 16 3648, 16 2448
Telefax: 06151 / 16 3758, 16 3739

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

Meinem Vater

Dr. med. Nour El Labani

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut ***WAR*** (WASSERVERSORGUNG, ABWASSERTECHNIK, ABFALLTECHNIK, UMWELT- UND RAUMPLANUNG) der Technischen Universität Darmstadt in enger interdisziplinärer Kooperation mit dem Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Thermische Verfahrenstechnik.

Die Idee der Errichtung von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen als Lösungsansatz entstand, nachdem ich durch die Mitwirkung an zahlreichen Industrie- und Forschungsprojekten im In- als auch im Ausland die Chance hatte, die konzeptionellen sowie auch die betrieblichen Spezifika thermischer Abfallbehandlungsanlagen aus einer umfassenden Sichtweise kennenzulernen. Besonders die gewonnenen Erkenntnisse während der Meßkampagnen am Müllheizkraftwerk Darmstadt des Zweckverbandes Abfallverwertung Südhessen (ZAS) und an der Sonderabfallverbrennungsanlage der Hessischen Industriemüll GmbH (HIM) in Biebesheim waren von Bedeutung.

Mein besonderer Dank gilt meinem Referenten, Herrn Prof. Dr. Johannes Jager, für die fachliche Betreuung und stets uneingeschränkte Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen, die konstruktiven Diskussionen und die Herausforderungen, Erfahrungen und Chancen, welche sich im Rahmen dieser Zusammenarbeit ergaben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred J. Hampe danke ich für die Übernahme des Co-Referat und die großzügige Nutzungsmöglichkeit des Simulationprogramms AspenPlus™ an seinem Lehrstuhl zur Durchführung meiner Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Bruder Raef El Labani, der sich viel Zeit für Diskussionen und konstruktive Kritik an der Arbeit genommen hat. Den ehemaligen Diplomanden und wissenschaftlichen Hilfskräften Wolfgang Eisenhart, Stefan Grimm und Bernhard Goldstein danke ich für die hervorragende Unterstützung. Ohne deren zuverlässigen und unermüdlichen Einsatz wäre die Arbeit nicht in überschaubarer Zeit möglich gewesen. Für die Endkorrekturen bedanke ich mich ganz herzlich bei Gabriele Tröger.

Für das außerordentlich angenehme und kollegiale Institutsklima möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts WAR bedanken. Ein herzlicher Dank gilt meinen Kollegen der Fachgruppe „Abfalltechnik". Hervorheben möchte ich Karin Mohr und Christian Herr, welche jederzeit für kritische und fachliche Diskussionen zur Verfügung standen und mit dem unkonventionellen Informationsaustausch zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. Für die stets freundschaftliche und offene Zusammenarbeit möchte ich auch Maike Hora, Elke Schwing, Ralph Hunklinger, Thomas Ludwig und Harald Danhamer danken. Ein ganz besonderer Dank gilt dabei Aysen Cevik für ihre tatkräftige Unterstützung in jeder Hinsicht.

Für die freundliche Aufnahme und Unterstützung möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Fachgebietes Thermische Verfahrenstechnik bedanken. Besonders bedanken möchte ich mich bei Marcus Grün, der sich viel Zeit für die Einweisung in das Programm AspenPlus™ und für die darauffolgenden Diskussionen genommen hat.

Den Mitarbeitern des MHKW Darmstadt danke ich für die gute Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Mielke für die hilfreichen fachlichen Diskussionen und die zahlreichen Informationen, die er stets zur Verfügung stellte.

Meiner Familie danke ich für ihr Verständnis und die moralische Unterstützung, die mir die nötige Kraft zur Durchführung dieser Arbeit gegeben haben.

Darmstadt, im September 2000 *Mamoun El Labani*

Abfallverbrennungsanlagen basieren auf dem Verfahren der thermischen Abfallbehandlung; das ist die Energieerzeugung aus der kontrollierten Umwandlung organischer, reaktionsfähiger Restabfälle. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben mußten bestehende Abfallverbrennungsanlagen nachträglich um leistungsfähige Rauchgasreinigungssysteme ergänzt werden. Dies führte zu einem erheblichen Anstieg der Kosten und Behandlungsgebühren mit dem entsprechenden Druck zur optimierten Nutzung.

Zusätzliche Behandlungskapazitäten werden benötigt für heizwertreiche Abfälle. Sie können zwar in konventionellen Abfallverbrennungsanlagen für Hausmüll behandelt werden, bedingen aber aufgrund des höheren Heizwertes eine Durchsatzreduzierung was die Kostensituation weiter negativ beeinflußt. Daher favorisieren aktuelle Konzepte die Behandlung heizwertreicher Abfälle in spezifischen, dezentralen Anlagen. Die üblicherweise kleinen Anlagen gehen einher mit hohen Nebenkosten der Errichtung.

Zur Abschätzung des Optimierungspotentials bestehender Abfallverbrennungsanlagen wurde deren Auslastungssituation untersucht. Bei umfangreichen Meßkampagnen am MHKW Darmstadt konnte selbst bei 100% iger Auslastung der Verbrennungseinheit in der Rauchgasreinigungsanlage eine Lücke aufgezeigt werden, die durch eine entsprechend angepaßte Vorschaltanlage aufgefüllt werden könnte. Eine solche Vorschaltanlage definiert zusammen mit der bestehenden Abfallverbrennungsanlage eine HYBRID-Abfallbehandlungsanlage. Die Bereitstellung eines Instrumentariums zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Konzeption solcher Anlagen ist Gegenstand dieser Arbeit.

Das Instrument baut auf zwei Säulen auf: 1) Prozeßsimulation einer kompletten Müllverbrennungsanlage in verschiedenen Szenarien einschließlich aller Behandlungsstufen von der Abfallaufgabe bis zur Einleitung der Rauchgase in den Kamin. 2) Betriebswirtschaftliche Beurteilung der gewählten Szenarien.

Die Prozeßsimulation basiert auf dem kommerziellen Software-Paket AspenPlus™. Es wurde ergänzt um spezifische Routinen insbesondere zur Berücksichtigung der Stoffstromrückführungen in der Anlage. Das Modell wurde mit Daten aus den am MHKW Darmstadt durchgeführten Meßkampagnen validiert.

Mit dem validierten Modell wurde in einer Parameterstudie die Zugabe heizwertreicher Abfälle in den Verbrennungsraum des MHKW Darmstadt untersucht. Dabei wurde deutlich, daß die Zugabe größerer Mengen Altholz- oder Shredderabfällen zu einer erhöhten thermischen Belastung führt, welches auch die Bildung von Stickoxiden begünstigt. Im Fall der Shredderzugabe wurde durch den Eintrag bestimmter Schadstoffe (Schwefel, Chlor ....) ein Anstieg bei den Hilfsmittelverbräuchen in der Rauchgasreinigungsanlage festgestellt. Das Modell zeigte die Verlagerung der Abreinigung des Rauchgases auf die Apparate: Sprühtrockner, Elektrofilter und Wäscher und die daraus resultierende Zunahme der Reststoffmengen.

Die anschließende Simulation der Integration einer Shredderverbrennungsanlage in das bestehende MHKW Darmstadt zu einer HYBRID-Abfallbehandlungsanlage führte zu folgenden Ergebnissen:

- die bestehende Rauchgasreinigungsanlage kann die zusätzliche Rauchgasmenge mitbehandeln,
- die sichere Einhaltung der 17. BImSchV wird auch bei der HYBRID-Anlagenschaltung gewährleistet,

- die erhöhten Mengen an Reststoffen und Hilfsmitteln erfordern keine Kapazitätssteigerung der vorhandenen Transport-, Bevorratungs- und Lagerungseinrichtungen.

Verglichen mit einer dezentralen Shredderverbrennungsanlage konnte für die betrachtete HYBRID-Abfallbehandlungsanlage ein Einsparpotential von ca. 38% der Investitionskosten bzw. ca. 54% der Jahreskosten ermittelt werden. Letztere resultieren aus reduzierten durchsatzunabhängigen Betriebskosten und höheren Stromerlösen aufgrund des reduzierten Eigenbedarfs der Anlage.

Mit dem entwickelten Instrumentarium wurde ein leistungsfähiges Planungstool zur Beurteilung der Machbarkeit von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen geschaffen. An anderen Standorten wird das Modell mit den Daten der dortigen Anlagentechnik parametriert und entsprechend validiert.

Waste incineration plants are based on the process of thermal waste treatment, i.e. the generation of power from the controlled conversion of organic reactive residue waste. Statutory requirements forced operators to install powerful flue gas cleaning systems into their existing waste incineration plants. This led to a tremendous increase in cost and treatment prices generating pressure to optimize the process.

Currently, markets demand additional capacities for the treatment of waste of elevated heating value (~ 5,0 MWh/Mg). It is possible to treat this type of waste in a conventional waste incineration plant. However, the elevated heating value dictates a reduction in throughput with ever increasing pressure on costs. This is why current concepts consider the treatment of waste of elevated heating value in specific, so called de-centralized plants. These plants are usually of low throughput with accordingly high specific cost of developing the infrastructure.

The capacity of existing waste incineration plants has been investigated in order to assess the potential for optimization. Extensive test runs at the Municipal Solid Waste Incineration Plant (MSW) Darmstadt revealed a capacity gap in the flue gas cleaning system even with the incineration unit running at full capacity. This gap could be filled with an additional incineration plant for waste of elevated heating value, whose capacity is matched accordingly. Such additional incineration plant defines in conjunction with the existing waste incineration plant a so called HYBRID Waste Treatment Plant. It is the aim of this treatise to develop an instrument to support the decision making process related to the planning of such plants.

The instrument is based on: 1) Process simulation of a complex waste incineration plant in different scenarios covering all processing stages, starting from the introduction of the waste down to feeding of cleaned flue gas into the stack. 2) Assessment of the selected scenarios from a economic point of view.

The commercial software package AspenPlus™ has been selected for the process simulation. Specific routines - in particular routines required to cover the various media recycle streams in the plant - had to be developed and implemented for realistic coverage of the complete process. For model validation, measurement values from test runs at MSW Darmstadt have been used.

By means of the validated model, the addition of waste of elevated heating value into the furnace of the MSW Darmstadt has been studied. Results show that high quantities of wood waste or shredder waste lead to an increase in thermal stress. Furthermore, it supports the formation of NO_X. Adding shredder to the furnace results in an increase in the consumption of auxiliary media in the flue gas cleaning system due to the content of Sulfur, Chlorine, etc. The model correctly predicts a shift in the washing of flue gas onto the following equipment: spray tower, electrostatic precipitator and scrubbing column. This shift is accompanied by higher quantities of residue media.

In the following step, the integration of a shredder incineration plant into the existing MSW Darmstadt has been simulated to build a HYBRID waste treatment plant with the following results:

- the existing flue gas cleaning system is able to treat the additional flue gas flow
- the fulfillment of statutory requirements (17. BImSchV) is ensured

- the quantities of residue media generated and the necessary increase in auxiliary media does not require an expansion and/or modification of transport and storage capacities.

The model suggests double-digit savings in investment cost and operating cost for the HYBRID Waste Treatment Plant as compared to a de-centralized shredder incineration plant. In case of MSW Darmstadt, a reduction of 38% in investment cost can be achieved. Operating costs have been found to be 54% lower resulting from a reduction in overhead (fixed) costs and from higher turnover from the sale of power due to the lower power requirements of the plant itself.

The developed instrument is a powerful planning tool to assess the feasibility of HYBRID Waste Treatment Plants. To study such concepts at another location, the model has to be fed with the data of the respective plant and validated.

INHALTSVERZEICHNIS

1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG 1

1.1 PROBLEMSTELLUNG 1

1.2 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE 5

2 THERMISCHE BEHANDLUNG HEIZWERTREICHER MONOFRAKTIONEN 7

2.1 MITBEHANDLUNG VON HEIZWERTREICHEN ABFÄLLEN 7

2.1.1 Mitbehandlung heizwertreicher Abfälle in Hausmüllverbrennungsanlagen 8

2.1.2 Mitbehandlung heizwertreicher Abfälle in Industrieanlagen 11

2.1.2.1 Zementwerke 11

2.1.2.2 Kraftwerke 12

2.1.2.3 Stahlwerke bzw. Hochöfen 14

2.2 THERMISCHE BEHANDLUNG IN SPEZIFISCHEN ANLAGEN 16

2.2.1 Spezifische Behandlung in dezentralen Anlagen 16

2.2.2 Spezifische Behandlung im Anlagenverbund 22

2.3 GEGENÜBERSTELLUNG DER BEHANDLUNGSMÖGLICHKEITEN 24

3 HYBRID-ABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN 26

3.1 DEFINITION VON HYBRID-ABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN 26

3.2 KONZEPTION VON HYBRID-ABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN 29

4 SIMULATION DES MÜLLHEIZKRAFTWERKES DARMSTADT MITTELS ASPENPLUS™ 31

4.1 EINLEITUNG 31

4.2 ANLAGENBESCHREIBUNG 32

4.2.1 Die Verbrennungsanlage 33

4.2.2 Die Energieerzeugung 35

4.2.3 Die Rauchgasreinigungsanlage 35

4.2.3.1 Staubabscheidung 36

4.2.3.2 Wäscher 37

4.2.3.3 DeNO$_x$-Anlage 38

4.2.3.4 Waschwasseraufbereitung 39

4.3 GRUNDMODELL 40

4.4 VALIDIERUNGSSTRATEGIE 41

4.5 SIMULATIONSMODELLE 43

4.5.1 Die Verbrennungsanlage 44

4.5.2 Die Energieerzeugung 45

4.5.3 Die Rauchgasreinigungsanlage 46

4.5.3.1 Staubabscheidung 46

4.5.3.2 Wäscher 50

4.5.3.3 DeNOx-Anlage 51

4.5.3.4 Waschwasseraufbereitung 52

4.5.3.5 Stoffstromrückführungen 53

4.6 INPUTPARAMETER DER SIMULATION 56
4.7 ERGEBNISSE DER SIMULATION FÜR DAS GRUNDMODELL 57
4.7.1 Betriebsparameter *57*
4.7.2 Hilfsmittelverbräuche *59*
4.7.3 Reststoffströme *60*
4.7.4 Betrachtung der Emissionsdaten *67*
4.7.5 Abscheidegrade der Simulation *69*

5 MITVERBRENNUNG HEIZWERTREICHER ABFÄLLE IN MÜLLVERBRENNUNGSANLAGEN ... 71

5.1 INPUTPARAMETER FÜR DIE SIMULATION 71
5.2 ERGEBNISSE DER SIMULATION 73
5.2.1 Betriebsparameter (Betrachtung des Feuerraumes) *73*
5.2.2 Hilfsmittelverbräuche *74*
5.2.3 Reststoffströme *75*
5.2.4 Betrachtung der Emissionsdaten *76*

6 BETRACHTUNG EINER HYBRID-ANLAGE AM STANDORT DES MHKW DARMSTADT 78

6.1 ANLAGENAUSWAHL 78
6.2 SIMULATIONSMODELL DER HYBRID-ANLAGE 80
6.3 INPUTPARAMETER DER SIMULATION 81
6.4 ERGEBNISSE DER SIMULATION 82
6.4.1 Betriebsparameter (Auslastung der Apparate) *82*
6.4.2 Hilfsmittelverbräuche *83*
6.4.3 Reststoffströme *84*
6.4.4 Betrachtung der Emissionsdaten *85*

7 KOSTENBETRACHTUNG VON HYBRID-ABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN 87

7.1 INVESTITIONSKOSTENVERGLEICH 89
7.2 JAHRESKOSTENVERGLEICH 92

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 93

9 LITERATURVERZEICHNIS 101

10 ANHANG

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Prozentuale Aufteilung der Anlagen-Jahreskosten bei thermischen Anlagen [KNÖRR 1997]

Abbildung 1-2: Gemessene Dampfmengen und Rauchgasmengen an der Linie 1 des MHKW Darmstadt bezogen auf die Auslegungswerte ([JAGER ET AL. 1998], 27.06.97, Meßzeit 3 Stunden)

Abbildung 2-1: Heizwertabweichungen mechanisch und mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle

Abbildung 2-2: Spezifische Behandlungskosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße bei Rostfeuerungsanlagen (siehe auch Anhang D)

Abbildung 2-3: Typische Verteilung der Investitionen im Bereich der Apparate- und Maschinentechnik (in Anlehnung an [BORN 1998])

Abbildung 3-1: Systemgrenze einer Abfallverbrennungsanlage

Abbildung 3-2: Schematische Darstellung einer HYBRID-Abfallbehandlungsanlage

Abbildung 4-1: Vereinfachtes Fließbild der betrachteten Anlage (MHKW Darmstadt)

Abbildung 4-2: Grundmodell der Simulation

Abbildung 4-3: Menü für die Definition der Ausgangsvariablen

Abbildung 4-4: Menü für die Definition des Datentransferziels

Abbildung 4-5: Menü für die Ausführungseingliederung in den Gesamtprozeß

Abbildung 4-6: Liste der FORTRAN-Programme für die Stoffstromrückführungen

Abbildung 4-7: Reststoffe-Zyklon (Simulation)

Abbildung 4-8: Reststoffe-Sprühtrockner (Simulation)

Abbildung 4-9: Reststoffe-Elektrofilter (Simulation)

Abbildung 4-10: Rückgeführte Waschflüssigkeit zum Sprühtrockner (Simulation)

Abbildung 5-1: Prozentualer Vergleich der Emissionsdaten im Reingas

Abbildung 6-1:	Theoretische Rauchgasmengen bei Shredder-Verbrennungsanlage in Abhängigkeit von den jährlichen Behandlungskapazitäten für unterschiedliche Luftzahlen (λ = 1,6 – 2,0) [WAGNER 1990]
Abbildung 6-2:	Input- und Outputströme des Simulationsmodells (HYBRID-Anlage)
Abbildung 6-3:	Auslastung der Apparate der Rauchgasreinigungsanlage
Abbildung 6-4:	Gegenüberstellung der wesentlichen Emissionen im Reingas
Abbildung A1-1:	Gesamtfließbild des Müllheizkraftwerkes Darmstadt [ZAS 1997]
Abbildung A1-2:	Werksplan des Müllheizkraftwerkes Darmstadt
Abbildung A2-1:	Kompaktanlage der Firma Techform [TECHFORM 1998]
Abbildung B1-1:	AspenPlus™ - Grundeinstellungen
Abbildung B1-2:	Menü für die Simulationsoptionen
Abbildung B1-3:	Intervalle für die Partikelgrößenverteilung
Abbildung B1-4:	Komponentenhauptmenü
Abbildung B1-5:	Henry-Konstanten binärer Gemische
Abbildung B1-6:	Wechselwirkungsparameter zwischen Elektrolyten und Molekülen sowie zwischen zwei Elektrolyten
Abbildung B1-7:	Zuordnungsmenü für eine spezifizierte Sektion
Abbildung B1-8:	Beispiel für die Vorgabe reaktionsspezifischer Koeffizienten zur Gleichgewichtseinstellung bei einer chemischen Reaktion
Abbildung B1-9:	Konvergenz – Grundeinstellungen
Abbildung B1-10:	Vorgaben für die SECANT-Methode
Abbildung B1-11:	Vorgaben für die Wegstein-Methode
Abbildung B1-12:	Sequenz 1 (Quencher)
Abbildung B1-13:	Sequenz 2 (Absorber)
Abbildung B1-14:	Sequenz 3 (Ring-Jet)
Abbildung B2-1:	Definition der Variablen für das FORTRAN-Programm (Auszug)

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Ergebnisse der am MHKW Darmstadt durchgeführten Verbrennungsversuche mit mechanisch und mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen

Tabelle 2-2: Beispiele dezentraler Anlagen zur thermischen Behandlung heizwertreicher Fraktionen

Tabelle 2-3: Beispiele für die thermische Behandlung heizwertreicher Fraktionen im Anlagenverbund

Tabelle 2-4: Möglichkeiten zur Behandlung heizwertreicher Monofraktionen

Tabelle 4-1: Haupteckdaten des Müllheizkraftwerkes Darmstadt [ZAS 1997]

Tabelle 4-2: Prozeßstufen und Komponenten der Rauchgasreinigungsanlage

Tabelle 4-3: Datengrundlage zur Validierung des Simulationsmodells

Tabelle 4-4: Übersicht der Simulationsmodelle

Tabelle 4-5: Eingangsstoffe und Reaktionsprodukte bei der Feuerraumsimulation

Tabelle 4-6: Partikelgrößenverteilung (Mittelwerte aus BIRNBAUM ET AL. 1997)

Tabelle 4-7: Elementare Zusammensetzung der simulierten Hausmüllfraktion

Tabelle 4-8: Inputparameter der Simulation

Tabelle 4-9: Simulierte Betriebsparameter (Grundmodell)

Tabelle 4-10: Simulierte Hilfsmittelverbräuche (Grundmodell)

Tabelle 4-11: Mengen der anfallenden Reststoffe der Simulation (Grundmodell)

Tabelle 4-12: Zusammensetzung der simulierten Rückstände (Grundmodell)

Tabelle 4-13: Metallische und halbmetallische Bestandteile der Schlacke und der Kesselasche - Vergleich Simulation/Literatur -

Tabelle 4-14: Metallische und halbmetallische Bestandteile der Reststoffe der Rauchgasreinigung - Vergleich Simulation/Literatur -

Tabelle 4-15: Simulierte Emissionsdaten im Rohgas (Grundmodell)

Tabelle 4-16: Simulierte Emissionsdaten im Reingas (Grundmodell)

Tabelle 4-17: Abscheidegrade der relevanten Schadstoffe (Grundmodell)

Tabelle 5-1:	Inputparameter der Simulation
Tabelle 5-2:	Prozentuale Änderung der einzelnen Elemente der Inputströme gegenüber Input(A)
Tabelle 5-3:	Rohgasmenge- und Temperaturänderung bei der Zugabe heizwertreicher Abfallfraktionen
Tabelle 5-4:	Mengen der berechneten Hilfsmittel in der Rauchgasreinigung
Tabelle 5-5:	Schlacke- und Reststoffmengenänderungen bei der Zugabe heizwertreicher Abfallfraktionen
Tabelle 6-1:	Mittelwerte gemessener Rauchgasmengen am MHKW Darmstadt
Tabelle 6-2:	Inputparameter der Simulation
Tabelle 6-3:	Mengen der berechneten Hilfsmittel in der Rauchgasreinigung
Tabelle 6-4:	Schlacke- und Reststoffmengenänderungen in der HYBRID-Anlage
Tabelle 6-5:	Gegenüberstellung der wesentlichen Emissionen im Reingas
Tabelle 7-1:	Kostengruppen (Hauptpositionen) bei der Investitionskostenschätzung [in Anlehnung an UBA 1998]
Tabelle 7-2:	Kostengruppen (Hauptpositionen) bei der Jahreskostenschätzung [in Anlehnung an UBA 1998]
Tabelle 7-3:	Spezifische Daten der betrachteten Anlagen bezüglich Grundstück und Personal
Tabelle 7-4:	Investitionskostenschätzung und Einsparpotential der HYBRID-Variante gegenüber der dezentralen Variante (siehe auch Anhang D1)
Tabelle 7-5:	Jahreskostenschätzung und Einsparpotential der HYBRID-Variante gegenüber der dezentralen Variante (siehe auch Anhang D2)
Tabelle A1-1:	Auslegungsdaten und Hauptabmessungen des MHKW Darmstadt (Linie 1)
Tabelle A2-1:	Anlagenkomponenten einer dezentralen Kleinverbrennungsanlage [ECOTEC (a)/(b) 1999]
Tabelle B1-1:	Einfluß des Beschleunigungsparameters auf die Konvergenz

Tabelle C1-1: Elementare Zusammensetzung der für die Simulation relevanten Abfallfraktionen

Tabelle C1-2: Elementare Zusammensetzung von Hausmüll (Literaturwerte)

Tabelle C1-3: Elementare Zusammensetzung von Holzabfällen (Literaturwerte)

Tabelle C1-4: Elementare Zusammensetzung von Shredderabfällen (Literaturwerte)

Tabelle C2-1: Referenzwerte für die Schadstoffverteilung der Rückstände (Schlacke und Kesselasche) (Literaturwerte)

Tabelle C2-2: Verteilung der Elemente auf Rohgas/Schlacke bei Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

Tabelle C2-3: Verteilung der Elemente auf Rohgas/Kesselasche bei Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

Tabelle C3-1a: Betriebsdaten des MHKW Darmstadt (Linie 1)

Tabelle C3-1b: Betriebsdaten des MHKW Darmstadt (Linie 1)

Tabelle C4-1: Hilfsmittelverbräuche des MHKW Darmstadt (Vergleich mit Betriebswerten)

Tabelle C4-2a: Hilfsmittelverbräuche bei Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

Tabelle C4-2b: Hilfsmittelverbräuche bei Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

Tabelle C4-2c: Hilfsmittelverbräuche bei Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

Tabelle C5-1: Mengen der anfallenden Reststoffe bei Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

Tabelle C6-1: Zusammensetzung der Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

Tabelle C6-2a: Zusammensetzung der Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

Tabelle C6-2b: Zusammensetzung der Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

Tabelle C6-3: Zusammensetzung der Kesselaschen aus Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

Tabelle C6-4: Zusammensetzung der Kesselaschen aus Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

Tabelle C6-5: Zusammensetzung der Entstaubungsrückstände (Zyklon, E-Filter) aus Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

Tabelle C6-6: Zusammensetzung der Reaktionsprodukte (Flugstaubsalzgemisch) aus Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

Tabelle C6-7: Zusammensetzung der Reaktionsprodukte (Flugstaubsalzgemisch) aus Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

Tabelle C7-1a: Emissionsdaten des MHKW Darmstadt (Rohgasdaten) während der SAGA Meßkampagnen [JAGER ET AL. 1998; JAGER, HERR 1996]

Tabelle C7-1b: Emissionsdaten des MHKW Darmstadt (Rohgasdaten) während der SAGA Meßkampagnen [JAGER ET AL. 1998; JAGER, HERR 1996]

Tabelle C7-2a: Emissionsdaten des MHKW Darmstadt (Reingasdaten) während der SAGA Meßkampagnen [JAGER ET AL. 1998; JAGER, HERR 1996]

Tabelle C7-2b: Emissionsdaten des MHKW Darmstadt (Reingasdaten) während der SAGA Meßkampagnen [JAGER ET AL. 1998; JAGER, HERR 1996]

Tabelle C8-1: Abscheidegrade der für die Simulation relevanten Schadstoffe (Literaturwerte)

Tabelle D1-1: Basisdaten und Einheitspreise der Jahreskostenschätzung

Tabelle D1-2: Basisdaten und Einheitspreise der Jahreskostenschätzung

Tabelle D1-3: Basisdaten und Einheitspreise der Jahreskostenschätzung

Tabelle D2-1: Vergleichsdaten zur Validierung des Kostenmodells (Literaturdaten)

1 Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Problemstellung

Die Basis moderner Abfallwirtschaftskonzepte besteht im Vermeiden, Vermindern und Verwerten von Abfällen. In Zukunft werden allerdings weiterhin erhebliche Restabfallmengen anfallen, selbst unter der Voraussetzung optimierter Abfallvermeidung und mit idealen Möglichkeiten zur Wertstoffrückgewinnung. Diesen Restabfall gilt es in eine ökologisch unbedenkliche Form zu überführen und erst dann abzulagern.

Als wirksames Verfahren zur kontrollierten Umwandlung organischer, reaktionsfähiger Stoffe bei gleichzeitiger Volumenminderung und Energienutzung der Ausgangsprodukte hat sich die thermische Abfallbehandlung bewährt. Kernstück der Anlagentechnik ist die Verbrennungseinheit und Energieerzeugung (siehe Abbildung 3-1). Zusätzliche Stufen müssen verschaltet werden, um die relevanten gesetzlichen Anforderungen des Gewässerschutzes und des Immissionsschutzes zu erfüllen.

Für die thermische Behandlung von Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, Sperrmüll, Klärschlamm und Sonderabfällen steht in Deutschland eine große Anzahl von Anlagen zur Verfügung, womit ihre Bedeutung manifestiert wird (Gesamtkapazität in Klammern):

- 53 kommunale Hausmüll-Verbrennungsanlagen (10,9 Mio. Mg/a)
- 13 kommunale Monoklärschlamm-Verbrennungsanlagen (0,31 Mio. Mg/a)
- 31 öffentlich zugängliche Sonderabfall-Verbrennungsanlagen (1,05 Mio. Mg/a)

Diese Anlagen sind inzwischen mit komplexen und besonders leistungsfähigen Rauchgasreinigungssystemen ausgestattet [URBAN, FRIEDEL 1997], da bis zum Ablauf der Fristen der 17. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (17. BImSchV) Ende 1996 aufwendige Sekundärmaßnahmen nachgerüstet werden mußten. Zu nennen sind die stufenweise betriebenen Rauchgasreinigungsanlagen und die mit Katalysatoren zur Abscheidung von Dioxin und Furan bestückten Anlagen. Das Ergebnis sind außerordentlich niedrige Emissionswerte, z. T. weit unter den gesetzlichen Vorgaben, verbunden mit einem erheblichen Kapitalaufwand (siehe auch [BORN 1996]).

Das MHKW Darmstadt z. B. hat ca. 310 Mio. DM in den letzten 10 Jahren in solche Um- und Nachrüstungsmaßnahmen investiert. Parallel stiegen die Gebühren für die Verbrennung von Hausmüll im Zeitraum (1991 – 1997) von ca. 290,- auf ca. 450,- DM/$Mg_{Hausmüll}$ [ZAS 1997]. Für andere Anlagen sind vereinzelt sogar Gebühren bis zu 650,- DM/$Mg_{Hausmüll}$ zu registrieren.

Infolge dieser Investitionen macht der Kapitaldienst inzwischen mehr als die Hälfte der durchschnittlichen Jahreskosten von thermischen Anlagen aus, wie Abbildung 1-1 entnommen werden kann. Diese Jahreskosten müssen durch die Behandlungsgebühren gedeckt werden.

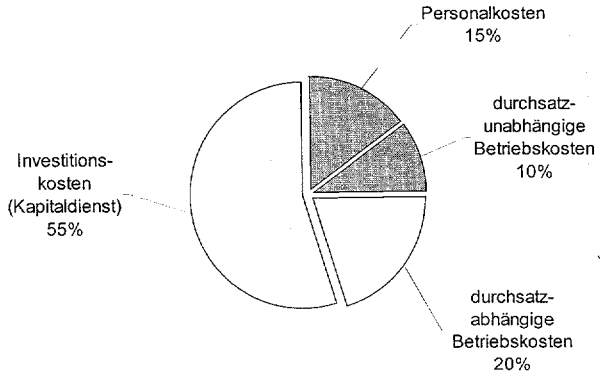


Abbildung 1-1: Prozentuale Aufteilung der Anlagen-Jahreskosten bei thermischen Anlagen [KNÖRR 1997][1]

Es bleibt festzuhalten, daß die thermische Abfallbehandlung einem hohen Kostendruck ausgesetzt ist (siehe auch [SCHUMACHER ET AL. 1996]). Allerdings ist sie aus zeitgemäßen Abfallwirtschaftskonzepten nicht mehr wegzudenken. Im Gegenteil, sie profitiert weiter von gesetzlichen Auflagen, die bestimmte Entsorgungswege stark einschränken, wenn nicht sogar ausschließen. Nach der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi) dürfen mit Ablauf der Übergangsfrist im Jahre 2005 auf Deponien keine Stoffe mehr abgelagert werden, die einen Glühverlust größer 5% haben. Diese müssen dann vorbehandelt werden. Im Einzugsbereich des

[1] Unter durchsatzunabhängigen Betriebskosten werden folgende Posten verstanden: Versicherung, Wartung, Reparatur, Ersatzteile

MHKW Darmstadt fallen z. B. Altholzmengen von ca. 35.000 Mg/a an, die z. Z. überregional auf Deponien entsorgt werden und somit potentiell thermisch behandelt werden könnten. Für die Verbrennung von Altholz und anderen heizwertreichen Abfällen läßt sich insgesamt ein zunehmender Bedarf an Behandlungskapazitäten feststellen, der sich aber durch bestehende Hausmüllverbrennungsanlagen auf längere Sicht nicht decken läßt [BRILL ET AL. (a) 1996].

Diese sind zwar prinzipiell zur Behandlung heterogener Abfallfraktionen [2] konzipiert, jedoch führt die Verbrennung von heizwertreichen Abfällen zu einem schnellen Erreichen der Belastungsgrenze der Verbrennungseinheit und zwingt zur Durchsatzreduzierung. Außerdem wird der Energiegehalt der Stoffe in solchen Anlagen nur unzureichend genutzt.

Ein weiteres Merkmal der Behandlung heterogener Abfallfraktionen sind die induzierten Schwankungen der Prozeßparameter in der Verbrennungseinheit, die ein Risiko darstellen für den Ausbrand des Abfalls und für die Verfügbarkeit der Anlage.

Daher tendieren aktuelle Konzepte zur Behandlung heizwertreicher Abfälle eher zu speziellen Anlagen mit dem Vorteil der stoffspezifischen Behandlung der Fraktion bei entsprechend geringen Schwankungen im System. Für diese Anlagen werden kleinere Durchsätze (bis ca. 50.000 Mg/a) favorisiert. Überproportional nachteilig wirken sich bei kleinen, dezentralen Anlagen aber die Kosten für den Erwerb und die Erschließung des Grundstücks aus. Ferner sind solche Anlagengrößen nur mit Abstrichen bei der Technologie denkbar, insbesondere was die Rauchgasreinigung betrifft.

In diesem Zusammenhang interessiert die Frage, bis zu welchem Grad die Rauchgasreinigungsanlagen existierender Müllverbrennungsanlagen tatsächlich ausgelastet sind. Die Verhältnisse am MHKW Darmstadt zeigt beispielhaft Abbildung 1-2. Zur Verdeutlichung wurden gemessene Dampfmengen und Rauchgasmengen gegenübergestellt, jeweils bezogen auf den Auslegungswert. Obwohl der Kessel zeitweise vollständig ausgelastet wird, bleiben in der Rauchgasreinigung mehr als 20% der installierten Kapazität ungenutzt.

[2] mit Unterschieden in den physikalischen und chemischen Eigenschaften (Konsistenz, Heizwert, Schadstoffgehalt, ...)

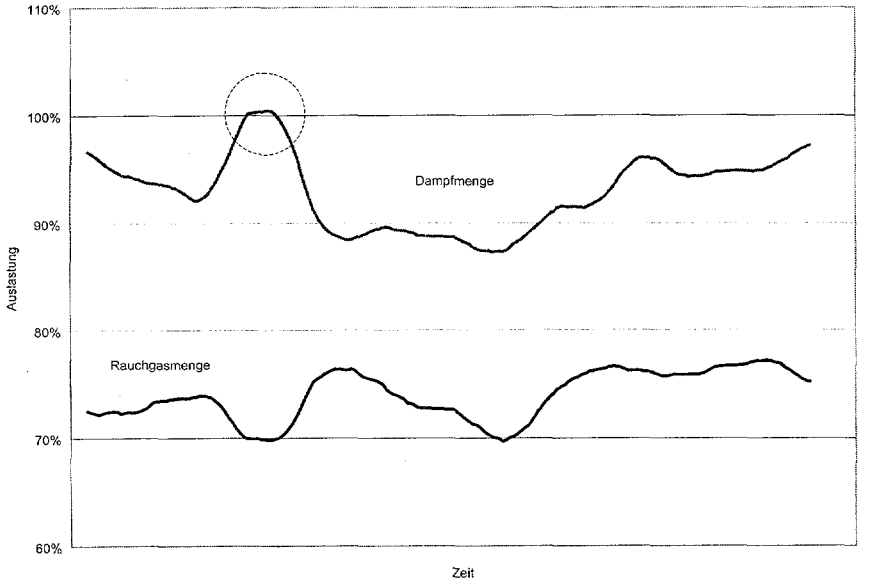


Abbildung 1-2: gemessene Dampfmengen und Rauchgasmengen an der Linie 1 des MHKW Darmstadt bezogen auf die Auslegungswerte ([JAGER ET AL. 1998], 27.06.97, Meßzeit 3 Stunden)

Vor diesem Hintergrund entstand die Idee, HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen zu konzipieren als Anlagenverbund zwischen einer Verbrennungsanlage für heizwertreiche Monofraktionen und einer vorhandenen Müllverbrennungsanlage mit Rauchgasreinigung mit folgenden Vorteilen gegenüber dezentralen Anlagen:

- Niedrigere Investitionskosten, insbesondere durch Einsparen der Rauchgasreinigung und der teilweisen Mitbenutzung der vorhandenen Infrastruktur,
- Verringerung des Genehmigungsaufwandes, wie im Rahmen einer Voranfrage bei den zuständigen Genehmigungsbehörden bestätigt werden konnte [HECKWOLF 1998],
- bessere Akzeptanz bei der Bevölkerung, da kein neuer Standort notwendig wird.

Für den Verbund erhöht sich die Flexibilität durch die Schaffung zusätzlicher Behandlungskapazitäten für Abfälle, die bisher nicht oder nur bedingt behandelbar sind.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Bereitstellung eines Instrumentariums zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei Anlagenverbundkonzepten auf der Basis von Müllverbrennungsanlagen. Dazu wird die Machbarkeit eines solchen Konzeptes anhand eines konkreten Beispiels im Detail untersucht, sowohl aus anlagentechnischer als auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht.

Die folgende Vorgehensweise wurde gewählt:

Zunächst wird in **Kapitel 2** der Stand der energetischen Behandlung heizwertreicher Abfallfraktionen ermittelt. Die Betrachtung schließt auch die Mitverbrennung der heizwertreichen Abfälle in geeigneten Industrieanlagen ein. Weiterhin werden die aktuell verfolgten Konzepte bei der Realisierung dezentraler thermischer Anlagen diskutiert. Es handelt sich um neue Ansätze, die bei der Planung von Neuanlagen berücksichtigt werden und z. T. auch auf Altanlagen anwendbar sind.

In **Kapitel 3** wird die Definition von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen vorgenommen und einige Aspekte des Konzeptes dargestellt.

Kapitel 4 befaßt sich mit der Entwicklung eines Tools zur Simulation einer kompletten Müllverbrennungsanlage. Besondere Bedeutung wird der Modellvalidierung beigemessen, wozu recherchierte Daten aus der Literatur und durchgeführte Meßkampagnen herangezogen wurden. Mit dem Modell wird es möglich, verschiedene Stoffströme bezüglich Mengen und Zusammensetzung zu untersuchen.

In **Kapitel 5** wird die Problematik der direkten Zugabe heizwertreicher Abfälle in eine Hausmüllverbrennungsanlage durch Simulation reproduziert. Damit wird auch die Eignung des Modells zur Wiedergabe von Schwankungen im Input demonstriert.

Kapitel 6 beschreibt die Konzeption einer Hybridanlage durch Integration einer Shredderanlage in eine Hausmüllverbrennungsanlage. Die simulierten Effekte auf die Hilfsmittel, Restströme und Emissionen werden untersucht.

In **Kapitel 7** wird ein Kostenmodell entwickelt und mit dem Anlagensimulationsmodell verknüpft.

Die Betrachtung schließt mit einer Zusammenfassung ab.

2 Thermische Behandlung heizwertreicher Monofraktionen

Die energetische Nutzung von heizwertreichen Abfällen (insbesondere von Althölzern, Shredderrückständen, DSD-Sortierresten, ...) wird zunehmend vom gesetzlichen Hintergrund geprägt. Dabei werden das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) und die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi) die zukünftige Entsorgung der Abfallprodukte stark beeinflussen.

Das KrW-/AbfG berücksichtigt die Tatsache, daß der stoffliche Kreislauf endlich ist und die Stoffe nach einer stoffbezogenen Umlaufziffer aus dem Kreislauf herausgenommen werden müssen. Damit scheint das KrW-/AbfG auch der Diskussion, ob jeder noch so hohe Energieaufwand ohne ökologische Rücksichtnahme zur Aufrechterhaltung des Stoffkreislaufes gerechtfertigt ist, ein Ende zu bereiten. Anfallende Reststoffe müssen gemäß dem KrW-/AbfG einer Entsorgung zugeführt werden[1]. Für jeden brennbaren Stoff steht am Schluß der Spirale der Kreislaufwirtschaft entweder die energetische Nutzung oder die thermische Behandlung [PAULSEN 1996]. Mit dem KrW-/AbfG wurde darüber hinaus das Prinzip der Produkthaftung auf den Bereich der Abfallentsorgung ausgeweitet. Es besteht grundsätzlich die Verpflichtung zur Rücknahme von Produkten und zu deren Entsorgung nach Ablauf der Nutzungsdauer. Hieraus ergibt sich der Bedarf nach Entsorgungs- oder Verwertungsalternativen zu dem bisher hauptsächlich genutzten Weg der Deponierung [NEUMANN, BAUMGÄRTNER 1998].

In diesem Zusammenhang werden die potentiellen Behandlungsmöglichkeiten heizwertreicher Monofraktionen nach dem Kriterium klassifiziert, ob die Behandlung in eigens dafür vorgesehenen Anlagen erfolgt (Spezifische Anlagen) oder in anderen Anlagen, die aufgrund ihrer Verfahrenstechnik, eine Möglichkeit zur Mitbehandlung aufweisen. Mit der Diskussion der zweiten Möglichkeit wird begonnen.

2.1 Mitbehandlung von heizwertreichen Abfällen

Von praktischer Bedeutung ist die Verbrennung heizwertreicher Abfälle zusammen mit anderen Stoffen in geeigneten Prozessen. Hierzu muß in einem ersten Schritt untersucht werden, wie stark die Eigenschaften der heizwertreichen Abfälle und der Stoffe, die ursprünglich zur Verbrennung vorgesehen waren, voneinander abweichen. Relevant ist der Energiegehalt und der Schadstoffgehalt. Sofern die Brennstoffe mit Produkten eines Prozesses in direkten Kontakt

[1] Im abfallrechtlichen Sinne ist unter dem Oberbegriff der Entsorgung sowohl die energetische und stoffliche Verwertung als auch die umweltgerechte Beseitigung zu verstehen.

kommen, wird die wichtigste Frage sein, inwiefern Schadstoffe aus den heizwertreichen Abfällen in die Endprodukte eingebunden werden.

Der Kriterienkatalog könnte weiter ergänzt werden durch die Betrachtung der Notwendigkeit zur mechanischen Vorbehandlung der Abfälle, worauf an geeigneter Stelle eingegangen wird.

Prinzipiell kommen die folgenden Prozesse in Frage:

- Verbrennungsanlagen für Hausmüll
- Großfeuerungen in Industrieanlagen

Welche Probleme damit verbunden sind, wird nun im einzelnen diskutiert.

2.1.1 Mitbehandlung heizwertreicher Abfälle in Hausmüllverbrennungsanlagen

Hausmüllverbrennungsanlagen mit nachgeschalteter Rauchgasreinigung sind prinzipiell zur Behandlung eines weiten Spektrums von Abfallfraktionen vorgesehen. Durch Betrachtung der Unterschiede zwischen heizwertreichen Fraktionen und Hausmüll wird festgehalten:

- Ein Kontakt mit Produkten eines Prozesses ist hier nicht gegeben;
- moderate Abweichungen in den Konzentrationen einzelner Schadstoffe dürften sich lediglich in einem Mehreinsatz entsprechender Hilfsmittel bei der Abreinigung des Rauchgases niederschlagen. Der Effekt einer besonders starken Abweichung von der typischen Hausmüllzusammensetzung muß im einzelnen untersucht werden;
- aufgrund der starken Abweichung im Energiegehalt, muß mit einer erhöhten thermischen Belastung in der Verbrennungseinheit und Energieerzeugung gerechnet werden.

Diese Problematik wurde bereits in mehreren Forschungsprojekten untersucht. Zu nennen sind die am MHKW Darmstadt durchgeführten Meßkampagnen, aus denen im folgenden einige Ergebnisse zitiert werden (siehe auch [HERR 1999], [SCHWING 1999], [JAGER ET AL. 1998], [JAGER, HERR 1996]).

Ziel der durchgeführten Großversuche am MHKW Darmstadt, war die Untersuchung der Abweichung der Verbrennungseigenschaften von mechanisch und mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmüll.

Abbildung 2-1 zeigt die Abfallmischungen mit einem erhöhten Heizwert gegenüber dem „normalen Müll".

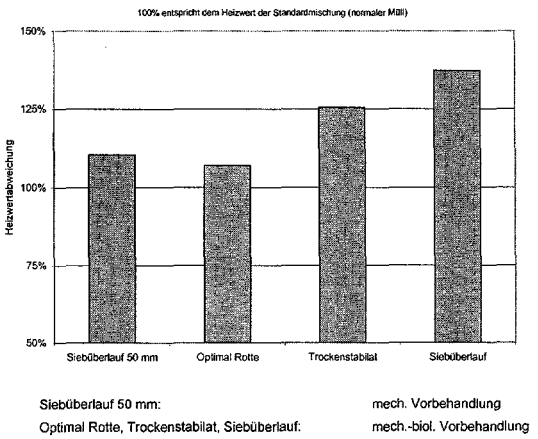


Abbildung 2-1: Heizwertabweichungen mechanisch und mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle

In Tabelle 2-1 sind die wesentlichen Ergebnisse im Hinblick auf die Eigenschaften der Mischungen, das Feuerbild, die Fahrweise der Anlage und die mechanische und thermische Belastung des Systems dargestellt.

Als Endergebnis der am MHKW Darmstadt durchgeführten Großversuche ist festzuhalten, daß die Behandelbarkeit der Mischungen unter Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften prinzipiell möglich ist.

Für den Dauerbetrieb sind jedoch folgende negative Auswirkungen hervorzuheben:

- unruhige Fahrweise und dadurch erhöhtes Verschleißverhalten;
- hohe Temperaturwerte und CO-Spitzen führen zu negativen Einflüssen auf die Kesselwände und Rauchgasreinigungsaggregate;
- schlechte mechanische Eigenschaften der Optimalrotte und des Trockenstabilats machen einen zusätzlichen Auflockerungsprozeß notwendig.

Tabelle 2-1: **Ergebnisse der am MHKW Darmstadt durchgeführten Verbrennungsversuche mit mechanisch und mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen**

	Siebüberlauf 50 mm	Optimal Rotte	Trockenstabilat	Siebüberlauf
Quelle	[JAGER, HERR 1996]	[JAGER ET AL. 1998]		
Vorbehandlung	mechanisch	mechanisch-biologisch		
Eigenschaft	- hoher Kunststoffanteil - große Partikel - relativ niedriger Durchsatz	- trocken „klumpig" - hohe Anteile an Folien und Textilien - relativ hoher Durchsatz - nicht optimales Müllbett	- sehr trocken „klumpig" - hohe Anteile an Folien und Textilien - Lastschwankungen - unebene, überhöhte, teilweise nicht vorhandene Müllschicht	- keine Feinfraktion - sehr hoher Anteil an Folien und Textilien - relativ geringer Durchsatz
Feuerbild	- unruhiges Flammenbild - spätes Zündverhalten - hohe Flammenbildung in der Ausbrandzone - kein kritisches Abbrandverhalten	- ruhiges Flammenbild - zum Rostende hin verschobene Ausbrandzone	- unruhiges Flammenbild - zu lange Ausbrandzeiten - zum Rostende hin verschobene Ausbrandzone - schlechter Ausbrand	- unruhiges Flammenbild - hohe Temperaturen im Feuerraum - kein kritisches Abbrandverhalten
Fahrweise	- hohe Rauchgastemperaturen am Ende der Nach-verbrennungszone	- günstiges Verbrennungs-verhalten - hoher Staubgehalt im Roh- und Reingas	- überhöhter Regelaufwand - hohe Sauerstoffkonzentration - CO-Spitzen - hohe Rauchgastemperaturen am Ende der Nach-verbrennungszone - hoher TOC-Gehalt	- CO-Spitzen
mech.-therm. Belastung		- mechanische Belastung des Systems Rost/Kessel	- mechanische Belastung des Systems Rost/Kessel - Verstopfungen im Trichter und Schlackeabwurf	

2.1.2 Mitbehandlung heizwertreicher Abfälle in Industrieanlagen

Zur Mitverbrennung als Sekundärbrennstoff in Industriefeuerungen kommen sowohl industrielle Abfälle als auch die hochkalorischen Fraktionen aus mechanisch-biologisch vorbehandelten Siedlungsabfällen in Frage (siehe [URBAN, FRIEDEL 1997]).

Durch Betrachtung der Unterschiede zwischen heizwertreichen Fraktionen und fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdöl, Erdgas) wird festgehalten:

- Der Energiegehalt heizwertreicher Abfälle ist geringer als der von fossilen Brennstoffen. Probleme mit der Verbrennung dürften nicht zu erwarten sein;
- Der Brennstoff kann in Kontakt mit dem Produkt kommen und dieses kontaminieren;
- Industrieanlagen sind mit einer vergleichsweise einfachen Rauchgasreinigungsanlage ausgestattet mit einer begrenzten Fähigkeit zur Abscheidung der im Abfall befindlichen Schadstoffe. Hieraus kann sich die Notwendigkeit ergeben, Modifikationen vorzunehmen, z. B. durch die Installation zusätzlicher Behandlungsstufen.

Im folgenden werden die maßgeblichen Industrieprozesse, die sich für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen etabliert haben, diskutiert.

2.1.2.1 Zementwerke

Zementdrehrohröfen sind klassische Einsatzgebiete für Ersatzbrennstoffe wie Altreifen, Gummiabfälle, Altöl, Lösemittel, Hausmüll und Industriereststoffe. Maßgebend ist die verwendete Brenntechnik. Hier läßt sich prinzipiell zwischen Trocken-, Naß- und Wirbelschichtverfahren unterscheiden [SEEMANN 1996].

Die Rauchgasreinigung eines Zementwerkes beschränkt sich auf die Entstaubung und die Naßwäsche. Damit kann zwar der überwiegende Teil der Schwermetalle abgeschieden werden, das hochflüchtige Quecksilber verläßt aber die Anlage mit dem Abgasstrom mangels einer Senke im Prozeß. In einigen Anlagen werden darüber hinaus die emissionsseitigen Mischungsgrenzwerte für Kohlenmonoxid, Gesamt-C und Stickoxide sowie einige Schwermetallgrenzwerte nicht oder nur schwer eingehalten. Hier müssen Ausnahmegenehmigungen beantragt werden. Problematisch bleibt insbesondere die potentielle Belastung des Endproduktes Zement durch toxische Stoffe wie Blei, Arsen, Chrom, Nickel und Zink [POTT(a) 1997]. Zu hohe Chromgehalte z. B. können bei der Verarbeitung des Zementes zur Mauerkrätze führen [URBAN, FRIEDEL 1997].

Im Rahmen einer vom Institut WAR durchgeführten Befragung zum „Einsatz von Flachdachabdichtungsmaterial in Zementwerken" wurden die Anforderungen an einen Sekundärbrennstoff wie folgt ermittelt [SEEMANN 1996]: Das Material sollte weitgehend homogen sein zur Erzielung eines guten Brandverhaltens. Es sollte leicht zu zerkleinern sein wegen der pneumatischen Förderung. Die Anteile an Kupfer und Chlor sollten entsprechend klein sein.

2.1.2.2 Kraftwerke

Heizwertreiche Abfälle weisen vergleichbare Brennstoffeigenschaften auf wie Braunkohle und eignen sich daher besonders zum Einsatz als Sekundärbrennstoffe in industriellen Braunkohlekraftwerken. Relevant ist allerdings die verwendete Feuerungstechnik: Für die Staubfeuerung sind die Partikelgrößen der Abfälle meist zu groß und lassen sich somit nicht pneumatisch fördern. Dies wird von der zirkulierenden Wirbelschicht eher toleriert.

Es wurden mehrere Versuche durchgeführt, Sekundärbrennstoffe, und zwar insbesondere Klärschlamm, in Braunkohlefeuerungen einzugeben. Probleme mit der Abscheidung von Quecksilber sind allerdings vorprogrammiert. So verfügen schon Monoverbrennungsanlagen für Klärschlamm über aufwendige Rauchgasreinigungen. Bei der Klärschlammverbrennungsanlage der Fa. Hoechst z. B. sind vier Rauchgaswäscherstufen installiert, um das Schwermetall, das zu über 90% als Quecksilberchlorid vorliegt, auszuwaschen [FRIEDL 1995].

Im Kraftwerk der Firma BASF in Ludwigshafen wurden schon Anfang der 90er Jahre Betriebserfahrungen zur Mitverbrennung von Klärschlämmen gewonnen, wobei der Klärschlamm in einem Trommeltrockner auf 90 - 95% TS getrocknet, als Granulat gemahlen und in einer Größenordnung von 20% bis 30% der Gesamtfeuerungsleistung (Feuerungswärmeleistung) in den Brennern des Schmelzkammerkessels verfeuert wurde.

Im kommunalen Kraftwerk Lausward, Düsseldorf wurden im Jahre 1993 versuchsweise 25% der Gesamtfeuerungsleistung getrockneter Schlamm mitverbrannt. Dadurch entstanden laut Betreiber keine Auswirkungen auf das Emissionsverhalten des Kraftwerkes [ANTKOWIAK 1994].

Weitere positive Erfahrungen bei der Mitverbrennung von Klärschlämmen wurden während eines 2 jährigen Versuchsbetriebes im Kraftwerk Weyher der Saarbergwerke AG gesammelt. Hier wurde Klärschlamm (25% der Gesamtfeuerungsleistung) mit einem Trocknungsgehalt von ca. 90% TS eingesetzt.

Weitere Untersuchungen wurden bei der Rheinbraun AG unternommen. Im Rahmen eines EU-Projektes wurden in den Jahren 1994 - 1996 am Standort des Kraftwerkes Beerenrath bei Köln sowohl Technikums- als auch großtechnische Versuche durchgeführt.

Trotz der Anhäufung positiver Erfahrungen zum Fahrverhalten bleibt es jedoch unumstritten, daß die Emissionen bestimmter Schwermetalle sowie von Dioxinen/Furanen eine bedeutende Rolle spielen. So steigt die Fracht bestimmter Schwermetalle wie Arsen, Thallium und Quecksilber in den Rauchgasen bei hohen Temperaturen. Da auch prinzipiell die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV bis zu einem Klärschlammzusatz von 25% der Feuerungswärmeleistung anteilig gelten, ist die Notwendigkeit der Durchführung einer Nullmessung gegeben, wenn die entsprechenden Grenzwerte nur in der 17. BImSchV, nicht aber in der eigenen Regelung festgelegt sind. Dies gilt besonders für die schon genannten Dioxine/Furane und einige Schwermetalle, so daß eine Nachrüstung der Rauchgasreinigung unumgänglich wird wie am Beispiel der Kölner Rheinbraun AG [POTT(b) 1997].

Ein weiterer Aspekt ist die Qualität der Reststoffe. Bei Braunkohlekraftwerken ist es üblich, daß der Kohleproduzent die Aschen zurücknimmt, um den Anlagenbetreibern Entsorgungssicherheit zu bieten. Sie werden zu Rekultivierungs- und Düngezwecken eingesetzt. Im Falle der Mitbehandlung muß ausgeschlossen werden, daß aus der Asche nach Aufbringen auf den Boden schädliche Substanzen ausgewaschen werden können.

Im Rahmen des am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Stuttgart geleitete EU-Forschungsprogramms "APAS - Clean Coal Technology Programme" wurde von Untersuchungen zur Mitverbrennung von kommunalen Klärschlämmen in Kohlestaubfeuerungen berichtet [GERHARDT ET AL. (a) 1996], [GERHARDT ET AL. (b) 1996]. Anhand von Messungen an Kohlestaubfeuerungen im Labormaßstab wurde festgestellt, daß eine Aktivierung des Calciumoxids im Klärschlamm zur Einbindung eines Teils des erhöhten Brennstoffschwefelgehaltes in der Asche nicht möglich ist. Der ansteigende SO_2-Gehalt im Abgas muß demnach von Sekundärmaßnahmen abgefangen werden. In bezug auf die Stickoxidemissionen und Dioxin/Furan-Betrachtung wurde kein signifikanter Anstieg festgestellt. Aufschluß über die gesicherte großtechnische Anwendung hinsichtlich der Verteilung der flüchtigen Spurenelemente (z.B. Quecksilber) und der Neigung der Klärschlammasche zur Verschmutzung und Verschlackung sowie der Korrosionsgefahr durch veränderte Verhältnisse der Inhaltsstoffe, wie z. B. Chlor und Schwefel zu Kalium und Calcium, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes nicht vorgenommen.

Im Rahmen eines Großversuches der Rheinbraun AG im Braunkohlekraftwerk in Ville bei Köln wurde entwässerter Klärschlamm (70% TS) über Rückfallschächte den Zyklonen der zirkulierenden Wirbelschicht zugeführt. Die Emissionswerte für SO_2 , NO_x , CO und Staub lagen dabei innerhalb der betrieblichen Schwankungsbreite. Um jedoch den Grenzwert für Quecksilber einhalten zu können, wurde eine Nachreinigung mit einem Flugstromabsorber installiert. Der beladene Altkoks aus dem Absorber wird in einer Sondermüllverbrennungsanlage als

Ölersatz verwertet. Weiterhin erhöhte sich der Ascheanfall durch die Klärschlammzugabe deutlich [SCHIFFER ET AL. 1996].

Im Hinblick auf den Einsatz weiterer Sekundärbrennstoffe in Kraftwerken sind eine Vielzahl von Planungen bekannt. Die LAUBAG beabsichtigt, im Heizkraftwerk Senftenberg im Lausitzer Revier Klärschlamm und Holz in der Braunkohlestaubfeuerung des Heizkraftwerkes einzusetzen [GREIF 1996], wobei der thermische Anteil der mitzuverbrennenden Sekundärbrennstoffe insgesamt ca. 15% der Feuerungswärmeleistung betragen soll.

Die Vereinigte Energiewerke AG in Berlin (VEAG) hat an ihrem Kraftwerksstandort Boxberg die gemeinsame Verbrennung von Klärschlamm und Braunkohle in einem großtechnischen Versuch erfolgreich erprobt. Die Mitverbrennung erfolgte in einem 500-MW-Block mit Staubfeuerung. Der Klärschlammanteil lag bei max. 2% der Feuerungswärmeleistung. Im Mai 1998 wurde ein Antrag auf Genehmigung zur Mitverbrennung von ca. 130.000 Mg/a Klärschlamm (30% TS) positiv beschieden [LUDWIG 1998].

Im Werk Dormagen der Firma Bayer wurde ein Großversuch zur energetischen Verwertung von gebrauchten Kunststoffen als Zusatzbrennstoff zur Kohle durchgeführt [WEIGAND ET AL. 1996]. Polyurethan (PUR-Pulver) mit einem Heizwert von 24 - 30 MJ/kg wurde direkt in die Wirbelschicht eingeblasen bei 20% Anteil an der Feuerungswärmeleistung. Insgesamt wurden ca. 21 Mg PUR-Schaumstoff verfeuert. Das Material wurde auf eine Partikelgröße von weniger als 0,5 mm pulverisiert, um einen pneumatischen Transport zu ermöglichen. Die Ergebnisse waren insgesamt positiv. Allerdings gibt es Limitierungen für den Gehalt an Schwefel, Chlor, Fluor und an Schwermetallen.

2.1.2.3 Stahlwerke bzw. Hochöfen

Bezüglich des Einsatzes einer hochkalorischen Fraktion in Hochöfen werden nur die Kohlenwasserstoffe als Reduktionsmittel angesehen, alle anderen Bestandteile sind Störstoffe und könnten den Prozeßablauf beeinträchtigen. Dadurch kristallisieren sich hohe Anforderungen hinsichtlich der Korngröße sowie des Chlor- (< 1,5 %), Alkalien- und Kupfergehaltes heraus. Darüber hinaus sollen Asche-, Schwefel- und Wassergehalte niedrig sein.

Besonderes Augenmerk muß auf die Aufbereitung der Abfälle gelegt werden, wobei eine Ausschleusung von PVC, Elektronikschrott und von Kabelresten vorgenommen werden muß [URBAN, FRIEDEL 1997].

Der Einsatz von Altkunststoffen im Hochofenprozeß wird schon seit längerem praktiziert. Vorreiter war die Bremer Stahlwerke GmbH, die das Bremer Hochofen Verfahren (BHV-

Verfahren) entwickelt und erprobt hat. Es erlaubt die Substitution von Schweröl durch Kunststoffabfälle, welche nach Zerkleinerung und Granulation dem unteren Teil des Hochofens zugeführt werden. Bei ca. 2000°C zerfallen die Polymere [ROTHENBERG 1995]. Es entsteht CO, das bei diesen hohen Temperaturen ein starkes Reduktionsmittel darstellt. In einem Erfahrungsbericht der Betreiber wurde der hohe Ascheanteil in den Kunststoffen im Vergleich zum ursprünglich eingesetzten Öl als kritisch betrachtet. Die Mitbehandlung von DSD-Sortierresten führte zu einer Erhöhung des Anteils der festen Reststoffe und des Abwasseranfalls um 8% respektive 2,5%. Der PVC-Eintrag stellte ein Problem dar und führte zu ungünstigen Auswirkungen auf die Emissionen, so daß die Rauchgasreinigung des Winderhitzers modifiziert werden mußte. Darüber hinaus haben sich in den ersten 9 Monaten die Anlagenstörungen durch den Einsatz von Kunststoffen als ein ernstes Problem herausgestellt. Weiterhin ist eine aufwendige Kontrolle hinsichtlich der zulässigen Eingangswerte notwendig.

Auch weitere "kohlenstoffhaltige Produkte" wurden durch die Bremer Stahlwerke zum Einsatz als Reduktionsmittel im Hochofen betrachtet. So wurde über Versuche zum Einsatz von Lackschlämmen berichtet. Pläne existieren auch zur Mitverbrennung von Hausmüll nach einer entsprechenden Vorbehandlung (Trocknung, Erhitzung, Verfestigung und anschließende Zerkleinerung) [ROTHENBERG 1995]. Jedoch könnte die heterogene Zusammensetzung des Hausmülls dem empfindlichen Hochofenprozeß Probleme bereiten. Darüber hinaus wurden Überlegungen angestellt, Teppichabfälle als Reduktionsmittel einzusetzen. Ein erster Betriebsversuch wurde 1994 durchgeführt. Bedingung war jedoch, daß der Gehalt an PVC und Chlor nicht höher als 0,5 Gew.-% betragen darf [LAHL 1995].

Im Jahre 1995 hat auch die Krupp-Hoesch Stahl AG in Dortmund den Einsatz von Kunststoffabfällen in deren Hochöfen erprobt. Die Thyssen Stahl AG sowie die Hüttenwerke Krupp-Mannesmann (HKM), beide in Duisburg, hatten auch Versuche mit Kunststoffabfällen durchgeführt.

Andere Stahlproduzenten, wie EKO Stahl in Eisenhüttenstadt, bevorzugten den Einsatz von Shredder-Rückständen als Reduktionsmittel. Während eines Testversuches im Jahre 1995 wurden rund 100 Mg einer agglomerierten Leichtfraktion, die mittels des Verfahrens der Firma Thyssen Henschel aufbereitet wurde, eingesetzt.

An der RWTH Aachen wurde der Einsatz von reinem Polyethylen, DSD-Fraktionen und einer Shredderleichtfraktion in einer Hochofen-Laboranlage untersucht [GUDENAU 1996].

Folgende Ergebnisse sind zu erwähnen:

- Die einsetzbare Menge an DSD-Kunststoffen im Hochofen ist begrenzt.
- Beim Einsatz von Shredderleichtfraktionen verschlechterte sich der Umsetzungsgrad mit zunehmendem Anteil des Einsatzgutes.
- Der Kupferanteil in der Shredderleichtfraktion führte zu Problemen, da dieser sich im Roheisen löst und zu Verunreinigungen führt.
- Ein hoher Inertanteil führte zur Verschlechterung der Schlacke.

