Österr Wasser- und Abfallw
DOI 10.1007/s00506-016-0332-5

Anteil erneuerbarer Energien und klimarelevante CO_2-Emissionen aus der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich

Therese Schwarzböck · Helmut Rechberger · Oliver Cencic · Johann Fellner

© Der/die Autor(en) 2016. Dieser Artikel ist eine Open-Access-Publikation.

Zusammenfassung Da brennbare Abfälle zumeist ein Gemisch aus biogenen (z. B. Papier, Holz, Küchenabfälle) und fossilen Materialien (Kunststoffe) darstellen, entstehen bei ihrer thermischen Verwertung sowohl klimaneutrale als auch klimarelevante CO_2-Emissionen. Analog verhält es sich auch bei der erzeugten Energie (Strom), die entsprechend dem jeweiligen Biomassegehalt des Abfalls zum Teil als erneuerbar eingestuft wird und als solche auch auszuweisen ist. Im Zuge der vorliegenden Studie wurden erstmals auf nationaler Basis die fossilen und biogenen Anteile in thermisch verwerteten Abfällen bestimmt. Die methodische Grundlage dabei bildet die von der Technischen Universität Wien auf europäischer Ebene patentierte Bilanzenmethode. Das Verfahren beruht auf einem mathematischen Abgleich von Materialdaten (z. B. mittlere stoffliche Zusammensetzung biogener und fossiler Materialen) mit messbaren Betriebsgrößen der Verbrennungsanlage (z. B. Reingasmenge, O_2- und CO_2-Konzentration im Reingas, Dampfmenge). Aufgrund einer Anlagenertüchtigung und teils fehlender CO_2-Messungen konnten 10 von 13 Abfallverbrennungsanlagen und damit rund 88 % des in österreichischen Müllverbrennungsanlagen verwerteten Abfalls für die Auswertung berücksichtigt werden (rund 2,3 Mio. Tonnen). Die Ergebnisse zeigen eine große Streuung der biogenen Heizwertanteile der Anlagen (im Jahresmittel stammen zwischen 35,7 ± 2,4 % und 61,2 ± 2,7 % der eingesetzten Energie aus biogenen Quellen). Auch eine starke zeitliche Variation der Abfallzusammensetzung auf Basis von Monatsmittelwerten ist deutlich erkennbar. Folglich lässt sich für Abfallverbrennungsanlagen kein allgemein gültiger Heizwertanteil oder Emissionsfaktor ableiten und eine anlagenspezifische Auswertung über einen längeren Zeitraum (wie es mit der Bilanzenmethode relativ einfach möglich ist) erscheint zielführend für eine zuverlässige Ausweisung des erneuerbaren Energieanteils oder der fossilen CO_2-Emissionen. Die eingesetzten Energien aus fossilen und biogenen Abfallbestandteilen (für die 10 betrachteten Anlagen) liegen im Jahr 2014 bei rund 11.450 ± 120 TJ und 10.730 ± 110 TJ. Es ergeben sich gesamt rund 1060 ± 24 kt klimarelevantes CO_2, das aus den thermischen Abfallverwertungsanlagen in Österreich im Jahr 2014 emittiert wurde (mit Hochrechnung auf alle 13 Anlagen).

T. Schwarzböck, M.Sc. (✉) ·
Univ.-Prof. DI Dr. H. Rechberger ·
DI O. Cencic ·
Ass.-Prof. DI Dr. J. Fellner
Institut für Wassergüte,
Ressourcenmanagement und
Abfallwirtschaft, Technische
Universität Wien, Karlsplatz 13,
E226/2, 1040 Wien, Österreich
E-Mail:
therese.schwarzboeck@tuwien.ac.at

Share of renewable energy and climate-relevant CO_2 emissions from Waste-to-Energy plants in Austria

Abstract Since combustible wastes usually consist of biogenic (e.g. paper, wood, food waste) and fossil organic matter (plastics), their thermal recovery results in climate neutral and climate relevant CO_2 emissions. Moreover, the fraction of biogenic materials in the waste feed is relevant for the amount of renewable energy produced. The latter has to be reported and might be subsidized according to national laws (e.g. based on European directive 2009/28/EG). The present study represents the first comprehensive evaluation of the share of biogenic and fossil materials in the waste feed of waste-to-energy (WTE) plants on a national basis. The Balance Method, which is patented on a European level by TU Wien, was applied to 10 out of 13 Austrian WTE plants (around 2.3 Mio tons of waste corresponding to around 88 % of the overall waste feed in Austrian WTE plants). The method is based on the mathematical reconciliation of the material properties (e.g. mean chemical composition of biogenic and fossil materials) and routinely recorded operating data of WTE plants (e.g. flue gas volume, CO_2 and O_2-content in the dry flue gas, steam production). The results demonstrate large variations for the share of energy from biogenic sources in the different WTE plants, ranging from 35.7 ± 2.4 % to 61.2 ± 2.7 % (based on annual averages). Additionally, for several WTE plants large temporal variations can be observed based on monthly mean values. Thus, a plant-specific and continuous evaluation of the waste composition in WTE plants (which the Balance Method allows to do at reasonable efforts) can be recommended for a reliable reporting of the renewable share of energy or fossil CO_2 emissions from waste incineration. The energy input which stems from fossil and biogenic sources can be estimated to 11,450 ± 120 TJ and 10,730 ± 110 TJ, respectively for the year 2014 (for the 10 WTE plants). In total 1060 ± 24 kt fossil CO_2 emissions from the thermal recovery of waste in Austria's WTE plants in 2014 could be determined (estimation for all 13 WTE plants).

1 Einleitung und Zielsetzung

Nach Inkrafttreten der Deponieverordnung in Österreich, die seit 2004 bzw. in einzelnen Bundesländern seit 2009 das Deponieren von unbehandeltem Restmüll und Rückständen aus der kommunalen Abwasserreinigung untersagt, ist ein deutlicher Anstieg der thermisch verwerteten Abfälle zu verzeichnen (von 14,5 auf 36,4 %;

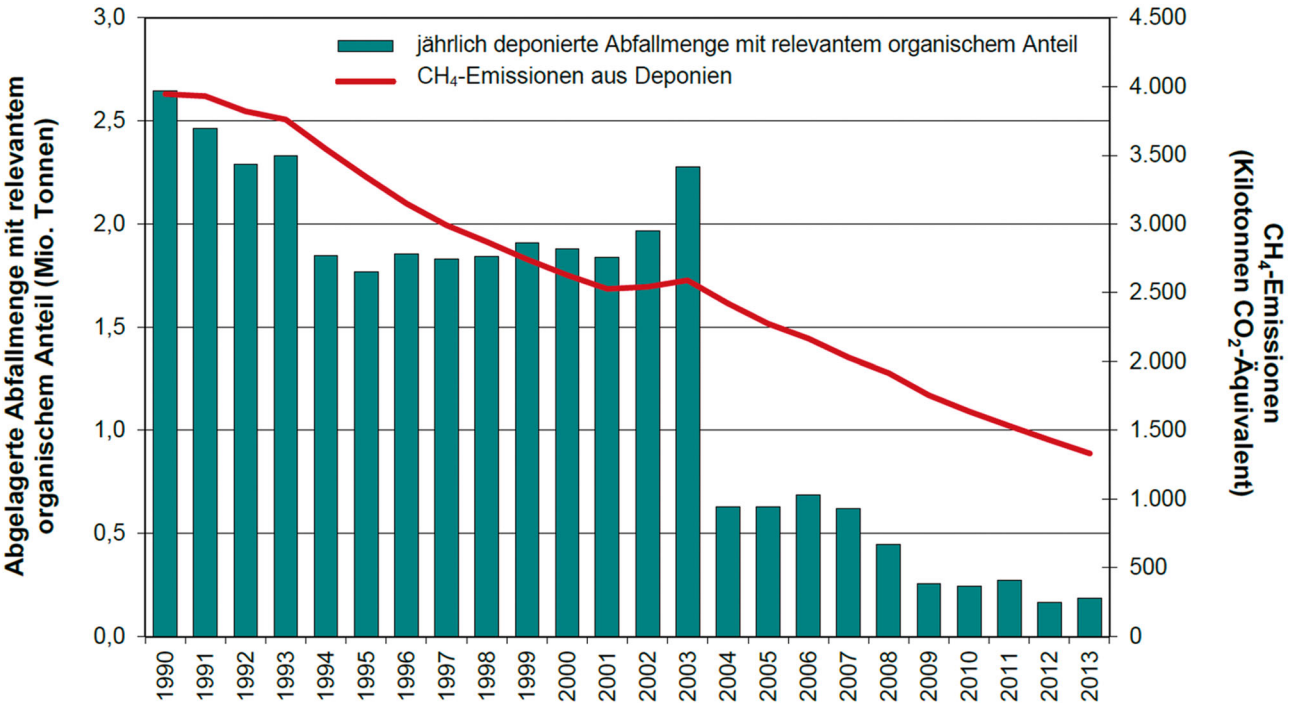


Abb. 1 Methan-Emissionen aus Deponien und jährlich deponierte Abfälle mit relevantem organischen Anteil (Umweltbundesamt 2015b)

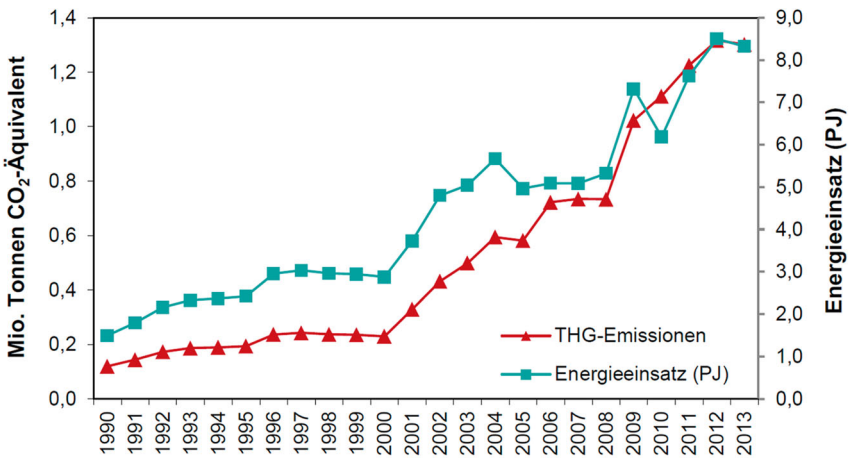


Abb. 2 Treibhausgasemissionen der Abfallverbrennung und eingesetzte Energie aus Abfällen (Umweltbundesamt 2015b)

