

(19)



österreichisches
patentamt

(10)

AT 501 170 A4 2006-07-15

(12)

Österreichische Patentanmeldung

(21) Anmeldenummer:

A 539/2005

(51) Int. Cl.⁸: G01N 33/22 (2006.01)

(22) Anmeldetag:

30.03.2005

(43) Veröffentlicht am:

15.07.2006

(73) Patentanmelder:

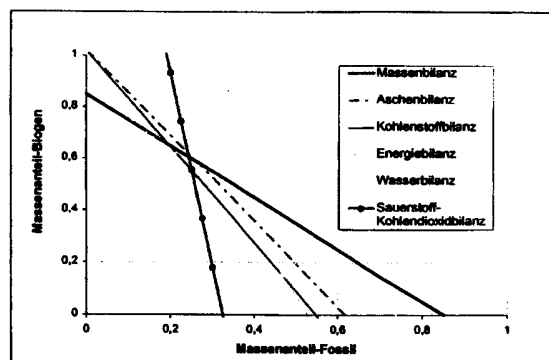
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
A-1040 WIEN (AT)

(72) Erfinder:

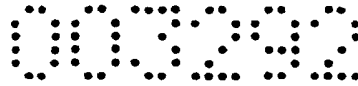
FELLNER JOHANN DIPL.ING. DR.TECHN.
WIEN (AT)
RECHBERGER HELMUT DR.
WIEN (AT)
CENCIC OLIVER DIPL.ING.
PETRONELL (AT)

(54) **VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG DER ANTEILE BIOGENER UND FOSSILER ENERGIETRÄGER SOWIE BIOGENER UND FOSSILER KOHLENDIOXIDEMISSIONEN BEIM BETRIEB VON VERBRENNUNGSANLAGEN**

(57) Die Erfindung bezieht sich auf Verfahren zur Ermittlung der Anteile biogener und fossiler Energieträger sowie biogener und fossiler Kohlendioxidemissionen beim Betrieb von Verbrennungsanlagen. Um eine genaue Bestimmung der einzelnen Anteile zu ermöglichen, erfolgt die Ermittlung der Anteile durch die Bestimmung von zumindest drei der folgenden Bilanzen, der Massenbilanz, der Aschenbilanz, der Kohlenstoffbilanz, der Energiebilanz, der Bilanz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion und der Wasserbilanz.



AT 501 170 A4 2006-07-15



P42865

C1

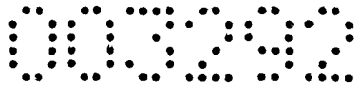
- 48 -

Zusammenfassung

Die Erfindung bezieht sich auf Verfahren zur Ermittlung der Anteile biogener und fossiler Energieträger sowie biogener und fossiler Kohlendioxidemissionen beim Betrieb von Verbrennungsanlagen.

Um eine genaue Bestimmung der einzelnen Anteile zu ermöglichen, erfolgt die Ermittlung der Anteile durch die Bestimmung von zumindest drei der folgenden Bilanzen, der Massenbilanz, der Aschenbilanz, der Kohlenstoffbilanz, der Energiebilanz, der Bilanz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion und der Wasserbilanz.

(Fig. 7)



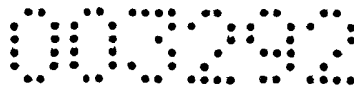
**Verfahren zur Ermittlung der Anteile biogener und fossiler Energieträger sowie
biogener und fossiler Kohlendioxidemissionen
beim Betrieb von Verbrennungsanlagen**

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der Anteile biogener und fossiler Energieträger sowie biogener und fossiler Kohlendioxidemissionen beim Betrieb von Verbrennungsanlagen.

Die Betreiber von Müllverbrennungsanlagen bzw. Mitverbrennungsanlagen (darunter
10 versteht man, eine Verbrennungsanlage, in der Abfälle als Ersatz- oder Zusatzbrennstoff bis zu 40 % der in einem Kalendervierteljahr tatsächlich zugeführten durchschnittlichen Gesamtbrennstoffwärmeleistung eingesetzt werden) mit Stromauskoppelung sind gesetzlich verpflichtet, die während vorgegebener Zeiträume eingesetzten Primärenergieträger auszuweisen. Hintergrund ist, dass die bei der Verbrennung von
15 Abfällen erzeugte elektrische Energie von verschiedenen Primärenergieträgern stammt. Zum einen ist dies Biomasse wie Holz, Papier, Küchen- und Gartenabfälle udgl., zum anderen fossile Brennstoffe, wie insbesondere Kunststoffe, die aus Erdöl hergestellt werden.

Analog zur Stromkennzeichnung wird es zukünftig im Rahmen des
20 Emissionszertifikatshandels für alle Betreiber von Müllverbrennungsanlagen bzw. Mitverbrennungsanlagen erforderlich sein, biogene und fossile Kohlendioxidemissionen auszuweisen.

Um der bestehenden (und zukünftigen) gesetzlichen Verpflichtung nachzukommen, war es
25 im Stand der Technik bekannt, Abfallsortieranalysen zu betreiben und den einzelnen Abfallfraktionen einen biomassebürtigen bzw. einen erdölproduktbürtigen Heizwert (bzw. Kohlenstoffgehalt) zuzuordnen. Dieses Verfahren ist nicht nur kostspielig, für die durchführenden Personen äußerst unangenehm und unter Umständen gefährlich, sondern es ist auch mit großen Unsicherheiten behaftet, die einerseits auf die unsichere Bewertung
30 der Heizwerte der einzelnen Fraktionen, andererseits auf kaum erfassbare jahreszeitliche Schwankungen in der Abfallzusammensetzung zurückgeht. Schließlich tritt auch eine allgemeine längerfristige Drift der Zusammensetzung des Abfalls durch Änderungen im Einzugsgebiet der Müllverbrennungsanlage, durch Änderungen in den



Lebensgewohnheiten der Personen, deren Abfall verbrannt wird und letztlich auch durch rechtliche Änderungen auf, die so nicht erfasst werden können. Derartige rechtliche Änderungen können beispielsweise Änderungen im Recyclingsystem sein, wenn etwa ab einem gesetzlich vorgegebenen Zeitpunkt nicht mehr aller Kunststoffmüll gesammelt und
5 recycelt wird, sondern nur mehr PET-Flaschen, und die anderen Kunststoffe der Verbrennung zugeführt werden.

Es ist nun ein Ziel der Erfindung, ein Verfahren der eingangs genannten Art anzugeben, das die genannten Nachteile nicht aufweist und es erlaubt, genauere Werte zu erhalten
10 bzw. auch Aussagen über längere Zeiträume machen zu können. All dies soll mit geringem Aufwand möglich sein und insbesondere den Betrieb der Verbrennungsanlage nicht beeinträchtigen.

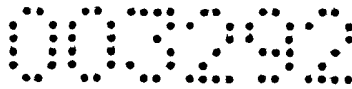
Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe mit einem eingangs erwähnten Verfahren
15 dadurch gelöst, dass die Ermittlung der Anteile durch die Bestimmung von zumindest drei der folgenden Bilanzen erfolgt, der Massenbilanz, der Aschenbilanz, der Kohlenstoffbilanz, der Energiebilanz, der Bilanz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion und der Wasserbilanz.

20 Die einzelnen Bilanzen können auf einfache Weise ermittelt werden, wodurch auch jahreszeitlichen Schwankungen in der Abfallzusammensetzung Rechnung getragen werden kann. Die Einbeziehung mehrerer unterschiedlicher Bilanzen liefert sehr genaue Resultate für die Anteile der einzelnen Brennwertanteile bzw. für die Anteile der biogenen und fossilen Kohlendioxidemissionen.

25

Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen bzw. Fehlergrenzen exakter angeben zu können, erfolgt die Ermittlung der Brennwertanteile zusätzlich durch die Bestimmung zumindest einer weiteren Bilanz.

30 In einer bevorzugten Variante der Erfindung ist das Verfahren dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung der Anteile durch die Bestimmung der Massenbilanz, der Aschenbilanz, der Kohlenstoffbilanz, der Energiebilanz, der Bilanz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion erfolgt. Diese fünf Bilanzen



können besonders gut bestimmt werden und liefern daher auch sehr genaue Daten mit geringen Fehlergrenzen.

Im anschließenden Ausführungsbeispiel ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, dass die Anteile mittels Ausgleichsrechnung ermittelt werden. Die
5 Ausgleichsrechnung stellt ein effizientes Instrument zur Bestimmung von Unbekannten in einem überbestimmten System dar.

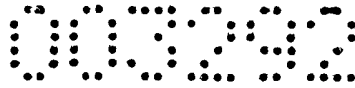
In einer Variante ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, dass die
10 Anteile mittels Monte Carlo Simulation ermittelt werden. Dadurch können die bei komplizierten Bilanzgleichungen auftretenden nichtlinearen Ausgleichrechnungen vermieden bzw. umgangen werden.

Die Erfindung wird im Folgenden an Hand der theoretischen Überlegung und schließlich
15 eines praktischen Beispiels näher erläutert, ohne auf dieses beschränkt zu sein. Die verwendete Anzahl bzw. Kombination von Bilanzgleichungen zur Bestimmung der Anteile kann selbstverständlich variiert werden.

Begriffsdefinitionen Energieinhalt

20 Der obere Heizwert H_o (auch Brennwert) und der untere Heizwert H_u (auch Heizwert) eines Brennstoffes sind Maße für die bei der vollständigen Verbrennung frei werdenden Wärmemengen.

Nach DIN 51900 ist der obere Heizwert (Brennwert) definiert als der Quotient aus der bei
25 vollständiger und vollkommener Verbrennung einer bestimmten Masse eines festen oder flüssigen Brennstoffes frei werdenden Wärmemenge und der Masse des Brennstoffes, wenn die Temperatur des Brennstoffes vor dem Verbrennen und die seiner Verbrennungsrückstände 25°C beträgt, wenn das vor dem Verbrennen im Brennstoff vorhandene Wasser und das beim Verbrennen der wasserstoffhaltigen Verbindungen des
30 Brennstoffes gebildete Wasser nach der Verbrennung im flüssigen Zustand vorliegen. Außerdem müssen die Verbrennungserzeugnisse des Kohlenstoffs und des Schwefels als Kohlendioxid und als Schwefeldioxid in gasförmigen Zustand vorliegen.



- Der untere Heizwert H_u unterscheidet sich vom oberen Heizwert H_o im Wesentlichen dadurch, dass das Wasser nach der Verbrennung im gasförmigen Zustand vorliegt, d.h. der untere Heizwert ist gegenüber dem oberen Heizwert um die Verdampfungswärme des Wassers reduziert.

Heizwert bzw. Brennwertbestimmung

- Die Bestimmung des Brennwertes eines Brennstoffs kann experimentell oder mathematisch über Näherungsgleichungen (bei Kenntnis der Elementarzusammensetzung) erfolgen. Bei der experimentellen Bestimmung wird zwischen Messungen im Labor mittels Kalorimetern und Messungen an großtechnischen Versuchsanlagen unterschieden.

Für die Bestimmung des Brenn- bzw. Heizwertes von Abfällen (üblicherweise ein Gemisch aus verschiedenen Brennstoffen) sind folgende Methoden denkbar:

- Experimentell aus den Betriebsdaten bei der Verbrennung der Abfälle: der Heizwert errechnet sich aus der Energiebilanz der Verbrennungsanlage
- Brennwertberechnung anhand der Einzelfractionen der Abfälle: der Brennwert des Abfalls ergibt sich aus den Massenanteilen der Einzelfractionen und den dazugehörigen Brennwerten der Fractionen

$$H_{o,ges} = \sum m_{Br,E} \cdot H_{o,E}$$

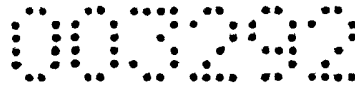
$H_{o,ges}$ Brennwert des Abfalls [MJ/kg FS]

$m_{Br,E}$ Massenanteil der Einzelfractionen im Abfall [kg/kg]

$H_{o,E}$ Brennwert der Einzelfractionen [MJ/kg FS]

- Brennwertbestimmung über die Elementarzusammensetzung der Abfälle: der Brennwert des Abfalls wird mit Hilfe empirischer Formeln in die Gehalte an C, H, O, S und N einfließen, abgeschätzt.

Tabelle 1 Empirische Formeln zur Berechnung des Brenn- bzw. Heizwertes eines Brennstoffs (bei Kenntnis der Elementarzusammensetzung)



Literatur	Brennwert bzw. Heizwert [MJ/kg FS]
Michel (1938)	$H_o = 34,889 \cdot c_C + 124,348 \cdot c_H - 10,467 \cdot c_O + 6,28 \cdot c_N + 19,092 \cdot c_S$
Dulong (zitiert in Beiz & Küttner, 1986)	$H_o = 34,827 \cdot c_C + 144,267 \cdot c_H - 18,0337 \cdot c_O + 9,420 \cdot c_S$
Boie (1957)	$H_u = 34,834 \cdot c_C + 93,868 \cdot c_H - 10,802 \cdot c_O + 6,28 \cdot c_N + 10,467 \cdot c_S - 2,449 \cdot c_{H20}$
Verbandsformel (zitiert in Beiz & Küttner, 1986)	$H_u = 33,913 \cdot c_C + 121,417 \cdot c_H - 115,177 \cdot c_O + 10,467 \cdot c_S - 2,512 \cdot c_{H20}$

$c_C, c_H, c_O, c_N, c_S, c_{H20}$ Gehalt an Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel und Wasser des Brennstoffs [kg/kg FS]

H_u, H_o Heizwert bzw. Brennwert des Brennstoffs [MJ/kg FS]

5

Tabelle 1 beinhaltet eine Auswahl bekannter Formeln zu Berechnung des Energieinhaltes von Brennstoffen. Eine exakte Berechnung des Brennwertes ist mithilfe dieser Methode allerdings nicht möglich, da die chemischen Bindungsformen in den Formeln im Einzelfall nicht berücksichtigt werden. Jede Brennstoffformel gilt daher für eine gewisse Art von Brennstoffen.

10

Ein Vergleich (Kost, 2001) von berechneten mit „gemessenen“ Brenn- bzw. Heizwerten von Abfällen zeigt jedoch, dass mithilfe der empirischen Näherungsgleichungen der Brennwert gut abgeschätzt werden kann. Die beste Annäherung an experimentell bestimmte Heizwerte wurde mithilfe der Formeln von Boie (1957) und Michel (1938) erzielt. Allerdings kommt es auch bei Verwendung dieser Formeln zu einer generellen Überschätzung des Brenn- bzw. Heizwertes (siehe Fig. 1) von Abfällen. Diese Brennwertüberschätzung drückt sich in Fig. 1 in einem negativen „offset“ der linearen Regressionsgeraden (y-Achsenabschnitt) aus. Bei Verwendung empirischer Näherungsgleichungen zur Heizwertbestimmung von Abfällen empfiehlt es sich daher diesen „Fehler (Überschätzung)“ auszugleichen.

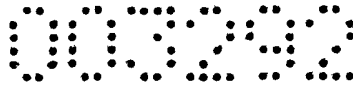
15

20

Biomassebürtiger Teil des Heizwertes von Abfällen

Der Energieinhalt (Brennwert) von Abfällen (Restmüll, Gewerbemüll) beruht auf erneuerbarer organischer Substanz (Biomasse wie Holz, Papier, Küchen- und Gartenabfälle) und nicht erneuerbarer organischer Substanz (z.B. Kunststoffe). Zur Abschätzung der jeweiligen Anteile (Biomasse und fossile Energieträger) des Brennwertes am

25



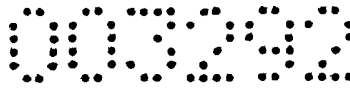
Gesamtbrennwert eignet sich prinzipiell sowohl die Brennwertbestimmung über die Einzelfractionen als auch die Berechnung über die Elementarzusammensetzung.

Bei der Berechnung des biomassebürtigen Anteils am Heizwert über Einzelfractionen müssen die Brennwerte der verschiedenen Fractionen den beiden Primärenergieträgern zugeordnet werden. Dagegen sind bei der Bestimmung anhand der Elementarzusammensetzung separate Angaben über die stoffliche Zusammensetzung (C, H, S, N, O, H₂O) der Biomasse und der fossilen Energieträger im Abfall erforderlich.