2.2 Thermische Behandlung in spezifischen Anlagen

Mit spezifischen Anlagen sind Anlagen gemeint, die ausschließlich zur Behandlung einer bestimmten Monofraktion konzipiert wurden.

Prinzipiell kommen in spezifischen Anlagen folgende Verfahrensprinzipien zur Anwendung: Die Verbrennung (Rostfeuerung, Wirbelschichtfeuerung, ...), die Pyrolyse, die Vergasung und die Kombinationsbehandlung [SCHMAND 1996].

Für spezifische Anlagen sind folgende Konzepte zu beobachten:

- Dezentrale Anlagen für die thermische Behandlung heizwertreicher Monofraktionen. Dies sind Anlagen, die über eine eigene Infrastruktur verfügen.
- Thermische Mitbehandlung heizwertreicher Monofraktionen im Anlagenverbund. Darunter werden Anlagen verstanden, welche sich mit Industrieanlagen die Infrastruktur teilen.

Allerdings kommen die oben erwähnten Verfahrensprinzipien nicht gleichermaßen zur Anwendung, wie weiter unten diskutiert wird.

2.2.1 Spezifische Behandlung in dezentralen Anlagen

Dezentrale Anlagen werden hauptsächlich als Verbrennungsanlagen konzipiert.

Tabelle 2-2 stellt einige Beispiele dezentraler Anlagenkonzepte dar. Hervorzuheben sind die vorgenommenen Umbauten älterer Braunkohlekraftwerke (Brand-Erbisdorf) und Müllverbrennungsanlagen (MHKW Kempten) in energetische Altholzverwertungsanlagen.

Tabelle 2-2: Beispiele dezentraler Anlagen zur thermischen Behandlung heizwertreicher Fraktionen

Quelle	Betreiber	Standort	Status	Abfall		Verfahren	
				Kapazität/ Menge	Art	Art der Feuerung	Basis
[PAULSEN 1996]	Elektrizitätswerk Wesertal GmbH	Kraftwerk Afferde, Hameln	In Betrieb seit 1996	35 – 40 Mg/h (225.000 Mg/a)	Altholz	Rostfeuerung	Fernwärmeblock
[KUCHTA, JAGER 1997]	Mitteldeutsche Energieversorgung AG (MEAG), Harpen AG, Edelhoff AG	--	Planung	120.000 Mg/a	Unbehandeltes, beschichtetes, lackiertes und imprägniertes Holz	--	Neubau Heizkraftwerk
[ENTSORGUNGS PRAXIS 6/98]	ZAK-Energie GmbH	MHKW Kempten	--	16.000 Mg/a	Wald-, Säge-, Rest- und Altholz	Rostfeuerung (wassergekühlt)	Umbau einer Linie des MHKW
[LAUTENSCHLAGER ET AL. 1998]	Söderenergie AB	Stockholm	Probebetrieb seit Januar 1998	--	Holz, Papier, Kunststoff, Altreifenschnitzel	Rostfeuerung (wassergekühlt)	Umbau eines Heißwasserkessels auf Basis von Kohle/Öl
[MÜLL UND ABFALL 5/98]	--	Brand-Erbisdorf	Inbetriebnahme voraussichtlich September 1999	75.000 Mg/a	Altholz	--	Umbau eines Dampferzeugers auf Basis von Braunkohle
[STANA ET AL. 1998]	RVL Reststoffverwertung	--	In Bau	150.000 Mg/a	Kunststoff-Folien, Papier, Textilien, Kartonagen, Klärschlämme, Holzabfälle, Rechengut (ABA)	Wirbelschicht-feuerung	Neubau Industrieheizkraftwerk
[SPUZIAK-SALZENBERG 1998]	Bremer Entsorgungs-betriebe	--	Planung	--	Sekundärreststoffe	--	Neubau Industrieheizkraftwerk
[HIEMER 1998]	--	HKW Hagenow	In Betrieb seit 1997	3,7 Mg/h (25.000 Mg/a)	Naturbelassenes Holz, gestrichenes, lackiertes, beschichtetes Holz, Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten	Rostfeuerung	Umbau Heizwerk Hagenow
--	NV Avira, CDEM Holland BV	Duiven/ Niederlande	Inbetriebnahme voraussichtlich 2000	200.000 Mg/a	Papierschlamm	Wirbelschicht	Neubau Heizkraftwerk
[ENTSORGUNGS PRAXIS 5/98]	PNEM	Cujik/ Niederlande	Inbetriebnahme voraussichtlich 1999	250.000 Mg/a	Holzhackschnitzel	--	Neubau Heizkraftwerk

Die geplanten und realisierten Anlagen sind jedoch vorwiegend für größere Durchsätze vorgesehen (150.000 bis 250.000 Mg/a). Ausnahmen bilden die schon oben erwähnten Umbaumaßnahmen, die sich auf eine einzige Linie der ursprünglichen Anlage beziehen. Die dabei realisierten Durchsätze liegen in der Größenordnung von 25.000 Mg/a.

Der Zusammenhang zwischen spezifischen Behandlungskosten und der Anlagengröße favorisiert das Errichten größerer Anlagen, wie Abbildung 2-2 am Beispiel von Hausmüllverbrennungsanlagen mittels der Rostfeuerungstechnologie entnommen werden kann.

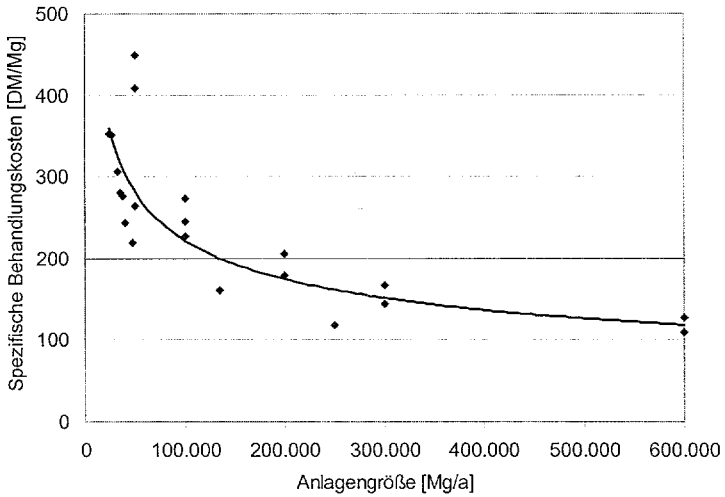


Abbildung 2-2: Spezifische Behandlungskosten in Abhängigkeit der Anlagengröße bei Rostfeuerungsanlagen (siehe auch Anhang D)

Um die Realisierung von Kleinanlagen (bis ca. 50.000 Mg/a) attraktiver zu gestalten, wurden Konzepte zur Senkung der Investkosten entwickelt. Diese setzen sich zu ca. 70% aus den Investitionen des Apparate- und Maschinenteils zusammen mit den nach Abbildung 2-3 aufgezeigten Hauptanteilen.

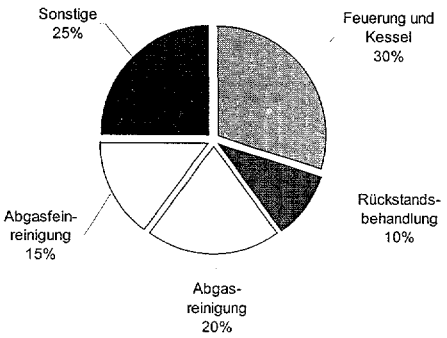


Abbildung 2-3: Typische Verteilung der Investitionen im Bereich der Apparate- und Maschinentechnik (in Anlehnung an [BORN 1998])

Folgende Schwerpunkte wurden gewählt:

- Errichtung einliniger Anlagen mit einem einfachen Verbrennungskonzept: Hierbei können die Kosteneinsparungen, bezogen auf die Apparate- und Maschinentechnik, bis zu 25% betragen. Bei Anlagenstillständen wird jedoch eine Alternative zur Zwischenlagerung bzw. Entsorgung notwendig (Kooperationen mit anderen Verbrennungsanlagen, Zwischenlagerung ....) [KNÖRR 1997].

- Zweckmäßige Rauchgasreinigungsanlagen ohne deutliche Unterschreitung der gesetzlichen Vorgaben mit den folgenden wesentlichen Stufen: Staubabscheidung, HCl-, SO_2-, Hg-Abscheidung als Reinigungsstufen und NO_x-Reduzierung und Entdioxinierung (bzw. Polizeifilter) zur Feinreinigung. Zur Entlastung der Rauchgasreinigungsanlage, um dadurch den Bau überdimensionierter Anlagen zu vermeiden, wird die Anwendung des SNCR-($DeNO_x$) Verfahrens in der Nachverbrennungszone und die verstärkte Staubabscheidung im Kesselbereich empfohlen. Die Einbindung einer Schadstoffvorabscheidung durch Eindüsen von $Ca(OH)_2$ im optimalen Temperaturfenster des Kesselzuges ermöglicht eine weitere Entlastung der Abgasreinigung. Weiterhin eröffnet der Einsatz von Aktivkoks als Adsorbens zur Feinreinigung die Möglichkeit, die kostengünstigeren trockenen und quasitrockenen Abgasreinigungstechniken anzuwenden.

- Verzicht auf eine Reststoffnachbehandlung

- Vereinfachungen in der Bauweise der Anlage: Beispiele sind die Konzeption der Rauchgasreinigungsanlage als Freiluftanlage, die Anwendung der Industrieanlagenbauweise (Stahlskelettbau), simple Überdachung des Anlieferungsbereiches, Anfahrrampe zum Bunker anstelle der Absenkung in das Erdreich.

Im folgenden werden Beispiele dieser Konzepte beschrieben:

Das **Steinmüller-Modulkonzept** für dezentrale Restmüllverbrennungsanlagen sieht z. B. Anlagen mit einem stündlichen Durchsatz von 6,5 Mg/h je Linie vor. Die Kompaktanlage wird in Modulbauweise angeboten und verfügt über folgende Besonderheiten im Hinblick auf die Kostenreduktion [SCHUMACHER ET AL. 1996]:

- eine einfache Einfahrschleuse im Anlieferungsbereich,
- einbahnige Ausführung des Rostes (3 Sektionen),
- ein hängender Kessel in Vertikalzugbauweise,
- eine SNCR-Stufe, wobei die Eindüsung von 25%-igem Ammoniakwasser mit Hilfe von Dampf in den ersten Kesselzug erfolgt,
- die Rauchgasreinigung besteht aus einem Sprühabsorber zur Abscheidung der sauren Schadgase mit Hilfe von Kalk und einem Gewebefilter mit Aktivkokseindüsung zur Abtrennung von Staub, Schwermetallen und Dioxinen/Furanen.

Das Konzept der **Firma Martin** für kostenoptimierte Kleinanlagen mit einer Bandbreite von 25.000 bis 55.000 Mg/a sieht keinen wassergekühlten Rost vor. Die Behandlung heizwertreicher Abfälle (bis ca. 16 - 17 MJ/kg) ist laut Hersteller in den Anlagen der Standardbaureihe prinzipiell möglich. Die Anlagen sind einlinig konzipiert.

Die Abgasreinigung besteht aus einer nichtkatalytischen NO_x-Minderungsstufe (SNCR-Verfahren), einer abwasserfreien Abgasbehandlung mit trockenem Reaktionsprodukt, bestehend aus Sprühabsorber mit nachgeschaltetem Gewebefilter. Die Dosierung von Herdofenkoks erfolgt in dem Abgasstrom vor dem Sprühabsorber zur Adsorption von Dioxinen/Furanen und zur Restabscheidung flüchtiger Schwermetalle (z. B.: Quecksilber). Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV werden damit gesichert. Eine darüber hinausgehende Absenkung auf 50% der BImSchV-Werte ist nicht vorgesehen. Die Anlagen werden im Bereich der Abgasreinigung als Freianlagen ausgeführt [KANNHEISER 1998].

Ein weiteres vergleichbares Konzept ist die von der **Firma Techform** angebotene einlinige Kompaktanlage, die vorwiegend für die Behandlung heizwertreicher Abfälle einsetzbar ist. Ein wassergekühlter Verbrennungsrost mit angepaßter Feuerleistungsregelung bildet das Kernstück der gesamten Anlage.

Zur Entstickung der entstandenen Abgase wird das Verfahren der selektiven nichtkatalytischen Reduktion (SNCR) mit dem Additiv Ammoniakwasser eingesetzt. Die weitere Abgasreinigung ist als konditionierte Trockensorption mit dem Additiv Bicarbonat, einer Eindüsung von Herdofenkoks und nachgeschaltetem Gewebefilter konzipiert.

Die Schwerpunkte der Optimierung in den Bereichen Feuerung, Kessel und Rauchgasreinigung bei der klassischen Müllverbrennung unter ökonomischen Gesichtspunkten bei der Verfahrensauswahl wurden von FRITZ und LORSON am Beispiel des Konzeptes der **Firma Noell** dargestellt und sind im folgenden zusammengefaßt:

Da die angelieferten Abfälle starken Schwankungen in der Zusammensetzung und des Heizwertes unterworfen sind, wird der Einbau eines wassergekühlten Rostes empfohlen. Daraus ergeben sich folgende Vorteile:

- Keine Einschränkung des Rostbetriebes
- Reduzierung des thermischen Verschleißes und dadurch Erhöhung der Standzeit
- Verringerung des Rostdurchfalls
- Entkopplung der Prozesse "Rostkühlung" und "Verbrennungsführung"
- Gleichmäßige Luftverteilung über der Rostfläche

Weiterhin kann die Durchmischung der Abgase am Eintritt des ersten Kesselzuges durch die Abgasrezirkulation erfolgen. Damit wird ein guter Gasausbrand und ein gleichmäßigeres Temperaturprofil im Kessel erzielt.

Im Hinblick auf die Rauchgasreinigungsanlage werden einfachere Konzepte, die niedrige Investitions- und Betriebskosten und trotzdem eine hohe Betriebssicherheit aufweisen, favorisiert. Das Konzept besteht aus einem Verdampfungskühler und einem nachgeschalteten Gewebefilter zur Entstaubung und Restabscheidung der Schadgase. Durch Zugabe eines Additives werden die im Rauchgas vorhandenen Schwermetalle, Dioxine und Furane adsorptiv gebunden. Die Entstickung der Rauchgase erfolgt mittels eines High-Dust-Katalysators [FRITZ, LORSON 1998].

Die oben betrachteten Konzepte im Bereich der thermischen Abfallbehandlung zeigten, daß sich generell Reserven in der Kostenstruktur aufdecken lassen. Diese werden bei Konzepten für Neuanlagen bereits berücksichtigt.

Allgemein läßt sich feststellen, daß eine maßgebliche Kostenreduzierung bei zukünftigen Investitionen dezentraler - und zentraler - Anlagen damit erreicht werden kann, wenn im Rahmen der Planungsgenehmigung keine über die 17. BImSchV hinausgehenden Anforderungen an den Bau und die Emissionen der Anlagen gestellt werden.

Für die anschließende Baurealisierung kommen derartige Verfahrenstechniken in Betracht, die preisgünstig die Planfeststellungsauflagen erfüllen. Dies läßt sich einerseits durch bausteinähnliche Einzelmodule in einer Gesamtanlage realisieren; andererseits sollen preisgünstige Verfahrenslösungen wie z. B. das Additiv-Verfahren anstelle von kostenaufwendigen Verfahren zum Einsatz kommen. Des weiteren soll eine Vergleichmäßigung der Systeme vorgenommen werden, wobei zunehmend Industriestandards und preiswerte Bauelemente anstelle aufwendiger, massiver Fassadenelemente eingesetzt werden [REIMANN 1998].

2.2.2 Spezifische Behandlung im Anlagenverbund

Die Gestaltung als Anlagenverbund zwischen einer spezifischen Anlage zur Behandlung heizwertreicher Abfälle und einer bestehenden Industrieanlage bietet sich insbesondere dann an, wenn die spezifische Anlage ein brennbares Gas produziert, mit dem Brennstoffe substituiert werden können. Als Verfahren kommt der Vergasungs- oder Pyrolyseprozeß in Frage. Potentielle Industrieanlagen, die sich für einen solchen Verbund eignen, sind Zementdrehrohröfen, Kraftwerke, ...

Im Verbund werden Kostenvorteile erzielt, die für kleine Anlagengrößen besonders attraktiv sind. Potentielle Einsparmöglichkeiten gibt es bei Grundstück und Erschließung, beim Personal, ...

Beispiele zur Konzeption als Anlagenverbund listet Tabelle 2-3.

Tabelle 2-3: Beispiele für die thermische Behandlung heizwertreicher Fraktionen im Anlagenverbund

Quelle	Betreiber	Standort	Status	Abfall		Verfahren		Verbund mit
				Kapazität / Menge	Art	Art des Reaktors	Therm. Leistung	
[STAHL, NEERGAARD 1996]	Sydkraft AB	Värnamo/ Schweden	Demonstrationsanlage In Betrieb seit 1995	--	Vorwiegend industrielle Holzabfälle	Druckaufgeladener Vergaser (18 bar)	18 MW	Abhitzekessel
[GREIL, HIRSCHFELDER 1999]	Rüdersdorfer Zement	Rüdersdorf	In Betrieb seit 1996	--	Aschen, Filterrückstände, Altgummi, Altholz, Sortierreste aus Papier- und Kunststoffindustrie, Spuckstoffe	Zirkulierender Wirbelschichtvergaser (ZWS-Gaserzeuger)	100 MW	Zementdrehrohrofen
[GREIL, HIRSCHFELDER 1999]	--	Pöls/ Österreich	In Betrieb seit 1987	--	Baumrinde	Zirkulierender Wirbelschichtvergaser (ZWS-Gaserzeuger)	27 MW	Kalkdrehrohrofen
[GREIL, HIRSCHFELDER 1999]	--	Bioelettrica/ Italien	Inbetriebnahme voraussichtlich 2000	--	Holz	Zirkulierender Wirbelschichtvergaser (ZWS-Gaserzeuger)	12 MW	Gas-/Dampfturbinenkraftwerk
[GREIL, HIRSCHFELDER 1999]	--	Geertruidenberg/ Niederlande	Inbetriebnahme voraussichtlich 2000	150.000 Mg/a	Abfallholz	Zirkulierender Wirbelschichtvergaser (ZWS-Gaserzeuger)	85 MW	Kohlekraftwerk
[LESKE 1995]	SVZ - Schwarze Pumpe	Schwarze Pumpe	In Betrieb	--	Mischkunststoffe, Klärschlamm, belastetes Holz, Shredderleichtgut, ölhaltige Betriebsmittel, belastete Industrieabfälle	Festbettdruckvergasung, Flugstromvergasung	--	Kombikraftwerk, Gipsfabrik, Methanolsynthese
[ENTSORGUNGS PRAXIS 11/98]	VEW Energie AG	Kraftwerk Hamm-Uentrop	Inbetriebnahme voraussichtlich 2000	100.000 Mg/a	Heizwertreiche Rückstände	Pyrolysedrehrohrofen	--	Kohlekraftwerk
[SCHINGNITZ, FRITZ 1997]	--	--	Verfahrenskonzept	--	--	Noell-Verfahren (Pyrolyse und Flugstromvergasung)	--	Kraftwerke

2.3 Gegenüberstellung der Behandlungsmöglichkeiten

In Tabelle 2-4 werden die diskutierten Behandlungsmöglichkeiten einander gegenübergestellt.

Tabelle 2-4: Möglichkeiten zur Behandlung heizwertreicher Monofraktionen

	Vorteile	Nachteile
Mitverbrennung in den Feuerräumen von MVA´s	✓ Keine Notwendigkeit für eine neue Anlage	✓ Erhöhte thermische Belastung des Feuerraumes ✓ Reduzierung der zur Verfügung stehenden Behandlungskapazität
Mitverbrennung in industriellen Anlagen	✓ Substitution von Brennstoffen ✓ Keine Notwendigkeit für eine neue Anlage	✓ Mengenbeschränkung ✓ Eventuelle Modifikation der Rauchgasreinigung ✓ Qualität der Endprodukte
Dezentrale Anlagenkonzepte	✓ Spezifische Behandlung	✓ Hohe Kosten der Anlagentechnik
Anlagenverbund mit industriellen Anlagen	✓ Spezifische Behandlung ✓ Substitution von Brennstoffen ✓ Ersparnisse in der Anlagentechnik	✓ Unterschiedliche Genehmigungssituation ✓ Eventuelle Modifikation der Rauchgasreinigung
Bestehende Abfallverbrennungsanlagen	✓ Modernste Technik ✓ Effektive Rauchgasreinigungsanlagen	✓ Komplexe und teuere Anlagentechnik ✓ Überdimensionierte Schnittstellen (Kessel/Rauchgasreinigung) ✓ Hohe Behandlungskosten

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß der Einsatz heizwertreicher Monofraktionen in bestehenden Anlagen nur begrenzt möglich ist. Hervorzuheben sind die verfahrenstechnischen Hindernisse bei Müllverbrennungsanlagen. Bei den industriellen Prozessen spielen die genehmigungsrechtlichen Restriktionen und behördlichen Auflagen im Hinblick auf die Einstufung und Eignung des Industrieprozesses, die notwendige Vorbehandlung der Abfälle sowie die Notwendigkeit der Einhaltung strikter Orientierungswerte eine bedeutende Rolle.

So bleibt der Weg der Mitverbrennung für viele Industrieabfälle sowie heizwertreiche Monofraktionen verschlossen. Weiterhin sind die begrenzten Mengen an einzusetzenden Abfällen im Prozeß ein limitierender Faktor.

Die spezifische Behandlung sowie die Flexibilität sind der Hauptvorteil bei den aufgezeigten dezentralen Anlagenkonzepten. Hauptnachteil sind jedoch die steigenden spezifischen Kosten. Kostengünstige Anlagenkonzepte im Bereich der Hausmüllverbrennung zeigen viele Gemein-

samkeiten auf: dezentrale Konzepte zur sicheren Auslastung der Anlage, vereinfachte Rauchgasreinigungsanlagen zur Einhaltung der 17. BImSchV (ohne weitere Unterschreitungen), vereinfachte Bauweise, flexiblere und optimierte Verbrennung, ...

Diese Konzepte sind auf den Bereich der thermischen Behandlung heizwertreicher Abfälle übertragbar.

Eine weitere Kosteneinsparung bei Anlagen mit kleinen und mittleren Durchsätzen ist durch die Errichtung von Reaktoren zur Behandlung heizwertreicher Abfälle im Anlagenverbund, mit bereits bestehenden Kraftwerken, realisierbar.

Festzustellen ist, daß bei den aufgezeigten Konzepten die Nutzung der Standorte bestehender thermischer Abfallbehandlungsanlagen sowie das enorme Erweiterungspotential dieser Anlagen unberücksichtigt bleiben.

3 HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen

Nach dem Innovationsschub im Hinblick auf die Entwicklung der Sekundärmaßnahmen zur weiteren Reduktion der Emissionen sowie zur Verbesserung der Qualität der verbleibenden Produkte und Reststoffe bei thermischen Abfallbehandlungsanlagen wird ein größeres Augenmerk den Primärmaßnahmen geschenkt, um den Anlagenbetrieb in jeder Hinsicht noch umweltfreundlicher und besonders kostengünstig zu gestalten.

Wie in Kapitel 2.2 zu erkennen ist, ist die verfahrenstechnische Entwicklung bei thermischen Abfallbehandlungsanlagen durch die Betrachtung und Optimierung der Grundoperationen geprägt. Die Erfahrungen der vergangenen Jahre bei chemischen Produktionsstätten haben jedoch gezeigt, daß ein erhebliches Entwicklungspotential in der verfahrenstechnischen Betrachtung der Gesamtverfahren liegt [OTTEN, HOFFMAN 1996]. Die Effizienz industrieller Standorte - auch die Standorte von Abfallverbrennungsanlagen - wird in Zukunft vom Zusammenwirken ineinandergreifender Anlagenteile bestimmt.

So stehen im Vordergrund der Betrachtungen die über die Einzelanlagen hinausgehenden Optimierungsmöglichkeiten durch die Schaffung eines Anlagenverbundes.

Die Zielgrößen bei der Optimierung eines Anlagenverbundes sind, neben den wirtschaftlichen Parametern, hohe Ausbeute, geringer Energieeigenbedarf, hohe verfügbare Anlagenkapazität sowie Anlagenflexibilität am Standort.

3.1 Definition von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen

Eine thermische Anlage bzw. ein thermisches Verfahren wird aus der verfahrenstechnisch kleinsten Einheit, der Grundoperation, aufgebaut. Wie aus Abbildung 3-1 zu erkennen ist, besteht eine Abfallverbrennungsanlage aus der Grundoperation bzw. Einheit: Verbrennungsanlage und Energieerzeugung. Diese Einheit liefert zum Teil aber nur Vor- und Zwischenprodukte, so daß zum Erreichen des Endproduktes mehrere Anlageneinheiten verschaltet werden müssen. Die technische Komplexität dieser Einheiten wird maßgeblich durch die Anforderungen des Immissions- und Gewässerschutzes beeinflußt.

Außerdem benötigen die Verfahren Aufarbeitungs- und Nachbehandlungsanlagen, um eine Verwertung oder Entsorgung der entstehenden Reststoffe zu ermöglichen. Auch hier sind die Investitionsentscheidungen abhängig von den gesetzlichen Rahmenbedingungen der Deponierung oder Endlagerung sowie von den Anforderungen an die Produktqualität im Fall einer Verwertungsmöglichkeit.

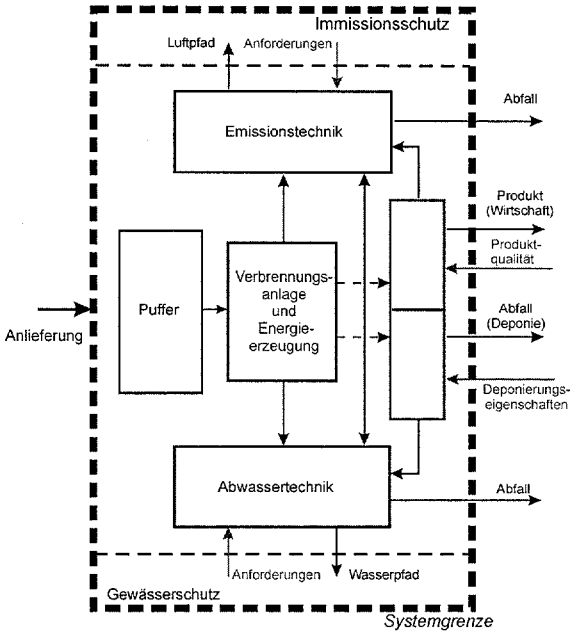


Abbildung 3-1: Systemgrenze einer Abfallverbrennungsanlage

Durch die Installation aufwendiger Sekundärmaßnahmen sowie die Durchführung von Nachrüstungen bei Altanlagen in den letzten Jahrzehnten erfüllen bzw. unterschreiten bestehende Abfallverbrennungsanlagen weitgehend die oben erwähnten gesetzlichen Anforderungen.

Bewegt man sich nun innerhalb der vordefinierten Systemgrenze einer Anlage und unternimmt den Versuch, die Anzahl der wechselwirkenden Anlageneinheiten zu erhöhen, so geschieht dies unter der Voraussetzung, daß die Anforderungen und die Wechselwirkungen zwischen Systemgrenze und Umgebung unverändert bleiben. Dies ist die Basis der Errichtung von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen.

Definition

> Eine *HYBRID-Abfallbehandlungsanlage* ensteht aus der Integration von Reaktoren zur Behandlung heizwertreicher Monofraktionen in bestehende Abfallverbrennungsanlagen.

Die folgenden Beispiele für HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen demonstrieren die Erhöhung der Flexibilität des Verbundes hinsichtlich der Behandlung unterschiedlicher Abfallarten:

- Integration eines Pyrolysedrehrohrs zur Behandlung von Elektronikschrott und Leiterplatten in eine bestehende Klärschlammverbrennungsanlage,
- Integration einer thermischen Bodenreinigungsanlage in eine Hausmüllverbrennungsanlage,
- Integration einer Shredderanlage in eine Hausmüllverbrennungsanlage,
- Integration einer Altholzvergasungsanlage in eine Sonderabfallverbrennungsanlage,
- Integration einer Kunststoffvergasungsanlage in eine Sonderabfallverbrennungsanlage.

Am Beispiel der Vergasungsanlage und/oder Pyrolyseanlage ergibt sich weiterhin die Möglichkeit, Hilfsbrennstoffe durch das erzeugte Schwach-/Pyrolysegas zu substituieren, womit Kostenvorteile erzielt werden können.

Näher betrachtet wird das Beispiel der Shredderanlage (siehe Abbildung 3-2).

Hausmüll und ähnliche Gewerbeabfälle werden in den Bunker der bestehenden Anlage angeliefert und durchlaufen die hintereinander geschalteten Stufen der Anlage vom Feuerraum, dem Kessel, über die Rauchgasreinigung bis zum Kamin. Die heizwertreichen Abfälle werden separat angeliefert, einer eventuellen Vorbehandlung (Zerkleinerung, Vorsortierung ...) unterzogen und in den Reaktor der separaten Feuerungsanlage eingeführt. Das erzeugte Rauchgas wird in dem angeschlossenen separaten Kessel abgekühlt und in der bestehenden Rauchgasreinigungsanlage mitbehandelt.

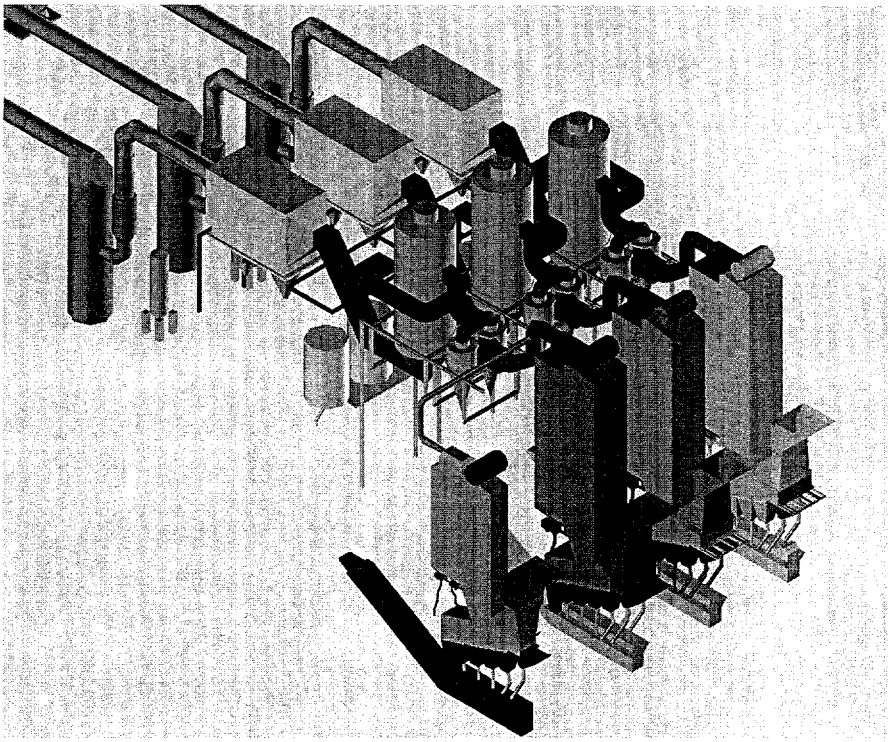


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung einer HYBRID-Abfallbehandlungsanlage

3.2 Konzeption von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen

Zur Konzeption einer HYBRID-Abfallbehandlungsanlage wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Ermittlung des Bedarfs an Behandlungskapazitäten am Standort
- Beurteilung der Erweiterungsmöglichkeiten am Standort
- Beurteilung der Bereitschaft zur Änderung der Verwaltungsstrukturen und zur Übernahme von Akquisitionsaufgaben

- Ermittlung der Rauchgasmenge, die in der bestehenden Anlage unter Vollast mitbehandelt werden kann
- Ermittlung des Platzbedarfs für das Aufstellen der zusätzlichen Apparate und der Mischstrecken und Rohrleitungen
- Untersuchung der zusätzlichen Belastung der Infrastruktur
- Beurteilung der Chancen zur Genehmigung der Erweiterung bzw. Änderung
- Analyse der Kosten
- Entscheidung über die Investition

4 Simulation des Müllheizkraftwerkes Darmstadt mittels AspenPlus™

4.1 Einleitung

Die Konzeption von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen erfordert die Berücksichtigung einer Reihe von Randbedingungen, die zunächst in den Spezifika der Altanlage ihre Ursache haben. Detaillierte Kenntnisse über den Ist-Zustand der Anlage sind daher essentiell zur Analyse des Potentials zur Integration weiterer Reaktoren. Zu den hierzu benötigten Informationen zählen die Auslegungsdaten (Ausschreibungsunterlagen, Herstellerangaben, ...), Daten der Prozeßführung und vor allem die Erfahrungen des Betreiberpersonals. Aufgrund einer Reihe von Untersuchungen, die das Institut WAR in Zusammenarbeit mit dem Müllheizkraftwerk Darmstadt durchgeführt hat, bietet sich dieses als Referenzanlage an.

Die Integration eines weiteren Reaktors führt zwangsweise zu Verschiebungen in der Bilanz des Gesamtsystems. Diese Verschiebungen vorauszusagen ist wiederum notwendig, um die Machbarkeit einer solchen Integrationsmaßnahme überhaupt beurteilen zu können. Hier kommt der **Prozeßsimulation** eine wesentliche Bedeutung zu.

Eine thermische Anlage mit Rauchgasreinigung besteht aus mehreren stofflich und energetisch gekoppelten Einheiten und stellt somit einen komplexen verfahrenstechnischen Gesamtprozeß dar. Zum Verständnis des Verhaltens der Gesamtanlage wird es - aufgrund der Vielzahl von Variablen und Interaktionen - notwendig, nicht nur einzelne Komponenten zu simulieren, sondern eine **Gesamtprozeßsimulation** durchzuführen.

Im Bereich der chemischen und thermischen Verfahrenstechnik haben sich verschiedene kommerzielle Simulationsprogramme für die Modellierung von Gesamtprozessen etabliert, z. B.:

- AspenPlus™ der Fa. AspenTechnology, Inc. (USA/Cambridge, Massachusetts)
- ChemCAD der Fa. ChemStations, Inc. (USA/Houston)
- Pro Designer® der Fa. Intelligen, Inc. (USA/NJ)

Die genannten Programme beinhalten eine Reihe von Modulen zur Simulation von Apparaten. Beispiele sind: Zentrifuge, Zyklon, Hydrozyklon, Mühle, Venturiwäscher, Mischer, Separator, Filter, Wärmetauscher, Flashverdampfer, Absorber, Destillationskolonne, Extraktor und Chemiereaktoren. Diese Module können in einem Fließbild auf einer graphischen Benutzeroberfläche zum gewünschten Prozeß konfiguriert werden. Anschließend wird der „Feedstrom" festgelegt und jedes Modul hinsichtlich der Anforderungen an den Prozeß mit den erforderlichen Größen belegt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnung zeigen dann, ob der Prozeß in der gewählten

Ausführung sinnvoll durchführbar ist. Darüber hinaus können spezifische chemische Grundoperationen in einer Entwicklungsumgebung definiert und in den Prozeß eingebunden werden. Vorwiegend kommen FORTRAN und C** als Programmiersprachen zur Anwendung.

Die Programme haben unterschiedliche Anwendungsschwerpunkte, was die Auswahl vordefinierter Module bestimmt.

Für die vorliegende Arbeit wurde das Programm AspenPlus™ gewählt aufgrund programmiertechnischer Vorteile und der bekannten Nutzung im Bereich der thermischen Abfallbehandlung sowie der Energietechnik: [BEHNKE ET AL. 1997], [KURKELA ET AL. 1992], [YANG ET AL. 1991], [FARAG ET AL. 1991], [SUNDKVIST 1991] ...

Zur Erstellung der Gesamtprozeßsimulation wurde wie folgt vorgegangen:

- Eignungsprüfung von AspenPlus™ zur Darstellung einer gesamten thermischen Abfallbehandlungsanlage (Hauptaggregate, Nebenaggregate, Chemie ...),
- Anpassen bestehender Module an die Verfahrensstufen des MHKW Darmstadt,
- Test der einzelnen Verfahrensstufen: Überprüfung des Abscheidegrades, der chemischen Reaktionen, des Temperaturverlaufs, der Gleichgewichtsbedingungen ...,
- Sequentielle Integration der einzelnen Modelle in die Gesamtprozeßsimulation,
- Schnittstellentests,
- Validierung der Gesamtprozeßsimulation.

Zunächst folgt eine Beschreibung des MHKW Darmstadt und des Grundmodells der Simulation. Anschließend wird die Validierungsstrategie vorgestellt, auf deren Basis bestehende Modelle ausgewählt bzw. angepaßt wurden oder, wo notwendig, neue Modelle erstellt wurden.

4.2 Anlagenbeschreibung

Die Haupteckdaten des Müllheizkraftwerkes Darmstadt sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Tabelle 4-1: Haupteckdaten des Müllheizkraftwerkes Darmstadt [ZAS 1997]

Abfallarten		Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbemüll, Sperrmüll		
Installierte Behandlungskapazität		265.000 Mg/a (bei einem Heizwert von 8.800 kJ/kg)		
Tatsächliche Auslastung		165.000 Mg/a (bei einem Heizwert von 10.500 kJ/kg)		
Betriebseinheiten				
Linien		*Linie 1*	*Linie 2*	*Linie 3*
Nenndurchsatz[1]	[Mg/h]	11,0	8,3	11,0
Dampfmenge	[t/h]	28,8	21,0	33,0
(t = 345 °C, p = 38 bar)				
Rauchgasmenge (Kessel)	[Nm^3/h]	61.900	52.000	68.000

Die Beschreibung der Prozeßstufen orientiert sich an dem in Abbildung 4-1 dargestellten Fließbild.

4.2.1 Die Verbrennungsanlage

Abfallaufgabe: Der Abfall wird zunächst in dem Müllbunker entladen. Anschließend gelangt er mittels zweier Kräne in den Einfülltrichter und wird mittels des Dosierstößels dem Feuerraum zugeführt. Das Durchmischen verschiedener Abfallfraktionen erfolgt subjektiv durch den Kranfahrer.

Feuerraum: Im Feuerraum wird der Abfall auf den Verbrennungsrost gegeben. Dieser ist als Vorschubrost konzipiert und bewegt das Müllbett durch die verschiedenen Zonen.

Im Bereich der Beschickung trocknet der Abfall, entzündet sich auf dem Weg über den Rost von selbst und brennt aus. Die Verbrennungstemperaturen liegen im Bereich 900°C bis ca. 1050°C.

Die Verbrennungsluft wird mittels Primärluftventilatoren von unten durch den Rost bzw. mittels Sekundärluftventilatoren seitlich zugeführt. Um keine Rauchgase austreten zu lassen und somit jede Emission und Geruchsbelästigung zu unterbinden, herrscht ein leichter Unterdruck in der Brennkammer.

[1] Bei einem Heizwert von 8.800 kJ/kg

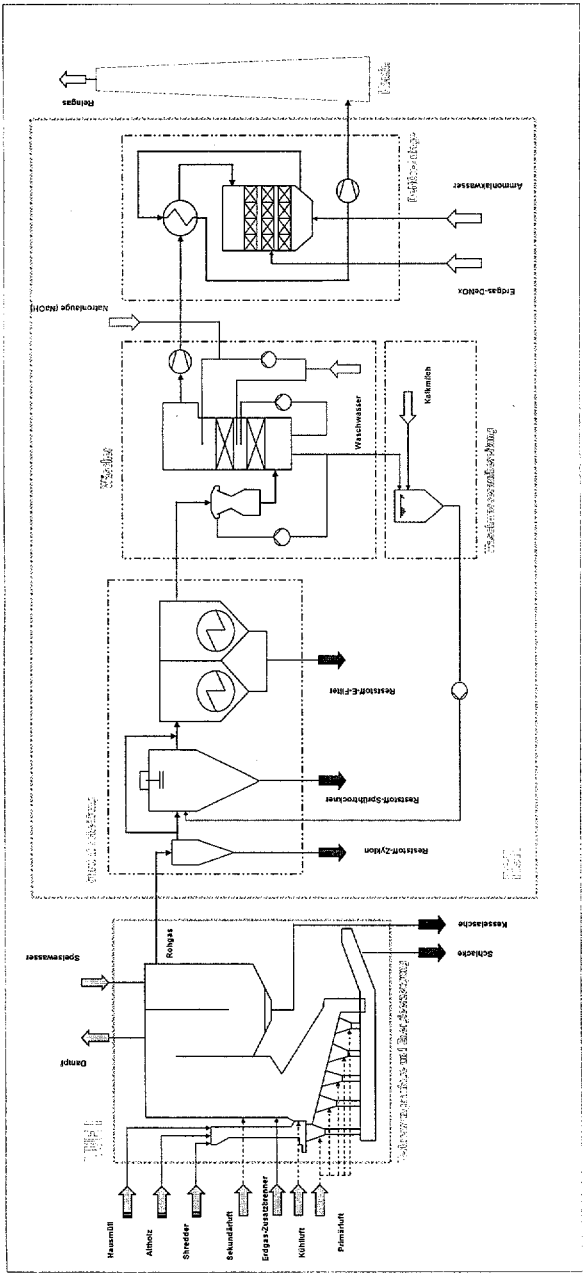


Abbildung 4-1: vereinfachtes Fließbild der betrachteten Anlage (MHKW Darmstadt)

Zusatzbrenner: Das Einhalten der in der 17. BImSchV vorgeschriebenen Verbrennungstemperatur von mindestens 850°C im Feuerraum macht es erforderlich, beim Vorliegen heizwertarmer Abfälle, ein Erdgas/Luft–Gemisch (Luftverhältnis λ = 1,2) zusätzlich zu verbrennen. Hierzu sind zwei Erdgasbrenner installiert. Sinkt die Temperatur auf unter 850°C, werden die Brenner zugeschaltet bis ein Niveau im Feuerraum von 900°C wieder erreicht wird.

Schlackeabtrennung: Ist der Abfall ausgebrannt, fällt die zurückbleibende Schlacke am Ende des Rostes in ein Wasserbad, aus dem eine Kratzkette die Schlacke in den Schlackenbunker fördert.

Nachverbrennungszone: Um die in der 17. BImSchV vorgeschriebene Mindestverweilzeit von zwei Sekunden zu erreichen, wird in der Nachverbrennungszone oberhalb des Rostes zusätzlich Sekundärluft eingeblasen. Dies senkt die Rauchgastemperatur auf ca. 750 - 800°C vor Kesseleintritt.

4.2.2 Die Energieerzeugung

Dampferzeuger (Kessel): Die Energie der entstehenden Rauchgase wird im nachgeschalteten Kessel zur Dampferzeugung genutzt. Das Rauchgas kühlt dabei auf eine Temperatur von ca. 240°C ab. Der Kessel besteht im wesentlichen aus den Austauschflächen (Kesselverrohrung) des ***Verdampfers*** und dem ***Überhitzer***. Durch den Kontakt der Rauchgase mit den Austauschflächen werden die groben Staubpartikel abgeschieden und als Kesselasche abgeführt (***Flugstaubabscheidung***).

Turbine: Der Heißdampf (38 bar, 345°C) wird einer Entnahme-Kondensationsturbine (10 MW_{el}) zugeführt. Abhängig von der Menge entspannt der Dampf auf 0,5 bis 0,1 bar und kondensiert letztendlich in einem Luftkondensator. Eine regelbare Entnahmestelle in der Turbine ermöglicht die Abgabe von Prozeßdampf bei einem Druck von 5,0 bar bis 12,5 bar. Dieser Dampf wird z. T. zur Versorgung anlageninterner Verbraucher genutzt sowie als Prozeßdampf abgegeben.

4.2.3 Die Rauchgasreinigungsanlage

Die Funktionalität sowie Struktur der Rauchgasreinigungsanlage ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt:

Tabelle 4-2: Prozeßstufen und Komponenten der Rauchgasreinigungsanlage

Prozeßstufe	Funktion	Komponenten
Staubabscheidung	Abscheidung von Metallen, Metalloxiden und Salzen	1. Zyklon 2. Sprühtrockner 3. Elektrofilter
Wäscher	Absorption der sauren Gase HCl , HF und SO_2	1. Quencher 2. Absorber 3. Ring-Jet
Saugzuggebläse (1)	Ausgleich von Druckverlusten und Erzeugung eines Unterdruckes im Feuerraum	
DeNO$_X$[2]	Reduktion der Stickoxide, Minderung des Anteils an Dioxinen und Furanen	1. Wärmetauscher 2. Erdgasbrenner 3. SCR-Anlage
Saugzuggebläse (2)	Ausgleich von Druckverlusten und Erzeugung eines Unterdruckes im Bereich der DeNOx-Anlage	

4.2.3.1 Staubabscheidung

Die Staubabscheidung umfaßt zwei parallel geschaltete Zyklone sowie jeweils einen Sprühtrockner und Elektrofilter. Stromab der Zyklone wird der Rauchgasstrom in zwei Teilströme aufgeteilt, wobei nur der erste Teilstrom dem Sprühtrockner zugeführt wird. Nach der Sprühtrocknung werden beide Rauchgasströme wieder vereint und gemeinsam in den Elektrofilter geleitet. Der Rauchgasstrom, der weitestgehend von Feststoffpartikeln befreit ist, verläßt letztendlich die Staubabscheidung mit einer Temperatur von ca. 230°C.

Zyklone: Die Zyklone trennen einen großen Teil der in der Gas-/Dampfphase suspendierten Feststoffteilchen durch Zusammenwirken von Zentrifugal- und Schwerkraft ab. Dies hängt wesentlich von der Partikelgrößenverteilung ab.

Der Rauchgasstrom tritt tangential in das zylindrische Zyklongehäuse ein und setzt sich in einer spiralförmigen Kreisbewegung nach unten fort. Die Feststoffteilchen streben unter der Zentrifugalbeschleunigung zur Wand, gleiten in den kegelförmigen unteren Teil des Zyklons und werden über ein regelbares Austragsventil abgezogen und von dort über einen Trogkettenförderer in den Flugaschesilo geleitet. Der Gasstrom mit einer Restbeladung an Feststoffteilchen strömt entlang der Kegelachse wirbelnd auf, gelangt in das zentrale Austrittsrohr (Tauchrohr) und wird von dort zum Sprühtrockner geleitet.

---

[2] Die Dioxin-Minderungsstufe wurde Mitte 1996 nachgerüstet und in Betrieb genommen.

Sprühtrockner: Dem Sprühtrockner werden heißes Rauchgas und ein mit Salzen beladener Flüssigkeitsstrom zugeführt. Die Flüssigkeit wird mittels einer rotierenden Sprühscheibe zerstäubt und horizontal abgeschleudert. Die Bauform des Trockners erfordert einen großen Durchmesser, damit eine vollständige Verdampfung der Flüssigkeitströpfchen vor dem Auftreffen auf die Wandungen gewährleistet ist. Der Rauchgasstrom kühlt dabei von ca. 220°C auf ca. 180°C ab. Das anfallende Staub-/Salzgemisch wird über eine Förderanlage dem Reststoffsilo zugeführt.

Elektrofilter: Der Elektrofilter scheidet Feinstaub, Rauch und Nebel in einem elektrischen Feld ab. Die negativen Sprühdrahtelektroden ionisieren durch hohe Feldstärke die umgebenden Gasmoleküle. Die gebildeten Ionen stoßen auf ihrem Weg mit den Schwebeteilchen zusammen, laden diese wiederum negativ auf und führen sie – vom Feld geleitet – zu den positiven Niederschlagselektroden, wo die Schwebeteilchen entladen werden. Der abgeschiedene Staub wird periodisch abgeklopft, fällt in den Sammeltrichter und gelangt von dort in den Staubbunker. Auch hier hängt der Abscheidegrad wesentlich von der Partikelgrößenverteilung ab.

4.2.3.2 Wäscher

Die Wäscherstufe besteht aus: Quencher, Absorber, Ring-Jet. Der Quencher und der Absorber dienen der HCl- und HF-Abscheidung wogegen die Ring-Jet-Stufe vorrangig der SO_2-Abscheidung dient.

Quencher: Das Rauchgas wird durch Wassereindüsung von etwa 230°C auf seine Sättigungstemperatur von ca. 63°C abgekühlt. Dabei kondensieren einige der gasförmigen Metallverbindungen (z. B. Quecksilberoxid) aus und gelangen als Aerosole in die nächste Waschstufe. Der Rauchgasstrom wird dann in den Absorber geleitet, während das im Sumpf anfallende Wasser zum größten Teil rezirkuliert wird. Der für die Kühlung im Sprühtrockner notwendige Teil hingegen wird über die Waschwasseraufbereitung als Speiseflüssigkeit zurückgeführt. Dabei werden die leicht löslichen Salze (z. B. NaCl) und der Chlorwasserstoff ausgeschieden. Durch Zugabe von Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) entsteht Calciumchlorid ($CaCl_2$), welches im Sprühtrockner beim Verdampfen wieder als Feststoff abgeschieden wird.

Absorber: Im Absorber werden die Rauchgase im Gegenstrom zur Waschflüssigkeit durch eine mit Ciba-Geigy-„IGEL"-Füllkörpern beladene Füllkörperkolonne geführt. Die große spezifische Oberfläche der Füllkörper bewirkt einen hohen Absorptionsgrad von HCl und HF. Der größte Teil der Waschflüssigkeit wird rezirkuliert und ein kleinerer Teil dem Quencher zugeführt. Das Mitreißen der Waschflüssigkeit durch die Rauchgase wird durch einen integrierten Tropfenabscheider unterbunden. Die Füllkörper werden in größeren zeitlichen Abständen regeneriert und haben keinen Einfluß auf die kurzfristige Betrachtung der Systemmassenbilanz.

Ring – Jet:. Der Ring-Jet dient der SO_x-Absorption und der Abscheidung von Feinstaub und Aerosolen. Um eine wirkungsvolle Absorption zu erreichen, wird der pH-Wert des Kreislaufwassers mittels Zudosierung von Natronlauge auf etwa 6 gehalten. In die Kreislaufführung der Ring-Jet-Stufe wird das Prozeßwasser zudosiert und das SO_x (überwiegend SO_2) durch eine Wäsche in die Flüssigkeit überführt.

4.2.3.3 DeNO$_x$-Anlage

Die $DeNO_x$-Anlage umfaßt: Wärmetauscher, Erdgasbrenner und SCR-Anlage[3]. Die vom Wäscher kommenden Rauchgase müssen auf etwa 320°C aufgeheizt werden, bevor sie der anschließenden NO_x- und Dioxinminderungsstufe zugeführt werden können. In der SCR-Anlage findet die eigentliche Stickoxidreduzierung statt.

Wärmetauscher: Der Rauchgaswärmetauscher (Rohrbündelwärmetauscher in Kreuzwärmetechnik) heizt die Rauchgase zunächst von ca. 63°C auf ca. 270°C auf. Als Heizmedium dient das gereinigte Rauchgas (aus der SCR-Anlage).

Erdgasbrenner: Um die endgültige für die selektive katalytische Reduktion notwendige Temperatur von 320°C zu erreichen, wird mittels eines Erdgasbrenners ein Erdgas/Luft – Gemisch mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}2$ offen im Rauchgasstrom verbrannt.

SCR-Anlage: Die Reduktion des NO_x-Gehaltes wird durch die chemische Umsetzung mit Ammoniak an TiO_2-V_2O_5-WO_3-Katalysatoren zu Stickstoff und Wasser nach dem folgenden Mechanismus erreicht:

$$NO + NO_2 + 2NH_3 \Leftrightarrow 2N_2 + 3H_2O$$

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \Leftrightarrow 4N_2 + 6H_2O$$

Der Umsetzungsgrad steigt mit der Reaktionstemperatur und bewegt sich praktisch zwischen 66% und 92%. Bei ca. 450°C setzt allerdings die Oxidation des NH_3 zu NO und H_2O ein, begleitet durch materialtechnische Probleme des Katalysators (ab ca. 420°C). Weiterhin ist der Umsetzungsgrad vom Sauerstoffgehalt, von der Raumgeschwindigkeit und vom NH_3/NO_X-Molverhältnis abhängig [JANICKA 1992].

---

[3] SCR = Selective Catalytical Reduction

Da die SCR-Anlage im Rauchgasweg stromab der Rauchgasentschwefelungsanlage installiert ist, wird sie nur mit einer niedrigen Staubkonzentration beaufschlagt, was zu einer Verlängerung der Standzeit des Katalysators führt.

4.2.3.4 Waschwasseraufbereitung

Am unteren Teil des Wäschers sammelt sich das saure Waschwasser, das zum größten Teil dem Wäscherkreislauf zurückgeführt wird. Der Rest wird dem Wäscher entzogen und in einem Rührbehälter mit Kalkmilch neutralisiert. Dies ermöglicht, die in der wäßrigen Lösung vorliegenden Cl^- -, F^- - Ionen und Quecksilber in ihre Salzform zu überführen. Anschließend wird die Lösung dem Sprühtrockner zugeführt und dort durch die heißen Rauchgase verdampft. Dadurch kristallisieren die Salze aus und werden mit dem Rauchgasstrom zum Elektrofilter gebracht, wo sie zusammen mit der Flugasche abgeschieden und ausgeschleust werden.

4.3 Grundmodell

Zur Beschreibung der prinzipiellen Austauschvorgänge des MHKW Darmstadt wurde das in Abbildung 4-2 dargestellte Grundmodell gewählt:

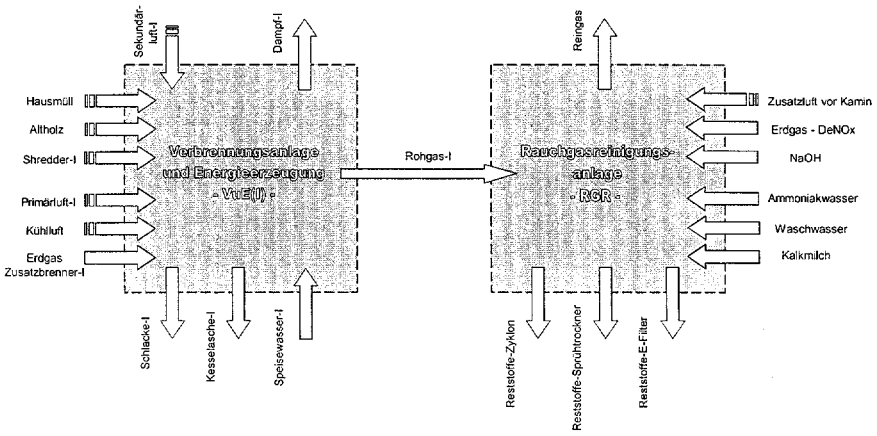


Abbildung 4-2: Grundmodell der Simulation

Der Bereich VuE(I) erzeugt Dampf aus dem zugeführten Speisewasser und Rohgas bei Vorgabe der Abfallzusammensetzung (Hausmüll; Altholz; Shredder) und der Luftverteilung (Primär-; Sekundär-; Kühlluft). Dabei entstehen Reststoffe (Schlacke; Kesselasche).

Das Rohgas wird der RGR zugeführt.

Abhängig von der Rohgasmenge und der Beladung mit Schadstoffen und Stäuben produziert die RGR Reingas, und es fallen wiederum Reststoffe an (aus Zyklon; Sprühtrockner; E-Filter). Für ihren Betrieb benötigt die RGR Hilfsstoffe (Kalkmilch; Waschwasser; Ammoniakwasser; NaOH; Erdgas).

Mit dem vorgestellten Modell soll ermöglicht werden, die Gesamtanlage hinsichtlich der Erfüllung der an das Reingas und an die Reststoffe gestellten Qualitätsanforderungen zu analysieren. Mit den entsprechenden Kosteninformationen versehen, erlaubt es ferner, Aussagen über Betriebskosten zu machen durch Betrachtung der Reststoffmengen und des Verbrauchs an Hilfsmitteln. Damit dient es als Grundmodell für die spätere Integration weiterer Reaktoren. Hier muß die Validierungsstrategie ansetzen.

4.4 Validierungsstrategie

Um das Grundmodell validieren zu können, sind Daten notwendig zu den Stoffströmen. Diese wurden wie folgt ermittelt:

- Sichtung und Auswertung der Ergebnisse von Meßkampagnen am MHKW Darmstadt,
- Sichtung und Auswertung von Daten des Betreibers des MHKW Darmstadt,
- Identifikation bestehender Datenlücken und Ergänzung aus der Literatur.

Aus der dann vorliegenden Datengrundlage wird ein Referenzbereich für die Simulation bestimmt. Dies wird im einzelnen diskutiert. Siehe hierzu Anhang C.

Abfallzusammensetzung: Aus der Literatur wurde eine für typischen Hausmüll repräsentative Elementaranalyse angenommen. Diese ergab einen Heizwert, der sich mit den - im Laufe der Meßkampagnen ermittelten - Werten deckt (Siehe hierzu Tab. C1-1 bis Tab. C1-4).

Betriebsparameter: Repräsentative Betriebsparameter konnten aus den umfangreichen Meßkampagnen ermittelt werden (Siehe hierzu Tab. C3-1a/b).

Hilfsmittelverbräuche: Die Hilfsmittelverbräuche wurden zunächst aus den Aufzeichnungen des Betreibers ermittelt und gegen Auslegungsdaten der Anlage verifiziert. In diesem Zusammenhang haben auch Literaturwerte interessiert (Tab. C4-1, C4-2a/b/c).

Reststoffströme: Daten zur Elementaranalyse der am MHKW Darmstadt erzeugten Reststoffe liegen nicht vor. Ferner werden die Mengen nicht kontinuierlich aufgezeichnet. Die Validierung der Reststoffströme erfolgte deshalb anhand von Literaturwerten (Tab. C5-1, C6-1 bis C6-7). Hierbei ist zu bemerken, daß in der Literatur hauptsächlich Angaben zu den Elementformen zu finden sind, also nicht zu den Oxiden. Der direkte Vergleich wird daher erst über die Umrechnung der simulierten Oxide in deren Elementarform ermöglicht.

Weiterhin ist anzumerken, daß die Abscheidecharakteristika der Apparate der Rauchgasreinigung des MHKW Darmstadt, aufgrund deren besonderer Verschaltung, nur über eine Analogiebetrachtung den in der Literatur gefundenen Werten gegenübergestellt werden können. So wird angenommen, daß die Reststoffe, die durch einen mit trockenem Rohgas beaufschlagten Zyklon (MHKW Darmstadt) abgeschieden werden, in ihrer Zusammensetzung den Entstaubungsrückständen eines wiederum mit trockenem Rohgas beaufschlagten Elektro-Filters (Literatur) ähneln. Und die Reststoffe, die durch den Sprühtrockner (MHKW Darmstadt) abgeschieden werden, stehen in Analogie zu den Reaktionsprodukten aus einem Wäscher (Literatur).

Emissionsdaten: Die wesentlichen Emissionsdaten des Reingases werden kontinuierlich überwacht. Aus Meßkampagnen liegen detaillierte Daten zur Qualität sowohl des Rohgases als auch des Reingases vor (Tab. C7-1a/b respektive Tab. C7-2a/b).

Abscheidegrade: Die Abscheidegrade der Rauchgasreinigungsanlage bezüglich einzelner Schadstoffe können aus den Meßkampagnen rechnerisch ermittelt werden und Literaturwerten gegenübergestellt werden (Tab. C8-1).

Tabelle 4-3 faßt die zur Verfügung stehenden Datenquellen für die Validierung zusammen.

Tabelle 4-3: Datengrundlage zur Validierung des Simulationsmodells

Stoffstrom	Meß-kampagnen	Betreiber-angaben	Literatur-werte	Auslegungs-daten
Hausmüll	X		X	
Altholz			X	
Shredder			X	
Primärluft	X			X
Sekundärluft	X			X
Kühlluft	X	X		X
Erdgas Zusatzbrenner		X	X	X
Schlacke			X	
Kesselasche			X	
Speisewasser	X	X		X
Rohgas	X			
Reststoffe-Zyklon			X	
Reststoffe-Sprühtrockner			X	
Reststoffe-E-Filter			X	
Kalkmilch		X	X	X
Waschwasser		X	X	X
Ammoniakwasser		X	X	X
NaOH		X	X	X
Erdgas DeNO$_x$		X	X	X
Zusatzluft vor Kamin		X		
Reingas	X			
Dampf	X	X		X

Es wird festgehalten, daß die Emissionsdaten der Schlüssel zur Validierung des Gesamtmodells sind.

4.5 Simulationsmodelle

Die folgende Tabelle ist eine Übersicht der für jedes Anlagenteil verwendeten Simulationsmodelle:

Tabelle 4-4: Übersicht der Simulationsmodelle

Anlagenteil	Bezeichnung im Fließbild	Modell
Die Verbrennungsanlage		
Abfallaufgabe	TRICHTER	ASPEN – MIXER
Feuerraum	BRENNER	ASPEN – RGIBBS
Zusatzbrenner	Z-BRENN	ASPEN – RGIBBS DESIGN – PROZESS FORTRAN – ROUTINE
Schlackeabtrennung	ABSCHEID	ASPEN – SEP
Nachverbrennungszone	TVERLUST	ASPEN – RGIBBS
Die Energieerzeugung		
Verdampfer	DAMPFERZ	ASPEN – HEATX
Überhitzer	ÜHITZER	ASPEN – RGIBBS
Flugstaubabscheidung	FLYASH	ASPEN – SEP
Turbine	TURBINE	ASPEN – COMPR
Die Rauchgasreinigungsanlage		
Staubabscheidung		
Zyklon	ZYKLON	ASPEN – CYCLONE
Sprühtrockner	SPR-TR	ASPEN – FLASH2 DESIGN – PROZESS
Elektrofilter	E-FILTER	ASPEN – ESP
Wäscher		
Quencher	QUENCHER	ASPEN – FLASH2
Absorber	ABSORBER	ASPEN – RADFRAC FORTRAN – ROUTINE
Ring-Jet-Stufe	RINGJET	ASPEN – FLASH2 FORTRAN – ROUTINE
Saugzuggebläse (1)	SAUGZUG1	ASPEN - HEATER
DeNOx-Anlage		
Wärmetauscher	WT-1	ASPEN – HEATX
Erdgasbrenner	WT-2	ASPEN – RGIBBS DESIGN – PROZESS
SCR – Anlage	SCR	ASPEN – RSTOIC
Saugzuggebläse (2)	SAUGZUG2	ASPEN – HEATER
Waschwasseraufbereitung		
Kalkmilchzugabe	MIXER	ASPEN – RSTOIC DESIGN – PROZESS

Die **Systemgrenze** umfaßt somit die Gesamtanlage von der Abfallaufgabe in den Trichter bis zur letzten Stufe der Rauchgasreinigung (Kamineintritt), wobei folgende Anlagenteile nicht berücksichtigt wurden:

- Vorgeschaltete Zerkleinerungsstufen (Sperrmüllschere ....),
- Speisewasseraufbereitung (VE-Anlage),
- Energienutzung in Form von Fernwärme bzw. interne Wärmetauscherkreisläufe.

Ferner wurden die Rohrleitungsverluste vernachlässigt.

4.5.1 Die Verbrennungsanlage

Abfallaufgabe: Für die Berechnung muß die Abfallzusammensetzung in Form einer Elementaranalyse vorgegeben werden. Das Modul MIXER ermöglicht die Zusammenführung dreier Abfallfraktionen (Hausmüll, Altholz und Shredderabfall) und übernimmt somit die Mischfunktion des Abfallinputs.

