



(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43)

Veröffentlichungstag:
10.01.2024 Patentblatt 2024/02

(51)

Internationale Patentklassifikation (IPC):
F23G 5/00 (2006.01) F23N 5/00 (2006.01)

(21)

Anmeldenummer: 22183726.3

(52)

Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
F23G 5/00; F23N 5/003; F23N 5/006;
F23G 2900/55003; F23G 2900/55008;
F23G 2900/55011; F23N 2239/02; F23N 2241/18;
F23N 2900/05002

(22)

Anmeldetag: 08.07.2022

(84)

Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(71)

Anmelder: EWR Consult - Ingenieurbüro für
Umwelttechnik e.U.
1100 Wien (AT)

(72)

Erfinder:
• FELLNER, Johann
1100 Wien (AT)
• SCHWARZBÖCK, Therese
1200 Wien (AT)
• DWORAK, Sabine
1090 Wien (AT)

(74)

Vertreter: Patentanwälte
Barger, Piso & Partner
Operngasse 4
1010 Wien (AT)

(54)

VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG DER GESAMTEN, BIOGENEN UND FOSSILEN
KOHLENSTOFF- UND CO2-FRACHT SOWIE DES ABGASVOLUMENSTROMS BEI DER
VERBRENNUNG VON ABFÄLLEN UND ABFALLBÜRTIGEN BRENNSTOFFEN

(57)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der gesamten, biogenen und fossilen Kohlenstoff- und CO₂- Fracht sowie des Abgasvolumenstroms bei der Verbrennung von Abfällen und abfallbürtigen Brennstoffen beim Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen.

Die Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass für die Ermittlung zumindest die zwei Gleichungen betref-

fend die Energiebilanz und des Verhältnisses von biogenem zu fossilem Kohlenstoff und zusätzlich entweder die Kohlenstoffbilanz oder die Sauerstoffverbrauchsbilanz verwendet wird.

In Ausgestaltungen können beide, und auch weitere, Bilanzen verwendet werden.

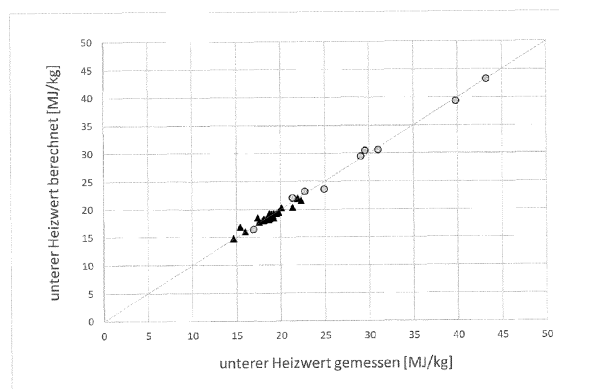


Fig.

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der gesamten, biogenen und fossilen Kohlenstoff- und CO₂-Fracht sowie des Abgasvolumenstroms bei der Verbrennung von Abfällen und abfallbürtigen Brennstoffen mit im Vergleich zu bisherigen Verfahren verbesserter Genauigkeit, entsprechend dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Die Betreiber von Müllverbrennungsanlagen bzw. Mitverbrennungsanlagen (darunter versteht man eine Verbrennungsanlage, in der Abfälle als Ersatz- oder Zusatzbrennstoff bis zu 40 % der in einem Kalendervierteljahr tatsächlich zugeführten durchschnittlichen Gesamtbrennstoffwärmeleistung eingesetzt werden, kann von Jurisdiktion zu Jurisdiktion variieren) sind bzw. werden zukünftig gesetzlich verpflichtet, die während vorgegebener Zeiträume emittierten Kohlenstoff- bzw. CO₂ Frachten auszuweisen. Typischerweise gilt es diese CO₂ Emissionen unterschieden nach ihren Quellen (biogene bzw. erneuerbare Abfallbestandteile, wie z.B. Papier, Holz, oder Küchenabfälle und fossile Abfallbestandteile, wie z.B. Kunststoffe) auszuweisen.

[0003] Um der bestehenden (und zukünftigen) gesetzlichen Verpflichtung nachzukommen, sind gemäß Stand der Technik unterschiedliche Verfahren bekannt, die in der DIN EN ISO 21644:2021-07 beschrieben sind:

- Abfallprobenahme und anschließend

- o Anwendung der manuellen Sortierung (für > 10mm), wobei den einzelnen Abfallfraktionen fossile und biogene Kohlenstoffgehalte zugeordnet werden und diese schlussendlich zu einem Gesamtkohlenstoffgehalt des Abfalls bzw. einem gesamten biogenen und fossilen Kohlenstoffgehalt des Abfalls aggregiert werden.

- o Anwendung der selektiven Lösemethode, bei der die entnommenen Abfallproben mit unterschiedlichen Chemikalien behandelt werden, sodass biogene Abfallbestandteile gelöst werden und fossile Materialien zurückbleiben, wodurch eine Unterscheidung in biogen und fossil ermöglicht wird. Zusätzlich wird den entnommenen Abfallproben nach entsprechender Aufbereitung mittels Elementaranalyse der gesamte Kohlenstoffgehalt sowie der Kohlenstoffgehalt im Löserest bestimmt.

- o Anwendung der Radiocarbonmethode. Hier wird an einer Abfallprobe das Isotopenverhältnis von ¹⁴C zu ¹²C bestimmt und daraus der biogene Kohlenstoffanteil abgeleitet. Zusätzlich ist analog zur selektiven Lösemethode der Gesamtkohlenstoff der Abfallproben zu bestimmen.

[0004] Sämtliche Verfahren, die darauf beruhen, dass repräsentative Abfallproben entnommen, entsprechend aufbereitet und analysiert werden, sind typischer sehr aufwendig, kostenintensiv und aufgrund der großen Heterogenität von Abfällen zumeist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden bzw. einer Vielzahl an Proben um ein möglichst repräsentatives Ergebnis zu erhalten.

[0005] Alternativ zur Abfallprobennahme können folgende alternative Verfahren verwendet werden, die entweder die Material- und Energieströme der Anlage bilanzieren oder eine Probenahme im Abgas der Anlage durchführen. Beschrieben sind diese Methoden im Detail in den Normen ISO 18466:2016 und ISO 13833:2013:

- Bilanzenmethode. Diese beruht auf einem mathematischen Abgleich von verschiedenen Energie- und Stoffbilanzen der Müllverbrennungsanlage
- Die Radiocarbonmethode mit Probenahme des CO₂ im Abgas der Anlage und anschließende Analyse auf das Isotopenverhältnis von ¹⁴C zu ¹²C, das proportional zum biogenen Kohlenstoff- bzw. CO₂-Anteil ist.

[0006] Alternativ zur Radiocarbonmethode kann auch das in der WO2020252513 (Verfahren zur Analyse des Betriebs und zur Betriebsoptimierung von Müllverbrennungsanlagen) offenbarte Verfahren zur Bestimmung des Anteils an biogenem bzw. fossilem Kohlenstoff im Abfallinput bzw. Abgas einer Abfallverbrennungsanlage verwendet werden. Dieses Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass im Abgas der Gehalt an CO₂ gemessen wird und, gegebenenfalls nach Rückführung dieses Messwertes auf einen normierten O₂ Gehalt im Abgas, das Verhältnisses von biogenem zu fossilen Kohlenstoff im verbrannten Müll bestimmt werden kann.