BAWP 2011). Im Jahr 2000 standen in Österreich fünf Abfallverbrennungsanlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungs- und Gewerbemüll, Industrieabfälle und Klärschlamm mit einer Kapazität von rund 730.000 Tonnen pro Jahr zur Verfügung (Stubenvoll et al. 2002). Mittlerweile sind 11 Anlagen mit einer Gesamtkapazität von rund 2.600.000 Tonnen pro Jahr in Betrieb (exklusive der 2 Anlagen zur Behandlung von gefährlichen Abfällen). Diese Entwicklung führte zu einer drastischen Reduktion der deponierten Mengen an biologisch abbaubaren Abfällen und damit verbunden auch zu einem Rückgang aktueller und insbesondere zukünftiger Methanemissionen von Deponien (siehe Abb. 1). Durch den Anstieg der verbrannten Abfallmengen gelangt jedoch mehr CO_2 in die Atmosphäre. Laut Klimaschutzbericht hat sich seit 2014 die emittierte Menge an treibhausrelevantem CO_2 aus der thermischen Verwertung nahezu verdoppelt (auf rund 1,3 Mio. Tonnen $CO_{2,equ}$; siehe Abb. 2) (Umweltbundesamt 2015b). Obgleich CO_2 weitaus weniger klimawirksam ist als Methan, ist es in der Klimabilanz Österreichs selbstverständlich zu berücksichtigen. Allerdings wird bei der Abfallverbrennung sowohl treibhausrelevantes (aus Kunststoffen stammend) als auch treibhausneutrales CO_2 (aus biogenen Quellen wie Holz, Papier, Küchen- und Gartenabfälle) freigesetzt. Eine Abschätzung beider CO_2-Anteile (biogen und fossil) ist daher notwendig. Analog zur Klimarelevanz stammt die bei der thermischen Verwertung erzeugte Energie aus Abfällen von verschiedenen Primärenergieträgern (biogen und fossil). Die Zusammensetzung eingesetzter Abfälle ist daher auch aus energiepolitischer Sicht von Interesse. Einerseits wird die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien gefördert (2009/28/EG) und andererseits sind die Stromlieferanten verpflichtet, den Primärenergieträgeranteil auszuweisen (Bundeskanzleramt 2011).

Die Quantifizierung der Anteile der „grünen“ und fossilen Energie bzw. des klimaneutralen und klimarelevanten Kohlenstoffdioxidausstoßes ist aufgrund der variablen Zusammensetzung thermisch verwerteter Abfälle und der

zahlreichen Fraktionen im Müll, die Verbunde aus unterschiedlichen Werkstoffen darstellen, schwierig. Bisherige Methoden, den Anteil fossiler CO_2-Emissionen zu bestimmen, basieren vorwiegend auf Sortieranalysen, welche jedoch mit großer Unsicherheit behaftet sind (Fellner et al. 2007; Fichtner 2007; Severin et al. 2010). Restfeinfraktionen (die bis zu 30 % betragen) können nicht mehr den Attributen „fossil“ oder „biogen“ zugeordnet werden. Zudem geben Verfahren, die auf einer punktuellen Analyse beruhen, selbst bei repräsentativ gezogenen Proben des Abfallinputs nur eine Momentaufnahme der Zusammensetzung zum Zeitpunkt der Probenahme wieder (wie beispielsweise die selektive Lösemethode) (Cuperus et al. 2005; van Dijk und Steketee 2002). Eine weitere gängige Methode zu Bestimmung der CO_2-Emissionen aus der Abfallverbrennung ist die Verwendung von sogenannten Emissionsfaktoren, die die fossile CO_2-Menge pro Tonne Abfall bzw. pro GJ Energieinhalt des Abfalls angeben. Diese Emissionsfaktoren beruhen zumeist auf Ergebnissen von Sortieranalysen und werden üblicherweise als typischer Emissionswert für verschiedene Brennstoffe (z. B. Steinkohle, Diesel, Braunkohle) angegeben. Jüngere Untersuchungen belegen allerdings, dass allgemeine Emissionsfaktoren für die Abfallverbrennung nur sehr bedingt Gültigkeit haben, da die Zusammensetzung des Abfalls sowohl zeitlich als auch regional sehr stark variieren kann (Fuglsang et al. 2014; Obermoser et al. 2009). Ein an der Technischen Universität Wien entwickeltes Verfahren ist die sogenannte Bilanzenmethode. Diese beruht auf einem mathematischen Modell, das vorhandene Betriebsparameter der Müllverbrennungsanlagen und Informationen über die chemische Zusammensetzung der biogenen und fossilen Abfallanteile verwendet. Dadurch lassen sich zeitliche Veränderungen der Zusammensetzung des Abfalls (Unterscheidung zwischen biogen und fossil) beobachten (Fellner et al. 2007).

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Zusammensetzung des Abfallinputs aller österreichischen Abfallverbrennungsanlagen zu analysieren und zu vergleichen. Da aufwendige Probenahmen und Sortierungen vermieden werden sollen (sehr kosten- und zeitintensiv), wurde die Bilanzenmethode als relativ einfaches und kostengünstiges Tool zur Bestimmung des biogenen und fossilen Brennstoffanteils eingesetzt.

Folgende Kennwerte (pro Anlage und gesamt für die thermische Verwertung von Abfällen in Österreich) für ein Kalenderjahr (2014) gilt es zu generieren:

- Erneuerbarer Energieanteil (Energieanteil aus Biomasse).
- Fossiler Kohlenstoffanteil und Ableitung von fossilen CO_2-Emissionsfaktoren: spezifische klimarelevante CO_2-Emissionen bezogen auf Abfallinput (kg $CO_{2,foss}$ pro Tonne Abfallinput) bzw. bezogen auf den Heizwert des Abfalls (kg $CO_{2,foss}$ pro GJ Heizwert des Abfalls.
- Klimarelevante Gesamt-CO_2-Emissionen aus der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich.

2 Methodik

2.1 Bilanzenmethode zur Bestimmung des fossilen/biogenen Anteils im Input der Abfallverbrennungsanlagen

Die methodische Grundlage für die Ermittlung der fossilen und biogenen Anteile im Input der Abfallverbrennungsanlagen bildet die am 30.3.2005 zum österreichischen Patent angemeldete und in der Zwischenzeit (26.12.2012) auf europäischer Ebene patentierte Bilanzenmethode („Verfahren zur Ermittlung der Anteile biogener und fossiler Energieträger sowie biogener und fossiler Kohlendioxidemissionen“). Das Verfahren beruht auf einem mathematischen Abgleich von Materialdaten (z. B. mittlere stoffliche Zusammensetzung biogener und fossiler Materialen) mit messbaren Betriebsgrößen der Verbrennungsanlage (z. B. Reingasmenge, O_2- und CO_2-Konzentration des Reingases und Dampfmenge). Dazu werden insgesamt sechs Bilanzgleichungen herangezogen (Abb. 3):

- Massenbilanz,
- Aschenbilanz,
- Kohlenstoffbilanz,
- Energiebilanz,
- Sauerstoffverbrauchsbilanz und
- Differenz aus Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidproduktion.

Jede der Gleichungen charakterisiert eine bestimmte Abfalleigenschaft (zum Beispiel Aschegehalt, Kohlenstoffgehalt, Heizwert). Für die Erstellung der Bilanzgleichungen werden die Materialien des Abfallinputs gedanklich in vier Stoffgruppen unterteilt: inerte (m_I), biogene (m_B) und fossile (m_F) Materialien sowie Wasser (m_W). Die inerte Stoffgruppe beinhaltet dabei per Definition die Trockenmasse aller nicht brennbaren Abfallbestandteile, wie beispielsweise Steine, Glas, Aschen oder anorganische Anteile in Bioabfällen bzw. Kunststoffen (zum Beispiel Kaolin in Papier bzw. anorganische Additive in Kunststoffen). In den biogenen und fossilen Stoffgruppen m_B und m_F ist jeweils nur die wasser- und aschefreie organische Substanz subsumiert (siehe Abb. 4).

Die Unbekannten des Gleichungssystems sind die Massenanteile an inerten, biogenen und fossilen Stoffen sowie Wasser (m_I, m_B, m_F und m_w) (siehe Abb. 3). Die Koeffizienten der Unbekannten auf der linken Seite der Gleichungen (z. B. Heizwert biogen HW_B, Kohlenstoffgehalt biogen c_B, $d_{O2\text{-}CO2,B}$, $O_2{}^c{}_{,B}$ etc.) lassen sich aus der chemischen Zusammensetzung der biogenen und fossilen Materialien berechnen. Daten hierfür können aus der Literatur entnommen oder durch Laboranalysen bestimmt werden. Die in dieser Studie verwendeten Eingangsdaten zur chemischen Zusammensetzung des biogenen und fossilen Materials auf wasser- und aschefreier Basis sind in Tab. 1 angegeben und stammen aus Ergebnissen bestehender Abfallsortieranalysen, nationalen Produktions- und Einsatzdaten von Polymeren sowie Ergebnissen von Monte-Carlo-Simulationen (Fellner et al. 2007; Schwarzböck et al. 2016c).

Um einen möglichen Einfluss anorganischer Reaktionen (zum Bespiel Kalkbrennen bzw. Oxidation von Metallen) auf die einzelnen Bilanzen zu berücksichtigen, wurden folgende Prozesse in den oben angeführten Gleichungen inkludiert:

- etwa 25 g $CaCO_3$/kg Abfall werden zu CaO und CO_2 dissoziert. Dies entspricht rund 50 % der gesamten Karbonatmenge im Abfallinput (Priester et al. 1996),
- Oxidation von Aluminium in einem Ausmaß von rund 0,75 g Al/kg Abfall (berechnet nach Skutan and Brunner 2006 sowie Mitterbauer et al. 2009), und
- Oxidation von Eisen im Ausmaß von rund 4 g Fe/kg Abfall (nach AGW 1992).

Das Gleichungssystem der Bilanzenmethode besteht aus 6 Gleichungen und 4 Unbekannten. Für jeden Eingabewert wird eine entsprechende Unsicherheit angegeben. Es handelt sich somit um