Feuerraum: Für die Simulation des Brennraumes wurde das Modell RGIBBS gewählt. Dabei handelt es sich um einen Gleichgewichtsreaktor, der bei seiner Berechnung gleichzeitig chemische Gleichgewichte sowie Phasengleichgewichte in Abhängigkeit der Temperatur berücksichtigt. Als mathematisches Modell liegt für die Gleichgewichtsberechnung das Erreichen minimaler Gibbsscher Energie zugrunde. Berücksichtigt werden für das chemische Gleichgewicht alle zu erwartenden Verbrennungsprodukte.

Die folgende Tabelle listet die Eingangsstoffe aus der Elementaranalyse auf sowie die Reaktionsprodukte, die bei der Feuerraumsimulation und den nachfolgenden Berechnungsschritten berücksichtigt werden.

Tabelle 4-5: Eingangsstoffe und Reaktionsprodukte bei der Feuerraumsimulation

Eingangsstoffe	*Brennbare Anteile:* C, H, O, N, S, Cl, P, B, Br, F, H_2O *Anteile der Asche:* Si, Ca, Fe, Na, Mg, Al, K, Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, Cd, Hg, As, Ag, Ba, Mn, Sb, Se, Sn, V
Reaktionsprodukte	*Gasförmig:* H_2O, O_2, CO_2, CO, N_2, H_2, NO_2, NO, SO_2, Cl_2, HCl, HF *Staubförmig / Oxide / Chloride:* C, Si, SiO_2, Ca, CaO, $Ca(OH)_2$, $CaCl_2$, CaF_2, Fe, Fe_2O_3, Na, NaCl, Na_2SiO_3, Mg, MgO, Al, Al_2O_3, K, K_2O, Zn, ZnO, Pb, PbO, Cu, Cr, Cr_2O_3, Ni, Cd, Hg, Hg_2Cl_2, As, Ag, Ba, Mn, Sb, Se, Sn, V, NH_4OH

Die Zugabe der Primärluft im Feuerraum erfolgt nach einer Aufwärmung auf ca. 90°C. Die Kühlluft dagegen wird ohne Vorwärmung mit 20°C zugeführt.

Zusatzbrenner: Eine FORTRAN-Abfrage prüft, ob die resultierende Rauchgastemperatur aus der Verbrennung im Feuerraum den Mindestwert von 850°C erreicht und aktiviert ggf. den Zusatzbrenner. Für die Simulation des Zusatzbrenners wird das Modell RGIBBS verwendet, wobei vereinfachend für Erdgas Methan eingesetzt wird und die vorgegebene Luftzahl eingestellt wird. Die Berechnung erfolgt über einen Design–Prozeß, wobei unter der Annahme adiabatischer Verbrennung und der Vorgabe der zu erreichenden Temperatur von 900°C die benötigte Menge an Brennstoff berechnet wird.

Schlackeabtrennung: Die Aufteilung der Feststoffe auf Rohgas und Schlacke im Feuerraum ist problematisch. Die reale Charakteristik kann durch die zur Verfügung stehenden Module nicht wiedergegeben werden. Außerdem liegen keine Betriebsdaten vor, die für die Entwicklung einer eigenen Routine notwendig wären. Deshalb wird auf Literaturwerte zurückgegriffen, wo die prozentuale Aufteilung der einzelnen Elemente und Oxide auf Rauchgas und Schlacke ermittelt wurde (Tab. C2-1). Zur Simulation wird dann auf das Modell SEP zurückgegriffen. Es erlaubt eine nach Bestandteilen unterschiedlich gewichtete Aufteilung eines eintretenden Stoffstromes auf mehrere austretende Stoffströme.

Nachverbrennungszone: Das Modell entspricht dem des Feuerraumes, wobei ein konstanter Sekundärluftstrom in die Nachverbrennungszone zugeführt wird.

4.5.2 Die Energieerzeugung

Dampferzeuger (Kessel): Die Simulation berücksichtigt den Aufbau des Kessels aus den drei Bereichen: Verdampfer, Überhitzer und Flugstaubabscheidung. Das Modell HEATX bietet viele Varianten für Zweistromwärmetauscher an und wurde für die Simulation des ***Verdampfers*** angewandt. Das Modell rechnet den Wärmeaustausch und dadurch die Temperatur des resultierenden Dampfes bei einer Abkühlung der Rauchgase auf ca. 240°C. Um jedoch die Endparameter von 38 bar und 345°C zu erreichen, ist eine weitere Erhöhung der Dampfparameter im Überhitzer notwendig. Für den ***Überhitzer*** kam das Modell RGIBBS zum Einsatz. Die dabei erzielten Ergebnisse für den Heißdampf sind hinreichend genau. Für die ***Flugstaubabscheidung*** kam wiederum das Modell SEP zur Anwendung.

Turbine: Für die Turbine wurde das Modell COMPR gewählt. Das Modell rechnet, bei Vorgabe des Turbinenwirkungsgrades und des Enddrucks, die isentropische Expansion des Dampfes auf die Endtemperatur.

> Exkurs: Bei Berücksichtigung der Entnahmestellen an der Turbine kann das Modell MCOMPR für mehrstufige Turbinen eingesetzt werden.

4.5.3 Die Rauchgasreinigungsanlage

4.5.3.1 Staubabscheidung

Um eine möglichst reale Gas-Feststoff-Trennung zu simulieren, muß die Partikelgrößenverteilung der im Rohgas vorkommenden Stäube vorgegeben werden. Folgende Verteilung, die sich auf Untersuchungen von BIRNBAUM bezüglich der Charakterisierung von Filterstäuben aus Müllverbrennungsanlagen stützt, wurde gewählt:

Tabelle 4-6: Partikelgrößenverteilung (Mittelwerte aus BIRNBAUM ET AL. 1997)

Partikeldurchmesser in [µm]	Anteil in [%]
0 bis 1	2
1 bis 2	4
2 bis 10	6
10 bis 20	13
20 bis 80	20
80 bis 100	10
100 bis 200	35
200 bis 300	8
300 bis 1000	1
1000 bis 2000	1

Zyklone: Das AspenPlus™–Modell CYCLONE berechnet die Separationseffizienz und den Druckverlust eines oder mehrerer parallel geschalteter Zyklone. Die Gesamtseparationseffizienz η_m berechnet sich aus [ASPEN 1996]:

$$\eta_m = \frac{C_e - C_a}{C_e} = \frac{Q_e C_e - E}{Q_e C_e} \qquad \text{[Gl. 4-1]}$$

mit:

C_e = Konzentration der Feststoffe im Eingangsgasstrom

C_a = Konzentration der Feststoffe im Ausgangsgasstrom

Q_e = Fließgeschwindigkeit des Gases am Eintritt

E = Austrittsemissionsrate des Feststoffes im gereinigten Gas

Der Druckverlust Δp ergibt sich aus:

$$\Delta p = 0{,}003 \rho_f U_e^2 N_e \qquad \text{[Gl. 4-2]}$$

mit:

ρ_f = Dichte des Fluids

U_e = Gasgeschwindigkeit am Eingang

N_e = Eingangsgeschwindigkeitsverhältnis

Das Eingangsgeschwindigkeitsverhältnis N_e ist definiert als:

$$N_e = K\frac{ab}{D_a^2} \qquad \text{[Gl. 4-3]}$$

mit:

K = Dimensionslose Konstante

a = Höhe des Eintritts

b = Breite des Eintritts

D_a = Durchmesser des Austritts

Die dimensionslose Konstante ist definiert als:

$$K = \frac{8(V_S + V_{nl}/2)}{abD_Z^2} \qquad \text{[Gl. 4-4]}$$

mit:

V_S = Ringförmiges Volumen zwischen Austrittsrohr und mittlerer Höhe des Eintrittsrohrs

V_{nl} = Effektives Volumen des Zyklons

D_Z = Durchmesser des Zyklons

Das ringförmige Volumen V_S ergibt sich dabei aus:

$$V_S = \frac{\pi(s - \frac{a}{2})(D_Z^2 - D_a^2)}{4} \qquad \text{[Gl. 4-5]}$$

mit:

s = Länge des Gasaustrittsrohrs

Sprühtrockner: AspenPlus™ bietet das Modell eines Sprühtrockners nicht direkt an. Vereinfachend wurde das Modell FLASH2 verwendet, welches Temperatur- und Phasenzustände eines Gemisches von Eingangsströmen berechnet. Hierdurch wird der Vorgang des Verdampfens der Speiseflüssigkeit und die Staub-/Salzabscheidung erfaßt. Vorgegeben werden Druck, Temperatur und Feststoffgehalt in der Dampfphase. Die Fähigkeit der zerstäubten, kalkhaltigen, noch nassen Tröpfchen, saure Gase (HCl, HF, SO_2) zu absorbieren [HAJDU 1989], wird dabei vernachlässigt.

Anschließend wird über eine DESIGN-Spezifikation unter der Bedingung, daß der Prozeß adiabatisch verläuft, die benötigte Flüssigkeitsmenge berechnet. Diese beiden Schritte werden von dem Simulationsprogramm über ein Iterationsverfahren gelöst. Als Konvergenzmethode wird die SECANT-Methode angewendet.

Elektrofilter: Für die Simulation des Elektrofilters kam das AspenPlus™-Modell ESP zur Anwendung.

Dabei berechnet sich der Abscheidegrad η wie folgt:

$$\eta = 1 - \frac{C_{nvs}}{C_{nvo}} e^{-\left[\frac{(X_S - L) q_{ps} E_c C}{3\pi\mu d W V}\right]} \qquad \text{[Gl. 4-6]}$$

mit:

C_{nvs}	= Partikelkonzentration von X_s
C_{nvo}	= Partikelkonzentration am Eingang
X_s	= Ort, an dem alle Partikel eine Sättigungsladung erlangt haben
L	= Elektrodenlänge
q_{ps}	= Sättigungsladung der Partikel
E_c	= Gesamtfeldstärke
C	= Conningham Korrekturfaktor
μ	= Viskosität des Gases
d	= Partikeldurchmesser
W	= Abstand zwischen Platten und Elektroden
V	= Aktuelle Gasgeschwindigkeit durch den Abscheider

Der Ort, an dem alle Partikel eine Sättigungsladung X_s erlangt haben, ist definiert als:

$$X_s = \frac{\mu d W^2 s_w V(C_{nvo} - C_{nvs})}{0{,}332\varepsilon_0 E_c C\left(0{,}8E_c\sqrt{Ws_w} - E_0 r_0\right)} \qquad \text{[Gl. 4-7]}$$

mit:

S_w = Elektrodenabstand

ε_0 = Elektrische Feldkonstante

E_0 = Koronenfeldstärke

r_0 = Koronendurchmesser

Die Gesamtfeldstärke E_c ist definiert als:

$$E_c = 0{,}25\left[-V_B f\left(\frac{T_0 P}{TP_0} + 0{,}03\sqrt{\frac{T_0 P}{TP_0 r_0}}\right)\right] \qquad \text{[Gl. 4-8]}$$

mit:

V_B = Abbruchspannung

f = Rauhigkeitsfaktor der Elektroden

T_0 = Standardtemperatur

P_0 = Standarddruck

T = Temperatur

P = Druck

Die Partikelkonzentration C_{nvs} an dem Ort, wo die Partikel ihre Sättigungsladung besitzen, ist:

$$C_{nvs} = \frac{0{,}212(k+2)}{kd^2} \frac{0{,}8E_c\sqrt{Ws_w} - E_0 r_0}{0{,}427Ws_w E_c + 2E_0 r_0\left(0{,}533\sqrt{Ws_w} - r_0\right)} \qquad \text{[Gl. 4-9]}$$

mit:

k = Dielektrizitätskonstante

Die Sättigungsladung q_{ps} der Partikel ist:

$$q_{ps} = \frac{3k\pi\varepsilon_0 d^2}{k+2}\left[\frac{2}{3}E_c + \frac{2{,}5E_0 r_0}{\sqrt{Ws_w}}\left(\frac{2}{3} - \frac{1{,}25r_0}{\sqrt{Ws_w}}\right)\right] \qquad \text{[Gl. 4-10]}$$

Der Druckverlust Δp durch den Abscheider ergibt sich aus:

$$\Delta p = 45{,}5\rho_g V_g^2 \qquad \text{[Gl. 4-11]}$$

mit:

ρ_g = Dichte des Gases

V_g = Gasgeschwindigkeit

4.5.3.2 Wäscher

Quencher: Für den Quencher kommt das in AspenPlus™ vorgegebene Modell FLASH2 den Anforderungen am nächsten. Im Gegensatz zu Elektrolyten wie z. B. Salze (NaCl, Hg_2Cl_2) werden Feststoffe hier nicht in die Phasengleichgewichtsberechnungen mit einbezogen. Das Modell wurde unter der Annahme gewählt, daß der austretende Rauchgasstrom mit Wasser gesättigt (φ=1) den Quencher verläßt. Die Gleichgewichtszusammenhänge dieses Vielkomponenten- und Mehrphasenproblems werden internen Datenbanken entnommen und nach einem Modell für wäßrige Elektrolytlösungen berechnet.

Absorber: Die Berechnung des Absorbers erfolgt mit dem Modell RADFRAC. Hierzu wurden alle bekannten Parameter der Füllkörperkolonne aus der Anlagenbeschreibung berücksichtigt.

Ring–Jet: Für die Ring-Jet-Stufe wurde das FLASH2-Modell, welches schon für den Quencher Anwendung fand, zugrunde gelegt. Dieses Modell berechnet die Phasengleichgewichte bei gegebener Temperatur von 63°C und der Annahme einer adiabatischen Prozeßführung.

Für die SO_2-Abscheidung wurde ein von der RWE Energie AG entwickelter Simulationsmechanismus eingesetzt [EDEN ET AL. 1997]. Die Gleichung 5-12 gilt für niedrige Leerrohr-

geschwindigkeiten (2,0 bis 2,7 m/s), mittlere Absorptionshöhen und hohe pH-Werte (pH > 5,5) und gibt den SO_2–Abscheidegrad auf ± 0,5 % genau wieder. Die Voraussetzungen der Anwendung werden am MHKW Darmstadt erfüllt: Die Leerrohrgeschwindigkeit liegt bei 2,2 m/s. Der pH-Wert wird auf 6 eingestellt.

$$\eta_{SO_2} = 1 - e^{-5{,}8*10^{-4}*\left(\frac{L}{G}\right)^{0.92}*v^{0{,}19}*e^{\left(pH+1{,}35*10^{-4}[Mg]-0{,}58*10^{-4}[SO_2]+1{,}45*10^{-5}[Cl]\right)}} \qquad \text{[Gl. 4-12]}$$

mit:

η_{SO2}	= SO_2–Abscheidegrad	[-]
L/G	= Flüssigkeits–Gas–Verhältnis	[l/Nm³]
Cl	= Chloridionenkonzentration	[ppm]
Mg	= effektive Magnesiumkonzentration	[ppm]
pH	= pH–Wert der Wäschersuspension	[-]
SO_2	= SO_2–Eintrittskonzentration	[mg/Nm³]
V	= Gasleerrohrgeschwindigkeit Absorber	[m/s]

Die SO_2-Abscheidung wird im Anschluß an das FLASH2–Modell mittels eines FORTRAN–Programms berechnet und der SO_2–Gehalt der austretenden Stoffströme entsprechend angepaßt. Die für die Neutralisation notwendige NaOH–Menge wird von der FORTRAN–Routine ebenfalls berechnet. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, daß das gesamte SO_x in der flüssigen Phase als SO_3^{2-} und SO_4^{2-} vorliegt. Daraus ergibt sich für die benötigte Natronlauge die doppelte Molmenge der vorliegenden Sulfat- und Sulfit-Ionenkonzentration (siehe auch Anhang B2).

Saugzuggebläse (1): Um auch die Förderung der Feststoffpartikel im Rauchgas zu gewährleisten, wurde das HEATER–Modell verwendet. Es dient lediglich zur Druckänderung und berechnet daraus die für den Saugzug notwendige Leistung. Es wurde ein Druck von 1,05 bar am Saugzugausgang vorgegeben.

4.5.3.3 DeNOx-Anlage

Wärmetauscher: Mit dem Modell HEATX wird der Wärmeaustausch zwischen den beiden Rauchgasströmen simuliert, um die vorgegebene Temperatur vor dem Brenner zu erreichen.

Erdgasbrenner: Für die Simulation des Brenners wird das Modell RGIBBS verwendet, wobei vereinfachend für Erdgas Methan eingesetzt wird und die vorgegebene Luftzahl eingestellt wird.

Die Berechnung erfolgt über einen Design–Prozeß. Unter der Annahme adiabatischer Verbrennung und der Vorgabe der zu erreichenden Temperatur wird die benötigte Menge Brennstoff berechnet.

SCR-Anlage: Da AspenPlus™ kein Modell für die Katalyse als solche zur Verfügung stellt, wurde für die näherungsweise Berechnung das Model RSTOIC gewählt, das für stöchiometrische Umsetzungen gedacht ist.

Die beiden Reaktionsgleichungen geben die wesentlichen Umsetzungen während der selektiven katalytischen Reduktion wieder:

$$NO + NO_2 + 2NH_3 \Leftrightarrow 2N_2 + 3H_2O$$

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \Leftrightarrow 4N_2 + 6H_2O$$

In der Literatur finden sich Abscheidegrade zwischen 66% und 92%. Für die Berechnung wurde von einem für den heutigen Stand der Technik üblichen Abscheidegrad von ca. 70% ausgegangen (Anhang C, Tab. C8-1).

Saugzuggebläse (2): Um auch die Förderung der Feststoffpartikel im Rauchgas zu gewährleisten, wurde das HEATER – Modell verwendet. Es dient lediglich zur Druckänderung und berechnet daraus die für den Saugzug notwendige Leistung. Es wurde ein Druck von 1,05 bar am Saugzugausgang vorgegeben. Zusätzlich wird vor dem Saugzug eine Luftmenge von 15.700 Nm³/h eingestellt.

4.5.3.4 Waschwasseraufbereitung

Zur Realisierung der stöchiometrischen Umsetzungen dient wiederum das RSTOIC-Modell. Insgesamt werden folgende Gleichungen berücksichtigt:

$$Ca(OH)_2 + 2Cl^- \Leftrightarrow CaCl_2 + 2OH^-$$

$$Ca(OH)_2 + 2HF \Leftrightarrow CaF_2 + 2H_2O$$

$$Ca(OH)_2 + 2Hg + 2Cl^- \Leftrightarrow Hg_2Cl_2 + Ca + 2OH^-$$

$$4OH^- + 4H_3O^+ \Leftrightarrow 8H_2O$$

4.5.3.5 Stoffstromrückführungen

Eine besondere Problematik stellt die Stoffstromrückführung unter AspenPlus™ dar. Zur Berücksichtigung ineinander verschachtelter und voneinander abhängiger Stoffströme sowie der Gegenstromführung von Rauchgas und Waschwasser müssen FORTRAN-Programme und Transfer-Prozesse entwickelt und implementiert werden. Darüber hinaus werden Voreinstellungen von Stoffstrommengen an den Rohrleitungen notwendig, die bei der Iteration konvergieren sollen.

Für die vier Stoffstromrückführungen benötigt das Programm je nach Auswahl der Rohrleitungen mindestens vier feste Werte. Die ausgewählten Stoffströme sind die jeweils in die einzelnen Wäscherstufen führenden sowie die in den Sprühtrockner führenden Gesamtmassenströme. Dabei ergibt sich der in den Sprühtrockner führende Stoffmassenstrom aus der für die Kühlung benötigten Menge. Diese wird an entsprechender Stelle mittels eines Design-Prozesses bestimmt und anschließend mittels Datentransfer an den Split-2-Block übertragen, wo der Wert für weitere Berechnungen benötigt wird.

Für die Stoffströme, die in den Quencher, den Absorber und die Ring-Jet-Stufe führen, wird jeweils ein fester Wert vorgegeben. Damit das Programm die Berechnung in der richtigen Reihenfolge durchführt, wird für jede der drei Stufen inkl. der umgebenden Misch- und Splitstellen sowie der Pumpen die Berechnungsreihenfolge für den Konvergenzprozeß vorgegeben.

Die folgenden Abbildungen geben ein Beispiel für eine Datentransfereinstellung wieder:

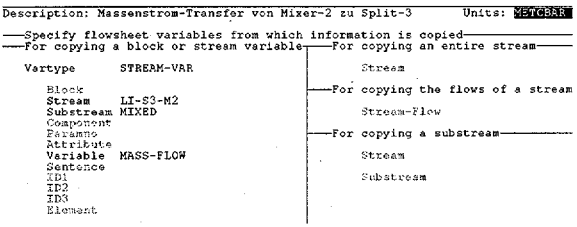


Abbildung 4-3: Menü für die Definition der Ausgangsvariablen

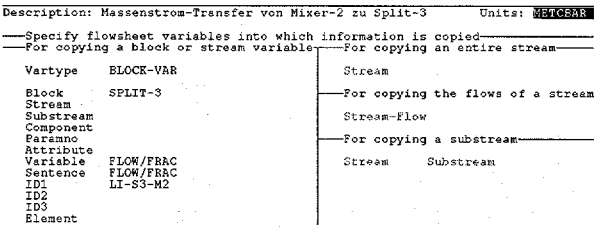


Abbildung 4-4: Menü für die Definition des Datentransferziels

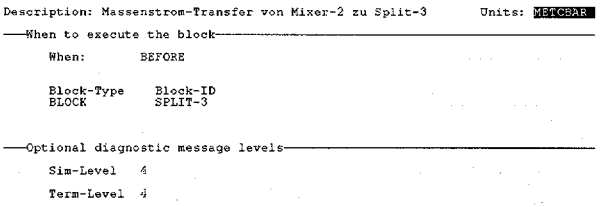


Abbildung 4-5: Menü für die Ausführungseingliederung in den Gesamtprozeß

Alle anderen Datentransfereinstellungen sind ähnlich aufgebaut und brauchen daher hier nicht weiter aufgeführt werden.

Weitere FORTRAN-Programme wurden benötigt, um die Stoffrückführungen in Kreisprozessen zu simulieren. Der Aufbau der Programme (Variablendefinition, FORTRAN-Programm, Ausführungszeitpunkt) unterscheidet sich nicht wesentlich von dem aufgeführten Programm für die SO_2 - Abscheidung.

Abbildung 4-6 zeigt eine Liste der selbsterstellten FORTRAN-Programme, die für den Simulationsablauf nötig waren.

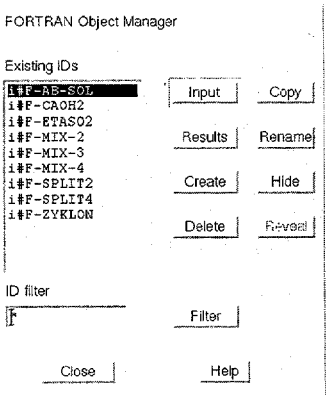


Abbildung 4-6: Liste der FORTRAN-Programme für die Stoffstromrückführungen

4.6 Inputparameter der Simulation

Für die Simulation wurde die Zusammensetzung für Hausmüll nach Anhang C verwendet, welche in Tabelle 4-7 wiedergegeben ist.

Tabelle 4-7: Elementare Zusammensetzung der simulierten Hausmüllfraktion

	Hausmüll	
	[g/kg]	[kg/h]
C	272,1	2.998,5
H	34,5	380,5
O	183,9	2.027,5
N	3,0	33,1
S	2,0	22,1
Cl	5,0	55,2
P	–	–
B	–	–
Br	–	–
F	0,25	2,8
Feuchte (H_2O)	***250,2***	***2.756,1***
Summe Brennbares	***500,6***	***5.520,0***
Summe Asche	***249,3***	***2.747,3***
Si	82,4	908,2
Ca	61,9	681,6
Fe	62,0	683,0
Na	12,4	136,4
Mg	0,007	0,077
Al	20,7	227,5
K	5,0	54,6
Zn	2,1	22,9
Pb	0,106	1,2
Cu	0,840	9,3
Cr	0,412	4,6
Ni	0,104	1,2
Cd	0,021	0,228
Hg	0,008	0,091
As	0,008	0,092
Ag	0,018	0,193
Ba	1,5	16,6
Mn	0,515	5,8
Sb	0,124	1,4
Se	0,001	0,012
Sn	0,022	0,243
V	0,006	0,068
Summe	***1.000,0***	***11.020,0***
Heizwert (kJ/kg)	***9.650***	

Die Inputparameter der Simulation sind in Tabelle 4-8 zusammengefaßt:

Tabelle 4-8: Inputparameter der Simulation

		Simulation (Inputparameter)
$Hu_{Müll}$	[kJ/kg]	9.650
$m_{Müll}$	[kg/h]	11.020
$V°_{Gesamtluft}$	[Nm³/h]	48.800
$V°_{Primärluft}$	[Nm³/h]	27.660
$t_{Primärluft}$	[°C]	90
$V°_{Sekundärluft}$	[Nm³/h]	14.740
$V°_{Kühlluft}$	[Nm³/h]	6.400
$V°_{Luft-vorKamin}$	[Nm³/h]	15.700

4.7 Ergebnisse der Simulation für das Grundmodell

Im folgenden werden die berechneten Werte den Referenzwerten gegenübergestellt. Hierzu dient die in Abschnitt 4-4 ermittelte Datengrundlage zur Validierung.

4.7.1 Betriebsparameter

Tabelle 4-9 faßt die simulierten Betriebsparameter zusammen[4]. Der besseren Übersicht halber werden auch die Eingabeparameter aufgeführt.

[4] siehe auch Anhang C, Tab. C3-1a/b

Tabelle 4-9: Simulierte Betriebsparameter (Grundmodell)

			Referenz Simulation (Betriebsbereich) *Erwartungswert*	Simulation (Grundmodell) *Inputparameter*	Simulation (Grundmodell) *kalkulierte Werte*
Input	$Hu_{Müll}$	[kJ/kg]	8.800 – 10.800 *9.650*	9.650	
	$m_{Müll}$	[Mg/h]	10,1 – 11,0 *11,0*	11,02	
Verbrennungsanlage	$V°_{Gas\text{-}Brenner}$	[Nm³/h]	*nach Bedarf*		0
	$p_{Feuerraum}$	[bar]			0,924
	$V°_{Gesamtluft}$	[Nm³/h]	37.400 – 51.300 *48.800*	48.800	
	$V°_{Primärluft}$	[Nm³/h]	17.950 – 38.000 *27.660*	27.660	
	$t_{Primärluft}$	[°C]	70 – 122 *90*	90	
	$V°_{Sekundärluft}$	[Nm³/h]	13.900 – 18.600 *14.740*	14.740	
	$t_{RG\text{-}Stirn}$	[°C]	860 – 1.064 *1.050*		1.044
	$t_{RG\text{-}Nacken}$	[°C]	900 – 966 *950*		
Energieerzeugung	$t_{RG\text{-}NBK/Kessel\ (1)}$	[°C]	694 - 779 *750*		781
	$t_{RG\text{-}NBK/Kessel\ (2)}$	[°C]	694 – 785 *750*		781
	$t_{RG\text{-}EndeKessel}$	[°C]	203 – 260 *220*		227
	$V°_{RG\text{-}EndeKessel}$	[Nm³/h]	--		55.356
	$m°_{HD}$	[Mg/h]	24,5 – 28,8 *26,5*		26
	$CO_{Ende\text{-}Kessel}$	[mg/Nm³]	1,0 – 6,6 *5,0*		--
	$O_{2\text{-}Ende\text{-}Kessel}$	[Vol.-%]	9,7 – 11,9 *10,0*		8,77
	$p_{Ende\text{-}Kessel}$	[bar]	--		0,95
Rauchgasreinigungsanlage	$t_{RG\text{-}EndeSprühtrockner}$	[°C]	160 ; 181 *180*		180
	$p_{EndeSprühtrockner}$	[bar]	--		0,925
	$t_{RG\text{-}EndeElektrofilter}$	[°C]	182 ; 225 *210*		227,1
	$t_{RG\text{-}EndeQuencher}$	[°C]	62 ; 64 *63*		63
	$V°_{RG\text{-}EndeWäscher}$	[Nm³/h]	54.000 – 79.000 *60.000*		61.486
	$t_{RG\text{-}EndeWäscher}$	[°C]	60 – 65 *65*		63
	$t_{RG\text{-}DeNOx}$	[°C]	*320*		320
	$V°_{Luft\text{-}vorKamin}$	[Nm³/h]	*15.700*	15.700	
	$t_{RG\text{-}Kamin}$	[°C]	99 ; 101 *100*		105
	$V°_{RG\text{-}Kamin}$	[Nm³/h]	--		77.186

4.7.2 Hilfsmittelverbräuche

Ein weiterer Aspekt für die Beurteilung der Simulationsgüte sind die Hilfsmittelverbräuche. Tabelle 4-10 stellt die zum Einsatz kommenden Hilfsmittel im Vergleich mit Betreiberangaben dar.

Tabelle 4-10: Simulierte Hilfsmittelverbräuche (Grundmodell)

		MHKW Darmstadt (1997)	Simulation	
			[Einh./Mg]	[Einh./h]
Erdgas (**Brennraum**)	[m³/Mg]	2,0 [5]	--	--
Erdgas (**DeNO$_x$-Anlage**)	[m³/Mg]	11,65	10,39	114,5
Wassermenge (**Sprühabsorber**)	[m³/Mg]	--	0,69	6,7
Wasserverbrauch (**Gesamt**)	[m³/Mg]	0,97	--	--
Absorptions- und Neutralisationsmittel (**Wäscher**)				
CaO	[kg/Mg]	3,3 [6]	--	--
$CaCO_3$	[kg/Mg]	--	--	--
$Ca(OH)_2$	[kg/Mg]	--	4,18	46
NaOH	[kg/Mg]	3,64 (100%)	3,82	42
Ammoniakwasser (**DeNO$_x$-Anlage**)	[kg/Mg]	0,47 (100%)	0,4	4,41

Allgemein kann eine gute Übereinstimmung der berechneten Hilfsmittel mittels des Simulationsprogramms mit den Betreiberangaben festgestellt werden.

Da die Wasseraufbereitung nicht in den Betrachtungsraum der Simulation aufgenommen wurde, blieben die in diesem Bereich notwendigen Hilfsmittelverbräuche (Helamin und NaCl) unberücksichtigt.

[5] Der Erdgasverbrauch im Brennraum ist der errechnete Mittelwert über das Jahr 1997. Es ist anzumerken, daß dieser Brenner nur im An- und Abfahrbetrieb sowie bei Temperaturunterschreitungen in Betrieb geht. Beim regulären Betrieb der Anlage (Simulationsbetrachtung) bleibt der Brenner außer Betrieb.

[6] Der Kalk wird als gebrannter Kalk (CaO) angeliefert und dessen Menge registriert. Durch die Anreicherung mit Wasser wird er zu Kalkmilch ($Ca(OH)_2$) verarbeitet und als Neutralisationsmittel eingesetzt. In der Simulation wird direkt die notwendige Menge an Kalkmilch ermittelt.

4.7.3 Reststoffströme

In Tabelle 4-11 sind die Mengen der anfallenden Reststoffe dargestellt. Zum Vergleich dienen Literaturdaten. Dabei ist anzumerken, daß die unterschiedlichen Quellen der Literaturwerte die Daten eingeschränkt nutzbar machen, da sie sich teilweise auf andere Anlagenschaltungen der Rauchgasreinigung beziehen.

Tabelle 4-11: Mengen der anfallenden Reststoffe der Simulation (Grundmodell)

	Referenz Simulation (Erwartungsbereich) [kg/Mg$_{Abfall}$]	Simulation [kg/Mg$_{Abfall}$]	Simulation [kg/h]
Schlacke	*250 – 380*	402,6	4.436,7
Kesselasche	*2 – 13*	4,8	52,9
Reststoffe-Zyklon	*17 – 50*	17,3	191,0
Reststoffe-Sprühtrockner	*2 –15*	5,6	62,1
Reststoffe-Elektrofilter	--	7,7	85,0
∑ Reststoffe Zyklon + Sprühtrockner + E-Filter	*25 – 145*	*30,7*	*338,1*

Im allgemeinen liegen die simulierten Werte der Reststoffe in der Größenordnung des Erwartungsbereiches.

Die hohen abgeschiedenen Schlackemengen sind auf die eingeschränkte Betrachtung der Oxide, Chloride und Sulfate bei der Simulation zurückzuführen.

Zu verdeutlichen ist dies anhand des elementspezifischen Verhaltens (Verdampfungsverhalten), welches wiederum vom Dampfdruck der Elemente, ihrer Verbindungen und den thermodynamischen Bedingungen im Feuerraum abhängt. Z. B. beim Schwefel ist bekannt, daß bei üblichen Verbrennungstemperaturen von bis zu 900°C ca. 90% des Schwefels als Sulfate oder Sulfite in der Schlacke verbleiben. Schon eine Erhöhung der Verbrennungstemperaturen auf ca. 1000°C führt zu einer Entfrachtung der Schlacke um 50% [BORN 1998].

Weiterhin spielt die Müllbettemperatur bei der Verdampfung der Schwermetalle eine bedeutende Rolle. Bei Bleiverbindungen ist anzumerken, daß unter normalen Verbrennungsbedingungen (ca. 800 – 900°C) ein Großteil des Bleis als Pb(IV)- bzw. Pb(II)-Chlorid in die Gasphase überführt wird [VEHLOW ET AL. 1997].

Die Berücksichtigung weiterer Verbindungen in Form von Sulfaten, Sulfiten, Chloriden und Oxiden führt somit zu einer realistischeren Betrachtung der Schlackemengen durch deren Entfrachtung von leicht verdampfbaren Verbindungen.

Weiterhin ist aus Tabelle 4-11 zu erkennen, daß die ausgeschiedenen Reststoffmengen in der Rauchgasreinigung im unteren Bereich der Literaturwerte angesiedelt sind. Dies ist im wesentlichen mit der spezifischen Anlagenschaltung zu erklären, wobei die Waschflüssigkeit im Kreislauf geführt und nur ein geringer, mit Schadstoffen aufkonzentrierter, Anteil dem Kreislauf entzogen wird.

Weiterhin ermöglicht die Simulation mittels des Programmes AspenPlus™ eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Reststoffströme. Im einzelnen werden die anhand des aufgestellten Gesamtanlagenmodells berechneten Zusammensetzungen der relevanten Reststoffe dargestellt:

Tabelle 4-12 Zusammensetzung der simulierten Rückstände (Grundmodell)

	Schlacke		Kesselasche		Reststoffe-Zyklon		Reststoffe-Sprühtrockner		Reststoffe-E-Filter	
	[g/kg]	[kg/h]	[g/kg]	[kg/h]	[g/kg]	[kg/h]	[g/kg]	[kg/h]	[g/kg]	[kg/h]
Si										
SiO_2	407,5	1808,1	368,1	19,5	377,0	72,0	127,5	7,9	232,1	19,73
Ca										
CaO	193,6	858,8	270,7	14,3	257,6	49,2	87,1	5,4	158,6	13,5
$Ca(OH)_2$							19,0	1,2	13,8	1,2
$CaCl_2$							555,1	34,5	393,6	33,5
CaF_2							0,007	0,0005	0,005	0,0005
Fe										
Fe_2O_3	214,5	951,6	73,8	3,9	65,1	12,4	22,0	1,4	40,1	3,4
Na										
NaCl	3,4	15,3	1,8	0,7	2,2	0,43	0,76	0,05	1,4	0,12
Na_2SiO_3	73,8	373,5	39,1	2,1	48,2	9,2	16,3	1,01	29,7	2,5
Mg										
MgO	0,025	0,11	0,02	0,001	0,053	0,01	0,02	0,001	0,03	0,0023
Al										
Al_2O_3	84,2	373,5	162,5	8,6	151,5	28,9	66,6	4,14	76,4	6,5
K	0,25	1,1	0,83	0,04	1,03	0,2	0,45	0,03	0,5	0,04
K_2O	10,8	48,0	36,3	1,9	44,7	8,5	19,7	1,2	22,6	1,9
Zn										
ZnO	3,2	14,2	24,3	1,3	41,4	7,9	18,2	1,1	20,9	1,8
Pb										
PbO	0,18	0,8	2,7	0,14	1,11	0,21	0,37	0,02	0,84	0,07
Cu	1,9	8,5	1,8	0,09	2,1	0,4	0,72	0,05	1,6	0,14
Cr										
Cr_2O_3	1,5	6,5	1,4	0,07	0,4	0,08	0,14	0,009	0,36	0,03
Ni	0,26	1,2	0,27	0,14	0,09	0,017	0,03	0,002	0,08	0,007
Cd	0,09	0,02	0,78	0,04	0,3	0,058	0,11	0,007	0,27	0,02
Hg	0,02	0,005	0,0034	0,0002	0,22	0,04	0,08	0,005	--	--
Hg_2Cl_2	--	--	--	--	--	--	0,84	0,05	0,61	0,05
As	0,018	0,08	0,05	0,003	0,035	0,007	0,01	0,002	0,031	0,003
Ag	0,037	0,16	0,07	0,004	0,08	0,02	0,03	0,002	0,07	0,006
Ba	3,3	14,6	3,14	0,17	5,8	1,1	2,0	0,12	5,7	0,49
Mn	1,3	5,6	1,1	0,06	0,37	0,07	0,12	0,01	0,28	0,024
Sb	0,15	0,64	11,1	0,59	0,53	0,1	0,18	0,011	0,4	0,03
Se	0,0006	0,003	0,03	0,0013	0,03	0,005	0,009	0,0005	0,02	0,002
Sn	0,05	0,22	0,07	0,0036	0,066	0,01	0,02	0,001	0,06	0,005
V	0,014	0,06	0,013	0,0007	0,022	0,004	0,007	0,0005	0,013	0,001
H_3O^+							22,7	1,36		
Cl^-							42,4	2,54		
Σ	*1.000*	*4.436,7*	*1.000*	*52,9*	*1.000*	*191,0*	*1.000*	*62,1*	*1.000*	*85,0*
	[g/kg]	*[kg/h]*	*[g/kg]*	*[kg/h]*	*[g/kg]*	*[kg/h]*	*[g/kg]*	*[kg/h]*	*[g/kg]*	*[kg/h]*

Die Oxide wurden in ihre Elementarform umgerechnet zum direkten Vergleich mit Literaturwerten. Tabelle 4-13 zeigt die Zusammensetzung der Schlacke und Kesselasche.

Tabelle 4-13: Metallische und halbmetallische Bestandteile der Schlacke und der Kesselasche - Vergleich Simulation/Literatur -

	Schlacke [g/kg$_{Schlacke}$]		Kesselasche [g/kg$_{Kesselasche}$]	
	Referenz Simulation (Erwartungsbereich)	Simulation	*Referenz Simulation (Erwartungsbereich)*	Simulation
Si	*150 – 300*	190,2	*100 – 250*	171,8
Ca	*50 – 140*	138,3	*70 – 200*	193,3
Fe	*40 – 200*	150,1	*15 – 65*	51,7
Na	*10 – 60*	29,2	*12 – 55*	15,5
Mg	*7 – 20*	0,015	*10 – 25*	0,015
Al	*10 – 80*	44,6	*50 – 120*	86,0
K	*5 – 20*	9,0	*20 – 50*	31,0
Zn	*2 – 7*	2,6	*1 – 20*	19,5
Pb	*0,2 – 5*	0,17	*2 – 10*	2,5
Cu	*2 – 5*	1,9	*0,5 – 2*	1,8
Cr	*0,2 – 3*	1,0	*0,2 – 1*	1,0
Ni	*0,2 – 0,5*	0,26	*0,05 – 0,3*	0,27
Cd	*0,001 – 0,03*	0,021	*0,05 – 0,6*	0,78
Hg	*0,0001 – 0,02*	0,005	*0,0003 – 0,005*	0,0034
As	*0,001 – 0,02*	0,018	*(0,02)*	0,052
Ag	--	0,037	--	0,073
Ba	*1 ; 1,5*	3,29	--	3,14
Mn	*0,5 – 1,5*	1,27	*(0,8)*	1,1
Sb	--	0,145	--	0,025
Se	--	0,001	--	0,069
Sn	*0,1 – 0,3*	0,05	*0,5 – 3*	0,013
V	--	0,014	--	0,01

Die Ergebnisse der Schlacke- und Kesselaschezusammensetzungen in Tabelle 4-13 zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Literaturdaten. Dabei ist anzumerken, daß die Schlacken im wesentlichen aus den Hauptelementen Silizium, Calcium, Eisen, Natrium und Aluminium bestehen. Ausnahmen bilden die Elemente Magnesium (Mg) und Zinn (Sn), wobei davon auszugehen ist, daß beide Elemente im Abfallinput zu klein angenommen worden sind.

Die gute Übereinstimmung ist einerseits auf die Möglichkeit der direkten Gegenüberstellung mit Literaturwerten und andererseits auf die erfolgte Kalibrierung des Simulationsmodells im Hinblick auf die Aufteilung der festen Anteile auf Schlacke/Rohgas und Kesselasche/Rohgas zurückzuführen. Die Kalibrierung konnte anhand der zur Verfügung stehenden Rohgaswerte, die eine interne Größe bei der Modellbetrachtung darstellen, vorgenommen werden (siehe Abschnitt 4.7.4.).

Die weitere Betrachtung der Reststoffe der Rauchgasreinigung gestaltet sich zunehmend schwieriger, da der direkte Vergleich mit den entsprechenden Literaturwerten nur teilweise gegeben ist. Tabelle 4-14 kann daher nur eine qualitative Aussage bezüglich der Reststoffzusammensetzung liefern.

Es ist jedoch festzustellen, daß die Größenordnung der Hauptanteile der anhand des Simulationsmodells berechneten Reststoffe mit der aus der Literatur weitgehend übereinstimmt.

Tabelle 4-14: Metallische und halbmetallische Bestandteile der Reststoffe der Rauchgasreinigung - Vergleich Simulation/Literatur -

	Entstaubungsrückstände [g/kg$_{Reststoff}$]		Reaktionsprodukte [g/kg$_{Reststoff}$]	
	Referenz Simulation (Erwartungsbereich)	Simulation [Zyklon]	*Referenz Simulation (Erwartungsbereich)*	Simulation [Reststoff-Sprühtrockner]
Si	*(150)*	175,9	*10 – 20*	59,5
Ca	*60 – 130*	184,0	*200 – 350*	272,14
Fe	*25 – 50*	45,5	*15 – 30*	15,4
Na	*20 – 50*	19,1	*4 – 10*	6,4
Mg	*12 – 25*	0,03	*5 – 13*	0,0014
Al	*70 – 85*	80,2	*4 – 12*	35,2
K	*20 – 50*	38,2	*3 – 25*	16,8
Zn	*15 – 35*	33,2	*5 – 9*	14,6
Pb	*5 - 10*	1,0	*1 – 4*	0,35
Cu	*1 – 2*	2,1	*0,3 – 0,7*	0,72
Cr	*0,5 – 2,0*	0,28	*0,01 – 0,2*	0,094
Ni	*0,1 – 0,5*	0,09	*0,02 – 0,8*	0,03
Cd	*0,1 – 0,5*	0,3	*0,05 – 0,5*	0,11
Hg	*0,005 – 0,02*	0,23	*0,05 – 1,5*	0,79
As	*(0,03)*	0,035	*0,005 ; 0,009*	0,012
Ag	--	0,08	--	0,027
Ba	*(0,4)*	5,8	*(0,5)*	1,96
Mn	*0,8 ; 1,6*	0,37	*0,46 ; 1*	0,12
Sb	*0,5 – 0,9*	0,53	*(0,73)*	0,18
Se	*0,013 ; 0,017*	0,026	*0,01 ; 0,12*	0,01
Sn	*1 – 5*	0,07	*0,5 – 2*	0,02
V	*(0,04)*	0,022	*(14)*	0,0073

Anhand Abbildungen 4-7 bis 4-10 kann jedoch die Plausibilität der berechneten Reststoffe dargestellt werden. Im Zyklon werden erhöhte Mengen der vom Rauchgas mitgerissenen Oxide abgeschieden (Abb. 4-7). Die Reststoffzusammensetzung zeigt damit eine übereinstimmende Struktur mit der Zusammensetzung der Schlacke und Kesselasche, wobei auch der Hauptanteil bei den Silizium-, Calcium-, Eisen- und Aluminiumoxiden liegt.

Abbildung 4-7: Reststoffe-Zyklon (Simulation)

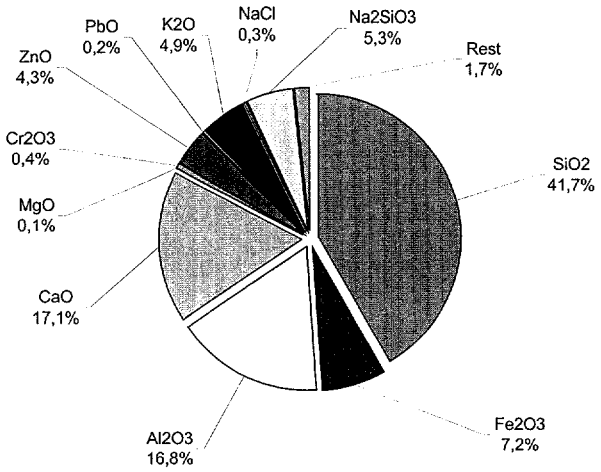


Abbildung 4-8: Reststoffe-Sprühtrockner (Simulation)

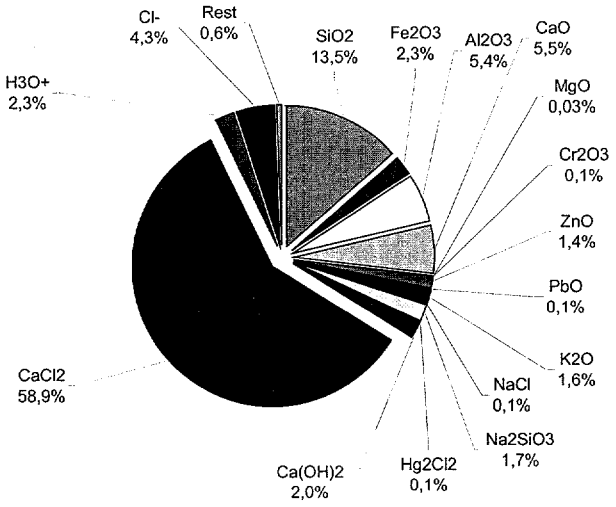


Abbildung 4-9: **Reststoffe-Elektrofilter (Simulation)**

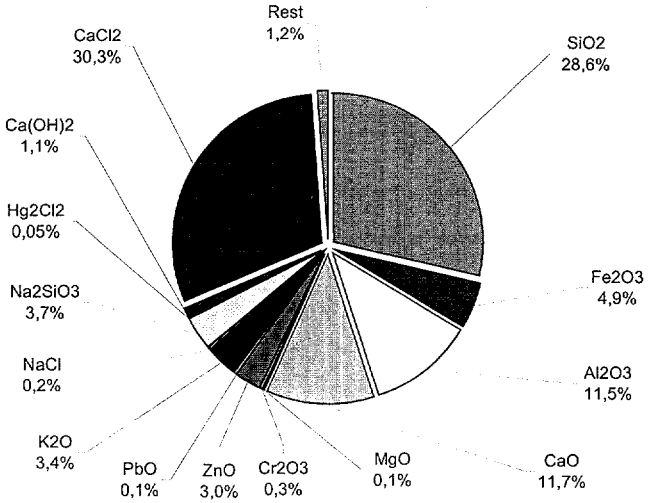
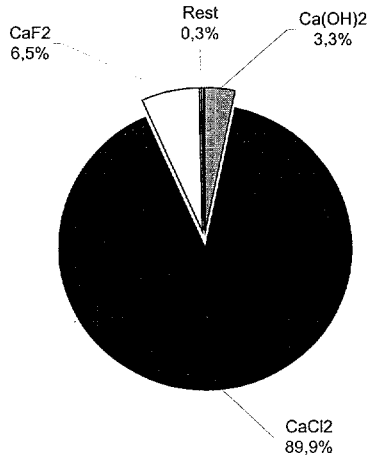


Abbildung 4-10: **rückgeführte Waschflüssigkeit zum Sprühtrockner (Simulation)**



Durch die Rückführung der neutralisierten Waschflüssigkeit in den Sprühtrockner wird ein erhöhter Anteil von Calcium-Verbindungen ($CaCl_2$, CaF_2 und $Ca(OH)_2$) eingedüst. Ein hoher Anteil dieser Verbindungen wird in die ausgeschiedenen Reststoffe im Sprühtrockner verlagert und nimmt einen Anteil von ca. 65 Gew.-% an. Mit der Waschflüssigkeit werden weiterhin Feststoffanteile, vorwiegend Oxide, aus dem Rauchgasstrom entfernt (Abb. 4-8).

Die abgeschiedenen Reststoffe im Elektrofilter stimmen sehr gut mit der Funktion dieses Apparates als Feinstaubabscheider überein. Dabei werden wieder verstärkt die restlichen Feststoffanteile aus dem Rauchgasstrom abgeschieden (Abb. 4-9).

4.7.4 Betrachtung der Emissionsdaten

Die simulierten Emissionsdaten werden Meßwerten direkt gegenübergestellt (siehe auch Anhang C, Tab. C7-1a/b).

Der zum Einsatz kommende Reaktor zur Simulation der Brennkammer basiert auf der Annahme vollkommener Verbrennung unter Gleichgewichtsbedingungen. Dies erklärt auch den geringen Anteil an Sauerstoff O_2 im Rohgas im Vergleich zu den gemessenen Werten an der Anlage. Darüber hinaus findet eine Umwandlung des Kohlenmonoxids (CO) zu Kohlendioxid (CO_2) statt, so daß der Anteil an CO_2 zu hoch ausfällt. CO ist dagegen vernachlässigbar klein und liefert keine verläßliche Aussage. In diesem Bereich ist anzumerken, daß anhand der Modifikation des Modells durch die Erhöhung des Detaillierungsgrades bessere Ergebnisse zu erwarten sind.

Die betrachteten Gasanteile NO_X, SO_2, HCl und HF im Rohgas liegen im Betriebsbereich der Anlage und zeigen somit eine gute Übereinstimmung der Simulation. Die HCl- und HF-Werte liegen jedoch im unteren Betriebsbereich, was auf eine zu geringe Menge an Chlor- und Fluoranteilen im Abfallinput zurückzuführen ist. Dies hat zur Folge, daß die simulierten HCl- und HF-Werte im Reingas zu gering ausfallen. Es ist jedoch anzumerken, daß die Simulationsergebnisse in der Größenordnung der gemessenen Werte liegen und daher eine verläßliche Aussage liefern.

Die gute Übereinstimmung der metallischen und halbmetallischen Anteile im Rohgas deckt sich mit der schon beobachteten Übereinstimmung der Anteile in der abgeschiedenen Schlacke und der Kesselasche. Hier ist zu erwähnen, daß die zur Verfügung stehenden Rohgasmessungen als Basisdaten zur Kalibrierung des Modells im Bereich des Brennraumes gedient haben.

Tabelle 4-15: simulierte Emissionsdaten im Rohgas (Grundmodell)

			Referenz Simulation (Betriebsbereich)	Simulation
Gasförmige Emissionen	H_2O_{Rohgas}	[Vol.-%]	--	9,3
	$O_{2\text{-}Rohgas,\ tr.}$	[Vol.-%]	*10,2 – 12,4*	9,2
	$CO_{2\text{-}Rohgas,\ tr.}$	[Vol.-%]	*6,9 – 9,3*	13,5
	$CO_{Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*5,4 – 16*	0,0068
	$NO_{x\text{-}Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*253 – 453*	332,1
	$SO_{2\text{-}Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*68 – 520*	298,9
	$TOC_{Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*1,0 – 2,3*	--
	$HCl_{Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*168 – 1.629*	738,4
	$HF_{Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*0,5 – 18,7*	2,64
	(I-TEQ) $PCDD/F_{Rohgas,\ tr.}$	[ng/Nm³]	*3,2*	--
Metalle und Halbmetalle	$Staub_{Rohgas,\ tr.}$	[g/m³]	*0,77 – 7,7*	2,95
	$\sum$ (Cd + Tl)	[mg/Nm³]	*0,74 – 1,93*	1,73 (nur Cd)
	$\sum$ Hg	[mg/Nm³]	*0,07 – 1,32*	1,28
	$\sum$ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	[mg/Nm³]	*26,6 – 52,6*	25,9
	$Pb_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*2.219 – 35.145*	5.853,0
	$Cu_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*2.925 – 24.298*	12.096,2
	$Cr_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*48,4 – 1.921*	1.578,9
	$Ni_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*6 – 759*	498,6
	$Cd_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*158 – 1.912*	1.729,9
	$Hg_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*70,2 – 1.301*	1.279,0
	$As_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*10,6 – 276*	199,4
	$Ag_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*6 – 759*	453,2
	$Mn_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*18 – 3.166*	2.095,5
	$Sb_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*425 – 3.669*	3.034,9
	$Se_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	--	145,2
	$Sn_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*254 ; 1.561*	373,1
	$V_{Rohgas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*24 - 560*	122,8

Tabelle 4-16: simulierte Emissionsdaten im Reingas (Grundmodell)

			Referenz Simulation (Betriebsbereich)	Simulation (Berechnung)
Gasförmige Emissionen	$H_2O_{Reingas}$	[Vol.-%]	--	16,9
	$O_{2\text{-}Reingas,\ tr.}$	[Vol.-%]	*10,9 – 11,5*	8,3
	$CO_{2\text{-}Reingas,\ tr.}$	[Vol.-%]	--	12,4
	$CO_{Reingas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*10,2 – 16,6*	--
	$NO_{x\text{-}Reingas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*73 – 259*	96,1
	$SO_{2\text{-}Reingas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*5,0 – 94,4*	39,7
	$HCl_{Reingas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*2,0 – 2,9*	1,95
	$HF_{Reingas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*0,3 – 0,5*	0,24
	(I-TEQ) $PCDD/F_{Reingas,\ tr.}$	[ng/Nm³]	*1,41*	--
Metalle und Halbmetalle	$Staub_{Reingas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	*0,9 – 9,8*	5,34
	Σ (Cd + Tl)	[mg/Nm³]	*0,003 – 0,005*	0,001 (nur Cd)
	Σ Hg	[mg/Nm³]	*0,010 – 0,053*	0,012
	Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	[mg/Nm³]	*0,044 – 0,119*	0,084
	$Pb_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*5,9 – 48,9*	30,6
	$Cu_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*4,9 – 19,4*	14,2
	$Cr_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*3,8 – 8,2*	6,5
	$Ni_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*3,2 – 5,3*	4,8
	$Cd_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*0,4 – 1,9*	0,9
	$Hg_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*9,9 – 53*	12,2
	$As_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*0,7 – 1,1*	0,83
	$Ag_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	--	1,9
	$Mn_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*1,1 – 21,4*	10,9
	$Sb_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*3,2 – 5,3*	4,9
	$Se_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	--	0,6
	$Sn_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*3,2 – 5,3*	3,6
	$V_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	*6,4 – 10,5*	8,1

4.7.5 Abscheidegrade der Simulation

Zusätzlich zu den Emissionsdaten der Roh- und Reingase werden die Abscheidegrade der Simulation in bezug auf die relevanten Schadstoffe den am MHKW Darmstadt berechneten Abscheidegraden gegenübergestellt.

Tabelle 4-17: Abscheidegrade der relevanten Schadstoffe (Grundmodell)

	Abscheidegrade [%]		
	MHKW Darmstadt	Referenz Simulation (Erwartungswert)	Simulation
Gesamtstaub	*99,8*	> 95	99,8
SO_x (SO_2)	*94,4*	> 80	86,7
HCl	*99,7*	> 95	99,7
HF	*96,2*	> 95	90,9
NO_x (NO_2)	*57,2*	> 60	71,1
Σ (Cd + Tl)	*99,6*	> 94	99,8 (nur Cd)
Σ Hg	*85,5*	> 80	99,0
Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	*99,8*	> 95	99,7
PCDD/PCDF	*56,3 (ohne DeNOx)* *99,4 (mit DeNOx)*	-- > 90	nicht betrachtet

Dabei eröffnet sich eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der Simulationsgüte und erklärt somit das Abscheideverhalten einiger Schadstoffe. Z. B. erklären die hohen NO_x– und Hg-Abscheidegrade, daß die entsprechenden Werte im Reingas im unteren Bereich der gemessenen Werte liegen.

5 Mitverbrennung heizwertreicher Abfälle in Müllverbrennungsanlagen

Die Zugabe von Abfallfraktionen mit - im Vergleich zu Hausmüll - höheren Heizwerten in den Feuerraum bestehender Hausmüllverbrennungsanlagen ist verbunden mit einer Reduzierung im Durchsatz. Grund dafür ist die höhere thermische Belastung, die schnell zum Erreichen der Auslegungsgrenzen des Kessels führt. Dieser Aspekt soll anhand des erstellten Simulationsmodells reproduziert werden.

In der Simulation wird Hausmüll durch die Zugabe von Altholz- bzw. Shredderabfällen bis maximal 1.000 kg/h substituiert. Die neuen Betriebsbedingungen im Feuerraum werden betrachtet und Änderungen in den Reststoffmengen und Hilfsmittelverbräuchen festgehalten.

5.1 Inputparameter für die Simulation

Die Inputparameter sind in Tabelle 5-1 zusammengefaßt:

Tabelle 5-1: Inputparameter der Simulation

		Input (A)	Input (B)	Input (C)
$Hu_{Müll}$	[kJ/kg]	9.650	10.126	10.181
$m_{Hausmüll}$	[kg/h]	11.020	10.020	10.020
$m_{Altholz}$	[kg/h]	-	1.000	-
$m_{Shredder}$	[kg/h]	-	-	1.000
$m_{Müll}$	[kg/h]	11.020	11.020	11.020
$V°_{Gesamtluft}$	[Nm³/h]	48.800		
$V°_{Primärluft}$	[Nm³/h]	27.660		
$t_{Primärluft}$	[°C]	90		
$V°_{Sekundärluft}$	[Nm³/h]	14.740		
$V°_{Kühlluft}$	[Nm³/h]	6.400		
$V°_{Luft-vorKamin}$	[Nm³/h]	15.700		

Zu jedem Abfallgemisch wurde die Zusammensetzung und der Heizwert anhand der in Anhang C, Tab. C1-1 aufgeführten Daten der einzelnen Fraktionen ermittelt. Hierbei ergeben sich die prozentualen Änderungen in den Elementen gegenüber dem Referenzfall (reiner Hausmüll) gemäß Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2: prozentuale Änderung der einzelnen Elemente der Inputströme gegenüber Input(A)

	Input (A) [kg/h]	Input (B) [%]	Input (C) [%]
C	2998,5	+ 4,6	+ 2,6
H	380,5	+ 4,1	+ 4,1
O	2027,5	+ 7,7	- 3,2
N	33,1	- 1,5	+ 19,7
S	22,1	- 2,3	+ 15,9
Cl	55,2	- 7,3	+ 21,8
F	2,8	- 11,3	+ 1,8
Feuchte (H_2O)	***2756,1***	***- 2,7***	***- 6,8***
Summe Brennbares	***5520,3***	***+ 5,6***	***+ 0,9***
Summe Asche	***2747,3***	***- 8,4***	***+ 4,8***
Si	908,2	- 9,0	- 9,1
Ca	681,6	- 7,6	- 7,5
Fe	683,0	- 8,8	+ 30,9
Na	136,4	- 9,1	- 7,5
Mg	0,077	+ 1.028,0	+ 13.343,3
Al	227,5	- 8,6	+ 2,2
K	54,6	- 7,1	- 4,4
Zn	22,9	- 6,9	+ 64,8
Pb	1,2	+ 59,4	+ 359,0
Cu	9,3	- 5,8	+ 267,5
Cr	4,6	- 6,9	+ 9,7
Ni	1,2	- 4,7	+ 113,1
Cd	0,228	- 6,1	+ 50,1
Hg	0,091	- 3,4	+ 1,1
As	0,092	- 3,4	+ 223,5
Ag	0,193	- 9,1	- 9,1
Ba	16,6	- 9,1	- 9,1
Mn	5,8	- 5,6	- 9,1
Sb	1,4	- 8,5	+ 1,0
Se	0,012	+ 81,7	- 9,1
Sn	0,243	- 5,0	+ 3.414,5
V	0,068	- 9,1	- 9,1
Heizwert [kJ/kg]	***9.650***	***+4,9***	***+ 5,5***

Input (A): 11.020 kg/h Hausmüll
Input (B): 10.020 kg/h Hausmüll + 1.000 kg/h Altholz
Input (C): 10.020 kg/h Hausmüll + 1.000 kg/h Shredderabfälle

Bei der Zugabe von Altholz – Input (B) – ist im wesentlichen eine Verschiebung in Richtung höhere brennbare Anteile bei Rückgang der Ascheanteile (inerte Anteile) zu beobachten. Weiterhin wird der Aspekt der Heizwerterhöhung durch den Rückgang des Feuchteanteils im Input - Input (B) und (C) - begünstigt.

Zusätzlich zu den resultierenden höheren Heizwerten der Inputfraktionen wird ein erhöhter Eintrag bestimmter Schadstoffe durch die Zugabe der heizwertreichen Fraktion in Form von Altholz- bzw. Shredderabfällen beobachtet. Hervorzuheben ist der deutlich erhöhte Chlor- und Schwefelgehalt bei der Shredderzugabe – Input (C) - .

Der erhöhte Ascheanteil im Fall der Shredderzugabe – Input (C) – resultiert aus den hohen Anteilen an Metallen, die bei dem Aufbereitungsvorgang im Shredderabfall aufkonzentriert werden [SCHÄFER 1997] [KEHL 1998]. Besonders zu betrachten sind die erhöhten Anteile an Eisen, Zink, Blei, Kupfer, Nickel, Cadmium und Arsen.

Die Zunahme der beiden Elemente Magnesium und Zinn ist mit der schon zu geringen angenommenen Menge im Hausmüllinput zu begründen und wird in der weiteren Betrachtung nicht in die Diskussion mit einbezogen.

5.2 Ergebnisse der Simulation

5.2.1 Betriebsparameter (Betrachtung des Feuerraumes)

Für die Betrachtung der Einflüsse der Zugabe heizwertreicher Abfallfraktionen auf das Verbrennungsverhalten im Feuerraum wurden stellvertretend die Parameter: Rohgasmenge, Temperatur im Feuerraum und Temperatur vor Kesseleintritt gewählt, um die wesentlichen Einflüsse auf das Verbrennungsverhalten im Hinblick auf die zusätzliche Belastung des Feuerraumes zu diskutieren.

Tabelle 5-3: Rohgasmenge- und Temperaturänderung bei der Zugabe heizwertreicher Abfallfraktionen

	Rohgasmenge [Nm^3/h]	Temperatur [°C]	
	$\dot{V}_{Rohgas}$	$t_{Feuerraum}$	$t_{Eintritt\text{-}Kessel}$
Input (A)	55.356	1.044	781
Input (B)	55.671 (+ 0,6 %)	1.209 (+ 15,8 %)	853 (+ 9,2 %)
Input (C)	55.452 (+ 0,2 %)	1.117 (+ 7,0 %)	818 (+ 4,7 %)

Aus Tabelle 5-2 wurde deutlich, daß die Zugabe von Altholz zu einer Erhöhung des brennbaren Anteils im Gesamtinput führt. Dieser Aspekt spiegelt sich wider in einer – für den betrachteten Fall relativ gesehen geringen - Erhöhung der Rauchgasmengen um ca. 300 Nm^3/h (0,6 Vol.-%).

Durch die Betrachtung des Verlaufes der Rauchgastemperaturen im Feuerraum und am Kesseleintritt wird die zusätzliche thermische Belastung im Feuerraum (Ausmauerung, Rostbelag, ...) sowie die der Kesselaustauschflächen deutlich.

Allgemein kann eine wesentliche Zunahme der Temperaturen sowohl im Feuerraum als auch am Kesseleintritt beobachtet werden.