10 **Bestehende Ansätze zur Bestimmung des biomassebürtigen Brennwertanteils**

Im Stand der Technik bekannte Studien (Würdinger et al., 1997; TBHauer, 2000) zur Bestimmung des regenerativen Anteils an Primärenergieträgern bei der thermischen Verwertung von Restmüll beruhen auf der Brennwertberechnung anhand von Einzelfractionen, wobei die Brennwerte der einzelnen Fractionen den Primärenergieträgern zugeordnet wurden. Die Vorgangsweise dieser Methode gliedert sich im Detail in folgende Arbeitsschritte:

1. Bestimmung der Abfallzusammensetzung (Fractionen) durch Sortieranalysen bzw. basierend auf Literaturdaten
 2. Bewertung der einzelnen Abfallfractionen mit Heizwerten
 3. Zuordnung der einzelnen Heizwerte zu den beiden Primärenergieträgern Biomasse und Erdölprodukte
 4. Berechnung des Gesamtheizwertes des betrachteten Abfalls
 5. Berechnung der Heizwertanteile von Biomasse und Erdölprodukten des betrachteten Abfalls
- Der auf diese Weise bestimmte biomassebürtige Heizwertanteil liegt je nach betrachteter Anlage und behandeltem Abfall zwischen 25 und 50 % (Würdinger et al., 1997, TBHauer, 2000, 2002). Die Unsicherheiten der Resultate, die sich bei Verwendung dieser Methode ergeben, beruhen einerseits auf der „unsicheren“ Datenlage hinsichtlich der Abfallzusammensetzung und andererseits auf der eingeschränkten Verlässlichkeit von Brennwert- bzw. Heizwertangaben für die einzelnen Abfallfractionen. Darüber hinaus ist die Zuordnung der Heizwerte zu Biomasse bzw. fossilen Energieträgern bei verschiedenen Abfallfractionen schwierig durchzuführen und mit erheblichen Unsicherheiten behaftet



(z.B.: Verbundstoffe oder Hygienewaren). Ein weiterer Punkt der wesentlich zur Unschärfe des Ergebnisses beiträgt, ist der unspezifizierbare Rest bei Abfallsortieranalysen, dem schwierig ein Heizwert zugeordnet werden kann.

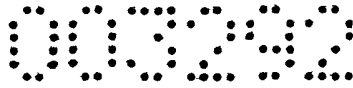
- 5 Die Unsicherheiten dieser Methode zur Bestimmung des biomassebürtigen Heizwertanteils von Abfällen lassen sich durch aufwendige Sortieranalysen und anschließende Heizwertbestimmung der einzelnen Fraktionen verringern. Allerdings können selbst bei Durchführung aufwendiger Sortier- und Heizwertanalysen des in der betrachteten Anlage behandelten Abfalls, jahreszeitliche Schwankungen der Abfallzusammensetzung kaum quantifiziert und
- 10 berücksichtigt werden. Untersuchungen von Morf et al. (2004) zeigen allerdings, dass mit starken zeitlichen Schwankungen der Abfallzusammensetzung zu rechnen ist. Es ist daher davon auszugehen, dass durch einzelne Sortieranalysen nur sehr ungenaue Resultate erzielt werden können.

15 **Bestehende Ansätze zur Bestimmung des biogenen und fossilen Kohlenstoffgehalts bzw. der Kohlendioxidemissionen**

Die Bestimmung der „biogenen“ bzw. „fossilen“ Kohlendioxidemissionen bei der Müllverbrennung erfolgte bisher analog zu den oben beschriebenen Verfahren für die Brennwertanteile:

- 20 1. Bestimmung der Abfallzusammensetzung (Fraktionen) durch Sortieranalysen bzw. basierend auf Literaturdaten
2. Bewertung der einzelnen Abfallfraktionen mit Kohlenstoffgehalten
3. Zuordnung der einzelnen Kohlenstoffgehalte hinsichtlich ihres Ursprungs (biogen oder fossil)
- 25 4. Berechnung des gesamten Kohlenstoffgehalts des betrachteten Abfalls
5. Berechnung der Anteile des Kohlenstoffgehalts von Biomasse und Erdölprodukten des betrachteten Abfalls
6. Berechnung der „biogenen“ und „fossilen“ Kohlendioxidemissionen

- 30 Alternativ dazu kann die sogenannte C14-Methode angewandt werden: Die WO 02/06730 A1 offenbart ein Verfahren zur Bestimmung des Verhältnisses von erneuerbaren zu nicht erneuerbaren Energieträgern in einem Brennstoffgemisch, bei dem



der Anteil instabiler radioaktiver Elemente, wie z.B. C14, bestimmt wird. Während der C14-Gehalt bei nicht erneuerbaren Energieträger wie Öl, Gas und Kohle verschwindend klein und daher vernachlässigbar ist, weisen erneuerbare kohlenstoffhaltige Energieträger wie Holz ein geringes Alter und daher messbare Anteile von C14 auf. Die Messung des

5 Isotopenverhältnisses erfolgt beispielsweise im Abgasstrom über das CO₂. Das Isotopenverhältnis bzw. der Anteil von C14 wird entweder direkt mit Massenspektrometern ermittelt oder nach einer Umwandlung von CO₂ mittels Proportional- oder Flüssigkeitszählrohren. Diese Methode erfordert jedoch eine Vielzahl von kostspieligen und empfindlichen Messgeräten, mit denen die Verbrennungsanlage nachträglich

10 ausgestattet werden muss und die einer regelmäßigen Wartung bedürfen.

Neue Methode zur Bestimmung des biomassebürtigen Brennwertanteils bzw. der biomassebürtigen Kohlendioxidemissionen bei der Verbrennung von Abfällen

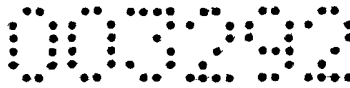
Aufgrund der angeführten Mängel bisheriger Studien bzw. Verfahren zur Bestimmung des

15 biomassebürtigen Anteils am Heizwert von Abfällen (bzw. der biomassenbürtigen Kohlendioxidemissionen) wurde diese neue Methode entwickelt. Ein Ziel dieser Methode ist es, jahreszeitliche Änderungen der Müllzusammensetzung (z.B.: höherer Strauchschnittanteil im Sommer) erfassen zu können und bei der Berechnung zu berücksichtigen.

20 Der neue Ansatz basiert auf der Methode der Heizwertbestimmung mittels Elementarzusammensetzung. Es wird dabei die Kenntnis der stofflichen Zusammensetzung von Biomasse und fossilen Energieträgern genutzt, um den biomassebürtigen Heizwertanteil der behandelten Abfälle abschätzen zu können. Die Ergebnisse bzw. Eingangsdaten der angestellten Berechnungen werden mit den Betriebsparametern (z.B.: CO₂-Konzentration

25 im Reingas, Reingasmenge, Dampfmenge,...) und verschiedenen Monitoringgrößen (z.B.: Menge an Schlacke,...) der Verbrennungsanlagen abgeglichen. Diese Vorgangsweise soll es ermöglichen, dass jahreszeitliche Änderungen in der Abfallzusammensetzung in der Berechnung Berücksichtigung finden.

30 Im Konkreten stützt sich die neue Methode auf fünf Bilanzgleichungen, die „theoretisch“ hergeleitet sind. Die Ergebnisse dieser Gleichungen sind mit den auf der Verbrennungsanlage gemessenen Güter-, Stoff- und Energiebilanzen in Übereinstimmung



zu bringen. Für die „theoretischen“ Bilanzgleichungen werden die unterschiedlichen Materialien des Abfalls in drei „Stoffgruppen“: Inert (z.B.: Glas, Metalle), Biogen (z.B.: Papier, Küchenabfälle, ...) und Fossil (z.B.: Kunststoff, bzw. Kunststoffanteile in Textilien, Hygieneartikeln, ...) unterteilt. Diese drei Gruppen bzw. deren Massenanteile
5 stellen die unbekannten Größen dar, die es zu bestimmen gilt. In weiterer Folge kann bei Kenntnis dieser Größen und der Elementarzusammensetzung der drei Gruppen der biomassebürtige Anteil des Heizwertes (bzw. die biomassenbürtigen Kohlendioxidemissionen) berechnet werden.

10 Theoretische Güter-, Stoff-, und Energiebilanzen

Sämtliche Einheiten sowie Erklärungen der verwendeten Formelzeichen sind am Ende des Ausführungsbeispiels zusammengefasst.

1) Massenbilanz:

15 Die Gesamtmasse ergibt sich aus der Summe der Masse an inertem Material M_I , Masse an biogenem Material M_B und Masse an fossilem Material M_F . Bezogen auf die gesamte Abfallmasse M_{Abfall} ergibt sich folgende Gleichung:

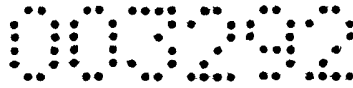
$$m_I + m_B + m_F = 1$$

20

$$m_I = \frac{M_I}{M_{Abfall}} \quad m_B = \frac{M_B}{M_{Abfall}} \quad m_F = \frac{M_F}{M_{Abfall}}$$

2) „Aschen“-Bilanz:

Der Aschegehalt des Abfalls errechnet sich aus den Aschegehalten der drei Gruppen Inert,
25 Biogen und Fossil. Wertebereiche für die Aschegehalte dieser drei Fraktionen lassen sich wiederum aus Sortieranaysen und Literaturangaben ableiten. Der „theoretisch“ errechnete Aschegehalt a_A des Abfalls muss mit den Schlacken- und Aschenmengen, die bei der Verbrennung anfallen, übereinstimmen. Angestellte Berechnungen zur Massenänderung von „inerten“ Materialien durch beispielsweise die Oxidation von Metallen (Aluminium)
30 zeigen, dass diese Oxidationsprozesse für die Aschebilanz unerheblich sind. Ebenso ist der



Gehalt an Rauchgasreinigungsmitteln (CaO bzw. NaO) in den Rückständen (Aschen) für die Bilanz unbedeutend.

$$m_I \cdot a_I \cdot (1 - w_I) + m_B \cdot a_B \cdot (1 - w_B) + m_F \cdot a_F \cdot (1 - w_F) = a_A \cdot (1 - w_A)$$

5

3) Kohlenstoffbilanz:

Der Kohlenstoffgehalt des Abfalls c_{CA} ergibt sich aus den einzelnen Kohlenstoffgehalten der drei Fraktionen Inert, Biogen und Fossil. Wertebereiche für die Kohlenstoffgehalte dieser drei Fraktionen lassen sich wiederum aus Sortieranalysen und Literaturangaben ableiten. Dieser rechnerisch abgeleitete Kohlenstoffgehalt des Abfalls muss mit dem mittleren Kohlenstoffgehalt des Abfalls c_{CA} übereinstimmen, der sich aus der Reingasmenge, der CO_2 Konzentration und dem Kohlenstoff-Transferkoeffizienten im Reingas $T_{C,R}$ ermitteln lässt (Morf et al., 1997).

15

$$m_B \cdot c_{C_B} \cdot (1 - w_B) \cdot (1 - a_B) + m_F \cdot c_{C_F} \cdot (1 - w_F) \cdot (1 - a_F) = c_{C_A}$$

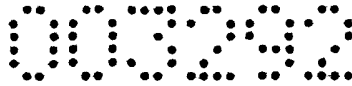
4) Energie-Bilanz:

$$m_I \cdot (-2,449 \cdot w_I) + m_B \cdot \left(\left(34,834 \cdot c_{C_B} + 93,868 \cdot c_{H_B} - 10,802 \cdot c_{O_B} + \right. \right. \\ \left. \left. + 6,28 \cdot c_{N_B} + 10,467 \cdot c_{S_B} \right) \cdot (1 - w_B) \cdot (1 - a_B) - 2,449 \cdot w_B \right) + \\ + m_F \cdot \left(\left(34,834 \cdot c_{C_F} + 93,868 \cdot c_{H_F} - 10,802 \cdot c_{O_F} + \right. \right. \\ \left. \left. + 6,28 \cdot c_{N_F} + 10,467 \cdot c_{S_F} \right) \cdot (1 - w_F) \cdot (1 - a_F) - 2,449 \cdot w_F \right) = H_{u,A,B}$$

20

Der untere Heizwert des Abfalls kann über die Elementarzusammensetzung der drei Fraktionen Inert, Biogen und Fossil bestimmt werden, wobei dafür unterschiedliche empirische Gleichungen (siehe Tabelle 1) herangezogen werden können. Im Konkreten wird der Formel von Boie (1957) der Vorzug gegeben, da bei Verwendung dieser Formel die „geringsten Korrekturen“ für eine Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Heizwerten von Abfällen notiert wurde (Kost, 2001). Die berücksichtigende Korrekturgleichung für den Heizwert nach Boje lautet gemäß den Ergebnissen von Kost (2001) folgendermaßen:

25



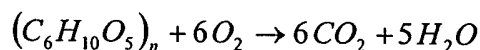
$$H_{u,A} = 0,9806 \cdot H_{u,A,B} - 0,495$$

Dieser „rechnerisch“ ermittelte Heizwert (abgeleitet aus der Elementarzusammensetzung und vermindert gemäß Kost, 2001) muss mit dem Heizwert des Abfalls übereinstimmen, der sich aus den Betriebsdaten der MVA (Dampfmenge, Wirkungsgrade, Dampfdruck, Dampftemperatur, Temperatur bzw. Druck im Kondensator) errechnen lässt.

5) „Sauerstoffverbrauchs- und Kohlendioxidproduktions“-Bilanz

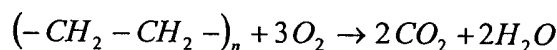
- 10 Ein eindeutiger Unterschied bei der Verbrennung von biogenen und fossilen Materialien ist der Verbrauch von O_2 und die gleichzeitige Produktion von CO_2 .

Bei der Verbrennung von Biomasse (hier angenommen: Zellulose) werden pro Glukoseeinheit 6 Moleküle O_2 verbraucht und dabei 6 Moleküle CO_2 produziert. Die Molsumme aus Sauerstoff und Kohlendioxid ist damit vor und nach der Verbrennung ident.



- 20 Bei der Verbrennung von Kunststoffen (hier angenommen: Polyethylen) werden pro Ethyleneinheit 3 Moleküle O_2 verbraucht und dabei 2 Moleküle CO_2 produziert. Der restliche Sauerstoff wird zu Oxidation des Wasserstoffs benötigt. Die Molsumme aus Sauerstoff und Kohlendioxid in der Luft vor der Verbrennung ist damit größer als nach der Verbrennung.

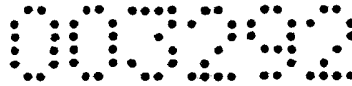
25



Dieser Unterschied in der Zusammensetzung des Rauchgases kann zur Bestimmung des Anteils an Biomasse bzw. fossilen Materialien im behandelten Abfall verwendet werden.

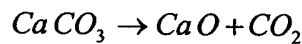
30

In Gleichungsform ausgedrückt ergibt sich für das beschriebene Phänomen folgende Schreibweise:



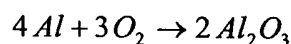
$$m_B \cdot (1 - w_B) \cdot (1 - a_B) \cdot \left(\frac{c_{H_B}}{4} - \frac{c_{O_B}}{32} + \frac{c_{N_B}}{14} + \frac{c_{S_B}}{32} \right) + \\ + m_F \cdot (1 - w_F) \cdot (1 - a_F) \cdot \left(\frac{c_{H_F}}{4} - \frac{c_{O_F}}{32} + \frac{c_{N_F}}{14} + \frac{c_{S_F}}{32} \right) = \Delta_{O_2+CO_2,g}$$

- In obiger Gleichung wurde durch die Vernachlässigung des Inertanteils angenommen, dass die inerte Stoffgruppe die selbe Menge an Sauerstoff verbraucht wie sie Kohlendioxid produziert. Diese Annahme lässt sich durch die folgenden Abschätzungen begründen:
- 5 Durch das Brennen von $CaCO_3$ zu CaO kann aus inerten Materialien CO_2 entstehen.

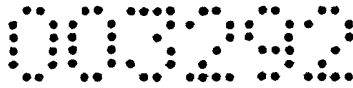


- 10 Bei einem mittleren Gehalt an $CaCO_3$ von 60 g/kg TS (berechnet nach Döberl et al., 2002) ergibt sich unter der Annahme, dass das Calciumcarbonat zu 50 % zu Calciumoxid gebrannt wird, eine CO_2 -Produktion von 0,3 mol/kg TS.

- Sauerstoff wird bei „inerten Stoffen“ zur Oxidation von Metallen verbraucht. Die
- 15 Hauptreaktion ist dabei die Oxidation von metallisch vorliegendem Aluminium zu Aluminiumoxid Al_2O_3 .