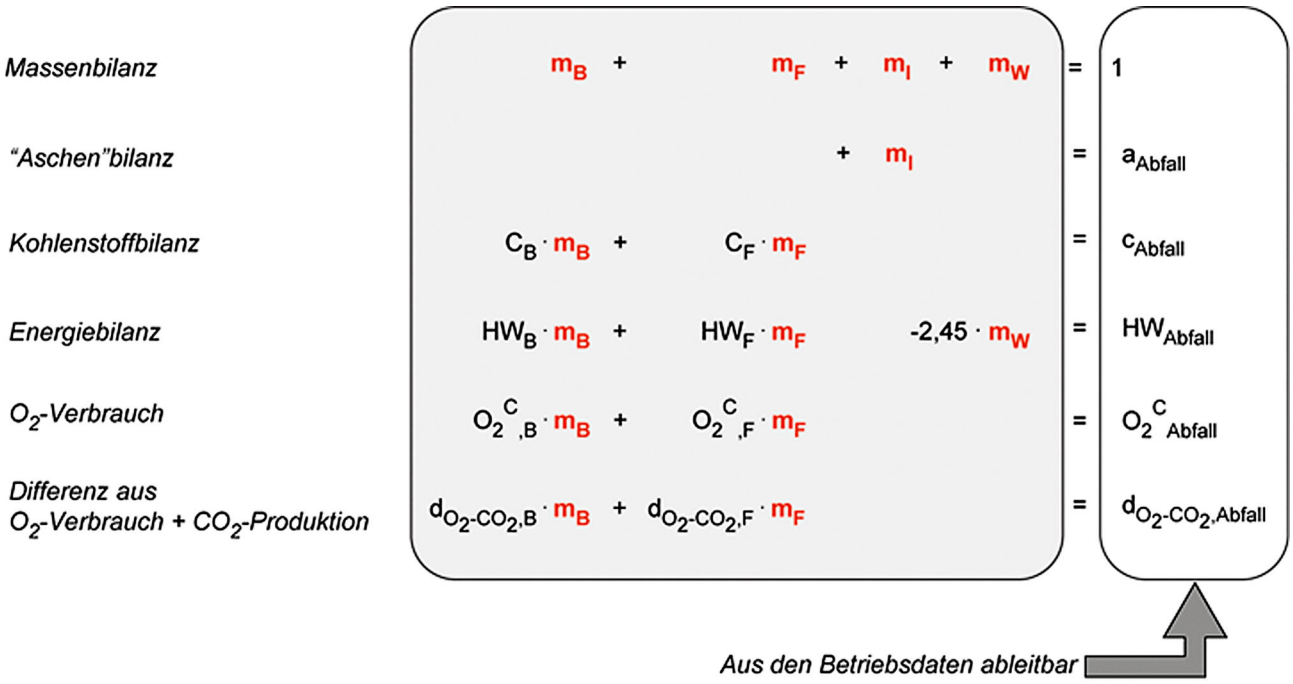


Abb. 3 Gleichungssystem der Bilanzenmethode (vereinfachte Darstellung); mit c_B, c_F ... Kohlenstoffgehalt im biogenen bzw. fossilen Abfallanteil, HW_B, HW_F ... Heizwert des biogenen bzw. fossilen Abfallanteils, $O_2^{C}{}_{,B}$, $O_2^{C}{}_{,F}$ ... Sauerstoffverbrauch des biogenen bzw. fossilen Abfallanteils, m_B, m_F ... Massenanteile des biogenen bzw. fossilen Materials auf wasser- und aschefreier Basis, m_I, m_W ... Inertanteil bzw. Wasseranteil des Abfalls (Fellner et al. 2006a)

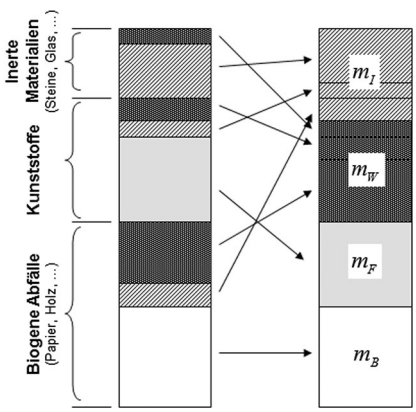


Abb. 4 Unterteilung des Abfalls in Stoffgruppen (basierend auf Fellner et al. 2007)

ein überbestimmtes System, das mithilfe nichtlinearer Ausgleichsrechnung zu lösen ist. Konkret wird dazu die Methode der schrittweisen linearen Ausgleichsrechnung angewandt. Ausgabewerte sind die berechneten Massenanteile m_B, m_F, m_W, m_I sowie die zugehörigen Unsicherheitsbereiche.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Gleichungen der Bilanzenmethode ist dem österreichischen Patent A539/2005 („Verfahren zur Ermittlung der Anteile biogener und fossiler Energieträger sowie biogener und fossiler Kohlendioxidemissionen") bzw. der europäischen Patentanmeldung (Fellner et al. 2006b) zu entnehmen. Die Methode wird ebenfalls in Fellner et al. (2007) im Detail beschrieben. Die Gültigkeit der Bilanzenmethode wurde in verschiedenen Studien anhand von Vergleichsanalysen mit anderen Methoden und Sensitivitätsanalysen bestätigt (Larsen et al. 2013; Mohn et al. 2008; Obermoser et al. 2009; Rechberger et al. 2014). Eine Routineanwendung erfolgt bereits in mehr als 15 europäischen Müllverbrennungsanlagen zur Stromkennzeichnung oder zur Ausweisung der Treibhausgasemissionen.

2.2 Abfallverbrennungsanlagen in Österreich

Im Jahr 2014 standen in Österreich 13 Abfallverbrennungsanlagen für die Behandlung von Siedlungsabfällen, Gewerbe- und Industrieabfällen, Klärschlamm und gefährlichen Abfällen mit einer Gesamtkapazität von rund 2,75 Mio Tonnen zur Verfügung (Tab. 2). Davon konnten 10 Anlagen für die Auswertungen herangezogen werden. Eine Anlage war im Berichtsjahr nicht in Betrieb, während bei weiteren zwei Anlagen, die vorwiegend gefährliche Abfälle behandeln, die Auswertung aufgrund der Datenlage (keine CO_2-Messungen oder unzureichende Datenqualität) nicht möglich war. Damit konnten rund 88 % des thermisch verwerteten Abfalls in Österreichs Müllverbrennungsanlagen im Jahr 2014 für die Auswertung berücksichtigt werden (rund 2,3 Mio. Tonnen von ca. 2,6 Mio Tonnen Abfall inklusive Klärschlamm).

Die untersuchten Anlagen umfassen demnach 6 Anlagen mit Rostfeuerung sowie 4 Anlagen mit Wirbelschichtfeuerung, wobei überwiegend Restmüll, Gewerbe- und Industrieabfall sowie Klärschlamm und Ersatzbrennstoffe eingesetzt werden (Tab. 2).

2.3 Notwendige Betriebsdaten für die Anwendung der Bilanzenmethode

Für die Anwendung der Bilanzenmethode nach der Beschreibung in Kapitel 2.1 sind neben Informationen zur chemischen Zusammensetzung der biogenen und fossilen Materialien, Reingasparameter, Input- und Outputströme und die Dampfparameter der Müllverbrennungsanlagen notwendig. Tab. 3 listet die nötigen Betriebsdaten auf, die idealerweise als Stundenmittelwerte in die Berechnungen gemäß Bilanzenmethode eingehen.

Tab. 1 Chemische Zusammensetzung des biogenen und fossilen Materials in Mischabfällen (Fellner et al. 2007; Schwarzböck et al. 2016c)

Wasser- und aschefrei		Biogenes Material[a]		Fossiles Material[a]	
Gehalt an	Einheit	MW	±[b]	MW	±[b]
C	g/kg	483	9	777	32
H	g/kg	65	2.4	112	11
O	g/kg	443	14	61	26
N[c]	g/kg	7	5	14	11
S[c]	g/kg	1.1	0.5	3	1
Cl[c]	g/kg	–[d]	–	32	24

[a]Kleine Unterschiede der Werte im Vergleich zu Werten in Fellner et al. (2007) sind auf eine Erweiterung der Datenbasis zurückzuführen
[b]95 % Vertrauensintervall
[c]Der Gehalt an N, S und Cl ist für die Ergebnisse der Bilanzenmethode von untergeordneter Bedeutung (Fellner et al. 2007)
[d]Cl-Gehalt < 5 g/kg

2.4 Plausibilitätsprüfungen der Betriebsdaten

Vor der eigentlichen Berechnung mittels Bilanzenmethode werden die Betriebsdaten durch Plausibilitätsprüfungen auf mögliche Messfehler untersucht. Dafür werden folgende chemisch-physikalische Beziehungen zwischen dem Heizwert und der Reingasmenge sowie dessen Zusammensetzung herangezogen: Jedes Mol verbrauchter Sauerstoff geht mit einer Energiefreisetzung von 360 bis 400 kJ einher (basierend auf theoretischen Berechnungen des unteren Heizwertes und des Sauerstoffverbrauchs für „extreme“ Abfallzusammensetzungen – entweder nur biogen oder nur fossil zusammen mit inertem Material und Wasser). Es ergeben sich ähnliche Zusammenhänge für den Kohlenstoffgehalt. Hier werden durch die Verbrennung von einem Gramm organischen Kohlenstoffs 34 bis maximal 44 kJ an Wärme freigesetzt (Fellner et al. 2007).

Folgende Zusammenhänge in den Betriebsdaten werden vor der Auswertung mit der Bilanzenmethode überprüft:

1. Gegengleicher Verlauf der O_2- und CO_2-Konzentrationen im Reingas,
2. Summe der O_2- und CO_2-Konzentrationen im Reingas im Bereich zwischen 15 und 21 %,
3. Korrelationen zwischen dem Heizwert des Brennstoffs und dem Sauerstoffverbrauch während der Verbrennung,
4. Korrelationen zwischen dem Heizwert und dem Kohlenstoffgehalt des Brennstoffs,
5. Korrelationen zwischen dem Sauerstoffverbrauch und dem Kohlenstoffgehalt des Brennstoffs.

Sind die erwarteten Zusammenhänge gemäß Überprüfung 1) und 2) nicht erkennbar oder liegen die Daten nicht wie erwartet in den definierten Wertebereichen gemäß Überprüfung 3), 4) und/oder 5), müssen Mess- oder Datenübertragungsfehler vermutet werden. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Messungen der O_2- und CO_2-Konzentration im Reingas zu legen, da sich die Auswertung der Bilanzenmethode sehr stark auf diese Messungen stützt und sich Fehlmessungen dementsprechend stark auf das Ergebnis auswirken (siehe dazu auch Sensitivitätsanalysen in Fellner et al. 2007). Zusatzangaben zu beispielsweise den Messstellen, Messmethoden, Überprüfungsmessungen oder gegebenenfalls weitere Datensätze können zur Klärung der unplausiblen[1] Daten oder teilweise auch zur Korrektur von systematischen Fehlern herangezogen werden.

Die Überprüfung der Daten gemäß Punkt 5) ist schlussendlich die ausschlaggebende für den etwaigen Ausschluss von Datensätzen. Eine beispielhafte Darstellung der untersuchten Korrelation bietet Abb. 5. Alle Daten, die innerhalb des definierten Wertebereichs liegen (plausible Datensätze[1]), werden für die Auswertung mittels Bilanzenmethode herangezogen.

[1] Die Bezeichnung unplausibel bedeutet, dass die Messdaten bestimmte Korrelationen nicht ausreichend genau erfüllen. Es ist jedoch gleichzeitig festzuhalten, dass sich diese Wertung lediglich auf die Anwendung der Daten im Rahmen der Bilanzenmethode bezieht.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Plausibilitätsprüfung

Die Plausibilitätsprüfung wird basierend auf gleitenden 6-Stunden-Mittelwerten der notwendigen Betriebsparameter durchgeführt. In Abb. 5 sind exemplarisch die Ergebnisse einer Anlage (Anlage E) dargestellt. 90 % der Werte in Abb. 5 liegen im definierten Wertebereich. Bei nahezu allen Anlagen (bei 8 von 10) liegt der Anteil der Abfallmenge bei plausiblen Betriebsdaten über 95 % (Tab. 4). Die etwas niedrigere Plausibilitätsrate für die Anlagen D und I ist auf instabile CO_2-Messungen sowie teils auf geringere zeitliche Auflösung der ausgewerteten Betriebsdaten (Tagesmittelwerte statt Stundenmittelwerte) zurückzuführen. Insgesamt können über 96 % der verbrannten Abfallmenge im Jahr 2014 in die Auswertung miteinbezogen werden (rund 2,2 Mio Tonnen von 2,3 Mio Tonnen Abfall).