Bei einem Holzanteil von 1000 kg/h im Gesamtinput – Input (B) - erhöhen sich die Temperaturen am Kesseleintritt auf über 850°C ($\Delta t_{Kesseleintritt} \approx 70°C$), welche sehr nahe an der kritischen Temperatur der Kesselauslegung liegen. Zu beachten ist, daß diese Temperaturentwicklung bei einer konstanten Primär- und Sekundärluftmenge entstand. Durch eine erhöhte Zugabe von Luft kann dieser Temperaturentwicklung entgegengewirkt werden, jedoch führt dies zu einem Anstieg der Rauchgasmengen und dadurch zu einer erhöhten Belastung der Rauchgasreinigungsanlage.

Durch die geringe Zunahme der Rauchgasmengen bei den betrachteten Fällen, die weit unter den Auslegungswerten der einzelnen Apparate liegen, wird keine Beeinträchtigung der Funktionsweise der Rauchgasreinigungsapparate erwartet, so daß kein konstruktiver Modifikationsbedarf besteht. Die weitere Diskussion wird deshalb auf die Betrachtung der Hilfsmittelverbräuche, der Reststoffe und der Emissionswerte eingeschränkt.

5.2.2 Hilfsmittelverbräuche

Die simulierten Hilfsmittel und deren prozentuale Änderung gegenüber der reinen Hausmüllverbrennung sind in Tabelle 5-4 dargestellt.

Tabelle 5-4: Mengen der berechneten Hilfsmittel in der Rauchgasreinigung

			Input (A)	Input (B)	Input (C)
Neutralisation	Kalkmilch	[kg/h]	46	53 (+ 15,2 %)	71 (+ 54,4 %)
Ring-Jet	NaOH	[kg/h]	42	41 (- 2,4 %)	50 (+ 19,1 %)
	Wasser	[l/h]	6.700	6.730 (+ 0.4 %)	6.687 (- 0,2 %)
$DeNO_x$	Brenngas	[m³/h]	114,5	120 (+ 4,8 %)	116,3 (+ 1,6 %)
	Ammoniak	[kg/h]	4,4	5,8 (+ 30,4 %)	6,4 (+ 45,4 %)

Durch die Betrachtung des Feuerraumes in Abschnitt 5.2.1 wurde nur eine unwesentliche Erhöhung der Rauchgasmengen festgestellt. Jedoch wird durch die prozentuale Zunahme des Verbrauches an Hilfsmitteln bei der Altholz- und Shredderzugabe im Vergleich zu der reinen Hausmüllverbrennung die zusätzliche Belastung der Rauchgasreinigung deutlich.

Im Fall der Shredderzugabe korreliert der erhöhte Verbrauch an Kalkmilch zur Neutralisation des rückgeführten Waschwassers mit dem erhöhten Eintrag bestimmter Schadstoffe (Schwefel, Chlor, ...). Anders im Fall der Holzzugabe, hier ist der erhöhte Kalkmilchverbrauch auf den

höheren brennbaren Anteil im Input und die resultierende Verlagerung der Abreinigung auf die Apparate der Rauchgasreingung zurückzuführen (siehe auch Abschnitt 5-3).

Durch die erhöhten SO_2-Emissionen bei der Zugabe von Shredderabfällen muß im Bereich des Wäschers eine erhöhte Menge an Natronlauge zugegeben werden. Weiterhin wird eine erhöhte Menge Ammoniak im Bereich der $DeNO_x$-Anlage eingedüst, um den erhöhten NO_x-Emissionen entgegenzuwirken. Dies gilt für beide Fälle (siehe auch Abbildung 5-1).

5.2.3 Reststoffströme

Die simulierten Mengen an Schlacke und Reststoffen und deren prozentuale Änderung gegenüber der reinen Hausmüllverbrennung sind in Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-5: Schlacke- und Reststoffmengenänderungen bei der Zugabe heizwertreicher Abfallfraktionen

	Schlacke [kg/h]	Reststoffe [kg/h]			
		Kesselasche	Zyklon	Sprühtrockner	Elektrofilter
Input (A)	4.436,7	52,9	191,0	62,1	85,0
		Summe = 404,2			
Input (B)	4.017,0	47,9	170,7	66,6	90,5
	(- 9,5 %)	*(- 9,5 %)*	*(- 10,6 %)*	*(+ 7,2 %)*	*(+ 6,5 %)*
		Summe = 375,7 *(- 7,0 %)*			
Input (C)	4.052,9	51,93	193,1	84,3	116,5
	(- 8,65 %)	*(- 1,8 %)*	*(+ 1,1 %)*	*(+ 35,7 %)*	*(+ 37,0 %)*
		Summe = 445,8 *(+ 10,3 %)*			
	Verwertung (Straßenbau, ...)	*Entsorgung (Deponie, Untertagedeponie, ...)*			

Die Zugabe von Altholz führt zu einer Erhöhung des brennbaren Anteils und gleichzeitig zu einem Rückgang des Ascheanteils im Gesamtinput. Dies führt wiederum zu geringeren Schlacke- und Kesselaschemengen und einem Rückgang der im Grobstaubabscheideapparat (Zyklon) zurückgehaltenen Mengen. Im allgemeinen wird die Abreinigung des Rauchgases auf die Apparate: Sprühtrockner, Elektrofilter und Wäscher verlagert.

Entgegen den Erwartungen ist im Fall der Shredderzugabe und trotz erhöhter Ascheanteile im Input ein Rückgang der Schlacke- und Kesselaschemengen zu beobachten. Dies ist auf das reduzierte Sauerstoffangebot im Feuerraum zurückzuführen, so daß keine optimale Einbindung der Ascheanteile in die Schlacke erfolgen kann. Im wesentlichen ist dieser Aspekt auf die modellbedingte Aufteilung des Feuerraumes in Brennraum und Nachbrennkammer zurückzuführen. Die Primärluftmenge ist nicht ausreichend, um eine vollständige Bildung der Oxide

hervorzurufen. Einige der Elemente verlassen den Feuerraum in die Nachbrennkammer, wobei dort und erst durch die Zugabe von Sekundärluft die entsprechenden Reaktionen stattfinden können.

Aus der erhöhten Zugabe an Hilfsmitteln in der Rauchgasreinigung resultiert eine Zunahme der in den Apparaten der Feinstaubscheidung (Sprühtrockner und Elektrofilter) abgeschiedenen Reststoffmengen. Im Fall der Shredderzugabe liegt diese Zunahme bei über 35 Gew.-% (Tabelle 5-3).

5.2.4 Betrachtung der Emissionsdaten

In Abbildung 5-1 werden die wesentlichen Emissionswerte im Reingas für die beiden Fälle: Zugabe von Holzabfällen und Zugabe von Shredderabfällen im Feuerraum des Müllheizkraftwerkes Darmstadt, dem Grundmodell gegenübergestellt. Die 100%-Linie stellt die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV für den jeweiligen Schadstoff (Tagesmittelwerte) dar.

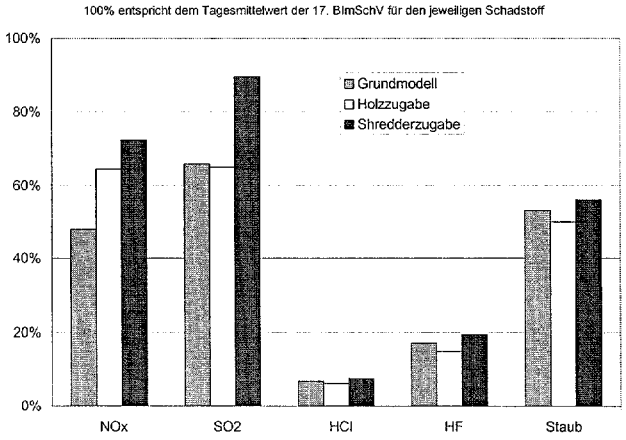


Abbildung 5-1: prozentualer Vergleich der Emissionsdaten im Reingas

Durch die Erhöhung der brennbaren Anteile und die daraus resultierenden erhöhten Temperaturen im Feuerraum wird die Bildung von Stickoxiden begünstigt. Dies erklärt auch den erhöhten Ammoniakverbrauch in der DeNO$_x$-Anlage.

Da in der Simulation die Korngrößenverteilung für alle Elemente im Rauchgasstrom gleich angenommen wurde, kann anhand des vorliegenden Modells der Verlauf der leichten Partikel-

teilchen im Rauchgasstrom nicht hinreichend genau betrachtet werden. Die erwartete Zunahme des Staubgehaltes, besonders im Fall der Altholzzugabe, tritt bei der Simulation nicht auf. Hier besteht ein weiterer Modifikationsbedarf im Hinblick auf die Einbindung elementspezifischer Partikelgrößenverteilungen, um bessere Ergebnisse zu erzielen.

Durch die Gegenüberstellung der Emissionswerte im Reingas mit den Tagesmittelwerten der 17. BImSchV sind besonders die erhöhten NO_x- und SO_2-Emissionen als limitierender Faktor bei der Zugabe weiterer Shreddermengen im Feuerraum zu sehen.

6 Betrachtung einer HYBRID-Anlage am Standort des MHKW Darmstadt

Das vorliegende Kapitel diskutiert die Konzeption einer HYBRID-Abfallbehandlungsanlage als Verbund einer Shredder-Verbrennungsanlage mit dem Müllheizkraftwerk Darmstadt. Hierzu muß eine Shredder-Verbrennungsanlage geeigneter Größe gefunden werden, um damit das Grundmodell der Simulation zu erweitern.

6.1 Anlagenauswahl

Der von der Shredder-Verbrennungsanlage produzierte Rohgasvolumenstrom korreliert mit der Kapazität der Anlage zur Abfallbehandlung. Die Höhe des Rohgasvolumenstroms muß den Gegebenheiten der Grundanlage (MHKW Darmstadt) gerecht werden, um in der existierenden Rauchgasreinigungsanlage mitbehandelt werden zu können. Daher interessiert an der Grundanlage an erster Stelle der Übergang zwischen der Verbrennungseinheit und Energieerzeugung zur Rauchgasreinigungsanlage.

Hier läßt sich zunächst eine planungsbedingte Kapazitätsreserve von ca. 7.000 Nm^3/h ausmachen (siehe hierzu auch die Daten in Anhang A, Tab. A3-1). Zusätzlich sind betriebsbedingte Reserven vorhanden, weil die Auslegungswerte für die Rohgasmengen der Grundanlage nicht erreicht werden. Dies wird anhand der in Abbildung 1-2 (Kap. 1) wiedergegebenen Beispielmessung verdeutlicht. Insgesamt läßt sich hier, als Summe der planungsbedingten und betriebsbedingten Reserven, eine Gesamtreserve von über 20% ausmachen, eine Größenordnung, die auch von Herstellern als realistisch angesehen wird [SCHUMACHER 1997].

Eine weitere Bestätigung liefert die Betrachtung der Mittelwerte aus anderen am MHKW Darmstadt durchgeführten Meßkampagnen, wie Tabelle 6-1 entnommen werden kann:

Tabelle 6-1: Mittelwerte gemessener Rauchgasmengen am MHKW Darmstadt

	Rauchgasmenge ($V°_{RG\text{-}EndeWäscher}$) [$Nm^3/h$]
CLEAN I	54.000
HU	54.600
SAGA II	55.700
Infrarot	63.500
Final CLEAN	57.600
Auslegung (Linie 1)	**79.000**

Auf dieser Basis wird mit einer verfügbaren Kapazität der Rauchgasreinigungsanlage zur Behandlung zusätzlicher Rohgasmengen von 12.500 Nm^3/h (maximal 15.500 Nm^3/h) gerechnet.

Unter Verwendung des theoretischen Zusammenhangs zwischen der behandelten Abfallmenge und der produzierten Rohgasmenge nach WAGNER kann die Größe der Shredder-Verbrennungsanlage aus Abbildung 6-1 entnommen werden. Hier ist für die Luftzahl ein Bereich von 1,6 bis 2,0 dargestellt mit dem für Hausmüllverbrennungsanlagen typischen Mittelwert von 1,8.

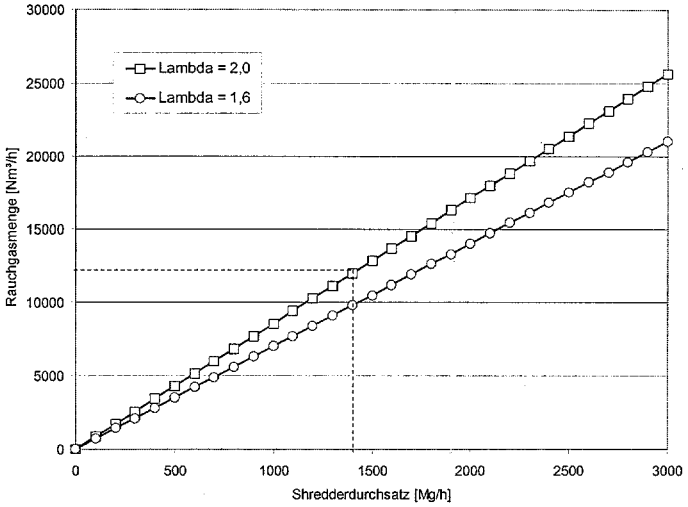


Abbildung 6-1: theoretische Rauchgasmengen bei Shredder-Verbrennungsanlage in Abhängigkeit von den jährlichen Behandlungskapazitäten für unterschiedliche Luftzahlen (λ = 1,6 – 2,0) [WAGNER 1990]

Für die Behandlung heizwertreicher Abfälle wird mit einer höheren Luftzahl gerechnet, so daß bei λ = 2,0 der korrespondierende Shredderdurchsatz zu ca. 1.400 kg/h ermittelt werden kann.

Als Anlagentechnologie kommen die in Kapitel 2 diskutierten Konzepte in Frage. Ein Beispiel für ein Verfahrensfließbild mit einer Auflistung der Anlagenkomponenten ist in Anhang A, Tabelle A3-1 wiedergegeben.

6.2 Simulationsmodell der HYBRID-Anlage

Das Simulationsmodell der HYBRID-Anlage basiert auf dem in Kapitel 4 vorgestellten Grundmodell. Dazu wird die Shredderanlage durch eine Verbrennungsanlage und Energieerzeugung modelliert mit vergleichbaren Austauschvorgängen mit der Umgebung. Die bestehende Rauchgasreinigungsanlage behandelt jetzt das Rohgas aus der Müllverbrennungsanlage sowie das Rohgas aus der Shredderanlage. Hierzu muß eine Mischstrecke stromauf von den Zyklonen vorgesehen werden, so daß der gemeinsame Rohgasstrom diesen zugeführt werden kann. Vergleiche hierzu Abbildung 6-2.

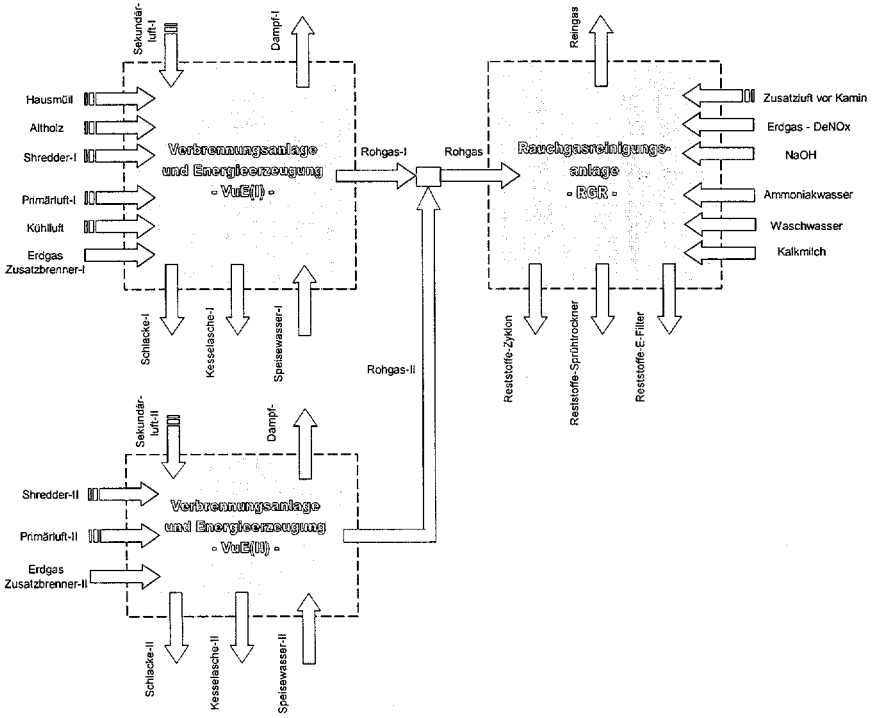


Abbildung 6-2: Input- und Outputströme des Simulationsmodells (Hybrid-Anlage)

Mit dem kombinierten Modell werden folgende Aspekte untersucht:

- Auslastung der Komponenten der Rauchgasreinigungsanlage
- Auswirkungen auf die Hilfsmittelverbräuche
- Auswirkungen auf die Mengen der verbleibenden Reststoffe
- Betrachtung der Qualität des Reingases

6.3 Inputparameter der Simulation

Die für die Simulation gewählten Inputparameter sind in Tabelle 6-2 aufgelistet:

Tabelle 6-2: Inputparameter der Simulation

			Simulation (Inputparameter)
Input Hausmüllanlage	$Hu_{Müll}$	[kJ/kg]	9.650
	$m_{Müll}$	[kg/h]	11.020
	$V°_{Gesamtluft}$	[Nm³/h]	48.800
	$V°_{Primärluft}$	[Nm³/h]	27.660
	$t_{Primärluft}$	[°C]	90
	$V°_{Sekundärluft}$	[Nm³/h]	14.740
	$V°_{Kühlluft}$	[Nm³/h]	6.400
Input Shredderanlage	$Hu_{Shredder}$	[kJ/kg]	15.500
	$m_{Shredder}$	[kg/h]	1.400
	$V°_{Gesamtluft-II}$	[Nm³/h]	12.390
	$V°_{Primärluft-II}$	[Nm³/h]	7.690
	$t_{Primärluft-II}$	[°C]	70
	$V°_{Sekundärluft-II}$	[Nm³/h]	4.700
	$V°_{Kühlluft-II}$	[Nm³/h]	--
	$V°_{Luft-vorKamin}$	[Nm³/h]	15.700

Die Inputparameter für die Hausmüllverbrennungsanlage decken sich mit den in Kapitel 5 verwendeten Werten.

Die zusätzlichen Parameter der Shredderanlage sind an die vorher vorgenommene Auswahl der Anlagengröße angepaßt. Da die ausgewählten Anlagenkonzepte mit wassergekühlten Rosten ausgestattet sind, wird auf den Inputstrom Kühlluftmenge verzichtet.

6.4 Ergebnisse der Simulation

6.4.1 Betriebsparameter (Auslastung der Apparate)

Ein wesentlicher Aspekt bei der Betrachtung der Hybridanlage ist die Auslastung der einzelnen Apparate der Rauchgasreinigungsanlage. In Abbildung 6-3 sind diese der ursprünglichen Simulation der Hausmüllverbrennungsanlage gegenübergestellt. Zusätzlich wurde die entsprechende Auslastung der Apparate bezogen auf den Auslegungswert berechnet, um somit eventuelle Überlastungen des Systems aufzudecken und auf die entsprechenden entgegenwirkenden Maßnahmen hinzuweisen.

Aus Abbildung 6-3 ist zu erkennen, daß bei den Apparaten: Zyklon, ByPass sowie Austritt Quench im Falle der HYBRID-Betrachtung geringfügige Engpässe entstehen, die nicht unbedingt eine konstruktive Änderung der Apparate erforderlich machen.

Der Zyklon kann die geringe Zusatzmenge (+ 1,3 Vol.-%) ohne wesentliche Probleme mitbehandeln, da mechanische Abscheider mit einem höheren Sicherheitszuschlag ausgelegt werden.

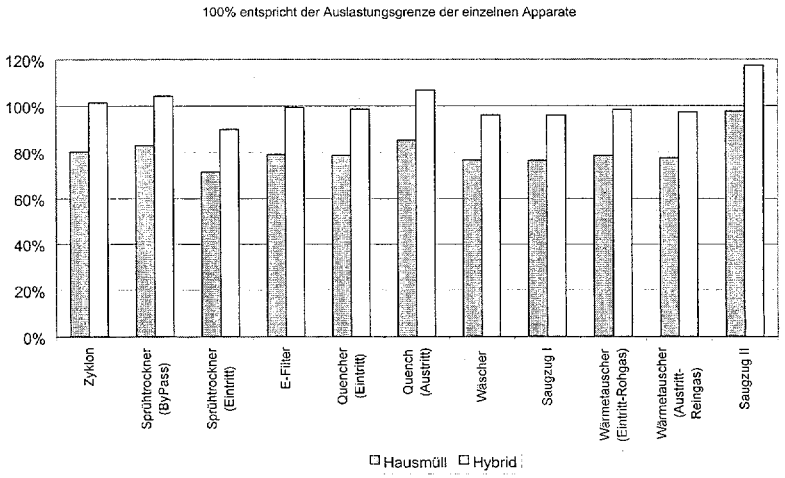


Abbildung 6-3: Auslastung der Apparate der Rauchgasreinigungsanlage

Im Sprühtrockner können noch weitere 10,3 Vol.-% mitbehandelt werden, so daß eine Erhöhung der durch den Sprühtrockner geleiteten Menge den ByPass entlastet. Dies kann auch im Sprühtrockner zu einer erhöhten Reststoffausscheidung und dadurch zu einer weiteren Entlastung der nachgeschalteten Apparate führen, besonders beim Quencher.

Ein weiterer Aspekt zur Entlastung des Quenchers kann die Mengenreduktion der zurückgeführten Waschflüssigkeit sein. Zu klären ist jedoch, ob solche Maßnahmen einen wesentlichen Einfluß auf die entsprechende Reinigungsleistung des gesamten Wäschers und eine eventuelle Verschiebung der Einstellungen in Richtung ungünstigere Bedingungen haben.

Beim Saugzuggebläse resultiert eine wesentliche Überlastung die mit dem installierten Aggregat nicht mehr abgedeckt werden kann. Hier wird eine Leistungserhöhung unumgänglich, um den geforderten Unterdruck in der Anlage weiterhin aufrechterhalten zu können und das Rauchgas problemlos in den Kamin leiten zu können. Dieser Punkt wird bei der in Kapitel 7 folgenden Kostenbetrachtung berücksichtigt.

6.4.2 Hilfsmittelverbräuche

Eine größere Rauchgasmenge hat auch eine Erhöhung der absoluten Mengen an Schadstoffen zur Folge und führt damit zwangsweise zu höheren Hilfsmittelverbräuchen. Dies wird durch die Simulationsergebnisse bestätigt, die in Tabelle 6-3 zusammengefaßt wurden:

Tabelle 6-3: Mengen der berechneten Hilfsmittel in der Rauchgasreinigung

		Hausmüll	Hybridanlage	*Zunahme [%]*
Wasserverbrauch – Wäscher	[l/h]	6.700	8.214,8	*(+ 22,6 %)*
NaOH – RingJet	[kg/h]	42	56,0	*(+ 33,3 %)*
Ammoniak (NH_3)	[kg/h]	4,41	8,7	*(+ 97,3 %)*
Erdgas – DeNOx-Anlage	[m^3/h]	114,5	174,6	*(+ 52,5 %)*
Kalkmilch - Neutralisation	[kg/h]	46,0	64,9	*(+ 41,1 %)*
Rückgeführte Waschflüssigkeit zum Sprühtrockner	[kg/h]	919,4	1.310,2	*(+ 42,5 %)*

Von Bedeutung ist die Menge rezirkulierter Waschflüssigkeit. Hier zeigt die Simulation eine relativ gute Übereinstimmung der Zunahme der Kalkmilchmenge, die zur Neutralisation der Waschflüssigkeit benötigt wird (41,1 Gew.-%), mit der Zunahme der rückgeführten Menge zum Sprühtrockner (42,5 Gew.-%).

Der hohe Zusatzbedarf an NaOH (33,3 Gew.-%), das für die Absorption von SO_2 eingesetzt wird, hängt im wesentlichen mit dem hohen Schwefelanteil im Shredderabfall (siehe auch Anhang B, Tab. B1-1) zusammen.

Besonders zu betrachten ist die hohe Zunahme an reinem Ammoniak, das in der DeNO$_x$-Anlage zum Abbau von NO_x eingesetzt wird. Diese Zusatzmenge richtet sich nach dem stöchiometrischen Verhältnis (NH_3/NO_x-Verhältnis), welches maßgeblich als Einflußfaktor auf den Abscheidegrad gilt. Diese Mengensteigerung führt jedoch nur bedingt zu dem gewünschten

Effekt, da auch die Katalysatorbelastung in [m^3/m^3h], die sich aus dem Quotienten des Volumenstromes zum Katalysatorvolumen ergibt, eine wesentliche Rolle beim NO_x-Abbau spielt. Nach SCHULTES ermöglichen niedrige Katalysatorbelastungen bzw. große Katalysatorvolumina einen hohen Stoffumsatz sowohl für NO_x als auch für NH_3 [SCHULTES 1996]. Ein effektiverer NO_x-Abbau kann daher nur durch die gleichzeitige Erhöhung des Katalysatorvolumens erreicht werden.

Durch die HYBRID-Schaltung wird die Auslegungsmenge des Erdgasbrenners (130 m^3/h) überschritten. Hier wird eine Leistungserhöhung notwendig, bzw. ein zusätzlicher Brenner muß installiert werden (siehe auch Anhang B).

Ansonsten bewegen sich die ermittelten Werte für die Hilfsmittelverbräuche im Bereich der Erfahrungen. Die Versorgung und Lagerung ist durch die vorhandenen Einrichtungen möglich.

6.4.3 Reststoffströme

Die Mengenzunahmen an simulierten Reststoffen sind im folgenden tabellarisch dargestellt:

Tabelle 6-4: Schlacke- und Reststoffmengenänderungen in der HYBRID-Anlage

	Hausmüll [kg/h]	Shredder [kg/h]	Hybridanlage [kg/h]	*Zunahme*[1] *[%]*
Feuerung und Kessel				
Schlacke	4.436,7	706,3	5.143	*(+ 15,9 %)*
Kesselasche	52,9	3,0	55,9	*(+ 5,6 %)*
Rauchgasreinigung				
Reststoffe-Zyklon	191,0	--	205,9	*(+ 7,8 %)*
Reststoffe- Sprühtrockner	62,1	--	83,3	*(+ 34,1 %)*
Reststoffe- Elektrofilter	85,0	--	106,6	*(+ 25,4 %)*

Die für die HYBRID-Anlage ermittelten Mengen für die Schlacke und die Kesselasche liegen nach wie vor im Auslegungsbereich der vorhandenen Einrichtungen, womit die gemeinsame Nutzung nicht gefährdet ist. Die deutliche Zunahme der verbleibenden Reststoffe im Sprühtrockner und im Elektrofilter läßt sich im wesentlichen mit dem Anstieg der zum Sprühtrockner rezirkulierten Menge an Waschflüssigkeit erklären. Die Mengen liegen jedoch im Auslegungsbereich der betrachteten Apparate, so daß auch hier ein Umbau der Transport- und Lagerungseinrichtungen nicht notwendig ist.

[1] Die prozentuale Mengenzunahme der einzelnen Reststoffe im Fall der HYBRID-Anlagenschaltung im direkten Vergleich mit der ursprünglichen Hausmüllverbrennungsanlage.

Der Einfluß der Mengenzunahme an Reststoffen auf die Verwertungs- bzw. Entsorgungskosten wird in Kapitel 7 berücksichtigt.

6.4.4 Betrachtung der Emissionsdaten

In Tabelle 6-5 werden die wesentlichen Reingasemissionen der untersuchten Anlagenschaltungen gegenübergestellt.

Tabelle 6-5: Gegenüberstellung der wesentlichen Emissionen im Reingas

Stoffe		Hausmüll	Hybridanlage	*Änderung [%]*	Grenzwert 17. BImSchV
H_2O	[Vol.-%]	16,9	17,1	*(+ 1,4 %)*	--
O_2	[Vol.-%]	8,3	10,5	*(+ 27,0 %)*	--
CO_2	[Vol.-%]	12,4	15,9	*(+ 28,7 %)*	--
CO	[mg/Nm³]	--	--	--	50
NO_X	[mg/Nm³]	96,1	187,4	*(+ 95,0 %)*	200
SO_2	[mg/Nm³]	39,7	47,1	*(+ 18,6 %)*	50
HCl	[mg/Nm³]	1,95	2,98	*(+ 52,8 %)*	10
HF	[mg/Nm³]	0,24	0,38	*(+ 58,3 %)*	1
Gesamtstaub	[mg/Nm³]	5,34	6,9	*(+ 29,2 %)*	10

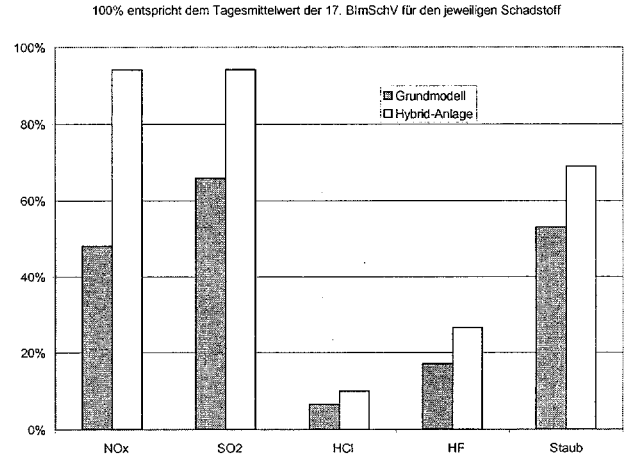


Abbildung 6-4: Gegenüberstellung der wesentlichen Emissionen im Reingas

Der schon erwähnte erhöhte Wasserverbrauch im Wäscher bei der Hybridanlage führt zu einer geringfügigen Zunahme der Feuchte im Rauchgas um 1,4 Vol.-%. Weiterhin stimmt die Zunahme des Sauerstoffgehaltes im Reingas (27 Vol.-%) mit den erhöhten Luftmengen, die in das Gesamtsystem eingeführt werden, überein.

Besonders kritisch zu betrachten sind die NO_x- und die SO_2- Emissionen im Reingas, da der resultierende Wert sehr nah an dem vorgeschriebenen Wert der 17. BImSchV liegt. Die erhöhten Stickstoffwerte sind einerseits auf die schon während der Shredderverbrennung enstehenden hohen Emissionen zurückzuführen. Andererseits ist der NO_x-Abscheidegrad im Katalysator von dem ursprünglichen Wert von ca. 71% auf 65% zurückgegangen.

Der hohen Zunahme des NO_x-Gehaltes um 95 Gew.-% kann durch die Aktivierung der schon im Feuerraum der Shredder-Verbrennungsanlage vorgesehenen SNCR-Anlage[2] entgegengewirkt werden.

Wie schon in Kap. 6.4.2 erwähnt, ist eine weitere Erhöhung der zugeführten Ammoniakmengen nicht sinnvoll, da einerseits schon eine Verdoppelung dieser Menge für die Behandlung des Zusatzstromes erfolgte. Andererseits hängt der NO_x-Abscheidegrad im wesentlichen vom Katalysatorvolumen ab. Eine Nachrüstung mit zusätzlichen Katalysator-Horden, um eine Erhöhung des NO_x-Abscheidegrades zu erreichen, wird daher als sinnvolle Lösung angesehen. Ein weiterer Aspekt ist der damit eingehende Rückgang des NH_3-Schlupfes und die damit verbundene Reduktion des Ammoniakverbrauches.

Die erhöhten Schwefelfrachten, die durch den Shredderabfall in das System eingebracht werden, führen zu einer Erhöhung der SO_2-Schadstofffracht im Reingas. Vorwiegend ist der SO_2-Abscheidegrad vom pH-Wert im Wäscher, von der Leerrohrgeschwindigkeit und von der mittleren Absorptionshöhe abhängig. Unter Beibehaltung der konstruktiven Gegebenheiten des Wäschers kann ein Abbau der erhöhten SO_2-Emissionen daher nur durch eine Erhöhung der Waschflüssigkeitsmenge und die damit zusammenhängende Erhöhung des Neutralisationsmediums (Natronlauge) im Bereich des Wäschers erfolgen.

Die Zunahme von HCl- und HF-Emissionen (52,8 Gew.-% respektive 58,3 Gew.-%) ist wiederum auf den erhöhten Eintrag durch den Shredderabfall zurückzuführen. Die Werte der HCl- und HF-Emissionen liegen jedoch weit unter dem vorgeschriebenen Grenzwert, so daß in diesem Fall keine weiteren Maßnahmen zu treffen sind.

---

[2] SNCR = Selective Non Catalytic Reduction

7 Kostenbetrachtung von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Investitions- und Betriebskostenschätzung orientiert sich weitgehend an der Studie des Umweltbundesamtes: "Kostenstrukturuntersuchung von Abfallbeseitigungsverfahren" aus dem Jahre 1998 [UBA 1998].

Da die untersuchten Anlagengrößen in der erwähnten Studie nicht berücksichtigt wurden sowie ein höhererer Detaillierungsgrad zur Verdeutlichung des Einsparpotentials notwendig war, wurde das Datenmaterial der Kostenbetrachtung um Zusatzinformationen ergänzt:

- aus aktuellen Ausschreibungsunterlagen und Angeboten die dem Institut WAR zur Verfügung standen: [SCHMAND 1996], [KLEIN 1997], [ECOTEC (a), (b) 1999], sowie
- aus weiteren Veröffentlichungen: [RIEMANN, SONNENSCHEIN 1998], [KANNHEISER 1998], [NAMENDORF 1998], [THEOCHARIS 1999].

Zur Ermittlung der Investitionskosten[1] wurde das folgende Schema verwendet:

Tabelle 7-1: Kostengruppen (Hauptpositionen) bei der Investitionskostenschätzung [in Anlehnung an UBA 1998]

Position	Kostengruppen
1	Grundstück
2	Herrichten und Erschließen
3	Baukonstruktion
3.1	Gründung und Schwerbau
3.2	Leichtbau
4	Technische Anlagen
4.1	Maschinentechnische Anlagen
4.2	Elektrotechnische Anlagen
4.3	Leittechnische Anlagen
5	Außenanlagen
6	Baunebenkosten
7	Zusatzinvestitionen (nur im Fall Hybrid)
8	Investitionssumme

[1] Die prozentuale Aufteilung wird exemplarisch für die Hauptpositionen und die Unterposition „Maschinentechnische Anlagen" in Anhang D3 dargestellt.

Die Investitionen beziehen sich auf die schlüsselfertige Erstellung einer Gesamtanlage einschließlich Inbetriebnahme und Probebetrieb.

Die benötigten Daten wurden weitestgehend an die Gegebenheiten der betrachteten Anlagen, das MHKW Darmstadt und die Shredder-Verbrennungsanlage, angepaßt. Dies betrifft insbesondere den Grundstücksbedarf und -preis sowie die bautechnischen Anlagen und deren Dimensionierung (umbauter Raum).

Zur Berechnung der Jahreskosten wurden folgende Positionen berücksichtigt:

Tabelle 7-2: Kostengruppen (Hauptpositionen) bei der Jahreskostenschätzung [in Anlehnung an UBA 1998]

Position	Kostengruppen
1	Investitionskosten
2	Betriebskosten
2.1	Durchsatzunabhängige Betriebskosten
2.2	Durchsatzabhängige Betriebskosten
3	Erlöse
3.1	Energieerlöse
3.2	Wertstofferlöse
4	Jahreskosten
5	Spezifische Kosten

Die verwendeten Basisdaten sind Anhang D, Tabelle D2-1 zu entnehmen. Die Einheitspreise wurden für den Standort Darmstadt angepaßt.

Die Mengen an Betriebs- und Hilfsmitteln wurden anhand der zur Verfügung stehenden Informationen sowie den entsprechenden Simulationsrechnungen entnommen. Dies gilt weiterhin für die verbleibenden Reststoffe. Bei den Erlösen wurden ausschließlich die Stromerlöse berücksichtigt.

Tabelle 7-3 zeigt die angenommenen Werte für Grundstück und Personalbedarf:

Tabelle 7-3: spezifische Daten der betrachteten Anlagen bezüglich Grundstück und Personal

	MHKW	Shredderanlage
Grundstückgröße [m²]	28.000	8.000
Grundstückspreis [DM/m²]	75	75
Anlagenpersonal [Pers.]	42	16
Lohnkosten [DM/Pers./a]	80.000	80.000

Im folgenden wird ein Vergleich der Investitionskosten und der Jahreskosten durchgeführt.

7.1 Investitionskostenvergleich

Durch die Integration der Shredder-Verbrennungsanlage in eine bestehende Anlage können zusätzlich zu der Rauchgasreinigung weitere Apparate gemeinsam genutzt werden und dadurch der Investitionsaufwand gegenüber einer dezentralen Anlage weiter reduziert werden.

Im folgenden sind einige Ansatzpunkte zu Integrations- und Nutzungsmöglichkeiten dargestellt:

Nutzung der vorhandenen Infrastruktur außerhalb der MVA: Die zu integrierende Shredder-Verbrennungsanlage profitiert von den infrastrukturellen Maßnahmen, die für das MHKW Darmstadt bereits ergriffen wurden. Dazu gehören ausreichend ausgebaute Zufahrtswege und verkehrsregelnde Maßnahmen.

Nutzung des Eingangs- und Anlieferungsbereichs: Die Nutzung der Waagen und Kontrolleinrichtungen im Eingangsbereich stehen für die Transportfahrzeuge von Shredderabfällen zur Verfügung. Ein zusätzlicher Anlieferungsbereich muß jedoch ausgewiesen und eingeplant werden.

Rauchgasreinigungsanlage: Um die gemeinsame Nutzung der Rauchgasreinigungsanlage zu ermöglichen, müssen zusätzliche Rauchgasleitungen installiert werden. Dies ist am betrachteten Beispiel des MHKW Darmstadt mit spezifischen Problemen verbunden, da die Vorlaufstrecke am Zyklon relativ kurz ist. Die Integration der benötigten Mischstrecke gestaltet sich als schwierig und ist deshalb mit einem gewissen konstruktiven Aufwand verbunden.

Wärmeabgabe: Die direkte Nähe des MHKW Darmstadt zu Wohngebieten sowie zu großen Gewerbe- und Industrieunternehmen bietet eine optimale Infrastruktur zur Weitergabe der erzeugten Wärme und des Stromes. In diesem Zusammenhang existieren Versorgungsverträge mit großen Abnehmern. Darüber hinaus kann durch die Nutzungsmöglichkeit des vorhandenen Fernwärmenetzes ein noch größerer Abnehmerkreis versorgt werden. Interessant sind dabei Abnehmer von Großmengen über das gesamte Jahr wie z. B. Krankenhäuser, Hallenbäder, Produktionsbetriebe, ...

Nebenanlagen und Hilfsmittelversorgung: Inwieweit die bestehenden Nebenanlagen für die Shredder-Verbrennungsanlage von Nutzen sein können, muß anhand einer Gegenüberstellung von vorhandenen Kapazitäten und den benötigten Mengen beurteilt werden. Nachstehende Anlagen kommen beispielsweise dafür in Frage:

- Druckluftstationen
- Wasseraufbereitungsanlage für benötigtes Betriebswasser (Speisewasser, ...)
- Chemikalienlager

Außerdem muß zum Betrieb der angebundenen Anlage die Versorgung mit Hilfsmitteln sichergestellt sein. Auch hier sind die bereits vorhandenen Medien nutzbar. Beispiele hierfür sind:

- Wasser
- Strom (Netz und Notstrom)
- Hilfsmittel und Chemikalien für die Speisewasseraufbereitung
- Druckluft
- Erdgas (eigene Gasleitung inklusive Zähler)

Die Integration des Brandschutzes (Brandmeldeanlagen, Hydranten), die vorgeschriebenen Kontrollen (Betriebslabor zur Durchführung der analytischen Eingangskontrolle, Sichtung der angelieferten Abfälle, ...), die gemeinsame Nutzung der vorhandenen Werkstätten, die Integration des Betriebsleit- und -überwachungssystems in die bereits bestehende Warte, gilt es ebenfalls zu überprüfen.

Zusammenfassend kann für die Errichtung einer HYBRID-Abfallbehandlungsanlage gesagt werden, daß das MHKW Darmstadt eine optimale Infrastruktur durch das vorhandene Fernwärmenetz und die Nähe zu großen Industrieunternehmen bietet. Weiterhin sind die Erweiterungsmöglichkeiten am Standort des MHKW Darmstadt gegeben. Zum einen ist dies die großzügige Bauweise der Anlage, die eine Kombination bzw. Verschaltung mehrerer Aggregate bautechnisch zuläßt. Zum anderen bietet das Gelände sowie der Standort weitere Reserveflächen, die für eine Errichtung einer HYBRID-Anlage genutzt werden können (siehe auch Anhang A).

Um diesen Aspekt näher zu beleuchten, werden im folgenden die Investitionen einer dezentralen Shredder-Verbrennungsanlage abgeschätzt und einer Hybridanlage gegenübergestellt.

In Tabelle 7.4 sind die Hauptpositionen bei der Investitionskostenschätzung der beiden Anlagenkonzepte, dezentral und Hybrid, aufgelistet und das Einsparpotential im Hinblick auf die wegfallenden Positionen dargestellt.

Tabelle 7-4: Investitionskostenschätzung und Einsparpotential der Hybrid-Variante gegenüber der dezentralen Variante (siehe auch Anhang D1)

Anzahl der Verbrennungslinien	1	
Durchsatz pro Linie	1,4	Mg/h
Gesamtkapazität	10.500	Mg/a
Verfügbarkeit	7.500	h/a
Heizwert Shredder	15.500	kJ/kg

	Kostengruppen	Shredderanlage als dezentrale Anlage [TDM]	Shredderanlage als Hybrid Anlage [TDM]
1	Grundstück	600	–
2	Herrichten und Erschließen	150	–
3	Baukonstruktion	2.055	892
4	Technische Anlagen	13.142	8.106
5	Außenanlagen	354	20
6	Baunebenkosten	2.225	1.925
7	Zusatzinvestitionen	–	590
8	**Investitionssumme**	**18.526**	**11.533**
9	**Spezifische Investitionen [DM.a/Mg]**	**1.764**	**1.098**

Durch die Nutzung des vorhandenen Standortes können die Kostengruppen Grundstück, Erschließung und Außenanlagen fast zu 100% eingespart werden. Die Kosten der technischen Anlagen können bis zu 38% eingespart werden, resultierend aus dem Wegfall einer eigenen Rauchgasreinigungsanlage, dem Annahmebereich, der gemeinsamen Nutzung des bestehenden Reststoffsystems und des Energieteils sowie der vorhandenen Nebenanlagen (Labor, Werkstatt, Luftversorgung, Notstromaggregat, Wasserversorgung, ...).

Die Zusatzinvestition im Fall der Hybrid-Variante beinhaltet vorwiegend die notwendigen Rauchgaskanäle, die Mischstrecke sowie die zusätzlichen Regel- und Absperrarmaturen. Darüber hinaus sind zusätzliche Investitionen im Bereich der Meß- und Regeltechnik vorzunehmen, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten.

Insgesamt können bis zu 38% der Investitionen bei der Integration der betrachteten Shredderanlage in eine bestehende Anlage eingespart werden. Dies entspricht für die vorgenommene Kostenschätzung rund 7 Mio DM.

Für den oben betrachteten Fall können somit die spezifischen Investitionskosten, bezogen auf die durchgesetzte Jahrestonne Shredderabfall, von 1.764 DM/(Mg/a) auf 1.098 DM/(Mg/a) reduziert werden.

7.2 Jahreskostenvergleich

Tabelle 7-5 zeigt eine Gegenüberstellung der Jahreskosten.

Tabelle 7-5: Jahreskostenschätzung und Einsparpotential der Hybrid-Variante gegenüber der dezentralen Variante (siehe auch Anhang D2)

	Kostengruppen	Shredderanlage als dezentrale Anlage [TDM/a]	Shredderanlage als Hybrid Anlage [TDM/a]
1	Investitionskosten	1.930	1.165
2	Betriebskosten		
2.1	Durchsatzunabhängige Betriebskosten	2.090	930
2.1	Durchsatzabhängige Betriebskosten	1.210	580
3	Erlöse	220	353
4	**Jahreskosten [TDM/a]**	**5.010**	**2.320**
5	***Spezifische Kosten [DM/Mg]***	***478***	***221***

Die Hybrid-Variante ermöglicht eine Reduktion der spezifischen Jahreskosten von 478 auf 221 $DM/Mg_{Shredderabfall}$. Dies entspricht einem Einsparpotential von ca. 54%.

Das größte Einsparpotential verbirgt sich in den reduzierten Investitionskosten der Hybrid-Variante gegenüber der dezentralen Variante sowie in den durchsatzunabhängigen Betriebskosten, wobei schwerpunktmäßig die notwendigen Aufwendungen für Reparatur, Wartung und Unterhaltung zu nennen sind.

Die höheren Stromerlöse bei der Hybrid-Variante folgen aus dem reduzierten Eigenstrombedarf der Anlage durch den Wegfall der Rauchgasreinigung, der Nebenapparate, einem eigenen Betriebsgebäude, ...

8 Zusammenfassung und Ausblick

Thermische Abfallbehandlungsanlagen haben sich als wirksames Verfahren zur kontrollierbaren Umwandlung organischer und reaktionsfähiger Inhaltsstoffe bei gleichzeitiger Volumenminderung der festen Abfallstoffe bewährt und sind als essentieller Bestandteil eines modernen funktionierenden Abfallwirtschaftskonzeptes nicht mehr wegzudenken.

Im Gegenteil, durch die gesetzlichen Anforderungen der TA-Siedlungsabfall und des Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) nimmt die Bedeutung solcher Anlagen weiterhin zu.

Bestehende Anlagen haben sich, bedingt durch die kontinuierliche Verschärfung der Emissionsgrenzwerte, zu einer hochkomplexen Anlagentechnologie entwickelt und sind mit den leistungsfähigsten Rauchgasreinigungssystemen ausgestattet. Daher sind sie auch zu kostenintensiven Behandlungsmethoden geworden.

Die Behandlungskosten sind sehr stark von der Auslastung der Anlagen abhängig. Eine Erhöhung der Behandlungskapazität sowie -flexibilität eines Anlagenstandortes kann zu einer wesentlichen Kostenreduktion beitragen. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Bedarfs an Behandlungskapazitäten für heizwertreiche Abfallfraktionen einerseits sowie dem enormen Erweiterungspotential bestehender Abfallverbrennungsanlagen andererseits ist die Überlegung, entsprechende Reaktoren mit kleinen Durchsätzen in bereits bestehende Verbrennungsanlagen zu integrieren, entstanden.

Hauptaspekt der Integration von Reaktoren zur thermischen Behandlung heizwertreicher Abfälle ist die Nutzung der freien Kapazitäten in den unterschiedlichen Apparaten bestehender Anlagen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Bereitstellung eines Instrumentariums zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei Anlagenverbundkonzepten auf der Basis von Müllverbrennungsanlagen. Dazu wurde die Machbarkeit eines solchen Konzeptes anhand eines konkreten Beispiels im Detail untersucht, sowohl aus anlagentechnischer als auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht.

Nach einführender Darstellung der Ziele und der Vorgehensweise der Arbeit in Kapitel 1 wurde in Kapitel 2 eine ***systematische Untersuchung des jetzigen Standes der energetischen Behandlung heizwertreicher Abfallfraktionen*** vorgenommen. Dabei wurde deutlich, daß die Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen durch das erhöhte Verschleißverhalten aufgrund unruhiger Fahrweise und hoher Temperatur- und CO-Spitzen nur bedingt möglich ist.

Auch der Weg der Mitverbrennung in Industrieanlagen (Zementwerken, Industriekraftwerken, Hochöfen, ...) bleibt für viele Industrieabfälle sowie heizwertreiche Monofraktionen verschlossen. Grund dafür sind die genehmigungsrechtlichen Restriktionen und behördlichen Auflagen im Hinblick auf die Einstufung und Eignung des Industrieprozesses, die verfahrenstechnischen Hindernisse einzelner Prozesse, die notwendige Vorbehandlung der Abfälle sowie die Notwendigkeit der Einhaltung strikter Orientierungswerte. Weiterhin sind die begrenzten Mengen an einzusetzenden Abfällen im Industrieprozeß ein limitierender Faktor.

Die Bedeutung der spezifischen Behandlung in dezentralen Anlagen nimmt zu. Vorwiegend wurden jedoch Anlagen mit größeren Durchsätzen realisiert (150.000 – 250.000 Mg/a). Durch den zunehmenden Kostendruck bei Anlagen mit kleinen und mittleren Durchsätzen wurde deutlich, daß vermehrt Reaktoren zur Behandlung von heizwertreichen Abfällen im Anlagenverbund mit bereits bestehenden Kraftwerken geplant und realisiert werden. Dabei ist eine 50% ige Reduktion der aufzubringenden Investitionen im Vergleich mit dezentralen Anlagen möglich.

Im Gegensatz zu den aufgezeigten Konzepten für Neuanlagen, die folgende Gemeinsamkeiten aufweisen: dezentrale Konzepte zur sicheren Auslastung der Anlage, vereinfachte Rauchgasreinigungsanlagen zur Einhaltung der 17. BImSchV (ohne weitere Unterschreitungen), vereinfachte Bauweise, flexiblere und optimierte Verbrennung ....., bleibt die Nutzung der Standorte bestehender thermischer Abfallbehandlungsanlagen sowie das enorme Erweiterungspotential dieser Anlagen unberücksichtigt.

Das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete ***Konzept der HYBRID-Abfallbehandlungsanlage*** wurde in Kapitel 3 folgendermaßen definiert: Eine HYBRID-Abfallbehandlungsanlage entsteht aus der Integration von Reaktoren zur Behandlung heizwertreicher Monofraktionen in bestehende Abfallverbrennungsanlagen.

In Kapitel 4 wurde ***die Entwicklung eines Tools zur Simulation einer kompletten Müllverbrennungsanlage*** vorgenommen. Eine Vorab-Literaturrecherche[1] der im Bereich der thermischen Abfallbehandlung bekannten Simulationsmodelle zeigte, daß noch kein umfassendes Modell zur Beschreibung einer Gesamtanlage, von der Abfallaufgabe durchgehend bis zum Kamin, zur Verfügung steht. Dies hängt maßgeblich von den spezifischen Fragestellungen, die zu der Entwicklung der jeweiligen Modelle führten, ab.

---

[1] siehe [BARIN ET AL. 1996], [TEICHMANN ET AL. 1995], [TEICHMANN ET AL. 1998], [SCHOLZ ET AL. (a) 1997], [BECKMANN 1995], [SCHOLZ ET AL. 1997], [STELLA II], [BEHRENDT 1992], [CHRISTENSEN, CRAMER 1993], [VAN KESSEL, BREM 1995], [STAUDT, RENZ 1998], [WOCADLO 1994], [LIPP ET AL. 1998], [JENNEN ET AL. 1998], [JAGER ET AL. 1998].

Für die vorliegende Arbeit wurde das Programm AspenPlus™ aufgrund programmiertechnischer Vorteile und der bekannten Nutzung im Bereich der thermischen Abfallbehandlung sowie der Energietechnik gewählt.

Die Simulation der Hausmüllverbrennungsanlage wurde auf der Basis der Verfahrensschaltung sowie der Auslegungsdaten der Linie 1 der betrachteten Referenzanlage, des Müllheizkraftwerkes Darmstadt, vorgenommen. Die von AspenPlus™ angebotenen fertigen Module wurden an die jeweiligen Bedingungen angepaßt und zum Teil durch eigene FORTRAN-Programme ergänzt. Eine besondere Problematik, die im Rahmen des Simulationsmodells gelöst wurde, sind die Stoffstromrückführungen im Bereich des Wäschers.

Die Modellvalidierung erfolgte anhand von Daten und Erfahrungen des Anlagenbetreibers und gemessenen Daten im Rahmen durchgeführter Meßkampagnen, ergänzt durch eine umfassende Literaturrecherche. Dabei zeigte das Modell weitgehend eine gute Übereinstimmung mit den Referenzdaten. Einige Ausnahmen, die als Grundlage zur Verbesserung des Modells dienen, sind:

- Durch die eingeschränkte Betrachtung von Oxiden, Chloriden und Sulfaten wird im Feuerraum eine zu hohe Schlackemenge abgeschieden.
- Einige Elemente wurden im Abfallinput zu gering angenommen (Magnesium und Zinn). Dies führte zu Abweichungen der berechneten Werte von den Referenzwerten.
- Das zum Einsatz kommende Modell zur Simulation der Brennkammer basiert auf der Annahme vollkommener Verbrennung unter Gleichgewichtsbedingungen. Dies führt dazu, daß einige Ergebnisse der gasförmigen Schadstoffe, besonders von CO, zu gering ausfallen. Die wesentlichen berechneten Emissionen (NO_x, SO_2, HCl und HF) liegen jedoch im Betriebsbereich der Anlage.

In Kapitel 5 wurde die Problematik der direkten ***Zugabe heizwertreicher Abfälle in eine Hausmüllverbrennungsanlage*** durch Simulation reproduziert.

Durch die Zugabe größerer Mengen Altholzabfälle oder Shredderabfälle konnte die erhöhte thermische Belastung aufgezeigt werden. Dabei wurde im Fall der Holzzugabe eine Temperaturerhöhung im Feuerraum von bis zu 15,8 % festgestellt. Besonders betroffen ist der Kesselbereich, wobei die Temperatur vor Kesseleintritt auf über 850°C ($\Delta t_{Kesseleintritt} \approx 70°C$) anstieg, welche sehr nah an der kritischen Auslegungstemperatur liegt.

Der Anstieg bei den Hilfsmittelverbräuchen, besonders im Fall der Shredderzugabe (Kalkmilch, NaOH und Ammoniak) ist auf den erhöhten Eintrag bestimmter Schadstoffe (Schwefel, Chlor, ...) und die daraus resultierenden Emissionen zurückzuführen.

Durch die im Feuerraum herrschenden erhöhten Temperaturen wird besonders die Bildung von Stickoxiden begünstigt. Weiterhin sind besonders im Fall der Shredderzugabe die hohen NO_x- und SO_2-Emissionen als limitierender Faktor bei der Zugabe weiterer Shreddermengen im Feuerraum anzusehen.

Nicht zu vernachlässigen ist die Verlagerung der Abreinigung des Rauchgases auf die Apparate: Sprühtrockner, Elektrofilter und Wäscher und die daraus resultierende Zunahme der Reststoffmengen, die einer Endablagerung zugeführt werden müssen.

In Kapitel 6 wurde die ***Betrachtung einer HYBRID-Abfallbehandlungsanlage als Verbund einer Shredder-Verbrennungsanlage mit dem Müllheizkraftwerk Darmstadt*** diskutiert.

Für den Fall des Müllheizkraftwerkes Darmstadt läßt sich im Bereich der Rauchgasreinigung als Summe der planungsbedingten und betriebsbedingten Reserven eine Gesamtreserve von über 20% ausmachen. Dies galt als Grundlage für die Auswahl der Shredderanlage.

Durch die vorgenommene Simulation der HYBRID-Anlage konnten die möglichen Engpässe bei der gemeinsamen Nutzung der bestehenden Rauchgasreinigungsanlage sowie die daraus resultierenden Änderungen der Mengen an Rest- und Hilfsstoffen aufgezeigt werden. So ist eine Leistungssteigerung des Saugzuges vor dem Kamin notwendig. Die geringfügige Überschreitung bei den Auslegungswerten des Zyklons führt zu keiner notwendigen konstruktiven Maßnahme. Eine Entlastung des Sprühtrockner-ByPasses kann durch eine Erhöhung der durch den Sprühtrockner geführten Mengen herbeigeführt werden.

Die Problematik der kurzen Rauchgasleitungsstrecke zwischen Kessel und Zyklon steht einer einfachen Anbringung der Zuführung und einer notwendigen Mischstrecke entgegen. Eine konstruktive Änderung dieser Strecke könnte notwendig sein, wird aber im Rahmen dieser Arbeit und da es spezifisch für die betrachtete Anlage ist, nicht weiter in Betracht gezogen.

Die erhöhten Mengen an Reststoffen und benötigten Hilfsmitteln ergeben keine Notwendigkeit einer Kapazitätssteigerung der vorhandenen Transport-, Bevorratungs- und Lagerungseinrichtungen, da die ermittelten Mengen im Auslegungsbereich dieser Nebenaggregate liegen.

Stellvertretend für die Qualitätsbetrachtung wurde die sich ergebende Erhöhung der Reingasemissionen diskutiert. Die sichere Einhaltung der 17. BImSchV wird auch bei dieser Anlagenschaltung und unter den zugrunde gelegten Randbedingungen gewährleistet. Kritisch

anzusehen sind jedoch die sich ergebenden erhöhten NO_x- und SO_2-Emissionen. Abhilfe kann einerseits die Erweiterung des Katalysatorvolumens oder die Inbetriebnahme einer SNCR-Anlage im Bereich der Shredderfeuerung zur Reduzierung der NO_x-Emissionen schaffen. Andererseits kann die SO_2- Abbaurate durch weitere Zugabe von Natronlauge erhöht werden, um damit eine weitere Reduzierung der Emissionswerte zu erreichen.

Durch die Simulation des Anlagenverhaltens bei der Hybridschaltung und die dargestellten Ergebnisse konnte festgestellt werden, daß die Nutzung der bestehenden Anlage technisch möglich ist. Ein weiterer Punkt bleibt jedoch das veränderte Regelungsverhalten und die Abstimmung der beiden Reaktoren und deren Eignung für einen reibungslosen Dauerbetrieb. Hier ist eine entsprechende Regelungstechnik vorzusehen.

Da die Wirtschaftlichkeit solcher Vorhaben sowohl für die Entscheidungsträger als auch für die Betreiber bestehender Anlagen als eine essentielle Fragestellung im Vordergrund jeder Investition steht, wurde in Kapitel 7 im Rahmen einer ***Kostenbetrachtung*** eine Abschätzung der Investitions- und der Betriebskosten (Jahreskosten) vorgenommen. Ein wesentlicher Aspekt war dabei der direkte Vergleich der Hybridanlage mit der dezentralen Shredderanlage.

Durch die Integration der betrachteten Shredderanlage in eine bestehende Hausmüllverbrennungsanlage können insgesamt bis zu 38% der Investitionen eingespart werden. Dies entsprach für die vorgenommene Kostenschätzung rund 7 Mio DM.

Die spezifischen Investitionskosten, bezogen auf die durchgesetzte Jahrestonne Shredderabfall können somit von 1.764 DM/(Mg/a) auf 1.098 DM/(Mg/a) reduziert werden.

Anhand der durchgeführten Jahreskostenschätzung konnte weiterhin nachgewiesen werden, daß eine Reduktion der spezifischen Jahreskosten von 478 auf 221 $DM/Mg_{Shredderabfall}$ möglich ist. Dies entspricht einem Einsparpotential von ca. 54% und verbirgt sich vorwiegend in den reduzierten durchsatzunabhängigen Betriebskosten und den erhöhten Stromerlösen durch reduzierten Eigenbedarf der Anlage.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten die technische Machbarkeit sowie die Vorteile der Errichtung von HYBRID-Anlagen ausführlich dargestellt werden. Zudem konnte gezeigt werden, daß das experimentell abgestützte Simulationsmodell von Gesamtanlagen als ein zuverlässiges Instrumentarium zur Betrachtung extremer Betriebssituationen und Anlagenkombinationen verwendet werden kann.

Nach dem Aufzeigen der Möglichkeiten und der wirtschaftlichen Vorteile müssen für die ***Umsetzung bzw. für die Realisierung von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen*** eine Reihe weiterer Untersuchungen durchgeführt werden:

- Um das Betriebsverhalten des Anlagenverbundes genauer zu beschreiben, besonders die Schwankungen in der Menge und der Konzentration an den Schnittstellen der einzelnen Apparate, sind dynamische Simulationen, aufbauend auf das bestehende Modell, durchzuführen.

- Die anhand von Simulationsprogrammen ausgearbeiteten Erkenntnisse soliten durch Technikums- oder Betriebsversuche an Pilotanlagen bestätigt werden.

- Zur Überwachung des Anlagenverbundes ist eine über die Prozeßleitsysteme der Einzelanlagen übergreifende Anlagenüberwachungsebene notwendig. Die dafür notwendigen Meß- und Regeleinrichtungen müssen auch im Rahmen von Feldversuchen an Pilotanlagen erprobt werden.

Im Zusammenhang mit dem ***Simulationsmodell*** ergeben sich weitere vielfältige Aufgabenstellungen, die in der folgenden Liste aufgezeigt werden:

- Da im Rahmen der eingeschränkten Zeit für diese Arbeit nicht alle Möglichkeiten von AspenPlus™ ausgeschöpft werden konnten, lassen sich an der vorliegenden Simulation noch einige Verbesserungen durchführen. Einige Beispiele sind:

  - Optimierung der SCR-Anlage unter Verwendung kinetischer Daten für den verwendeten Katalysator.

  - Erweiterung der bisher berücksichtigten Stoffe bei der Müllverbrennung. Dazu müßte für einige Komponenten die vorhandene Stoffdatenbank von AspenPlus™ erweitert werden.

  - Berücksichtigung von Dioxinen und Furanen (Programmierung der Verbindungen in AspenPlus™ ist möglich) und Programmierung entsprechender Stoffdaten.

- Der Schwerpunkt der durchgeführten Simulation lag im Bereich der Rauchgasreinigung. In diesem Zusammenhang werden in der Industrie verschiedene Rauchgasreinigungskonzepte angeboten. Da AspenPlus™ speziell für die Simulation chemischer Anlagen und Anlagenkomponenten ausgelegt ist, bietet sich eine Simulation verschiedener Rauchgasreinigungsanlagen an. So lassen sich verschiedene Konzepte vergleichen und eventuell effektivere Lösungen zur gestellten Reinigungsaufgabe bei gleichzeitiger Kostensenkung und/oder geringerem apparativem Aufwand finden.

- Umfangreiche Möglichkeiten sind gegeben durch die Simulation weiterer Anlagen mittels AspenPlus™, um einen Vergleich unterschiedlicher Technologien vorzunehmen. Die Modifikation des bestehenden Modells im Bereich der Abfallaufgabe und der Rauchgasreinigung zur Simulation einer Sonderabfall-Verbrennungsanlage wurde in einer weiterführenden Untersuchung vorgenommen und zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Betriebsdaten der gewählten Referenzanlage [Tandler 1999].

Diese Liste könnte noch weiter fortgeführt werden. Es sollte jedoch gezeigt werden, daß die Anwendung von Simulationen eine sinnvolle Ergänzung zu praktischen Versuchen darstellen kann und ohne größeren Aufwand Vorhersagen möglich sind, die in der Praxis aufgrund gegebener gesetzlicher Restriktionen gar nicht durchgeführt werden können.