[0007] Der Vorteil der Radiocarbonmethode gegenüber der Bilanzenmethode bzw. dem Verfahren der WO2020252513 ist, dass das Verhältnis von fossilen zu biogenem Kohlenstoff bzw. fossilen zu biogenem CO₂ genau bestimmt werden kann (mit geringerer Unsicherheit). Ein Nachteil der Radiocarbonmethode (und auch des Verfahrens der WO202025251) ist hingegen, dass zur Ermittlung der biogenen und fossilen Kohlenstoff-Fracht bzw. CO₂-Fracht, diese Verhältniszahl (biogener Kohlenstoffanteil bzw. fossiler Kohlenstoffanteil) mit dem Abgasvolumenstrom und der CO₂ Konzentration im Abgas multipliziert werden muss, um schlussendliche eine biogene bzw. fossilen CO₂ Fracht bestimmen zu können (siehe Gleichung 1 und Gleichung 2).

[0008] Sowohl der Abgasvolumenstrom als auch in vielen Fällen die CO₂ Konzentration im Abgas werden in Müllverbrennungsanlagen oft nur mit unzureichender Genauigkeit bestimmt (in seltenen Fällen verfügt die Anlage über keine CO₂ Messung im Abgas.).

[0009] Demzufolge bedeutet eine hohe Genauigkeit der Radiocarbonmessung zur Bestimmung des biogen Kohlenstoffanteils $f_{CO_2, biogen}$ bzw. fossilen Kohlenstoffanteils $(1 - f_{CO_2, biogen})$ nicht unmittelbar eine hohe Endgenauigkeit der biogenen und fossilen CO₂ Fracht, die allerdings die gesetzlich relevanten Ergebnisse darstellen.

$$M_{CO_2, biogen} = \frac{c_{CO_2, fg}}{100} * \frac{V_{fg} * m_{CO_2}}{v_{mol}} * f_{CO_2, biogen} * \frac{1}{1000} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$M_{CO_2, fossil} = \frac{c_{CO_2, fg}}{100} * \frac{V_{fg} * m_{CO_2}}{v_{mol}} * (1 - f_{CO_2, biogen}) * \frac{1}{1000} \quad \text{Gleichung 2}$$

[0010] Die Bilanzenmethode hingegen weist eine geringere Genauigkeit hinsichtlich des Anteils an biogenen bzw. fossilen Kohlenstoff und CO₂ auf (ähnlich zum Verfahren der WO202025251). Gleichzeitig ist die Bilanzenmethode jedoch in der Lage durch das überbestimmte System an Energie und Stoffbilanzen, die Genauigkeit der Abgasvolumenstrommessung zu verbessern (die Messunsicherheit wird reduziert).

[0011] Folglich leiden alle drei Verfahren unter unterschiedlichen Nachteilen, die schlussendlich eine Bestimmung der fossilen und biogenen CO₂ Frachten mit hohen Genauigkeiten (Fehler von unter 3% relativ) kaum erlauben.

[0012] Es besteht somit ein Bedarf an einem genauen und doch einfachen Verfahren zur Bestimmung der fossilen und biogenen CO₂ Frachten, und es ist Ziel und Aufgabe der Erfindung, ein solches Verfahren anzugeben.

[0013] Die Erfindung löst diese Aufgabe durch die im kennzeichnenden Teil des Anspruches¹ angegebenen Merkmale. Mit anderen Worten, durch eine neue Kombination von zwei Verfahren (Radiocarbonmethode und Bilanzenmethode bzw. Bilanzenmethode und Verfahren der WO202025251) in einer speziellen Form, wodurch die Genauigkeit des benötigten Endergebnisses (fossile und biogene CO₂ Fracht) auf unerwartete Weise stark verbessert wird.

[0014] Im Konkreten sieht die Erfindung vor, dass das Ergebnis der Radiocarbonbestimmung bzw. des Verfahrens der WO202025251 in Form einer weiteren "Gleichung" in die Bilanzenmethode integriert wird und auf diese Weise wertvolle weitere Information den Bilanzgleichungen zugeführt wird, was es schlussendlich erlaubt, sowohl den Abgasvolumenstrom als auch die CO₂ Konzentration im Abgas mit hoher Genauigkeit (Fehler < 3 % relativ) zu bestimmen/zu berechnen.

[0015] Im Konkreten beruht das so entwickelte Verfahren/Erfindung darauf, dass wasser- und aschefreie fossile als aus biogene Materialien ein jeweils relativ konstantes Verhältnis von Kohlenstoffgehalt und dazugehörigem Heizwert aufweisen. Dh. bei bekanntem Heizwert (errechenbar aus der Energiebilanz der Anlage) und bekanntem Verhältnis von biogenem zu fossilem Kohlenstoff im Abfall ergibt sich für trockenen Abfall eine genau ermittelbare Verhältniszahl von Kohlenstoff zu Heizwert, aus der wiederum über den Heizwert der Kohlenstoffgehalt des Abfalls (Produkt aus Abgasvolumenstrom und CO₂ Konzentration im Abgas) errechnet werden kann. Wird feuchter Abfall betrachtet, so ist zusätzlich der Wassergehalt bei der Errechnung der Verhältniszahl zwischen Kohlenstoff und Heizwert des Abfalls zu berücksichtigen (erfolgt bei Anwendung der Bilanzenmethode unter Berücksichtigung der Massenbilanz bei bekanntem Aschegehalt).

[0016] Anders als bei der aus der EP 1 715 339 A3 bekannten: "bestehenden Bilanzenmethode" ist es das primäre Ziel der Erfindung, nicht die Massenanteile an biogenen, fossilen, und inerten Materialien sowie Wasser zu bestimmen, sondern den Abgasvolumenstrom und die CO₂ Konzentration mit hoher Genauigkeit zu ermitteln. Beide können anschließend gemeinsam mit dem Resultat der Radiocarbonbestimmung bzw. dem Verfahren der WO202025251 ($f_{CO_2, biogen}$) in Gleichung 1 und Gleichung 2 eingesetzt werden um die fossile und biogene Kohlenstoff- bzw. CO₂ Fracht mit minimaler Unsicherheit zu bestimmen.

[0017] Im Folgenden sind die Gleichungen der bestehenden Bilanzenmethode (gemäß ISO 18466:2016) sowie die Erweiterung um eine zusätzliche Gleichung (Berücksichtigung des Ergebnisses der Radiocarbonmethode bzw. des Verfahrens der WO202025251 - siehe Gleichung 14) angeführt. Dabei wird bei der Energiebilanz (Bilanz 5) auf die einzige Figur verwiesen. Diese zeigt einen Vergleich der Heizwerte von verschiedenen wasser- und aschefreien Kunststoffen (dargestellt durch Kreissymbole) und biogenen Materialien, wie Holz, Papier, Küchenabfälle (dargestellt durch Dreieckssymbole), die sich im Abfall befinden können. Auf der x-Achse sind Messdaten der Heizwerte (in MJ/kg) aufgetragen, während auf der y-Achse mittels Boje-Formel und der Elementarzusammensetzung der Materialien berechnete Heizwerte (in MJ/kg) aufgetragen wurden. Es zeigt sich zwischen den gemessenen und den berechneten Heizwerten eine sehr gute Übereinstimmung. Die Messdaten stammen aus unterschiedlichen Quellen (Zahlen zu Kunststoffen vorwiegend aus Schjerve & Schneider, 2018 Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz, Bauphysik Kalender 2018: Zahlen zu unterschiedlichen biogenen Materialien wurden primär der Phyllis Datenbank <https://phyllis.nl/> entnommen).