Bei der Mehrzahl der Anlagen waren als Resultat der Plausibilitätsprüfungen Rückfragen an den Betreiber nötig, da sich einzelne Parameter als nicht stimmig darstellten. Grund dafür waren häufig Fehler in der Dokumentation oder auch Messfehler. Die gröbsten und häufigsten Fehler in den übermittelten Betriebsdaten lassen sich für vorliegende Untersuchung wie folgt zusammenfassen:

- Feuchte Reingasmengen als trocken angegeben.
- Umrechnung der Reingasmengen von Ist-O_2-Gehalt auf 11 % O_2-Gehalt nicht nachvollziehbar oder nicht ausgewiesen.
- Systematische Über- oder Unterschätzung der Reingasmengen.
- Keine Informationen über Messprinzip der O_2- und CO_2-Messungen (trocken oder feucht).

3.2 Biogener Heizwertanteil

Anhand der berechneten Massenanteile der wasser- und aschefreien biogenen und fossilen Abfallfraktion im Input der Abfallverbrennungsanlagen (m_B und m_F aus Abb. 3) und der jeweiligen Kohlenstoffgehalte (C_B und C_F in Abb. 3) lassen sich gemäß Fragestellung die fossilen Kohlenstoffanteile (entspricht den Anteilen der biogenen CO_2-Emissionen) ableiten. Weiters kann mittels des

Tab. 2 Übersicht über die österreichischen Abfallverbrennungsanlagen im Jahr 2014 mit jeweiliger Feuerungstechnologie und verbrannten Abfallarten

Anlage	Feuerungstechnologie	Verbrannter Abfall (qualitative Angabe)
A	Rostfeuerung (RF)	Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle
B	Rostfeuerung (RF)	Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle
C	Stationäre Wirbelschichtfeuerung (WS)	Fraktionen aus Siedlungs- und Gewerbeabfallsplitting, Klärschlamm
D	Wirbelschichtfeuerung (WS)	Fraktionen aus Siedlungs- und Gewerbeabfallsplitting, Klärschlamm
E	Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (WS)	Fraktionen aus Siedlungs- und Gewerbeabfallsplitting, Klärschlamm
F	Rostfeuerung (RF)	Gewerbeabfälle, Industrieabfälle, Siedlungsabfälle
G	Stationäre Wirbelschichtfeuerung (WS)	Fraktionen aus Siedlungs- und Gewerbeabfallsplitting, geringe Anteile Klärschlamm
H	Rostfeuerung (RF)	Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle, geringe Anteile Industrieabfälle und Klärschlamm
I	Rostfeuerung (RF)	Überwiegend Siedlungsabfälle
J	Rostfeuerung (RF)	Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle, geringe Anteile Klärschlamm
K[a]	Stationäre Wirbelschichtfeuerung und Drehrohrofen (WS+DRO)	Gefährliche und nicht gefährliche Abfälle, Industrieschlämme, Klärschlamm
L[a]	Stationäre Wirbelschichtfeuerung und Drehrohrofen (WS+DRO)	Gefährliche und nicht gefährliche Abfälle, Industrieschlämme, Klärschlamm
M[a]	Rostfeuerung (RF)	Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle

[a]Anlagen K, L und M konnten in der vorliegenden Auswertung nicht berücksichtigt werden, wobei Anlage M im Jahr 2014 nicht in Betrieb war und demnach im Berichtsjahr keinen Abfall verwertet hat

Tab. 3 Benötigte Stundenmittelwert-Betriebsdaten der Müllverbrennungsanlagen für die Anwendung der Bilanzenmethode

Betriebsparameter	Einheit
Verbrannte Abfallmenge	[t/h]
Verbrannte Klärschlammmenge	[t/h]
Zusatzbrennstoffe (Öl und/oder Gas)	[t/h] bzw. [m³/h]
Rückstandsmengen (Schlacke, Asche)	[t/h][a]
Reingasmenge trocken	[Nm³/h]
O_2- und CO_2-Konzentration im trockenen Reingas	[Vol-%]
Dampfproduktion	[t/h]
Dampftemperatur und Dampfdruck	[°C] und [bar]
Speisewassertemperatur	[°C]
Wirkungsgrad des Dampfkessels	[-]

[a]Daten für die Rückstände sind auch in Form von Monatsmittelwerten ausreichend

berechneten biogenen Massenanteils m_B (wasser- und aschefrei) sowie des Heizwertes des biogenen Abfallanteils HW_B (abgeleitet aus der chemischen Zusammensetzung der wasser- und aschefreien biogenen Materialien), der erneuerbare (biogene) Anteil der eingesetzten Energie aus Abfällen berechnet werden. Diese biogenen Heizwertanteile sind in Abb. 6 als Monatsmittelwerte pro untersuchter Anlage dargestellt, aufgeteilt in Anlagen mit Rostfeuerung (RF) und Anlagen mit Wirbelschichttechnologie (WS). Die RF-Anlagen verwerten vorwiegend Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle (ausgenommen Anlage F, die überwiegend mit Gewerbe- und Industrieabfällen gefahren wird), während der Input in die WS-Anlagen im Wesentlichen aus aufbereiteten Siedlungs- und Gewerbeabfällen und Klärschlamm besteht. Die genaue quantitative Zusammensetzung des Abfallinputs der Anlagen (Anteil an den jeweiligen Abfallarten) ist den AutorInnen nicht bekannt.

Aus Abb. 6 zeigt sich jedoch, dass der biogene Anteil am Heizwert (bezogen auf den Heizwert des gesamten Abfalls inklusive Klärschlamm) starken Schwankungen unterliegt und im Monatsmittel ein Minimum von 22,5 ± 2,9 % (MVA E) und ein Maximum von 69,3 ± 3,0 % (MVA C) erreicht. Im Jahresmittel liegen die Werte zwischen 35,7 ± 2,4 % (MVA F) und 61,2 ± 2,7 % (MVA C). Diese große Bandbreite (es ergibt sich eine mittlere Streuung der Jahresmittelwerte über alle Anlagen von ± 10 %abs und ± 21 %rel) weist auf eine regional stark schwankende Abfallzusammensetzung hin, da die Müllverbrennungsanlagen in verschiedenen Regionen Österreichs angesiedelt sind. Neben dem Einfluss unterschiedlicher Sammelsysteme in den Bundesländern kann zusätzlich davon ausgegangen werden, dass die Anteile der jeweilig eingesetzten Abfallarten (Siedlungsabfälle, Gewerbeabfälle, Industrieabfälle etc.) die Ergebnisse der Auswertung mitbestimmen, da unterschiedliche Industriebranchen und Betriebe in den Regionen angesiedelt sind.

Weiters sind starke zeitliche Schwankungen der biogenen Heizwertanteile zu verzeichnen. Beispielsweise stammen, basierend auf den Monatsmittelwerten, in MVA E zwischen 22,5 % und 45,2 % der Energie aus biogenen Quellen (das entspricht einer mittleren relativen Streuung von 16 %) (Abb. 6). Bei der Hälfte der Anlagen ergibt sich eine mittlere relative Streuung der berechneten Heizwertanteile von über 10 %, wobei dies vorwiegend bei den Wirbelschichtanlagen zu beobachten ist. Diese stärkere zeitliche Variabilität der Abfallzusammensetzung in den Wirbelschichtöfen im Vergleich zu den Rostfeuerungsanlagen ist unerwartet, da in Wirbelschichtöfen vorwiegend vorsortierte bzw. aufbereitete Abfälle mit geringerer Korngröße eingebracht werden, und daher grundsätzlich von einem homogeneren Brennstoff in diesen Anlagen ausgegangen werden kann. Es wird daher angenommen, dass der teils saisonabhängige Bedarf an Ersatzbrennstoffen (in Form von aufbereitetem Abfall) in der Industrie die Be-

Tab. 4 Als plausibel eingestufte Betriebsdaten der einzelnen Anlagen für das Kalenderjahr 2014 (angegeben als verbrannte Abfallmenge bei plausiblen Betriebsdaten bezogen auf die gesamte Menge an verbranntem Abfall)

Anlage	A	B	C	D[a]	E	F	G	H	I	J	*Gesamt*
Plausible „Abfallmenge“	98,3%	99,3%	95,8%	84,4%	99,5%	99,5%	98,3%	99,0%	82,8%	99,7%	*96,7%*

[a]Auswertung für nur 7 Monate

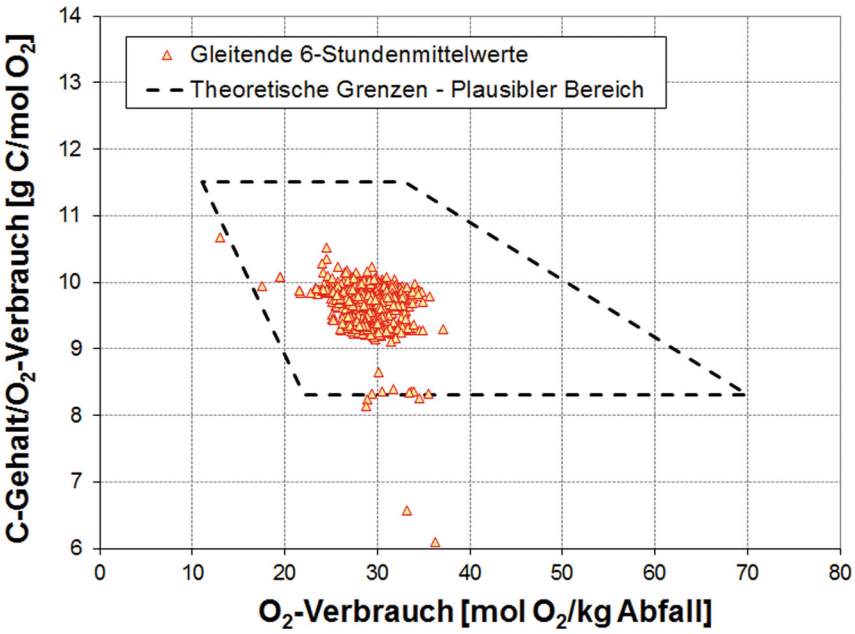


Abb. 5 Resultate der Plausibilitätsprüfung der Abfallverbrennungsanlage E (Korrelation zwischen Sauerstoffverbrauch und Kohlenstoffgehalt)

wirtschaftung und den Betrieb von mechanischen Abfallaufbereitungsanlagen mitbestimmt. Beispielsweise wurden im Jahr 2014 laut Verein der österreichischen Zementindustrie rund 300.000 t Kunststoff-Abfälle in österreichischen Zementwerken als Ersatzbrennstoffe eingesetzt (VÖZ 2015). Bei einer Gesamtkapazität der Wirbelschichtöfen in Österreich von rund 650.000 t Abfällen pro Jahr (exklusive Klärschlamm), ergibt sich bereits bei einem Zementproduktionsrückgang von 20 % pro Monat ein Anstieg der Kunststoffabfälle (und damit der Abfälle fossilen Ursprungs), die in Wirbelschichtöfen verwertet werden, von knapp 10 % (unter der Annahme, dass der schwankende Bedarf der Zementindustrie nur durch die Verbrennung in den Wirbelschichtanlagen ausgeglichen wird). Zahlen des Vereins Deutscher Zementwerke zeigen sogar Unterschiede in der Zementproduktion zwischen Winter- und Sommermonaten von über 100 % (VDZ 2016). MVA G und MVA E der vorliegenden Studie zeigen einen deutlichen Abwärtstrend des biogenen Heizwertanteils gegen Ende des Jahres 2014 (Abb. 6). Soweit den AutorInnen bekannt ist, werden in diesen Anlagen Fraktionen von mechanischen Abfallaufbereitungsanlagen verwertet, die auch Ersatzbrennstoffe für Zementwerke bereitstellen. Für die anderen Anlagen wird erwartet, dass andere Einflussfaktoren, wie Stillstandzeiten benachbarter Anlagen (für Revision oder Erneuerung) einen stärkeren Effekt auf die Zusammensetzung des Abfalls haben.