9 LITERATURVERZEICHNIS

[AFFÜPPER 1996] M. AFFÜPPER, *Ersatzbrennstoffe aus Restmüll und Reststoffen aus DSD-Sortierungen,* EntsorgungsPraxis 5 (1996), 29-31

[AINSWORTH 1989] S.J. AINSWORTH, *More Companies are Using Computers to Design Plants*, Chemical & Engineering News, Vol. 67, pp. 9-10, November 20, 1989

[ALBERT 1997] F. W. ALBERT, *Kostenminderung durch geeignete Feuerfestmaßnahmen,* In: Thermische Abfallbehandlung - Entwicklung von Technik und Kosten in einer Kreislaufwirtschaft - ; A. Urban, B. Bilitewski, M. Faulstich (Hrsg.), Kassel, 1997

[ALBRECHT ET AL. (a) 1994] J. ALBRECHT, J. LÖFFLER und R. REIMERT, *Restabfallvergasung mit integrierter Ascheverschlackung*, GVC Symposium "Abfallwirtschaft - Herausforderung und Chance", Würzburg, Oktober 1994

[ALBRECHT ET AL. (b) 1996] J. ALBRECHT, J. LÖFFLER und H. HIRSCHFELDER, *Brenngaserzeugung aus nachwachsenden Biomassen in der zirkulierenden Wirbelschicht als Grundlage für eine CO2 neutrale Stromerzeugung in einem GUD Kraftwerk,* DGMK-Fachtagung "Energetische und stoffliche Nutzung von Abfällen und nachwachsenden Rohstoffen", Velen/Westfalen, April 1996

[ANTKOWIAK 1994] R. ANTKOWIAK, *Klärschlamm im Kraftwerk*, VDI-Nachrichten, Nr. 35, 2. September 1994, S. 18

[ASPEN 1996] ASPEN PLUS™, *Reference Manual – Volume 1, Unit Operation Models, Release 9,* July 1996

[AZNAR 1990] M.P. AZNAR, J. CORELLA, J. DELGADO und J. LAHOZ, *Steam Gasification in a Fluidized bed with Secondary Catalytic Bed,* Biomass for Energy and Industry, 5th E.C. Conference, Hg. G. Grassi, G. Gosse and G. dos Santos, London: Elsevier 1990.

[BAAKE ET AL. 1996] E. BAAKE, U. JÖRN, A. MÜHLBAUER, *Energiebedarf und CO_2-Emission industrieller Prozeßwärmeverfahren*, Essen: Vulkan-Verl., 1996

[BABU SURESH, RENSFELT 1997] P. BABU SURESH und E. RENSFELT, *Status and Impact of Commercialization of Thermal Gasification of Biomass,* Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Hg. A. V. Bridgwater und D.G.B. Boocock, London: Blackie 1997

[BAEHR1988] H. D. BAEHR, *Thermodynamik*, Berlin: Springer 1988

[BARIN ET AL. 1996] I. BARIN, A. IGELBÜSCHER und F.-R. ZENZ, *Thermodynamische Analyse der Verfahren zur thermischen Müllentsorgung*, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 23-50, (1996)

[BÄSE 1997] U. BÄSE, *Holzpellets sollen Braunkohle ablösen,* VDI-Nachrichten, Nr. 24, 13. Juni 1997, S. 16

[BASF 1992] BASF, *BASF DeNO$_x$-Katalysatoren,* Produktprospekt, 1992

[BDE 1997] BDE - BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN ENTSORGUNGSWIRTSCHAFT E.V., *Thermische Behandlung/Energetische Nutzung,* In der Reihe: „Kreislaufwirtschaft in der Praxis", Nr.5, Mai 1997, Köln

[BECKER 1996] H. BECKER, *In Zukunft dynamisch: In der Simulation geht der Trend zur Prozeß-optimierung in Echtzeit,* Chemie Technik, 25. Jahrgang (1996) Nr. 3

[BECKMANN 1995] M. BECKMANN, *Mathematische Modellierung und Versuche zur Prozeßführung bei der Verbrennung und Vergasung in Rostsystemen zur thermischen Rückstandsbehandlung,* Dissertation TU Clausthal, CUTEC Schriftenreihe, 1995

[BEHNKE ET AL. 1997] S. BEHNKE, R. HIRSCH, W. ARLT und U. HÜBNER, *Thermodynamische Simulation eines Verfahrens zur Bodensanierung mit AspenPlus™,* Altlasten Spektrum, 1/97, 15-25

[BEHRENDT 1992] T. BEHRENDT, *Thermodynamische Modellierung des Betriebsverhaltens von Hausmüllverbrennungsanlagen am Beispiel TAMARA,* Fortschrittberichte VDI, Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 99, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992

[BEITZ, KÜTTNER 1994] W. BEITZ, K.H. KÜTTNER (Hrsg.), Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage, Berlin: Springer 1994

[BELEVI ET AL. 1998] H. BELEVI, M. LANGMEIER, H. MÖNCH, Y. TURBAN, TH. MÜLLER und P. BACCINI, *Stoffbuchhaltung für eine Müllverbrennungsanlage*, Müll und Abfall 2/98, 82-98

[BERNSTEIN, KOPPE 1999] W. BERNSTEIN und K. KOPPE, *Vergasung von Ersatzbrennstoffen und Nutzung des Synthesegase in vorhandenen Energieerzeugungsanlagen,* In: Thermische Abfallbehandlung, Co-Verbrennung, Hrsg.: B. Bilitewski, M. Faulstich, A. Urban, Tagungsband der Fachtagung vom 1. bis 3. März 1999, Beiträge zur Abfallwirtschaft, Band 9, Dresden

[BIELEFELD 1994] Müllverbrennungsanlage Bielefeld-Herford, *Emissionsbericht 1994*

[BILLIGMANN 1998] F.R. BILLIGMANN, *Thermische Restabfallbehandlung in Deutschland und in anderen EU-Mitgliedsstaaten sowie in der Schweiz,* 54. Darmstädter Seminar – Abfalltechnik – am 6. Februar 1998, Darmstadt

[BIRNBAUM ET AL. 1997] L. BIRNBAUM, U. RICHERS, W. KÖPPEL, H. VOGG, *Charakterisierung von Filterstäuben aus Abfallverbrennungsanlagen*, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 57, 1-5, (1997)

[BLACKADDER ET AL. 1992] W.H. BLACKADDER, H. LUNDBERG, E. RENSFELT and L. WALDHEIM, *Heat and Power Production via Gasification in the Range 5-50 MW_e ,* "Advances in Thermochemical Biomass Conversion", Interlaken, Mai 1992

[BORN (a) 1998] M. BORN, *Stand der Pyrolyse- und Vergasungsverfahren in der thermischen Abfallbehandlung,* VDI Bildungswerk „Energetische Verwertung von Abfällen in Kombinationsverfahren", Mannheim, 15./16.06.1998

[BORN (b) 1996] M. BORN, *Möglichkeiten und Grenzen der thermischen Abfallbehandlung in dezentralen Anlagen,* AbfallwirtschaftJournal 12/96, 11 – 15 (1996)

[BORN, SCHÖTTLER 1986] R. BORN, M. SCHÖTTLER, *Der Einsatz einer trockenen Rauchgasreinigung unter der Anforderung der TA Luft*, Wasser, Luft und Betrieb 9/86, 72 – 76, (1986)

[BRACKER ET AL. 1999] G.-P. BRACKER, F.-E. VON CHRISTEN und J. STADTMÜLLER, *Kraftwerks-integrierte Abfallpyrolyse,* In: Thermische Abfallbehandlung, Co-Verbrennung, Hrsg.: B. Bilitewski, M. Faulstich, A. Urban, Tagungsband der Fachtagung vom 1. bis 3. März 1999, Beiträge zur Abfallwirtschaft, Band 9, Dresden

[BRIDGWATER 1995] A.V. BRIDGWATER, *The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation*, Fuel 74 (Num 5, 1995), p. 631 - 653

[BRIDGWATER, EVANS 1993] A.V. BRIDGWATER and G.D. EVANS, *An Assesment of Thermochemical Conversion Systems for Processing Biomass and Refuse,* Report ETSUB/T1/00207/REP, 1993

[BRILL ET AL. (a) 1996] ST. BRILL, CH. PASEL und J.D. HERBELL, *Energetische Verwertung von Abfallhölzern - ein notwendiger Weg zur Schließung des Stoffkreislaufes,* AbfallwirtschaftJournal 11/96, 59-61

[BRILL ET AL. (b) 1996] ST. BRILL, CH. PASEL und W. SENGER, *Notwendigkeit und Maßnahmen zur Emissionsminderung bei Altholzfeuerungsanlagen,* EntsorgungsPraxis (EP) 11/1996, 46-48

[BRINGEZU, VOSS 1993] S. BRINGEZU und A. VOSS, *Hinweise zur Entsorgung von holzschutzmittelbehandeltem Altholz,* Müll und Abfall 10/1993, 727-738

[BRUNNER 1996] W. BRUNNER, *Behandlung von Holzabfällen in Vergasungsanlagen,* Vortrag am Institut WAR der TU Darmstadt, 13.05.1996

[BRUX 1997] G. BRUX, *Abfallentsorgung und Stoffkreisläufe bei der Zementherstellung in der Schweiz*, EntsorgungsPraxis 11 (1997), 56-57

[BU 1996] BU ÜBERWACHUNGSGEMEINSCHAFT BAUEN FÜR DEN UMWELTSCHUTZ, *Fax vom 11.11.1996, Wiesbaden*

[BUCHNER 1996] N. BUCHNER, *Kunststoffverwertung: ein Appell an die Vernunft*, Müll und Abfall 7 (1996), 448-453

[BUCK ET AL. 1996] J. BUCK, H. HORNIG, R. EICHHORN, J. KRÜGER und J. KRONE, *Erfahrungen bei der ökologischen Vernichtung von Explosivstoffen und bei der thermischen Bodenbehandlung in der zirkulierenden Wirbelschicht,* Müll und Abfall 3 (1996), 169-177

[BÜHLER 1994] R. BÜHLER, *Stand der Technik von Holzvergasungsanlagen,* "Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz", Hrsg. T. Nussbaumer, Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft 1994

[BURGKIRCHEN 1997] *Broschüre des Müllheizkraftwerkes Burgkirchen,* (1997)

[BUWAL 1987] *Behandlung und Verfestigung von Rückständen aus Kehrichtverbrennungsanlagen,* Hrsg.: Bundesamt für Umweltschutz, Schriftenreihe Umweltschutz 62, Bern, April 1987, Seite 32

[CHEMCAD 3] CHEMCAD 3.30.-386, *Testversion der Fa. Chemstations Deutschland GmbH,* Wesel, 1997

[CHEMCAD IV] CHEMCAD IV FOR WINDOWS, *Produktinformation der Fa. Chemstations Deutschland GmbH,* Wesel, 1998

[CHRISTENSEN, CRAMER 1993] P. LA COUR CHRISTENSEN und J. CRAMER, *Simulator für Müllverbrennungsanlage - Fassung 2.0* -, Beschreibung der Fa. dk-TEKNIK, Söborg/Denmark, September 1993

[CLEAN 1997] C. HERR, J. JAGER, U.A., *„CLEAN" - Innovative Technology in Automatic Control of Waste Incineration Processes* -, Contract Nr. EV5V-CT94-0566, Abschlußbericht 1997

[DANHAMER 1998] H. DANHAMER, *persönliche Mitteilung*, Dezember 1998

[DITBC 1996] DITBC, "Conference on the Development in Thermochemical Biomass Conversion, special session on cracking of tars" Bannff: May 1996

[EASYMOD 1997] INNOVATIONSZENTRUM BOIZENBURG, *Projektbeschreibung*, Stand 23.04.97

[EAWAG 1985] P. H. BRUNNER, M. KRÄHENBÜHL, H. MÖNCH, *Die Zusammensetzung von Elektrofilterstäuben aus Müllverbrennungsanlagen; Das Auslaugeverhalten von Elektrofilterstäuben und verfestigten Elektrofilterstäuben aus Müllverbrennungsanlagen,* Bericht EAWAG-Projekt 30-4694, Juni 1985

[ECKELMANN 1979] G. ECKELMANN, *Drehofenbrenner für feste Brennstoffe und Brennstoffgemische*, Zement-Kalk-Gips, Nr. 8 / 1979, p. 386 – 389

[ECOTEC (a) 1999] ECOTEC, *Richtpreisangebot einer Shredderverbrennungsanlage mit einer Behandlungskapazität von 15.000 Mg/a*, April 1999

[ECOTEC (b) 1999] ECOTEC, *Richtpreisangebot einer Altholzverbrennungsanlage mit einer Behandlungskapazität von 50.000 Mg/a*, Mai 1999

[EDEN ET AL. 1997] D. EDEN, B. HEITING und M. LUCKAS, *Berechnung und Optimierung von SO_2-Rauchgaswäschern*, VGB Kraftwerkstechnik 77, Heft 6, 505-511, (1997)

[EISENHART 1998] W. EISENHART, *Simulation einer thermischen Abfallbehandlungsanlage mittels des Simulationsprogrammes AspenPlus™*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR) und am Fachgebiet Thermische Verfahrenstechnik (TVT), TU Darmstadt, 1998

[EL LABANI 1998] M. EL LABANI, *Möglichkeiten der Errichtung von HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen,* Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Mechanisch-biologische Restmüllbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen", Endbericht, 1998

[EL LABANI ET AL. (a) 1998] M. EL LABANI, W. EISENHART, J. JAGER, *Simulation einer Abfallverbrennungsanlage mittels des Programmes Aspen Plus™*, In: Vom Geruch bis zum Feuer – Neuestes aus der Forschung rund um den Abfall - , Hrsg.: W. Bidlingmaier, J. Jager, Bauhaus-Universität Weimar, November 1998

[EL LABANI ET AL. (b) 1998] M. EL LABANI, TH. SCHMAND und J. JAGER, *Kombinationsmöglichkeiten von Reaktoren mit kleinen Durchsätzen zur thermischen Behandlung von Siedlungs- und Gewerbeabfällen,* Interne Arbeitssitzung des GVC/DECHEMA-Fachausschusses "Abfallbehandlung" und der GVC-Fachausschüsse "Energieverfahrenstechnik" und "Gasreinigung" vom 20. - 22. April 1998, Würzburg

[EL LABANI ET AL. (c) 1998] M. EL LABANI, B. GOLDSTEIN und J. JAGER, *Erstellung einer objektorientierten-Datenbank zur wirtschaftlichen Planung thermischer Abfallbehandlungsanlagen,* Interne Arbeitssitzung des GVC/DECHEMA-Fachausschusses "Abfallbehandlung" und der GVC-Fachausschüsse "Energieverfahrenstechnik" und "Gasreinigung" vom 20. - 22. April 1998, Würzburg (Posterbeitrag)

[ELLIOTT 1987] D.C. ELLIOTT, *Analysis of Medium-BTU Gasification Condensates,* DoE Contract DE-AC06-76RLO 183, Pacific Northwest Laboratory 1987

[ENTSORGUNGSPRAXIS 5/98] N.N., *Siemens baut Biomassekraftwerk in den Niederlanden*, Firmennachrichten, EntsorgungsPraxis 5/98, S. 98

[ENTSORGUNGSPRAXIS 6/98] N.N., *Biomasse-Heizkraftwerk offiziell in Betrieb*, EntsorgungsPraxis 6/98, S. 10

[ENTSORGUNGSPRAXIS 11/98] N.N., *Kraftwerksintegrierte ConTherm-Anlage in Hamm-Uentrop*, Firmennachrichten, EntsorgungsPraxis 11/98, S. 59

[EQUITHERM V4.02] EQUITHERM V 4.02, *Produktinformation der Fa. ScienceWare / VCH Software,* Münster, 1995

[FARAG ET AL. (a) 1991] I.H. FARAG, C.L. CHAPMAN and J. BURNETT-HERKES (UNIVERSITY OF NEW HAMPSHIRE), *Stage Fluidized Bed Decontaminant and Optimization,* presented at ASPENWORLD 91, Cambridge, MA, USA, November 1991

[FARAG ET AL. (b) 1991] I.H. FARAG, P.W. GALLIER and C.C. CHEN, *Addressing Hazardous Waste Incineration by Simulation*, presented at I & EC Symposium, Atlanta, GA, October 1991

[FAULSTICH 1992] M. FAULSTICH, *Übersicht über die derzeit verfügbaren thermischen Inertisierungsverfahren und Entwicklungstendenzen,* In: Inertisierung durch thermische Abfallbehandlung; M. Faulstich (Hrsg.), Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Nr. 118, TU München, 1994, 45-70

[FRIEDL 1995] C. FRIEDL, *Immer mehr Klärschlamm wird verbrannt,* VDI-Nachrichten, Nr. 41, 13. Oktober 1995, S. 28

[FRITZ, LORSON 1998] P. FRITZ und H. LORSON, *Entwicklungspotentiale zur weiteren Verbesserung thermischer Verfahren,* EntsorgungsPraxis 4/98, 37-39

[GEBHARD ET AL. 1995] S.C. GEBHARD, W.A. JACOBY, C. BACA-OVERLY, C. ROTH, R. L. VOJDANI and M.A. RATCLIFF, *Biosyngas Conditioning Research and Biosyngas Synthesis Research,* "Advances in Thermochemical Biomass Conversion", London: Blackie 1995

[GERHARDT ET AL. (a) 1996] TH. GERHARDT, H. SPLIETHOFF und K.R.G. HEIN, *Thermische Nutzung von Klärschlämmen in Kraftwerksfeuerungen*, EntsorgungsPraxis 3 (1996), 50-58

[GERHARDT ET AL. (b) 1996] TH. GERHARDT, M. REBMANN, H. SPLIETHOFF und K.R.G. HEIN, *Untersuchungen zur Mitverbrennung von kommunalen Klärschlämmen in Kohlestaubfeuerungen*, VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), Heft 5, 403-413

[GERICKE ET AL. 1994] VON B. GERICKE, J. C. LÖFFLER und M. A. PERKAVEC, *Biomassenverstromung durch Vergasung und integrierte Gasturbinenprozesse*, VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994), Heft 7

[GILLES 1997] E. D. GILLES, *Netzwerktheorie verfahrenstechnischer Prozesse,* Chemie Ingenieur Technik (69) 8/97, 1053–1065

[GLASNECK 1993] J. GLASNECK, *Implementation von selbstdefinierten Modellen in das Simulationsprogramm ASPEN,* Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik der RWTH Aachen, 1993

[GOLDSTEIN 1997] B. GOLDSTEIN, *Konzipierung einer objektorientierten Datenbank zur Verwaltung anlagentechnischer Spezifikationen für thermische Abfallbehandlungsanlagen*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, September 1997

[GÖRISCH, OERTER 1995] U. GÖRISCH, M. OERTER, *Schößlinge im Schatten,* ENTSORGA-Magazin, EntsorgungsWirtschaft, 6/95

[GREIF 1996] H.-G. GREIF, *Mitverbrennung von Reststoffen in Industriekesseln mit Braunkohle*, In: Abfallwirtschaft in der Papierindustrie: Vermeidung, Verwertung und Entsorgung Papiertechnischer Reststoffe; J. Murr, G. Chryssos (Hrsg.), PTS-Manuskripte, München, 1996

[GREIL, HIRSCHFELDER 1999] C. GREIL, H. HIRSCHFELDER, *Brenngas aus Reststoffen – Innovative Anlagenkonzepte auf Basis der zirkulierenden Wirbelschichtvergasung –*, EntsorgungsPraxis 4/99, 28-30, (1999)

[GÜNTHER 1974] R. GÜNTHER, *Verbrennung und Feuerung*, Berlin: Springer 1974

[HAJDU 1989] A.S. HAJDU, *Das Sprühabsorptionsverfahren*, EntsorgungsPraxis – Spezial, Nr. 7, 21-30, (1989)

[HDH 1996] HDH, *Alternativen künftiger Alt- und Restholznutzung*, Duisburg, März 1996

[HECKWOLF 1998] U. HECKWOLF, *Ermittlung des Genehmigungsaufwandes bei der Erweiterung sowie Modifikation bestehender thermischer Anlagen –HYBRID-Abfallbehandlungsanlagen*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, 1998

[HERREN ET AL. 1998] U. HERREN, P. STABEROW und F. STORK, *Optimierung von Altanlagen der Müllverbrennung*, „Optimale Auslegung von Rohrwandabkleidungen zur Einhaltung der 17. BImSchV und Reisezeitverlängerung" , AbfallwirtschaftJournal 4/98, 33-36

[HEITING ET AL. 1989] B. HEITING, K. HORCH und G. MÜTZENICH, *Rückstandsoptimierte Rauchgasreinigung*, EntsorgungsPraxis – Spezial, Nr. 6, 15 – 19, (1989)

[HEMMING 1989] W. HEMMING, *Verfahrenstechnik*, 5. Aufl., Würzburg: Vogel, 1989 (Kamprath-Reihe: Technik)

[HERGUIDO ET AL. 1990] J. HERGUIDO, J.L. RODRIGUEZ-TRULILLO und J. CORELLA, *Gasification of Biomass with Tar Cracking Catalysts in a Circulating Multisolid Fluidized Bed Pilot Plant,* Biomass for Energy and Industry, 5th E.C. Conference, Hrsg. G. Grassi, G. Gosse and G. dos Santos, London: Elsevier 1990.

[HERR, LOHF 1996] CH. HERR und A. LOHF, Heizwertberechnung aus On-line-Messungen an einer Müllverbrennungsanlage, EntsorgungsPraxis 6/96, 42-44

[HIEMER 1998] K. HIEMER, *Dezentrale Anlagen zur Energieerzeugung und Abfallentsorgung am Beispiel des Holzheizkraftwerkes Hagenow,* AbfallwirtschaftJournal 4/98, 28-32

[HOCHGESAND 1992] G. HOCHGESAND et al., „Gas Production". *Ullmann´s Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. A12.* Weinheim: Verlag Chemie 1992

[HOFBAUER 1994] H. HOFBAUER, *Charakterisierung von biogenen Brennstoffen und Verwertung von Holzaschen,* "Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz", Hrsg. T. Nussbaumer, Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft 1994

[HUGO PETERSEN 1996] HUGO PETERSEN, *pers. Mitteilung.* Brief vom 20.03.1996

[IUU 1996] PLANUNGS- und INGENIEURGESELLSCHAFT Infrastruktur und Umwelt: *Entwicklung eines Restmüllbehandlung- und logistikkonzepts für Südhessen,* Abschlußbericht, 1996

[JAGER ET AL. 1998] J. JAGER, A. LOHF, C. HERR, 54. Sem. Abfalltechnik – Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung, WAR 105, 65-128, (1998)

[JAGER, HERR 1996] J. JAGER, C. HERR, 48. Sem. Abfalltechnik – Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung, WAR 90, 201-234, (1996)

[JANICKA 1992] J. JANICKA, *Vorlesungsskript Verbrennungstechnik*; 13/028 – 13/040 (1991/92)

[JENNEN ET AL. 1998] T. JENNEN, R. HILLER, D. KÖNEKE und P.-M. WEINSPACH, *Modellierung der Vergasung von Holz in einer zirkulierenden Wirbelschicht,* Interne Arbeitssitzung des GVC/DECHEMA-Fachausschusses "Abfallbehandlung" und der GVC-Fachausschüsse "Energieverfahrenstechnik" und "Gasreinigung" vom 20. - 22. April 1998, Würzburg

[JOCHEM 1989] M. JOCHEM, *Stand der Rostfeuerungstechnik und Entwicklungstendenzen*, EntsorgungsPraxis – Spezial Nr. 10, 28 – 31, (1989)

[KANNHEISER 1998] K.-H. KANNHEISER, *Thermische Behandlung von Restmüll in Kleinanlagen,* EntsorgungsPraxis (EP) 6/1998, 37-40

[KARGER 1990] R. KARGER, *Verfahren zur Rauchgasreinigung bei der Abfallverbrennung unter dem Gesichtspunkt des Recyclings der abgeschiedenen Rauchgaskomponenten und einer abwasserfreien Prozeßführung,* AbfallwirtschaftsJournal 2 (1990), Nr. 6, 365-375

[KASSEL 1994] MHKW KASSEL, *Broschüre „Kurzbeschreibung Müllheizkraftwerk Kassel Linie 3 und 4",* (1994)

[KASSER 1994] U. KASSER, *Verwertung und Entsorgung von Rückständen aus Altholzfeuerungsanlagen,* "Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz", Hrsg. T. Nussbaumer, Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft 1994

[KAUFMANN 1994] H. KAUFMANN, *Vergasung von Holz und Gras in Festbettvergasern,* "Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz", Hrsg. T. Nussbaumer, Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft 1994

[KEBAG 1987] *Zusammensetzung KEBAG-Asche,* In: Behandlung und Verfestigung von Rückständen aus Kehrichtverbrennungsanlagen, Hrsg.: Bundesamt für Umweltschutz, Schriftenreihe Umweltschutz 62, Bern, April 1987, Seite 32

[KEHL 1998] A. KEHL, *Betrachtungen zur Shredderabfallentsorgung in der Europäischen Union - Situationsanalyse und Definition eines geeigneten Instruments zur Bewertung verschiedener Behandlungskonzepte,* Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt 1998

[KHARTCHENKO 1997] N. V. KHARTCHENKO, *Umweltschonende Energietechnik*, 1. Aufl., Würzburg: Vogel, 1997 (Kamprath-Reihe)

[KLEIN 1997] N. KLEIN, *Kostenuntersuchung für Verfahren zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, Februar 1997

[KLOCKOW 1996] S. KLOCKOW, *Planung, Bau und Betrieb von Abfallentsorgungsanlagen unter Unsicherheit,* AbfallwirtschaftJournal 7-8/1996, 41-47

[KLOMANN 1998] A. KLOMANN, *Zuordnung ausgewählter Abfallarten zu den Begrifflichkeiten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes und die Auswirkungen auf deren Entsorgungswege,* Diplomarbeit am Fachgebiet Umwelt- und Raumplanung (Institut WAR), TU Darmstadt, Mai 1998

[KLOSE 1992] E. KLOSE, *Anwendungen der Wirbelschichttechnik für die Vergasung,* "Wirbelschichttechnik in der Energiewirtschaft ", Hrsg. W. Michel, Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1992

[KNOLL 1996] P. KNOLL, *Angebot und Nachfrage - Aufkommen, Erfassung und Verwertungsverfahren bestimmen neben der Qualität die Absetzchancen für Altholz,* Müllmagazin, Heft 4/1996

[KNÖRR 1997] A. KNÖRR, *Reduzierung der technischen Ansprüche bei der thermischen Abfallbehandlung,* In: Thermische Abfallbehandlung - Entwicklung von Technik und Kosten in einer Kreislaufwirtschaft - ; A. Urban, B. Bilitewski, M. Faulstich (Hrsg.), Kassel, 1997

[KNORRA 1996] U. KNORRA, *Altöl ins Feuer?,* EntsorgungsPraxis 5 (1996), 32-34

[KORNER 1987] H. KORNER (BASF AG), *The Optimum Use of Energy in the Chemical Industry Concept & Effects*, presented at the Annual Meeting of Process Engineers, Freiburg, Germany, October 1987

[KRISTENSEN ET AL. 1983] A. KRISTENSEN, B. FALLENKAMP, J. TH. MCLLER, *Sprühtrockenabsorption zur Abgasreinigung nach Müllverbrennungsanlagen,* In: Müllverbrennung und Rauchgasreinigung; K. J. Thome-Kozmiensky (Hrsg.), Berlin, 1983, 737 – 768

[KRISTER 1996] S. KRISTER, *Biomass IGCC Overview and the Värnamo Power Plant,* 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen: 24-27 Juni 1996

[KUCHTA, JAGER 1997] K. KUCHTA, J. JAGER, *Zeitgemäße Abfallbehandlung mit Kombinationsverfahren - Mitbehandlung von Altholz - ,* VDI-Seminar 43-07-16, Mannheim, Juni 1997

[KUNII, LEVENSPIEL 1991] D. KUNII, O. LEVENSPIEL, *Fluidization Engineering,* Boston: Butterworth-Heinemann 1991

[KUO 1986] K.K. KUO, *Principles of Combustion*, John Wiley&Sons, Inc., 1986

[KURKELA ET AL. (a) 1989] E. KURKELA, P. STAHLBERG, P. SIMELL and J. LEPPÄLAHTI, *Updraft Gasification of Peat and Biomass*, Biomass 19 (1989): 37-46

[KURKELA ET AL. (b) 1992] Y. SOLANTAUSTA, T. MAKINEN, P. McKEOUGH and E. KURKELA, *Simulation of Biomass Power Plant Concepts with ASPEN PLUS*, Laboratory of Fuel and Process Technology, VTT, 1992

[LAHL 1995] U. LAHL, *Der Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen - Ein Rückblick*, Müll und Abfall 5 (1995), 309-313

[LAUTENSCHLAGER ET AL. 1998] G. LAUTENSCHLAGER, H. LORSON, und H.G. MAYER, *Energetische Verwertung hochkalorischer Abfälle in einem mit einer Rostfeuerung nachgerüsteten Heizkraftwerk,* Interne Arbeitssitzung des GVC/DECHEMA-Fachausschusses "Abfallbehandlung" und der GVC-Fachausschüsse "Energieverfahrenstechnik" und "Gasreinigung" vom 20. - 22. April 1998, Würzburg

[LEMANN 1992] M. LEMANN, *Abfalltechnik*, S. 41, 79-172, (1992).

[LESKE 1995] M. LESKE, *Abfälle liefern Energie und Gase,* VDI-Nachrichten, Nr. 42, 20. Oktober 1995, S. 30

[LILLACK ET AL. 1995] H. LILLACK, W. FRANTZ und M. HARTUNG, *Emissionsgrenzwertrechnung bei Mitverbrennung von Abfallstoffen,* AbfallwirtschaftsJournal 7 (1995), Nr. 11, 671-674

[LIPP ET AL. 1998] C. LIPP, B. NEUKIRCHEN und U. WERNER, *Modellierung der Verbrennung von festen Sonderabfällen im Drehrohrofen,* Interne Arbeitssitzung des GVC/DECHEMA-Fachausschusses "Abfallbehandlung" und der GVC-Fachausschüsse "Energieverfahrenstechnik" und "Gasreinigung" vom 20. - 22. April 1998, Würzburg

[LIPPERT ET AL. 1997] T.E. LIPPERT, D.M. BACHOVCHIN, B.C. WIANT and J.L. LARKIN, *Westinghouse Hot Gas Filter Experience,* Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Hg. A. V. Bridgwater und D.G.B. Boocock, London: Blackie 1997

[LÖFFLER 1997] J.C. LÖFFLER, *Zirkulierende Wirbelschicht zur Erzeugung von Schwachgas,* VDI-Seminar, Mannheim, Juni 1997

[LORBER 1984] K.E. LORBER, *Die Zusammensetzung des Mülls und die durch Müllverbrennungsanlagen emittierten Schadstoffe,* 559-594, (1984).

[LORENZEN, MADSEN 1996] S. LORENZEN und A.G. MADSEN, *Haderslev - Eine Müllverbrennungsanlage mit separat befeuertem Überhitzer,* VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), Heft 4, 324-326

[LUDERA 1980] L.M. LUDERA, *Brennzonenlängen und Durchmesser von Brennermündungen in Drehrohröfen,* Zement-Kalk-Gips, Nr. 11 / 1980, p. 558 - 568

[LURGI (a) 1991] LURGI Energie und Umwelt GmbH, Broschüre, *Reinigung von Nutz- und Abgasen – Abscheiden von Stäuben und gasförmigen Schadstoffen -,* August 1991

[LURGI (b) 1995] LURGI Energie und Umwelt GmbH, Broschüre, *Das Lurgi Öko-Gas Verfahren,* Juni 1995

[MAIR 1995] K. MAIR, *Einsatz von Sonderbrennstoffen in Zementwerken,* EntsorgungsPraxis 6 (1995), 68-70

[MARNET ET AL. 1983] C. MARNET, B. KASSEBOHM, J. BEWERUNGE, *Die quasi-trockene Rauchgasreinigung „System Düsseldorf" am Beispiel der Müllverbrennungsanlage Düsseldorf,* In: Müllverbrennung und Rauchgasreinigung; K. J. Thome-Kozmiensky (Hrsg.), Berlin, 1983, 699 – 736

[MARUTZKY 1995] R. MARUTZKY, *Anforderungen an Holzbrennstoffe für den Einsatz in Feuerungsanlagen,* VDI-Seminar "Alt- und Restholz -Thermische Nutzung und Entsorgung, Anlagenplanung, Energiekonzepte-" Salzburg, Oktober 1995

[MARUTZKY, STRECKER] R. MARUTZKY, M. STRECKER, *Aspekte der energetischen Verwertung von Altholz,* Holz Zentralblatt 67

[MATTER ET AL. 1996] CH. MATTER, L. PELLONI, TH. VOLLMEIER, *Lösungen zur Verwertung oder Beseitigung von Klärschlamm in der Schweiz,* Müll und Abfall 11, 1996, 751-755

[MEHRLING, REIMERT 1986] P. MEHRLING, R. REIMERT, *Synthetic Fuel from Wood via Gasification in the Circulating Fluid Bed,* Energy from Biomass - Advanced Gasification, Hrsg. A.A.C.M. Beenackers und W. van Swaay, Dordrecht: Reidel 1986

[MEISTER 1996] A. MEISTER, *Vergleich verschiedener Verwertungsverfahren für Bau- und Abbruchholz unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Holzschutzmitteln,* Diplomarbeit TU Berlin, Mai 1996

[MIELKE (a) 1996] U. MIELKE, 48. Sem. Abfalltechnik – Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung, WAR 90, 257-268, (1996)

[MIELKE (b) 1998] U. MIELKE, *persönliche Mitteilung*, Fax vom 19. Mai 1998

[MORF, BRUNNER 1999] L.S. MORF, P.H. BRUNNER, *Die Müllverbrennung als Analyseinstrument zur Bestimmung der Abfallzusammensetzung,* Müll und Abfall 5, 1999, 307-314

[MÜLL UND ABFALL 5/98] N.N., *Beteiligung an der Holzverbrennung Brand-Erbisdorf GmbH zur Nutzung von Biomasse*, Nachrichten aus der Industrie, Müll und Abfall, 5/98, S. 354

[MYREN ET AL. (a) 1997] C. MYREN, C. HÖRNELL, K. SJÖSTRÖM, Q. YU, C. BRAGE and E. BJÖRNBOM, *Catalytic Upgrading of the Grude Gasification Product Gas,* Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Hrsg. A.V. Bridgwater und D.G.B. Boocock, London: Blackie 1997

[MYREN ET AL. (b) 1997] C. MYREN, C. HÖRNELL, K. SJÖSTRÖM, Q. YU, C. BRAGE and E. BJÖRNBOM, *Catalytic Tar Cracking of Gas from Agricultural Residues and Biomass,* Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Hrsg. A.V. Bridgwater und D.G.B. Boocock, London: Blackie 1997

[N.N. 1996] N. N., *Rüdersdorfer Zement rüstet sich mit zirkulierender Wirbelschicht für stärkere Abfallverwertung*, AbfallwirtschaftJournal 12 (1996), S. 65

[NAMENDORF 1998] TH. NAMENDORF, *Kostenermittlung für technische Auftragsprojekte im Bereich der thermischen Abfallbehandlung – Rostfeuerungsanlagen,* Studienarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, Mai 1998

[NEUMANN, BAUMGÄRTNER 1998] P. NEUMANN, D. BAUMGÄRTNER, *Die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten*, AbfallwirtschaftJournal 6 (1998), 22-26

[NIESAR ET AL. 1996] N. NIESAR, H. KÜHMICHEL, K. FRICKE, 48. Sem. Abfalltechnik – Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung, WAR 90, 87-138, (1996)

[NITSCHE 1999] R. NITSCHE, *Das MultiCom – Konzept – Standort – und Energieoptimierte thermische Verwertung von Restabfällen,* In: Thermische Abfallbehandlung, Co-Verbrennung, Hrsg.: B. Bilitewski, M. Faulstich, A. Urban, Tagungsband der Fachtagung vom 1. bis 3. März 1999, Beiträge zur Abfallwirtschaft, Band 9, Dresden

[NUSSBAUMER (a) 1996] TH. NUSSBAUMER, *Feuerungstechnik, Ascheverwertung und Wärme-Kraft-Kopplung,* Tagungsband zum 4. Holzenergie-Symposium, 18. Oktober 1996, ETH Zürich, Hrsg. Th. Nussbaumer, Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft 1996

[NUSSBAUMER (b) 1994] TH. NUSSBAUMER, *Altholzverwertung in 1-10 MW Anlagen,* "Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz", Hrsg. Th. Nussbaumer, Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft 1994

[NUSSBAUMER (c) 1990] TH. NUSSBAUMER, *Grundlagen der Holzvergasung*, Heizung Klima Nr.7/1990

[OTTEN, HOFFMANN 1996] W. OTTEN, P. HOFFMANN, *Verfahrenstechnische Optimierung eines Anlagenverbundes am Beispiel einer Kunststoffproduktion,* Chemie Ingenieur Technik (68) 8/96, 973-977

[PAULSEN 1996] W. PAULSEN, *Ein MVA-Konzept aus der Sicht eines Betreibers,* Abfallwirtschaft Journal 10 (1996), 48-51

[PEKKA ET AL. 1997] S. PEKKA, P. STAHLBERG, Y. SOLTANTAUSTA, J. HEPOLA and E. KURKELA, *Gasification Gas Cleaning with Nickel Monolyth Catalyst,* Developments in Thermochemical Biomass Conversion, Hrsg. A.V. Bridgwater und D.G.B. Boocock, London: Blackie 1997

[PETRIDES ET AL. (a) 1997] D. PETRIDES, J. CALANDRANIS and J. FLORA, *Clean Water Begins with a Mouse - A comprehensive computer simulation can simplify the task of designing a cost-effective wastewater treatment plant,* Industrial Wastewater (a WEF Publication), May/June 1997 issue, pp. 33-40

[PETRIDES ET AL. (b) 1995] D. PETRIDES, K.V. AELION, S.K. MALLICK and E.S. VENKATARAMANI, *EnviroCAD: A Comprehensive Environmental Process Simulator,* Journal of Hazardous Materials, Volume 42 - No. 3, August 1995

[PETRIDES ET AL. (c) 1994] D. PETRIDES, V. AELION and K. MALLICK, *Pollution Prevention Through Process Simulation*, in Industrial Pollution Prevention Handbook, H.M. Freeman (ed.), McGraw Company, New York, 1994, p. 409

[PFEIFFER 1983] K.-D. PFEIFFER, *Rauchgasreinigung mit dem Fläkt-DAS-Verfahren in Müllverbrennungsanlagen,* In: Müllverbrennung und Rauchgasreinigung; K. J. Thome-Kozmiensky (Hrsg.), Berlin, 1983, 790 – 817

[PFRANG-STOTZ, REICHELT 1999] G. PFRANG-STOTZ, J. REICHELT, *Charakterisierung und Bewertung von Müllverbrennungsschlacken aus 15 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik,* Müll und Abfall 5, 1999, 262-268

[PILLARD 1996] PILLARD, *Brennerausrüstungen für Schwachgase*, Katalog der Firma Pillard, Taunusstein o.D., 1996

[POTT(a) 1997] F. POTT, *Müllverbrennung mit zweierlei Maß,* VDI-Nachrichten, Nr. 9, 28. Februar 1997, S. 20

[POTT(b) 1997] F. POTT, *Biomasse als Energiespender,* VDI-Nachrichten, Nr. 24, 13. Juni 1997, S. 16

[REH 1977] L. REH, *Auswahlkriterien für nicht katalytische Gas/Feststoff-Hochtemperatur-reaktoren,* Chem.-Ing.-Tech 49 (1977), 786-795

[REID ET AL. 1997] R.C. REID, M.J. PRAUSNITZ and B.E. POLING, *The Properties of Gases & Liquids,* Fourth Edition, New York, 1997

[REIMANN (a) 1998] D.O. REIMANN, *Verbrennungskosten und deren Beeinflußbarkeit*, Müll und Abfall 7/98, 452-457

[REIMANN (b) 1996] D.O. REIMANN, *Synergie von Abfall und thermischer Behandlung*, Müll und Abfall 12 (1996), 797-800

[REIMANN (c) 1995] D.O. REIMANN, *Rückstände und Reststoffe aus Rauchgasreinigungsanlagen*, Umwelt Bd. 25 Nr.5/6, 212-217, (1995)

[REIMANN, HÄMMERLI-WITH 1992] D.O. REIMANN, H. HÄMMERLI-WIRTH, *Verbrennungstechniken – Bedarf-Entwicklung-Berechnung-Optimierung* -, AbfallwirtschaftJournal 4 (1992), Nr. 8, 605-616

[REIMANN 1990] D.O. REIMANN, *Reststoffe aus der Rauchgasreinigung von Abfall- und Sonderabfallverbrennungsanlagen sowie von Kohlekraftwerken, - Art – Behandlung – Verwertung – Entsorgung -*, Beihefte zu Müll und Abfall, Bamberg, Januar 1990, 12-16

[REIMER 1983] H. REIMER, *Abwasserlose Rauchgasreinigung in Abfallverbrennungsanlagen*, Staub – Reinhaltung Luft 43, 28 – 40, (1983)

[RICK, VIX 1991] F. RICK, U. VIX, *Product Standards for Pyrolysis Products for Use as Fuel in Industrial Firing Plants,* Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization, Hrsg. A.V. Bridgwater und G. Grassi, London: Elsevier 1991

[RIEMANN, SONNENSCHEIN 1998] K.A. RIEMANN, H. SONNENSCHEIN, *Kosten der thermischen Restabfallbehandlung in dezentralen Kleinanlagen*, EntsorgungsPraxis, 10/98, 32-35

[ROTHENBERG (a) 1995] M. ROTHENBERG, *Altautos im Hochofen,* VDI-Nachrichten, Nr. 35, 1. September 1995, S. 22

[ROTHENBERG (b) 1995] M. ROTHENBERG, *Aus Müll wird im Hochofen ein begehrter Rohstoff,* VDI-Nachrichten, Nr. 41, 13. Oktober 1995, S. 3

[SAGA-IGW 1998] IGW FRICKE & TURK GMBH, *Möglichkeiten der energetischen und stofflichen Verwertung von heizwertreichen Reststoffen aus der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung im Rahmen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes*, Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Mechanisch-biologische Restmüllbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren", Witzenhausen, 1998

[SCHÄFER 1997] B. SCHÄFER, *Analyse des Shredderprozesses unter besonderer Beachtung der Restabfallpfade*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, 1997

[SCHÄFER, SCHUMACHER 1997] W. SCHÄFERS, W. SCHUMACHER, *Bewertung aktueller technischer Entwicklungen und deren Vorteile für den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb*, In: Thermische Abfallbehandlung - Entwicklung von Technik und Kosten in einer Kreislaufwirtschaft - ; A. Urban, B. Bilitewski, M. Faulstich (Hrsg.), Kassel, 1997

[SCHÄFL 1995] A. SCHÄFL, *Thermische Abfallbehandlung*, Verlag Abfall Now, Bd. 13.1, 41 ff, (1995)

[SCHAUB 1996] G. SCHAUB, *Rauchgasreinigung mit Feststoffbehandlung und Wertstoffgewinnung in der Abfallverbrennung – Stand und Tendenzen -,* Chemie Ingenieur Technik (68) 11/96, 1424-1431

[SCHIFFER ET AL. 1996] H.-P. SCHIFFER, K. BIERBAUM, W. ADLHOCH, G. THOMAS, *Vergleich der Mitvergasung und Mitverbrennung kommunaler Klärschlämme in Braunkohlegefeuerten Anlagen*, Im Rahmen der DGMK-Fachbereichstagung: „Energetische und stoffliche Nutzung von Abfällen und nachwachsenden Rohstoffen", 22 – 24 April 1996, Velen/Westf.

[SCHINGNITZ, FRITZ 1997] M. SCHINGNITZ, und P. FRITZ, *Integration von Abfall- und Energiewirtschaft durch Anwendung des NOELL-Konversionsverfahren*, Chemie Ingenieur Technik (69) 6/1997, 820-824

[SCHMAND 1996] TH. SCHMAND, *Planung einer Versuchsanlage zur thermischen bzw. alternativ thermischen Behandlung von Abfällen*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, 1996

[SCHMIDT 1997] W. SCHMIDT, *Prozeßsimulation: Leistungsfähiges und schnelles Werkzeug für den Verfahrensingenieur*, CAV-Sonderteil

[SCHNEIDER ET AL. 1995] J. SCHNEIDER, W. SEIFERT und B. BUTTKER, *Betriebsergebnisse bei der Klärschlammvergasung*, AbfallwirtschaftJournal 7 (1995), Nr. 10, 618-620

[SCHOLZ ET AL. (a) 1997] R. SCHOLZ, M. BECKMANN und F. SCHULENBURG, *Modellierung und Vergleich verschiedener Feuerungsführungen in Rostsystemen*, VDI Berichte 1313: Verbrennung und Feuerungen, 18. Deutsch-Niederländischer Flammentag, Delft, 28. und 29.08.1997, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997

[SCHOLZ ET AL. (b) 1994] R. SCHOLZ, M. BECKMANN, F. SCHULENBURG und W. BRINKER, *Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren - Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung*, Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994) 11/12

[SCHÖNGRUNDER ET AL. 1995] W. SCHÖNGRUNDER, J. HIEBLER und W. ZIERLER, *Betriebserfahrungen mit einer High-dust-SCR-Anlage*, VGB Kraftwerkstechnik 75, Heft 1, 61 – 66, (1995)

[SCHULTES 1996] M. SCHULTES, *Abgasreinigung: Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen, Verfahrensvergleich*, Springer, 1996

[SCHUMACHER 1997] SCHUMACHER, *pers. Kommunikation*, Gespräch in Gummersbach, Januar 1997

[SCHUMACHER ET AL. 1996] W. SCHUMACHER, B. BUCHHORN und H. LISS, *Das Steinmüller-Modulkonzept für dezentrale Restmüllverbrennungsanlagen*, VDI-Bildungswerk, XLVII. Berg- und Hüttenmännischer Tag, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 20./21.06.1996

[SCHUMACHER, BECKER 1994] W. SCHUMACHER und J. BECKER, *Überblick über die thermische Abfallverwertung*, Vortragsveranstaltung Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, Wackersdorf, 08.02.1994

[SCHWEIZER ET AL. 1991] A. SCHWEIZER, P.K. HERBERT und J.C. LÖFFLER, *Heizgas aus Baumrinde zum Betrieb eines Kalkdrehrohrofens in einem Sulfat-Zellstoffwerk*, Zement-Kalk-Gips, Nr. 5/1991

[SCHWING 1999] E. SCHWING, *Bewertung der Emissionen der Kombination mechanisch-biologischer und thermischer Abfallbehandlungsverfahren in Südhessen*, Dissertation am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, Juli 1999

[SEEMANN 1996] A. SEEMANN, *Analyse der thermischen Verwertung und Behandlung von gemischten Baustellenabfällen mit unterschiedlichen Anteilen an Wärmedämmverbundsystem- und Flachdachabdichtungsaufbauten –Abrißmaterialien, vor dem Hintergrund des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, Oktober 1996

[SEIFERT ET AL. 1998] H. SEIFERT, W. HASBERG und I.H. DORN, *Planung einer Verbrennungsanlage für industrielle Rückstände*, Chemie Ingenieur Technik 61 (1989) Nr. 4, 300-308

[SHAHABI ET AL. 1996] T. SHAHABI, M.O. TADE, D. WHITE and S. SHARMA, *Simulation of an Industrial Combustion Process Using SPEEDUP*

[SOLANTAUSTA ET AL. 1992] Y. SOLANTAUSTA, T. MAKINEN, P. MCKEOUGH, E. KURKELA, *Simulation of Biomass Power Plant Concepts with AspenPlus™*, 1992

[SPANKE 1998] V. SPANKE, *Aufbereitung der Shredderleichtfraktion aus der Altautoverwertung*, EntsorgungsPraxis (EP) 5/98, 26-34

[SPUZIAK-SALZENBERG (a) 1998] D. SPUZIAK-SALZENBERG, *Energetische Verwertung heizwertreicher Abfälle*, AbfallwirtschaftJournal 6 (1998), 27-29

[SPUZIAK-SALZENBERG ET AL. (b) 1998] D. SPUZIAK-SALZENBERG, S. RIEMER, B. BAYLEY-BLACKWEDEL und G. BÄR, *Probenaufbereitungssystem zur Qualitätssicherung für Abfälle zur energetischen (stofflichen) Verwertung*, EntsorgungsPraxis 10/98, 36-40

[STAHL, NEERGAARD 1996] K. STAHL und M. NEERGAARD, *Das Kombi-Kraftwerk mit integrierter Biomassen-Vergasung in Värnamo/Schweden*, VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), Heft 4, 327-330

[STANA ET AL. 1998] A. STANA, G. ALFONS und R. GÖSCHL, *Neubau einer Wirbelschicht-Kesselanlage zur Verwertung von Leichtfraktionen aus der Abfallaufbereitung*, AbfallwirtschaftJournal 6 (1998), 30-32

[STAUDT, RENZ 1998] M. STAUDT und U. RENZ, *Modellierung und numerische Berechnung des gekoppelten Wärme- und Stoffaustauschs zwischen Brennstoff und Verbrennungsluft bei der Rostfeuerung,* Interne Arbeitssitzung des GVC/DECHEMA-Fachausschusses "Abfallbehandlung" und der GVC-Fachausschüsse "Energieverfahrenstechnik" und "Gasreinigung" vom 20. - 22. April 1998, Würzburg

[STEILEN ET AL. 1992] N. STEILEN, H. W. KÜPPERS, *Verwertung von Schlacke aus der Hausmüllverbrennung,* EntsorgungsPraxis 11/92

[STEINBEISS ET AL. 1993] E. STEINBEISS, C. BAUER und W. BREIDENSTEIN, *Entwicklungsstand des PYRO-JET Brenners*, VDZ Kongreß 1993, Wiesbaden: Bauverlag 1993

[STELLA II] STELLA II, *Product information,* Download from http://www.hps-inc.com, 1998

[SUNDKVIST 1991] S.G. SUNDKVIST (ABB STAL), *Power Plant Simulation with ASPEN PLUS at ABB STAL*, presented at ASPENWORLD 91, Cambridge, MA, USA, November 1991

[SUPERPRO DESIGNER® (a) 1998] N.N., *Product information,* Chemical Engineering, August 1997

[SUPERPRO DESIGNER® (b) 1997] SUPER PRO DESIGNER®, *User´s Guide for the Demonstration Version,* Download from http://www.intelligen.com, 1997

[TANDLER 1999] M. TANDLER, *Simulation einer Sonderabfall-Verbrennungsanlage mittels des Simulationsprogrammes AspenPlus™*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR) und am Fachgebiet Thermische Verfahrenstechnik (TVT), TU Darmstadt, 1999

[TBF 1987] *Messungen (KEZO, Hinwil; TBF: Toscano-Bernardi-Frey AG, Planer und Ingenieure, Zürich),* In: Behandlung und Verfestigung von Rückständen aus Kehrichtverbrennungsanlagen, Hrsg.: Bundesamt für Umweltschutz, Schriftenreihe Umweltschutz 62, Bern, April 1987, Seite 35

[TCHOBANOGLOUS ET AL. 1993] G. TCHOBANOGLOUS, H. THEISEN, S. VIGIL, *Integrated Solid Waste Management*, McGraw-Hill, Inc., 1993

[TECHFORM 1998] TECHFORM Engineering GmbH, Broschüre, *Power-Tech Kompakt-verbrennungsanlage*, 1998

[TEICHMANN ET AL. (a) 1995] O. TEICHMANN, G. FUNK und W. KRUMM, *Mathematische Modellbildung zur Beurteilung von thermischen Verfahren,* AbfallwirtschaftJournal 7 (1995), Nr. 11, 694-697

[TEICHMANN ET AL. (b) 1998] O. TEICHMANN, G. FUNK und W. KRUMM, *Energetischer Vergleich zwischen einer Müllverbrennungsanlage mit Rostfeuerung und dem Schwel-Brenn-Verfahren,* AbfallwirtschaftJournal 1-2 (1998), 29-35

[TELLER 1994] M. TELLER, *Entwicklungsstand des THERMO-CYCLING PROCESS®,* VDI-Seminar: „Thermische Abfallbehandlung mit Kombinationsverfahren", 17. - 18. November 1994, Mannheim

[THEOCHARIS 1999] N. THEOCHARIS, *Erstellung einer Datenbank zur Kostenermittlung thermischer Abfallbehandlungsanlagen (Rostfeuerungsanlagen)*, Diplomarbeit am Fachgebiet Abfalltechnik (Institut WAR), TU Darmstadt, März 1999

[THOME-KOZMIENSKY 1994] K. J. THOME-KOZMIENSKY, *Thermische Abfallbehandlung,* EF-Verlag, Berlin 1994

[TIETZ ET AL. 1996] H.-P. TIETZ, H.-J. FELSEN und A. THIERRY, *BRAM-Einsatz in der Zementindustrie*, EntsorgungsPraxis 11 (1995), 22-25

[TOBLER, NOGER 1994] H.P. TOBLER, D. NOGER, *Beurteilung und Entsorgung der festen Rückstände von Altholzanlagen,* Müll und Abfall, 6/1994, 333-344

[UBA 1998] M. AUKSUTAT, R. LÖFFLER, *Kostenstrukturuntersuchung von Abfallbeseitigungsverfahren*, Forschungsbericht 203 50 502 des Umweltbundesamtes, Berlin, Mai 1998

[ULBRICH, MECKL 1998] M. ULBRICH, S. MECKL, *Theorie und Praxis bei Rauchgaswäschern,* Chemie Ingenieur Technik (70) 3/98, 246–253

[URBAN, FRIEDEL 1997] A. URBAN, M. FRIEDEL, *Kapazitäten thermischer Verfahren und Behandlungsanlagen*, In: Thermische Abfallbehandlung - Entwicklung von Technik und Kosten in einer Kreislaufwirtschaft - ; A. Urban, B. Bilitewski, M. Faulstich (Hrsg.), Kassel, 1997

[UZD 1994] UmweltZentrumDortmund GmbH, *Neue Möglichkeiten der Altholz-Verwertung,* November 1994

[VAN KESSEL, BREM 1995] L.B.M. VAN KESSEL and G. BREM, *A dynamic model of a municipal solid waste incinerator (as a tool for process optimization and operation training)*, VDI Berichte 1193: Verbrennung und Feuerungen, 17. Deutscher Flammentag, Hamburg, 12. und 13.09.1995, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995

[VAUCK, MÜLLER 1988] VAUCK, MÜLLER, *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*, 7. Aufl., VCH, 247 ff., (1988)

[VEHLOW ET AL. 1997] J. VEHLOW, L. BIRNBAUM und W.KÖPPEL, *Arsen und Antimon in der Abfallverbrennung*, AbfallwirtschaftsJournal 3/97

[VON ROLL (a)1997] VON ROLL Environmental Technology Ltd., *Broschüre*, Switzerland

[VON ROLL (b)1998] ENVIRONMENTAL FLASH, *Maßgeschneiderte Problemlösungen am Beispiel der MVA Bonn*, Periodische Kundenzeitung der vonRoll *INOVA*, Nr. 13, November 1998

[WAGNER 1990] W. WAGNER, *Thermische Apparate und Dampferzeuger: Planung und Berechnung,* 2. Aufl., Würzburg: Vogel, 1990 (Kamprath-Reihe)

[WARNATZ 1985] J. WARNATZ, *Elementarreaktionen in Verbrennungsprozessen,* BWK Bd. 37 (1985) Nr. 1-2 – Jan./Febr., 11-19

[WARNATZ, MAAS 1993] J. WARNATZ, U. MAAS, *Technische Verbrennung,* Berlin: Springer 1993

[WERTHER 1992] J. WERTHER, „Fluidized-Bed Reactors". *Ullmann´s Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. B4 240-274,* Weinheim: Verlag Chemie 1992

[WIEHN ET AL. 1994] G.CH. WIEHN, R. BECKMANN und J. JUNG, *Auslegungsparameter für die Projektierung von Anlagen zur Siedlungabfallentsorgung,* AbfallwirtschaftJournal 6 (1994), 33-38

[WIESE ET AL. 1998] CH. WIESE, M. BECKMANN, P.-G. MAST und B. JOHNKE, *Einfluß der Abfallzusammensetzung auf die Qualität der Schlacke bei der Verbrennung von Rest-Siedlungsabfällen,* Müll und Abfall 11 / 98, 685-693

[WILGEROTH ET AL. 1997] U. WILGEROTH, G. SCHWEDT und W. BLÜMEL, *Untersuchung zu den Emissionspfaden von Schwermetallen bei der Verbrennung in Kraftwerksanlagen,* Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 57 (1997), 319-324

[WISCHNEWSKI 1995] R. WISCHNEWSKI, W. RENZENBRINK und H.J. SCHUHMACHER, *Operational experience gained with the hot gas filter of the HTW Demonstration plant at Berrenrath,* POWER GEN´95, EUROPE, Amsterdam, May 1995

[WOCADLO 1994] TH. WOCADLO, *Experimentelle Untersuchung und mathematische Modellierung eines großtechnischen Pyrolyse-Drehrohrofens zur Reinigung kontaminierter Böden,* Fortschrittberichte VDI, Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 127, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1994

[WOLF ET AL. 1996] A. WOLFF, M. GROEBEL, R. JANOWSKY, *Wärmetechnische Optimierung eines Chemiestandortes,* Chemie Ingenieur Technik (68) 6/96, 615–659

[YANG ET AL. 1991] W.C. YANG, N.H. ULERICH and S.V. DIGHE (WESTINGHOUSE STC), I.H. FARAG (UNIVERSITY OF NEW HAMPSHIRE), and C.C. CHEN, *Simulation of MSW Incineration in a Water-Walled Rotary Combustor,* presented at ASPENWORLD 91, Cambridge, MA, USA, November 1991

[ZAS 1997] ZAS (Zweckverband Abfallverwertung Südhessen), *Broschüre des Müllheizkraftwerkes Darmstadt „Energie aus Abfall",* (1997)

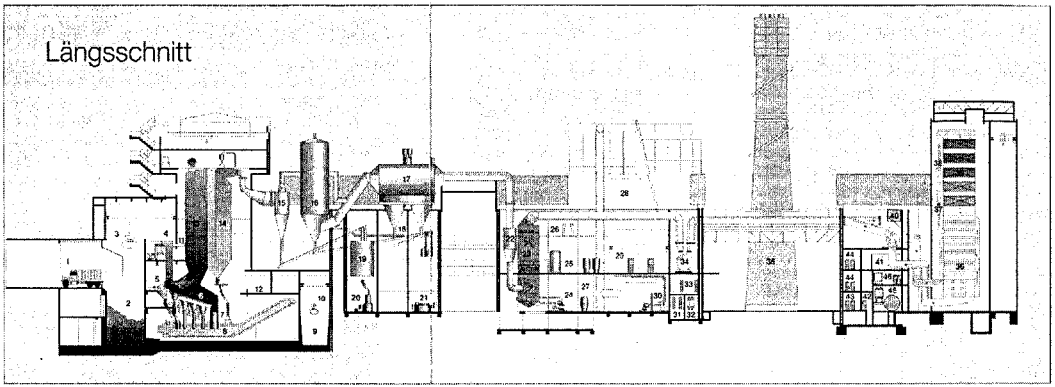
[ZIMMERMANN ET AL. 1996] P. ZIMMERMANN, B. DOKA, F. HUBER, A. LABHARDT und M. MENARD, *Ökoinventare von Entsorgungsprozessen „Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen",* ESU-Reihe Nr. 1/96, Zürich, August 1996

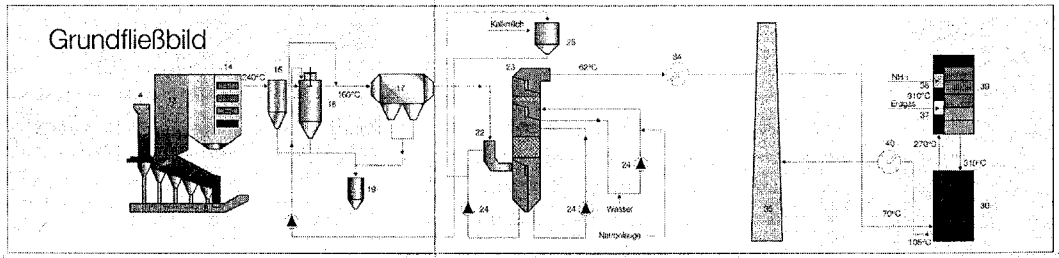
10 Anhang

Anhang A

A1 Gesamtfließbild und Auslegungsdaten des MHKW Darmstadt

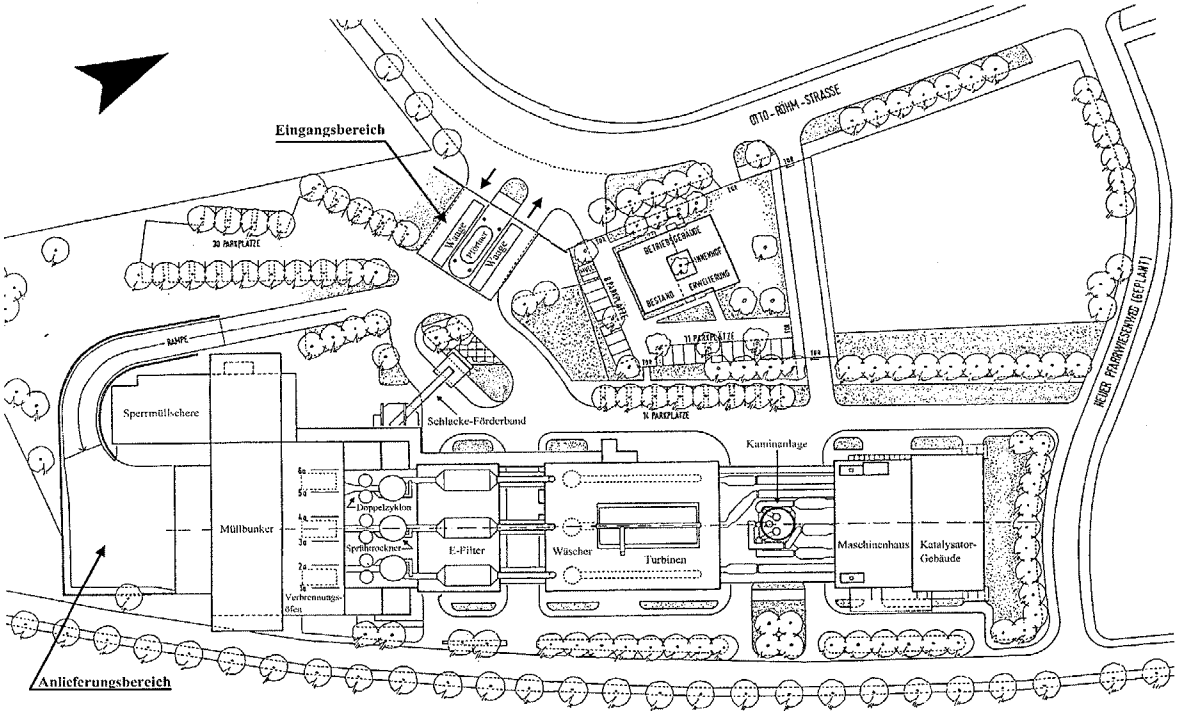
A2 Gesamtfließbild und Komponenten einer Shredder-Verbrennungsanlage





1 Entladehalle
2 Müllbunker
3 Müllkran
4 Einfülltrichter
5 Dosierstößel
6 Verbrennungsrost
7 Schlackeschacht
8 Entschlacker
9 Schlackebunker
10 Schlackekran
11 Primärluftventilator
12 Sekundärluftventilator
13 Nachbrennkammer
14 Dampfkessel
15 Zyklon
16 Sprühtrockner
17 Elektrofilter
18 Reststoffördereinrichtungen
19 Reststoffsilo
20 Reststoffverladung
21 Notstromdiesel
22 Quench
23 Rauchgaswäscher
24 Kreislaufpumpen
25 Neutralisationsbehälter
26 Emissionsmeßanlage
27 Kondensataufbereitung
28 Luftkondensator
29 Turbogenerator
30 Turbohilfsbetriebe
31 Mittelspannungsanlage
32 Transformatoren
33 Niederspannungsanlage
34 Saugzug 1
35 Kamin
36 Wärmetauscher
37 Erdgas - Flächenbrenner
38 NH_3 - Dosierung
39 Katalysator
40 Saugzug 2
41 Emissonsmeßanlage
42 Mittelspannungsanlage NO_x
43 Transformatoren NO_x
44 Niederspannungsanlage NO_x
45 NH_3 OH - Lager
46 NH_3 - Verdampfer

