

## **Online-Bilanzierung in Müllverbrennungsanlagen – Vorteile für den Betrieb der Abgasreinigung**

Martin Horeni, Michael Beckmann<sup>1</sup>, Hans Fleischmann, Erhard Barth<sup>2</sup>

### **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Bilanzierung in Müllverbrennungsanlagen .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Praktische Durchführung der Bilanzierung .....</b>	<b>5</b>
3.1	Ableitung der Berechnungsalgorithmen für die Bilanzierung.....	5
3.2	Umsetzung in das Online-Bilanzierungsprogramm .....	7
<b>4</b>	<b>Anwendungsbeispiele in der Abgasreinigung .....</b>	<b>9</b>
4.1	Überprüfung von Messstellen in der Abgasreinigung.....	10
4.2	Ermittlung von Chlor-Frachten .....	13
4.3	Nachweis des Einflusses einer Wassereindüsung in die Feuerung .....	16
<b>5</b>	<b>Quellen.....</b>	<b>19</b>

---

<sup>1</sup> Bauhaus-Universität Weimar, Lehrstuhl Verfahren und Umwelt, Coudraystraße 11C, D-99423 Weimar, [http:// www.uni-weimar.de/lvu](http://www.uni-weimar.de/lvu) / [lvu@bauing.uni-weimar.de](mailto:lvu@bauing.uni-weimar.de) / Tel.: +49 (0) 3643 58 - 4676, Fax: - 4803

<sup>2</sup> AVA Abfallverwertung Augsburg GmbH, Am Mittleren Moos 60, D-86167 Augsburg, <http://www.ava-augsburg.de> / [hans.fleischmann@ava-augsburg.de](mailto:hans.fleischmann@ava-augsburg.de) / Tel.: +49 (0) 821 7409 - 233, Fax: - 240

## 1 Zusammenfassung

Der Betrieb von Müllverbrennungsanlagen wird zunehmend durch schwankende Abfallzusammensetzungen am Eintritt in die Anlage und Änderungen der Energieabnahme am Austritt (Fernwärme- und Dampfabnahme) beeinflusst. Im Vergleich zu fossil befeuerten Kraftwerken ergeben sich dadurch häufig wechselnde Betriebszustände. Für die weitere Optimierung von Müllverbrennungsanlagen ist deshalb die umfassende Kenntnis der jeweiligen Betriebszustände eine wichtige Voraussetzung. Die Betriebszustände werden durch Messwerte sowie durch Berechnungswerte, die aus diesen Messwerten ermittelt werden können (Wirkungsgrade, spezifische Betriebsmittelverbräuche, Schadstofffrachten usw.) beschrieben. Die möglichst genaue Beschreibung des Betriebszustandes ist u. a. für die Zuordnung von empirisch ermittelten Informationen, z. B. zur Korrosion, zu bestimmten Anlagenparametern und damit zur Erklärung von Ursachen sowie zur Vermeidung von Anlagenschäden wichtig. Aus diesem Grund ist es erforderlich, auf Grundlage der verfügbaren Messwerte möglichst detaillierte Stoff-, Massen- und Energiebilanzen für den jeweiligen Betriebszustand durchzuführen. Mit diesen Informationen können Optimierungsmaßnahmen im Betrieb für die Steigerung der Energieeffizienz, die optimale Auslastung der Anlage (insbesondere des Abfalldurchsatzes), den sparsamen Umgang mit Zusatzstoffen, die Verlängerung der Reisezeiten und damit insgesamt für die Verbesserung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses wirkungsvoll unterstützt werden. Die in modernen Müllverbrennungsanlagen über die Leittechnik erfassten Messwerte sind i. d. R. geeignet, um mit Hilfe von entsprechenden verfahrenstechnischen Bilanzierungsmodellen und Berechnungsmethoden solch eine detaillierte Bilanzierung von einzelnen Verfahrensbausteinen und damit auch der Gesamtanlage durchzuführen.