Eine quartalsmäßige Darstellung des biogenen Heizwertanteils in Abb. 7 lässt gesamt keinen deutlichen saisonalen Trend erkennen, weder für die Rostfeuerungsanlagen mit vorwiegend Siedlungs- und Gewerbeabfällen, noch für die Anlagen mit Wirbelschichtöfen. Einzig im 4. Quartal 2014 zeigt sich ein geringerer biogener Anteil der eingesetzten Energie für WS-Anlagen (41 % im Vergleich zu 47 bis 50 % in den anderen Quartalen). Aus Abb. 7 ist zudem erkennbar, dass die mittlere absolute Streuung zwischen den WS-Anlagen in den Winterquartalen (1. und 4. Quartal) mit 25 bis 30 %abs deutlich höher ist als im 2. und 3. Quartal des Jahres 2014 (16 bis 20 %abs; dargestellt als Fehlerbalken in Abb. 7). Das deutet wiederum auf eine stärkere (qualitative) Variation des Abfallinputs dieser Anlagen in den Wintermonaten hin.

Im Mittel über alle betrachteten Anlagen stammen rund 48 ± 2 % der über Abfälle eingesetzten Energie aus biogenen Quellen (gewichteter Jahresmittelwert) (Abb. 7).

Das Umweltbundesamt in Deutschland gibt als Standardwert einen biogenen Heizwertanteil von 50 % an (Icha 2015). Obwohl dieser Schätzwert innerhalb der Unsicherheit des in dieser Studie bestimmten Gesamtmittelwertes liegt, können sich bei Anwendung dieses Richtwertes anlagenspezifisch sehr hohe Über- oder Unterschätzungen (bis 32 %rel bezogen auf Jahresmittelwert, bis 60 %rel bezogen auf Monatsmittelwerte) des erneuerbaren Energieanteils ergeben. Bei höheren Einspeisetarifen für „grünen“ Strom kann das leicht zu finanziellen Verzerrungen führen (z. B. ungerechtfertigt getätigte Fördergeldzahlungen).

Die Ausführungen zu den zeitlichen Schwankungen sowie Streuungen zwischen den Anlagen bezüglich biogener Heizwertanteile sind im Wesentlichen auch auf die Ergebnisse der biogenen Kohlenstoffanteile übertragbar, da der Heizwert wesentlich vom Kohlenstoffgehalt des Abfalls bestimmt wird. Die biogenen Kohlenstoffanteile liegen jedoch im Vergleich zu den biogenen Heizwertanteilen rund 7 bis 9 %abs höher. Diese Differenz der Kohlenstoff- und Heizwertanteile ist einerseits auf die Bedeutung der chemischen Zusammensetzung der biogenen und fossilen Materialien für den Heizwert (neben dem Kohlenstoffgehalt spielen beispielsweise auch der Wasserstoff- und Sauerstoffgehalt eine wichtige Rolle) zurückzuführen, insbesondere jedoch ist der Heizwert im Vergleich zum Kohlenstoffgehalt vom Wassergehalt des Materials abhängig. Da der Wassergehalt üblicherweise in biogenen Materialien (Küchenabfälle, Grünschnitt, etc.) höher liegt als in fossilen, liegt der Anteil für den biogenen Kohlenstoff stets deutlich über dem biomassebürtigen Heizwertanteil.

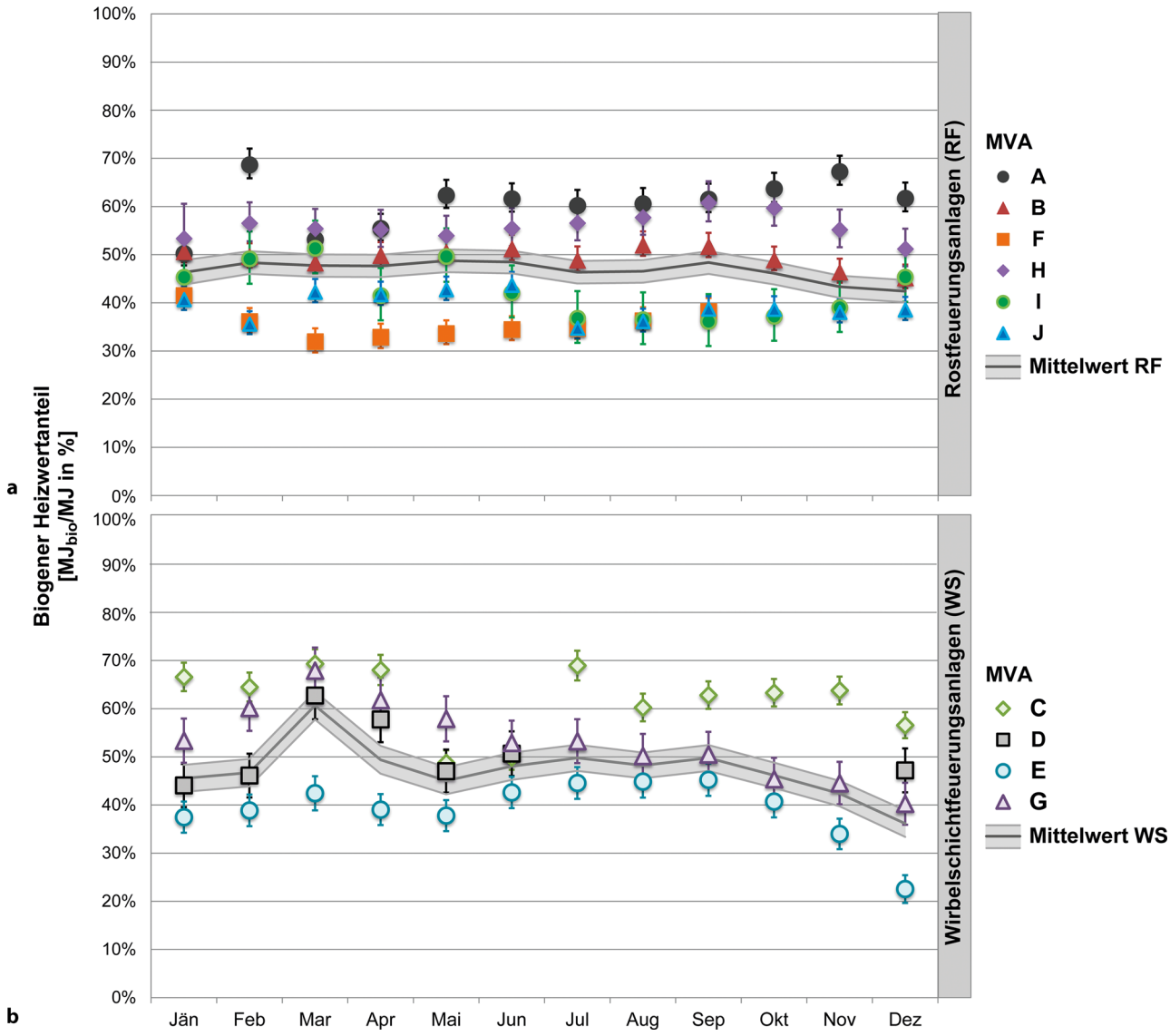


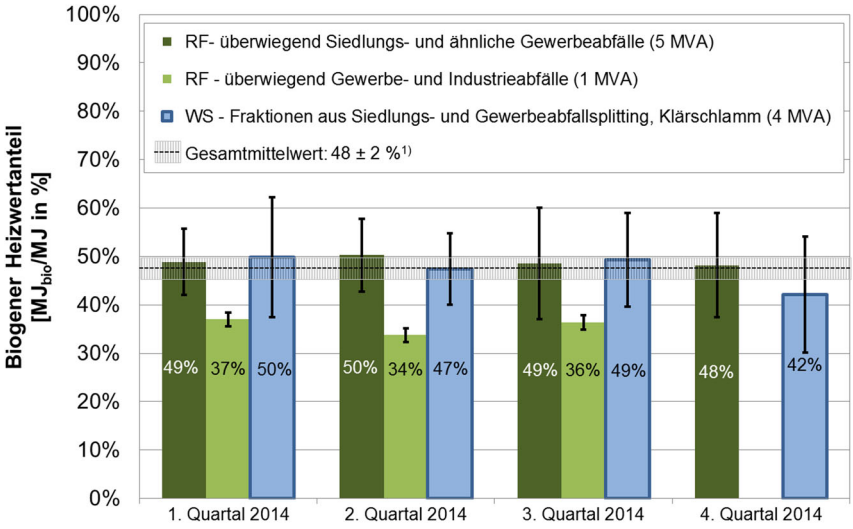
Abb. 6 Biogener Heizwertanteil der Müllverbrennungsanlagen (MVA) mit Rostfeuerung (**a**) und mit Wirbelschicht (**b**); gewichtete Monatsmittelwerte mit Standardunsicherheit (der ausgewiesene biogene Heizwertanteil bezieht sich nur auf den Abfallinput, Zusatzbrennstoffe sind hier nicht berücksichtigt)

Die eingesetzte Energie aus Abfällen (für die 10 betrachteten Anlagen) liegt im Kalenderjahr 2014 bei rund 22.500 TJ. Davon stammen im Mittel 47,7 ± 1,0 % aus biogenen Abfallbestandteilen (Papier, Küchenabfälle, Holz, Klärschlamm etc.), 50,9 ± 1,0 % aus Abfällen fossilen Ursprungs (Kunststoffe) und 1,4 ± 1,0 % aus Zusatzbrennstoffen (Erdgas, Erdöl).

3.3 Fossile CO_2-Emissionsfaktoren

Aus dem berechneten Massenanteil der wasser- und aschefreien fossilen Abfallfraktion im Input der Abfallverbrennungsanlagen (m_F in Abb. 3), dem Kohlenstoffgehalt im fossilen Material (c_F in Abb. 3) lässt sich der fossile Kohlenstoffgehalt des Abfalls pro Anlage ableiten. Mithilfe der molaren Massen von Kohlenstoff und Sauerstoff sowie der eingesetzten Abfallmenge bzw. Energiemenge aus Abfall (abgeleitet aus Abfallmenge und Heizwert) können daraus die spezifischen fossilen CO_2-Emissionen bezogen auf Abfall- oder Energieinput berechnet werden.