1. Massenbilanz

[0018] Die Gesamtmasse ergibt sich aus der Summe der Masse an inertem Material M_I , Masse an wasser- und aschefreiem (waf) biogenen Material M_B , Masse an waf fossilen Material M_F , und Masse an Wasser M_W . Bezogen auf die gesamte Abfallmasse M_{Abfall} ergibt sich folgende Gleichung:

$$m_B + m_F + m_I + m_W = 1 \quad \text{Gleichung 3}$$

$$m_B = \frac{M_B}{M_{Abfall}} \quad m_F = \frac{M_F}{M_{Abfall}} \quad m_I = \frac{M_I}{M_{Abfall}} \quad \text{Gleichung 4 bis 6}$$

$$m_W = \frac{M_W}{M_{Abfall}} \quad \text{Gleichung 7}$$

2. "Aschen"-bilanz

[0019] Der Aschegehalt des Abfalls m_I (bezogen auf die Feuchtschubstanz des Abfalls) errechnet sich aus der Trockenmasse der Verbrennungsrückstände $M_{Verbrennungsrückstände}$ bezogen auf den gesamten Abfallinput M_{Abfall} .

$$m_I = \frac{M_{Verbrennungsrückstände}}{M_{Abfall}} \quad \text{Gleichung 8}$$

[0020] Eine potentielle Massenänderung von "inerten" Materialien bei der Verbrennung durch beispielsweise die Oxidation von Metallen (Aluminium) sind für die Aschenbilanz unerheblich. Ebenso ist der Gehalt an Rauchgasreinigungsmitteln (CaO bzw. NaO) in den Rückständen (Aschen) für die Bilanz zumeist unbedeutend. Beides kann jedoch auch massenmäßig näherungsweise berücksichtigt werden.

3. Kohlenstoffbilanz

[0021] Der Kohlenstoffgehalt des Abfalls C_{Abfall} ergibt sich aus den einzelnen Kohlenstoffgehalten der waf Fraktionen Biogen und Fossil. Wertebereiche für die Kohlenstoffgehalte dieser beiden waf Fraktionen lassen sich wiederum aus Sortieranaysen und Literaturangaben ableiten (siehe Schwarzböck et al. 2017). Dieser rechnerisch abgeleitete organische Kohlenstoffgehalt des Abfalls (zuzüglich einem zumeist gering angenommenem anorganischen Kohlenstoffgehalt) muss mit dem mittleren Kohlenstoffgehalt des Abfalls C_{Abfall} übereinstimmen, der sich aus der Reingasmenge und der CO₂ Konzentration ergibt (siehe Gleichung 9).

$$\begin{aligned} (m_B * cCb + m_F * cCf) * 1000 + C_{anorg} &= C_{Abfall} = \\ &= \left[V_{fg} * \left(c_{CO_2,fg} - \frac{(100 - c_{O_2,fg} - c_{CO_2,fg})}{(100 - c_{O_2,air} - c_{CO_2,air})} * c_{CO_2,air} \right) * \frac{1}{100} \right. \\ &\quad \left. ** \frac{MC}{v_{mol}} \right] * \frac{1000}{M_{Abfall}} \end{aligned}$$

Gleichung 9

4. Sauerstoffverbrauchs Bilanz

[0022] Der Sauerstoffverbrauch der Abfallverbrennung $O_{2,verbr_Abfall}$ errechnet sich aus der Elementarzusammensetzung von waf biogenen und fossilen Materialien und deren Massenanteile (m_B, m_F) und muss mit dem im Abgas beobachteten Sauerstoffverbrauch übereinstimmen (siehe Gleichung 10).

$$\begin{aligned}
& m_B * \left(\frac{cCb}{MC} + \frac{cHb}{4 * MH} - \frac{cOb}{2 * MO} + \frac{cNb}{MN} + \frac{cSb}{MS} \right) * 1000 + m_F * \\
& * \left(\frac{cCf}{MC} + \frac{cHf - cClf / MCl}{4 * MH} - \frac{cOf}{2 * MO} + \frac{cNf}{MN} + \frac{cSf}{MS} \right) * 1000 \\
& + O2_{anorg} = O2_{verbr_{Abfall}} = \\
& = \left[V_{fg} * \left(c_{O2,air} * \frac{(100 - c_{O2,fg} - c_{CO2,fg})}{(100 - c_{O2,air} - c_{CO2,air})} - c_{O2,fg} \right) * \frac{1}{100} * \right. \\
& \left. * \frac{1000}{v_{mol}} \right] * \frac{1}{M_{Abfall}}
\end{aligned}$$

Gleichung 10

[0023] Der Sauerstoffumsatz infolge Oxidation anorganischer Materialien kann durch die Aufnahmen des Parameters $O2_{anorg}$ berücksichtigt werden. Generell ist dieser Faktor jedoch sehr gering und zumeist von vernachlässigbarer Bedeutung für die Sauerstoffverbrauchsbilanz.

5. Energiebilanz

[0024] Der untere Heizwert des Abfalls HW_{Abfall} kann über die Elementarzusammensetzung der beiden Fraktionen Biogen und Fossil und deren Massenanteile (m_B, m_F) und den Wassergehalt m_W bestimmt werden, wobei dafür unterschiedliche empirische Gleichungen herangezogen werden können. Im Konkreten wird die Formel von Boie (1957) für Abfälle empfohlen, da für diese die beste Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Heizwerten von Abfallbestandteilen festgestellt wurde (siehe Abbildung 1 bzw. Kost, 2001).

$$\begin{aligned}
& m_B * (cCb * 34,8 + cHb * 93,9 - cOb * 10,8 + cNb * 6,3 + cSb * 10,5) * 1000 \\
& + \\
& + m_F * \left(cCf * 34,8 + \left(cHf - \frac{cClf}{MCl} \right) * 93,9 - cOf * 10,8 + cNf * 6,3 + cSf \right. \\
& \left. * 10,5 \right) * 1000 - m_W * 2450 = HW_{Abfall} \\
& = \left[\frac{M_{Dampf} * \Delta h}{\eta} \right] * \frac{1}{M_{Abfall}}
\end{aligned}$$

Gleichung 11

6. Stoffbilanzen für biogene und fossile Materialien

[0025] Die Summe der Konzentrationen der Elemente C, H, O, N, S und Cl bezogen auf wasser- und aschefreie biogene bzw. fossile Substanz muss näherungsweise 1 ergeben.

$$cCb + cHb + cOb + cNb + cSb = 1$$

Gleichung 12

$$cCf + cHf + cOf + cNf + cSf + cClf = 1$$

Gleichung 13

7. Gleichung zum Verhältnis von biogenem zu fossilem Kohlenstoff

[0026] Der Massenanteil an biogenem Material m_B multipliziert mit der Kohlenstoffgehalt cCb der wasser- und asche-freien Biomasse dividiert durch den Gesamtkohlenstoffgehalt C_{Abfall} muss dem über die Radiocarbonmethode bzw. dem Verfahren der WO202025251 bestimmten biogenen Kohlenstoffanteil $f_{CO2,biogen}$ entsprechen.

$$\frac{m_B * cCb}{C_{Abfall}} = f_{CO2,biogen}$$

Gleichung 14

Mathematische Lösung der Gleichungen

[0027] Ein Zusammenführen der vorgestellten Bilanzgleichungen führt zu einem linearen Gleichungssystem von acht Gleichungen mit vier Unbekannten m_I , m_B , m_F und m_W Massenanteilen und je nachdem ob eine gesicherte Volumenstrommessung des Abgases und eine CO₂ Konzentrationsmessung im Abgas vorhanden ist zu weiteren 2 Unbekannten (V_{fg} und $c_{CO2,fg}$). Es handelt sich somit um ein überbestimmtes System, dessen Lösung über eine Ausgleichrechnung ermittelt werden muss. Die Koeffizienten (cCb , cCf , ...) der Unbekannten und die Anlagenmesswerte sind durch Mittelwerte (wahrscheinlichste Werte) und Unsicherheitsbereiche gegeben.