Am Lehrstuhl Verfahren und Umwelt wurde im Rahmen eines EU-Forschungsvorhabens ein Online-Bilanzierungsprogramm entwickelt, das die detaillierte Bilanzierung aktueller Betriebszustände und damit die umfassende Darstellung des jeweiligen Anlagen-Ist-Zustandes ermöglicht. Gemeinsam mit drei Müllverbrennungsanlagen in Schwandorf, Burgkirchen und Coburg sowie dem Anlagenhersteller Fa. Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik wurde das Online-Bilanzierungsprogramm in die Praxis umgesetzt.

Im vorliegenden Beitrag werden die Grundlagen des Online-Bilanzierungsprogramms, sowie Anwendungsmöglichkeiten am Beispiel des Abfallheizkraftwerkes der Abfallverwertungsanlage Augsburg (AVA Augsburg) beschrieben. Hierbei wird insbesondere auf die Bilanzierung der Abgasreinigungsapparate in Müllverbrennungsanlagen eingegangen.

## 2 Grundlagen der Bilanzierung in Müllverbrennungsanlagen

Bilanzen sind ein wichtiges Hilfsmittel für die Untersuchung von natürlichen und technischen Systemen. In den in der Energieverfahrenstechnik relevanten Prozessen der Energieumwandlung und Stoffbehandlung stellen Bilanzen die Gegenüberstellung von ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströmen für einen festgelegten Bilanzraum bzw. Bilanzkreis dar. Ziele bei der verfahrenstechnischen Bilanzierung sind:

- die **Berechnung unbekannter Größen** (nicht messbare oder nicht gemessene Größen, z. B. Falschlufteintritt in einzelne Apparate) aus gegebenen Größen (z. B. aus Messwerten),
- die (rechnerische) **Kontrolle von gemessenen Größen** (für die Fehlersuche und Plausibilitätsprüfung),

und mit diesen Größen

- die stoffliche und energetische **Beschreibung des Bilanzgegenstandes** z. B. als Voraussetzung für die **Auslegung und Optimierung** (bzw. auch die Abschätzung von Optimierungspotenzialen, z. B. Minimierung Energiebedarf, korrosionsgünstige Fahrweise, Verbesserung Produktqualität, Minderung Emissionen usw.), u. a. auch durch
- **Bildung von Kennziffern** über den Vergleich bestimmter Größen an Ein- und Austritt an dem jeweiligen Bilanzkreis (Wirkungsgrade, spezifische Verbräuche, Verdampfungskennziffern usw.).

Eine wichtige Voraussetzung für die Gesamtbilanzierung von Müllverbrennungsanlagen ist die systematische Darstellung der zu bilanzierenden Anlage. Wie in der Verfahrenstechnik üblich werden hierfür zunächst Bilanzgrenzen für die einzelnen Prozessteilschritte festgelegt. Bei der Bilanzierung von Müllverbrennungsanlagen ist die äußere Bilanzgrenze die Anlage selbst (siehe Abb. 1).

Für die weitere Bilanzierung ist es zweckmäßig, die Gesamtanlage in die übergeordneten Verfahrensabschnitte „Thermisches Hauptverfahren“, „Abgasreinigung“ und „Energieumwandlung“ zu unterteilen (sinnvoll aus verfahrenstechnischer Sicht). Die einzelnen Apparate und Bauteile der Anlage (z. B. Pumpen, Vorwärmer, Mischer) lassen sich dann diesen Verfahrensabschnitten zuordnen. Die bilanzierten Grundeinheiten wie Feuerung, Kessel, Wäscher usw. stellen i. d. R. Apparate- bzw. Bauteilgruppen dar und werden im Folgenden als Verfahrensbausteine bezeichnet (sinnvoll aus bilanzierungstechnischer Sicht). So besteht z. B. der Verfahrensbaustein „Luftvorwärmung“ aus einer Vielzahl von Bauteilen.

Für die einzelnen Bilanzkreise werden im nächsten Schritt Massen-, Stoff- und Energiebilanzen erstellt, unter Berücksichtigung aller wesentlichen, an den jeweiligen Bilanzgrenzen ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströme. Dabei besteht die Forderung, dass die Summe aller eintretenden Massen- und Energieströme gleich der Summe der austretenden Ströme ist.