Abbildung A1-1: Gesamtfließbild des Müllheizkraftwerkes Darmstadt [ZAS 1997]



bbildung A1-2: **Werksplan des Müllheizkraftwerkes Darmstadt**

Tabelle A1-1: Auslegungsdaten und Hauptabmessungen des MHKW´s Darmstadt (Linie 1)

Apparat	Abmessungen und Auslegungsgrößen	Werte
Anlieferung und Bunkerbereich		
Fahrzeugwaage	Anzahl der Wiegebrücken	2
	Länge	18 m
	Breite	3 m
	Wiegebereich	20 - 50.000 kg
Sperrmüllbunker	Aufnahmevolumen	450 m³
Hausmüllbunker	Aufnahmevolumen	3.300 m³ (bis Niveau +13,40 m) 4.800 m³ (insgesamt)
Krananlagen	Anzahl	2
Feuerung und Dampferzeugung		
Einfülltrichter mit Abschlußkappe	Einfüllquerschnitt	4,3 x 4,3 m
	Füllschacht	4,0 x 1,2 m
Verbrennungsrost	Rostbreite	4,0 m
	Rostlänge	8,25 m
	Rostfläche	33 m²
	Max. Mülldurchsatz	11 Mg/h
	Installierte Verbrennungsleistung	30,2 MW
Primärluftgebläse	Volumenstrom	38.000 Nm³/h
	Betriebstemperatur	20 °C
Sekundärluftgebläse	Volumenstrom	12.600 Nm³/h
	Betriebstemperatur	20 °C
Seitenwandluftgebläse	Volumenstrom	10.000 Nm³/h
	Betriebstemperatur	20 °C
Primär-Luftvorwärmer	Volumenstrom	28.100 Nm³/h
	Lufttemperatur	0 °C (Eintritt) - 125 °C (Austritt)
	Dampfmenge	2.150 kg/h
	Dampfparameter	7 bar, 170 °C
Gasbrenner (Zusatzbrenner)	Anzahl	2
	Leistung pro Brenner	95 - 575 m³/h
	Volumenstrom des Ventilators	12.000 Nm³/h
Dampfkessel	Bauart	3 - Zug Naturumlaufkessel
	Dampfleistung	28,8 t/h
	Mindestdampferzeugung	20 t/h
	Dampfparameter	39 bar, 350 °C
	Max. Rauchgastemp. nach Kessel	250 °C
	Rauchgasmenge	61.957 Nm³/h
	Speisewassertemperatur	127 °C
Entschlacker	Art des Austrages	Kratzerkette
	Austragsleistung	6 - 12 t/h
	Ausgleichswassermenge	0,5 - 1,5 m³/h
Kesselentaschung	Durchsatz	8 m³/h

Apparat	Abmessungen und Auslegungsgrößen	Werte
Thermische Anlage		
Speisewasserbehälter mit Entgaser	Betriebsparameter	1,75 bar, 127 °C
	Volumen Entgaser	3,22 m³
	Volumen Speisewasserbehälter	56 m³ (brutto), 40 m³ (netto]
Turbine	Bauart	Entnahme-Kondensations-Turbine
	Frischdampfdruck	37,5 bar (maximal 47 bar)
	Frischdampftemperatur	345 °C (maximal 360°C)
	Entnahmedruck	4,5 bis 12,5 bar (normal 5,5 bar)
	Abdampfdruck	0,1 - 0,5 bar
	Abdampfmenge	3,3 - 55,7 t/h
	Turbinenleistung	10,56 MW (maximal)
		10,22 MW (Auslegung)
Luftkondensator	Dampfmenge	46 t/h
	Dampftemperatur	110 °C (max.), 69 °C (Auslegung)
	Betriebsdruck	1,5 bar (max.), 0,3 bar (Auslegung)
	Kondensationsleistung	27,36 MW
Rauchgasreinigungsanlage		
Zyklone	Anzahl	2
	Volumenstrom	69.000 Nm³/h (maximal)
	Rauchgastemperatur	260 °C
	Differenzdruck	11 mbar
Sprühtrockner	Volumenstrom	31.000 Nm³/h (nominal)
	Rauchgastemperatur	260 °C (Eintritt), 160 °C (Austritt)
	Differenzdruck	6 mbar
Elektrofilter	Bauart	Horizontal (2 x 13 x 7 x 3,5 x 0,4)
	Volumenstrom	71.000 Nm³/h (maximal)
	Rauchgastemperatur	225 °C (maximal)
	Differenzdruck	2 mbar
Naß-Absorber		
1. Stufe: Quencher	Abmessungen	2,5 m (Höhe), 1,62 m (Ø-Innen)
	Volumenstrom	71.300 Nm³/h (Eintritt)
		70.000 Nm³/h (Austritt)
	Rauchgasaustrittstemperatur	64 °C
	Anzahl der Düsen	4
Waschturm (2. und 3. Stufe)	Abmessungen	18,7 m (Höhe), 4,2 m (Ø-Innen)
2. Stufe: HCL-Abscheidung	Volumenstrom	79.000 Nm³/h (maximal)
	Füllkörperhöhe	1,6 m
	Absorptionsmittel	Wasser
	Differenzdruck	1,0 - 1,5 mbar (nominal)
3. Stufe: SO2-Abscheidung	Anzahl Ringjet	36
	Absorptionsmittel	NaOH
	Differenzdruck	40 mbar (nominal)
Saugzuggebläse I	Volumenstrom	79.000 Nm³/h
	Betriebstemperatur	65 °C
	Differenzdruck	126 mbar

Apparat	Abmessungen und Auslegungsgrößen	Werte
Katalytische Rauchgasreinigung		
Ammoniakwasser-Verdampfer-station	Max. Durchsatz	40 kg/h wäßrige Ammoniaklösung mit 25 Gew.-%
Katalysator	Verbrauch wäßriger Ammoniak-lösung	38 kg/h
	Temperaturbereich	300 - 350 °C
	Katalysatorvolumen	10,36 m³
	Material	TiO2-V2O5-WO3
	Anzahl der Kanäle	35 x 35
	Modulabmessung LxBxH	970 x 1.907 x 1.090 mm
	Gesamtmasse der Module	10 t
Erdgasbrenner	Rauchgastemperaturaufheizung	Von 293,5 - 320,2 °C
	Rauchgasdruckverlust	1,5 mbar
	Brennerleistung	1.300 kW (Auslegung)
	Erdgasverbrauch	130 m³/h(Auslegung)
	Verbrennungsluftmenge	1.900 m³/h
	Verbrennungslufttemperatur	20 °C
	Erdgasdruck	4 bar
Rauchgaswärmetauscher	Rohgasvolumenstrom	77.000 Nm³/h
	Rohgasdruckverlust	9,3 mbar
	Rohgastemperatur	67 °C (Eintritt), 293 °C (Austritt)
	Reingasvolumenstrom	79.250 Nm³/h
	Reingasdruckverlust	10,3 mbar
	Reingastemperatur	320 °C (Eintritt), 102,1 °C (Austritt)
Saugzuggebläse II	Volumenstrom	79.000 Nm³/h
	Differenzdruck	68 mbar
Kaminanlage		
	Anzahl der Züge	3
	Ausführung	Stahlbeton
	Abmessungen	100 m (Kaminhöhe), 1,6 m (Ø-Innen)
	Temperatur am Eintritt	101 °C
	Rauchgasmenge	79.000 Nm³/h

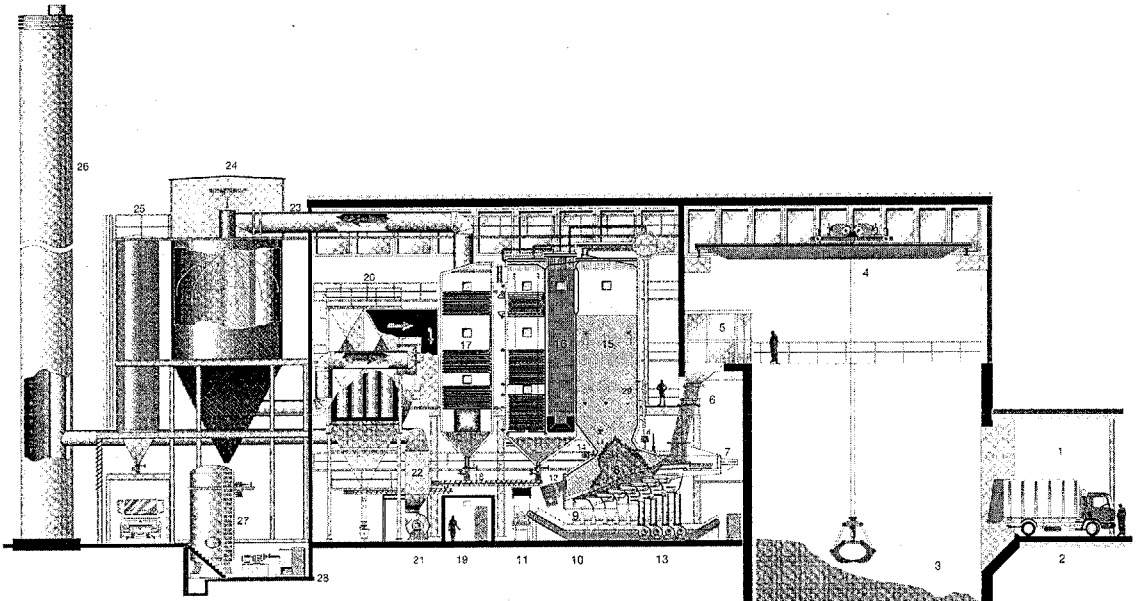


Abbildung A2-1: Kompaktanlage der Firma Techform [TECHFORM 1998]

Tabelle A2-1: Anlagenkomponenten einer dezentralen Kleinverbrennungsanlage [EcoTec (a)/(b) 1999]

- Brennstoffzuführung und Feuerung: Einfülltrichter, Einfüllschacht, Beschicker, wassergekühlter Verbrennungsrost, Naßentschlacker, Stützbrenner, Verbrennungsluftversorgung (Primär- und Sekundärluft)
- Feuerraum und Dampferzeugung: Heißdampferzeuger bestehend aus Kesseltrommel, Speisewasservorwärmer, Verdampferwände, Vorüberhitzer, Überhitzer, Economiser, Flugaschetrichter
- Energieerzeugung (Wasser – Dampf – System): Turbine und Generator, Turbinen-Bypass, ND-, HD-Sammler, Abdampfschiene, Druckreduzierstation, Kondensator, Kondensatbehälter und -pumpen, Speisewasserbehälter und –pumpen
- Rauchgasreinigung: Verdampfungskühler, Flugstromstrecke mit HOK-Eindüsung und Sorptionsmitteleindüsung, Gewebefilter, Additivlagerung und –förderung, SNCR-Anlage, Ammoniakwasserlager, Reststoffsilo, Fördersystem für Rückstände der RGR, Kamin, Rauchgaskanäle, Saugzugventilator vor Kamin
- Elektrotechnik, Meß-, Steuer- und Regelungstechnik: Schaltwarte / Niederspannungsraum, Niederspannungsverteilung, Leittechnik und Visualisierung, Rohgasmessungen (CO, O_2, NO_x, Temperatur), Emissionsmessung nach 17. BImSchV
- Nebenanlagen: Druckluftstationen, Stromerzeugungsaggregat, Brennstofflager für Stützbrenner, Diesellager für Stromerzeugungsaggregat, Wasseraufbereitungsanlage für benötigte Betriebswässer, Chemikalienlager, Schlacketransportanlage

Anhang B

B1 Modellübergreifende Grundeinstellungen für die Prozeßsimulation

B2 FORTRAN-Routine zur SO_2-Abscheidung

B 1 Modellübergreifende Grundeinstellungen für die Prozeßsimulation

Die übergreifenden Einstellungen für die Simulation lassen sich in zwei Gruppen aufteilen:

1. Voreinstellungen, die sich auf die gesamte Simulation beziehen und

2. Voreinstellungen, die sich auf bestimmte Sektionen der Simulation beziehen. Diese Sektionen lassen sich in AspenPlus™ definieren.

Zu der ersten Gruppe gehören Angaben wie die Festlegung des Einheitensystems, der zu berechnenden Eigenschaften, der Klassifizierung der Ströme und die Auswahl der für die Simulation notwendigen Stoffe sowie deren Eigenschaften (Aktivitätskoeffizient, Dipolmomente etc.).

Die folgenden Abbildungen zeigen Einstellungen, die für die gesamte Simulation gelten.

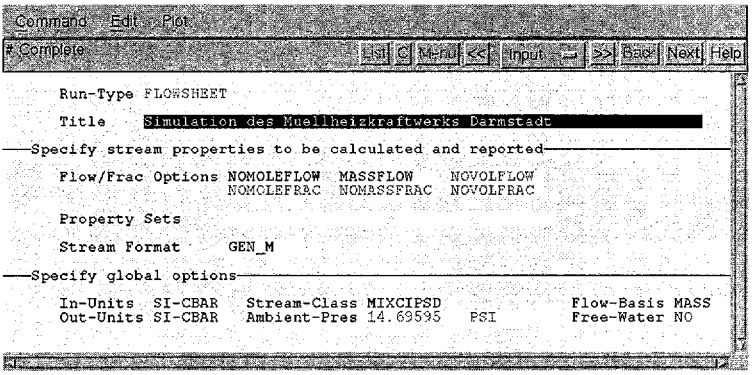


Abbildung B1-1: AspenPlus™ - Grundeinstellungen

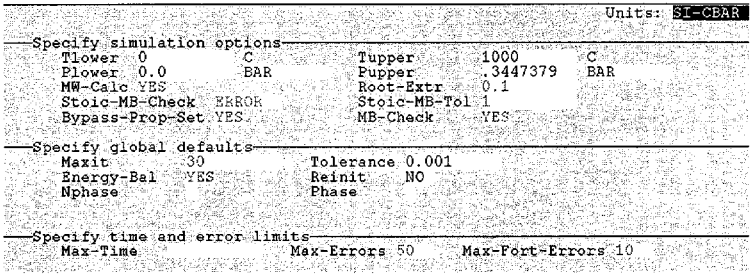


Abbildung B1-2: Menü für die Simulationsoptionen

Description: Partikelgroessenintervalle Units: SI-CBAR

Enter number of intervals and lower and upper size limits

Intervals 10 Size Units MU

Interval	Lower Limit	Upper Limit
1	0.0	1
2	1	2
3	2	10
4	10	20
5	20	80
6	80	100
7	100	200
8	200	300
9	300	1000
10	1000	2000

Abbildung B1-3: Intervalle für die Partikelgrößenverteilung

Data Banks Searched

ASPENPCD AQUEOUS SOLIDS INORGANIC COMBUST PURECOMP

Enter all components, assays, and blends in the simulation

Comp ID	Type	Formula	Component Name
CO	CONV	CO	CARBON-MONOXIDE
CO2	CONV	CO2	CARBON-DIOXIDE
NO	CONV	NO	NITRIC-OXIDE
NO2	CONV	NO2	NITROGEN-DIOXIDE
SO2	CONV	O2S	SULFUR-DIOXIDE
HCL	CONV	HCL	HYDROGEN-CHLORIDE
SIO2	SOLID	SIO2	SILICON-DIOXIDE
AL2O3	SOLID	AL2O3	ALUMINIUM-OXIDE-ALPHA-CORUNDUM
CAO	SOLID	CAO	CALCIUM-OXIDE
FE	SOLID	FE	IRON
FE2O3	SOLID	FE2O3	IRON-OXIDE(HEMATITE)

Abbildung B1-4: Komponentenhauptmenü

Description: Henry - Konstanten (binaer, Temperaturabhaengig) Units: METCBAR

Enter binary correlation coefficients

ParamName HENRY	DataSet 1	Databanks BINARY	HENRY
Estimate	Temp Units C	Prop Units BAR	
CompID i: CO2	SO2	HCL	NH4OH
j: H2O	H2O	H2O	H2O
aij 153.8650745	15.05177454	-47.51562646	81.75927454
bij -6741.550000	-2872.960000	1215.000000	-1096.810000
cij -21.66900000	-.3028800000	8.370700000	16.56020000
dij 1.102590000E-3	0.0	-9.5930000E-3	.0602466000
Tlower -.1499938965	9.850006104	-19.99999390	-.1499938965
Tupper 79.85000610	112.8500061	20.00000610	99.85000610

Abbildung B1-5: Henry-Konstanten binärer Gemische

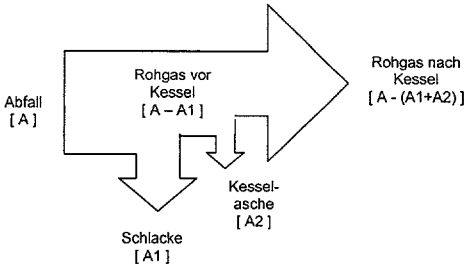
Tabelle C1-3: Elementare Zusammensetzung von Holzabfällen (Literaturwerte)

[g/kg]	[ALBRECHT ET AL. (a) 1994] Biomasse	[ALBRECHT ET AL. (b) 1996] Altholz	[BRILL ET AL. 1996] naturbelassenes Holz	[BRILL ET AL. 1996] behandeltes Holz	[N. N.] behandeltes Holz	[HUGO PETERSEN 1996] hochbelastetes Holz	[TOBLER, NOGGER 1994] Altholz (a)	[TOBLER, NOGGER 1994] Altholz (b)
C	301,0	434,0	500,0	500,0		500,0	440,0	450,0
H	55,0	47,7	60,0	60,0		61,0		
O		308,8	430,0	430,0		435,0		
N		2,3	0,9	6,5		5,0	7,6	0,513
S		1,0	0,012	1,3	1,0	2,5	0,02	5,5
Cl	19,0	0,2	0,01	0,5	2,0	1,2	0,2	0,014
P							0,31	0,021
B								
Br								
F			0,015	0,047	0,12	0,25	0,003	0,0002
J								
Feuchte (H_2O)	***400,0***	***191,0***	--	--	--	***200,0***	***430,0***	***170,0***
Summe Brennbares	--	--	--		--	--	--	--
Summe Asche	***30,0***	***15,0***	--	--	--	--	***60,0***	***90,0***
Si							0,45	1,8
Ca							13,0	
Fe							1,1	2,8
Na								
Mg							0,62	1,1
Al							0,55	1,5
K							1,3	0,78
Zn							0,49	0,62
Pb					1,0	1,5	0,14	0,51
Cu			0,002	0,178	1,5	0,75	0,016	0,002
Cr			0,0013	0,039	0,12	0,24	0,019	0,032
Ni					0,02	0,1	0,004	0,005
Cd			0,0001	0,0027	0,008	0,005	0,001	0,001
Hg			0,00002	0,0006	0,001	0,03	0,0005	
As					0,002	0,01	0,001	
Ag								
Ba								
Co					0,002	0,01		
Mn					0,1	0,4		
Mo								
Sb					0,005	0,011		
Se							0,012	
Sn					0,01			
V								
Heizwert (kJ/kg)	***11.000***	***15.400***	--	--	--			***14.800***

Tabelle C1-4: Elementare Zusammensetzung von Shredderabfällen (Literaturwerte)

[g/kg]	[KEHL 1998]		[SCHÄFFER 1997]		[SPANKE 1998]		[SPUZIAK-SALZENBERG 1998]	
	Bereich	*Mittelwerte*	*Bereich*	*Mittelwerte*	*Bereich*	*Mittelwerte*	*Bereich*	*Mittelwerte*
C	395,0 – 478,0	440,0			200,0 – 470,0	326,0		
H	49,0 – 60,0	55,0			20,0 – 60,0	41,0		
O	140,0 – 173,0	160,0			30,0 – 110,0	70,0		
N	9,0 – 11,0	10,0			2,0 – 18,0	9,0		
S	4,0 – 5,0	4,5			1,0 – 14,0	6,0		
Cl	17,0 – 21,0	19,0			5,0 – 30,0	18,0	10,0 – 20,0	14,0
P								
B								
Br								
F	0,1 – 0,5							
J								
Feuchte (H_2O)	***40,0 – 130,0***	***70,0***		--	***1,0 – 180,0***	***67,0***	***6,0 – 98,0***	***53,0***
Summe Brennbares	--	--		--	--	--	--	--
Summe Asche	***200,0 – 400,0***	***240,0***		***309,0***	***250,0 – 800,0***	***527,0***	***381,0 – 507,0***	***425,0***
Si								
Ca							4,2 – 15,0	6,3
Fe				167,0	50,0 – 240,0	141,0		
Na							0,52 – 2,3	1,3
Mg				1,7	8,0 – 10,0	8,7		
Al				18,7	10,0 – 25,0	20,0	2,9 – 21,8	7,0
K							0,41 – 11,0	0,77
Zn		30,0		34,5	2,0 – 13,0	9,0	2,16 – 6,46	3,9
Pb		1,6		2,0	0,3 – 14,0	5,1	0,844 – 1,71	1,2
Cu		2,8		2,8	3,3 – 30,0	11,4	4,19 – 37,2	18,7
Cr		0,69		0,48	0,34 – 1,3	1,2	0,081 – 0,446	0,19
Ni				0,83	0,4 – 2,8	1,2	0,043 – 0,278	0,14
Cd		0,13		0,097	0,04 – 0,08	0,061	0,123 – 0,591	0,026
Hg		0,02					0,0002 – 0,0017	0,001
As		0,28					0,0063 – 0,0433	0,032
Ag								
Ba								
Co								
Mn								
Mo								
Sb							0,002 – 0,226	0,082
Se								
Sn							1,1 – 9,95	4,9
V								
Heizwert (kJ/kg)	***17.400 – 21.000***	***19.000***	***10.500 – 13.200***	***12.500***	***7.000 – 26.000***	***13.000***	***11.900 – 17.900***	***15.200***

Tabelle C2-1: Referenzwerte für die Schadstoffverteilung der Rückstände (Schlacke und Kesselasche) (Literaturwerte)



			Referenz-Simulation *Aufteilung Schlacke/Rohgas vor Kessel*		Referenz-Simulation *Aufteilung Kesselasche/Rohgas nach Kessel*	
Element-Input	**Stoff-Output**	**Input [A] [g/kg$_{Input}$]**	**Schlacke [A1] [g/kg$_{Input}$]**	**Rohgas(v) [A – A1] [g/kg$_{Input}$]**	**Kesselasche [A2] [g/kg$_{Input}$]**	**Rohgas(n) [A – (A1+A2)] [g/kg$_{Input}$]**
C		1000	16	984	0,3	983,7
	CO_2		--	3603	--	--
H		1000	--	1000	--	--
O		1000	90	910	2	908
N		1000	10	990	--	990
S		1000	300	700	150	550
	SO_x als SO_2		--	120	--	--
Cl		1000	90	910	10	900
	Cl als HCl		--	10	--	--
P		1000	880	120	20	100
Br		1000	10	990	20	970
	Br als HBr		--	10	--	--
F		1000	430	570	100	470
	F als HF		--	11	--	--
H_2O		1000	--	1000	--	--
Si		1000	929	71	10	61
Ca		1000	929	71	20	51
Fe		1000	969	31	10	21
Na		1000	950	50	6	44
Al		1000	869	131	20	111
K		1000	750	250	30	220
Zn		1000	498	502	70	432
Pb		1000	499	501	110	391
Cu		1000	918	82	20	62
Cr		1000	829	171	10	161
Ni		1000	839	161	10	151
Cd		1000	120	880	70	810
Hg		1000	50	950	2	948
As		1000	550	450	30	420
Ba		1000	880	120	10	110
Co		1000	850	150	10	140
Mn		1000	860	140	10	130
Sb		1000	460	540	10	530
Se		1000	220	780	110	670
Sn		1000	620	380	15	365
V		1000	890	110	10	100

Tabelle C2-2: **Verteilung der Elemente auf Rohgas/Schlacke bei Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)**

			[SCHÄFL 1995]		[REIMANN (c) 1995]		Referenz-Simulation [ZIMMERMANN ET AL. 1996]	
	Element-Input	Stoff-Output [g/kg_{Input}]	Rohgas [g/kg]	Schlacke [g/kg]	Rohgas [g/kg]	Schlacke [g/kg]	Rohgas [g/kg]	Schlacke [g/kg]
Gasförmige Anteile	C						984	16
		CO_2					3603	
	H						1000	
	O						910	90
	N						990	10
	S		500	500			700	300
		SO_x als SO_2					120	
	Cl		850	150			910	90
		Cl als HCl					10	
	P						120	880
	Br						990	10
		Br als HBr					10	
	F		620	380			570	430
		F als HF					11	
	H_2O		1000		1000		1000	
Feste Anteile	Si						71	929
	Ca						71	929
	Fe						31	969
	Na						50	950
	Al						131	869
	K						250	750
	Zn		390	610	270	730	502	498
	Pb		290	710	330	670	501	499
	Cu		70	930			82	918
	Cr		60	940			171	829
	Ni		70	930			161	839
	Cd		770	230	900	100	880	120
	Hg		980	20	950	50	950	50
	As		750	250			450	550
	Ba						120	880
	Co						150	850
	Mn						140	860
	Sb						540	460
	Se						780	220
	Sn						380	620
	V						110	890

Tabelle C2-3: **Verteilung der Elemente auf Rohgas/Kesselasche bei Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)**

			Referenz-Simulation [ZIMMERMANN ET AL. 1996]	
	Element-Input	Stoff-Output [g/kg_{Input}]	Rohgas [g/kg]	Flugasche [g/kg]
Gasförmige Anteile	C	CO_2	983,7	0,3
	H			
	O		908	2
	N		990	--
	S	SO_x als SO_2	550	150
	Cl	Cl als HCl	900	10
	P		100	20
	Br	Br als HBr	970	20
	F	F als HF	470	100
	H_2O			
Feste Anteile	Si		61	10
	Ca		51	20
	Fe		21	10
	Na		44	6
	Al		111	20
	K		220	30
	Zn		432	70
	Pb		391	110
	Cu		62	20
	Cr		161	10
	Ni		151	10
	Cd		810	70
	Hg		948	2
	As		420	30
	Ba		110	10
	Co		140	10
	Mn		130	10
	Sb		530	10
	Se		670	110
	Sn		365	15
	V		100	10

Tabelle C3-1a: **Betriebsdaten des MHKW Darmstadt (Linie 1)**

			CLEAN I (Min. – Max.) *Mittelwert*	HU (Min. – Max.) *Mittelwert*	SAGA II (Min. – Max.) *Mittelwert*	Infrarot (Min. – Max.) *Mittelwert*	Final CLEAN (Min. – Max.) *Mittelwert*	Auslegung (Linie 1)	Referenz Simulation (Betriebsbereich) ***Erwartungswert***
Input	$Hu_{Müll}$	[kJ/kg]	-- --	8.900 - 15.300 *10.800*	9.180 - 11.800 *10.780*	-- --	-- --	-- *8.800*	**8.800 – 10.800** ***9.650***
	$m_{Müll}$	[Mg/h]	-- --	8,0 – 11,0 *10,1*	8,4 – 10,5 *10,1*	-- --	-- --	-- *11,0*	**10,1 – 11,0** ***11,0***
Verbrennungsanlage	$V°_{Gas\text{-}Brenner}$	[Nm³/h]	0 – 40 --	-- --	-- --	0 – 57 --	-- --	95 - 575 --	***nach Bedarf***
	$p_{Feuerraum}$	[mbar]	-- *- 0,8*	-1,5 – 0 *-1,0*	-1,5 – 0 --	-1,9 – 0 *-1,0*	-1,2 – 0,2 --	-- --	***-1,0***
	$V°_{Gesamtluft}$	[Nm³/h]	46.600 – 50.000 *48.500*	47.900 – 55.400 *51.300*	15.000 – 51.200 *37.400*	46.600 – 53.800 *51.200*	43.000 – 50.000 *47.000*	-- --	**37.400 – 51.300** ***48.800***
	$V°_{Primärluft}$	[Nm³/h]	25.800 –29.400 *28.300*	26.000 – 33.500 *29.450*	0 – 33.000 *17.950*	26.100 – 32.900 *30.500*	22.000 – 29.300 *26.950*	-- *38.000*	**17.950 – 38.000** ***27.660***
	$t_{Primärluft}$	[°C]	121 – 123 *122*	29 – 105 *80*	87 – 119 *99*	85 –88 *86*	93 – 97 *95*	0 – 125 *70*	**70 – 122** ***90***
	$V°_{Sekundärluft}$	[Nm³/h]	14.100 – 15.800 *15.100*	14.400 – 16.100 *14.600*	9.000 – 17.000 *13.900*	12.500 – 16.400 *14.200*	14.300 – 17.200 *16.200*	-- *18.600*	**13.900 – 18.600** ***14.740***
	$t_{RG\text{-}Stirn}$	[°C]	950 – 1.190 *1.021*	930 – 1.270 *1.064*	520 – 1.230 *860*	884 – 1.090 *972*	940 – 1.180 *1.011*	-- --	**860 – 1.064** ***1.050***
	$t_{RG\text{-}Nacken}$	[°C]	840 – 1.020 *940*	880 – 1.160 *966*	~477 --	849 – 979 *900*	-- --	-- --	**900 – 966** ***950***

Tabelle C3-1b: Betriebsdaten des MHKW Darmstadt (Linie 1)

			CLEAN I (Min. – Max.) *Mittelwert*	HU (Min. – Max.) *Mittelwert*	SAGA II (Min. – Max.) *Mittelwert*	Infrarot (Min. – Max.) *Mittelwert*	Final CLEAN (Min. – Max.) *Mittelwert*	Auslegung (Linie 1)	Referenz Simulation (Betriebsbereich) *Erwartungswert*
Energieerzeugung	$t_{RG\text{-}NBK/Kessel\ (1)}$	[°C]	660 - 723 *694*	750 - 840 *779*	635 – 803 *722*	726 – 791 *748*	747 – 787 *753*	-- --	**694 - 779** ***750***
	$t_{RG\text{-}NBK/Kessel\ (2)}$	[°C]	660 – 724 *694*	758 – 836 *785*	-- --	-- --	-- --	-- --	**694 – 785** ***750***
	$t_{RG\text{-}EndeKessel}$	[°C]	221 – 227 *224*	237 – 257 *248*	170 – 230 *203*	251 – 259 *256*	235 – 242 *238*	-- *260*	**203 – 260** ***220***
	$m°_{HD}$	[Mg/h]	24,0 – 31 *26,9*	23,5 – 32,1 *28,0*	15,0 – 31,5 *24,5*	25,3 – 30,9 28,1	25 – 30 *26,5*	-- *28,8*	**24,5 – 28,8** ***26,5***
	$CO_{Ende\text{-}Kessel}$	[mg/Nm³]	0,4 – 22,0 *5,5*	0 – 11,0 *1,0*	0 – 110,0 *6,6*	0 – 26,0 *5,0*	0 – 25,0 *3,5*	-- --	**1,0 – 6,6** ***5,0***
	$O_{2\text{-}Ende\text{-}Kessel}$	[Vol.-%]	7,0 – 13,0 *10,9*	8,5 – 12,5 *11,0*	8,0 – 15,0 *11,9*	8,3 – 12,4 *10,7*	8,0 – 11,4 *9,7*	-- --	**9,7 – 11,9** ***10,0***
	$p_{Ende\text{-}Kessel}$	[mbar]	- 0,8 --	-1,5 – 0 *-1,0*	-- --	- 0,7 – 0 --	0 – 0,04 --	-- --	**--** ***-1,5***
Rauchgasreinigungsanlage	$t_{RG\text{-}EndeSprühtrockner}$	[°C]	-- --	-- --	-- --	-- --	 *181*	 *160*	**160 ; 181** ***180***
	$p_{EndeSprühtrockner}$	[mbar]	-- --	-- --	-- --	-- --	 *- 22*		**--**
	$t_{RG\text{-}EndeElektrofilter}$	[°C]	-- --	-- --	-- --	-- --	 *182*	 *225*	**182 ; 225** ***210***
	$t_{RG\text{-}EndeQuencher}$	[°C]	-- --	-- --	-- --	-- --	 *62*	 *64*	**62 ; 64** ***63***
	$V°_{RG\text{-}EndeWäscher}$	[Nm³/h]	51.300 – 59.000 *54.000*	49.000 – 60.000 *54.600*	26.000 – 78.000 *55.700*	58.100 – 67.500 *63.500*	52.000 – 62.000 *57.600*	 *79.000*	**54.000 – 79.000** ***60.000***
	$t_{RG\text{-}EndeWäscher}$	[°C]	60 – 63 *62*	58 – 63 *61*	57 – 62 *60*	62 – 64 *63*	 *~60*	 *65*	**60 - 65** ***65***
	$t_{RG\text{-}DeNOx}$	[°C]	-- --	-- --	-- --	-- --	 *320*	 *320*	**--** ***320***
	$V°_{Luft\text{-}VorKamin}$	[Nm³/h]	-- --	-- --	-- --	-- --	 *15.700*		**--** ***15.700***
	$t_{RG\text{-}Kamin}$	[°C]	-- --	-- --	-- --	-- --	 *99*	 *101*	**99 ; 101** ***100***

Tabelle C4-1: Hilfsmittelverbräuche des MHKW´s Darmstadt (Vergleich mit Betriebswerten)

		Betriebswerte (Tab. C4-2a bis C4-2c) Min - Max	MHKW Darmstadt (1997)
Erdgas (**Brennraum**)	[kWh/Mg]		22,4
	[m³/h]		95 – 575
Erdgas (**DeNOx-Anlage**)	[kWh/Mg]		131,7
	[m³/h]		100 - 130
Ammoniakwasser (**SNCR**)	[kg/Mg]	4,1 – 18,8 (25%)	
Ammoniakwasser (**DeNOx-Anlage**)	[kg/Mg]	2,3 – 3,7 (25%)	0,47 (100%)
Speisewassermenge (**Kessel**)	[l/Mg]	1.360 – 5.180	
Einspritzwassermenge (**Kessel**)	[l/Mg]	57 – 545	
Wasseraufbereitung (**Kessel**)			
Helamin	[kg/Mg]		10
Salz (NaCl)	[kg/Mg]		0,47
Absorptionsmittel (**Sprühabsorber**) - Salzlösung: $Ca(OH)_2$ -	[m³/Mg]	0,1 – 0,4	
Zusatzwassermenge (**Sprühabsorber**)	[m³/Mg]	0,1 – 1,3	
Zusatzwasser (**Wäscher**)	[m³/Mg]		
Wasserverbrauch (**Gesamt**)	[m³/Mg]		0,97
Kreislaufwassermenge (**Wäscher**)	[m³/Mg]	5,6 – 47,7	
ausgeschleuste Menge (**Wäscher**)	[m³/Mg]	0,04 – 1,6	
Absorptions- , Neutralisationsmittel (**Wäscher**)			
CaO	[kg/Mg]	2,02 ; 14,4	3,3
$CaCO_3$	[kg/Mg]	11,4 ; 25	
$Ca(OH)_2$	[kg/Mg]	1,7 – 12,1	
NaOH	[kg/Mg]	1,35 - -5,8 (50%)	3,64 (100%)
HCl	[kg/Mg]	0,03 ; 0,7 (30%)	0,098 (100%)
Nalmet (Hg-Fällungsmittel)	[kg/Mg]		0,214
Additivmenge (**Gewebefilter**)			
Aktivkohle	[kg/Mg]	0,23 – 0,5	
Aktivkohle-Kalk-Gemisch	[kg/Mg]	(2,5)	
Herdofenkoks (HOK) + Kalkstein	[kg/Mg]	1,82 – 9,5	

Tabelle C4-2a: Hilfsmittelverbräuche bei Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

		Augsburg	Bamberg	Bonn	Burgkirchen	Coburg	Hamburg Borsigstraße	Hamburg II	Hamm	Heidelberg	
Erdgas (**Brennraum**) Erdgas (**DeNOx-Anlage**)	[kg/Mg] [kg/Mg]										
Ammoniakwasser (**SNCR**) Ammoniakwasser (**DeNOx-Anlage**)	[kg/Mg] [kg/Mg]			18,8 (25%)	2,3 (25%)		4,1 (25%)				
Speisewassermenge (**Kessel**)	[l/Mg]	2.950	3.300	2.800	3.430	3.640	3.930	2.110	2.450		
Einspritzwassermenge (**Kessel**)	[l/Mg]	200	--	170	200	450	251	137	212		
Wasseraufbereitung (**Kessel**)											
Helamin Salzsäure	[kg/Mg] [kg/Mg]										
Absorptionsmittel (**Sprühabsorber**) - Salzlösung; $Ca(OH)_2$ -	[m³/Mg]					0,17		0,14	0,1	0,2	
Zusatzwassermenge (**Sprühabsorber**)	[m³/Mg]						0,1				
Kreislaufwassermenge (**Wäscher**)	[m³/Mg]	19	25	10,4			47,7	10,5			
ausgeschleuste Menge (**Wäscher**)	[m³/Mg]	1,6	0,25	0,11 – 0,12	0,35	0,04	0,3	0,1			
Absorptions-, Neutralisationsmittel (**Wäscher**)											
CaO	[kg/Mg]			3,3						2,02	
$CaCO_3$	[kg/Mg]							25			
$Ca(OH)_2$	[kg/Mg]						1,7				
NaOH	[kg/Mg]	4,0 (25%)	4,2 (50%)	3,75 (50%)	8,0 (18%)	2,4 (30%)		4,74 (50%)		5,3 (45%)	
HCl	[kg/Mg]				0,7 (30%)						
Additivmenge (**Gewebefilter**)											
Aktivkohle	[kg/Mg]	0,32 – 0,36									
Aktivkohle-Kalk-Gemisch	[kg/Mg]			2,5							
Herdofenkoks (HOK) + Kalkstein	[kg/Mg]				9,5				8,0		

Tabelle folgt auf nächster Seite

Tabelle C4-2b: Hilfsmittelverbräuche bei Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

		Kiel	Landshut	Mannheim	Oberhausen	Pinneberg	Wuppertal	Basel	Bazenheid	Brügg - Biel	
Erdgas (**Brennraum**)	[kg/Mg]										
Erdgas (**DeNOx-Anlage**)	[kg/Mg]										
Ammoniakwasser (**SNCR**)	[kg/Mg]										
Ammoniakwasser (**DeNOx-Anlage**)	[kg/Mg]	2,4 (25%)			3,7 (25%)						
Speisewassermenge (**Kessel**)	[l/Mg]	2.630			1.820	2.820	2.920 – 3.330		1.360	5.000	
Einspritzwassermenge (**Kessel**)	[l/Mg]	57			545	--	420				
Wasseraufbereitung (**Kessel**)											
Helamin	[kg/Mg]										
Salzsäure	[kg/Mg]										
Absorptionsmittel (**Sprühabsorber**) - Salzlösung; $Ca(OH)_2$ -	[m³/Mg]		0,16	0,16		0,11	0,4				
Zusatzwassermenge (**Sprühabsorber**)	[m³/Mg]	0,57	1,3								
Kreislaufwassermenge (**Wäscher**)	[m³/Mg]	22,9	13,5		12,3	10,9	10	17,5	10,9	23,1	
ausgeschleuste Menge (**Wäscher**)	[m³/Mg]		0,7	0,1	0,11		0,27	0,4	0,05	0,52	
Absorptions-, Neutralisationsmittel (**Wäscher**)											
CaO	[kg/Mg]										
$CaCO_3$	[kg/Mg]	11,4									
$Ca(OH)_2$	[kg/Mg]			7		12,1					
NaOH	[kg/Mg]		4,3 (50%)				5,8 (50%)		2,7 (50%)	3,75 (50%)	
HCl	[kg/Mg]	0,03 (31%)									
Additivmenge (**Gewebefilter**)											
Aktivkohle	[kg/Mg]		0,5								
Aktivkohle-Kalk-Gemisch	[kg/Mg]										
Herdofenkoks (HOK) + Kalkstein	[kg/Mg]				1,82						

Tabelle folgt auf nächster Seite

Tabelle C4-2c: Hilfsmittelverbräuche bei Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

		Colombier	Limmatal	St Gallen	Winterthur	Zürich Hagenholz	Zürich Josefstr.	Wels	Wien	Betriebswerte Min - Max
Erdgas (**Brennraum**)	[kg/Mg]									
Erdgas (**DeNOx-Anlage**)	[kg/Mg]									
Ammoniakwasser (**SNCR**)	[kg/Mg]				12,8 (25%)					**4,1 – 18,8**
Ammoniakwasser (**DeNOx-Anlage**)	[kg/Mg]						2,86 (25%)	2,6 (25%)	2,96	**2,3 – 3,7**
Speisewassermenge (**Kessel**)	[l/Mg]	2.110	2.500	2.980	4.320 - 5.180			4.090		**1.360 – 5.180**
Einspritzwassermenge (**Kessel**)	[l/Mg]		300					150		**57 – 545**
Wasseraufbereitung (**Kessel**)										
Helamin	[kg/Mg]									
Salzsäure	[kg/Mg]									
Absorptionsmittel (**Sprühabsorber**) - Salzlösung; $Ca(OH)_2$ -	[m³/Mg]						0,29			**0,1 – 0,4**
Zusatzwassermenge (**Sprühabsorber**)	[m³/Mg]			0,23						**0,1 – 1,3**
Kreislaufwassermenge (**Wäscher**)	[m³/Mg]	8,3	6,1	9,6	20,8	5,6				**5,6 – 47,7**
ausgeschleuste Menge (**Wäscher**)	[m³/Mg]	0,2		0,23	0,23	0,09 – 0,12				**0,04 – 1,6**
Absorptions-, Neutralisationsmittel (**Wäscher**)										
CaO	[kg/Mg]							14,4		**2,02 ; 14,4**
$CaCO_3$	[kg/Mg]									**11,4 ; 25**
$Ca(OH)_2$	[kg/Mg]									**17 – 12,1**
NaOH	[kg/Mg]	2,3 (50%)	2,6 (50%)	1,35 (50%)	7,2 (30%)	3,35 (30%)		2,2	3,2	**1,35 - 5,8 (50%)**
HCl	[kg/Mg]									**0,03 ; 0,7**
Additivmenge (**Gewebefilter**)										
Aktivkohle	[kg/Mg]			0,23		0,38				**0,23 – 0,5**
Aktivkohle-Kalk-Gemisch	[kg/Mg]									**(2,5)**
Herdofenkoks (HOK) + Kalkstein	[kg/Mg]									**1,82 – 9,5**

Tabelle C5-1: Mengen der anfallenden Reststoffe bei Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

[kg/Mg_{Input}]	[Faulstich 1992]	[Lemann 1992]	[Thome-Kozmiensky 1994]	[Bielefeld 1994]	[Kassel 1994]	[Schäfl 1995]	[Zimmermann et al. 1996]	[Burgkirchen 1997]	Referenz Simulation (Erwartungsbereich)
Schlacke	250 – 350	300 – 350	250 – 350	245	350 – 380	200 – 300	220	193	**193 – 380**
Kesselasche	2 – 12		2 – 12				5	13	**2 – 13**
Entstaubungsrückstände (vorgeschalteter Entstaubungsapparat)	20 – 40	30 – 50	20 – 40	23,5		26	20	17	**17 – 50**
Reststoffe-Sprühtrockner (Reaktionsprodukte)		2 – 5	8 – 15	12		3 - 8,5	--	11,5	**2 –15**
Filterstaub und Reaktions-produkte	90 – 145	--	30 – 50 40 – 65 50 – 80		25	34,5	--	--	**25 – 145**
Ausgeschiedenes Abwasser (Wäscher)	5 – 25	--	5 – 15			9,5	5	14	**5 – 25**

Tabelle C6-1: Zusammensetzung der Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

[g/kg]	[BUWAL 1987]	[REIMANN 1990]	[FAULSTICH 1992]		[STEILEN ET AL. 1992]	[BU 1996]	[ZIMMERMANN ET AL. 1996]	Betriebswerte (Tab. C6-2a; Tab. C6-2b)	Referenz Simulation
	Einzelmess.	Mittelwert	Min - Max	Mittelwert	Min – Max	Min – Max		Min – Max	Erwartungsbereich
Silicium als SiO2	410		--	--	--	140 – 450			--
Silicium (Si)	--		142,5 – 320	200,1	360 – 460	--	200	129 – 292	**150 – 300**
Calcium (Ca)	110		33,2 – 134	76,8	25 – 100	30 – 140	120	50 – 130	**50 – 140**
Eisen (Fe)	46		37,1 – 86	59,6	40 – 230	20 – 110	100	22 – 120	**40 – 200**
Natrium (Na)	9		5 – 31,1	23,4	10 – 60	5 – 35	34	6,7	**10 – 60**
Magnesium (Mg)	7		3,9 – 18,2	9,4	6 – 18	3 – 20	16	6 – 45	**7 – 20**
Aluminium (Al)	46		4,6 – 92,8	54,3	80 – 180	10 – 80	50	24 – 76	**10 – 80**
Kalium (K)	5		2,9 – 21,4	9,6	5 – 20	3 – 20	12	2 – 40	**5 – 20**
Zink (Zn)	3	4,57	0,53 – 21	4,7	4 – 15	0,7 – 4,5	3	1,6 – 10,1	**2 – 7**
Blei (Pb)	0,9	1,01	0,33 – 5,2	2,0	1 – 17	0,3 – 4,0	2	0,23 – 6,2	**0,2 – 5**
Kupfer (Cu)	3	1,52	0,4 - 7	2,1	1 – 4	1,0 – 7,5	2,3	0,84 – 7,8	**2 – 5**
Chrom (Cr)	0,8	0,655	0,15 – 9,6	1,2	1 – 10	0,03 – 5,0	0,6	0,01 – 0,38	**0,2 – 3**
Nickel (Ni)	0,2	0,26	0,039 – 0,76	0,21	0,1 – 0,3	0,02 – 0,5	0,2	0,07 – 0,17	**0,2 – 0,5**
Cadmium (Cd)	< 0,1	0,0038	0,0001 – 0,079	0,021	0,01 – 0,03	0,001 – 0,04	0,01	0,0007 – 0,053	**0,001 – 0,03**
Quecksilber (Hg)	--	0,0007	0,00007 – 0,002	0,0007	0,0001 – 0,0007	--	0,001	0,0001 – 0,02	**0,0001 – 0,02**
Arsen (As)		0,0033					0,006	0,0007 – 0,03	**0,001 – 0,01**
Silber, Argentum (Ag)									--
Barium (Ba)	1						1,5		**1 ; 1,5**
Mangan (Mn)	1					0,5 – 1,5	0,6	1,5	**0,5 – 1,5**
Molybdän (Mo)							0,013		**(0,01)**
Antimon (Sb)									--
Selen (Se)									---
Zinn (Sn)	0,3		0,2 – 1,7	0,45	--	0,2 – 1,5	0,15		**0,1 – 0,3**
Vanadium (V)									--
Chlorid (Chlor) (Cl^-)	2,8	1,97	0,27 – 6,3	2,8	2 – 6	1,0 – 2,5	4	1 – 13	**1,5 – 5**
Phosphor (P)	--		3,46 – 33,7	13,7	7 – 14	--	2		**3 – 12**
Gesamt-Schwefel, als S	3		2 – 4,1	3,3	2 – 4	2 – 4	4,5	2 – 6,1	**2 – 4**
Sulfat, als S	2,2						3,5	10 – 30	**5 – 20**
Fluor (F)	--	0,215	0,02 – 1,1	0,31	--	--	0,5	0,001 – 1,1	**0,01 – 1**
Gesamt-Kohlenstoff, als C	33		5 – 50	28	7 – 15	5 – 30	20	1 – 30	**5 – 25**
Carbonat, als C	9,3								(9)
Sauerstoff (O)				508			426		--

Tabelle C6-2a: Zusammensetzung der Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

[g/kg]	Bamberg	Berlin Ruhleben	Düsseldorf	Hamburg II	Hamm	Heidelberg	Iserlohn	Kassel	Kempten	Landshut	Mannheim	
Silicium als SiO2	*350 – 450*				*620*				*430 – 590*			
Silicium (Si)		292					266					
Calcium (Ca)	*40 – 120*	85		82	120		62		50 – 90		79,1	
Eisen (Fe)	100 – 120	29		44	*210*	21,4	99		*49 – 202*		61,5	
Natrium (Na)											6,7	
Magnesium (Mg)	*10 – 30*	14,6			45		6		8 – 25		4,5	
Aluminium (Al)	*120 – 360*	38	< 35	49	*110*		30		*50 – 107*			
Kalium (K)	*5 – 20*	12,7			20		7		2 – 15		2,9	
Zink (Zn)		5,9								3,3	1,61	
Blei (Pb)		1,25		2,59						1,3	0,23	
Kupfer (Cu)		1,1		7,8						1,9	0,84	
Chrom (Cr)		0,01		0,38						0,36	0,11	
Nickel (Ni)		0,07								0,17	0,087	
Cadmium (Cd)	< 0,025	0,009	< 0,01		0,05	0,003	0,02	< 0,0005	< 0,006	0,022	0,0007	
Quecksilber (Hg)	< 0,0007	0,0004	< 0,0003	0,0003		0,0028	0,008	< 0,001	< 0,002	0,0002	0,0001	
Arsen (As)		0,0051		0,03						0,0007	0,006	
Silber, Argentum (Ag)												
Barium (Ba)												
Mangan (Mn)											1,5	
Molybdän (Mo)												
Antimon (Sb)												
Selen (Se)												
Zinn (Sn)												
Vanadium (V)												
Chlorid (Chlor) (Cl^-)	1 – 19	1,9	< 15		1,5		1,4	9,8	2,82 – 14,3		1,3	
Phosphor (P)												
Gesamt-Schwefel, als S												
Sulfat, als S	5 – 10	27	< 40		10		3,3	38	4,7 – 8,7		3,4	
Fluorid (Fluor) (F)		0,001 – 0,012					< 0,1	0,58				
Gesamt-Kohlenstoff, als C	15	15 – 21	< 30	13,2		26,7	24	10			1	
Carbonat, als C												
Sauerstoff (O)												

Tabelle folgt auf nächster Seite

* kursive Werte sind als Oxide angegeben

Tabelle C6-2b: Zusammensetzung der Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

[g/kg]	Nürnberg	Oberhausen	Weißenhorn	Wuppertal	Zirndorf	Basel	Buchs	Zürich Hagenholz	Zürich Josefstraße	Betriebswerte Min - Max
Silicium als SiO2				305						
Silicium (Si)	195				129	220 – 250		219	221	**129 – 292**
Calcium (Ca)	142	70		116	81,3	88 – 99		119	129	**50 – 130**
Eisen (Fe)	59	95		102	32,3	22 – 25	10,8	101	26,3	**22 – 120**
Natrium (Na)										**(6,7)**
Magnesium (Mg)	14,4	6		16	10,6	13 – 17		10,5	9,8	**6 – 45**
Aluminium (Al)	39,5	35	24	76,2	49,7	43 – 55	36,3	45,4	44,4	**24 – 76**
Kalium (K)	7,1	40		14,5	8,9			9,1	10,2	**2 – 40**
Zink (Zn)							10,1			**1,6 – 10,1**
Blei (Pb)							6,2			**0,23 – 6,2**
Kupfer (Cu)							3,3			**0,84 – 7,8**
Chrom (Cr)										**0,01 – 0,38**
Nickel (Ni)										**0,07 – 0,17**
Cadmium (Cd)	0,01	0,0024	0,01	0,025	0,016	< 0,01	0,053	0,01	0,007	**0,0007 – 0,053**
Quecksilber (Hg)	< 0,001	0,0001	0,0001	0,001	0,0007	< 0,02	0,0006	0,0002	0,0001	**0,0001 – 0,02**
Arsen (As)										**0,0007 – 0,03**
Silber, Argentum (Ag)										
Barium (Ba)										
Mangan (Mn)										**(1,5)**
Molybdän (Mo)										
Antimon (Sb)										
Selen (Se)										
Zinn (Sn)										
Vanadium (V)										
Chlorid (Chlor) (Cl^-)	5,5	12	2,86	3,6	13	2	10	2,63	5,16	**1 – 13**
Phosphor (P)										
Gesamt-Schwefel, als S						2 – 6		4,5	6,1	**2 – 6,1**
Sulfat, als S	61	8,2	14,4	12	29					**10 – 30**
Fluorid (Fluor) (F)	0,42	0,062	0,41	0,14	1,1			0,55	0,58	**0,001 – 1,1**
Gesamt-Kohlenstoff, als C		19,3				21 – 28	10	1,3	8,4	**1 – 30**
Carbonat, als C										
Sauerstoff (O)										

Tabelle C6-3: Zusammensetzung der Kesselaschen aus Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

[g/kg]	[TBF 1987]		[REIMANN 1990]		[FAULSTICH 1992]		[ZIMMERMANN ET AL. 1996]	Betriebswerte (Tab. C6-4)	Referenz Simulation
	Eco	ÜH	Min - Max	Mittelwert	Min – Max	Mittelwert		Min – Max	Erwartungsbereich
Silicium als SiO2	230	340			--	--			--
Silicium (Si)					103 – 168	140,6	110	110 – 420	100 – 250
Calcium (Ca)	66	110			27 – 117	77,4	100	66 – 200	70 – 200
Eisen (Fe)	100	29			25 – 46	33,9	40	7,5 – 67	15 – 65
Natrium (Na)	19	12			12 – 75	37,1	40		12 – 55
Magnesium (Mg)	11	17			12 – 30	16,5	15	8 – 23	10 – 25
Aluminium (Al)	41	90			64 – 95	77	50	33 – 140	50 – 120
Kalium (K)	30	24			19 – 78	36,4	40	18 – 50	20 – 50
Zink (Zn)	25	6	5,2 – 7,4	6,2	6,2 – 55	25,7	35	(1,6)	1 – 20
Blei (Pb)	30	2	2,15 – 2,95	2,44	2,4 – 54	12,8	10	0,1 – 9,5	2 – 10
Kupfer (Cu)	2	0,6	0,5 – 0,94	0,69	0,7 – 2	1,4	1,4	0,4 – 1	0,5 – 2
Chrom (Cr)	1	--	0,27 – 0,29	0,275	0,2 – 3,2	1	0,6	0,08 – 0,2	0,2 – 1
Nickel (Ni)			0,12 – 0,37	0,168	0,05 – 0,46	0,2	0,2	0,04 ; 0,08	0,05 – 0,3
Cadmium (Cd)	0,5	--	0,051 – 0,069	0,06	0,06 – 1	0,4	0,3	0,02 – 0,5	0,05 – 0,6
Quecksilber (Hg)	--	--	0,0009 – 0,0024	0,0014	0,0002 – 0,02	0,008	0,003	0,0003 – 0,035	0,0003 – 0,005
Arsen (As)								0,01 – 0,04	(0,02)
Silber, Argentum (Ag)									--
Barium (Ba)									--
Mangan (Mn)							0,8		(0,8)
Molybdän (Mo)									--
Antimon (Sb)									--
Selen (Se)									--
Zinn (Sn)	3	1			0,5 – 6,2	3	2		0,5 – 3
Vanadium (V)							14		(14)
Chlorid (Chlor) (Cl^-)			19 – 26	22,1	6 – 82	50,7	16	5 – 70	10 – 50
Phosphor (P)					0,2 – 30	10,4	5		4 – 12
Gesamt-Schwefel, als S	55	19			6 – 29,7	18	20	15 – 38	15 – 50
Sulfat, als S	160	58					60	4 – 160	50 – 120
Fluor (F)			0,045 – 0,062	0,053	0,03 – 12	2,4	0,5	0,15 – 14,5	0,05 – 12
Gesamt-Kohlenstoff, als C	8	35			1,6 – 42	15,1	20	6 – 46	10 – 30
Carbonat, als C	14	31							(22)
Sauerstoff (O)						440	500		--

Tabelle C6-4: Zusammensetzung der Kesselaschen aus Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

[g/kg]	Berlin Ruhleben	Bielefeld	Hamburg II	Hamm	Iserlohn	Kempten	Mann-heim	Ober-hausen	Offen-bach	Wuppertal	Basel	St. Gallen	Betriebswerte Min – Max
Silicium als SiO2													
Silicium (Si)	184	150		357	206	350 – 420			278	315	110 – 170		**110 – 420**
Calcium (Ca)	128	100		200	66	80 – 110		130	199	163,8	100 – 130	144 – 173	**66 – 200**
Eisen (Fe)	40,6	15		53	67,3	28 – 50	18,5	31	28	37,1	21 – 25	7,74	**7,5 – 67**
Natrium (Na)													
Magnesium (Mg)	13,8	8		23	11,3	8 – 11		12	21	21,8	11 – 13		**8 – 23**
Aluminium (Al)	35,4	37		130	70			55	140	120,7	60 – 71		**33 – 140**
Kalium (K)	28,4	53		25	34	10 – 50		44	18	47,7		46,2	**18 – 50**
Zink (Zn)	1,6												**(1,6)**
Blei (Pb)	0,11		1,4				9,5						**0,1 – 9,5**
Kupfer (Cu)	0,95		0,4				1						**0,4 – 1**
Chrom (Cr)	0,084		0,15				0,16						**0,08 – 0,2**
Nickel (Ni)	0,039						0,08						**0,04 ; 0,08**
Cadmium (Cd)	0,017	0,4	0,05	0,029	0,05	0,052 – 0,064	0,29	0,24		0,56	0,02 – 0,03	0,602	**0,02 – 0,6**
Quecksilber (Hg)	0,003	0,002	0,0003	0,0004	0,005	< 0,017		0,002		0,002	< 0,02	0,035	**0,0003 – 0,035**
Arsen (As)	0,012		0,01				0,04						**0,01 – 0,04**
Silber, Argentum (Ag)													
Barium (Ba)													
Mangan (Mn)													
Molybdän (Mo)													
Antimon (Sb)													
Selen (Se)													
Zinn (Sn)													
Vanadium (V)													
Chlorid (Chlor) (Cl^-)	19,8	45		24	64,6	5,1 – 9,4		62	73	50	6 – 69	51,8	**5 – 70**
Phosphor (P)													
Gesamt-Schwefel, als S											15 – 38		**15 – 38**
Sulfat, als S	53	160		59	26	3,5 – 44,5		63	53	68		43,4	**4 – 160**
Fluorid (Fluor) (F)	14,6	2,7			1,6			0,15		2,2		1,97	**0,15 – 14,5**
Gesamt-Kohlenstoff, als C	5,7		12	20	28		16	17			35 – 38	46	**6 – 46**
Carbonat, als C													
Sauerstoff (O)													

Tabelle C6-5: Zusammensetzung der Entstaubungsrückstände (Zyklon, E-Filter) aus Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

[g/kg]	[EAWAG 1987]	[KEBAG 1987]	[TBF 1987]	[REIMANN 1990]		[ZIMMERMANN ET AL. 1996]	Referenz Simulation
	Min – Max	Typ. Werte	Typ. Werte	Min – Max	Mittelwert		Erwartungsbereich
Silicium als SiO2	220 – 310	280	280				**250 – 300**
Silicium (Si)	--	--	--			150	**(150)**
Calcium (Ca)	62 – 93	84	130			60	**60 – 130**
Eisen (Fe)	25 - 52	25	27	28 – 33	30,5	30	**25 – 50**
Natrium (Na)	39 – 75	27	16			28	**20 – 50**
Magnesium (Mg)	12 – 30	12	18			24	**12 – 25**
Aluminium (Al)	66 – 85	68	75			80	**70 – 85**
Kalium (K)	19 – 78	44	18			30	**20 – 50**
Zink (Zn)	12 – 37	36	22	9 – 21,3	15,33	25	**15 – 35**
Blei (Pb)	4 – 16	12	7	4,14 – 6,34	5,25	7	**5 – 10**
Kupfer (Cu)	1 – 2	1,7	1	0,74 – 1,53	1,11	1,5	**1 – 2**
Chrom (Cr)	0,3 – 2,0	1,0	1	0,15 – 0,28	0,21	0,7	**0,5 – 2,0**
Nickel (Ni)	0,2 – 0,7	0,3	--	0,07 – 0,3	0,14	0,2	**0,1 – 0,5**
Cadmium (Cd)	0,3 – 0,7	0,4	0,3	0,1 – 0,49	0,33	0,4	**0,1 – 0,5**
Quecksilber (Hg)	0,008 – 0,02	--	0,025	0,001 – 0,019	0,004	0,02	**0,005 – 0,02**
Arsen (As)						0,03	**(0,03)**
Silber, Argentum (Ag)				0,03 – 0,05	0,04		**(0,04)**
Barium (Ba)						0,4	**(0,4)**
Mangan (Mn)		1,6				0,8	**0,8 ; 1,6**
Molybdän (Mo)						0,2	**(0,2)**
Antimon (Sb)				0,29 – 1,05	0,67	0,8	**0,5 – 0,9**
Selen (Se)				0,017	0,017	0,013	**0,013 ; 0,017**
Zinn (Sn)	2,9 – 6,2	1,6	5			1	**2 – 5**
Vanadium (V)						0,04	**(0,04)**
Chlorid (Chlor) (Cl^-)	44 – 83	82	45	17,57 – 43	40,2	50	**40 – 75**
Phosphor (P)	--	--	--			6	**(6)**
Gesamt-Schwefel, als S	25 – 48	48	23			26	**25 – 40**
Sulfat, als S	6 – 89	47	77	20,9 – 94	42,8	60	**40 – 75**
Fluor (Fluorid) (F^-)	--	--	--	0,06 – 0,31	0,18	2	**0,2 – 1,5**
Gesamt-Kohlenstoff, als C	22 – 39	23	21			20	**20 – 25**
Carbonat, als C	--	1,6	15				**1,6 ; 15**
Sauerstoff (O)						450	**--**

Tabelle C6-6: Zusammensetzung der Reaktionsprodukte (Flugstaubsalzgemisch) aus Hausmüllverbrennungsanlagen (Literaturwerte)

[g/kg]	[BUWAL 1987]	[REIMANN 1990]		[ZIMMERMANN ET AL. 1996]	Betriebswerte (Tab. C6-7)	Referenz Simulation
	Typ. Werte	Min - Max	Mittelwert		Min - Max	Erwartungsbereich
Silicium als SiO2	--				--	--
Silicium (Si)	--			13,5	2 – 24	**10 – 20**
Calcium (Ca)	260			284	139 – 526	**200 – 350**
Eisen (Fe)	33	31	31	17	0,5 – 17	**15 – 30**
Natrium (Na)	4			15	(4,2)	**4 – 10**
Magnesium (Mg)	7			14	1,4 – 13	**5 – 13**
Aluminium (Al)	4			10	0,4 – 14,4	**4 – 12**
Kalium (K)	2			31	2,9 – 20	**3 – 25**
Zink (Zn)	8	5,08 – 8,8	6,4	9,6	(2,4)	**5 – 9**
Blei (Pb)	3	2,02 – 3,49	2,79	3	0,73 ; 4,3	**1 – 4**
Kupfer (Cu)	0,3	0,32 – 0,45	0,385	1	0,06 ; 0,7	**0,3 – 0,7**
Chrom (Cr)	--	0,104 – 0,332	0,186		0,01 ; 0,18	**0,01 – 0,2**
Nickel (Ni)	--	0,43 – 1,65	0,835		(0,013)	**0,02 – 0,8**
Cadmium (Cd)	0,1	0,14 – 0,36	0,17	0,5	0,006 – 0,56	**0,05 – 0,5**
Quecksilber (Hg)	1	1,32 – 2,975	1,9	1	0,001 – 0,06	**0,05 – 1,5**
Arsen (As)				0,03	0,005 ; 0,023	**0,01 – 0,03**
Silber, Argentum (Ag)		0,009	0,009		(0,005)	**0,005 ; 0,009**
Barium (Ba)				0,5		**(0,5)**
Mangan (Mn)	1				(0,46)	**0,46 ; 1**
Molybdän (Mo)				0,02		**(0,02)**
Antimon (Sb)		0,73	0,73			**(0,73)**
Selen (Se)		0,12	0,12		(0,009)	**0,01 ; 0,12**
Zinn (Sn)	2			1	(0,11)	**0,5 – 2**
Vanadium (V)						*(14)*
Chlorid (Chlor) (Cl^-)	5	156 – 174	166	10	91 – 510	**75 – 250**
Phosphor (P)	0,4					**(0,4)**
Gesamt-Schwefel, als S	80			80		**(80)**
Sulfat, als S	76	2,59 – 5,55	4,1	150	8,4 – 150	**10 – 125**
Fluor (F)	--				0,35 – 4,4	**0,35 – 4,4**
Gesamt-Kohlenstoff, als C	52			150	5 – 27	**10 – 100**
Carbonat, als C	45					**(45)**
Sauerstoff (O)	--					