[0028] Gelöst wird das Gleichungssystem über nichtlineare Ausgleichsrechnung (siehe zB. Narasimhan & Jordache, 2000).

[0029] In unterschiedlichen Ausprägungen der Erfindung kann auch auf einzelne Gleichungen verzichten werden, wobei dies zumeist mit einem Genauigkeitsverlust (höhere Unsicherheit des Endergebnisses verbunden ist).

[0030] Wesentlich für die Anwendung ist jedoch zumindest die Verwendung der Gleichungen 14, 11 und 9 bzw. 14, 11 und 10, wobei in diesem Fall Näherungsannahmen für den Wassergehalt des Abfalls m_W getroffen werden müssen.

Beispiele

Beispiel A Müllverbrennungsanlage I

[0031] Es liegen Betriebsdaten für alle gemäß dem Gleichungssystem benötigten Parameter vor, wobei die Messunsicherheit des Reingasvolumenstroms V_{fg} mit einer relativen Unsicherheit von $\pm 15\%$ relativ groß ist. Zusätzlich zu den Betriebsdaten liegt das Ergebnis der Radiocarbonmessung, der Anteil an biogenem Kohlenstoff $f_{CO2,biogen}$, vor (siehe Tabelle 1). Ziel ist es, durch das erfindungsgemäße Verfahren die hohe Unsicherheit des Reingasvolumenstroms durch die Berechnung zu reduzieren.

Tabelle 1: Betriebsdaten der Anlage bzw. Messdaten aus der 14C Messung

Parameter	Einheit	Mittel- bzw. Summenwert	Standardabweichung
M_{Abfall}	t/Monat	20 752	311
$M_{Verbrennungsrückstände}$	t/Monat	3 721	112
V_{fg}	Nm ³ /Monat	99 107 000	14 866 050
$c_{O2,fg}$	Vol-%	7,83	0,0783
$c_{CO2,fg}$	Vol-%	11,28	0,1692
M_{Dampf}	t H ₂ O/Monat	77 777	389
Δh	MJ/t H ₂ O	2 626	6
η	-	0,880	0,005
$f_{CO2,biogen}$	kg C/kg C	0,542	0,012

[0032] Zusätzlich fließen in das Gleichungssystem Informationen über die Elementarzusammensetzung von wasser-

EP 4 303 491 A1

und aschefreier Biomasse und fossilen Materialien ein. Diese sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 (Kovarianzen zwischen einzelnen Elementargehalten) zusammengefasst. Die Information aus Tabelle 2 und Tabelle 3 gilt auch für die Beispiele B und C.

[0033] $O_{2,anorg}$ und C_{anorg} wurden im gegenständlichen Beispiel vernachlässigt bzw. mit Null angenommen.

[0034] Ohne Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrenswürden sich unter Anwendung der Gleichungen 1 und 2 und gemäß Gauß'scher Fehlerfortpflanzung folgende Werte und Unsicherheiten für die biogenen und fossilen CO₂ Emissionsfrachten ergeben:

$$M_{CO_2,biogen} = \frac{11,28}{100} * \frac{99\,107\,000 * 44}{22,414} * 0,542 * \frac{1}{1000} = 11\,894 \pm 1\,812 \text{ Tonnen CO}_2/\text{Monat}$$

$$M_{CO_2,fossil} = \frac{11,28}{100} * \frac{99\,107\,000 * 44}{22,414} * (1 - 0,542) * \frac{1}{1000} = 10\,051 \pm 1\,538 \text{ Tonnen CO}_2/\text{Monat}$$

Tabelle 2: Wertebereiche für die Elementarzusammensetzung von biogenen und fossilen Materialien (auf wasser- und aschefreier waf Basis) - basierend auf Schwarzböck et al. 2017

Parameter	Einheit	Mittelwert	Standardabweichung
cCb	kg C/kg waf	0,4826	0,00476
cHb	kg H/kg waf	0,06478	0,00126
cOb	Kg O/kg waf	0,44329	0,00533
cNb	kg N/kg waf	0,00699	0,00239
cSb	kg S/kg waf	0,00114	0,00035
cCf	kg C/kg waf	0,77736	0,01578
cHf	kg H/kg waf	0,1123	0,00486
cOf	Kg O/kg waf	0,06132	0,01163
cNf	kg N/kg waf	0,01391	0,00257
cSf	kg S/kg waf	0,00295	0,00108
cClf	kg Cl/kg waf	0,03216	0,01505

Tabelle 3: Kovarianz zwischen einzelnen Parametern der Elementarzusammensetzung von biogenen und fossilen Materialien (auf wasser- und aschefreier waf Basis)

1. Variable	2. Variable	Ko-Varianz
cOb	cCb	-2,3137E-05
cHb	cCb	4,083E-06
cOb	cHb	-6,0258E-06
cOf	cCf	-0,00014294
cHf	cCf	6,5356E-05
cOf	cHf	-4,7448E-05

[0035] Nach Einsetzen der Werte in die Gleichungen 3 bis 14 und Anwendung einer nichtlinearen Ausgleichsrechnung für das so entstehende Gleichungssystem ergeben sich folgende ausgeglichene Werte (Tabelle 4):

Tabelle 4: ausgeglichene Betriebsdaten der Anlage bzw. Messdaten aus der ^{14}C Messung (nach Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens)

Parameter	Einheit	Mittel- bzw. Summenwert	Standardabweichung
V_{fg}	Nm ³ /Monat	98 536 535	1 607 982
$c_{\text{CO}_2, fg}$	Vol-%	11,255	0,151
$f_{\text{CO}_2, biogen}$	kg C/kg C	0,542	0,012

[0036] Die biogenen bzw. fossilen CO₂ Emissionen (inkl. Unsicherheiten) ergeben sich schlussendlich nach Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens und den ermittelten Daten gemäß Tabelle 4 und den sich aus dem erfindungsgemäßen Verfahrens ergebenden Covarianzen (nicht dargestellt) zwischen den Parameter zu :

$$M_{\text{CO}_2, biogen} = \frac{11,255}{100} * \frac{98\,536\,535 * 44}{22,414} * 0,542 * \frac{1}{1000} = 11\,809 \pm 308 \text{ Tonnen CO}_2 / \text{Monat}$$

$$M_{\text{CO}_2, fossil} = \frac{11,255}{100} * \frac{98\,536\,535 * 44}{22,414} * (1 - 0,542) * \frac{1}{1000} = 9\,966 \pm 261 \text{ Tonnen CO}_2 / \text{Monat}$$

[0037] Die Unsicherheit des Ergebnisses konnte durch die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens deutlich (nahezu um Faktor 6) reduziert werden von $\pm 1\,538$ Tonnen CO₂/Monat auf ± 261 Tonnen CO₂/Monat (die fossilen CO₂ Emissionen betreffend). Noch deutlicher wurde die Unsicherheit des Reingasvolumenstroms von $\pm 14,9$ Mio Nm³/Monat auf $\pm 1,6$ Mio Nm³/Monat reduziert (Reduktion um Faktor 9,3).