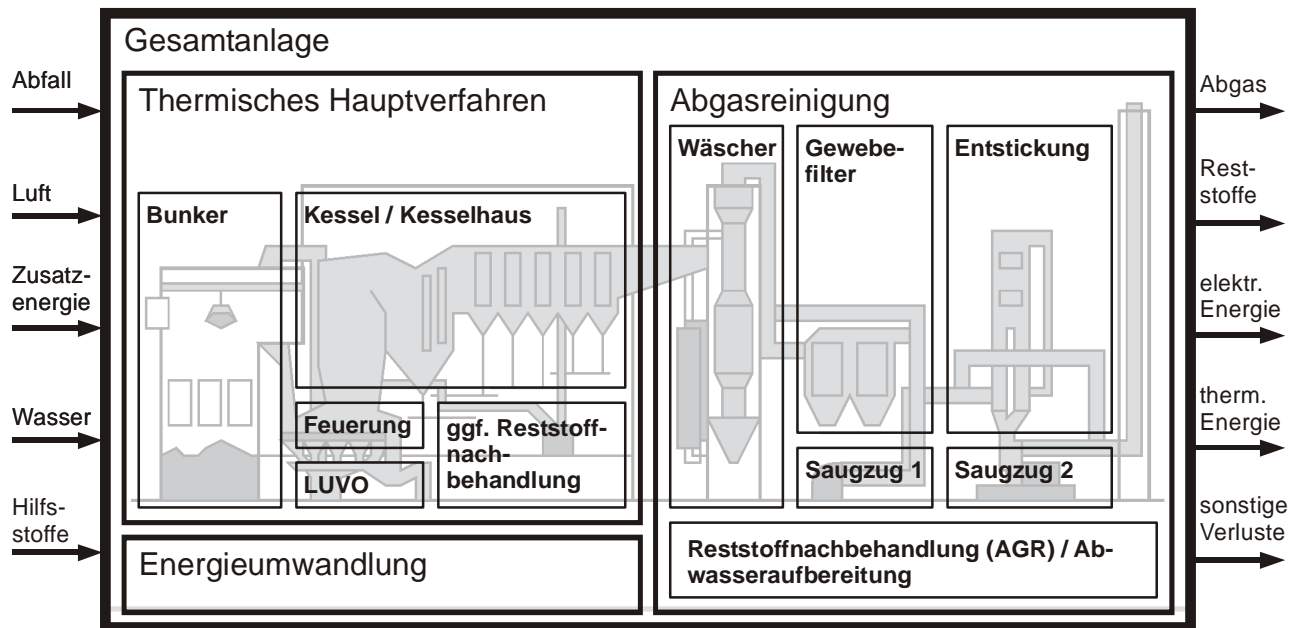


Abb. 1. Bilanzkreise für die Bilanzierung des Müllkraftwerkes Schwandorf, Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme.

Mit den oben definierten Bilanzkreisen ist für die Bewertung festgelegt, was Gegenstand der Betrachtung darstellt. Werden Wirkungsgrade gebildet, so sind diese als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand mit den an einem bestimmten Bilanzkreis ein- und austretenden Energieströmen zu bilden. In gleicher Weise hat dies bei der Bildung von spezifischen Stoffverbräuchen, Ermittlung von Schadstofffrachten usw. zu erfolgen (vergleiche hierzu auch [1]).

Im dem im vorliegenden Beitrag näher betrachteten Verfahrensabschnitt „Abgasreinigung“ hat man, je nach Konfiguration, in Verfahrensbausteine wie Wäscher, Gewebefilter, Entstickung (Denox) usw. zu unterteilen. Zusätzliche Module ergeben sich ggf. für die Reststoffnachbehandlung und Abwasseraufbereitung (in Abb. 1 nicht näher dargestellt).