- 20 Bei einem mittleren Aluminiumgehalt von 20 g/kg TS (Skutan & Brunner, 2003) ergibt sich unter der Annahme, dass 50 % davon als metallisches Aluminium vorliegen und dieses vollständig zu Aluminiumoxid oxidiert wird, ein Sauerstoffverbrauch von 0,28 mol/kg TS.
- 25 Der Verbrauch von O_2 bzw. die Produktion von CO_2 und damit auch die Differenz dieser beiden Werte sind für inerte (anorganische) Stoffe im Vergleich zu den organischen Materialien (Biomasse oder Kunststoffe) vernachlässigbar. Für Biomasse etwa liegt die Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion bei rund 3 mol/kg TS und bei Kunststoffen bei ungefähr 18 mol/kg TS.



6) Wasserbilanz:

Ausgehend von den drei „Stoffgruppen“ ergibt sich der Wassergehalt des Abfalls w_A aus den einzelnen Wassergehalten von Inert, Biogen und Fossil. Wertebereiche für die Wassergehalte dieser drei Gruppen lassen sich aus Sortieranalysen und Literaturangaben ableiten.

$$m_I \cdot w_I + m_B \cdot w_B + m_F \cdot w_F = w_A$$

10

Da bei der Verbrennung von Abfällen durch die Oxidation von Wasserstoff zusätzliches Wasser gebildet wird, gilt es diese Wassermenge in der Bilanz ebenso zu berücksichtigen. Die durch Wasserstoffoxidation gebildete Wassermenge errechnet sich folgendermaßen:

$$\frac{18}{2} \cdot (m_B \cdot (1 - w_B) \cdot c_{H_B} + m_F \cdot (1 - w_F) \cdot c_{H_F}) = w_H$$

15

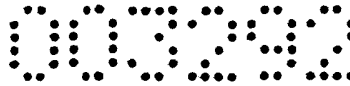
Die Summe beider rechnerisch ermittelter Wassermengen w_A und w_H muss mit dem „scheinbaren“ Wassergehalt des Abfalls w_S (beinhaltet den „eigentlichen“ Wassergehalt und jenes Wasser, das durch Wasserstoffoxidation entsteht), der sich aus den Betriebsdaten der Verbrennungsanlage (Wasserdampfgehalt im Reingas, Reingasmenge, Wasserbilanz des Wäschers) berechnen lässt, übereinstimmen.

20

$$w_A + w_H = w_S$$

Im Rahmen angestellter Berechnungen und Überlegungen zeigt sich, dass die Einbeziehung der Wasserbilanzgleichung für das zu bestimmende Ergebnis (biogener bzw. fossiler Anteil an Kohlenstoff bzw. Heizwert) von ungeordneter Bedeutung ist. Grund dafür ist einerseits die hohe Unsicherheit von Wasserbilanzen in Verbrennungsanlagen und andererseits der ähnliche Informationsgehalt (Stichwort: schleifender Schnitt siehe Fig. 7) im Vergleich zu den anderen Gleichungen. In einer Variante der Erfindung kann jedoch die Wasserbilanz sehr wohl als zusätzliche Bilanzgleichung in die Ermittlung der einzelnen Anteile aufgenommen werden.

30



„Messbare“ Güter-, Stoff und Energiebilanzen der Verbrennungsanlage

1) Massenermittlung:

- Die Masse des verbrannten Mülls wird bei der Aufgabe des Abfalls mit der direkt im Greifer des Müllkrans integrierten Kranwaage mechanisch - elektrisch gewogen. Die Masse des behandelten Mülls wird benötigt, um alle weiteren Betriebsdaten der Verbrennungsanlage auf die Abfallmenge beziehen zu können.

2) „Aschen“-Bilanz:

- Die Summe der Massen der festen Rückstände (Schlacke, Schrott, Kesselasche und Elektrofilterasche) aus der Verbrennungsanlage bezogen auf die Masse des Abfallinputs ergibt den Aschegehalt.

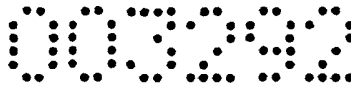
- Die Massen der einzelnen Rückstände werden diskontinuierlich durch Wägung erfasst. Da die Rückstände zwar trocken anfallen, jedoch vor ihrer Wägung verschiedene Behandlungsschritte durchlaufen, sind zur Bestimmung des Aschegehaltes zusätzlich zur Wägung der Massen, Angaben über den Wassergehalt der Rückstände (verursacht durch nasse Schlacken- und Aschenbehandlung) notwendig. Rauchgasreinigungsmittel (NaOH oder CaO) in den Rückständen (Aschen) sind mengenmäßig für die Bilanz unbedeutend.

$$a_A \cdot (1 - w_A) = \frac{M_{\text{Schlacke}} + M_{\text{Schrott}} + M_{\text{Kesselasche}} + M_{\text{EF-Asche}}}{M_{\text{Abfall}}}$$

3) Kohlenstoffbilanz:

- Bei Kenntnis des Kohlenstoff-Transferkoeffizienten (ins Reingas) lässt sich der Kohlenstoffgehalt des verbrannten Abfalls aus der Kohlendioxidfracht im Reingas berechnen. Die C-Fracht im Reingas muss jedoch um jene Kohlenstoffmenge verringert werden, die sich aus der Feuerung von eingesetzten Zusatzbrennstoffen (Ergas, Erdöl) ergibt.

- Im Routinebetrieb werden sowohl die Rauchgasmenge als auch die Kohlendioxidkonzentration online über das Leitsystem erfasst. Der Kohlenstoff-Transferkoeffizient von



Müllverbrennungsanlagen ins Reingas wurde in verschiedensten Studien (z.B: Morf et al., 1997) bestimmt. Dieser Transferkoeffizient liegt bei allen Anlagen in einem sehr engen Bereich (zwischen 0,95 und 0,99).

Mit dieser Information ist es möglich den Kohlenstoffgehalt des Abfalls laufend (ohne
5 zusätzlichen Messaufwand) zu ermitteln.

$$c_{C_A} = \frac{\left(V_R \cdot c_{CO_2,R} \cdot \frac{12}{44} - M_{Erdgas} \cdot c_{C,Erdgas} \right)}{M_{Abfall} \cdot T_{C,R}}$$

10 4) Energie-Bilanz:

Der Heizwert des Abfalls wird aus den Betriebsdaten, im Speziellen aus der produzierten Dampfmenge, der Netto-Enthalpie des Wassers im Kessel und dem Wirkungsgrad der Anlage berechnet. Die der Anlage über Zusatzbrennstoffe (Erdgas, Erdöl) zugeführte Energie ist ebenfalls zu berücksichtigen.

15

$$H_{u,A} = \frac{WD \cdot (h_T'' - h_K')}{M_{Abfall} \cdot \eta} - \frac{H_{u,Erdgas} \cdot M_{Erdgas}}{M_{Abfall}}$$

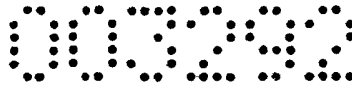
5) Sauerstoffverbrauchs- und Kohlendioxidproduktions“-Bilanz

Die Differenz aus O₂-Verbrauch und CO₂-Produktion bei Müllverbrennung lässt sich aus
20 den Betriebsdaten folgendermaßen berechnen:

$$\Delta_{O_2+CO_2,g} = \frac{(c_{O_2,L} + c_{CO_2,L}) - (c_{O_2,R} + c_{CO_2,R})}{100 \cdot m_v} \cdot \frac{V_R \cdot \left(\frac{79 + (c_{O_2,L} + c_{CO_2,L})}{79 + (c_{O_2,R} + c_{CO_2,R})} \right)}{M_{Abfall}}$$

6) Wasserbilanz:

Der mittlere Wassergehalt des Abfalls lässt sich anhand einer Wasserbilanzierung des
25 Systems Verbrennungsanlage (Verbrennung inkl. Kessel, E-Filter und nasser Rauchgasreinigung) ermitteln. Die einzelnen Güterflüsse dieses Systems (siehe Fig. 2) werden mit Ausnahme des Waschwasserinputs im Routinebetrieb laufend erfasst.



– **Wasserinput über Primärluft und Sekundärluft:**

Die Menge an Primär- und Sekundärluft wird als Volumenstrom bezogen auf Normalbedingungen mittels einer Venturidüse online gemessen und über das Leitsystem der Anlage erfasst. Bei Kenntnis der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte (wird
5 ebenfalls gemessen) lässt sich der Wasserinput über die Primär- und Sekundärluft folgendermaßen errechnen:

$$e = RF \cdot 0,6108 \cdot e^{\frac{(17,27 \cdot T)}{T_{Luft} + 237,3}}$$

$$a_{PL-SL} = \frac{m_{mol, H_2O}}{R} \cdot \frac{e}{273,15 + T_{Luft}}$$

10

$$a_{N, PL-SL} = \frac{T_{Luft} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_N}{p_{Luft}}$$

$$m_{H_2O, PL-SL} = V_{PL-SL} \cdot a_{N, PL-SL}$$

Eine vollständige Liste der verwendeten Formelzeichen findet sich im Anhang.

– **Wasserinput über den Abfall:**

15 Der Wassereintrag über den Abfall setzt sich zusammen aus dem „eigentlichen“ Wassergehalt des Mülls w_A und dem „chemischen“ Wasserinput w_H , der aus der anschließenden Oxidation des Wasserstoffs im Müll herrührt. Die Unbekannte, die es im Rahmen der Wasserbilanzierung zu berechnen gilt, ist die Summe w_S der beiden Wassereinträge.

20

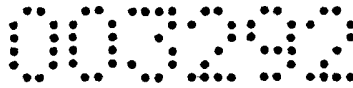
– **Wasserinput über Zusatzbrennstoffe:**

Der scheinbare Wassereintrag über Zusatzbrennstoffe (Erdöl, Erdgas) lässt sich aus der eingesetzten Brennstoffmenge und deren Gehalt an Wasserstoff folgendermaßen abschätzen.

25

$$m_{H_2O, Erdgas} = M_{Erdgas} \cdot c_{H, Erdgas} \cdot \frac{18}{2}$$

– **Wasserinput über Wäscher (Waschwasserzufuhr):**



Zurzeit besteht keine Mengenmessungen über die dem Wäscher 1 zugeführte Wassermenge. Diese Größe muss daher aus langjährigen Betriebsdaten abgeschätzt werden. Die Auslegung der Anlage lässt einen Wasserinput von 0 bis 5 m³/h zu.

5 – **Wasserabzug aus dem Wäscher (saures Waschwasser):**

Die Menge an saurem Waschwasser aus dem Wäscher 1 wird als Volumenstrom online über das Leitsystem erfasst.

– **Wasseroutput über die Reststoffe:**

- 10 Die Reststoffe (Schlacke, Schrott, Kessel-Asche, E-Filterasche) der Verbrennung fallen trocken an (der Nassentschlacker liegt außerhalb des Systems). Somit wird über diese Güter kein Wasser aus dem System ausgeschleust.

– **Wasseroutput über das Rohgas2 (nach dem Wäscher 1):**

- 15 Das Rohgas 2 wird im Wäscher 1 vollständig mit Wasserdampf gesättigt. Bei bekannter Temperatur (wird online gemessen) und bekanntem Druck im Wäscher lässt sich der absolute Wassergehalt im Rohgas 2 berechnen (siehe nachfolgende Gleichungen). Da der Druck im Wäscher nicht gemessen wird, muss als Näherungswert der online erfasste Druck am Ende des Rauchgaskessels herangezogen werden. Für die Ermittlung der Menge
- 20 des Rohgases 2 wird angenommen, dass diese der Reingasmenge entspricht, wobei die Reingasmenge als Volumenstrom bezogen auf Normalbedingungen online über das Leitsystem erfasst wird.

$$p_a = 0,6108 \cdot e^{\frac{(17,27 \cdot T)}{T_{\text{Wäscher}} + 237,3}}$$

$$a_{\text{Wäscher}} = \frac{m_{\text{mol}, H_2O}}{R} \cdot \frac{p_a}{273,15 + T_{\text{Wäscher}}}$$

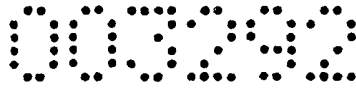
25

$$a_{N, \text{Rohgas 2}} = \frac{T_{\text{Wäscher}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_N}{p_{\text{Wäscher}}}$$

$$m_{H_2O, \text{Rohgas 2}} = V_R \cdot a_{N, \text{Rohgas 2}}$$

Mathematische Lösung der Bilanzgleichungen

- 30 Ein Zusammenführen der vorgestellten Bilanzgleichungen führt zu einem linearen Gleichungssystem von sechs Gleichungen mit drei Unbekannten m_I , m_B und m_F



(Massenanteil Inert, Biogen und Fossil). Es handelt sich somit um ein überbestimmtes System, dessen Lösung über eine Ausgleichrechnung ermittelt werden muss. Die Koeffizienten (c_{CB} , c_{CF} , ...) der Unbekannten und die Anlagenmesswerte sind durch Mittelwerte (wahrscheinlichste Werte) und Unsicherheitsbereiche gegeben.

5

Um die notwendige nichtlineare Ausgleichsrechnung zu umgehen und zu einer Näherungslösung zu gelangen, kann folgende Vorgangsweise gewählt werden: Die Koeffizienten der Unbekannten werden gemäß ihrer Unsicherheiten mittels Monte Carlo Simulation variiert. Für jede dabei entstehende Kombination von Koeffizienten wird eine
10 lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. Da in jeder Gleichung genau eine Beobachtungsgröße (Anlagenmesswert) als lineare Funktion der Unbekannten vorkommt, kann das Gauß-Markov-Modell angewandt werden:

$$l + v = Ax$$

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll}$$

mit

- 15 l Vektor der Beobachtungen
 v Vektor der Verbesserungen
 A Koeffizientenmatrix der Unbekannten
 x Vektor der Unbekannten,
 Σ_{ll} Kovarianzmatrix der Beobachtungen
20 σ_0^2 Varianz der Gewichtseinheit
 Q_{ll} Kofaktormatrix der Beobachtungen

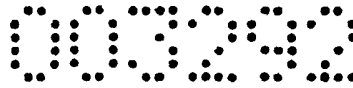
Daraus ergeben sich die Schätzwerte für die Unbekannten $\hat{x}$ inklusive ihrer Kofaktormatrix Q_{xx} :

25
$$\hat{x} = (A^T Q_{ll}^{-1} A)^{-1} A^T Q_{ll}^{-1} l$$
$$Q_{xx} = (A^T Q_{ll}^{-1} A)^{-1}$$

Die ausgeglichenen Beobachtungen $\hat{l}$ inklusive ihrer Kofaktormatrix $Q_{\hat{l}\hat{l}}$ berechnen sich aus:

$$\hat{l} = A\hat{x}$$

$$Q_{\hat{l}\hat{l}} = A Q_{xx} A^T$$



Entsprechend der Anzahl der Wiederholungen der Monte Carlo Simulation erhält man dadurch sowohl für jede Unbekannte x als auch für jede Beobachtung l die gleiche Anzahl möglicher Werte. Diese Werte werden statistisch ausgewertet und durch Parameter
5 (Mittelwert, Standardabweichung) beschrieben.

Beispiel:

Verwendete Daten

Zur Bestimmung der Koeffizienten (Wassergehalt, Aschegehalt, Kohlenstoffgehalt,
10 Wasserstoffgehalt, Sauerstoffgehalt, Schwefelgehalt, Stickstoffgehalt) der Unbekannten (Massenanteile m_I , m_B und m_F) in den „theoretischen“ Bilanzgleichungen wurden Ergebnisse von Sortieranalysen und Analysen hinsichtlich der Elementarzusammensetzung einzelner Abfallfraktionen herangezogen. Im Konkreten stützen sich die errechneten Koeffizienten auf Sortieranalysen von TBHauer (2000) und Untersuchungen zur
15 brennstofftechnischen Charakterisierung von Haushaltsabfällen (Kost, 2001). Für den Fall, dass in der zu untersuchenden Verbrennungsanlage überwiegend Restmüll verbrannt wird, können die im Folgenden angeführten Werte als allgemein gültige Standardwerte herangezogen werden. Werden in der betrachteten Anlage andere Abfallarten in
überwiegendem Masse behandelt, (beispielsweise, Einzelfraktionen aus der mechanisch
20 biologischen Abfallbehandlung, oder verschiedene Sortierreste), so ist zur Bestimmung der Ausgangsgrößen (die Koeffizienten: Wassergehalt, Aschegehalt, Kohlenstoffgehalt, Wasserstoffgehalt, Sauerstoffgehalt, Schwefelgehalt, Stickstoffgehalt) eine einmalige Sortieranalyse empfehlenswert. Relevante Änderungen in den Ausgangsgrößen sind jedoch nur für die Parameter Wassergehalt und Aschegehalt zu erwarten.