Tab. 5 listet die fossilen CO_2-Emissionsfaktoren bezogen auf den Energieinhalt der Abfälle als Monats- und Jahresmittelwerte pro Anlage sowie als Gesamtmonatsmittelwert und Gesamtjahresmittelwert über alle betrachteten Anlagen. Es zeigt sich, wie schon bei den biogenen Heizwertanteilen (Kapitel 3.2), eine große zeitliche Schwankung der ermittelten Emissionsfaktoren im Bereich von 4 bis 17 %rel pro Anlage bezogen auf den jeweiligen Mittelwert (mit einem Minimalwert von 25 ± 2 kg $CO_{2,foss}$/GJ für Anlage C im März und Maximalwert von 62 ± 3 kg $CO_{2,foss}$/GJ für Anlage E im Dezember). Die Schwankungen liegen dabei tendenziell wieder für die Wirbelschichtanlagen (MVA C, D, E, G) auf einem höheren Niveau im Vergleich zu den Anlagen mit Rostfeuerung (MVA A, B, F, H, I, J). Im Jahresmittel variieren die spezifischen fossilen CO_2-Emissio-



1) gewichteter Mittelwert ± Standardunsicherheit

Abb. 7 Biogener Heizwertanteil für Müllverbrennungsanlagen (MVA) mit unterschiedlichem Abfallinput (qualitativ); gewichtete Quartalsmittelwerte mit mittlerer Streuung zwischen den Anlagen (Fehlerbalken); RF: Rostfeuerung, WS: Wirbelschichtfeuerung; die vergleichsweise geringen Unsicherheiten für die Kategorie „RF – überwiegend Gewerbe- und Industrieabfälle" beruhen darauf, dass in dieser Kategorie lediglich eine Anlage vertreten ist; (der ausgewiesene biogene Heizwertanteil bezieht sich nur auf den Abfallinput, Zusatzbrennstoffe sind hier nicht berücksichtigt)

nen zwischen 32 ± 2 und 51 ± 2 kg $CO_{2,foss}$/GJ. Damit ergibt sich eine mittlere Streuung über alle Anlagen von ± 18 %rel bezogen auf den Gesamtmittelwert. Das bedeutet, dass die zeitliche Variation der Abfallzusammensetzung einer Anlage teilweise ein annähernd so großes Ausmaß annehmen kann wie die Unterschiedlichkeit der Abfallzusammensetzung zwischen den einzelnen Anlagen. Obwohl keine genauen Angaben dazu verfügbar sind, ist dennoch anzunehmen, dass die Abfallart (Anteile an Rest-, Gewerbe- oder Industrieabfällen bzw. aufbereitete Abfallfraktionen) einen wesentlichen Beitrag zu den zeitlichen Schwankungen leistet.

Den höchsten Anteil an fossilen CO_2-Emissionen (und damit CO_2 aus erdölbasierten Kunststoffen) liefert die Abfallverbrennungsanlage F, welche fast ausschließlich Gewerbe- und Industrieabfälle verwertet. Der fossile Emissionsfaktor für diese Anlage liegt demnach bei 51,5 kg $CO_{2,foss}$/GJ und damit 21 % über dem Gesamtmittelwert. Ein klarer Zusammenhang zwischen dem Anteil an Industrie- oder Gewerbeabfällen zu Siedlungsabfällen und dem fossilen Kohlenstoffanteil im Abfall konnte jedoch auch in anderen Studien nicht erkannt werden, wobei durchaus große Variationen bei verschiedenen Szenarien zur Zusammensetzung und Sammelsystemen berichtet werden (Fuglsang et al. 2014; Horttanainen et al. 2013; Jones et al. 2013; Larsen und Astrup 2011; Larsen et al. 2013).

Im Gesamtmittel über alle hier betrachteten Anlagen in Österreich können 42,6 ± 2 kg emittiertes fossiles CO_2 pro GJ Energieinhalt des Abfalls abgeschätzt werden. Im Vergleich dazu gibt das Umweltbundesamt einen Emissionsfaktor von 43,9 kg fossiles CO_2 pro GJ an (Umweltbundesamt 2015a). Dieser liegt damit innerhalb des Unsicherheitsbereiches des hier ermittelten Kennwertes. Die Gültigkeit eines für die Abfallverbrennung allgemein festgelegten Emissionsfaktors ist allerdings auf Basis der erhobenen Daten infrage zu stellen, da es für einzelne Anlagen zu einer signifikanten Überschätzung oder auch Unterschätzung der fossilen CO_2-Emissionen kommen kann (bis zu 40 % bezogen auf den Jahresmittelwert; bei Monatsmittelwerten sogar bis zu 75 %). Diese Fehlschätzung kann durch Verwendung eines hier ermittelten Mittelwertes (beispielsweise mit Einteilung der Anlagen nach Abfallart wie in Abb. 7 für die Heizwertanteile dargestellt) nur unwesentlich verringert werden (mit Über- bzw. Unterschätzungen des Jahresmittelwertes von bis zu 30 % und des Monatsmittelwertes bis zu 60 %). Eine sehr große Bandbreite an fossilen Emissionsfaktoren für 11 verschiedene Abfallverbrennungsanlagen in Österreich, Deutschland, Belgien und der Schweiz wurde auch in Obermoser et al. (2009) gefunden, mit Werten zwischen 30 und 67 kg $CO_{2,foss}$/GJ. Es kann daher nicht von einem allgemeingültigen Emissionsfaktor für Abfallverbrennungsanlagen ausgegangen werden, weder auf nationaler noch auf regionaler Ebene.

In Tab. 6 sind die berechneten fossilen CO_2-Emissionen bezogen auf die Menge an durchgesetztem Abfall als Jahresmittelwerte dargestellt. Die Emissionsfaktoren bewegen sich zwischen 255 ± 18 und 548 ± 27 kg fossiles CO_2 pro Tonne Abfall. Damit würde der abgeschätzte Emissionsfaktor des IPCC (2000) für Siedlungsabfälle von 557 kg $CO_{2,foss}$/t Abfall durchwegs eine Überschätzung des fossilen Kohlenstoffs im Abfallinput österreichischer Müllverbrennungsanlagen ergeben (bis über 100 % des Jahresmittelwertes). Die Variationskoeffizienten (die relative Streuung der Werte gemessen am Mittelwert) liegen für diesen massebezogenen Emissionsfaktor deutlich über denen der energiebezogenen Emissionsfaktoren in Tab. 5. Dies kann dadurch erklärt werden, dass variierende Gesamtkohlenstoffgehalte bzw. Heizwerte des Abfalls Auswirkungen auf die massebezogenen Emissionsfaktoren haben. Unterschiede der spezifischen Emissionen bezogen auf den Energieinhalt sind jedoch fast ausschließlich auf unterschiedliche Anteile von biogenen und fossilen Materialien im Abfall zurückzuführen und großteils unabhängig vom Aschegehalt des Abfalls.

3.4 Gesamte klimarelevante CO_2-Emissionen aus der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich

Abb. 8 präsentiert die gesamten jährlichen fossilen CO_2-Emissionen aus der Abfallverbrennung in Österreich, basierend auf der Auswertung für 2014. Für die 10 untersuchten Anlagen (MVA A bis MVA J) ergeben sich klimarelevante CO_2-Emissionen von 924 ± 22 kt pro Jahr. Dies entspricht rund 44 % der CO_2-Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen. Zusätzlich wurde die Menge an emittiertem fossilen CO_2 der nicht in die Untersuchung einbezogenen Anlagen (MVA K, L) mit 135 ± 10 kt für das Jahr 2014 abgeschätzt. Diese Abschätzung basiert auf dem Abfalldurchsatz der Anlagen, dem mittleren Heizwert

Tab. 5 Spezifische fossile CO_2-Emissionen (Fossiler CO_2-Emissionsfaktor) pro Müllverbrennungsanlage bezogen auf den jeweiligen Energieinhalt der Abfälle (gewichtete Monatsmittelwerte und Jahresmittelwerte für 2014 mit Standardunsicherheit sowie Variationskoeffizienten zur Darstellung der mittleren monatlichen Schwankungsbreite in %)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	*MW*
	[kg $CO_{2,foss}$/GJ Heizwert]										
Jän	40,2	40,4	27,4	44,9	50,1	46,9	37,6	37,5	45,7	47,6	*43,8*
Feb	25,7	41,1	29,3	43,2	49,0	51,2	32,3	35,2	43,6	51,6	*42,4*
Mar	37,8	41,8	*25,2*	30,1	46,1	54,5	26,3	36,1	40,8	46,3	*39,5*
Apr	36,0	41,2	26,1	34,0	48,8	53,7	31,4	36,2	48,9	46,8	*42,0*
Mai	30,7	40,3	41,4	42,4	49,9	53,2	34,5	37,3	41,8	46,1	*42,7*
Jun	31,2	40,0	40,5	39,6	46,0	52,5	38,3	36,1	48,0	45,3	*41,9*
Jul	32,4	41,6	25,3	n.a.	44,4	52,3	38,1	35,1	51,7	52,3	*42,6*
Aug	31,9	39,5	32,4	n.a.	44,3	51,0	40,5	34,1	52,4	51,1	*43,0*
Sep	31,3	39,7	30,4	n.a.	43,8	49,5	40,2	31,9	52,7	49,1	*41,6*
Okt	29,6	41,6	30,0	n.a.	47,5	n.a.	43,9	32,6	51,4	49,1	*37,5*
Nov	26,7	44,0	29,5	n.a.	52,9	n.a.	44,6	36,2	50,0	49,7	*38,5*
Dez	31,2	44,9	35,3	42,4	*62,1*	n.a.	47,9	39,2	45,1	49,3	*41,9*
MW	*32,2 ± 2*	*41,5 ± 2*	*31,6 ± 2*	*39,4 ± 4*	*49,0 ± 3*	*51,5 ± 2*	*38,0 ± 4*	*35,4 ± 3*	*48,0 ± 5*	*48,7 ± 2*	*42,6 ± 2*
VarK	13 %	4 %	17%	14 %	10 %	5 %	16 %	6 %	9 %	5 %	5 %

MW Gewichteter Mittelwert (gewichtet mit Energieinhalt der verwerteten Abfälle) mit Standardunsicherheit, *MVA* Müllverbrennungsanlage, *VarK* Variationskoeffizient (Streuung der Monatsmittelwerte bezogen auf den Jahresmittelwert) in [%rel], *n.a.* Werte nicht verfügbar

Tab. 6 Spezifische fossile CO_2-Emissionen (Fossiler CO_2-Emissionsfaktor) pro Müllverbrennungsanlage bezogen auf den jeweiligen Abfallinput (gewichtete Jahresmittelwerte für 2014 mit Standardunsicherheit sowie Variationskoeffizienten zur Darstellung der mittleren monatlichen Schwankungsbreite in %)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	*MW*
	[kg $CO_{2,foss}$/t Abfall]										
MW	*318 ± 24*	*424 ± 23*	*255 ± 18*	*366 ± 35*	*472 ± 28*	*548 ± 27*	*347 ± 34*	*354 ± 32*	*488 ± 28*	*496 ± 17*	*409 ± 18*
VarK	23 %	11 %	23%	15 %	10 %	5 %	22 %	10 %	10 %	7 %	23 %

MW Gewichteter Mittelwert (gewichtet mit Energieinhalt der verwerteten Abfälle) mit Standardunsicherheit, *MVA* Müllverbrennungsanlage, *VarK* Variationskoeffizient (Streuung der Monatsmittelwerte bezogen auf den Jahresmittelwert) in [% rel]

(Böhmer et al. 2007) und einer Abschätzung des fossilen Kohlenstoffanteils von rund 90 %. Damit ergeben sich gesamt rund 1.060 ± 24 kt klimarelevantes CO_2, das aus den thermischen Abfallverwertungsanlagen in Österreich im Jahr 2014 emittiert wurde.