### 3 Praktische Durchführung der Bilanzierung

#### 3.1 Ableitung der Berechnungsalgorithmen für die Bilanzierung

Wesentliches Ziel bei der Bilanzierung ist die Ermittlung zunächst unbekannter Größen (z. B. spezifische Verbräuche, Wirkungsgrade, Kennzahlen) aus gegebenen Größen. Bei der Online-Bilanzierung sind die gegebenen Grundgrößen die in der jeweiligen Anlage erfassten Messwerte, auf deren Grundlage Berechnungsstrategien für die Bilanzierung der unbekannteren Größen zu entwickeln sind. Bei der Entwicklung dieser Berechnungsstrategien für die Gesamtanlage muss zunächst die Bilanzierung der Abgasreinigung erfolgen. Dies ist für die Online-Bilanzierung in Müllverbrennungsanlagen von wesentlicher Bedeutung, da für die Ermittlung des aktuellen Abfallmassenstromes und -heizwertes das aus dem Kessel austretende Abgas hinsichtlich Volumenstrom, Zusammensetzung ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) und Temperatur bekannt sein muss. Da nach dem Kessel im Regelfall nur der Sauerstoffgehalt und die Abgastemperatur, teilweise auch die Abgasfeuchte gemessen werden, sind die fehlenden Größen über eine Bilanzierung zu bestimmen.

Abb. 2 zeigt beispielhaft für die Abgasreinigung des Müllkraftwerkes Schwandorf die drei Verfahrensbausteine „Wäscher“, „Gewebefilter“ und „Saugzug 1“ mit den ein- und austretenden Massen- und Energieströmen und zugehörig den verfügbaren Messdaten sowie Parametern (z. B. Zusammensetzung der Luft).

Verfügbare Messdaten und Vorgabewerte:

- Massen-, Volumen- und Energieströme
- Zusammensetzungen
- Zusammensetzung teilweise gemessen (z.B.  $\text{O}_2$ )
- Temperaturen bzw. spezifische Enthalpien (Speisewasser, Frischdampf) und Energien
- Temperaturen bzw. spezifische physikalische Enthalpien und Energien werden angenommen