25

Sortieranalysen von TBHauer (2000)

Im Zeitraum vom 14. bis 25. Februar 2000 wurden von TBHauer am Werksgelände der zu untersuchenden Müllverbrennungsanlage Sortieranalysen des angelieferten Abfalls durchgeführt. Die Analysen erfolgten dabei getrennt für Restmüll sowie für Gewerbe- und
30 Sperrmüll. Die fraktionelle Zusammensetzung wurde mittels manueller Sortierung bestimmt. Die Ergebnisse der Analysen sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengefasst. Der Wassergehalt wurde durch Trocknen von Proben aus den einzelnen Fraktionen bestimmt.



Tabelle 2 Abfallzusammensetzung (Fraktionen) des angelieferten Restmülls (TBHauer, 2000)

Fraktion	Restmüll [m% FS]		Wassergehalt [m% FS]		Restmüll [m% TS]	
	Mittelw.	Stdabw.	Mittelw.	Stdabw. ^a	Mittelw.	Stdabw.
Papier	13,3	2,3	20	10	10,6	2,3
Glas	4,2	1,0	2	1	4,1	1,0
Metalle	5,2	1,1	7	2	4,8	1,0
Holz	3,2	1,3	17	4	2,7	1,1
Hygienewaren	10,7	2,2	45	6	5,9	1,4
Biogenes	14,7	2,8	60	6	5,9	1,4
Rückstände aus Kompostierung	3,7		75	5	0,9	0,2
Textilien	10,3	2,0	20	14	8,2	2,2
Kunststoffe	17,5	2,4	10	7	15,8	2,5
Inertes	11,4	3,0	8	2	10,5	2,8
Materialverbunde	5,8	1,5	15	6	4,9	1,3
Summe	100,0				74,3	5,7

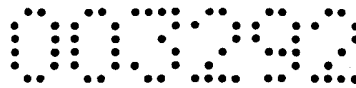
^a Die Standardabweichung des Wassergehaltes wurde basierend auf einer Zusammenstellung von Literaturdaten (Kost, 2001) angenommen

5 Tabelle 3 Abfallzusammensetzung (Fraktionen) des angelieferten Gewerbe- und Sperrmülls (TBHauer, 2000)

Fraktion	Gewerbe- und Sperrmüll [m% FS]		Wassergehalt [m% FS]		Gewerbe- und Sperrmüll [m% TS]	
	Mittelw.	Stdabw. ^a	Mittelw.	Stdabw. ^b	Mittelw.	Stdabw.
Papier	12,0	1,8	20	10	9,6	1,9
Glas	0,2	0,0	2	1	0,2	0,0
Metalle	3,9	0,6	7	2	3,6	0,5
Holz	28,0	4,2	17	4	23,2	3,7
Hygienewaren	0,1	0,0	45	6	0,1	0,0
Biogenes	3,1	0,5	60	6	1,2	0,3
Rückstände aus Kompostierung		0,0	75	5	0,0	0,0
Textilien	3,9	0,6	20	14	3,1	0,7
Kunststoffe	31,0	4,7	10	7	27,9	4,7
Inertes	9,3	1,4	8	2	8,6	1,3
Materialverbunde	8,5	1,3	15	6	7,2	1,2
Summe	100,0				84,8	6,6

^a Die Standardabweichung der Zusammensetzung wurde mit 15 % des Mittelwertes angenommen

^b Die Standardabweichung des Wassergehaltes wurde basierend auf einer Zusammenstellung von Literaturdaten (Kost, 2001) angenommen



Um für die einzelnen „Stoffgruppen“ Inert, Biogen und Fossil mittlere (wahrscheinlichste) Zusammensetzungen (Wasser-, Asche, Kohlenstoffgehalt) berechnen zu können, müssen die einzelnen Sortierfraktionen den drei „Gruppen“ zugeordnet werden. Bei jenen Fraktionen (Hygienewaren, Textilien, Materialverbunde) die sowohl biogene als auch fossile Energieträger enthalten, erfolgte die Aufteilung gemäß Literaturdaten bzw. wurde nach Angaben zur Sortieranalyse (TBHauer, 2000) berechnet, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4 Zuordnung zu den „Stoffgruppen“

	Massenanteile [m%]		
	Inert	Biogen	Fossil
Papier	-	100	-
Glas	100	-	-
Metalle	100	-	-
Holz	-	100	-
Hygienewaren	-	43 ^a	57 ^a
Biogenes	-	100	
Rückstände aus Kompostierung	-	100	
Textilien	-	64 ^b	36 ^b
Kunststoffe	-	-	100
Inertes	100	-	-
Materialverbunde Hausmüll	-	24,6 ^c	75,4 ^c
Materialverbunde Gewerbemüll		41,1 ^c	58,9 ^c

^a Aufteilung gemäß Windelzusammensetzung: 43 % Zellstofflocken, 27 % Superabsorber, 10 % Polypropylen, 13 % Polyethylen, 7 % Klebstoffe, Klebebänder (EDANA, 2001)

^b Aufteilung gemäß Weltproduktionsdaten der Textilindustrie 1990 (Echte, 1993)

^c Aufteilung gemäß Angaben zur Sortieranalyse (TBHauer, 2000)

Elementarzusammensetzung von Sortierfraktionen (Kost, 2001)

Im Rahmen einer Studie zur brennstofftechnischen Charakterisierung von Haushaltsabfällen wurde von Kost (2001) die stoffliche Zusammensetzung von Sortierfraktionen bestimmt. Dabei wurden jeweils Proben von ca. 20 kg in einer kleintechnischen Verbrennungsanlage verbrannt. Aus den gemessenen Emissionen der Anlage wurde die Elementarzusammensetzung (C, H, O, N, S, Cl, Aschegehalt und Wassergehalt) der Abfallproben rückgerechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der folgenden Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5 Elementarzusammensetzung von Abfallfraktionen (nach Kost, 2001)

Fraktion	Gruppe	Aschegehalt		Kohlenstoff- gehalt		Wasserstoff- gehalt		Schwefelgehalt		Stickstoffgehalt		Sauerstoff- gehalt	
		[m% TS]						[kg/kg aschefrei]					
		Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.
Papier	biogen	18	6	0,460	0,010	0,066	0,0015	0,003	0,0005	0,006	0,0005	0,460	0,015
Glas	inert	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metalle	inert	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Holz	biogen	5	4,2	0,480	0,010	0,064	0,001	0,004	0,002	0,012	0,005	0,440	0,010
Hygienewaren_biogen ^a	biogen	10	3	0,440	0,012	0,062	0,001	0,002	0,0005	0,008	0,002	0,470	0,015
Hygienewaren_fossil ^a	fossil	10	3	0,625	0,013	0,096	0,0035	0,002	0,0005	0,008	0,002	0,250	0,026
Biogenes	biogen	21	15	0,500	0,026	0,075	0,005	0,003	0,0005	0,027	0,0035	0,390	0,031
Rückstände aus Kompostierung ^b	biogen	21	15	0,500	0,026	0,075	0,005	0,003	0,0005	0,027	0,0035	0,390	0,031
Textilien_biogen	biogen	9	6	0,445	0,014	0,062	0,002	0,004	0,0015	0,012	0,003	0,474	0,012
Textilien_fossil	fossil	9	6	0,645	0,044	0,064	0,003	0,004	0,0015	0,063	0,010	0,227	0,024
Kunststoffe	fossil	18	8	0,750	0,046	0,111	0,011	0,003	0,0015	0,008	0,001	0,110	0,056
Inertes	inert	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialverbunde_biogen ^c	biogen	39	20	0,460	0,010	0,066	0,0015	0,003	0,0005	0,006	0,0005	0,460	0,015
Materialverbunde_fossil ^c	fossil	39	20	0,750	0,046	0,111	0,011	0,003	0,0015	0,008	0,001	0,110	0,056

^a Zusammensetzung laut eigenen Berechnungen

^b Zusammensetzung analog zu Biogenem angenommen

^c Annahme: der biogene Anteil an Materialverbunden entspricht in der Elementar-Zusammensetzung jener von Papier und der fossile Anteil entspricht jener der Kunststofffraktion



Zusammensetzung der Gruppen Inert, Biogen und Fossil

Aus den Ergebnissen der Sortieranaysen (Tabelle 2, Tabelle 3), der Zuordnung zu den Stoffgruppen (Tabelle 4) und der Elementarzusammensetzung der einzelnen Sortierfraktionen (Tabelle 5) lassen sich für die drei Gruppen (Inert, Biogen und Fossil) mittlere

5 Zusammensetzungen errechnen. Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten aller Eingangsdaten über die Fehlerfortpflanzungsrechnung nach Gauß, können zusätzlich zu den Mittelwerten deren Standardabweichungen ausgewiesen werden.

Da sich aufgrund der unterschiedlichen fraktionellen Zusammensetzung von Restmüll und

10 Gewerbemüll, auch unterschiedliche Elementarzusammensetzungen der drei „Stoffgruppen“ Inert, Biogen und Fossil ergeben, werden diese in Tabelle 6 für beide Abfallarten getrennt angegeben.

Für die anschließenden Ausgleichsrechnungen, empfiehlt es sich nicht mehr zwischen

15 Hausmüll und Gewerbemüll zu unterscheiden. Es ist daher erforderlich die Daten aus Tabelle 6 zu mittleren Gehalten an Wasser, Asche, C, H, S, N und O zusammenzuführen (siehe Tabelle 7). Der Anteil des Restmülls am gesamten in der MVA behandelten Müll wird dabei mit rund 75 % angenommen (Wert aus den Betriebsdaten des Geschäftsjahres 2003/04 abgeleitet). Die Vereinfachung (Verwendung eines mittleren jährlichen Hausmüll-

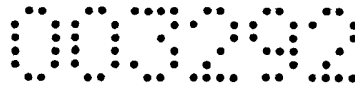
20 bzw. Gewerbemüllanteils) ist aufgrund der sehr ähnlichen Elementarzusammensetzung von Haus- und Gewerbemüll zulässig. Darüber hinaus sind die verwendeten Unsicherheitsbereiche deutlich größer als die einzelnen Unterschiede in der Zusammensetzung.

Tabelle 6 Elementarzusammensetzung der „Stoffgruppen“ für Restmüll sowie Gewerbemüll und Sperrmüll

	Gruppe	Wassergehalt		Aschegehalt		Kohlenstoff- gehalt		Wasserstoff- gehalt		Schwefel- gehalt		Stickstoff- gehalt		Sauerstoff- gehalt	
		[m% FS]		[m% TS]											
		Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.
Restmüll	Inert	6,5	2,0	100,0	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Biogen	38,7	6,6	16,1	3,4	0,467	0,0069	0,067	0,0012	0,0032	0,0004	0,013	0,0011	0,446	0,0086
	Fossil	18,6	5,6	19,0	4,5	0,719	0,029	0,103	0,0068	0,003	0,001	0,015	0,0015	0,145	0,036
Gewerbe- müll und Sperrmüll	Inert	7,6	1,9	100,0	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Biogen	20,5	4,3	11,5	2,4	0,473	0,007	0,065	0,0008	0,0037	0,0013	0,011	0,0033	0,446	0,0075
	Fossil	11,1	6,2	20,4	5,4	0,746	0,040	0,109	0,0093	0,003	0,0013	0,010	0,001	0,115	0,049

Tabelle 7 Elementarzusammensetzung der „Stoffgruppen“ für den in der untersuchten MVA behandelten Müll

	Gruppe	Wassergehalt		Aschegehalt		Kohlenstoff- gehalt		Wasserstoff- gehalt		Schwefel- gehalt		Stickstoff- gehalt		Sauerstoff- gehalt	
		[m% FS]		[m% TS]											
		Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.	Mittelw.	Stabw.
Systemmüll	Inert	6,7	2,0	100,0	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Biogen	34,0	6,0	14,9	3,1	0,468	0,0069	0,066	0,0011	0,0033	0,0007	0,012	0,0016	0,446	0,0083
	Fossil	16,5	5,8	19,4	4,8	0,726	0,032	0,105	0,0075	0,003	0,0011	0,014	0,0013	0,137	0,039



Betriebsdaten der untersuchten MVA

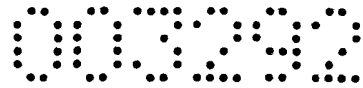
Im Rahmen des Routinebetriebs der untersuchten MVA werden folgende Größen gemessen, mit deren Hilfe sich der Aschegehalt, der Kohlenstoffgehalt, der Heizwert sowie die Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion der behandelten

5 Abfälle berechnen lassen (siehe Tabellen 8-10):

- Masse des behandelten Abfalls [t FS/Monat]
- Masse sowie mittlerer Wassergehalt der festen Rückstände [t FS/Monat bzw. kg H₂O/kg FS]
- eingesetzte Menge an Zusatzbrennstoffen (Erdöl und Erdgas) [t/Mo bzw. 10 Nm³/Monat]
- Reingasmenge (trocken und auf 11 Vol-% O₂ bezogen) [Nm³/h]
- O₂ und CO₂-Konzentration im Reingas [Vol-%]
- Dampfproduktion des Kessels [t H₂O]
- Dampfdruck [bar] und Dampftemperatur [°C] im Kessel.

15 Für die Erstellung der ursprünglich geplanten Wasserbilanz der Verbrennungsanlage (Systembild siehe Fig. 2) und der darauf aufbauenden Wassergehaltsbestimmung des Abfalls reichen die zum jetzigen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Betriebsdaten der Anlage nicht aus. Um eine vollständige Wasserbilanzierung durchführen zu können, müsste der Wassergehalt im Reingas und der Wasserinput in die Wäscher bekannt sein. Die 20 ursprünglich angedachte „einfache Bestimmung“ des Wassergehalts im Reingas über den Druck und die Temperatur im Wäscher 1 (unter der Annahme der Wasserdampfsättigung), scheint aufgrund der vorliegenden Messreihe, nicht zulässig. Es ist über das Jahr (bis zur nächsten Revision der Anlage) eine deutliche Zunahme der Temperatur im Wäscher zu erkennen (siehe Tabelle 10). Dies deutet auf zeitabhängige Veränderungen der 25 Bedingungen im Wäscher hin (z.B.: Ablagerungen bzw. Verschmutzungen um den Temperatursensor oder unvollständige Sättigung des Rauchgases).

Um den Wassergehalt des Abfalls bestimmen zu können, wäre daher eine erhebliche messtechnische Aufrüstung der Anlage (Wasserzähler für den Waschwasserinput und Feuchtigkeitsmessung im Reingas) erforderlich. Angestellte Überlegungen und Berechnungen 30 zeigen jedoch, dass der zusätzliche Informationsgehalts des Wasseranteils im Abfall für



- 26 -

den schlussendlich zu bestimmenden biomassenbürtigen Heizwertanteil bzw. die biomassebürtigen Kohlendioxidemissionen, nur gering ist.