Beispiel B: Müllverbrennungsanlage II

[0038] Es liegen Betriebsdaten für alle gemäß dem Gleichungssystem benötigten Parameter vor, mit Ausnahme der CO₂ Messung $c_{\text{CO}_2, fg}$, die an der gegenständlichen Anlage nicht installiert ist. Hinzukommt, dass die Messunsicherheit des Reingasvolumenstroms V_{fg} mit einer relativen Unsicherheit von $\pm 10\%$ relativ groß ist. Zusätzlich zu den Betriebsdaten liegt das Ergebnis der Radiocarbonmessung, der Anteil an biogenem Kohlenstoff $f_{\text{CO}_2, biogen}$, vor (siehe Tabelle 5). Ziel ist es durch das erfindungsgemäße Verfahren die CO₂ Konzentration im Reingas zu errechnen und die Unsicherheit des Reingasvolumenstroms durch die Berechnung zu reduzieren.

Tabelle 5: Betriebsdaten der Anlage bzw. Messdaten aus der ^{14}C Messung

Parameter	Einheit	Mittel- bzw. Summenwert	Standardabweichung
M_{Abfall}	t/Monat	20 752	311
$M_{\text{Verbrennungsrückstände}}$	t/Monat	3 721	112
V_{fg}	Nm ³ /Monat	99 107 000	9 910 700
$c_{\text{O}_2, fg}$	Vol-%	7,83	0,0783
$c_{\text{CO}_2, fg}$	Vol-%	?	?
M_{Dampf}	t H ₂ O/Monat	77 777	389
Δh	MJ/t H ₂ O	2 626	6
η	-	0,880	0,005
$f_{\text{CO}_2, biogen}$	kg C/kg C	0,542	0,012

[0039] Die Wertebereiche für die Elementarzusammensetzung von biogenen und fossilen Materialien sind analog zu Beispiel A (siehe Tabelle 2 und 3).

[0040] Da keine CO₂ Messung vorliegt, können selbst bei vorhandener Radiocarbonmessung die biogenen und fossilen CO₂ Emissionen nicht bestimmt werden.

[0041] Durch Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann die CO₂ Konzentration im Reingas errechnet werden, ebenso kann die Unsicherheit des Reingasvolumenstroms reduziert werden. Es ergeben sich nach Anwendung der nichtlinearen Ausgleichsrechnung folgende Wertebereiche (siehe Tabelle 6), wobei die Ausgleichsrechnung in folgenden Formeln bzw. Schritten erfolgt:

Das generelle Datenausgleichsproblem lässt sich als gewichtetes Optimierungsproblem der kleinsten Quadrate darstellen:

Konkret geht es um die Minimierung von

$$\text{Min } (\tilde{x} - x)^T \Sigma^{-1} (\tilde{x} - x)$$

Mit der Bedingung von

$$f(u, x, z) = 0$$

mit

- f Vektor ($m \times 1$) mit Gleichheitsbeschränkung
- u Vektor ($p \times 1$) der nicht gemessenen Variablen
- x Vektor ($n \times 1$) der gemessenen Variablen
- $\tilde{x}$ Vektor ($n \times 1$) der Messwerte der gemessenen Variablen
- z Vektor ($q \times 1$) der Konstanten

[0042] Da es sich um zum Teil nichtlineare Bedingungen im Gleichungssystem handelt wurde die Methode iterativen Lösung durch sukzessive lineare Approximation mittels Taylorreihenentwicklung für die Funktion $f(u, x, z) = 0$ gewählt, wobei lediglich der konstante Term und die erste Ableitung berücksichtigt wurden.

$$f(u, x, z) = J_u(u - \hat{u}) + J_x(x - \hat{x}) + f(\hat{u}, \hat{x}, z) = 0$$

[0043] Dies entspricht in Matrixform

$$\begin{bmatrix} J_u & J_x & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u - \hat{u} \\ x - \hat{x} \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

mit

- $\hat{u}$ Vektor ($p \times 1$) der geschätzten Werte der nicht gemessenen Variablen
- $\hat{x}$ Vektor ($n \times 1$) der geschätzten Werte der gemessenen Variablen
- Σ Varianz-Kovarianz Matrix ($n \times n$) der Messwerte

- J_u Jacobi-Matrix ($m \times p$) der nicht gemessenen Variablen
- J_x Jacobi-Matrix ($m \times n$) der gemessenen Variablen

$$J_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial u_1} & \frac{\partial f_m}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial u_p} \end{bmatrix}$$

$$J_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

[0044] Für diese linearisierte Form der Gleichung wird dann die Methode der linearen Ausgleichsrechnung angewandt, wobei das Prozedere der linearen Approximation mittels Taylorreihenentwicklung und lineare Ausgleichsrechnung mehrmals iterativ wiederholt wird, bis die entsprechende Lösung für die nicht lineare Funktion gefunden wird (ausreichende Annäherung der linearen Approximation an die nichtlineare Funktion).

[0045] Für das bestehende Gleichungssystem des erfindungsgemäßen Verfahrens bestehen die Vektoren u und x aus folgenden Variablen:

$$u = [m_B \quad m_F \quad m_W \quad m_I \quad V_{fg}]$$

$$x = \begin{bmatrix} cCb & cHb & cOb & cNb & cSb & cCf & cHf & cOf & cNf & cSf & cClf \\ & c_{O2,fg} & c_{CO2,fg} & f_{CO2,biogen} & M_{Abfall} & M_{Verbrennungsrückstände} \\ & & & M_{Dampf} & \Delta h & \eta \end{bmatrix}$$

[0046] Im Rahmen jeder Iteration wird ein Berechnungsverfahren gemäß der Projektionsmatrix von Crowe herangezogen um die lineare Ausgleichsrechnung durchzuführen. Dabei werden im Groben die folgenden Schritte durchlaufen:

1. Schritt: die Messwerte $\tilde{x}$ der gemessenen Variablen x werden als erste Schätzwerte verwendet. Die ersten Schätzwerte $\hat{u}$ für die Unbekannten u müssen vom Benutzer vorgegeben werden.
2. Schritt: die Jacobi Matrizen J_u, J_x werden berechnet.
3. Schritt: f, J_u und J_x werden für $\hat{u}, x, z$ ausgewertet.
4. Schritt: die reduzierte Stufenform (rref) von $[J_u \ J_x \ f]$ wird abgeleitet. Die Idee dahinter ist es, ein Gleichungssystem zu finden welches nur Funktionen von gemessenen Variablen beinhaltet

$$rref [J_u \ J_x \ f] = \begin{bmatrix} I & A_{xc} & A_{zc} \\ 0 & A_{xr} & A_{zr} \end{bmatrix}$$

mit

I Identitätsmatrix ($p \times p$)