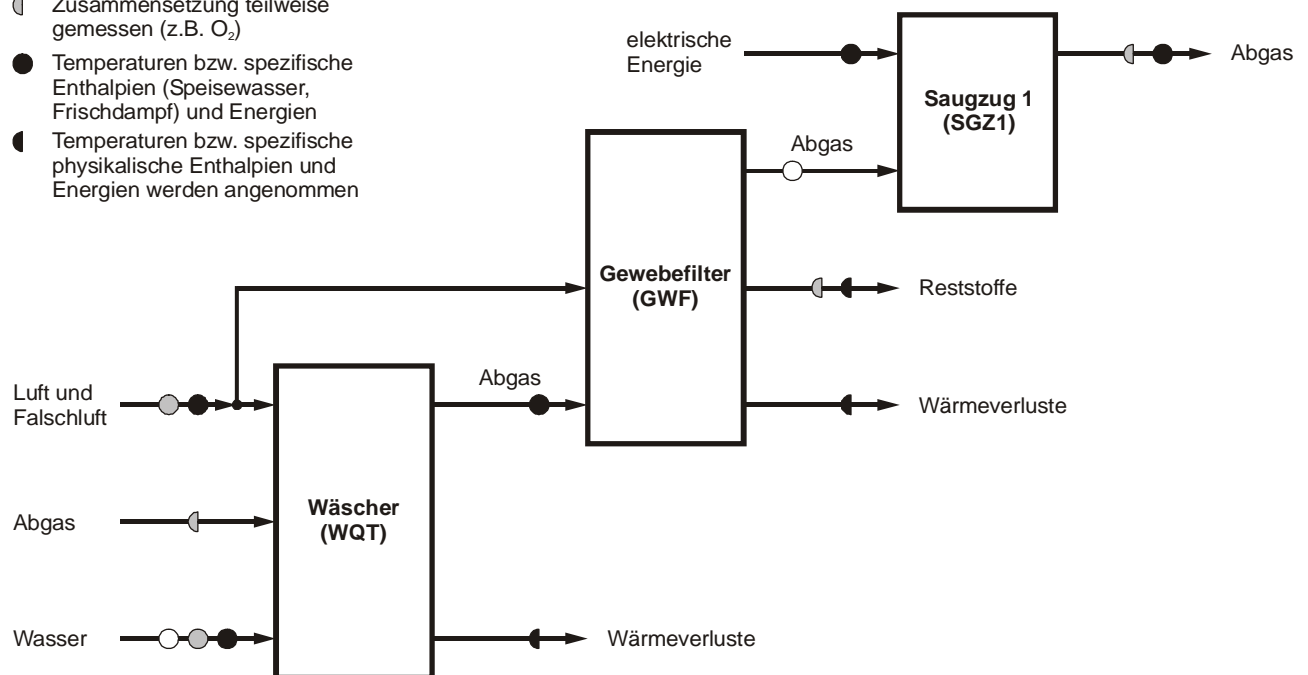


Abb. 2. In der Müllverbrennungsanlage Schwandorf verfügbare Messstellen (-arten) bzw. hinreichend genaue Annahmen für die Bilanzierung von Wäscher (quasitrocken), Gewebefilter und Saugzug 1, Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme.

Daraus ist zu erkennen, dass sich für einen einzelnen Verfahrensbaustein allein auf der Basis der Messwerte am Ein- und Austritt zunächst nicht unmittelbar eine geschlossene Bilanzierung ergeben muss, sondern unter Umständen „bausteinübergreifende“ Berechnungsalgorithmen zu entwickeln sind. Abb. 3 zeigt hierzu die für die Ermittlung des Abgasmassenstromes und der Abgaszusammensetzung nach dem Kessel berücksichtigten Ströme.

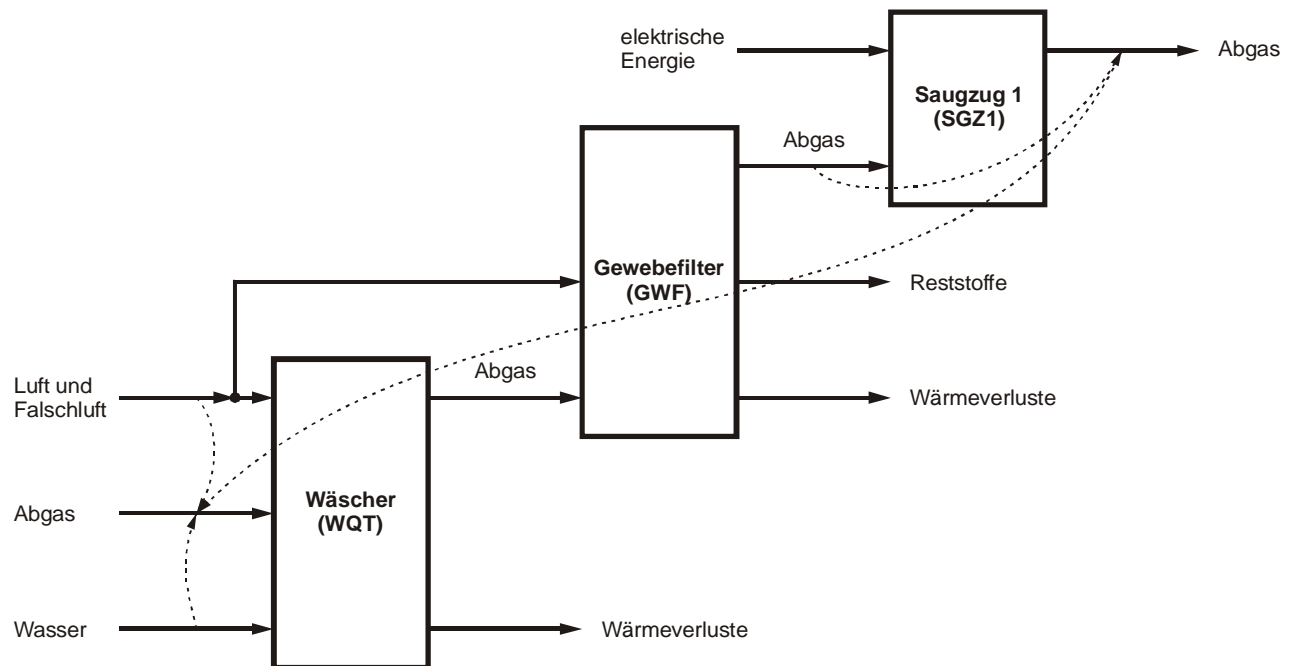


Abb. 3. Für die Online-Bilanzierung des Müllkraftwerkes Schwandorf berücksichtigte Ströme für die Ermittlung des Volumenstromes und der Zusammensetzung des Abgases nach dem Kessel bzw. vor dem Wäscher, Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme.