Tabelle 8 behandelte Müllmassen, anfallende Rückstände und darauf basierende Aschenbilanz der untersuchten MVA (Monatswerte)

	Okt. 03	Nov. 03	Dez. 03	Jän. 04	Feb. 04	Mär. 04	Apr. 04	Mai. 04	Jun. 04	Jul. 04	Aug. 04	Sep. 04	Summe bzw. Mittelwert
Restmüllmenge [t/Mo]	3.336	2.994	3.332	6.873	4.743	5.119	6.878	5.454	7.203	6.715	5.541	377	58.565
Sieüberlauf - Kompostierung [t/Mo]	132	180	91	2	49	111	62	127	122	85	77	80	1.118
Sperr- und Gewerbeabfall [t/Mo]	1.374	3.291	3.461	197	1.930	1.078	312	1.896	60	1.028	1.354	0	15.981
Gesamte Müllmenge [t/Mo]	4.842	6.464	6.885	7.073	6.721	6.308	7.252	7.477	7.385	7.828	6.971	458	75.664
Zusatzbrennstoff – Erdöl [t/Mo]	6,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,86
Zusatzbrennstoffe – Erdgas [Nm³/Mo]	46.170	16.750	37.340	27.970	46.110	68.710	14.810	6.520	21.130	14.580	18.130	87.570	405.790
Schlacke [t/Mo] (Wassergeh. 20 ± 4 %.)	1.140	1.643	1.791	1.746	1.407	1.396	1.620	1.838	2.105	1.773	1.732	93	18.284
Asche [t/Mo] (Wassergeh. 28 ± 5 %)	191	265	430	419	378	409	390	340	379	270	302	0	3.773
Schrott [t/Mo]	58	85	76	102	83	85	79	102	101	86	79	11	947
Summe der Rückstände [t TS/Mo]	1.108	1.590	1.818	1.800	1.481	1.496	1.656	1.817	2.058	1.699	1.682	86	18.294
Summe der Rückstände (Stabw) [t TS/Mo]	47	67	75	73	59	59	68	75	86	72	71	4	756
„Aschegehalt“ auf FS bezogen $a_F \cdot (1 - w_F)$ [kg TS/kg FS]	0,229	0,246	0,264	0,255	0,220	0,237	0,228	0,243	0,279	0,217	0,241	0,187	0,237
„Aschegehalt“ auf FS bezogen (Stabw.) [kg TS/kg FS]	0,010	0,010	0,011	0,010	0,009	0,009	0,009	0,010	0,012	0,009	0,010	0,008	0,010

Tabelle 9 Reingasmengen, Reingaskonzentrationen (O_2 , CO_2) und darauf basierende Kohlenstoffbilanz sowie die Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion der untersuchten MVA (Monatswerte)

	Okt. 03	Nov. 03	Dez. 03	Jän. 04	Feb. 04	Mär. 04	Apr. 04	Mai. 04	Jun. 04	Jul. 04	Aug. 04	Sep. 04	Summe bzw. Mittelwert
Reingasmenge [Nm^3/h] ¹⁾ trocken, auf 11% O_2 bezog.	53.200	54.300	59.200	55.700	49.600	48.200	57.300	60.500	59.400	61.600	62.400	57.900	679.300
O_2 - Konz. im Reingas ²⁾ [Vol-% trocken]	8,3	7,7	8,0	8,3	9,3	9,3	7,8	7,6	7,3	7,1	6,9	7,9	8,0
CO_2 - Konz. im Reingas ²⁾ [Vol-% trocken]	10,5	11,1	10,7	10,4	9,9	10,0	11,3	11,0	10,5	10,3	10,4	11,8	10,7
Betriebstage	23	30	31	31	29	27	30	31	30	31	28	4	325
Korrekturfaktor für Reingas (aufgrund falscher Wassergehaltsannahme des Reingases)	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	1,05	0,95
Reingasmenge [1.000 Nm^3/Mo] trocken	22.300	28.400	32.200	31.000	28.000	25.100	29.600	31.700	28.900	30.200	27.100	4.470	319.000
Kohlenstoff-Input über Zusatz- brennstoffe [t/Mo]	28	8	18	13	22	32	7	3	10	7	9	41	198
Kohlenstoff-Output über das Reingas [t/Mo]	1.206	1.626	1.751	1.640	1.405	1.269	1.692	1.763	1.507	1.530	1.375	297	17.063
Kohlenstoff-Output über das Reingas (Stdabw.) [t/Mo]	123	166	179	167	143	129	173	180	154	156	140	30	145
Kohlenstoffgehalt des Abfalls [g/kg FS] ³⁾	248	255	256	234	209	200	237	240	206	198	200	570	254
Kohlenstoffgehalt des Abfalls (Stdabw.) [g/kg FS]	26	26	26	24	22	21	24	24	21	20	20	68	27

1) Annahme: Standardabweichung der gemessenen Reingasmengen: 10 % des Mittelwertes

2) Annahme: Standardabweichung der O_2 - und CO_2 -Messungen im Reingas: 2 % des Mittelwertes

3) Transferkoeffizient des Kohlenstoffs ins Reingas: $0,982 \pm 0,0025$ (Morf et al., 1997)

Tabelle 10 Dampfproduktion und darauf basierende Energiebilanz der untersuchten MVA (Monatswerte)

	Okt. 03	Nov. 03	Dez. 03	Jän. 04	Feb. 04	Mär. 04	Apr. 04	Mai. 04	Jun. 04	Jul. 04	Aug. 04	Sep. 04	Summe bzw. Mittelwert
Dampfproduktion [t/Mo] ¹⁾	15.596	22.108	23.756	20.601	18.896	18.327	20.264	22.155	20.819	21.793	19.824	2.330	226.469
Dampfdruck im Kessel [bar]	~40	~40	~40	~40	~40	~40	~40	~40	~40	~40	~40	~40	~40
Dampftemperatur im Kessel [°C]	~400	~400	~400	~400	~400	~400	~400	~400	~400	~400	~400	~400	~400
im Dampfkessel erzeugte Energie [GJ/Mo] ^{2), 3)}	48.000	68.100	73.200	63.500	58.200	56.400	62.400	68.200	64.100	67.100	61.100	7.200	697.500
dem Dampfkessel zugeführte gesamte Energie [GJ/Mo] ⁴⁾	57.900	82.000	88.200	76.400	70.100	68.000	75.200	82.200	77.300	80.900	73.600	8.600	840.400
Energieinhalt der Zusatzbrennstoffe [GJ/Mo] ⁵⁾	1.900	600	1.300	1.000	1.600	2.400	500	200	700	500	600	3.000	14.300
Energieinhalt der eingesetzten Abfälle [GJ/Mo]	56.000	81.500	86.900	75.500	68.500	65.600	74.700	82.000	76.500	80.400	72.900	5.600	826.100
Heizwert des Abfalls [kJ/kg FS]	11.600	12.600	12.600	10.700	10.200	10.400	10.300	11.000	10.400	10.300	10.500	12.300	11.100
Heizwert des Abfalls (Stdabw.) [kJ/kg FS]	890	950	960	810	780	810	780	820	780	770	790	1.400	890

1) Standardabweichung der Dampfmengenmessung: 3 % des Mittelwertes

2) Netto-Enthalpie des Wassers bzw. Wasserdampfes im Kessel: 3080 kJ/kg (Druckkessel: Enthalpie des Wasserdampfes: 3215 kJ/kg; Kondensator: 5

Enthalpie des Wassers (bei Druck ~0,05 bar und Temp ~ 30°C): 135 kJ/kg

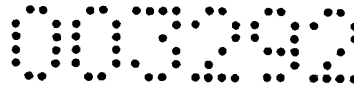
3) Standardabweichung der Netto-Enthalpie: 100 kJ/kg

4) Wirkungsgrad des Dampfkessels: 0,83 ± 0,04 (Wachter, 2004)

5) Heizwert von Erdöl extra-leicht: 43.142 kJ/kg; von Erdgas: 35.838 kJ/m³

Tabelle 11 Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion der untersuchten MVA (Monatswerte)

	Okt. 03	Nov. 03	Dez. 03	Jän. 04	Feb. 04	Mär. 04	Apr. 04	Mai. 04	Jun. 04	Jul. 04	Aug. 04	Sep. 04	Summe bzw. Mittelwert
Reingasmenge [1.000 Nm ³ /Mo] trocken	22.300	28.400	32.200	31.000	28.000	25.100	29.600	31.700	28.900	30.200	27.100	4.470	319.000
O ₂ - Konz. im Reingas ²⁾ [Vol.-% trocken]	8,3	7,7	8,0	8,3	9,3	9,3	7,8	7,6	7,3	7,1	6,9	7,9	8,0
CO ₂ - Konz. im Reingas ²⁾ [Vol.-% trocken]	10,5	11,1	10,7	10,4	9,9	10,0	11,3	11,0	10,5	10,3	10,4	11,8	10,7
Summe O ₂ + CO ₂ im Reingas [Vol.-% trocken]	18,8	18,8	18,7	18,7	19,2	19,3	19,1	18,6	17,8	17,4	17,3	19,7	18,6
Summe O ₂ + CO ₂ im Reingas (Stdabw.) [Vol.-% trocken]	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,25	0,25	0,28	0,27
Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion [mol/kg FS]	4,15	3,97	4,36	4,09	2,99	2,68	3,10	4,11	5,02	5,54	5,69	5,51	4,27
Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion (Stdabw.) [mol/kg FS]	0,67	0,65	0,69	0,64	0,56	0,53	0,57	0,63	0,65	0,68	0,69	1,42	0,70



Resultate

Ausgleichsrechnung

Analyse des Gleichungssystems und Aussagekraft der Ergebnisse

Exkurs lineare Gleichungssysteme:

- 5 Die Lösung von linearen Gleichungssystemen mit drei Unbekannten kann man sich vereinfacht als Schnittpunkt von mehreren Ebenen vorstellen. Eine exakte Lösung (ein Schnittpunkt) eines solchen Systems ist dann möglich, wenn das System weder unterbestimmt noch überbestimmt ist (drei Unbekannte in drei Gleichungen). Zur Veranschaulichung ist in Fig. 3 die Lösung eines „einfach bestimmten“ Gleichungssystems
- 10 mit zwei Unbekannten dargestellt (Schnittpunkt zweier Geraden).

Lineares Gleichungssystem mit zwei Unbekannten:

$$-0,5 x + y = 1,5$$

$$-8,0 x + y = -6$$

15

Sind die Koeffizienten der Unbekannten des Gleichungssystems nicht exakt gegeben sondern durch Mittelwerte und deren Unsicherheiten so stellt sich die Lösung folgendermaßen dar:

20

$$(-0,5 \pm 0,05) x + y = 1,5 \pm 0,25$$

$$(-8,0 \pm 1,60) x + y = -6 \pm 0,50$$

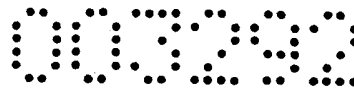
25

Als Lösung erhält man hier keinen Schnittpunkt sondern eine Schnittfläche (siehe Fig. 4). Die Größe der Schnittfläche bzw. die Differenz der Eckpunktkoordinaten der Fläche (repräsentativ für die Unsicherheit des Resultats) hängt einerseits von der angegebenen Unsicherheit der Koeffizienten ab und andererseits von der Lage der „Geraden“ zueinander. Je schiefender der Schnitt der Geraden (d.h. je ähnlicher die Koeffizienten der Gleichungen sind) ist, desto „unsicherer“ ist das Resultat (siehe Fig. 5)

30

Bei überbestimmten Gleichungssystemen besitzen daher jene Gleichungen mit sehr ähnlichen Koeffizienten (schiefender Schnitt!) nur einen geringen Informationsgehalt für das Resultat.

Werden Gleichungen mit mehr als zwei Unbekannten miteinander „verschnitten“, so ist das Ergebnis für jene Unbekannten mit sehr ähnlichen Koeffizienten relativ ungenau,



hingegen weist das Ergebnis für die Unbekannten mit stark unterschiedlichen Koeffizienten geringe Unsicherheiten auf.

Im Folgenden wurde versucht basierend auf den oben angestellten Überlegungen die aufgestellten Bilanzgleichungen (Massenbilanz, Aschebilanz, Kohlenstoffbilanz, Energiebilanz, „Sauerstoffverbrauchs- und Kohlendioxidproduktions-Bilanz“ und Wasserbilanz) auf ihren Informationsgehalt für das Endresultat (Masse an inerten (m_I), an biogenen (m_B) und an fossilen (m_F) Materialien) zu untersuchen. Es wurden dazu die Koeffizienten der Unbekannten in den einzelnen Gleichungen mit einander verglichen.

10

In Gleichung 1 sind die sechs Bilanzgleichungen zusammengestellt. Die Koeffizienten des Gleichungssystems sind durch die Mittelwerte („wahrscheinlichste Werte“) und deren Unsicherheitsbereiche (Standardabweichung) definiert. Sie wurden aus der Elementarzusammensetzung der Stoffgruppen (siehe Tabelle 7) errechnet. Die „konstanten Faktoren“ auf der rechten Seite der Gleichungen werden durch die Betriebsdaten der Anlage vorgegeben. Aufgrund fehlender Information hinsichtlich der Wasserbilanz der Anlage musste (hier im Rahmen der Analyse des Gleichungssystems) für die „Konstante“ dieser Gleichung ein wahrscheinlichster Näherungswert mit dazugehörigem größerem Unsicherheitsbereich angenommen werden.

20 Gleichung 1 Bilanzgleichungen (in der Reihenfolge: Massen-, Aschen-, Kohlenstoff-, Energie-, „Sauerstoffverbrauchs- und Kohlendioxidproduktions-“ und Wasserbilanz)

m_I	+	m_B	+	$m_F = 1$
$(0,933 \pm 0,021)$		m_I	+	$(0,098 \pm 0,037)$
		m_B	+	$(0,162 \pm 0,061)$
		m_F	=	$0,24 \pm 0,01$
		(263 ± 26)		m_B
				(489 ± 50)
				$m_F = 254 \pm 27$
(-164 ± 49)		m_I	+	(9.180 ± 1.030)
		m_B	+	(22.300 ± 1.900)
		m	=	11.100 ± 790
		$(2,00 \pm 0,70)$		m_B
				$(15,40 \pm 1,47)$
				$m_F = 4,27 \pm 0,70$
$(0,067 \pm 0,02)$		m_I	+	$(0,675 \pm 0,178)$
		m_B	+	$(0,799 \pm 0,155)$
		m_F	=	$0,60 \pm 0,20$

25

Um die Koeffizienten der Unbekannten (m_I , m_B und m_F) besser vergleichen zu können, wurde eine Normierung der Gleichungen durchgeführt, so dass der Koeffizient für den Biomasseanteil in jeder Gleichung 1 beträgt (siehe Gleichung 2).



Gleichung 2 *normierte Bilanzgleichungen (in der Reihenfolge: Massen-, Aschen-, Kohlenstoff-, Energie-, „Sauerstoffverbrauchs- und Kohlendioxidproduktions-“ und Wasserbilanz)*

m_I	+	m_B	+	$m_F = 1$
$(9,49 \pm 0,43)$		m_I	+	$(1,00 \pm 0,38)$
		m_B	+	$(1,65 \pm 0,62)$
				$m_F = 2,45 \pm 0,1$
		$(1,00 \pm 0,099)$		m_B
				$(1,86 \pm 0,19)$
				$m_F = 0,97 \pm 0,10$
$(-0,018 \pm 0,005)$		m_I	+	$(1,00 \pm 0,11)$
		m_B	+	$(2,43 \pm 0,21)$
				$m = 1,21 \pm 0,086$
		$(1,00 \pm 0,35)$		m_B
				$(7,70 \pm 0,74)$
				$m_F = 2,14 \pm 0,35$
$(0,10 \pm 0,03)$		m_I	+	$(1,00 \pm 0,26)$
		m_B	+	$(1,18 \pm 0,23)$
				$m_F = 0,89 \pm 0,27$

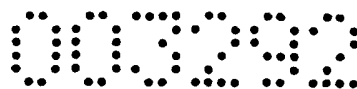
5

Ein Vergleich der Koeffizienten für den inerten Massenanteil m_I zeigt, dass diese Faktoren in den Gleichungen: Kohlenstoff-, Energie-, „Sauerstoffverbrauchs- und Kohlendioxidproduktions-“ und Wasserbilanz relativ ähnlich (im Bereich von Null) sind.

- 10 Eine alleinige Kombination dieser Gleichungen würde daher zu einem sehr unsicheren Resultat (inertter Massenanteil) führen (schleifender Schnitt der „Ebenen“ – Fig. 6). Die Koeffizienten für die restlichen beiden Gleichungen (Massen- und Aschenbilanz) unterscheiden sich jedoch deutlich (1 bzw. 9,49). Durch Kombination von Massen-, Aschen- und beispielsweise Energiebilanz (oder Wasserbilanz) kann somit der Inertanteil
- 15 m_I relativ exakt bestimmt werden (guter Schnittwinkel der „Ebenen“ – Fig. 6).

Die Koeffizienten für den fossilen Massenanteil m_F liegen im Gleichungssystem im Bereich von 1 bis 7,70. Hier gilt ebenso, dass eine Kombination von Gleichungen mit möglichst unterschiedlichen Koeffizienten zu einem exakteren Ergebnis führt. Die

- 20 Tatsache, dass die Koeffizienten von m_F in der Massen- und Wasserbilanzgleichung nahezu identisch sind (1 bzw. 1,18), bedeutet, dass eine Einbeziehung der Wasserbilanz keine zusätzliche (wertvolle) Information für die Ermittlung des fossilen bzw. biogenen Massenanteils m_F bzw. m_B bringen würde (schleifender Schnitt der Ebenen!!). Eine Aufrüstung der Messeinrichtungen der untersuchten MVA zur vollständigen Erfassung
- 25 aller Wasserströme und einer damit mögliche Wasserbilanzierung, würde daher zu keinem exakteren Ergebnis hinsichtlich des Biomasseanteils und dem in weiterer Folge zu bestimmenden biomassebürtigen Heizwertanteils (bzw. biomassebürtigen Kohlendioxidemissionen) führen.