Aus Abb. 8 ist zu erkennen, dass die einzelnen Anlagen, je nach Kohlenstoffanteil (rechte Säule in Abb. 8) und jeweiligem Durchsatz (nicht dargestellt) unterschiedlich viel fossiles CO_2 emittieren. Beispielsweise stammen 50 % der klimarelevanten CO_2-Emissionen der 10 untersuchten Abfallverbrennungsanlagen aus dem Abfalleinsatz von nur 3 der MVA (MVA E, H und J).

Gemessen an den gesamten Treibhausgasemissionen Österreichs im Jahr 2014 (76.200 kt) (Umweltbundesamt 2015c) stammen damit 1,4 % aus der Verbrennung von Kunststoffen in den Müllverbrennungsanlagen. Der Anteil der Abfallverbrennung innerhalb des Sektors der Abfallwirtschaft kann anhand der erhobenen Daten mit rund 38 % abgeschätzt werden (bezogen auf 2.900 kt Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft, Umweltbundesamt 2015c). Damit liegt dieser Wert unter dem angegebenen Wert des Umweltbundesamtes von 43,5 % für das Jahr 2013 (die Deponierung macht laut Klimaschutzbericht 44,6 % der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft aus und ist damit zusammen mit der Abfallverbrennung der dominierende Faktor innerhalb dieses Sektors) (Umweltbundesamt 2015b).

4 Schlussfolgerungen

Die präsentierten Ergebnisse wurden im Zuge einer erstmals auf nationaler Basis durchgeführten Untersuchung zu den fossilen und biogenen Anteilen in Abfällen für die thermische Verwertung generiert. Es konnten mit vergleichsweise wenig Aufwand (keine Probenahmen, Messungen oder Analysen) Kennwerte wie der erneuerbare Anteil der eingesetzten Energie (biogener Heizwertanteil) oder die spezifischen fossilen CO_2-Emissionen (Emissionsfaktoren) abgeschätzt werden.

Die Anwendung der Bilanzenmethode auf die Betriebsdaten von 10 Abfallverbrennungsanlagen in Österreich (von gesamt 13 Anlagen in Österreich) für das Kalenderjahr 2014 zeigt signifikante Unterschiede zwischen den ermittelten Werten pro Anlage. Beispielsweise variiert der mittlere biogene Heizwertanteil im Jahr zwischen 35,7 ± 2,4 % (MVA F) und 61,2 ± 2,7 % (MVA C). Dies legt nahe, dass regionale Abfallwirtschaftspraktiken und Sammelsysteme erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung des thermisch verwerteten Abfalls haben. Weiters wird angenommen, dass Anteile der jeweils eingesetzten Abfallarten (Siedlungsabfälle, Gewerbeabfälle, Industrieabfälle etc.) den biogenen bzw. fossilen Anteil im Abfall in relevantem Ausmaß mitbestimmen. Den AutorInnen liegen zu den verbrannten Abfallarten keine quantitativen Angaben vor, jedoch

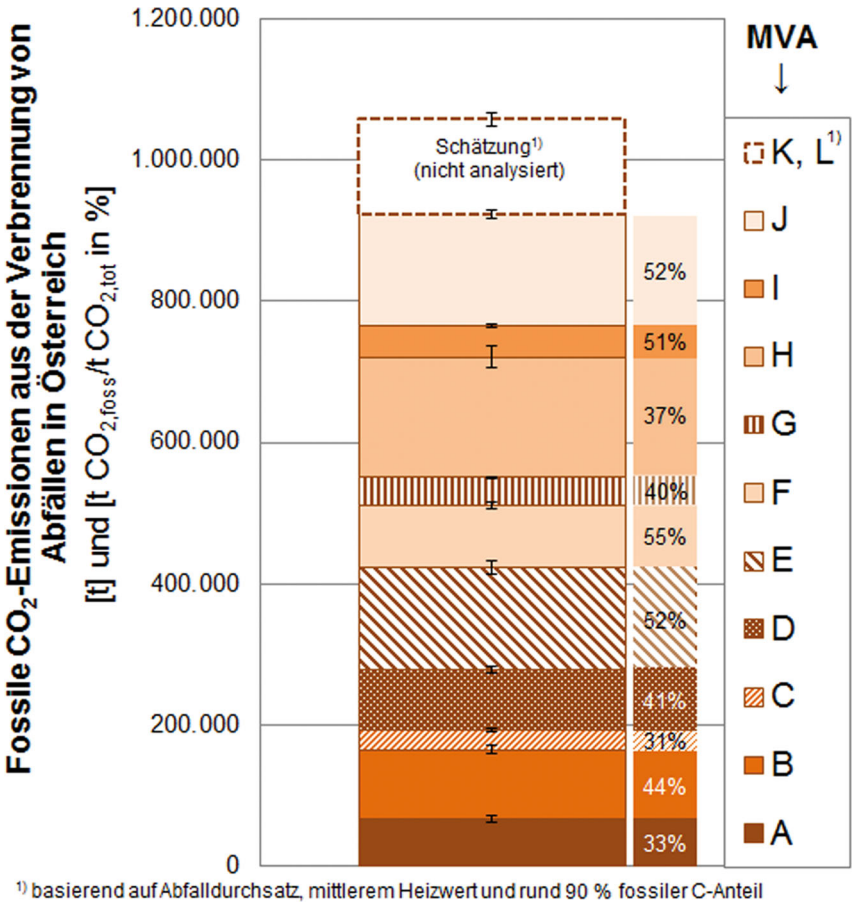


Abb. 8 Fossile CO_2-Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen für die Müllverbrennungsanlagen in Österreich sowie der jeweilige prozentuale Anteil der fossilen CO_2-Emissionen an den gesamten CO_2-Emissionen aus der Verbrennung pro Anlage (entspricht dem fossilen Kohlenstoffanteil pro Anlage)

konnte für die Anlage F, die vorwiegend Gewerbe- und Industrieabfälle einsetzt, der im Mittel geringste biogene Anteil verzeichnet werden. Zudem legen große Schwankungen der Monatsmittelwerte einiger Anlagen (bis 16 %rel pro Anlage) nahe, dass die eingesetzten Abfallarten auch zeitlich stark variieren. Da insbesondere die Monatsmittelwerte der Anlagen mit Wirbelschichtfeuerung stark streuen, wird davon ausgegangen, dass dies zum Teil auf saisonale Änderungen im Ersatzbrennstoffbedarf (z. B. verursacht durch Zementproduktion) zurückzuführen ist.

Es konnten fossile CO_2-Emissionsfaktoren von 32 ± 2 kg $CO_{2,foss}$/GJ (MVA C) bis 51 ± 2 kg $CO_{2,foss}$/GJ (MVA F) bestimmt werden (im Jahresmittel). Der Mittelwert über alle Anlagen ergibt sich zu 42,6 ± 2 kg $CO_{2,foss}$/GJ, welcher nur leicht unter dem Richtwert des Umweltbundesamt (2015a) von 43,8 kg $CO_{2,foss}$/GJ liegt, jedoch über dem der in Schweden (32 kg $CO_{2,foss}$/GJ), Dänemark (37 kg $CO_{2,foss}$/GJ) oder Finnland (40 kg $CO_{2,foss}$/GJ) vorgeschlagenen Werte (Anderson et al. 2011; Danish Energy Agency 2013; Olofsson 2004; Umweltbundesamt 2015a).

Auch in Bezug auf die Emissionsfaktoren sind klarerweise die starken Variationen zwischen den Anlagen sowie die zeitlichen Schwankungen zu beobachten. Es kann also bei Anwendung eines allgemeinen Emissionsfaktors (wie beispielsweise in IPCC 2000 oder Umweltbundesamt 2015a angegeben) sehr leicht zu Über- oder Unterschätzungen pro Anlage kommen. Bei Verwendung des Richtwertes des Umweltbundesamts (2015a) von 43,8 kg $CO_{2,foss}$/GJ kommt es basierend auf den vorliegenden Auswertungen zu Fehleinschätzungen der fossilen CO_2-Emissionen pro Anlage von bis zu 40 % bezogen auf den Jahresmittelwert und bei Monatsmittelwerten sogar bis zu 75 %. Der abgeschätzte Emissionsfaktor des IPCC (2000) für Siedlungsabfälle von 557 kg $CO_{2,foss}$/t Abfall ergibt durchwegs eine Überschätzung des fossilen Kohlenstoffs im Abfallinput österreichischer Müllverbrennungsanlagen (bis über 100 % des Jahresmittelwertes).

Die Auswertungen zeigen, dass eine zuverlässige Aussage über den erneuerbaren Energieanteil im Abfall oder den Anteil der klimarelevanten CO_2-Emissionen aus der Abfallverbrennung nur anlagenspezifisch sinnvoll ist. Die großen zeitlichen Schwankungen pro Anlage belegen zudem, dass nur eine Überwachung über einen längeren Zeitraum, vor allem bei Anlagen mit stark variierenden Inputströmen, zielführend für die Ausweisung des erneuerbaren Energieanteils oder die Treibhausgasinventuren ist. Diese Beobachtungen bestätigen die Ergebnisse anderer Studien (Fellner et al. 2011; Fuglsang et al. 2014; Obermoser et al. 2009). Ungerechtfertigt getätigte Fördergeldzahlungen und Verzerrungen der Treibhausgasinventur könnten durch eine Auswertung im fortlaufenden Betrieb verhindert werden. Die Bilanzenmethode bietet eine Möglichkeit diese veränderliche Zusammensetzung des Abfalls laufend aufzuzeichnen.