A_{xc} Matrix ($p \times n$) für die Berechnung der nicht gemessenen Variablen

A_{zc} Matrix ($p \times 1$) für die Berechnung der nicht gemessenen Variablen (konstanter Teil)

A_{xr} Matrix $((m-p) \times n)$ für den Datenausgleich

A_{zr} Matrix $((m-p) \times 1)$ für den Datenausgleich (konstanter Teil)

Der untere Bereich der Matrix kann verwendet werden um das gewünschte Set an Gleichungen zu erhalten, dann keine nicht gemessenen Variablen enthält.

$$A_{xr}(x - \hat{x}) + A_{zr} = 0$$

5. Schritt: Neue Werte für x werden berechnet:

$$x = \tilde{x} - \Sigma A_{xr}^T (A_{xr} \Sigma A_{xr}^T)^{-1} \{A_{xr}(\tilde{x} - \hat{x}) + A_{zr}\}$$

6. Schritt: Neue Werte für u werden berechnet:

$$u = \hat{u} - A_{xc}(x - \hat{x}) - A_{zc}$$

7. Schritt: Sofern die neuen Werte für x und u sich nicht signifikant von den jenen der vorhergehenden Iteration unterscheiden, wird die Berechnung abgebrochen. Gibt es signifikante Unterschiede so wird die Berechnung ab Schritt 3 mit neuen "Schätzwerten" ($\hat{x} = x$, $\hat{u} = u$) wiederholt.

8. Schritt: Die Varianz - Kovarianz Matrizen Σ_x und Σ_u werden berechnet:

$$\Sigma_x = \left(I - \Sigma A_{xr}^T (A_{xr} \Sigma A_{xr}^T)^{-1} A_{xr} \right) \Sigma$$

$$\Sigma_u = A_{xc} \Sigma_x A_{xc}^T$$

Tabelle 6: ausgeglichene Betriebsdaten der Anlage bzw. Messdaten aus der ^{14}C Messung (nach Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens)

Parameter	Einheit	Mittel- bzw. Summenwert	Standardabweichung
V_{fq}	Nm ³ /Monat	99 356 526	2 841 501
$c_{\text{CO}_2, fg}$	Vol-%	11,16	0,32
$f_{\text{CO}_2, biogen}$	kg C/kg C	0,542	0,012

[0047] Die biogenen bzw. fossilen CO₂ Emissionen (inkl. Unsicherheiten) ergeben sich schlussendlich nach Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens und den ermittelten Daten gemäß Tabelle 6 und den sich aus dem erfindungsgemäßen Verfahren ergebenden Kovarianzen (nicht dargestellt) zwischen den Parameter zu

$$M_{\text{CO}_2, biogen} = \frac{11,16}{100} * \frac{99\,356\,526 * 44}{22,414} * 0,542 * \frac{1}{1000} = 11\,795 \pm 311 \text{ Tonnen CO}_2 / \text{Monat}$$

$$M_{\text{CO}_2, fossil} = \frac{11,16}{100} * \frac{99\,356\,526 * 44}{22,414} * (1 - 0,542) * \frac{1}{1000} = 9\,968 \pm 262 \text{ Tonnen CO}_2 / \text{Monat}$$

[0048] Trotz komplettes Fehlen der CO₂ Messungen und einer relativ "ungenauen" Reingasvolumenstrommessung (relativer Fehler von 10%) können unter Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens die fossilen und biogenen CO₂ Emissionen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden (relativer Fehler im Bereich von 2.6%).

[0049] Die relative Unsicherheit der Reingasvolumenstrommessung konnte durch die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens von 10% auf kleiner 3% reduziert werden (siehe Tabelle 5 und 6). Des Weiteren war es möglich, trotz fehlender CO₂ Messdaten, diese zu errechnen mit $11,16 \pm 0,32$ Vol-%. Im Vergleich dazu lag der "wahre" Messwert (aus Beispiel A übernommen) bei $11,28 \pm 0,17$ Vol-%, wodurch sich zeigt, dass das erfindungsgemäße Verfahren geeignet ist bei fehlenden CO₂ Messdaten diese mit hinreichender Genauigkeit zu errechnen.

Beispiel C: Müllverbrennungsanlage III

[0050] Es liegen Betriebsdaten für alle gemäß dem Gleichungssystem benötigten Parameter vor, mit Ausnahme der CO₂ Messung im Reingas $c_{\text{CO}_2, fg}$ und des Reingasvolumenstroms V_{fg} . Zusätzlich zu den Betriebsdaten liegt das Ergebnis der Radiocarbonmessung, der Anteil an biogenem Kohlenstoff $f_{\text{CO}_2, biogen}$, vor (siehe Tabelle 5). Ziel ist es, durch das erfindungsgemäße Verfahren die CO₂ Konzentration im Reingas sowie den Reingasvolumenstrom zu errechnen, damit dadurch unter Anwendung von Gleichung 1 und 2 die fossilen und biogenen CO₂ Emissionen errechnet werden können.

Tabelle 7 Betriebsdaten der Anlage bzw. Messdaten aus der 14C Messung

Parameter	Einheit	Mittel- bzw. Summenwert	Standardabweichung
M_{Abfall}	t/Monat	20 752	311
$M_{Verbrennungsrückstände}$	t/Monat	3 721	112
V_{fg}	Nm ³ /Monat	?	?
$c_{O_2,fg}$	Vol-%	7,83	0,0783
$c_{CO_2,fg}$	Vol-%	?	?
M_{Dampf}	t H ₂ O/Monat	77 777	389
Δh	MJ/t H ₂ O	2 626	6
η	-	0,880	0,005
$f_{CO_2,biogen}$	kg C/kg C	0,542	0,012

[0051] Die Wertebereiche für die Elementarzusammensetzung von biogenen und fossilen Materialien ist analog zu Beispiel A (siehe Tabelle 2 und 3).

[0052] Da weder eine CO₂ Messung noch eine funktionierende Reingasvolumenstrommessung vorliegt können selbst bei vorhandener Radiocarbonmessung die biogenen und fossilen CO₂ Emissionen nicht bestimmt werden.

[0053] Durch Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann die CO₂ Konzentration im Reingas und auch der Reingasvolumenstrom errechnet werden. Es ergeben sich nach Anwendung der nichtlinearen Ausgleichsrechnung folgende Wertebereiche:

Tabelle 8 ausgeglichene Betriebsdaten der Anlage bzw. Messdaten aus der 14C Messung (nach Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens)

Parameter	Einheit	Mittel- bzw. Summenwert	Standardabweichung
V_{fg}	Nm ³ /Monat	99 206 983	2 960 344
$c_{CO_2,fg}$	Vol-%	11,17	0,33
$f_{CO_2,biogen}$	kg C/kg C	0,542	0,012

[0054] Die biogenen bzw. fossilen CO₂ Emissionen (inkl. Unsicherheiten) ergeben sich schlussendlich nach Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens und den ermittelten Daten gemäß Tabelle 8 und den sich aus dem erfindungsgemäßen Verfahrens ergebenden Covarianzen (nicht dargestellt) zwischen den Parameter zu

$$M_{CO_2,biogen} = \frac{11,17}{100} * \frac{99\,206\,983 \pm 44}{22,414} * 0,542 * \frac{1}{1000} = 11\,794 \pm 311 \text{ Tonnen CO}_2 \text{ /Monat}$$

$$M_{CO_2,fossil} = \frac{11,17}{100} * \frac{99\,206\,983 \pm 44}{22,414} * (1 - 0,542) * \frac{1}{1000} = 9\,967 \pm 262 \text{ Tonnen CO}_2 \text{ /Monat}$$

[0055] Trotz kompletten Fehlens der CO₂ Messungen und der Reingasvolumenstrommessung können unter Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens die fossilen und biogenen CO₂ Emissionen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden (relativer Fehler im Bereich von 2.6%).