Generell liegen die Koeffizienten für den fossilen Massenanteil m_F mit Ausnahme der Sauerstoffverbrauchs-Kohlendioxidproduktions-Differenz-Gleichung in einem relativ engen Bereich (1 bis 2,44). Es kommt daher zu eher schleifenden Schnitten der „Ebenen“ (siehe Fig. 7). Das Ergebnis für m_F und m_B ist daher im Vergleich zum inerten

5 Massenanteil m_I mit etwas größeren Unsicherheiten behaftet.

Ergebnisse

Die Ausgleichsrechnung zur Lösung des aufgestellten Gleichungssystems wurde mit der unter „Mathematische Lösung der Bilanzgleichungen“ beschriebenen Methode

10 durchgeführt. Als Eingangsparameter für die Berechnung wurden die Koeffizienten aus Tabelle 7 und die berechneten Betriebsgrößen der MVA (Aschegehalt, Kohlenstoffgehalt, Heizwert der behandelten Abfälle und die Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion siehe Tabelle 8 bis 10) herangezogen. Die Ergebnisse der

15 der drei Stoffgruppen „Inert, Biogen und Fossil“ sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Die Resultate (Fig. 8) zeigen, dass der biomassebürtige Heizwertanteil sowie der biogene Kohlenstoffgehalt über das Jahr nicht konstant sind, sondern erhebliche Schwankungen aufweisen. Diese Schwankungen lassen sich teilweise auf den unterschiedlichen Einsatz

20 von Haus- und Gewerbemüll sowie auch auf jahreszeitliche Änderungen der Müllzusammensetzung zurückführen.

Tabelle 11 Massen-, Heizwertanteil und Kohlenstoffanteile der „Fraktionen“ Inert, Biogen und Fossil über das Geschäftsjahr 2003/04

Ergebnisse		Ergebnisse nach Parameterausgleich											
		Okt. 03	Nov. 03	Dez. 03	Jän. 04	Feb. 04	Mär. 04	Apr. 04	Mai. 04	Jun. 04	Jul. 04	Aug. 04	Sep. 04
Massenanteil [kg/kg FS]	Inert	0,138	0,156	0,175	0,170	0,138	0,158	0,144	0,156	0,200	0,130	0,158	0,074
	Biogen	0,639	0,604	0,551	0,626	0,749	0,737	0,712	0,633	0,569	0,668	0,615	0,540
	Fossil	0,223	0,240	0,274	0,204	0,113	0,104	0,144	0,211	0,231	0,202	0,227	0,386
Heizwertanteil [kJ/kg FS] [#]	Inert	-23	-26	-29	-28	-23	-26	-24	-26	-33	-21	-26	-12
	Biogen	5.879	5.616	5.083	5.800	6.941	6.785	6.560	5.877	5.243	6.102	5.654	4.982
	Fossil	4.903	5.279	6.010	4.516	2.491	2.288	3.146	4.618	5.063	4.437	4.972	8.501
Heizwertanteil [%] *	Biogen	54,3	51,3	45,7	56,0	73,2	74,4	67,3	55,8	50,7	57,7	53,0	36,9
	Fossil	45,7	48,7	54,3	44,0	26,8	25,6	32,7	44,2	49,3	42,3	47,0	63,1
	Stdabw	8,4	8,4	7,5	8,4	10,0	9,4	9,3	8,6	8,1	8,6	8,4	7,4
Energieprod. Dampfkessels [GJ/Mo]	Gesamt	48.000	68.100	73.200	63.500	58.200	56.400	62.400	68.200	64.100	67.100	61.100	7.200
	Biogen	61,0	58,1	52,4	62,6	78,4	79,4	73,1	62,4	57,5	64,3	59,7	43,3
Kohlenstoff- anteile [%]	Stdabw	9,7	9,6	8,6	9,7	11,7	11,2	11,0	9,9	9,2	9,7	9,6	8,3
	Fossil	39,0	41,9	47,6	37,4	21,6	20,6	26,9	37,6	42,5	35,7	40,3	56,7
	Stdabw	6,6	6,7	6,4	6,6	7,5	7,0	7,1	6,7	6,4	6,6	6,6	7,0
Kohlenstoff- fracht [t/Mo]	Gesamt	1.178	1.618	1.734	1.627	1.383	1.237	1.685	1.760	1.497	1.524	1.367	2.56
	Stdabw	123	166	179	167	143	129	173	180	154	156	140	30

[#] Heizwertanteil [KJ/kg FS] nach Boje (1957), korrigiert nach Kost (2001)

* inerter Heizwertanteil (negativer Wert) auf Biomasse und fossile Energieträger aufgeteilt

00000



Biomassebürtiger Anteil am Heizwert

Aus den Ergebnissen der Ausgleichsrechnungen, den Massenanteilen der drei Fraktionen (Inert, Biogen und Fossil), lässt sich unter Berücksichtigung der monatlichen Energieproduktion und der errechneten monatlichen Heizwertanteile der mittlere jährliche biomassebürtige Heizwertanteil des behandelten Abfalls berechnen.

Für die Energieproduktion wurde dabei der Mittelwert aus den monatlichen biomassebürtigen Heizwertanteilen (gewichtet mit der Energieproduktion) gebildet (siehe Tabelle 11). Dieser Wert liegt für das Geschäftsjahr 2003/04 (Oktober 2003 bis September 2004) bei 57,5 %.

Dieser Rechenwert (57,5 %) ist anteilmäßig um jene Energiemenge zu reduzieren, die über fossile Zusatzbrennstoffe (Erdöl bzw. Erdgas) einbracht wurde. Dieser Anteil liegt für den betrachteten Zeitraum bei rund 1,7 % der erzeugten Energie. Somit ergibt sich für das Geschäftsjahr 2003/04 (Oktober 2003 bis September 2004) ein Heizwertanteil der Biomasse von 56,5 % (siehe Fig. 9). Die Unsicherheit dieses Ergebnisses liegt unter Berücksichtigung aller Faktoren bei rund 4,5 % (absoluter Fehler).

Tabelle 12 Gewonnene Energie aus dem Dampfkessel (im Geschäftsjahr 2003/04)

Energieträger	Erzeugte Wärmemenge	
	Gesamt [GJ]	Anteil [%]
Biomasse	394.099	56,5
Zusatzbrennstoffe (Erdgas + Erdöl)	11.858	1,7
Sonstige fossile Energieträger (Kunststoffe im Müll)	291.564	41,8
Summe	697.521	100

Biogene und fossile Kohlendioxidemissionen

Analog zu den Heizwertanteilen lässt sich aus den Ergebnissen der Ausgleichsrechnung eine gesamte biogene Kohlenstofffracht bzw. Kohlendioxidfracht und eine fossile Kohlendioxidfracht berechnen. Unter Berücksichtigung aller Faktoren ergibt sich für das Geschäftsjahr 2003/04 folgende Verteilung:



Tabelle 12 Gewonnene Energie aus dem Dampfkessel (im Geschäftsjahr 2003/04)

Energieträger	Kohlendioxidemissionen	
	Gesamt [t]	Anteil [%]
Biomasse	39.400 ± 2.200	63,1
Zusatzbrennstoffe (Erdgas + Erdöl)	600	1,0
Sonstige fossile Energieträger (Kunststoffe im Müll)	22.400 ± 1.400	35,9
Summe	62.400 ± 1.900	100

5 Untersuchungen zur Stabilität des Resultates

- Um die Stabilität bzw. Robustheit der entwickelten Methode (Ausgleichsrechnung der aufgestellten Bilanzgleichungen) zu überprüfen, wurden Betriebsdaten (Heizwert, Kohlenstoffgehalt und Aschegehalt) bei unterschiedlicher Müllzusammensetzung generiert. In weiterer Folge wurde untersucht, inwieweit mit Hilfe des entwickelten
- 10 Ansatzes die Unterschiede in der Müllzusammensetzung erkennbar sind. Ausgehend von den Ergebnissen der Sortieranalyse von Hauer (1999) wurde im 1. Fall (hoher Anteil an biogenen Materialien) der Anteil an Papier und Biogenem im Müll deutlich erhöht, während im 2. Fall (hoher Anteil an fossilen Materialien) der Anteil an Kunststoff vergrößert wurde.

15

Tabelle 13 Veränderungen der Abfallzusammensetzung gegenüber Hauer, 1999 (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3)

Fraktion	1. Fall		2. Fall	
	Veränderungen [m%] der Zusammensetzung gegenüber Hauer (1999)			
	Restmüll	Gewerbemüll	Restmüll	Gewerbemüll
Papier	+12	+18	-7	-
Holz	-	-	-2	-14
Biogenes	+5	-	-8	-
Kunststoffe	-17	-18	+17	+14

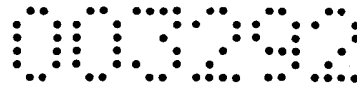


Tabelle 14 Generierte Betriebsdaten bei gezielt veränderter Abfallzusammensetzung

Parameter	1. Fall	2. Fall
Heizwert [kJ/kg FS]	8.250 ± 700	13.700 ± 800
Kohlenstoffgehalt [g/kg FS]	240 ± 20	335 ± 30
Aschegehalt [g/kg FS]	270 ± 10	290 ± 10
O ₂ -Verbrauch-CO ₂ -Produktion [mol/kg FS]	3,2 ± 0,3	8,7 ± 0,5

Der über die Elementarzusammensetzung (Formel nach Boje, 1957) berechnete biomassebürtige Heizwertanteil liegt für die veränderte Abfallzusammensetzung im Fall 1 bei 67,7 % und im Fall 2 bei 19,3 %.

Mit Hilfe der generierten Betriebsdaten (aus Tabelle 14) und den Koeffizienten der Bilanzgleichungen (aus Tabelle 7) wurden über die Ausgleichsrechnung folgende Stoffgruppenzusammensetzungen (Massenanteil inert, biogen und fossil) ermittelt:

Tabelle 15 Vergleich der vorgegebenen Massen-, Heizwertanteile und Kohlenstoffgehalte (aus der Abfallzusammensetzung) mit jener die über die Ausgleichsrechnung bestimmt wurden

Massenanteil	1. Fall		2. Fall	
	aus der Abfallzusammensetzung gegeben (Vorgabe)	über Ausgleichsrechnung bestimmt (Berechnung)	aus der Abfallzusammensetzung gegeben (Vorgabe)	über Ausgleichsrechnung bestimmt (Berechnung)
Massenanteile + Heizwert				
Inert [m%]	19,0	19,6	19,0	18,7
Biogen [m%]	65,1	68,2	31,2	27,4
Fossil [m%]	15,9	12,1	49,8	53,8
Biomassebürtiger Heizwertanteil [%]	67,7	69,8	19,3	17,5
Kohlenstoffanteile				
Biogen [m%]	72,2	75,4	24,6	21,8
Fossil [m%]	27,8	24,6	75,4	78,2

Ein Vergleich der vorgegebenen Massenanteile mit den über die Ausgleichsrechnung bestimmten Massenanteilen zeigt, dass die entwickelte Methode geeignet ist, um unterschiedliche Abfallzusammensetzungen (nach Stoffgruppen) zu erkennen und zu bestimmen. Für den inerten Massenanteil m_i ist der Fehler der Methodik am geringsten ($< 1\%$). Dies lässt



sich durch die unterschiedlichen Koeffizienten von m_i im zu lösenden Gleichungssystem erklären („guter Schnittwinkel der Ebenen“ – siehe Fig. 6). Für die Massenanteile von m_B und m_F ist die Abweichung zwischen vorgegebenen und berechneten Werten deutlich größer („schleifender Schnitt der Ebenen“ – siehe Fig. 7). Der Fehler beträgt in den beiden
5 oben dargestellten Fällen maximal 4 %.

Für das schlussendlich zu ermittelnde Endergebnis (den biomassebürtigen Heizwertanteil) reduziert sich der maximale Fehler auf rund 2 % (Fall 1: Vorgabe: 67,7 %, Rechnung: 69,8 %; Fall 2: Vorgabe: 19,3 %, Berechnung: 17,5 %).

10 Gilt es die Kohlendioxidemissionen (Kohlenstoffgehalte) dem biogenen bzw. fossilen Ursprung zu zuordnen, so liegt der Fehler bei rund 3 % (Fall 1: Vorgabe: 72,2 %, Rechnung: 75,4 %; Fall 2: Vorgabe: 24,6 %, Berechnung: 21,8 %).

Die hier ausgewiesenen Fehler beziehen sich ausschließlich auf die angewandte Methodik
15 der Ausgleichsrechnung für die verwendeten Bilanzgleichungen. Die tatsächliche Unsicherheit (Fehler) der entwickelten Methode bei der Verwendung von realen Betriebsdaten sind größer als die oben ausgewiesenen 3 %.

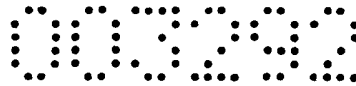
Zusammenfassung

20 Es wurde eine neue Methode zur Bestimmung des Stromanteils aus Biomasse bei der Stromauskopplung einer Müllverbrennungsanlage entwickelt. Das vorgestellte Konzept eignet sich ebenso zur Bestimmung der biogenen bzw. fossilen Kohlendioxidemissionen bei der Müllverbrennung. Der Ansatz beruht auf einem Abgleich „theoretischer“ Gleichungen mit gemessenen Betriebsdaten der Müllverbrennungsanlagen.

25

Für die theoretischen Gleichungen werden die Abfälle in drei Stoffgruppen: inerte, biogene und fossile Materialien unterteilt. Für diese Stoffgruppen wurden über Literaturdaten und über Ergebnisse aus Sortieranalysen mittlere stoffliche Zusammensetzungen errechnet.

30 Diese stoffliche Zusammensetzung der drei Fraktionen Inert, Biogen und Fossil kann verwendet werden um mit Hilfe theoretischer Gleichungen verschiedene Eigenschaften (Aschegehalt, Heizwert, Kohlenstoffgehalt, Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion) der behandelten Abfälle zu berechnen. Die theoretisch



ermittelten Eigenschaften der Abfälle müssen mit den über die Betriebsdaten der Müllverbrennungsanlage ermittelten Eigenschaften übereinstimmen. Diese Übereinstimmung zwischen theoretischen und gemessenen Eigenschaften wird durch Variieren der Massenanteile der drei Fraktionen (inert, biogen und fossil) erreicht. Diese

5 Variation der Massenanteile (so dass alle Gleichungen erfüllt werden) erfolgt durch eine mathematische Ausgleichsrechnung eines linearen Gleichungssystems. Das Ergebnis der Ausgleichsrechnung sind die Massenanteile der drei Fraktionen. Mithilfe dieser Massenanteile und deren mittlerer Elementarzusammensetzung lässt sich unter Verwendung von so genannten Heizwertformeln (z.B.: Boie, 1957) der gesamte Heizwert

10 des Abfalls und der biomassebürtiger Anteil des Heizwertes berechnen. Letzterer entspricht dem erzeugten Stromanteil aus Biomasse, der zu bestimmenden Größe.

Mit Hilfe dieser neuen Methode wurde für die MVA-Wels für das Geschäftsjahr 2003/04 (Oktober 2003 bis September 2004) der Stromanteil aus Biomasse berechnet. Für das

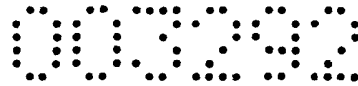
15 Geschäftsjahr 2003/04 wurde auf diese Weise ein mittlerer biomassebürtiger Heizwertanteil und damit ein Stromanteil aus Biomasse von 56,5 % errechnet. Die Unsicherheit des Ergebnisses ist liegt bei 4,5 %.

Die biogenen Kohlendioxidemissionen liegen für das untersuchte Geschäftsjahr bei rund 39.400 ± 2.200 t, während im selben Zeitraum etwa 22.400 ± 1.400 t fossiles CO₂ emittiert

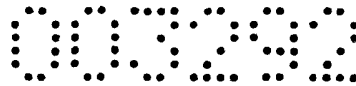
20 wurde.

Literatur

- Beiz, W. and Küttner, K.-H., 1986. Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- 25 Boie, W., 1957. Vom Brennstoff zum Rauchgas. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig.
- Dehoust, G., Gebhardt, P. and Gärtner, S., 2002. Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschonung, Institut für Angewandte Ökologie, Darmstadt.
- 30 Döberl, G., Huber, R., Fellner, J., Cencic, O. and Brunner, P.H., 2002. Neue Strategien zur Nachsorge von Deponien und zur Sanierung von Altlasten (Projekt STRANDEZA), Abteilung Abfallwirtschaft und Stoffhaushalt, Technische Universität Wien.