Die Besonderheit bei der Bilanzierung dieser drei Verfahrensbausteine im Müllkraftwerk Schwandorf besteht darin, dass die Anordnung der Messstellen zwar aus betrieblicher Sicht günstig ist, für die Bilanzierung aber zu recht umfangreichen Gleichungen für die Ermittlung des Abgasvolumenstromes nach dem Kessel führt [2]. Bei der Anwendung einer solchen detaillierten Bilanzierung erfordert dies unter Umständen – in Abhängigkeit von dem jeweils gewünschten Bilanzierungsergebnis – die Nachrüstung von Messstellen, insbesondere im Bereich der Abgasreinigung (z. B. CO<sub>2</sub>-Messstelle), aber auch der Energieumwandlung und im Thermischen Hauptverfahren.

### 3.2 Umsetzung in das Online-Bilanzierungsprogramm

Die Bilanzierung von Müllverbrennungsanlagen wird mit zunehmenden Detaillierungsgrad des Gesamtverfahrens sehr komplex. Eine detaillierte Bilanzierung kann in der industriellen Praxis deshalb nur mit einem geeigneten EDV-Programm realisiert werden. Hierfür wurde ein Online-Bilanzierungsprogramm entwickelt, das modular aufgebaut ist, um eine einfache Übertragung auf verschiedene Müllverbrennungsanlagen sowie auf weitere Anlagen der Energieumwandlung und Stoffbehandlung zu gewährleisten.

Grundlage für die einfache Übertragbarkeit sind u. a. vordefinierte Berechnungsmodule, z. B. für Feuerung, Luftvorwärmung, Gebläse, Pumpen usw., die im Rahmen eines EU24-Forschungsvorhabens<sup>3</sup> erarbeitet wurden und laufend ergänzt werden. Diese Module sind in einer zugehörigen Bibliothek zusammengefasst. Durch die Umsetzung des Online-Bilanzierungsprogramms mit einer Benutzeroberfläche auf Basis von Microsoft Excel ist für das Betriebspersonal eine einfache Bedienung und Transparenz des Programms gegeben (Abb. 4). Die Anbindung des Programms an die Leittechnik einer Anlage ist mittels eines OPC-Servers<sup>4</sup> oder über eine Datenbankabfrage des Messdatenerfassungssystems der jeweiligen Anlage möglich.

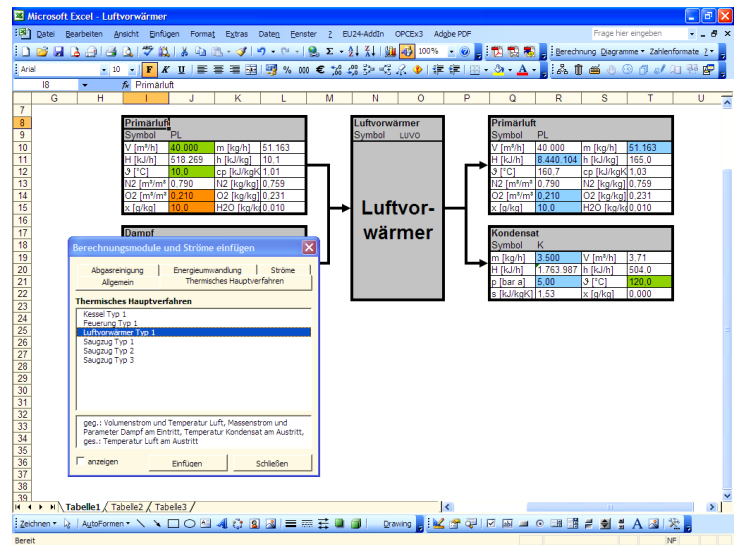


Abb. 4. Einfügen des Berechnungsmodul „Luftvorwärmer“ aus der vorhandenen Modul-Bibliothek.