[0056] Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt die Errechnung des Reingasvolumenstroms und auch der CO₂ Konzentration im Reingas mit einer relativen Unsicherheit von rund 3%.

[0057] Die errechnete Reingasmenge (Mittelwert) liegt bei 99 206 983 Nm³/Monat im Vergleich zum Messwerte von 99 107 000 Nm³/Monat (aus Beispiel A übernommen). Die CO₂-Konzentration wurde mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens mit 11,17±0,33 Vol-% errechnet. Im Vergleich dazu lag der "wahre" Messwert (aus Beispiel A übernommen) bei 11,28±0,17 Vol-%, wodurch sich zeigt, dass das erfindungsgemäße Verfahren geeignet ist bei fehlenden CO₂ und Reingasmessdaten diese mit hinreichender Genauigkeit zu errechnen.

Literatur:

[0058]

- 5 DIN EN ISO 21644:2021-07, Solid recovered fuels - Methods for the determination of biomass content, 2021, European Committee for Standardization.
ISO 18466:2016, Stationary source emissions - Determination of the biogenic fraction in CO₂ in stack gas using the balance method, 2016, International Organization for Standardization.
ISO 13833:2013, Stationary source emissions - Determination of the ratio of biomass (biogenic) and fossil-derived carbon dioxide - Radiocarbon sampling and determination.
10 Kost, T. 2001. Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen, Ph.D.Thesis, Beiträge zur Abfallwirtschaft/ Altlasten, Band 16, Technische Universität Dresden, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten, Dresden.
Narasimhan, S., Jordache C., 2000. Data Reconciliation & Gross Error Detection. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
15 Schjerve & Schneider, 2018 Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz, Bauphysik Kalender 2018.
Schwarzböck, T., Van Eygen, E., Rechberger, H. and Fellner, J. 2017. Determining the amount of waste plastics in the feed of Austrian waste-to-energy facilities. Waste Management & Research 35(2), 207-216.

Verwendete Formelzeichen

20	[0059]	
	M_B, M_F, M_I, M_{BW}	Masse der Fraktionen Biogen, Fossil, Inert und Wasser [kg FS]
	M_{Abfall}	Masse des behandelten Abfalls [kg FS]
25	m_B, m_F, m_I, m_W	Massenanteil der Fraktion Inert, Biogen, Fossil und Wasser
	[kg/kg FS] $M_{Verbrennungsrückstände}$	Trockenmasse der festen Verbrennungsrückstände (Summe aus Schlacke, Asche und Filterkuchen)
	$cCb, cHb, cOb, cNb,$	cSb Gehalt an C, H, O, N und S der wasser- und aschefreien Biomasse [kg/kg wasser- und aschefrei]
30	$cCf, cHf, cOf, cNf,$	$cSf, cClf$ Gehalt an C, H, O, N, S und Cl der wasser- und aschefreien fossilen Fraktion [kg/kg wasser- und aschefrei]
	C_{anorg}	Gehalt an anorganischen Kohlenstoff im Abfall der als CO ₂ freigesetzt wird [kg C/kg FS] ... typischerweise < 0,003 kg C/kg FS
	V_{fg}	trockener Abgasvolumenstrom [Nm ³]
35	$c_{CO_2,fg}, c_{O_2,fg}$	CO ₂ und O ₂ Konzentration im trockenen Abgas der Anlage [Vol-%]
	$c_{CO_2,air}, c_{O_2,air}$	CO ₂ und O ₂ Konzentration in der Verbrennungsluft der Anlage [Vol-%]
	MC, MH, MO, MN, MS, MCI	Molmassen der Elemente C, H, O, N, S und Cl [g/mol]
	v_{mol}	Molvolumen [Nm ³ /mol] = 0,0224 Nm ³ /mol
	C_{Abfall}	gesamter Kohlenstoffgehalt des Abfalls [kg C/kg FS Abfall]
40	$O_{2-anorg}$	anorganischer Sauerstoffverbrauch (durch Oxidation anorganischer Abfallbestandteile, zb. Al) [mol O ₂ /kg FS Abfall]
	$O_{2-verbr_Abfall}$	gesamter Sauerstoffverbrauch während der Verbrennung des Abfalls [mol O ₂ /kg FS Abfall]
	HW_{Abfall}	Heizwert des Abfalls [kJ/kg FS Abfall]
45	M_{Dampf}	erzeugte Dampfmenge [kg H ₂ O]
	Δh	spezifische Nettoenthalpie des Dampfkreislaufes [kJ/kg H ₂ O]
	η	Wirkungsgrad des Dampfkessels [-]
	$M_{CO_2,biogen}$	biogene CO ₂ Fracht [Tonnen CO ₂]
	$M_{CO_2,fossil}$	fossile CO ₂ Fracht [Tonnen CO ₂]
50	v_{mol}	Molvolumen (=22,414 m ³ /kmol)
	$f_{CO_2,biogen}$	biogener Kohlenstoffanteil im Abgas der Anlage (bestimmt mittels Radiocarbonmethode bzw. mittels dem Verfahren gemäß der Patentschrift WO202025251) [-]

55 Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung der gesamten biogenen und fossilen Kohlenstoff- und CO₂- Fracht und des Abgasvolumenstroms bei der Verbrennung von Abfällen und abfallbürtigen Brennstoffen beim Betrieb von Abfallverbrennungs-

anlagen, **dadurch gekennzeichnet, dass** für deren Ermittlung zumindest die folgenden zwei Gleichungen (Energiebilanz und Gleichung des Verhältnisses von biogenem zu fossilem Kohlenstoff):

$$m_B * (cCb * 34,8 + cHb * 93,9 - cOb * 10,8 + cNb * 6,3 + cSb * 10,5) * 1000 +$$

$$+ m_F * \left(cCf * 34,8 + \left(cHf - \frac{cClf}{MCl} \right) * 93,9 - cOf * 10,8 + cNf * 6,3 + cSf * 10,5 \right)$$

$$* 1000 - m_W * 2450 = HW_{Abfall} = \left[\frac{M_{Dampf} * \Delta h}{\eta} \right] * \frac{1}{M_{Abfall}}$$

und

$$\frac{m_B * cCb}{C_{Abfall}} = f_{CO2,biogen}$$

sowie zusätzlich entweder die Kohlenstoffbilanz:

$$(m_B * cCb + m_F * cCf) * 1000 + C_{anorg} = C_{Abfall} =$$

$$= \left[V_{fg} * \left(c_{CO2,fg} - \frac{(100 - c_{O2,fg} - c_{CO2,fg})}{(100 - c_{O2,air} - c_{CO2,air})} * c_{CO2,air} \right) * \frac{1}{100} * \right.$$