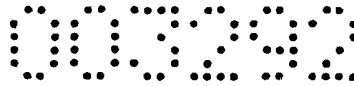
- Echte, A., 1993. Handbuch der Technischen Polymerchemie. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- EDANA, 2001. Diapers – Health Benefits and Environmental Aspects, European Disposables and Nonwovens Association, Brussels.
- 5 Kost, T., 2001. Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen. Dissertation Thesis, Technische Universität Dresden, Dresden.
- Morf, L.S., Ritter, E. and Brunner, P.H., 1997. Güter- und Stoffbilanz der MVA Wels, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, TU-Wien.
- Morf, L., Reil, E., Ritter, E. (2004) „Vier Jahre routinemäßiges Stoffflussmonitoring an der
10 MVA Spittelau – Resultate und Erfahrungen aus der Praxis“ DEPOTECH 2004 in Leoben, 24.-26. November 2004.
- Schachermayer, E., Bauer, G., Ritter, E. and Brunner, P.H., 1994. Messung der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage. 56, Umweltbundesamtes Wien GmbH., Wien.
- 15 Scholz, R., Beckmann, M. and Schulenburg, F., 2001. Abfallbehandlung in thermischen Verfahren Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Teubner, Stuttgart, 460 pp.
- Skutan, S. and Brunner, P.H., 2003. Stoffbilanzen mechanisch-biologischer Anlagen zur Behandlung von Restmüll (SEMBA) – 5. Zwischenbericht, Technische Universität
20 Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Wien.
- TBHauer, 1999. Oberösterreichische Abfallanalysen, Klosterneuburg.
- TBHauer, 2000. Bestimmung der Heizwertanteile fossiler und regenerativer Energieträger im Müll. Klosterneuburg
- TBHauer, 2002. Gutachten über Art und Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe,
25 des biogenen Anteils und des Anteils an „Abfall mit hohem biogenen Anteil“, Klosterneuburg.
- Wachter, R., 2004. Mündliche Mitteilung, Welser Abfallverwertung



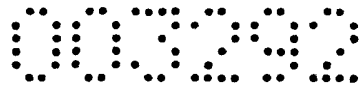
Würdinger, E., Wagner, J., Tränkler, J. and Rommel, W., 1997. Energetische Nutzung der Biomassenanteile in Abfällen, Bayerisches Institut für Abfallforschung (BifA GmbH), Augsburg.

5 Verwendete Formelzeichen

	M_I, M_B, M_F	Masse der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg FS]
	M_{Abfall}	Masse des behandelten Abfalls [kg FS]
	m_I, m_B, m_F	Massenanteil der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg/kg FS]
	$M_{\text{Schrott}}, M_{\text{Schlacke}}$	Masse des Schrotts bzw. der Schlacke [kg TS]
10	$M_{\text{EF-Asche}}, M_{\text{Kesselasche}}$	Masse der Elektrofilterasche bzw. Masse der Kesselasche [kg TS]
	M_{Erdgas}	Masse des zugefeuerten Erdgases bzw. Erdöls [kg]
	w_I, w_B, w_F	Wassergehalt der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg H ₂ O/kg FS]
	w_A	Wassergehalt des Abfalls [kg H ₂ O/kg FS]
	w_H	durch Oxidation von Wasserstoff produziertes Wasser pro kg Abfall [kg H ₂ O/kg FS]
15	w_s	„scheinbarer Wassergehalt“ des Abfalls [kg H ₂ O/kg FS]
	a_I, a_B, a_F	Aschegehalt der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg Asche/kg TS]
	a_A	Aschegehalt des Abfalls [kg Asche/kg TS]
20	$c_{C,I}, c_{C,B}, c_{C,F}$	Kohlenstoffgehalt der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg C/kg aschefrei]
	$c_{C,A}$	Kohlenstoffgehalt des Abfalls [kg C/kg FS]
	$c_{C,\text{Erdgas}}$	Kohlenstoffgehalt von Erdgas bzw. Erdöl [kg C/kg]
	$c_{H,\text{Erdgas}}$	Wasserstoffgehalt von Erdgas bzw. Erdöl [kg C/kg]
25	$c_{H,I}, c_{H,B}, c_{H,F}$	Wasserstoffgehalt der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg H/kg aschefrei]
	$c_{O,I}, c_{O,B}, c_{O,F}$	Sauerstoffgehalt der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg O/kg aschefrei]
	$c_{N,I}, c_{N,B}, c_{N,F}$	Stickstoffgehalt der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg N/kg aschefrei]
30		



	$c_{S,I}, c_{S,B}, c_{S,F}$	Schwefelgehalt der Fraktion Inert, Biogen und Fossil [kg S/kg aschefrei]
	V_R	Reingasmenge, trocken unter Normalbedingungen [Nm ³]
	$T_{C,R}$	Kohlenstoff-Transferkoeffizient ins Rauchgas [-], = 0,982±0,0025
5		(Morf et al., 1997)
	$c_{CO_2,R}$	Kohlendioxidkonzentration im Reingas, trocken, bezogen auf Normalbedingungen [kg/Nm ³]
	$H_{u,A,B}$	Heizwert des Abfalls nach Boje [MJ/kg FS]
	$H_{u,A}$	Heizwert des Abfalls (korrigiert nach Kost (2001)) [MJ/kg FS]
10	$H_{u,Erdgas}$	Heizwert von Erdgas bzw. Erdöl [MJ/kg]
	T_{Luft}	Außentemperatur [°C]
	p_{Luft}	Luftdruck(außen) [hPa]
	p_N	Luftdruck unter Normalbedingungen = 101,3 [hPa]
	a_{Pl-SL}	absolute Feuchte der Primär- und Sekundärluft [kg H ₂ O/m ³]
15	$a_{N,PL-SL}$	absolute Feuchte der Primär- und Sekundärluft bezogen auf Normalbedingungen [kg H ₂ O/Nm ³]
	RF	relative Luftfeuchte [%]
	e	Wasserdampfpartialdruck [hPa] der Luft
	m_{Mmol,H_2O}	Molare Masse von Wasser = 18 g/mol
20	R	universelle Gaskonstante = 8,314472 J/(mol*K)
	V_{PL-SL}	Menge an Primär- und Sekundärluft [Nm ³]
	$m_{H_2O,PL-SL}$	Wasserinput über die Primär- und Sekundärluft [kg]
	$m_{H_2O,Müll,H}$	Wasserinput über die Wasserstoffkonzentration im Müll [kg]
	$T_{Wäscher}$	Temperatur im Wäscher 1 [°C]
25	$p_{Wäscher}$	Druck im Wäscher 1 [hPa]
	p_N	Luftdruck unter Normalbedingungen = 101,3 [hPa]
	$a_{Wäscher}$	absolute Feuchte des Rohgases 2 im Wäscher 1 [kg H ₂ O/m ³]
	$a_{N,Rohgas2}$	absolute Feuchte des Rohgases 2 bezogen auf Normalbedingungen [kg H ₂ O/Nm ³]
30	p_a	Sättigungsdampfdruck [hPa]
	$m_{H_2O,Rohgas2}$	Wasseroutput über das Rohgas 2 [kg]
	WD	Wasserdampfmenge [kg]
	hat''	Enthalpie des Wasserdampfs im Kessel vor der Turbine [MJ/kg]



	h_K'	Enthalpie des Kesselwassers im Kondensator [MJ/kg]
	η	Wirkungsgrad des Dampfkessels = $0,83 \pm 0,04$ (Wachter, 2004)
	$\Delta_{O_2+CO_2,g}$	Differenz aus O_2 -Verbrauch und CO_2 -Produktion des behandelten Abfalls [mol/kg TS]
5	$\Delta_{O_2+CO_2,B}$	Differenz aus O_2 -Verbrauch und CO_2 -Produktion der Fraktion Biogen [mol/kg TS]
	$\Delta_{O_2+CO_2,F}$	Differenz aus O_2 -Verbrauch und CO_2 -Produktion der Fraktion Fossil [mol/kg TS]
10	$c_{O_2,L}$	Sauerstoffkonzentration in der Primär- und Sekundärluft [Vol-%, trocken] (=20,946 %)
	$c_{CO_2,L}$	Kohlendioxidkonzentration in der Primär- und Sekundärluft [Vol-%, trocken] (=0,034 %)
15	$c_{O_2,R}$	Sauerstoffkonzentration im Reingas [Vol-%, trocken]
	$c_{CO_2,R}$	Kohlendioxidkonzentration im Reingas [Vol-%, trocken]
	m_v	Molvolumen [Nm^3/mol] (=0,0224 Nm^3/mol)



Berechnung der stofflichen Zusammensetzung von Sortierfraktionen

Stoffliche Zusammensetzung von Hygienewaren

Tabelle 17 Stoffliche Zusammensetzung von Hygienewaren

Zusammensetzung		Gruppe	C-Gehalt	H-Gehalt	S-Gehalt	N-Gehalt	O-Gehalt
	[m%]		[mg/kg Aschefrei]				
Zellstoff	43%	biogen	444	62	-	-	494
Polymer (SAP)	27%	fossil	500	56	-	-	444
Polyethylen	10%		857	142	-	-	0
Polypropylen	13%		857	142	-	-	0
Klebstoff, Klebebänder	7%		350 [#]	100 [#]	-	-	300 [#]
Summe	100%						
Biogen	43 %	63,8	444	62	2	8*	494
Fossil	57 %	36,2	625	96	2	8*	247

[#] eigene Annahmen

5

- aufgrund fehlender Literaturdaten wurden Analyseergebnisse von Kost (2001) übernommen

1.1.1 Stoffliche Zusammensetzung von Textilien

10 Tabelle 18 Stoffliche Zusammensetzung von Textilien

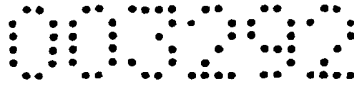
Zusammen- setzung	Gruppe	Anteil an der Weltproduktion	C- Gehalt	H- Gehalt	S- Gehalt	N- Gehalt	O- Gehalt
		[m%]	[mg/kg Aschefrei]				
Baumwolle	biogen	50,9%	444	62	-	-	494
Wolle		4,6%	482	63	71	162	221
Viscose		8,3%	444	62	-	-	494
Polyamide	fossil	8,8%	637	97	-	124	142
Polyester		19,7%	625	42	-	0	333
Polyacrylnitril		5,3%	647	59	-	223	71
Polypropylen		2,3%	857	143	-	-	0
Summe		100%					
Biogen		63,8	447	62	4*	12	474
Fossil		36,2	646	64	4*	63	227

- aufgrund fehlender Literaturdaten wurden Analyseergebnisse von Kost (2001) übernommen

Betriebsdaten der untersuchten MVA im Zeitraum September 2003 bis September 2004

Tabelle 19 meteorologische Daten am Standort, Luftmengen sowie monatliche Wasserflüsse der untersuchten MVA

	Okt. 03	Nov. 03	Dez. 03	Jän. 04	Feb. 04	Mär. 04	Apr. 04	Mai. 04	Jun. 04	Jul. 04	Aug. 04	Sep. 04
Primärluft [1.000 m³/Mo]	13.248	18.972	18.972	18.302	17.052	16.848	18.936	20.832	19.080	19.865	18.144	2.307
Sekundärluft [1.000 m³/Mo]	4.481	6.815	7.661	6.208	5.239	4.739	6.009	6.635	6.207	6.063	5.301	426
Reingas, trocken [1.000 Nm³/Mo]	26.030	33.309	38.770	37.296	33.633	31.721	35.646	38.564	35.572	37.697	37.038	4.253
mittl. Lufttemp. [°C]	6,7	5,2	5,0	-0,1	2,2	3,8	10,5	13,0	16,7	18,7	19,5	9,7
mittl. Luftfeuchte [%]	72,5	82,5	80,1	75,2	67,7	68,8	64,3	62,2	58,7	58,5	55,3	67,5
mittl. Luftdruck [mbar]	978	984	950	975	982	984	976	977	981	980	977	977
Temperatur im Wäscher 1 [°C]	58,3	58,2	54,6	56,4	59,9	56,0	59,9	60,1	61,9	62,7	63,2	58,0
Druck im Wäscher 1 [mbar]	977	982	949	974	980	982	975	976	980	979	976	976
Wassergehalt von Primär- und Sekundärluft [kg/Nm³]	0,0058	0,0060	0,0059	0,0038	0,0040	0,0045	0,0067	0,0077	0,0092	0,010	0,010	0,0069
Wassergehalt im Reingas (im Wäscher 1 – gesättigt) [kg/Nm³]	0,149	0,151	0,150	0,131	0,138	0,163	0,135	0,164	0,165	0,178	0,185	0,190
Wasserimport über Primär- und Sekundärluft [t/Mo]	100	150	160	90	90	100	170	210	230	270	240	20
Wasserexport – Wäscher 1 [t/Mo]	960	1.220	1.210	1.230	1.080	1.020	1.150	950	910	1.160	1.180	80
Wasserexport – Reingas [t/Mo]	4.270	5.510	6.980	6.690	6.180	5.620	6.630	7.160	7.320	8.130	7.550	390

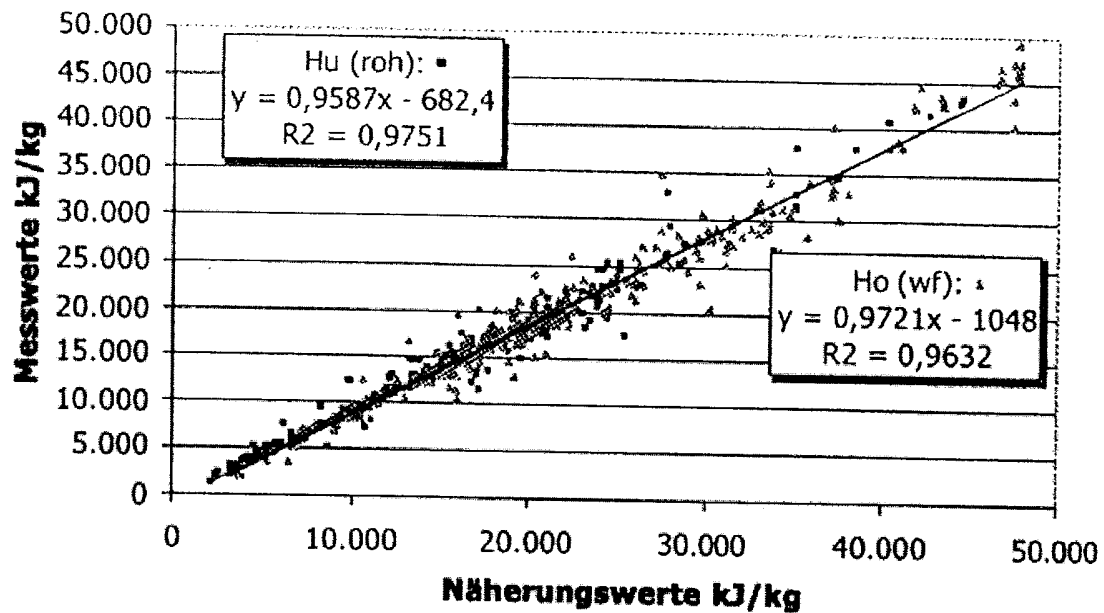


1. Verfahren zur Ermittlung der Anteile biogener und fossiler Energieträger sowie biogener und fossiler Kohlendioxidemissionen beim Betrieb von Verbrennungsanlagen, dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung der Anteile durch die Bestimmung von zumindest drei der folgenden Bilanzen erfolgt, der Massenbilanz, der Aschenbilanz, der Kohlenstoffbilanz, der Energiebilanz, der Bilanz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion und der Wasserbilanz.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung der Anteile zusätzlich durch die Bestimmung zumindest einer weiteren Bilanz erfolgt.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung der Anteile durch die Bestimmung der Massenbilanz, der Aschenbilanz, der Kohlenstoffbilanz, der Energiebilanz, der Bilanz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion erfolgt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Anteile mittels Ausgleichsrechnung ermittelt werden.
5. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Anteile mittels Monte Carlo Simulation ermittelt werden.