Tabelle C6-7: Zusammensetzung der Reaktionsprodukte (Flugstaubsalzgemisch) aus Hausmüllverbrennungsanlagen [THOME-KOZMIENSKY 1994]

[g/kg]	Bielefeld	Düsseldorf	Hamburg II	Hamm	Heidelberg	Landshut	Mannheim	Nürnberg	Weißen-horn	Wuppertal	St. Gallen	Betriebswerte Min - Max
Silicium als SiO2										1		
Silicium (Si)	2			24			4,2	20				**2 – 24**
Calcium (Ca)	260	300		350	301	170	139	320	350	526		**139 – 526**
Eisen (Fe)	0,5	6,8		17		0,7	2,4	6	7	5,4	4,5	**0,5 – 17**
Natrium (Na)							4,2					**(4,2)**
Magnesium (Mg)	2	6,5		13	2,32	2,3	9,1	5,6		1,4	4,6	**1,4 – 13**
Aluminium (Al)	1			4,5		0,41	1,9	9	13	0,994	14,4	**0,4 – 14,4**
Kalium (K)	7			20			2,9	6,4		5,5		**2,9 – 20**
Zink (Zn)							2,4					**(2,4)**
Blei (Pb)			4,3				0,73					**0,73 ; 4,3**
Kupfer (Cu)			0,73				0,063					**0,06 ; 0,7**
Chrom (Cr)			0,18				< 0,01					**0,01 ; 0,18**
Nickel (Ni)							0,013					**(0,013)**
Cadmium (Cd)	0,075	0,13	0,29	0,23	0,035	0,006	0,033	0,06	0,24	0,018	0,56	**0,006 – 0,56**
Quecksilber (Hg)	0,06		0,018	0,022	0,022	0,048	0,098	0,04	0,012	0,001	< 0,035	**0,001 – 0,06**
Arsen (As)			0,023				0,005					**0,005 ; 0,023**
Silber, Argentum (Ag)							< 0,005					**(0,005)**
Barium (Ba)												
Mangan (Mn)							0,46					**(0,46)**
Molybdän (Mo)												
Antimon (Sb)												
Selen (Se)							0,009					**(0,009)**
Zinn (Sn)							0,11					**(0,11)**
Vanadium (V)												
Chlorid (Chlor) (Cl^-)	500	91		120	457	510	354	182	164	170	323	**91 – 510**
Phosphor (P)												
Gesamt-Schwefel, als S												
Sulfat, als S	140	58		150	55	8,4	121	28	15	12	16,8	**8,4 – 150**
Fluorid (Fluor) (F)	1,5				2,7	4,4	3,6	3,2	2,4	0,74	0,35	**0,35 – 4,4**
Gesamt-Kohlenstoff, als C			27	5					11		10,5	**5 – 27**
Carbonat, als C												
Sauerstoff (O)												

Tabelle C7-1a: **Emissionsdaten des MHKW Darmstadt (Rohgasdaten) während der SAGA Meßkampagnen [JAGER ET AL. 1998; JAGER, HERR 1996]**

			SAGA I (1995) (Min. – Max.) *Mittelwert*					SAGA II (1996) (Min. – Max.) *Mittelwert*			Referenz Simulation (Erwartungsbereich)
			1	2	3	4	5	1	2	3	
Gasförmige Emissionen im Rohgas	H_2O_{Rohgas}	[Vol.-%]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	$O_{2\text{-}Rohgas,\ tr.}$	[Vol.-%]	10,4 – 11,9 *11,2*	9,7 – 10,8 *10,2*	10,0 – 11,0 *10,5*	9,1 – 11,8 *10,7*	10,4 – 11,8 *11,3*	10,6 – 11,2 *10,8*	11,0 – 14,4 *12,4*	10,8 – 12,2 *11,4*	**10,2 – 12,4**
	$CO_{2\text{-}Rohgas,\ tr.}$	[Vol.-%]	7,9 – 9,3 *8,6*	8,8 – 9,7 *9,3*	8,9 – 9,8 *9,3*	8,4 – 10,6 *9,2*	7,5 – 9,2 *8,3*	7,8 – 10,2 *9,3*	4,9 – 8,6 *6,9*	8,3 – 9,5 *8,9*	**6,9 – 9,3**
	$CO_{Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	9 – 31 *16*	7 – 13 *10*	10 – 18 *14*	8 – 20 *15*	7 – 44 *13*	3 – 11 *6,8*	5 – 28 *11,9*	3 – 9 *5,4*	**5,4 – 16**
	$NO_{x\text{-}Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	343 – 411 *369*	376 – 416 *395*	351 – 403 *380*	339 – 441 *379*	202 – 340 *286*	409 – 488 *453*	118 – 388 *253*	302 – 411 *366*	**253 – 453**
	$SO_{2\text{-}Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	383 – 600 *467*	419 – 538 *465*	397 – 526 *463*	434 – 628 *520*	194 – 414 *319*	330 – 439 *384*	1 – 171 *68*	83 – 202 *138*	**68 – 520**
	$TOC_{Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	1,6 – 3,6 *2,3*	0,8 – 3,5 *1,5*	1,5 – 2,4 *1,9*	0,7 – 1,8 *1,1*	0,7 – 1,3 *1,0*	1,1 – 1,9 *1,5*	1,2 – 2,2 *1,8*	1,0 – 2,1 *1,4*	**1,0 – 2,3**
	$HCl_{Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	650 ; 1629 --	279 ; 801 --	321 ; 557 --	847 ; 914 --	890 ; 965 --	950 ; 520 --	168 ; 608 --	693 ; 780 --	**168 – 1.629**
	$HF_{Rohgas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	7,2 ; 14,7 --	0,5 ; 9,9 --	9,3 ; 10,9 --	17,4 ; 18,7 --	17,7 ; 18,1 --	10,1 ; 11,7 --	1,5 ; 5,9 --	5,8 ; 6,2 --	**0,5 – 18,7**
	(I-TEQ) $PCDD/F_{Rohgas,\ tr.}$	[ng/Nm³]	2,3 --	2,88 --	3,31 --	3,93 --	3,68 --	-- --	-- --	-- --	**3,2**
	$Staub_{Rohgas,\ tr.}$	[g/m³]	3,2 ; 5,2 --	1,8 ; 3,4 --	4,9 ; 7,7 --	0,8 ; 1,5 --	1,0 , 4,5 --	1,47 ; 1,55 --	0,77 ; 0,86 --	0,84 ; 1,91 --	**0,77 – 7,7**
	Σ (Cd + Tl)	[mg/Nm³]	0,74 ; 0,92 --	0,97 ; 1,44 --	0,78 ; 1,93 --	0,83 ; 1,13 --	0,90 ; 1,54 --	-- --	-- --	-- --	**0,74 – 1,93**
	Σ Hg	[mg/Nm³]	0,26 ; 0,32 --	0,26 ; 0,31 --	0,11 ; 0,20 --	0,20 ; 0,21 --	0,08 ; 0,08 --	-- --	-- --	-- --	**0,08 – 0,32**
	Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	[mg/Nm³]	35 ; 51,6 --	26,7 ; 27,9 --	28,4 ; 52,6 --	26,6 ; 28,5 --	28,5 ; 42 --	-- --	-- --	-- --	**26,6 – 52,6**

Tabelle C7-1b: Emissionsdaten des MHKW Darmstadt (Rohgasdaten) während der SAGA Meßkampagnen [JAGER ET AL. 1998; JAGER, HERR 1996]

			SAGA I (1995) (Min. – Max.) *Mittelwert*					SAGA II (1996) (Min. – Max.) *Mittelwert*			Referenz Simulation (Erwartungsbereich)
			1	2	3	4	5	1	2	3	
Metalle und Halbmetalle im Rohgas	$Pb_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	15.357 ; 24.375 --	20.051 ; 20.075 --	19.427 ; 35.145 --	20.678 ; 22.792 --	20.705 ; 30.997 --	6.562 ; 8.007 --	2.219 ; 3.545 --	6.342 ; 6.802 --	**2.219 – 35.145**
	$Cu_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	17.013 ; 24.298 --	3.304 ; 3.635 --	3.945 ; 7.876 --	2.925 ; 3.493 --	3.052 ; 5.232 --	-- --	-- --	-- --	**2.925 – 24.298**
	$Cr_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	585 ; 1.047 --	377 ; 676 --	1.082 ; 1.921 --	98 ; 339 --	349 ; 1.013 --	86,2 ; 79,1 --	48,4 ; 73,4 --	64,3 ; 185 --	**48,4 – 1.921**
	$Ni_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	461 ; 569 --	110 ; 174 --	278 ; 759 --	6 ; 68 --	62 ; 277 --	30,7 ; 38,3 --	21,5 ; 26,8 --	18,5 ; 19,5 --	**6 - 759**
	$Cd_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	729 ; 905 --	962 ; 1.425 --	765 ; 1.912 --	816 ; 1.114 --	887 ; 1.524 --	288 ; 403 --	158 ; 161 --	199 ; 218 --	**158 – 1.912**
	$Tl_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	16 ; 19 --	11 ; 11 --	13 ; 16 --	10 ; 11 --	10 ; 13 --	-- --	-- --	-- --	**10 – 19**
	$Hg_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	265 ; 317 --	263 ; 312 --	107 ; 205 --	195 ; 206 --	75 ; 81 --	200 ; 1.301 --	70,2 ; 105 --	244 ; 299 --	**70,2 – 1.301**
	$As_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	141 ; 153 --	114 ; 126 --	109 ; 276 --	83 ; 133 --	98 ; 184 --	22,7 ; 28,4 --	10,6 ; 11 --	32,6 ; 33,3 --	**10,6 – 276**
	$Mn_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	152 ; 176 --	77 ; 104 --	2.189 ; 3.166 --	18 ; 69 --	46 ; 167 --	-- --	-- --	-- --	**18 – 3.166**
	$Co_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	26 ; 46 --	18 ; 31 --	55 ; 111 --	4 ; 14 --	8 ; 42 --	-- --	-- --	-- --	**4 – 111**
	$Sb_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	474 ; 703 --	2.185 ; 2.318 --	425 ; 1.202 --	1.768 ; 1.951 --	2.920 ; 3.669 --	-- --	-- --	-- --	**425 – 3.669**
	$Sn_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	254 ; 435 --	267 ; 716 --	556 ; 1.561 --	281 ; 400 --	446 ; 967 --	-- --	-- --	-- --	**254 - 1.561**
	$V_{Rohgas, tr.}$	[µg/Nm³]	121 ; 207 --	28 ; 194 --	331 ; 560 --	26 ; 28 --	24 ; 179 --	-- --	-- --	-- --	**24 - 560**

Tabelle C7-2a: Emissionsdaten des MHKW Darmstadt (Reingasdaten) während der SAGA Meßkampagnen [JAGER ET AL. 1998; JAGER, HERR 1996]

			SAGA I (1995) (Min. – Max.) *Mittelwert*					SAGA II (1996) (Min. – Max.) *Mittelwert*			Referenz Simulation (Betriebsbereich) *Erwartungswert*
			1	2	3	4	5	1	2	3	
Gasförmige Emissionen im Reingas	$H_2O_{Reingas, tr.}$	[Vol.-%]	--	--	--	--	--	--	--	--	
	$O_{2\text{-}Reingas, tr.}$	[Vol.-%]	10,6 – 13,4 *11,9*	9,8 – 12,3 *10,9*	1,04 – 12,5 *11,2*	9,4 – 12,3 *11,3*	9,5 – 12,9 *11,5*	--	--	--	**10,9 – 11,5**
	$CO_{2\text{-}Reingas, tr.}$	[Vol.-%]	--	--	--	--	--	--	--	--	
	$CO_{Reingas, tr.}$	[mg/Nm³]	4,3 – 58,7 *15,8*	5,8 – 16 *10,2*	6,7 – 19,8 *12,8*	3,9 – 25,9 *13,4*	0,27 – 114 *16,6*	--	--	--	**10,2 – 16,6**
	$NO_{x\text{-}Reingas, tr.}$	[mg/Nm³]	--	--	--	--	--	106 – 283 *165*	54 – 247 *140*	58 – 247 *156*	**73 – 259**
	$SO_{2\text{-}Reingas, tr.}$	[mg/Nm³]	6,3 – 40,9 *13,8*	7,1 – 81,8 *15,2*	4,5 – 203 *17,0*	3,17 – 78,7 *13,5*	1,74 – 78,1 *11,0*	1,9 – 77,8 *37,7*	7,2 – 163 *47,1*	8 – 32,3 *20,8*	**5,0 – 94,4**
	$HCl_{Reingas, tr.}$	[mg/Nm³]	2,1 ; 2,7 --	2,3 ; 2,9 --	2,1 --	2,0 ; 2,2 --	2,4 ; 2,5 --	--	--	--	**2,0 – 2,9**
	$HF_{Reingas, tr.}$	[mg/Nm³]	< 0,4 ; < 0,5 --	< 0,4 --	< 0,4 --	< 0,3 ; < 0,4 --	< 0,4 ; < 0,5 --	--	--	--	**0,3 – 0,5**
	(I-TEQ) $PCDD/F_{Reingas, tr.}$	[ng/Nm³]	-- --	-- --	-- 1,41	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	***1,41***
	$Staub_{Reingas, tr.}$	[mg/Nm³]	1,7 – 6,4 *3,7*	2,5 – 8 *4,6*	2,7 – 9,8 *6,3*	1,7 – 6,2 *3,7*	1,4 – 4,9 *3,0*	1,9 – 3,7 *2,7*	0,9 – 3,3 *1,6*	2,3 – 8,3 *5,0*	**0,9 – 9,8**
	Σ (Cd + Tl)	[mg/Nm³]	0,003 ; 0,004 --	0,004 --	0,005 --	0,004 ; 0,005 --	0,004 ; 0,005 --	-- --	-- --	-- --	**0,003 – 0,005**
	Σ Hg	[mg/Nm³]	0,015 ; 0,022 --	0,021 ; 0,048 --	0,053 --	0,037 ; 0,040 --	0,010 ; 0,021 --	-- --	-- --	-- --	**0,010 – 0,053**
	Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	[mg/Nm³]	0,042 ; 0,054 --	0,044 ; 0,045 --	0,119 --	0,059 ; 0,080 --	0,059 ; 0,089 --	-- --	-- --	-- --	**0,044 – 0,119**

Tabelle C7-2b: Emissionsdaten des MHKW Darmstadt (Reingasdaten) während der SAGA Meßkampagnen [JAGER ET AL. 1998; JAGER, HERR 1996]

			SAGA I (1995) (Min. – Max.) *Mittelwert*					SAGA II (1996) (Min. – Max.) *Mittelwert*			Referenz Simulation (Betriebsbereich) *Erwartungswert*
			1	2	3	4	5	1	2	3	
Metalle und Halbmetalle im Reingas	$C_{ges\text{-}Reingas,\ tr.}$	[mg/Nm³]	0,7 – 1,5 *1,0*	0,6 – 0,9 *0,7*	0,7 – 1,5 *1,0*	0 – 1,1 *0,6*	0,2 – 0,9 *0,3*	0,43 – 0,54 *0,48*	0,44 – 0,67 *0,54*	0,36 – 0,52 *0,47*	**0,43 – 0,95**
	$Pb_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	5,9 ; 8,3 --	6,3 ; 6,8 --	48,9 --	15,6 ; 36 --	21,5 ; 27 --	-- --	-- --	-- --	**5,9 – 48,9**
	$Cu_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	11,3 ; 8,6 --	4,9 ; 11,2 --	17,7 --	10,2 ; 19,4 --	7,7 ; 15,4 --	-- --	-- --	-- --	**4,9 – 19,4**
	$Cr_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	3,8 ; 6,9 --	5,5 ; 7,4 --	8,2 --	5,0 ; 7,0 --	6,5 ; 8,0 --	-- --	-- --	-- --	**3,8 – 8,2**
	$Ni_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	3,8 ; 4,3 --	3,9 ; 4,4 --	4,2 --	3,2 ; 4,4 --	4,1 ; 5,3 --	-- --	-- --	-- --	**3,2 – 5,3**
	$Cd_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	0,4 ; 0,5 --	0,4 ; 0,6 --	1,9 --	1,1 ; 1,3 --	0,8 ; 1,2 --	-- --	-- --	-- --	**0,4 – 1,9**
	$Ti_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	3,0 ; 3,4 --	3,1 ; 3,4 --	3,3 --	2,6 ; 3,5 --	3,3 ; 4,2 --	-- --	-- --	-- --	**2,6 – 4,2**
	$Hg_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	14,9 ; 21,7 --	21 ; 47,7 --	53 --	36,5 ; 39,7 --	9,9 ; 21,5 --	-- --	-- --	-- --	**9,9 – 53**
	$As_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	0,8 ; 0,9 --	0,8 ; 0,9 --	0,9 --	0,7 ; 0,9 --	0,8 ; 1,1 --	-- --	-- --	-- --	**0,7 – 1,1**
	$Mn_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	3,3 ; 4,4 --	1,1 ; 1,7 --	21,4 --	2,6 ; 3,0 --	1,3 ; 10,1 --	-- --	-- --	-- --	**1,1 – 21,4**
	$Co_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	0,8 ; 0,9 --	0,8 ; 0,9 --	0,9 --	0,7 ; 0,9 --	0,8 ; 1,1 --	-- --	-- --	-- --	**0,7 – 1,1**
	$Sb_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	3,8 ; 4,3 --	3,9 ; 4,4 --	4,2 --	3,2 ; 4,4 --	4,1 ; 5,3 --	-- --	-- --	-- --	**3,2 – 5,3**
	$Sn_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	3,8 ; 4,3 --	3,9 ; 4,4 --	4,2 --	3,2 ; 4,4 --	4,1 ; 5,3 --	-- --	-- --	-- --	**3,2 – 5,3**
	$V_{Reingas,\ tr.}$	[µg/Nm³]	7,6 ; 8,6 --	7,7 ; 8,7 --	8,3 --	6,4 ; 8,7 --	8,1 ; 10,5 --	-- --	-- --	-- --	**6,4 – 10,5**

Tabelle C8-1: Abscheidegrade der für die Simulation relevanten Schadstoffe (Literaturwerte)

	Abscheidegrade [%]								
	[PFEIFFER 1983]	[MARNET ET AL. 1983]	[BORN, SCHÖTTLER 1986]	[KRISTENSEN ET AL. 1993]	[THOME-KOZMIENSKY 1994]	[THOME-KOZMIENSKY 1994]	[SCHÄFL 1995]	*MHKW Darmstadt (berechnet)*	Referenz Simulation (Erwartungswert)
Gesamtstaub	--	95,2	> 99	95 – 99	--	--	66,7	***99,8***	**> 95**
SO_x (SO_2)	--	--	50 – 82	70 – 90	--	95 – 97	95	***94,4***	**> 80**
HCl	--	85 – 93	94 – 98	97 – 99	--	97 – 98	99,3	***99,7***	**> 95**
HF	--	--	--	98 – 99	--	> 95	95	***96,2***	**> 95**
NO_x (NO_2)	--	--	> 66	--	90	10 – 15	--	***57,2***	**> 60**
Σ (Cd + Tl)	70	96 – 98	--	92 – 96	--	97 – 99	--	***99,6***	**> 94**
Σ Hg	77 – 89		--		82 – 86	50 – 60	--	***85,5***	**> 80**
Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	50		--			97 – 99	--	***99,8***	**> 95**
PCDD/PCDF	--	--	--	--	--	--	60	***56,3 (ohne DeNOx)*** ***99,4 (mit DeNOx)***	-- **> 90**

Anhang D

D1 Basisdaten und Einheitspreise der Jahreskostenschätzung

D2 Vergleichsdaten zur Validierung des Kostenmodells

D3 Investitionskostenschätzung des MHKW Darmstadt

Investitionskostenschätzung der Shredder-Verbrennungsanlage als dezentrale Anlage und als HYBRID-Anlage

Jahreskostenschätzung des MHKW Darmstadt

Jahreskostenschätzung der Shredder-Verbrennungsanlage als dezentrale Anlage

Jahreskostenschätzung der Shredder-Verbrennungsanlage als HYBRID-Anlage

D4 Prozentuale Verteilung der Investitionskosten sowie der Kosten für maschinentechnische Anlagen für das MHKW Darmstadt und die Shredder-Verbrennungsanlage

Tabelle D1-1: Basisdaten und Einheitspreise der Jahreskostenschätzung

	Einheit	[UBA 1998]	[ECOTEC (a) 1999]	[RIEMANN, SONNENSCHEIN 1998]	*Referenz Simulation*
Jährliche Investitionskosten					
Zinssatz	[%]	7	4	7	***7***
Abschreibungsdauer Herrichten und Erschließen	[a]	25	--	15	***25***
Abschreibungsdauer Baukonstruktion	[a]	25	--		***25***
Abschreibungsdauer maschinentechnische Anlagen	[a]	15	20		***15***
Abschreibungsdauer elektro- und leittechnische Anlagen	[a]	15			***15***
Abschreibungsdauer Honorare und Gebühren	[a]	17	--		***17***
Abschreibungsdauer Vorfinanzierung	[a]	17	--		***17***
Durchsatzunabhängige Betriebskosten					
Prozentsatz Reparatur, Wartung u. Unterhaltung Baukonstruktion	[%] Invest. Baukonstruktion	1	3,5	5	***1***
Prozentsatz Reparatur, Wartung u. Unterhaltung maschinentechnische Anlagen	[%] Invest. maschinentech. Anlagen	4			***4***
Prozentsatz Reparatur, Wartung u. Unterhaltung elektro- und leittechnische Anlagen	[%] Invest. elektro- und leittech. Anlagen	2,5			***2,5***
Prozentsatz Steuern und Versicherungen	[%] der Gesamtinvestition	1	--	1,5	***1***
Prozentsatz Allgemeine Verwaltung / Betrieb	[%] der Personalkosten	10	2,65	5	***10***
Prozentsatz Sonstige Hilfs- und Betriebsmittel	[%] der Instandhaltungskosten	5	--		***--***
Sonstige Hilfs- und Betriebsstoffe					
Brennstoff Stützbrenner / Notstromaggregat (Gas)	[DM/l]	0,40	0,55	--	***0,40***
Brennstoff Stützbrenner / Notstromaggregat (Heizöl)	[DM/kg]	0,55	0,55	--	***0,55***
Personalkosten	[DM/Pers./a]	70.000,00	--	80.000,00	***80.000,00***

Tabelle D1-2: Basisdaten und Einheitspreise der Jahreskostenschätzung

	Einheit	[UBA 1998]	[ECOTEC (a) 1999]	[RIEMANN, SONNENSCHEIN 1998]	*Referenz Simulation*
Durchsatzabhängige Betriebskosten					
Hilfs- und Betriebsstoffe (insgesamt)	[DM/Mg_{Abfall}]	--	--	3,00	--
Betriebswasser {PROZESSWASSER}	[DM/m³]	0,30	7,00	5,00	***5,00***
Brennstoff DeNOx-Anlage {ERDGAS}	[DM/m³]	0,40	--	--	***0,40***
Stickstoff	[DM/m³]	0,20	--	--	***0,20***
Druckluft	[DM/m³]	--	0,03	--	***0,03***
Externe Stromvorhaltung/-bezug					
Anschlußleistung	[DM/kW]	--	--	250,00	***250,00***
Stromvorhaltung	[DM/kWh]	--	--	0,20	***0,20***
Öl- und Schmierstoffe	[DM/t]	--	550,00	--	***550,00***
Regenerierchemikalien Ionentauscher	[DM/t]	--	380,00	--	***380,00***
NaOH (100%-ige Lösung)	[DM/t]	--	--	--	***400,00***
NaOH (50%-ige Lösung)	[DM/t]	--	400,00	--	***400,00***
$NaHCO_3$	[DM/t]	--	420,00	--	***420,00***
Kalk, gebrannt (CaO)	[DM/t]	155,00	--	--	***155,00***
Kalk, gelöscht ($Ca(OH)_2$)	[DM/t]	155,00	--	--	***155,00***
Ammoniakwasser (NH_3 bezogen auf 100%-ige Lösung)	[DM/t]	--	--	--	***270,00***
Ammoniakwasser (25%-ig)	[DM/t]	190,00	270,00	--	***270,00***
Adsorbens (90% $Ca(OH)_2$, 10% Aktivkohle) / Sorbalit	[DM/t]	320,00	350,00	--	***350,00***
Aktivkohle {AKTIVKOKS}	[DM/t]	2.200,00	300,00	--	***300,00***
Salzsäure	[DM/t]	--	--	--	***290,00***
Salz (NaCl)	[DM/t]	--	--	--	***290,00***
Nalmet (Hg-Fällmittel)	[DM/t]	--	--	--	***290,00***
Helamin (Kesselwasserkonditionierung)	[DM/t]	--	--	--	***290,00***
Chemikalien (Mischpreis)	[DM/t]	--	--	290,00	--

Tabelle D1-3: Basisdaten und Einheitspreise der Jahreskostenschätzung

	Einheit	[UBA 1998]	[ECOTEC (a) 1999]	[RIEMANN, SONNENSCHEIN 1998]	*Referenz Simulation*
Entsorgung/Verwertung					
Entsorgung Schlacke (für 50.000 Mg/a - Anlage)	[DM/t]	161,00	50,00	40,00	***50,00***
Entsorgung Schlacke (für 100.000 Mg/a - Anlage)	[DM/t]	105,00	--	--	--
Entsorgung Schlacke (für 200.000; 300.000; 600.000 Mg/a - Anlage)	[DM/t]	55,00	--	--	--
Verwertung aufbereitete Schlacke	[DM/t]	10,00	--	--	--
Entsorgung der Inertstoffe	[DM/t]	161,00	--	--	***160,00***
Entsorgung der Kesselstäube / Flugasche	[DM/t]	500,00	400,00	--	***400,00***
Entsorgung der Filterstäube und Reaktionsprodukt	[DM/t]	500,00	300,00	--	***300,00***
Entsorgung des Eindampfrückstandes	[DM/t]	--	560,00	--	***560,00***
Entsorgung von HCl (30 -31%)	[DM/t]	--	50,00	--	***50,00***
Entsorgung von Gips	[DM/t]	--	30,00	--	***30,00***
Entsorgung RGR-Reststoffe	[DM/t]	--	--	200,00	--
Erlöse					
Elektrische Energie	[DM/MWh]	90,00	180,00	60,00	***60,00***
Dampf	[DM/t]	--	30,00	--	***30,00***
Fe-Metalle	[DM/t]	10,00	--	--	***10,00***
NE-Metalle	[DM/t]	500,00	--	--	***500,00***
Salzsäure (33%-ig)	[DM/t]	30,00	--	--	***30,00***
Gips ($CaSO_4 \times 2\ H_2O$)	[DM/t]	--	--	--	--

Tabelle D2-1: **Vergleichsdaten zur Validierung des Kostenmodells (Literaturdaten)**

Quelle	Art der Rauchgasreinigung	*Anlagenleistung* [Mg/a]	*Anlageninvestition* [Mio. DM]	*Spezifische* Investitionskosten [DM.a/Mg_{Abfall}]	*Spezifische* Behandlungskosten [DM/Mg_{Abfall}]	Betriebsnotwendiges Personal	Flächenbedarf [m^2]
[*TECHFORM* 1998]	trocken	15.000	15,8	1.053,0	156,0	6	--
[RIEMANN, SONNENSCHEIN 1998]	trocken	25.000	28,0	1.120,0	353,0	33	--
[KLEIN 1997] - VB		30.000	93,0	3.100,0		62	18.000
[KLEIN 1997] - VE		30.000	63,0	2.100,0		31	11.000
[KLEIN 1997] - VM		30.000	70,0	2.333,0		13	15.000
[Kannheiser 1998]	trocken	27.000 – 35.000	--	--	351,0 – 281,0	--	--
[Kannheiser 1998]	trocken	33.000 – 41.000	--	--	306,0 – 243,0	--	--
[Kannheiser 1998]	trocken	38.000 – 48.000	--	--	277,0 – 219,0	--	--
[RIEMANN 1998]	trocken	50.000	47,0	940,0	265,0	35	--
[UBA 1998]	trocken	50.000	104,0	2.078,0	408,0	47	14.000
[UBA 1998]	trocken-naß	50.000	113,0	2.267,0	449,0	53	18.000

Tabelle D2-2: Vergleichsdaten zur Validierung des Kostenmodells (Literaturdaten)

Quelle	Art der Rauchgasreinigung	Anlagenleistung [Mg/a]	AnlagenInvestition [Mio. DM]	Spezifische Investitionskosten [DM.a/Mg_{Abfall}]	Spezifische Behandlungskosten [DM/Mg_{Abfall}]	Betriebsnotwendiges Personal	Flächenbedarf [m^2]
[RIEMANN, SONNENSCHEIN 1998]	trocken	100.000	87,0	870,0	226,0	42	--
[UBA 1998]	trocken	100.000	134,0	1.340,0	245,0	47	18.000
[UBA 1998]	trocken-naß	100.000	149,0	1.48,0	274,0	53	21.000
[KLEIN 1997] - VB	--	135.000	170,0	1.259,0		62	21.000
[KLEIN 1997] - VE	--	135.000	132,0	978,0		31	27.000
[KLEIN 1997] - VM	--	135.000	135,0	1.000,0		22	23.000
[KLEIN 1997] - VN	--	135.000	120,0	890,0	161,0	--	--
[Uba 1998]	trocken	200.000	213,0	1.064,0	179,0	66	21.000
[Uba 1998]	trocken-naß	200.000	238,0	1.192,0	205,0	80	24.000
[KLEIN 1997] - VB	--	250.000	245,0	980,0		68	27.000
[KLEIN 1997] - VE	--	250.000	188,0	752,0		46	32.000
[KLEIN 1997] - VM	--	250.000	175,0	700,0		36	26.000
[KLEIN 1997] - VN	--	250.000	182,0	728,0	118,6	--	--
[KLEIN 1997] - VS	--	250.000	243,0	972,0		70	22.000
[UBA 1998]	trocken	300.000	265,0	883,0	144,0	66	25.000
[UBA 1998]	trocken-naß	300.000	300,0	1.001,0	167,0	80	28.000
[UBA 1998]	trocken	600.000	416,0	694,0	110,0	80	33.000
[UBA 1998]	trocken-naß	600.000	472,0	787,0	127,0	103	38.000

Hausmüllverbrennungsanlage (Rostfeuerung) - MHKW Darmstadt -

Allgemeine technische Daten

Anzahl der Verbrennungslinien	3
Durchsatz je Linie	7,3 Mg/h (im Mittel)
Gesamt Kapazität	165.000 Mg/a
Verfügbarkeit	7.500 h/a
Feuerungswärmeleistung	19,66 MW
Heizwert Müll	9.650 kJ/kg

Investitionskostenschätzung in DM* (Kostenbasis: 1998)
(Angaben gerundet)

Kostengruppen			Hausmüllverbr.-Anlage [DM*]
1	Grundstück		2.100.000
2	Herrichten und Erschließen		700.000
	2.1	**Her- und Einrichten**	**280.000**
	2.2	**Öffentliche Erschließung**	**420.000**
3	Baukonstruktion		56.845.000
	3.1	**Gründung und Schwerbau (incl. Ausbau)**	**43.220.000**
	3.1.1	Anlieferungshalle	220.000
	3.1.2	Müll- und Schlackebunker	14.000.000
	3.1.3	Dampferzeugergebäude	4.500.000
	3.1.4	Maschinen- und Elektrogebäudeteil	4.900.000
	3.1.5	Luftkondensationsanlage	760.000
	3.1.6	Abgasreinigungsgebäude	10.360.000
	3.1.7	Reststoffgebäude	580.000
	3.1.8	Verwaltungs- und Sozialgebäude, Werkstatt etc.	7.900.000
	3.2	**Leichtbau (incl. Ausbau)**	**13.625.000**
	3.2.1	Anlieferungshalle	2.050.000
	3.2.2	Müll- und Schlackebunker	-
	3.2.3	Dampferzeugergebäude	6.250.000
	3.2.4	Maschinen- und Elektrogebäudeteil	-
	3.2.5	Luftkondensationsanlage	105.000
	3.2.6	Abgasreinigungsgebäude	4.600.000
	3.2.7	Reststoffgebäude	270.000
	3.2.8	Verwaltungs- und Sozialgebäude, Werkstatt etc.	350.000
4	Technische Anlagen		264.810.000
	4.1	**Maschinentechnische Anlagen**	**234.900.000**
	4.1.1	Waagen	200.000
	4.1.2	Vorbehandlung	-
	4.1.3	Krananlagen und Hebezeuge	4.400.000
	4.1.4	Therm. Behandlungssystem u. Dampferzeuger	75.000.000
	4.1.5	Abgasreinigungssystem	105.500.000
	4.1.6	Turbogenerator	10.000.000
	4.1.7	Kondensationsanlage	9.500.000
	4.1.8	Wasser-Dampf-Kreislauf	12.000.000
	4.1.9	Kühlkreislauf	2.000.000
	4.1.10	Druckluftversorgung	800.000
	4.1.11	Werkstatteinrichtungen	2.000.000
	4.1.12	Laboreinrichtungen	600.000
	4.1.13	Aufzuganlagen	1.000.000
	4.1.14	Heizungs-, Klima- und Lüftungsanlagen	6.200.000
	4.1.15	Feuerlöschanlagen	2.000.000
	4.1.16	Wasseranlagen	2.400.000
	4.1.17	Abwasseranlagen	1.300.000
	4.2	**Elektrotechnische Anlagen**	**16.230.000**
	4.2.1	Schaltanlage (MS-/NS-Anlage, USV-Verteilung)	5.200.000
	4.2.2	Verkabelung	5.800.000
	4.2.3	Transformatoren	580.000
	4.2.4	Blindstromkompensation	160.000
	4.2.5	Ersatznetzaggregat	970.000
	4.2.6	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	470.000
	4.2.7	Beleuchtung und Steckdoseninstallation	3.050.000
	4.3	**Leittechnische Anlagen**	**13.680.000**
	4.3.1	Automatisierungssystem	9.900.000
	4.3.2	Zentrale Leitwarte	1.830.000
	4.3.3	Fernmelde- und informationstechnische Anlagen	1.950.000
5	Außenanlagen		4.510.000
	5.1	**Geländeflächen**	**180.000**
	5.2	**Befestigte Flächen**	**980.000**
	5.3	**Baukonstruktionen in Außenanlagen**	**2.300.000**
	5.4	**Technische Anlagen in Außenanlagen**	**1.050.000**
6	Baunebenkosten		40.900.000
	6.1	**Honorare und Gebühren**	**18.200.000**
	6.2	**Finanzierung**	**22.700.000**
7	Zusatzinvestitionen		-
	7.1	**Bereich Rauchgasreinigung**	**-**
	7.1.1	Rauchgaskanäle (Verbindungsstrecke)	-
	7.1.2	Mischstrecke	-
	7.1.3	Regel- und Absperrarmaturen	-
	7.2	**Bereich Meß- und Regelungstechnik**	**-**
8	**Investitionssumme**		**369.865.000**
	8.1	**Investitionssumme ohne Grundstück**	**367.765.000**
	8.2	**Investition bezogen auf Jahreskapazität (DM.a/Mg)**	**2.242**

* Schätzpreise sind Nettopreise (ohne MWSt.)

Shredder-Verbrennungsanlage (Rostfeuerung)

Allgemeine technische Daten

Anzahl der Verbrennungslinien	1	
Durchsatz je Linie	1,4	Mg/h
Gesamt Kapazität	10.500	Mg/a
Verfügbarkeit	7.500	h/a
Feuerungswärmeleistung	6,03	MW
Heizwert Shredder	15.500	kJ/kg

Investitionskostenschätzung in DM* (Kostenbasis: 1998)
(Angaben gerundet)

Kostengruppen	Dezentrale Anlage [DM*]	HYBRID-Anlage [DM*]
1 Grundstück	600.000	-
2 Herrichten und Erschließen	150.000	-
2.1 Her- und Einrichten	30.000	-
2.2 Öffentliche Erschließung	120.000	-
3 Baukonstruktion	2.055.000	892.000
3.1 Gründung und Schwerbau (incl. Ausbau)	1.505.000	556.000
3.1.1 Anlieferungshalle	**16.000**	**16.000**
3.1.2 Müll- und Schlackebunker	**200.000**	**-**
3.1.3 Dampferzeugergebäude	**350.000**	**350.000**
3.1.4 Maschinen- und Elektrogebäudeteil	**300.000**	**150.000**
3.1.5 Luftkondensationsanlage	**40.000**	**40.000**
3.1.6 Abgasreinigungsgebäude	**54.000**	**-**
3.1.7 Reststoffgebäude	**25.000**	**-**
3.1.8 Verwaltungs- und Sozialgebäude, Werkstatt etc.	**520.000**	**-**
3.2 Leichtbau (incl. Ausbau)	550.000	336.000
3.2.1 Anlieferungshalle	**110.000**	**50.000**
3.2.2 Müll- und Schlackebunker		
3.2.3 Dampferzeugergebäude	**280.000**	**280.000**
3.2.4 Maschinen- und Elektrogebäudeteil		
3.2.5 Luftkondensationsanlage	**6.000**	**6.000**
3.2.6 Abgasreinigungsgebäude	**70.000**	**-**
3.2.7 Reststoffgebäude	**30.000**	**-**
3.2.8 Verwaltungs- und Sozialgebäude, Werkstatt etc.	**54.000**	**-**
4 Technische Anlagen	13.142.000	8.106.000
4.1 Maschinentechnische Anlagen	10.137.000	6.854.000
4.1.1 Waagen	**35.000**	**-**
4.1.2 Vorbehandlung	-	-
4.1.2.1 Zerkleinerung	-	-
4.1.2.2 Magnetscheidung	-	-
4.1.2.3 Trogenkettenförderer	-	-
4.1.3 Krananlagen und Hebezeuge	**85.000**	**25.000**
4.1.4 Therm. Behandlungssystem u. Dampferzeuger	**4.549.000**	**4.357.000**
4.1.4.1 Beschickung	*497.000*	*497.000*
4.1.4.1.1 Abladestation (Schubbodenaustragung mit Kratzkettenförderer)	300.000	300.000
4.1.4.1.2 Dosierbunker , Dosiereinrichtung, Transportschnecke	110.000	110.000
4.1.4.1.3 Förderband, Schrägfördereinrichtung	40.000	40.000
4.1.4.1.4 Staubdichte Kapselung	10.000	10.000
4.1.4.1.5 Silo-Additive	37.000	37.000
4.1.4.2 Verbrennungsteil	*1.189.000*	*1.189.000*
4.1.4.2.1 Brennstoffaufgabevorrichtung	65.000	65.000
4.1.4.2.2 Brennkammer (wassergekühlter Vorschubrost mit hydr. Rostantrieb Stahlgerüst und Stahlblechverkleidung)	730.000	730.000
4.1.4.2.3 Aschetrichter (Sammelsystem)	20.000	20.000
4.1.4.2.4 Bühnen und Treppen	70.000	70.000
4.1.4.2.5 Verbrennungsluftleinrichtung	140.000	140.000
4.1.4.2.6 Isolierung des Heißluftteils	34.000	34.000
4.1.4.2.7 Ausmauerung	85.000	85.000
4.1.4.2.8 Zünd- und Stützbrenner	45.000	45.000
4.1.4.3 Kesselteil	*2.575.000*	*2.575.000*
4.1.4.3.1 Dreizug-Wasserrohrkessel	1.550.000	1.550.000
4.1.4.3.2 Aschelaufstutzen	45.000	45.000
4.1.4.3.3 Economizer	820.000	820.000
4.1.4.3.4 Kesselwasseraufbereitungsanlage	160.000	160.000
4.1.4.4 Reststoffsystem	*288.000*	*96.000*
4.1.4.4.1 Austrag / Lagerung Rostschlacke (Naßentschlacker, Kratzkette, Transportband, Schlackelager mit Verteilervorrichtung)	180.000	80.000
4.1.4.4.2 Kesselentaschung (Förder- und Sammelstrecke, pneumatischer Schubsender)	34.000	16.000
4.1.4.4.3 Silo Flugasche	37.000	-
4.1.4.4.4 Silo Staub-/Salzgemisch	37.000	-

		Dezentrale Anlage [DM*]	HYBRID-Anlage [DM*]
4.1.5	**Abgasreinigungssystem**	**2.045.000**	**250.000**
	4.1.5.1 SNCR-Anlage (Ammoniakeindüseeinrichtung, Dosierstation, Ammoniakwasserlager, Rohrleitungen, SNCR-Wasservorlagepumpstation)	*250.000*	*250.000*
	4.1.5.2 Sprühabsorbtion	*1.080.000*	-
	4.1.5.2.1 Rauchgaskanäle	75.000	-
	4.1.5.2.2 Sprühabsorber	940.000	-
	4.1.5.2.3 Isolierung des Rauchgasteils	65.000	-
	4.1.5.3 Entstaubung	*630.000*	-
	4.1.5.3.1 Rauchgaskanäle	75.000	-
	4.1.5.3.2 Gewebefilter	420.000	-
	4.1.5.3.3 Rauchgasrückführung	75.000	-
	4.1.5.3.4 Isolierung des Rauchgasteils	60.000	-
	4.1.5.4 Saugzuggebläse	*85.000*	-
4.1.6	**Turbogenerator**	**978.000**	**942.000**
	4.1.6.1 mehrstufige Kondensationsturbine incl. Generator	*942.000*	*942.000*
	4.1.6.2 Turbinenbypass	*36.000*	-
4.1.7	**Kondensationsanlage**	**610.000**	**610.000**
	4.1.7.1 Luftgekühlter Kondensator	*450.000*	*450.000*
	4.1.7.2 Kondensatbehälter	*85.000*	*85.000*
	4.1.7.3 Hochdrucksammelschiene	*35.000*	*35.000*
	4.1.7.4 Rohrleitungen	*40.000*	*40.000*
4.1.8	**Wasser-Dampf-Kreislauf**	**850.000**	**425.000**
4.1.9	**Kühlkreislauf**	**140.000**	**70.000**
4.1.10	**Druckluftversorgung**	**40.000**	-
4.1.11	**Werkstatteinrichtungen**	**90.000**	-
4.1.12	**Laboreinrichtungen**	**65.000**	-
4.1.13	**Aufzuganlagen**	**110.000**	**45.000**
4.1.14	**Heizungs-, Klima- und Lüftungsanlagen**	**320.000**	**40.000**
4.1.15	**Feuerlöschanlagen**	**35.000**	**15.000**
4.1.16	**Wasseranlagen**	**130.000**	**50.000**
4.1.17	**Abwasseranlagen**	**55.000**	**25.000**
4.2	Elektrotechnische Anlagen	1.370.000	412.000
4.2.1	**Schaltanlage (MS-/NS-Anlage, USV-Verteilung)**	**680.000**	**120.000**
4.2.2	**Verkabelung**	**320.000**	**200.000**
4.2.3	**Transformatoren**	**34.000**	**12.000**
4.2.4	**Blindstromkompensation**	-	-
4.2.5	**Ersatznetzaggregat**	**42.000**	-
4.2.6	**Unterbrechungsfreie Stromversorgung**	**14.000**	-
4.2.7	**Beleuchtung und Steckdoseninstallation**	**280.000**	**80.000**
4.3	Leittechnische Anlagen	1.635.000	840.000
4.3.1	**Automatisierungssystem**	**1.250.000**	**750.000**
4.3.2	**Zentrale Leitwarte**	**260.000**	**70.000**
4.3.3	**Fernmelde- und informationstechnische Anlagen**	**125.000**	**20.000**
5	Außenanlagen	354.000	20.000
5.1	Geländeflächen	24.000	-
5.2	Befestigte Flächen	120.000	20.000
5.3	Baukonstruktionen in Außenanlagen	150.000	-
5.4	Technische Anlagen in Außenanlagen	60.000	-
6	Baunebenkosten	2.225.000	1.925.000
6.1	Honorare und Gebühren	1.025.000	925.000
6.2	Finanzierung	1.200.000	1.000.000
7	Zusatzinvestitionen	-	590.000
7.1	Bereich Rauchgasreinigung	-	440.000
7.1.1	**Rauchgaskanäle (Verbindungsstrecke)**	-	**160.000**
7.1.2	**Mischstrecke**	-	**230.000**
7.1.3	**Regel- und Absperrarmaturen**	-	**50.000**
7.2	Bereich Meß- und Regelungstechnik	-	150.000
8	**Investitionssumme**	**18.526.000**	**11.533.000**
8.1	**Investitionssumme ohne Grundstück**	**17.926.000**	**11.533.000**
8.2	**Investition bezogen auf Jahreskapazität (DM.a/Mg)**	**1.764**	**1.098**

* Schätzpreise sind Nettopreise (ohne MWSt.)

Jahreskostenschätzung der Hausmüllverbrennungsanlage (Rostfeuerung)

Allgemeine technische Daten

Anzahl der Verbrennungslinien	3	
Durchsatz je Linie	7,3	Mg/h (im Mittel)
Gesamtdurchsatz	**165.000**	**Mg/a**
Verfügbarkeit	7.500	h/a
Feuerungswärmeleistung	19,66	MW
Heizwert Müll	9.650	kJ/kg

Kostengruppen

		Investitionen [DM]	Abschreibungs-dauer [a]	Zinssatz [%]	Investitionen [DM/a]	Spez. Kosten [DM/Mg]
1	Investitionskosten					
1.1	Grundstück	2.100.000,00	-	7%	147.000,00	0,89
1.2	Herrichten und Erschließen	700.000,00	25	7%	60.067,36	0,36
1.3	Baukonstruktion	56.845.000,00	25	7%	4.877.898,85	29,56
1.4	Maschinentechnische Anlagen	234.900.000,00*	15	7%	25.790.757,34	156,31
1.5	Elektro- und leittechnische Anlagen	29.910.000,00	15	7%	3.283.957,22	19,90
1.6	Außenanlagen	4.510.000,00	25	7%	387.005,43	2,35
1.7	Honorare und Gebühren	18.200.000,00	17	7%	1.864.138,51	11,30
1.8	Vorfinanzierung	22.700.000,00	17	7%	2.325.051,88	14,09
1.9	**Gesamtanlage**	**369.865.000,00**			**38.735.876,61**	**234,76**

		Investitionen Bezug [DM]	Prozentsatz [%]		Betriebskosten [DM/a]	Spez. Kosten [DM/Mg]
2	Betriebskosten					
2.1	Durchsatzunabhängige Betriebskosten					
2.1.1	Reparatur, Wartung und Unterhaltung					
2.1.1.1	*Baukonstruktion*	*62.055.000,00*	*1%*		*620.550,00*	*3,76*
2.1.1.2	*Maschinentechnische Anlagen*	*234.900.000,00*	*4%*		*9.396.000,00*	*56,95*
2.1.1.3	*Elektro- und leittechnische Anlagen*	*29.910.000,00*	*2,5%*		*747.750,00*	*4,53*
2.1.2	Steuern und Versicherungen	328.965.000,00	1%		3.289.650,00	19,94
2.1.3	Allgemeine Verwaltung	5.600.000,00	10%		560.000,00	3,39
2.1.4	Sonstige Hilfs- und Betriebsstoffe					

		Betriebs-stunden	Stündlicher Verbrauch	Jährlicher Verbrauch	[DM/Einheit]		
2.1.4.1	*Brennstoff Stützbrenner (m³)(ERDGAS)*	*460*	*495,00*	*227.700,00*	*0,40*	*91.080,00*	*0,55*
2.1.4.2	*Brennstoff Stützbrenner (kg)*	*0*	-	-	*0,55*	-	-
2.1.4.2	*Brennstoff Notstromaggregat (l)*	*0*	*600,00*	-	*0,55*	-	-
2.1.5	Personalkosten			Anzahl	DM/Person		
				42	80.000,00	3.360.000,00	20,36
	Summe durchsatzunabhängige Betriebskosten					**18.065.030,00**	**109,49**
2.2	Durchsatzabhängige Betriebskosten		[m³/Mg Abfall]	[m³/a]	[DM/m³]		
2.2.1	Betriebswasser {PROZESSWASSER}		0,972	160.380,00	5,00	801.900,00	4,86
2.2.2	Brennstoff DeNOx-Anlage {ERDGAS}		11,65	1.922.250,00	0,40	768.900,00	4,66
2.2.3	Stickstoff		-	-	0,20	-	-
2.2.4	Druckluft (Nm³)						
2.2.4.1	*Eindüsung SNCR*		-	-	*0,03*	-	-
2.2.4.2	*Abgaskonditionierung*		-	-	*0,03*	-	-
2.2.5	externe Stromvorhaltung/-bezug (400 h/a)		[kW/Mg Abfall]	[kW/a]	[DM/kW]		
2.2.5.1	*Anschlußleistung*		0,0185	3.052,50	250,00	763.125,00	4,63
			[kWh/Mg Abfall]	[kWh/a]	[DM/kWh]		
2.2.5.2	*Stromvorhaltung*		0,20	33.000,00	0,20	6.600,00	0,04

			[kg/Mg Abfall]	[Mg/a]	[DM/Mg]		-
2.2.6	Öl- und Schmierstoffe		0,350	57,75	550,00	31.762,50	0,19
2.2.7	Regenerierchemikalien Ionentauscher		2,800	462,00	380,00	175.560,00	1,06
2.2.8	NaOH (100%-ige Lösung)		3,641	600,77	400,00	240.306,00	1,46
2.2.9	NaOH (50%-ige Lösung)		-	-	400,00	-	-
2.2.10	NaHCO3		-	-	420,00	-	-
2.2.11	Kalk, gebrannt (CaO)		3,263	538,40	155,00	83.451,23	0,51
2.2.12	Kalk, gelöscht (Ca(OH)2)		-	-	155,00	-	-
2.2.13	Ammoniak (NH3 bezogen auf 100%-ige Lösung)		0,473	78,05	270,00	21.072,15	0,13
2.2.14	Ammoniakwasser (25 %-ig)		-	-	270,00	-	-
2.2.15	Adsorbens (90% Ca(OH)2. 10% Aktivkohle) (SORBALIT)		-	-	350,00	-	-
2.2.16	Aktivkohle (AKTIVKOKS)		-	-	300,00	-	-
2.2.17	Salzsäure		0,098	16,17	290,00	4.689,30	0,03
2.2.18	Salz (NaCl)		0,468	77,22	290,00	22.393,80	0,14
2.2.19	Nalmet (Hg-Fällmittel)		0,214	35,31	290,00	10.239,90	0,06
2.2.20	Helamin (Kesselwasserkonditionierung)		0,011	1,82	290,00	526,35	0,0032
2.2.21	Reststoffentsorgung		[kg/Mg Abfall]	[Mg/a]			
	2.2.21.1	*Entsorgung der Schlacke*	*402,60*	*66.429,00*	*50,00*	*3.321.450,00*	*20,13*
	2.2.21.2	*Entsorgung der Inertstoffe*	-	-	*160,00*	-	-
	2.2.21.3	*Entsorgung der Kesselstäube (FLUGASCHE)*	*4,80*	*792,00*	*400,00*	*316.800,00*	*1,92*
	2.2.21.4	*Entsorgung der Filterstaube und Reaktionsprodukte*	*30,70*	*5.065,50*	*300,00*	*1.519.650,00*	*9,21*
	2.2.21.5	*Entsorgung des Eindampfrückstandes*	-	-	*560,00*	-	-
	2.2.21.6	*Entsorgung von HCL (30 - 31%)*	-	-	*50,00*	-	-
	2.2.21.7	*Entsorgung von Gips*	-	-	*30,00*	-	-
	Summe durchsatzabhängige Betriebskosten					**8.088.426,23**	**49,02**

2.3	**Summe Betriebskosten**				**26.153.456,23**	**158,51**

		Menge [MWh/Mg Abfall]	[MWh/a]	[DM/MWh]	Jährliche Erlöse [DM/a]	Spez. Erlöse [DM/Mg]
3 Erlöse						
3.1	Energieerlöse					
3.1.1	el. Energie	0,35	57.750,00	60,00	3.465.000,00	21,00
		[Mg/Mg Dampf]	[Mg Dampf/a]	[DM/Mg]		
3.2.1	Dampferzeugung	-	-	30,00	-	-
3.2	Wertstofferlöse	[kg/Mg Abfall]	[Mg/a]	[DM/Mg]		
3.2.1	Fe-Metalle			10,00		
3.2.2	NE-Metalle			500,00		
3.2.3	Salzsäure (33 %ig)			30,00		
3.2.4	Gips (CaSO4 x 2 H2O)			-		
3.3	**Gesamterlöse**				**3.465.000,00**	**21,00**

4 Jahreskosten			
4.1	Jahreskosten mit Erlösen [DM/a]	**61.424.332,83**	
4.2	Jahreskosten ohne Erlöse [DM/a]	**64.889.332,83**	
5 Spezifische Kosten			
5.1	Spezifische Kosten mit Erlösen [DM/Mg]		**372,27**
5.2	Spezifische Kosten ohne Erlöse [DM/Mg]		**393,27**

*** Schätzpreise sind Nettopreise (ohne MWSt.)**

Jahreskostenschätzung der dezentralen Shredder-Verbrennungsanlage (Rostfeuerung)

Allgemeine technische Daten

Anzahl der Verbrennungslinien	1	
Durchsatz je Linie	1,4	Mg/h
Gesamt Kapazität	10.500	Mg/a
Verfügbarkeit	7.500	h/a
Feuerungswärmeleistung	6,03	MW
Heizwert Shredder	15.500	kJ/kg

Kostengruppen

		Investitionen [DM]	Abschreibungs-dauer [a]	Zinssatz [%]	Investitionen [DM/a]	Spez. Kosten [DM/Mg]
1	Investitionskosten					
1.1	Grundstück	600.000,00	-	7%	42.000,00	4,00
1.2	Herrichten und Erschließen	150.000,00	25	7%	12.871,58	1,23
1.3	Baukonstruktion	2.055.000,00	25	7%	176.340,61	16,79
1.4	Maschinentechnische Anlagen	10.137.000,00	15	7%	1.112.988,11	106,00
1.5	Elektro- und leittechnische Anlagen	3.005.000,00	15	7%	329.932,85	31,42
1.6	Außenanlagen	354.000,00	25	7%	30.376,92	2,89
1.7	Honorare und Gebühren	1.025.000,00	17	7%	104.985,82	10,00
1.8	Vorfinanzierung	1.200.000,00	17	7%	122.910,23	11,71
1.9	**Gesamtanlage**	**18.526.000,00**			**1.932.406,13**	**184,04**

		Investitionen Bezug [DM]	Prozentsatz [%]		Betriebskosten [DM/a]	Spez. Kosten [DM/Mg]
2	Betriebskosten					
2.1	Durchsatzunabhängige Betriebskosten					
2.1.1	Reparatur, Wartung und Unterhaltung					
2.1.1.1	*Baukonstruktion*	*2.559.000,00*	*1%*		*25.590,00*	*2,44*
2.1.1.2	*Maschinentechnische Anlagen*	*10.137.000,00*	*4%*		*405.480,00*	*38,62*
2.1.1.3	*Elektro- und leittechnische Anlagen*	*3.005.000,00*	*2,5%*		*75.125,00*	*7,15*
2.1.2	Steuern und Versicherungen	16.301.000,00	1%		163.010,00	15,52
2.1.3	Allgemeine Verwaltung	650.000,00	10%		65.000,00	6,19
2.1.4	Sonstige Hilfs- und Betriebsstoffe					

		Betriebs-stunden	Stündlicher Verbrauch	Jährlicher Verbrauch	[DM/Einheit]		
2.1.4.1	*Brennstoff Stützbrenner (m³)(ERDGAS)*	*0*	-	-	*0,40*	-	-
2.1.4.2	*Brennstoff Stützbrenner (kg)*	*300*	*335,00*	*100.500,00*	*0,55*	*55.275,00*	*5,26*
2.1.4.3	*Brennstoff Notstromaggregat (l)*	*300*	*125,00*	*37.500,00*	*0,55*	*20.625,00*	*1,96*
2.1.5	Personalkosten			Anzahl	DM/Person		
				16	80.000,00	1.280.000,00	121,90
	Summe durchsatzunabhängige Betriebskosten					**2.090.105,00**	**199,06**
2.2	Durchsatzabhängige Betriebskosten		[m³/Mg Abfall]	[m³/a]	[DM/m³]		
2.2.1	Betriebswasser (PROZESSWASSER)		1,05	11.025,00	5,00	55.125,00	5,25
2.2.2	Brennstoff DeNOx-Anlage (ERDGAS)		-	-	0,40	-	-
2.2.3	Stickstoff		-	-	0,20	-	-
2.2.4	Druckluft (Nm³)		-	-	0,03	-	-
2.2.4.1	*Eindüsung SNCR*		*71,50*	750.750,00	*0,03*	*22.522,50*	*2,15*
2.2.4.2	*Abgaskonditionierung*		-	-	*0,03*	-	-
2.2.5	externe Stromvorhaltung/-bezug (400 h/a)		[kW/Mg Abfall]	[kW/a]	[DM/kW]		
2.2.5.1	*Anschlußleistung*		0,0185	194,25	250,00	48.562,50	4,63
			[kWh/Mg Abfall]	[kWh/a]	[DM/kWh]		
2.2.5.2	*Stromvorhaltung*		0,20	2.100,00	0,20	420,00	0,04

		[kg/Mg Abfall]	[Mg/a]	[DM/Mg]		-
2.2.6	Öl- und Schmierstoffe	0,35	3,68	550,00	2.021,25	0,19
2.2.7	Regenerierchemikalien Ionentauscher	2,80	29,40	380,00	11.172,00	1,06
2.2.8	NaOH (100%-ige Lösung)	-	-	400,00	-	-
2.2.9	NaOH (50%-ige Lösung)	-	-	400,00	-	-
2.2.10	NaHCO3	71,40	749,70	420,00	314.874,00	29,99
2.2.11	Kalk, gebrannt (CaO)	-	-	155,00	-	-
2.2.12	Kalk, gelöscht (Ca(OH)2)	-	-	155,00	-	-
2.2.13	Ammoniak (NH3 bezogen auf 100%-ige Lösung)	-	-	270,00	-	-
2.2.14	Ammoniakwasser (25%-ig)	7,20	75,60	270,00	20.412,00	1,94
2.2.15	Adsorbens (90% Ca(OH)2, 10% Aktivkohle) {SORBALIT}	-	-	350,00	-	-
2.2.16	Aktivkohle {AKTIVKOKS}	14,30	150,15	300,00	45.045,00	4,29
2.2.17	Salzsäure	0,0980	1,03	290,00	298,41	0,03
2.2.18	Salz (NaCl)	0,4680	4,91	290,00	1.425,06	0,14
2.2.19	Nalmet (Hg-Fällmittel)	-	-	290,00	-	-
2.2.20	Helamin (Kesselwasserkonditionierung)	0,0110	0,12	290,00	33,50	0,00
2.2.21	Reststoffentsorgung	[kg/Mg Abfall]	[Mg/a]			
2.2.21.1	*Entsorgung der Schlacke*	*441,44*	*4.635,12*	*50,00*	*231.756,00*	*22,07*
2.2.21.2	*Entsorgung der Inertstoffe*	-	-	*160,00*	-	-
2.2.21.3	*Entsorgung der Kesselstäube (FLUGASCHE)*	*1,88*	*19,69*	*400,00*	*7.875,00*	*0,75*
2.2.21.4	*Entsorgung der Filterstäube und Reaktionsprodukte*	*142,86*	*1.500,00*	*300,00*	*449.999,55*	*42,86*
2.2.21.5	*Entsorgung des Eindampfrückstandes*	-	-	*560,00*	-	-
2.2.21.6	*Entsorgung von HCl, (30 - 31%)*	-	-	*50,00*	-	-
2.2.21.7	*Entsorgung von Gips*	-	-	*30,00*	-	-
	Summe durchsatzabhängige Betriebskosten				**1.211.541,77**	**115,38**
2.3	**Summe Betriebskosten**				**3.301.646,77**	**314,44**

		Menge [MWh/Mg Abfall]	[MWh/a]	[DM/MWh]	Jährliche Erlöse [DM/a]	Spez. Erlöse [DM/Mg]
3	Erlöse					
3.1	Energieerlöse					
3.1.1	el. Energie	0,35	3.675,00	60,00	220.500,00	21,00
		[Mg/Mg Dampf]	[Mg Dampf/a]	[DM/Mg]		
3.2.1	Dampferzeugung	-	-	30,00	-	-
3.2	Wertstofferlöse	[kg/Mg Abfall]	[Mg/a]	[DM/Mg]		
3.2.1	Fe-Metalle			10,00		
3.2.2	NE-Metalle			500,00		
3.2.3	Salzsäure (33 %ig)			30,00		
3.2.4	Gips (CaSO4 x 2 H2O)			-		
3.3	**Gesamterlöse**				**220.500,00**	**21,00**
4	Jahreskosten					
4.1	Jahreskosten mit Erlösen [DM/a]				**5.013.552,89**	
4.2	Jahreskosten ohne Erlöse [DM/a]				**5.234.052,89**	
5	Spezifische Kosten					
5.1	Spezifische Kosten mit Erlösen [DM/Mg]					**477,48**
5.2	Spezifische Kosten ohne Erlöse [DM/Mg]					**498,48**

*** Schätzpreise sind Nettopreise (ohne MWSt.)**

Jahreskostenschätzung der integrierten Shredder-Verbrennungsanlage (Rostfeuerung) -HYBRID-Anlage-

Allgemeine technische Daten

Anzahl der Verbrennungslinien	1	
Durchsatz je Linie	1,4	Mg/h
Gesamt Kapazität	10.500	Mg/a
Verfügbarkeit	7.500	h/a
Feuerungswärmeleistung	6,03	MW
Heizwert Shredder	15.500	kJ/kg

Kostengruppen

		Investitionen [DM]	Abschreibungs-dauer [a]	Zinssatz [%]	Investitionen [DM/a]	Spez. Kosten [DM/Mg]
1	Investitionskosten					
1.1	Grundstück	-	-	7%	-	-
1.2	Herrichten und Erschließen	-	25	7%	-	-
1.3	Baukonstruktion	892.000,00	25	7%	76.542,98	7,29
1.4	Maschinentechnische Anlagen	6.854.000,00	15	7%	752.532,36	71,67
1.5	Elektro- und leittechnische Anlagen	1.252.000,00	15	7%	137.462,87	13,09
1.6	Außenanlagen	20.000,00	25	7%	1.716,21	0,16
1.7	Honorare und Gebühren	925.000,00	17	7%	94.743,30	9,02
1.8	Vorfinanzierung	1.000.000,00	17	7%	102.425,19	9,75
1.9	Zusatzinvestitionen	590.000,00	15	7%	64.778,83	6,17
1.10	**Gesamtanlage**	**11.533.000,00**			**1.165.422,92**	**110,99**

		Investitionen Bezug [DM]	Prozentsatz [%]		Betriebskosten [DM/a]	Spez. Kosten [DM/Mg]
2	Betriebskosten					
2.1	Durchsatzunabhängige Betriebskosten					
2.1.1	Reparatur, Wartung und Unterhaltung					
2.1.1.1	*Baukonstruktion*	*912.000,00*	*1%*		*9.120,00*	*0,87*
2.1.1.2	*Maschinentechnische Anlagen*	*6.854.000,00*	*4%*		*274.160,00*	*26,11*
2.1.1.3	*Elektro- und leittechnische Anlagen*	*1.252.000,00*	*2,5%*		*31.300,00*	*2,98*
2.1.2	Steuern und Versicherungen	9.608.000,00	1%		96.080,00	9,15
2.1.3	Allgemeine Verwaltung	650.000,00	10%		65.000,00	6,19
2.1.4	Sonstige Hilfs- und Betriebsstoffe					