$$\left. * \frac{MC}{v_{mol}} \right] * \frac{1000}{M_{Abfall}}$$

oder die Sauerstoffverbrauchsbilanz:

$$m_B * \left(\frac{cCb}{MC} + \frac{cHb}{4 * MH} - \frac{cOb}{2 * MO} + \frac{cNb}{MN} + \frac{cSb}{MS} \right) * 1000 + m_F * \left(\frac{cCf}{MC} + \frac{cHf - cClf/MCl}{4 * MH} - \frac{cOf}{2 * MO} + \frac{cNf}{MN} + \frac{cSf}{MS} \right) * 1000$$

$$+ O2_{anorg} = O2_{verbrAbfall} =$$

$$= \left[V_{fg} * \left(c_{O2,air} * \frac{(100 - c_{O2,fg} - c_{CO2,fg})}{(100 - c_{O2,air} - c_{CO2,air})} - c_{O2,fg} \right) * \frac{1}{100} * \frac{1000}{v_{mol}} \right]$$

$$** \frac{1}{M_{Abfall}}$$

verwendet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** sowohl die Kohlenstoffbilanz als auch die Sauerstoffverbrauchsbilanz verwendet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** zusätzlich die Massenbilanzen:

$$m_B + m_F + m_I + m_W = 1$$

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

5

$$m_W = \frac{M_W}{M_{Abfall}}$$

und/oder die Aschenbilanz:

10

$$m_I = \frac{M_{Verbrennungsrückstände}}{M_{Abfall}}$$

15

und/oder die Stoffbilanzen für biogene und fossile Materialien:

$$cCb + cHb + cOb + cNb + cSb = 1$$

20

$$cCf + cHf + cOf + cNf + cSf + cClf = 1$$

verwendet werden.

25

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anteile mittels Ausgleichsrechnung ermittelt werden.

30

35

40

45

50

55

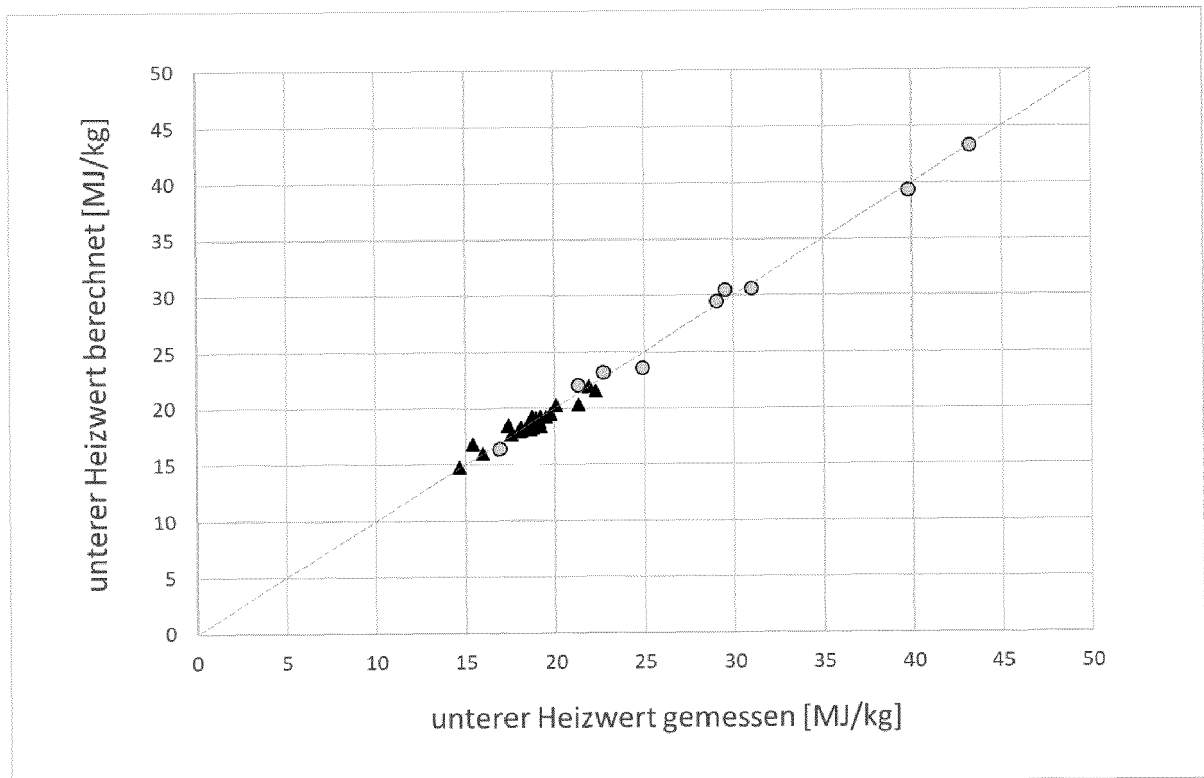


Fig.



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 22 18 3726

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A, D	EP 1 715 339 A2 (UNIV WIEN TECH [AT]) 25. Oktober 2006 (2006-10-25) * das ganze Dokument *	1	INV. F23G5/00 F23N5/00
A, D	WO 2020/252513 A1 (UNIV WIEN TECH [AT]) 24. Dezember 2020 (2020-12-24) * das ganze Dokument *	1	
A	MOHN J ET AL: "Determination of biogenic and fossil CO ² emitted by waste incineration based on ¹⁴ CO ² and mass balances", BIORESOURCE TECHNOLOGY, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, Bd. 99, Nr. 14, 1. September 2008 (2008-09-01), Seiten 6471-6479, XP022679222, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2007.11.042 [gefunden am 2008-02-27] * das ganze Dokument *	1	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			F23G F23N
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 10. Januar 2023	Prüfer Hauck, Gunther
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 22 18 3726

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

10-01-2023

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 1715339 A2	25-10-2006	AT 501170 A4	15-07-2006
		DK 1715339 T3	02-04-2013
		EP 1715339 A2	25-10-2006
		PL 1715339 T3	30-08-2013
WO 2020252513 A1	24-12-2020	AT 522157 A4	15-09-2020
		CN 113994147 A	28-01-2022
		EP 3987229 A1	27-04-2022
		US 2022373174 A1	24-11-2022
		WO 2020252513 A1	24-12-2020

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- WO 2020252513 A [0006] [0007]
- WO 202025251 A [0007] [0010] [0013] [0014] [0016] [0017] [0026] [0059]
- EP 1715339 A3 [0016]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen. **KOST, T.** Ph.D.Thesis. Technische Universität Dresden, Institut für Abfallwirtschaft, 2001, vol. 16 [0058]
- **NARASIMHAN, S. ; JORDACHE C.** Data Reconciliation & Gross Error Detection. Gulf Publishing Company, 2000 [0058]
- **SCHJERVE ; SCHNEIDER.** Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz. *Bauphysik Kalender*, 2018 [0058]
- **SCHWARZBÖCK, T. ; VAN EYGEN, E. ; RECHBERGER, H. ; FELLNER, J.** Determining the amount of waste plastics in the feed of Austrian waste-to-energy facilities. *Waste Management & Research*, 2017, vol. 35, 207-216 [0058]