003292

C

Formel nach Michel



Formel nach Bole

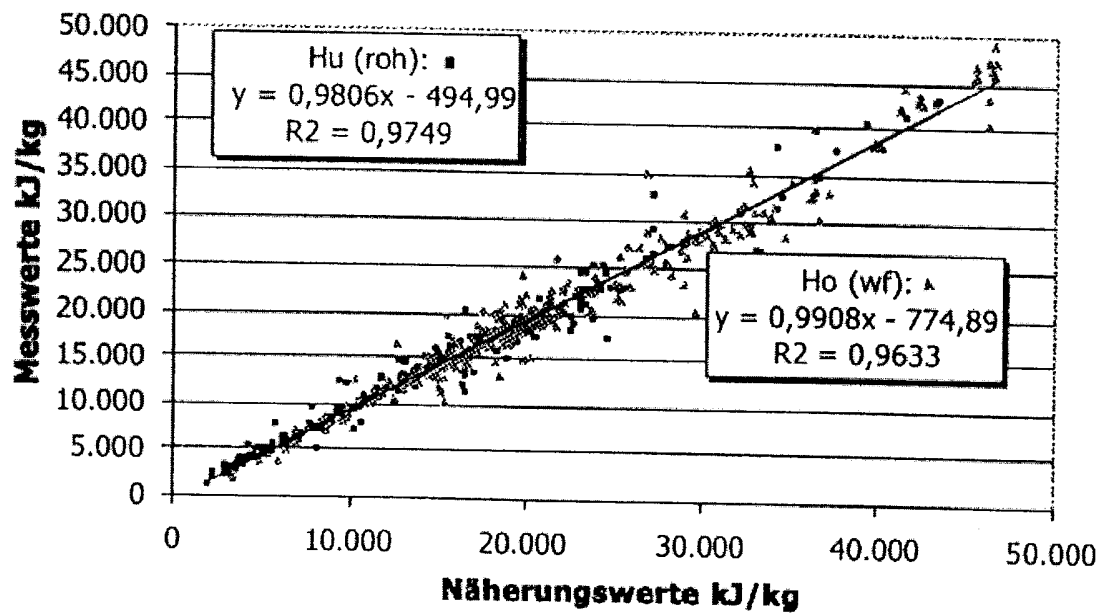


Fig. 1

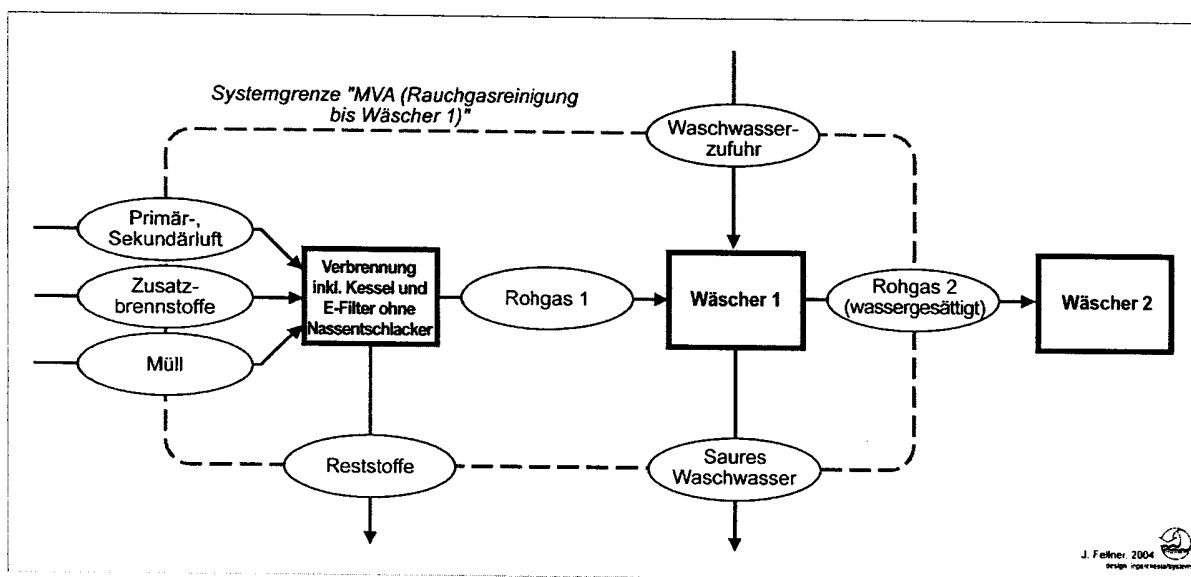


Fig. 2

003092

①

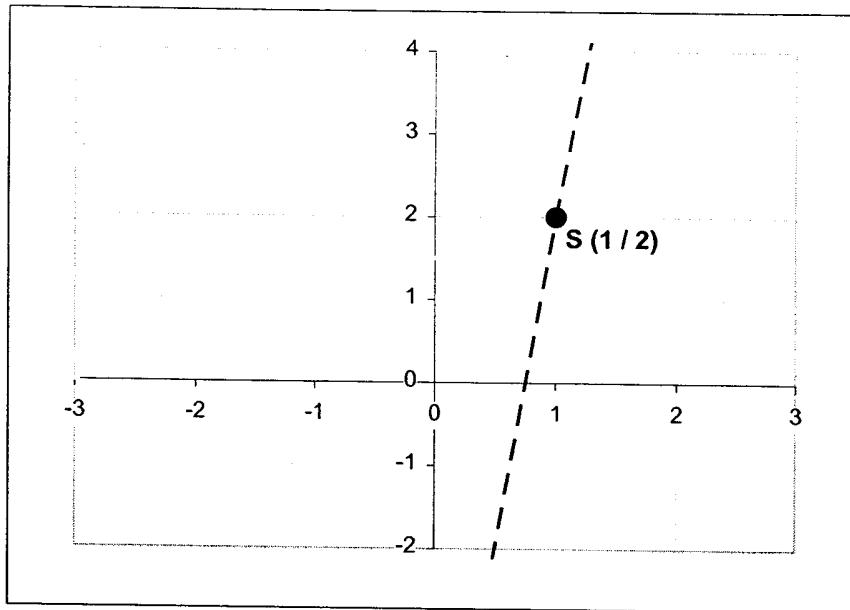


Fig. 3

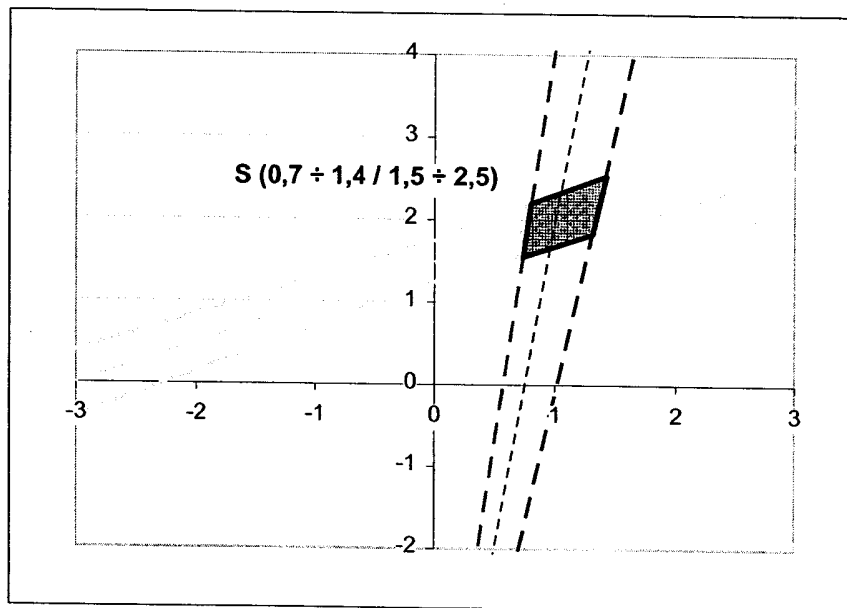


Fig. 4

003292

(1)

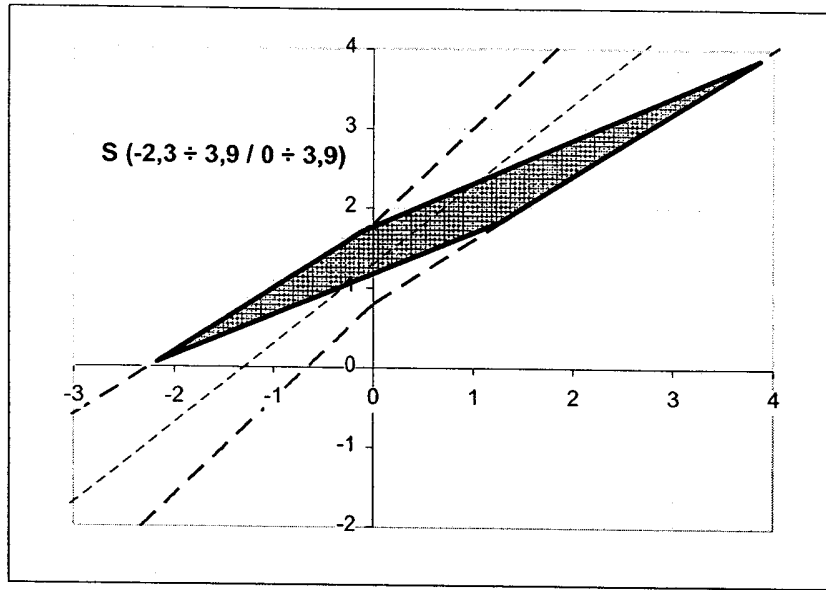


Fig. 5

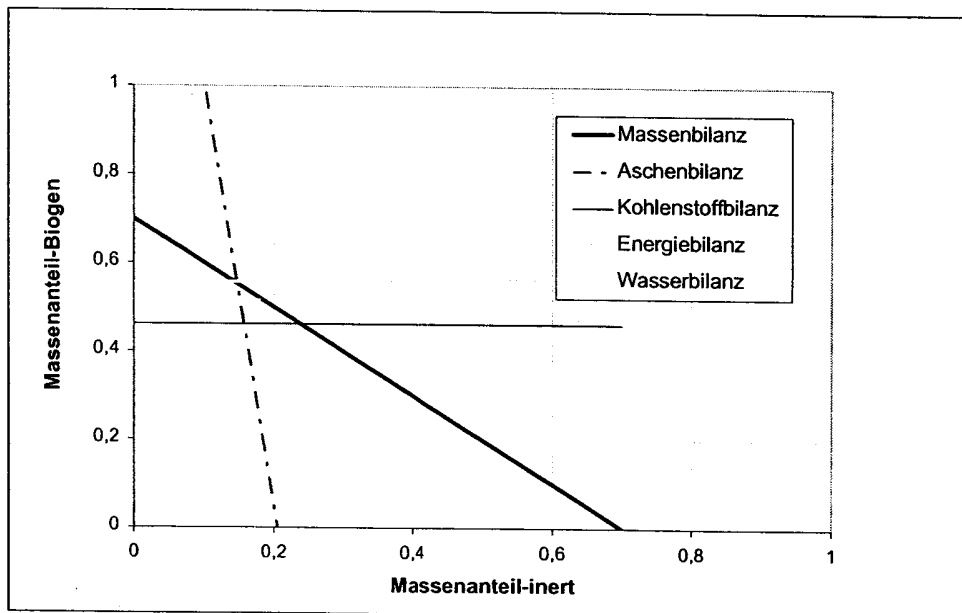


Fig. 6

003092

(1

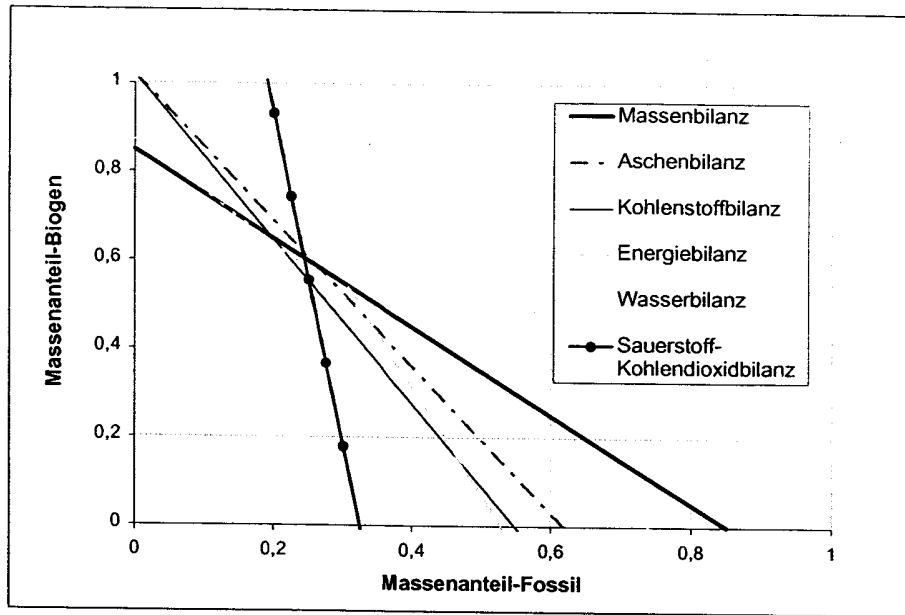


Fig. 7

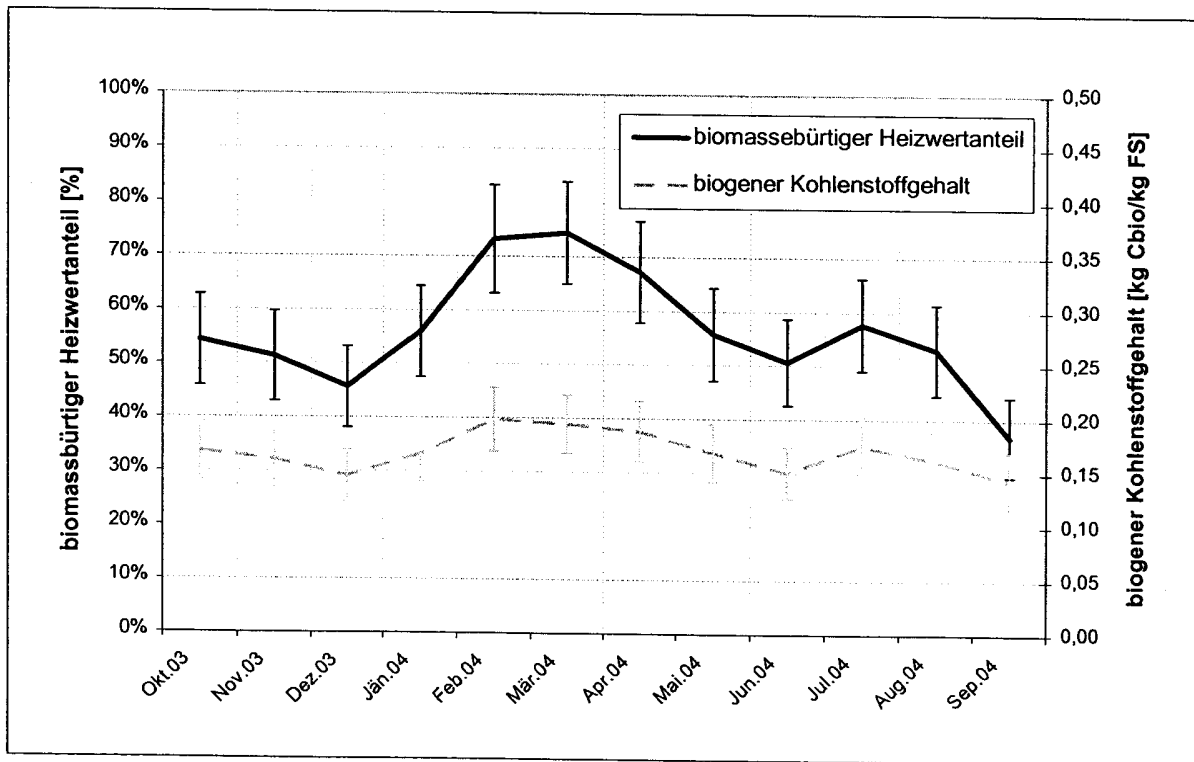


Fig. 8

003292

①

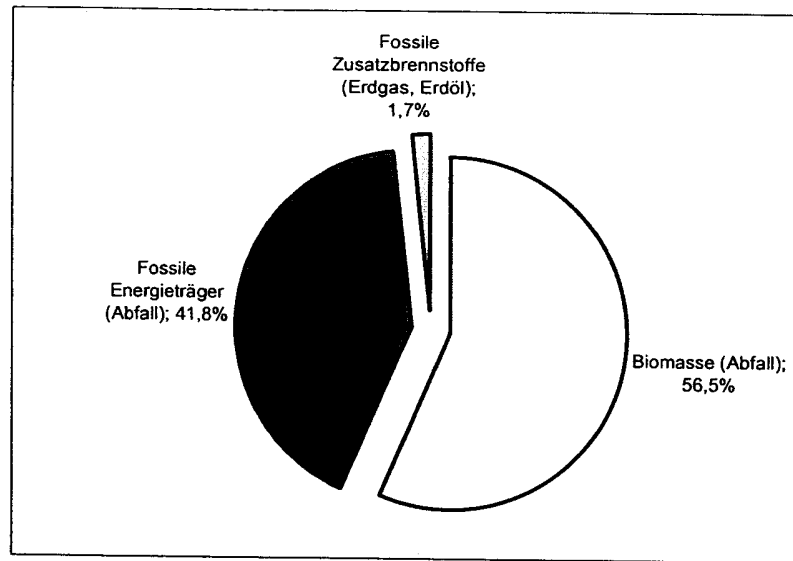


Fig. 9