Die Bilanzenmethode stellt sich als kostengünstiges, verlässliches Verfahren dar, das statistisch fundierte Ergebnisse liefert und für dessen Anwendung üblicherweise keine zusätzliche Messtechnik erforderlich ist (eventuell mit Ausnahme der CO_2-Messungen im Reingas). Ein zusätzlicher Nutzen für die Anlagenbetreiber entsteht, indem durch die Plausibilitätsuntersuchungen der Betriebsdaten mögliche systematische Fehlmessungen oder Fehldokumentationen aufgedeckt werden können. Valide Messwerte (insbesondere der CO_2- und O_2-Konzentration im Reingas) sind jedoch Voraussetzung für belastbare Ergebnisse, sodass regelmäßige Kontroll- und Kalibrierungsmessungen speziell bei einer Routineanwendung unabdingbar sind.

Die Methode könnte außerdem als Monitoring-Instrument zur Überwachung der Menge an thermisch verwerteten Kunststoffen (ableitbar aus dem fossilen Abfallanteil) eingesetzt werden, was verlässlichere Werte bieten würde als Sortieranalysen (Schwarzböck et al. 2016c). Beispielsweise könnten die Auswirkungen von höheren/geringeren Kunststoffrecyclingraten auf die Entwicklung der klimarelevanten CO_2-Emissionen aus der Abfallverbrennung beobachtet werden. Dies ist

natürlich nur in Zusammenhang mit der Entwicklung in anderen Sektoren (Industrie, Energie) sinnvoll. Dementsprechend müssen die klimarelevanten CO_2-Emissionen aus der thermischen Abfallverwertung, obgleich der Anteil an den nationalen Treibhausgasemissionen nur marginal erscheinen mag (1,4 %), immer gemeinsam mit alternativen Szenarien der Abfallbewirtschaftung (Deponierung, Recycling) und Energieversorgung (fossile Energieträger) hinsichtlich der Erreichung der österreichischen Klimaziele beurteilt werden.

Da es die Methode zudem erlaubt, auch andere Kennwerte des Abfalls im fortlaufenden Betrieb der Abfallverbrennungsanlagen zu erfassen (z. B. den Wassergehalt, Heizwert), wird momentan untersucht, inwiefern das Verfahren, neben der Ausweisung des biogenen und fossilen Anteils im Abfall, zusätzlich zur Prozessoptimierung herangezogen werden kann. Beispielsweise könnte die Durchmischung des Abfalls besser überwacht werden, wodurch eventuell ein geringerer Restsauerstoffgehalt zu einem höheren Wirkungsgrad des Kessels führen würde (Riber et al. 2013). Auch gibt es erste Überlegungen dazu, wie die Bilanzenmethode zur Maximierung der Dampfproduktion eingesetzt werden kann (Schwarzböck et al. 2016b).

Danksagung

Die AutorInnen danken dem Ministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft für die Finanzierung der Studie und der Umweltbundesamt GmbH sowie den Betreibern der österreichischen Abfallverbrennungsanlagen für die gute Kooperation. Zusätzlicher Dank an Inge Hengl für die Unterstützung bei der grafischen Gestaltung.

Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. ■

Literatur

2009/28/EG (2009): Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23.April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Amtsblatt der Europäischen Union, S. 16–62.

AGW (1992): Emissionsabschätzung für Kehrichtschlacke (Projekt EKESA). Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich (AGW), Zürich, Schweiz.

Anderson, R., Dahlbo, H., Myllymaa, T., Korhonen, M.-R., Manninen, K. (2011): Greenhouse Gas Emission Factors for Helsinki Regions Waste Management, Life Cycle Management Conference LCM 2011, Berlin, Germany, S. 10.

BAWP (2011): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich, S. 246.

Böhmer, S., Kügler, I., Stoiber, H., Walter, B. (2007): Abfallverbrennung in Österreich – Statusbericht 2006, Umweltbundesamt GmbH (Hrsg). Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3, Wien, Österreich, S. 175.

Cuperus, J. G., van Dijk, E. A., de Boer, R. C. (2005): Pre-normative research on SRF. TAUW bv, Deventer, Netherlands, S. 128.

Bundeskanzleramt (2011): E-Control, 2011. BGBl. II Nr. 310/2011: Verordnung der E-Control über die Regelungen zur Stromkennzeichnung und zur Ausweisung der Herkunft nach Primärenergieträgern (Stromkennzeichnungsverordnung), Bundeskanzleramt, https://www.ris.bka.gv.at.

Danish Energy Agency (2013): Notat: Standardfaktorer for brændværdier og CO_2-emissioner – indberetning af CO_2-udledning for 2012, Danish Energy Agency, http://www.ens.dk/files/klima-co2/co2-kvoter/produktionsenheder-co2-kvoteordningen/aarlig-co2-rapportering/Standardfaktorer%202012.pdf, Dänemark, S. 3.

van Dijk, E. A., Steketee, J. J. (2002): Feasibility study of three methods for determining the biomass fraction in secondary fuels. TAUW bv, Deventer, Netherlands, S. 51.

Fellner, J., Cencic, O., Rechberger, H. (2006a): Bilanzenmethode – Ein Verfahren zur Bestimmung der fossilen CO_2-Emissionen, in: Lorber, K.E.e.a. (Hrsg), Proceedings DepoTech 2006: „Abfall- und Deponietechnik, Abfallwirtschaft, Altlasten, 8. DepoTech Konferenz", Leoben, Österreich.

Fellner, J., Cencic, O., Rechberger, H. (2006b): Verfahren zur Ermittlung der Anteile bio¬gener und fossiler Energieträger sowie biogener und fossiler Kohlendioxidemissionen beim Betrieb von Verbrennungsanlagen (Bilanzenmethode). Anmeldung zum europäischen Patent (März 2006), Wien, Österreich.

Fellner, J., Cencic, O., Rechberger, H. (2007): A new method to determine the ratio of electricity production from fossil and biogenic sources in waste-to-energy plants. Environ Sci Technol 41, 2579–2586.

Fellner, J., Cencic, O., Zellinger, G., Rechberger, H. (2011): Long term analysis of the biomass content in the feed of a waste-to-energy plant with oxygen-enriched combustion air. Waste Manage. Res. 29, 3–12.

Fichtner (2007): C14 Determination of biomass energy content of fuels – Description of method. Renewable Energy Association (REA), S. 22.

Fuglsang, K., Pedersen, N. H., Larsen, A. W., Astrup, T. F. (2014): Long-term sampling of CO2 from waste-to-energy plants: 14C determination methodology, data variation and uncertainty. Waste Manage. Res. 32, 115–123.

Horttanainen, M., Teirasvuo, N., Kapustina, V., Hupponen, M., Luoranen, M. (2013): The composition, heating value and renewable share of the energy content of mixed municipal solid waste in Finland. Waste Manage 33, 2680–2686.

Icha, P. (2015): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2014. Umweltbundesamt, Wien, Österreich, S. 28.

IPCC (2000): IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories – Chapter 5 – Waste. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/, S. 32.

Jones, F. C., Blomqvist, E. W., Bisaillon, M., Lindberg, D. K., Hupa, M. (2013): Determination of fossil carbon content in Swedish waste fuel by four different methods. Waste Manage. Res. 31, 1052–1061.

Larsen, A. W., Astrup, T. (2011): CO2 emission factors for waste incineration: Influence from source separation of recyclable materials. Waste Manage 31, 1597–1605.

Larsen, A. W., Fuglsang, K., Pedersen, N. H., Fellner, J., Rechberger, H., Astrup, T. (2013): Biogenic carbon in combustible waste: Waste composition, variability and measurement uncertainty. Waste Manage Res 31, 56–66.

Mitterbauer, G., Skutan, S., Rechberger, H. (2009): Charakterisierung der Rostasche der MVA Dürnrohr im Hinblick auf die Rückgewinnung von Metallen (Projekt ChaRo), Bericht für AVN – Abfallverwertung Niederösterreich Ges.m.b.H, Österreich, S. 151.

Mohn, J., Szidat, S., Fellner, J., Rechberger, H., Quartier, R., Buchmann, B., Emmenegger, L. (2008): Determination of biogenic and fossil CO_2 emitted by waste incineration based on (CO2)-C-14 and mass balances. Bioresource Technol 99, 6471–6479.

Obermoser, M., Fellner, J., Rechberger, H. (2009): Determination of reliable CO_2 emission factors for waste-to-energy plants. Waste Manage Res 27, 907–913.

Olofsson, M. (2004): Waste-to-energy from an environmental point of view., Presentation at the 2nd CEWEP Congress „Where is EU Waste Policy going?", Amsterdam, Niederlande.

Priester, T., Köster, R., Eberle, S. H. (1996): Charkterisierung kohlenstoffhaltiger Bestandteile in Hausmüllverbrennungsschlacken unter besonderer Berücksichtigung organischer Stoffe. Müll und Abfall 6, 387–398.

Rechberger, H., Fellner, J., Cencic, O. (2014): Stets auf dem Laufenden – Die treibhauswirksamen Kohlendioxidemissionen und der grüne Stromanteil aus der Abfallverbrennung lassen sich mit der Bilanzenmethode effizient bestimmen. ReSource, 2014 (2).

Riber, C., Cencic, O., Fellner, J., Hindsgaul, C., Rechberger, H. (2013): Full Scale Application of the Balance Method: Experiences and Results ISWA World Congress 2013, Wien, Österreich.

Schwarzböck, T., Rechberger, H., Cencic, O., Fellner, J. (2016a): Determining national greenhouse gas emissions from waste-to-energy using the Balance Method. Waste Manage 49, 263–271.

Schwarzböck, T., Rechberger, H., Fellner, J. (2016b): The added-value of the Balance Method for Waste-to-Energy operators and national authorities, in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.), IRRC Waste-to-Energy, 5.–6. September 2016. Vivis, Wien, Österreich.

Schwarzböck, T., Van Eygen, E., Rechberger, H., Fellner, J. (2016c): Determining the amount of waste plastics in the feed of Austrian Waste to Energy facilities Waste Management & Research (Accepted in June 2016).

Severin, M., Velis, C. A., Longhurst, P. J., Pollard, S. J. T. (2010): The biogenic content of process streams from mechanical-biological treatment plants producing solid recovered fuel. Do the manual sorting and selective dissolution determination methods correlate? Waste Manage 30, 1171–1182.

Skutan, S., Brunner, P. H. (2006): Stoffbilanzen mechanisch-biologischer Anlagen zur Behandlung von Restmüll (SEMBA). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Umweltbundesamt GmbH, Wien Österreich, S. 362.

Stubenvoll, J., Böhmer, S., Szednyjm, I. (2002): Stand der Technik bei Abfallverbrennungsanlagen, Umweltbundesamt. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich, S. 170.

Umweltbundesamt (2015a): Austria's national inventory report 2015 – Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change.

Umweltbundesamt (2015b): Klimaschutzbericht 2015, Report REP-0555. Umweltbundesamt GmbH, Wien, Österreich.

Umweltbundesamt (2015c): Nahzeitprognose der österreichischen Treibhausgasemissionen 2014 (NowCast 2015). Umweltbundesamt GmbH, Wien, Österreich.

VDZ (2016): Zementversand Inland (Monatsdaten). Verein Deutscher Zementwerke e.V., www.vdz-online.de.

VÖZ (2015): Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie – Berichtsjahr 2014. Verein der österreichischen Zementindustrie VÖZ, Wien, Österreich, S. 19.