		Betriebs-stunden	Stündlicher Verbrauch	Jährlicher Verbrauch	[DM/Einheit]		
2.1.4.1	*Brennstoff Stützbrenner (m³)(ERDGAS)*	*0*	-	-	*0,40*	-	-
2.1.4.2	*Brennstoff Stützbrenner (kg)*	*300*	*335,00*	*100.500,00*	*0,55*	*55.275,00*	*5,26*
2.1.4.3	*Brennstoff Notstromaggregat (l)*	*0*	*125,00*	-	*0,55*	-	-
2.1.5	Personalkosten			Anzahl	DM/Person		
				5	80.000,00	400.000,00	38,10
	Summe durchsatzunabhängige Betriebskosten					**930.935,00**	**88,66**
2.2	Durchsatzabhängige Betriebskosten		[m³/Mg Abfall]	[m³/a]	[DM/m³]		
2.2.1	Betriebswasser (PROZESSWASSER)		1,08	11.361,00	5,00	56.805,00	5,41
2.2.2	Brennstoff DeNOx-Anlage (ERDGAS)		4,29	45.076,50	0,40	18.030,60	1,72
2.2.3	Stickstoff		-	-	0,20	-	-
2.2.4	Druckluft (Nm³)		-	-	0,03	-	-
2.2.4.1	*Eindüsung SNCR*		-	-	*0,03*	-	-
2.2.4.2	*Abgaskonditionierung*		-	-	*0,03*	-	-
2.2.5	externe Stromvorhaltung/-bezug (400 h/a)		[kW/Mg Abfall]	[kW/a]	[DM/kW]		
2.2.5.1	*Anschlußleistung*		0,0185	194,25	250,00	48.562,50	4,63
			[kWh/Mg Abfall]	[kWh/a]	[DM/kWh]		
2.2.5.2	*Stromvorhaltung*		0,20	2.100,00	0,20	420,00	0,04

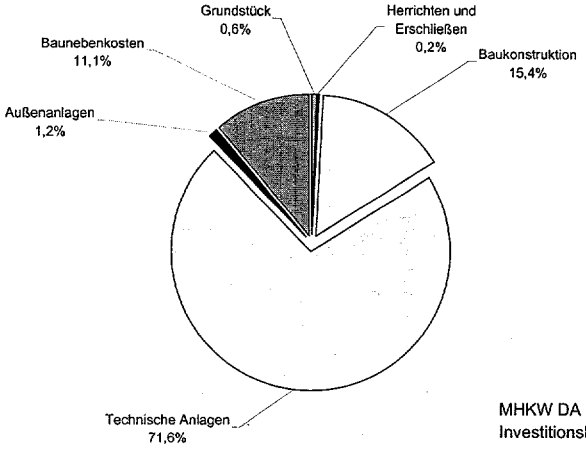
		[m³/Mg Abfall]	[Mg/a]	[DM/Mg]		
2.2.6	Öl- und Schmierstoffe	0,35	3,68	550,00	2.021,25	0,19
2.2.7	Regenerierchemikalien Ionentauscher	2,80	29,40	380,00	11.172,00	1,06
2.2.8	NaOH (100%-ige Lösung)	10,00	105,00	400,00	42.000,00	4,00
2.2.9	NaOH (50%-ige Lösung)	-	-	400,00	-	-
2.2.10	NaHCO3	-	-	420,00	-	-
2.2.11	Kalk, gebrannt (CaO)	13,50	141,75	155,00	21.971,25	2,09
2.2.12	Kalk, gelöscht (Ca(OH)2)	-	-	155,00	-	-
2.2.13	Ammoniak (NH3 bezogen auf 100%-ige Lösung)	3,06	32,17	270,00	8.686,44	0,83
2.2.14	Ammoniakwasser (25%-ig)	-	-	270,00	-	-
2.2.15	Adsorbens (90% Ca(OH)2, 10% Aktivkohle) {SORBALIT}	-	-	350,00	-	-
2.2.16	Aktivkohle {AKTIVKOKS}	-	-	300,00	-	-
2.2.17	Salzsäure	0,098	1,03	290,00	298,41	0,03
2.2.18	Salz (NaCl)	0,468	4,91	290,00	1.425,06	0,14
2.2.19	Nalmet (Hg-Fällmittel)	0,107	1,12	290,00	325,82	0,03
2.2.14	Melamin (Kesselwasserkonditionierung)	0,011	0,12	290,00	33,50	0,00
2.2.15	Reststoffentsorgung	[kg/Mg Abfall]	[Mg/a]			
	2.2.15.1 Entsorgung der Schlacke	*441,44*	*4.635,12*	*50,00*	*231.756,00*	*22,07*
	2.2.15.2 Entsorgung der Inertstoffe	-	-	*160,00*	-	-
	2.2.15.3 Entsorgung der Kesselstäube (FLUGASCHE)	*1,88*	*19,69*	*400,00*	*7.875,00*	*0,75*
	2.2.15.4 Entsorgung der Filterstäube und Reaktionsprodukte	*40,00*	*420,00*	*300,00*	*126.000,00*	*12,00*
	2.2.15.5 Entsorgung des Eindampfrückstandes	-	-	*560,00*	-	-
	2.2.15.6 Entsorgung von HCL (30 - 31%)	-	-	*50,00*	-	-
	2.2.15.7 Entsorgung von Gips	-	-	*30,00*	-	-
	Summe durchsatzabhängige Betriebskosten				**577.382,82**	**54,99**
2.3	**Summe Betriebskosten**				**1.508.317,82**	**143,65**

		Menge [MWh/Mg Abfall]	[MWh/a]	[DM/MWh]	Jährliche Erlöse [DM/a]	Spez. Erlöse [DM/Mg]
3	Erlöse					
3.1	Energieerlöse					
3.1.1	el. Energie	0,561	5.890,50	60,00	**353.430,00**	**33,66**
		[Mg/Mg Dampf]	[Mg Dampf/a]	[DM/Mg]		
3.1.2	Dampferzeugung	-	-	30,00	-	-
3.2	Wertstofferlöse	[kg/Mg Abfall]	[Mg/a]	[DM/Mg]		
3.2.1	Fe-Metalle			10,00		
3.2.2	NE-Metalle			500,00		
3.2.3	Salzsäure (33 %ig)			30,00		
3.2.4	Gips (CaSO4 x 2 H2O)			-		
3.3	**Gesamterlöse**				**353.430,00**	**33,66**

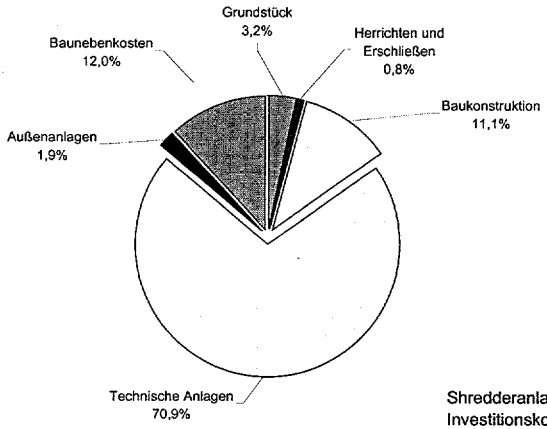
4	Jahreskosten	
4.1	Jahreskosten mit Erlösen [DM/a]	**2.320.310,74**
4.2	Jahreskosten ohne Erlöse [DM/a]	**2.673.740,74**

5	Spezifische Kosten	
5.1	Spezifische Kosten mit Erlösen [DM/Mg]	**220,98**
5.2	Spezifische Kosten ohne Erlöse [DM/Mg]	**254,64**

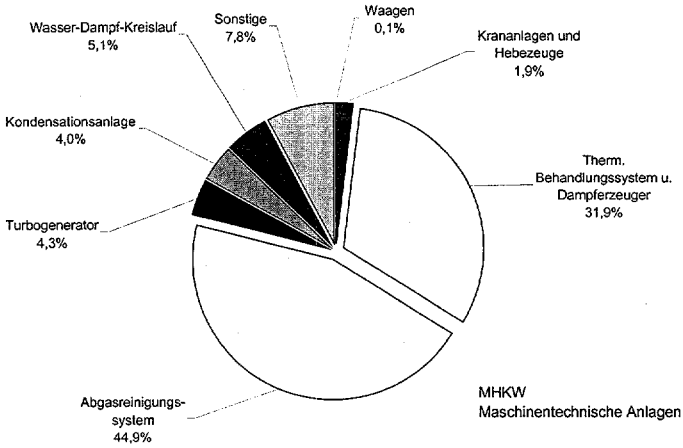
*** Schätzpreise sind Nettopreise (ohne MWSt.)**

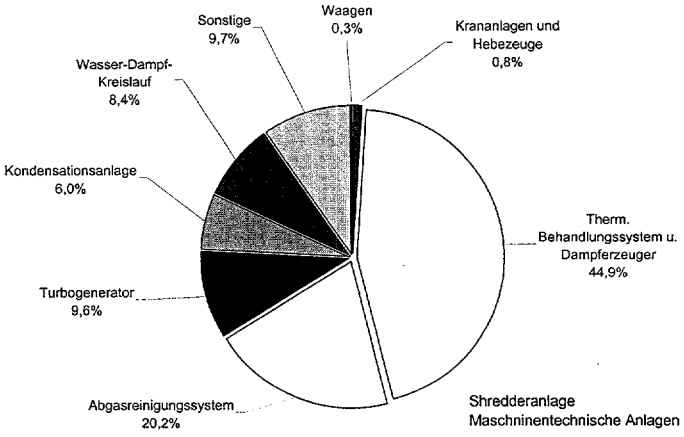


MHKW DA
Investitionskosten



Shredderanlage
Investitionskosten


Waagen
0,1%
Sonstige
7,8%
Wasser-Dampf-Kreislauf
5,1%
Krananlagen und
Hebezeuge
1,9%
Kondensationsanlage
4,0%
Therm.
Behandlungssystem u.
Dampferzeuger
31,9%
Turbogenerator
4,3%
Abgasreinigungs-
system
44,9%
MHKW
Maschinentechnische Anlagen

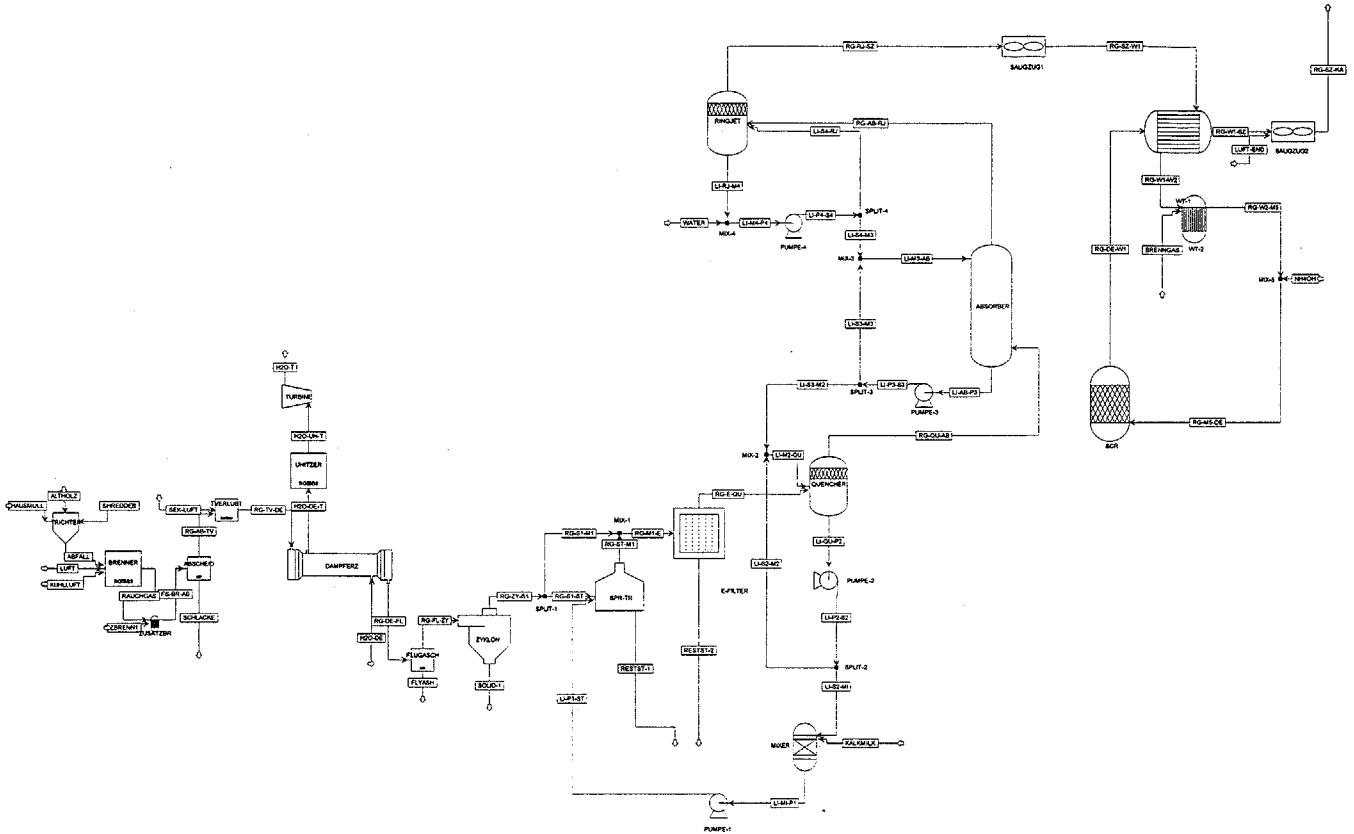

Sonstige
9,7%
Waagen
0,3%
Krananlagen und
Hebezeuge
0,8%
Wasser-Dampf-
Kreislauf
8,4%
Kondensationsanlage
6,0%
Therm.
Behandlungssystem u.
Dampferzeuger
44,9%
Turbogenerator
9,6%
Abgasreinigungssystem
20,2%
Shredderanlage
Maschninentechnische Anlagen

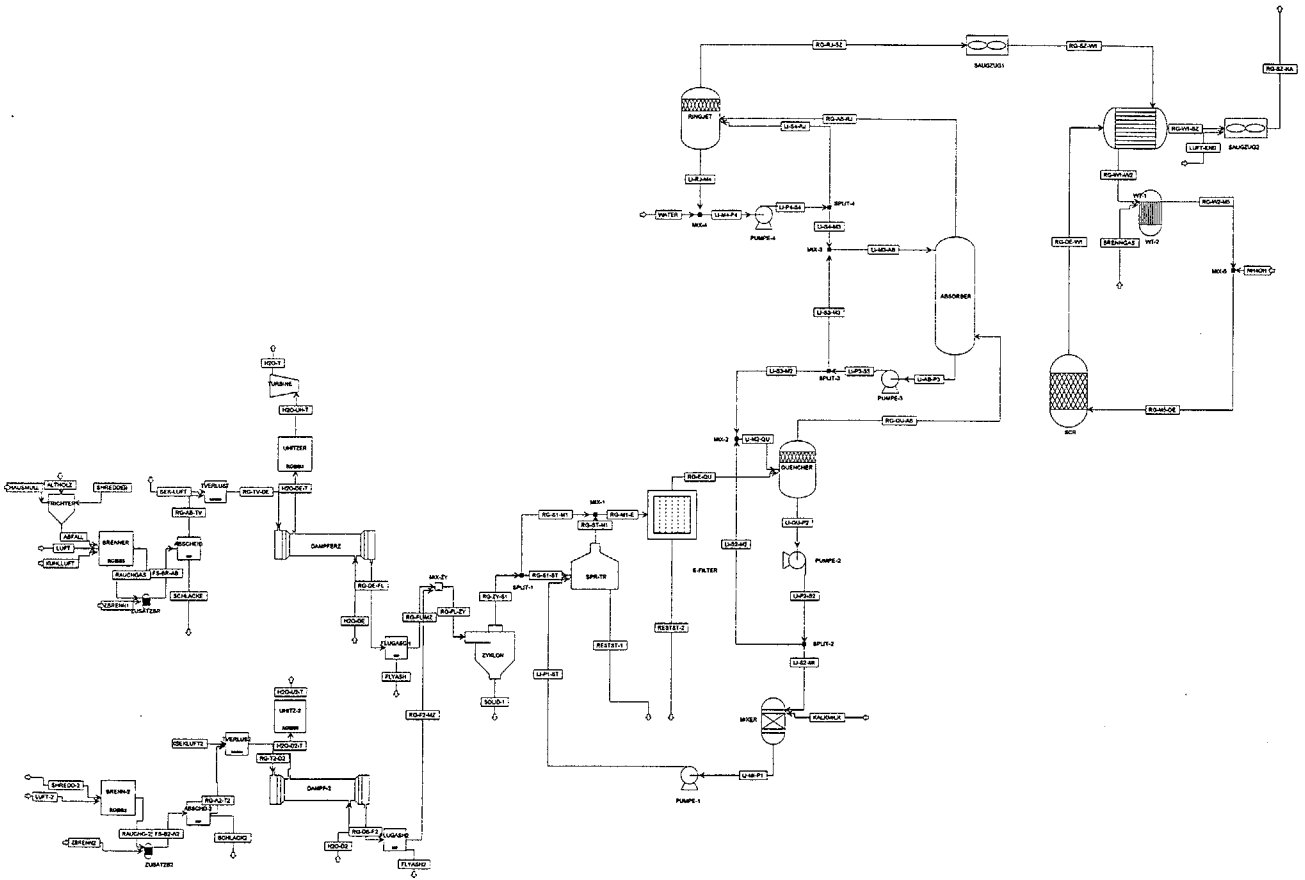
Anhang E

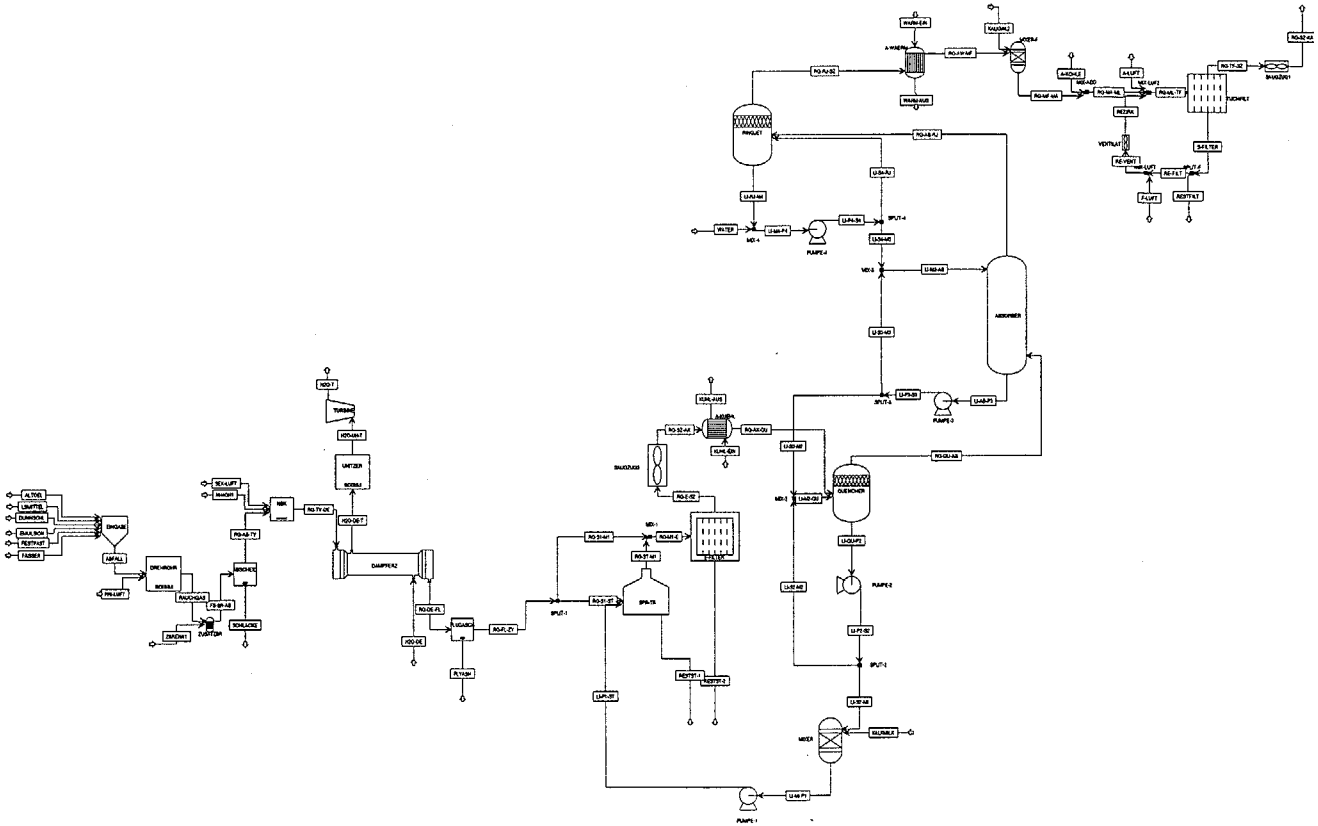
E1 AspenPlus™ –Verfahrensfließbild der Hausmüllverbrennungsanlage

E2 AspenPlus™ –Verfahrensfließbild der HYBRID-Abfallbehandlungsanlage

E3 AspenPlus™ –Verfahrensfließbild einer Sonderabfall-Verbrennungsanlage [siehe auch TANDLER 1999]

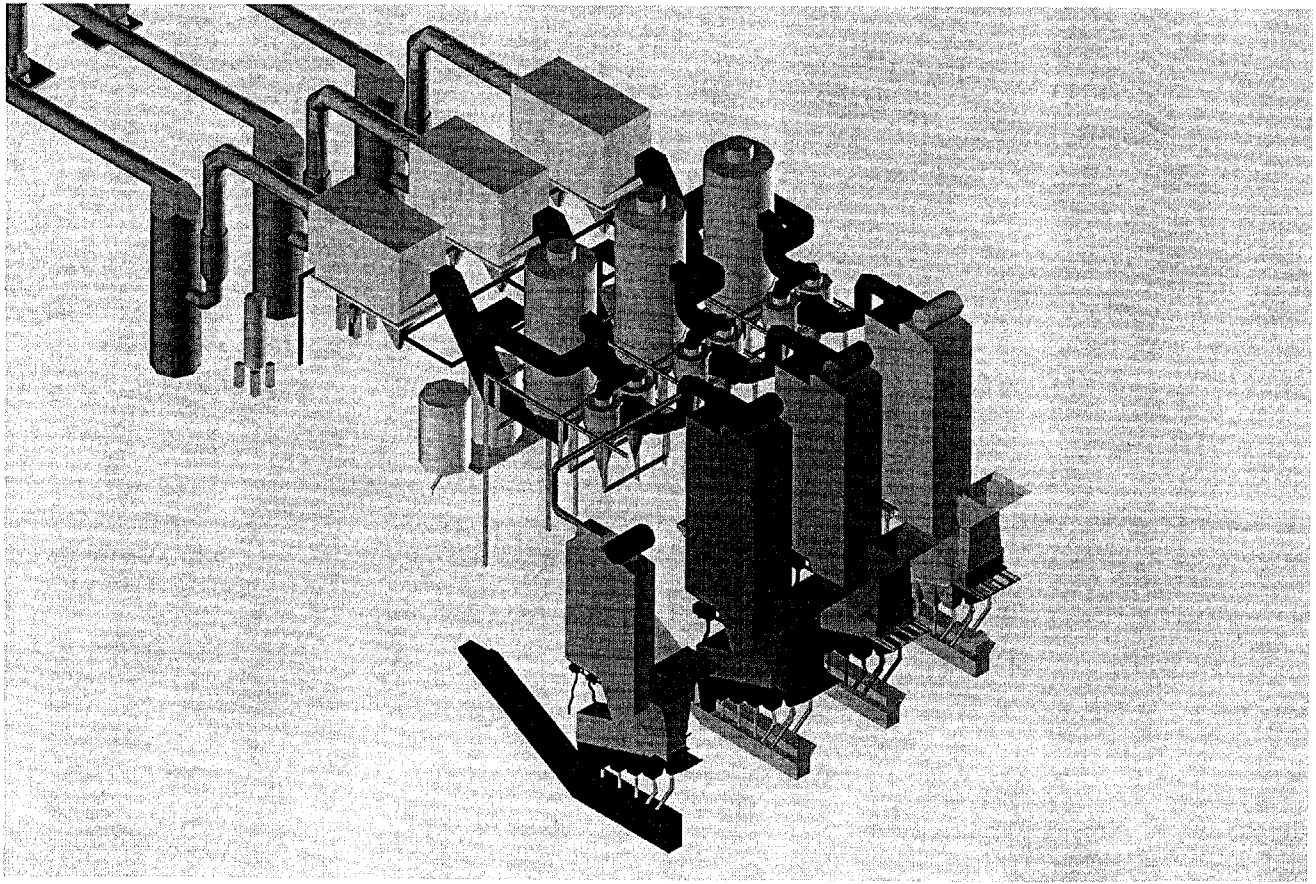

ALTHOLZ
SHREDDER
TRICHTER
ABFALL
BRENNER
ROBBIN
LUFT 1
KUHLLUFT
RAUCHGAS
FS-BR-AB
SCHLACKE
ZUSATZBR
SEK-LUFT
TVER.LUFT
RG-AB-TV
ABSCHEID
RG-TV-DE
H2O-T1
TURBINE
H2O-UN-T
UHTZER
ROBBIN
H2O-DE-T
DAMPFERZ
RG-DE-FL
H2O-DE
FLUGASCH
FLYASH
RG-FL-ZY
ZYKLON
SOLID-1
RG-ZY-S1
SPLIT-1
RG-S1-M1
RG-S1-M2
MIX-1
SPR-TR
REST-ST-1
REST-ST-2
E-FILTER
RG-E-GU
MIX-2
QUENCHER
LI-GU-P2
PUMPE-2
LI-P2-M2
SPLIT-2
LI-S2-M1
MIXER
KALKMILK
LI-M-P1
PUMPE-1
LI-P1-ST
RG-ST-M1
RG-M1-E
LI-M2-M2
LI-GU-M2
RG-GU-AB
LI-M1-GU
RG-AB-FL
LI-S4-M2
LI-M4-P1
WATER
MIX-4
PUMPE-4
LI-P4-S4
SPLIT-4
LI-S4-M3
LI-M3-M2
MIX-3
LI-M3-M1
ABSORBER
LI-S3-M2
SPLIT-3
LI-P3-S3
LI-AB-P3
PUMPE-3
RG-FL-SZ
SAUGZUG1
RG-SZ-WT
RINGJET
LI-S4-RJ
LI-RJ-M1
RG-AB-FL
RG-SZ-KA
RG-WT-SZ
LUFT-BHD
SAUGZUG2
RG-W1-W2
WT-1
WT-2
RG-W2-M3
BRENNGAS
RG-DE-WT
MIX-5
NH4OH
SCR
RG-M3-DE

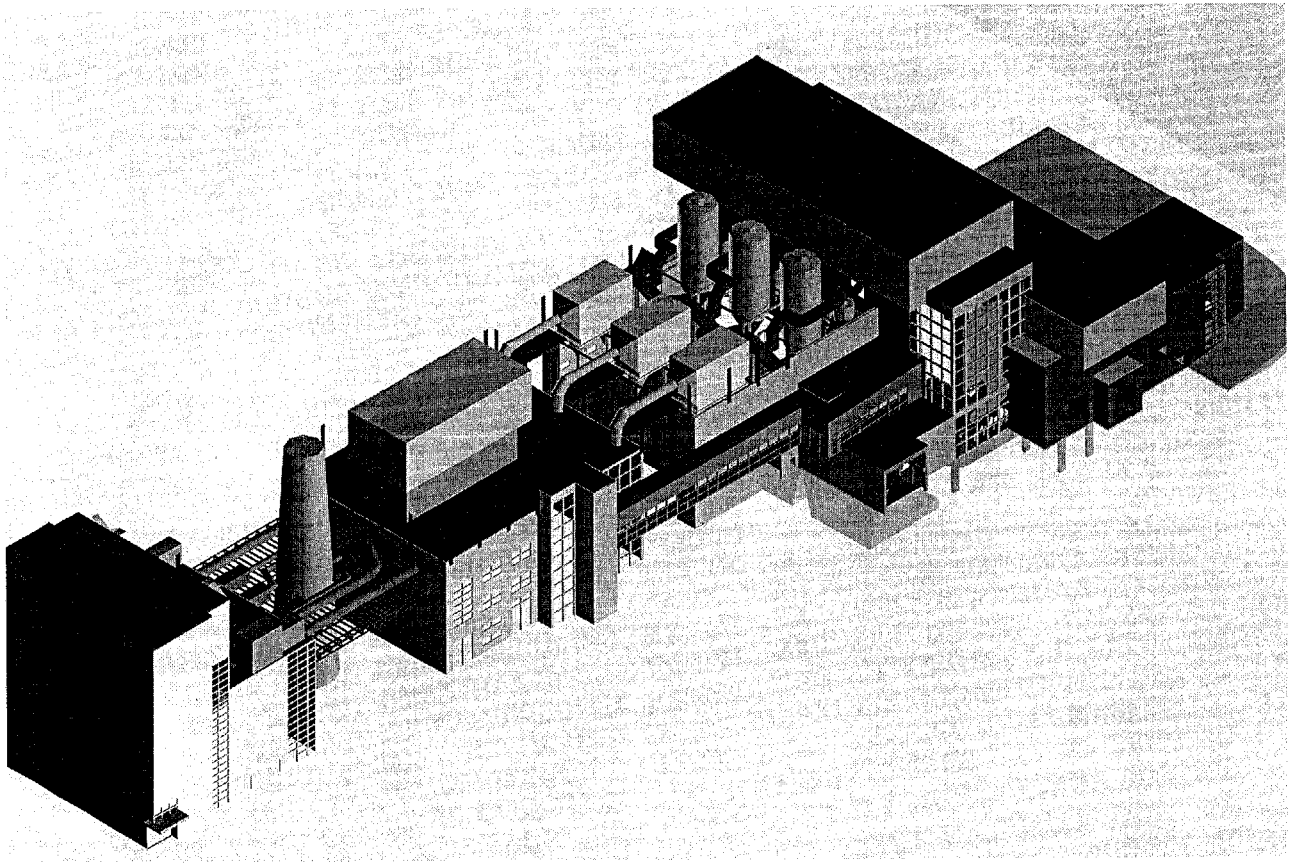

SAUGZUG1
RAUGJET
ABSORBER
QUENCHER
E-FILTER
ZYKLON
DAMPFER2
DAMPFER1
UNITZ2
UNITZER
SPRÜH-2
SPRÜH-1
MISCHER
BRENNER
ABSCHEID
SCHLACKE
ZUSATZ2
ZUSATZ1
PUMPE-1
PUMPE-2
PUMPE-3
PUMPE-4
MIXER
SCR
WT1
WT2
SPLIT-1
SPLIT-2
SPLIT-3
SPLIT-4
MIX-1
MIX-2
MIX-3
MIX-4
MIX-5
MIX-6
MIX-7
RESTST-1
RESTST-2
SOLID-1
FLYASH
FLYASH2
WATER
NH4OH

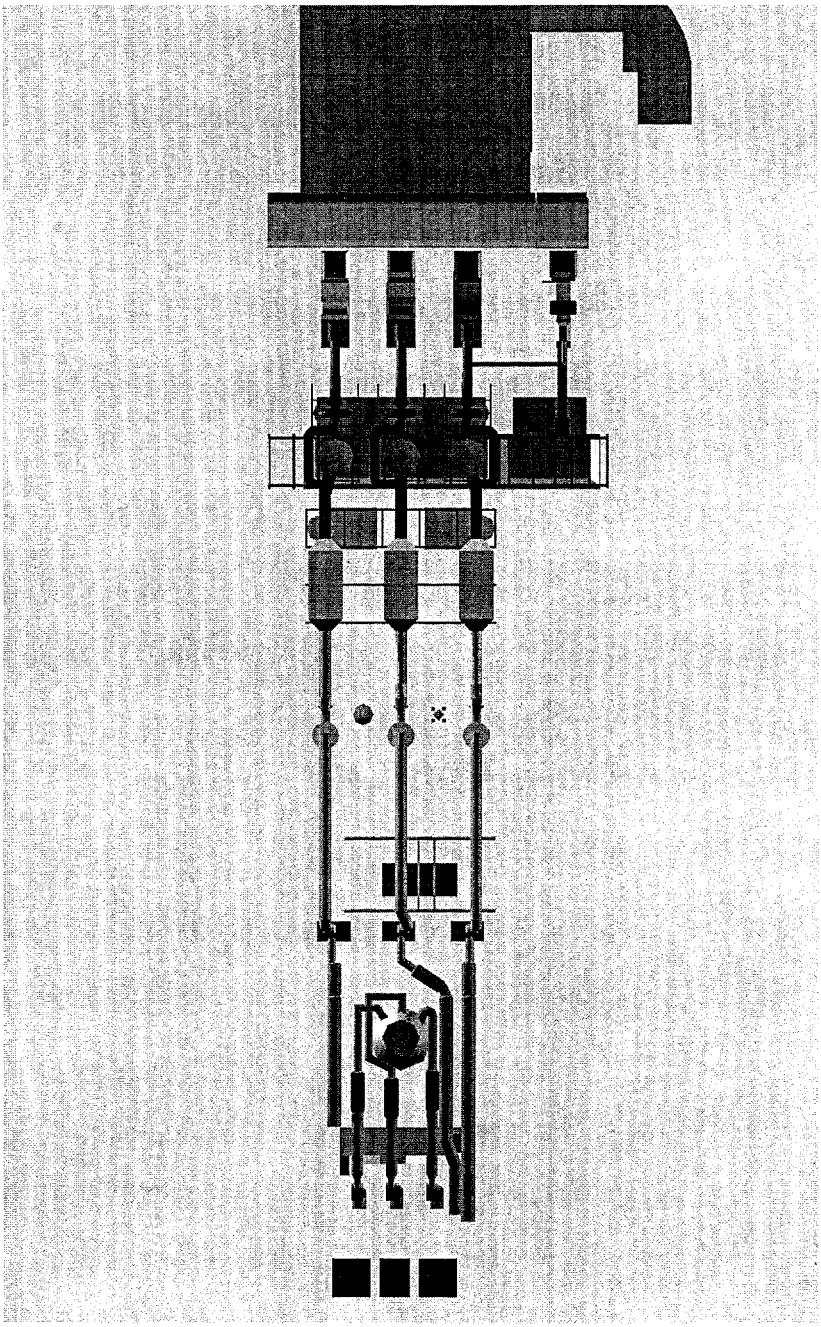


Anhang F

F1 Zeichnerische Darstellung der Integration der Shredder-Verbrennungsanlage in die bestehende Hausmüll-Verbrennungsanlage







In der Schriftenreihe *WAR* sind erschienen:

WAR 1	Brunnenalterung Wassertechnisches Seminar am 13.10.1978, TH Darmstadt, 1980	20,-- DM
WAR 2	Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Günther Rincke. TH Darmstadt, 1979	Vergriffen
WAR 3	Gniosdorsch, Lothar Georg: Ein Beitrag über den Einfluß der in Abhängigkeit von der verfahrensmäßigen Durchführung der biologischen Abwasserreinigung bedingten Schlammeigenschaften auf die Schlammentwässerung und anschließende Verbrennung. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1979	Vergriffen
WAR 4	Grundwassergewinnung mittels Filterbrunnen. 2. Wassertechnisches Seminar am 11.04.1980, TH Darmstadt, 1981	Vergriffen
WAR 5	Rudolph, Karl-Ulrich: Die Mehrdimensionale Bilanzrechnung als Entscheidungsmodell der Wassergütewirtschaft. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1980	Vergriffen
WAR 6	Hantke, Hartmut: Vergleichende Bewertung von Anlagen zur Grundwasseranreicherung. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1981	Vergriffen
WAR 7	Riegler, Günther: Eine Verfahrensgegenüberstellung von Varianten zur Klärschlammstabilisierung. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1981	Vergriffen
WAR 8	Technisch-wissenschaftliche Grundlagen für Wasserrechtsverfahren in der öffentliche Wasserversorgung. 3. Wassertechnisches Seminar am 05.und 06.03.1981, TH Darmstadt, 1982	50,-- DM
WAR 9	Geruchsemissionen aus Abwasseranlagen. 4. Wassertechnisches Seminar am 15.10.1981, TH Darmstadt, 1982	Vergriffen
WAR 10	Stadtplanung und Siedlungswasserwirtschaft in Entwicklungsländern.-Aspekte der Projektdurchführung. Vorträge in den Jahren 1980 - 1981. TH Darmstadt, 1982	Vergriffen
WAR 11	Hierse, Wilfried: Untersuchungen über das Verhalten phosphathaltiger Schlämme unter anaeroben Bedingungen. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1982	40,-- DM

WAR 12	Gossel, Hans: Untersuchungen zum Verhalten von Belebungsanlagen bei Stoßbelastungen. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1982	Vergriffen
WAR 13	Hanel, Robert: Der Sauerstoffeintrag und seine Messung beim Belebungsverfahren unter besonderer Beachtung der Viskosität und Oberflächenspannung. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1982	Vergriffen
WAR 14	Cichorowski, Georg: Regionale Differenzierung in der Gewässergütewirtschaft. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1982	45,-- DM
WAR 15	Schreiner Horst: Stofftausch zwischen Sediment und Wasserkörper in gestauten Fließgewässern. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1982	50,-- DM
WAR 16	Grundwasserbewirtschaftung - Grundwassermodelle, Grundwasseranreicherung 5. Wassertechnisches Seminar am 08.10.1982, TH Darmstadt, 1982	Vergriffen
WAR 17	Rüthrich, Wulf: Abhängigkeit des Verhaltens der Wohnbevölkerung von Verkehrsimmissionen. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1982	Vergriffen
WAR 18	Hill, Stefan: Untersuchungen über die Wechselwirkungen zwischen Porenverstopfung und Filterwiderstand mittels Tracermessungen. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1983	50,-- DM
WAR 19	Kaltenbrunner, Helmut: Wasserwirtschaftliche Auswirkungen der Kühlverfahren von Kraftwerken und von Abwärmeeinleitungen in Fließgewässern. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1983	50,-- DM
WAR 20	Roeles, Gerd: Auswirkungen von Müllverbrennungsanlagen auf die Standortumgebung - Analyse der Wahrnehmungen von Störungen und Belästigungen. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1982	Vergriffen
WAR 21	Niehoff, Hans-Hermann: Untersuchungen zur weitergehenden Abwasserreinigung mit vorwiegend biologischen Verfahrensschritten unter besonderer Berücksichtigung der Grundwasseranreicherung. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1983	Vergriffen

*WA*R 22	Biologische Verfahren in der Wasseraufbereitung. 6. Wassertechnisches Seminar am 06.04.1984, TH Darmstadt, 1985	Vergriffen
*WA*R 23	Optimierung der Belüftung und Energieeinsparung in der Abwassertechnik durch Einsatz neuer Belüftungssysteme. 7. Wassertechnisches Seminar am 16.11.1984, TH Darmstadt, 1985	Vergriffen
*WA*R 24	Wasserverteilung und Wasserverluste. 8. Wassertechnisches Seminar am 30.05.1985, TH Darmstadt, 1985	Vergriffen
*WA*R 25	Professor Dr. rer. nat. Wolters zum Gedächtnis - 1. Januar 1929 bis 26. Februar 1985. Beiträge von Kollegen, Schülern und Freunden. TH Darmstadt, 1986	Vergriffen
*WA*R 26	Naturnahe Abwasserbehandlungsverfahren im Leistungsvergleich - Pflanzenkläranlagen und Abwasserteiche -. 9. Wassertechnisches Seminar am 07.11.1985, TH Darmstadt, 1986	Vergriffen
*WA*R 27	Heuser, Ernst-Erich: Gefährdungspotentiale und Schutzstrategien für die Grundwasservorkommen in der Bundesrepublik Deutschland. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1986	Vergriffen
*WA*R 28	Rohrleitungen und Armaturen in der Wasserversorgung 10. Wassertechnisches Seminar am 24.04,1986, TH Darmstadt, 1986	Vergriffen
*WA*R 29	Bau, Kurt: Rationeller Einsatz der aerob-thermophilen Stabilisierung durch Rohschlamm-Vorentwässerung. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1986	Vergriffen
*WA*R 30	Wehenpohl, Günther: Selbsthilfe und Partizipation bei siedlungswasserwirtschaftlichen Maßnahmen in Entwicklungsländern -Grenzen und Möglichkeiten in städtischen Gebieten unterer Einkommensschichten. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1987	Vergriffen
*WA*R 31	Stickstoffentfernung bei der Abwasserreinigung - Nitrifikation und Denitrifikation -. 11. Wassertechnisches Seminar am 13.11.1986, TH Darmstadt, 1987	Vergriffen

*WA*R 32	Neuere Erkenntnisse beim Bau und Betrieb von Vertikalfilterbrunnen. 12. Wassertechnisches Seminar am 14.05.1987, TH Darmstadt, 1987	Vergriffen
*WA*R 33	Ist die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung nutzbringende Düngung oder preiswerte Abfallbeseitigung?- Standpunkte und Argumente -. 13. Wassertechnisches Seminar am 12.11.1987, TH Darmstadt, 1988	Vergriffen
*WA*R 34	Automatisierung in der Wasserversorgung - auch für kleinere Unternehmen 14. Wassertechnisches Seminar am 09.06.1988, TH Darmstadt, 1988	65,-- DM
*WA*R 35	Erkundung und Bewertung von Altlasten -Kriterien und Untersuchungsprogramme-. 15. Wassertechnisches Seminar am 12.10.1988, TH Darmstadt, 1989	Vergriffen
*WA*R 36	Bestimmung des Sauerstoffzufuhrvermögens von Belüftungssystemen in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen. Workshop am 15. u. 16.03.1988, TH Darmstadt, 1989	Vergriffen
*WA*R 37	Belüftungssysteme in der Abwassertechnik - Fortschritte und Perspektiven -. 16. Wassertechnisches Seminar am 10.11.1988, TH Darmstadt, 1989	Vergriffen
*WA*R 38	Farinha, Joao António Muralha Ribeiro: Die stufenweise Versorgung mit Anlagen der Technischen Infrastruktur in Abhängigkeit von der Entwicklung der sozioökonomischen Verhältnisse der Bevölkerung - dargestellt am Beispiel der Bairros Clandestinos der Region Lissabon-. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1989	Vergriffen
*WA*R 39	Sicherstellung der Trinkwasserversorgung Maßnahmen und Strategien für einen wirksamen Grundwasserschutz zur langfristigen Erhaltung der Grundwassergewinnung. 17. Wassertechnisches Seminar am 01.06.1989, TH Darmstadt, 1989	65,-- DM
*WA*R 40	Regenwassernutzung in privaten und öffentlichen Gebäuden -Qualitative und quantitative Aspekte, technische Anlagen-. Studie für den Hessischen Minister für Umwelt und Reaktorsicherheit. TH Darmstadt, 1981	Vergriffen
*WA*R 41	Folgenutzen kontaminierter Betriebsflächen unter besonderer Berücksichtigung der Sanierungsgrenzen. 18. Wassertechnisches Seminar am 11.10.1989, TH Darmstadt, 1989	Vergriffen

*WA*R 42	Privatisierung öffentlicher Abwasseranlagen -Ein Gebot der Stunde ? 19. Wassertechnisches Seminar am 09.11.1989, TH Darmstadt, 1989	60,-- DM
*WA*R 43	Pöpel, H. Johannes; Joachim Glasenapp; Holger Scheer: Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen zur Stickstoffelimination. Gutachten für das Hess. Ministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit, TH Darmstadt, 1990	70,-- DM
*WA*R 44	Abfallentsorgung Hessen. Standpunkte - Gegensätze - Perspektiven Abfallwirtschaftliches Symposium am 31.10.1989, TH Darmstadt, 1990	60,-- DM
*WA*R 45	Brettschneider, Uwe: Die Bedeutung von Sulfaten in der Siedlungswasserwirtschaft und ihre Entfernung durch Desulfurikation. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1990	Vergriffen
*WA*R 46	Grabenlose Verlegung und Erneuerung von nicht begehbaren Leitungen - Verfahren, Anwendungsgrenzen, Erfahrungen und Perspektiven-. 20. Wassertechnisches Seminar am 29.03.1990, TH Darmstadt, 1990	70,-- DM
*WA*R 47	Härtel, Lutz: Modellansätze zur dynamischen Simulation des Belebtschlammverfahrens. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1990	70,-- DM
*WA*R 48	Pflanzenkläranlagen - besser als ihr Ruf? 21. Wassertechnisches Seminar am 18.09.1990, TH Darmstadt, 1990	Vergriffen
*WA*R 49	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) in der Wasserwirtschaft - administrativer Wildwuchs oder ökologische Keule? Dokumentation der Beiträge zum Interdisziplinären Kolloquium am 23.02.1990 und zum Sachverständigengespräch am 23.02.1990, TH Darmstadt, 1991	60,-- DM
*WA*R 50	UVP in der abfallwirtschaftlichen Planung. 22. Wassertechnisches Seminar am 18.10.1990, TH Darmstadt, 1991	Vergriffen
*WA*R 51	Biologische und chemische Phosphatelimination - Technische Möglichkeiten und Grenzen -. 23. Wassertechnisches Seminar am 15.11.1990, TH Darmstadt, 1991	70,-- DM

*WA*R 52	Pöpel, H. Johannes; Tankred Börner: Wurzelraum-Modellanlage Hofgeismar-Beberbeck -Pilotprojekt des Landes Hessen. Gutachten für das Hess. Ministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit. TH Darmstadt, 1991	60,-- DM
*WA*R 53	Wagner, Martin: Einfluß oberflächenaktiver Substanzen auf Stoffaustauschmechanismen und Sauerstoffeintrag. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1991	70,-- DM
*WA*R 54	Belüftungssysteme in der Abwassertechnik 1991 - Fortschritte und Perspektiven -. 1. gemeinsames Abwassertechnisches Seminar mit der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar am 11. und 12.04. 1991 in Weimar, TH Darmstadt, 1991	60,-- DM
*WA*R 55	Neuere gesetzliche Anforderungen und moderne technische Lösungen zur Sicherung der Wasserversorgung - Erkennen, Vermeiden und Beseitigen von Schadstoffen - 24. Wassertechnisches Seminar am 16.05.1991 TH Darmstadt, 1991	Vergriffen
*WA*R 56	Zhang, Jiansan: Energiebilanzierung anaerob-mesophiler Stabilisierungsanlagen mit vorgeschalteter aerob-thermophiler Stufe Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1991	Vergriffen
*WA*R 57	Glasenapp, Joachim: Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von Verfahrensvarianten zur Sickstoffelimination beim Belebtschlammverfahren. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1992	Vergriffen
*WA*R 58	Börner, Tankred: Einflußfaktoren für die Leistungsfähigkeit von Pflanzenkläranlagen. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1992	Vergriffen
*WA*R 59	Erzmann, Michael: Untersuchungen zur biologischen Elimination von chlorierten Lösemitteln aus Abwasser. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1992	70,-- DM
*WA*R 60	Erfassung und Sanierung schadhafter Abwasserkanäle. 26. Wassertechnisches Seminar am 28.11.1991 TH Darmstadt, 1992	70,-- DM
*WA*R 61	Realisierung von Entsorgungsanlagen Umsetzungsprobleme und Lösungsansätze aus planerischer, verwaltungsrechtlicher und politischer Sicht. 25. Wassertechnisches Seminar am 07.11.1991, TH Darmstadt, 1992	50,-- DM

*WA*R 62	Koziol, Matthias: Umwelteffekte durch Förderung von Energieeinsparmaßnahmen in innerstädtischen Althausgebieten. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1992	50,-- DM
*WA*R 63	Lautner, Gerd: Einführung in das Bauordnungsrecht. 7. erw. Auflage TH Darmstadt, 1992	Vergriffen
*WA*R 64	Abwasserkanäle - Bemessung, Ausführung, Sanierung - 2. gemeinsames Seminar -Abwassertechnik- mit der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar am 18. und 19.03.1992 in Weimar, TH Darmstadt, 1992	Vergriffen
*WA*R 65	Optimierung der Grundwassergewinnung über Filterbrunnen Neue Bau- und Betriebserkenntnisse - 27. Wassertechnisches Seminar am 21.05.1992, TH Darmstadt, 1992	80,-- DM
*WA*R 66	Kläschlammbehandlung und Klärschlammentsorgung -Stand und Entwicklungstendenzen- 31. Darmstädter Seminar -Abwassertechnik- am 12.11.1992, TH Darmstadt, 1992	70,-- DM
*WA*R 67	Kreislaufwirtschaft Bau - Stand und Perspektiven beim Recycling von Baurestmassen- 32. Darmstädter Seminar -Abfalltechnik- am 09.03.1993, TH Darmstadt, 1993	60,-- DM
*WA*R 68	Bewertung von Geruchsemissionen und -immissionen 29. Darmstädter Seminar -Immissionsschutz- am 08.10.1992, TH Darmstadt, 1993	50,-- DM
*WA*R 69	Möglichkeiten und Grenzen der Klärschlammentsorgung 3. gemeinsames Seminar -Abwassertechnik- mit der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar am 31.03. und 01.04.1993, TH Darmstadt, 1993	90,-- DM
*WA*R 70	Sichere Wasserversorgung durch moderne Rohrleitungstechnik 33. Darmstädter Seminar -Wasserversorgungstechnik- am 11.03.1993, TH Darmstadt, 1993	Vergriffen
*WA*R 71	Aktuelle Aufgaben der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung 35. Darmstädter Seminar -Abwassertechnik- am 05. + 06.05.1993, TH Darmstadt, 1993	90.—DM

WAR 72	Raumordnungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsprüfung und Umweltleitbilder für die Landes- und Regionalplanung 28. und 30. Darmstädter Seminar -Raumplanung- am 17.09. + 05.11.1992, TH Darmstadt, 1993	80,-- DM
WAR 73	Grohmann, Walter: Vergleichende Untersuchungen von Belüftungs- und Durchmischungssystemen zur bioverfahrenstechnischen Optimierung der aerob-thermophilen Stabilisation (ATS). Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1993	70,-- DM
WAR 74	Dioxinimmissionen und Quellen 34. Darmstädter Seminar -Immissionsschutz- am 15.04.1993, TH Darmstadt, 1994	60,-- DM
WAR 75	Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen Optimierung, Prozeßstabilität, Kosteneinsparung 36. Darmstädter Seminar -Abwassertechnik- am 04.11.1993 in Darmstadt und 5. gemeinsames Seminar -Abwassertechnik- mit der Fakultät Bauingenieurwesen der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar am 23. und 24.03.1994 in Weimar, TH Darmstadt, 1994	90,-- DM
WAR 76	Umweltgerechte Ausweisung und Erschließung von Gewerbegebieten 4. gemeinsames Seminar -Umwelt- und Raumplanung- mit der Fakultät Architektur, Stadt- und Regionalplanung der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar am 08. und 09.09.1993 in Weimar, TH Darmstadt, 1994	70,-- DM
WAR 77	Von der Umweltverträglichkeitsprüfung zum kooperativen Planungsmanagement. -Das Scoping-Verfahren als erste Stufe!?- 37. Darmstädter Seminar -Umwelt- und Raumplanung- am 11.11.1993, TH Darmstadt, 1994	Vergriffen
WAR 78	Modellbildung und intelligente Steuerungssysteme in der Umwelttechnik. 38. Darmstädter Seminar -Abfalltechnik- am 24.02.1994, TH Darmstadt, 1994	Vergriffen
WAR 79	Brauchwassernutzung in Haushalten und Gewerbebetrieben - Ein Gebot der Stunde? 39. Darmstädter Seminar -Wasserversorgungstechnik- am 17.03.1994, TH Darmstadt, 1994	50,-- DM
WAR 80	Restabfallbehandlung in Hessen 41. Darmstädter Seminar -Abfalltechnik- mit dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten -HMUEB- am 16.06.1994, TH Darmstadt, 1994	Vergriffen

WAR 81	Umweltbeeinflussung durch biologische Abfallbehandlungsverfahren 42. Darmstädter Seminar -Abfalltechnik- mit dem Institut für Hygiene der FU Berlin und dem Institut für Meteorologie der TH Darmstadt am 08. und 09.09.1994 in Berlin, TH Darmstadt, 1994	90,-- DM
WAR 82	Zeitgemäße Planung von Anlagen der Ortsentwässerung -Kanäle, Bauwerke, Sonderbauwerke- 6. gemeinsames Seminar -Abwassertechnik- mit der Fakultät Bauingenieurwesen der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar am 15. und 16.03.1995 in Weimar, TH Darmstadt, 1995	Vergriffen
WAR 83	Grundwasseranreicherung -Stand der Technik und neuere Entwicklungen- 44. Darmstädter Seminar -Wasserversorgungstechnik- mit dem Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. -DVGW- am 26.04.1994, TH Darmstadt, 1995	60,-- DM
WAR 84	Auswirkungen der Phosphorelimination auf die Schlammbehandlung Theoretische Erkenntnisse und praktische Erfahrungen Workshop vom 24. bis 25. November 1994, TH Darmstadt, 1995	60,-- DM
WAR 85	Stickstoffelimination mit oder ohne externe Substrate ? - Erfahrungen und Überlegungen - 43. Darmstädter Seminar -Abwassertechnik- in Abstimmung mit der Abwassertechnischen Vereinigung e.V. (ATV) am 09.11.1994, TH Darmstadt, 1995	70,-- DM
WAR 85	Stickstoffelimination mit oder ohne externe Substrate ? - Erfahrungen und Überlegungen - 2. Auflage Wiederholung des 43. Darmstädter Seminars -Abwassertechnik- in Abstimmung mit der Abwassertechnischen Vereinigung e.V. (ATV) am 01.02.1996 in Düsseldorf TH Darmstadt, 1996	70,-- DM
WAR 86	Möglichkeiten und Grenzen der Einsparung von Investitions- und Betriebskosten bei der Abwasserbehandlung 47. Darmstädter Seminar -Abwassertechnik- am 15.11.1995, TH Darmstadt, 1995	80,-- DM
WAR 87	Jardin, Norbert: Untersuchungen zum Einfluß der erhöhten biologischen Phosphorelimination auf die Phosphordynamik bei der Schlammbehandlung. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1996	70,-- DM
WAR 88	Thermische Restabfallbehandlung für kleine Planungsräume. 45. Darmstädter Seminar -Abfalltechnik- am 22.06.1995 in Hanau, TH Darmstadt, 1996	70,-- DM

*WA*R 89	Ferber, Uwe: Aufbereitung und Revitalisierung industrieller Brachflächen in den traditionellen Industrieregionen Europas. Sonderprogramme im Vergleich. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt 1996	50,-- DM
*WA*R 90	Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen. 48. Darmstädter Seminar -Abfalltechnik- am 29.02.1996, TH Darmstadt, 1996	80,-- DM
*WA*R 91	Neuere Erkenntnisse bei Planung, Bau, Ausrüstung und Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen. 7. gemeinsames Seminar -Abwassertechnik- mit der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar am 11. und 12.09.1996 in Weimar, TH Darmstadt, 1996	80,-- DM
*WA*R 92	Hygiene in der Abfallwirtschaft. 50. Darmstädter Seminar -Abfalltechnik- am 17.10.1996, TH Darmstadt, 1996	60,-- DM
*WA*R 93	Europäische Richtlinien und Normen zur Abwassertechnik -Konsequenzen und Folgerungen für die Praxis in Deutschland-. 51. Darmstädter Seminar -Abwassertechnik- am 14.11.1996, TH Darmstadt, 1996	50,-- DM
*WA*R 94	Dickhaut, Wolfgang: Möglichkeiten und Grenzen der Erarbeitung von Umweltqualitätszielkonzepten in kooperativen Planungsprozessen. - Durchführung und Evaluierung von Projekten-. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt 1996	60,-- DM
*WA*R 95	Lautner, Gerd: Einführung in das Baurecht. 8. erweiterte und aktualisierte Auflage, TH Darmstadt, 1997	30,-- DM
*WA*R 96	Reichert, Joachim: Bilanzierung des Sauerstoffeintrags und des Sauerstoffverbrauchs mit Hilfe der Abluftmethode. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt 1997	90,-- DM
*WA*R 97	Kuchta, Kerstin: Produktion von Qalitätsgütern in der Abfallbehandlung. Dargestellt am Beispiel der Produktion in der thermischen Abfallbehandlung. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt 1997	60,-- DM
*WA*R 98	Görg, Horst: Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrom-betrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1997	90,-- DM

*WA*R 99	Tiebel-Pahlke, Christoph: Abfallentsorgungsplanung – Beeinflussung der Umweltauswirkungen von Deponien. Dissertation, FB 13, TH Darmstadt, 1997	60,-- DM
*WA*R 100	Wagner, Martin: Sauerstoffeintrag und Sauerstoffertrag von Belüftungssystemen und deren Bestimmung mit modernen Meßmethoden. Habilitation, FB 13, TH Darmstadt, 1997	50,-- DM
*WA*R 101	Neue Trends bei der Behandlung und Entsorgung kommunaler und industrieller Klärschlämme. 8. gemeinsames Seminar -Abwassertechnik- mit der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar am 10. und 11.09.1997 in Weimar, TH Darmstadt, 1997	70,-- DM
*WA*R 102	Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen. 52. Darmstädter Seminar -Abwassertechnik- am 06.11.1997 in Darmstadt, TU Darmstadt, 1997	70,-- DM
*WA*R 103	Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen. 53. Darmstädter Seminar -Wasserversorgung- am 13.11.1997 in Darmstadt mit dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. –DVGW-, TU Darmstadt, 1997	60,-- DM
*WA*R 104	Wünschmann, Gabriele: Untersuchungen zur Kompostierbarkeit von Reststoffen der Papierindustrie und Altpapier unter besonderer Berücksichtigung von Schadstoffbilanzierungen. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 1997	50,-- DM
*WA*R 105	Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen. 54. Darmstädter Seminar -Abfalltechnik- am 06.02.1998 in Darmstadt mit dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit und der Südhessischen Arbeitsgemeinschaft Abfall-wirtschaft (SAGA)-. TU Darmstadt, 1998	80,-- DM
*WA*R 106	Zentrale oder dezentrale Enthärtung von Trinkwasser – Konkurrenz oder sinnvolle Ergänzung ? 55. Darmstädter Seminar -Wasserversorgung- am 14.05.1998 in Darmstadt mit dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. -DVGW- TU Darmstadt, 1998	70,-- DM
*WA*R 107	Dach, Joachim: Zur Deponiegas- und Temperaturentwicklung in Deponien mit Siedlungsabfällen nach mechanisch-biologischer Abfallbehandlung. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 1998	70,-- DM

*WA*R 108	Einsparung von Kosten für Betriebsmittel, Energie und Personal auf Abwasserbehandlungsanlagen. 9. gemeinsames Seminar -Abwassertechnik- am 16. und 17.09.1998 in Weimar mit der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, TU Darmstadt, 1998	80,-- DM
*WA*R 109	Fortschritte in der Abwassertechnik – 15 Jahre Forschungs- und Entwicklungstätigkeit von Prof. Dr.-Ing. H. Johannes Pöpel. 56. Darmstädter Seminar -Abwassertechnik- am 05.11.1998 in Darmstadt TU Darmstadt, 1998	80,-- DM
*WA*R 110	Qualitativer und Quantitativer Grundwasserschutz –Stand und Perspektiven-. 57. Darmstädter Seminar -Wasserversorgung- am 10.06.1999 in Darmstadt mit dem D eutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. -DVGW- TU Darmstadt, 1999	70,-- DM
*WA*R 111	Schwing, Elke: Bewertung der Emissionen der Kombination mechanisch-biologischer und thermischer Abfallbehandlungsverfahren in Südhessen. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 1999	60,-- DM
*WA*R 112	Schade, Bernd: Kostenplanung zur Analyse der Wirtschaftlichkeit von biologischen Restabfall-behandlungsanlagen. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 1999	60,-- DM
*WA*R 113	Lohf, Astrid: Modellierung der chemisch-physikalischen Vorgänge im Müllbett von Rostfeuerungsanlagen. Dissertaton, FB 13, TU Darmstadt, 1999	50,-- DM
*WA*R 114	Stackelberg, Daniel von: Biologische Festbettdenitrifikation von Grundwasser mit abbaubarem Trägermaterial. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 1999	60,-- DM
*WA*R 115	Folgerungen aus 10 Jahren Abwasserbeseitigung in den neuen Bundesländern -Erfahrungen und Perspektiven- 10. gemeinsames Seminar –Abwassertechnik- am 01. und 02.09.1999 in Weimar mit der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, TU Darmstadt, 1999	80,-- DM
*WA*R 116	Abwasserwiederverwendung in wasserarmen Regionen - Einsatzgebiete, Anforderungen, Lösungsmöglichkeiten -. 58. Darmstädter Seminar --Abwassertechnik- am 11.11.1999 in Darmstadt, TU Darmstadt, 1999	70,-- DM

*WA*R 117	Reinhardt, Tim: Untersuchungen zur Dynamik biologischer Prozesse in drei-Phasen-Systemen am Beispiel der Restabfallrotte unter besonderer Berücksichtigung anaerober Teilprozesse. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 1999	60,-- DM
*WA*R 118	Umweltfachpläne und Umweltgesetzbuch -Ein Beitrag zur Fortentwicklung des Umweltfachplanungssystems- und „Von der Landschaftsplanung zur Umweltleitplanung?" 46. Darmstädter Seminar -Umwelt- und Raumplanung- am 28.09.1995 in Darmstadt, TU Darmstadt, 1999	60,-- DM
*WA*R 119	Herr, Christian: Innovative Analyse und primärseitige Prozeßführungsoptimierung thermischer Abfallbehandlungsprozesse – am Beispiel der Mülleingangsklassifizierung bei der Rostfeuerung. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 2000	65,-- DM
*WA*R 120	Neumüller, Jürgen: Wirksamkeit von Grundwasserabgaben für den Grundwasserschutz – am Beispiel des Bundeslandes Hessen. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 2000	70,-- DM
*WA*R 121	Hunklinger, Ralph: Abfalltechnische Kennzahlen zur umweltgerechten Produktentwicklung. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 2000	60,-- DM
*WA*R 122	Wie zukunftsfähig sind kleinere Wasserversorgungsunternehmen? 60. Darmstädter Seminar -Wasserversorgung- am 29. Juni 2000 in Darmstadt. TU Darmstadt, 2000	70,-- DM
*WA*R 123	Massnahmen zur Betriebsoptimierung von Pumpwerken, Kanalisationssystemen und Abwasserbhandlungsanlagen. 11. gemeinsames Seminar -Abwassertechnik- in Weimar am 20. und 21. September 2000 mit der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar. TU Darmstadt, FB 13, 2000	80,-- DM
*WA*R 124	Mohr, Karin: Entwicklung einer on-line Emissionsmeßtechnik zur quasi-kontinuierlichen Bestimmung von Organohalogen-Verbindungen in Abgasen thermischer Prozesse. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 2000	60,-- DM
*WA*R 125	El Labani, Mamoun: Optimierte Nutzung bestehender Abfallverbrennungsanlagen durch Errichtung vorgeschalteter Reaktoren zur Behandlung heizwertreicher Abfälle. Dissertation, FB 13, TU Darmstadt, 2000	50,-- DM