Für die Bilanzierung ist zu berücksichtigen, dass nur entsprechend validierte Messwerte in die Berechnung einfließen dürfen. Mit dem Online-Bilanzierungsprogramm kann in diesem Zusammenhang geprüft werden, ob sich die Anlage zu dem betrachteten Zeitpunkt in einem stationären Zustand bzw. einem „Beharrungszustand“ befindet. Dies betrifft insbesondere diejenigen Messgrößen, die repräsentativ für das dynamische Anlagenverhalten sind und relevanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben (i. d. R. ca. 1/3 der für die Bilanzierung verwendeten Messgrößen). In dem Online-Bilanzierungsprogramm kann für die Probe auf Einhaltung eines stationären Zustandes eine Berechnung nach der Richt-

<sup>3</sup> Die Grundlagen für das Programm wurden in dem Forschungsvorhaben „EU24 – Wirkungsgrad von Abfallverbrennungsanlagen; technische, ökologische und ökonomische Optimierung“ [2], gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung (EFRE) erarbeitet.

<sup>4</sup> OPC...OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control. Ein OPC-Server ist ein Hardware-Treiber, der es OPC-fähiger Standard-Software (OPC-Clients) ermöglicht, externe Geräte ohne zusätzlichen Programmieraufwand anzusprechen.

---

linie VDI 3986 „Ermittlung des Wirkungsgrades von konventionellen Kraftwerken“ durchgeführt werden [3]. Da der Anlagenbetrieb in Müllverbrennungsanlagen häufigen Schwankungen unterworfen ist, muss für die einzuhaltende Toleranz im Vergleich z. B. zu Abnahmeversuchen an kraftwerkstechnischen Anlagen ein entsprechend höherer Wert gewählt werden. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass auch bei Vernachlässigung der Probe auf den Beharrungszustand ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden [4].



## 4 Anwendungsbeispiele in der Abgasreinigung

Herkömmliche Betriebsdatenerfassungssysteme zeigen die aktuell in der Anlage vorliegende Messwerte sowie deren zeitliche Verläufe an. Dies betrifft z. B. Luft- und Abgasvolumenströme, Abgaskonzentrationen, Dampfmengen und Dampfparameter. Mit dem zuvor beschriebenen Online-Bilanzierungsprogramm werden, über die bereits mit dem Betriebsdatenerfassungssystem mögliche Anzeige von Messwerten hinaus, Massen-, Stoff- und Energieströme in allen wesentlichen Anlagenabschnitten und die zugehörigen Wirkungsgrade und spezifischen Kennzahlen wie Betriebsmittelverbräuche, spezifische Dampfmengen usw. dargestellt. Damit steht dem Betriebspersonal eine Vielzahl zusätzlicher Informationen für die Optimierung der Fahrweise der Anlage zur Verfügung.

Für die Anwendung des Online-Bilanzierungsprogramms in der Abgasreinigung gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Von besonderer Bedeutung für die Gesamtbilanzierung von Müllverbrennungsanlagen ist die Ermittlung des Abgasvolumenstromes und der vollständigen Abgaszusammensetzung nach dem Kessel, die für die Ermittlung des Massenstromes, der Zusammensetzung und des Heizwertes des aktuell auf dem Rost verbrannten Abfalls erforderlich ist. Die Berechnung dieser Größen wiederum ist für die weitere Optimierung des Feststoffumsatzes in der Feuerung (z. B. hinsichtlich Primärmaßnahmen für die Abgasreinigung oder der Verminderung von Korrosionserscheinungen im Dampferzeuger) wichtig.

Der Vorteil bei der Online-Bilanzierung der Abgasreinigung besteht neben der zeitnahen Auswertung der Massen-, Stoff- und Energieströme v.a. in dem hierbei möglichen Detaillierungsgrad, der für die detaillierte Beschreibung der aktuellen Betriebszustände als grundlegende Voraussetzung für die weitere Optimierung von MVA erforderlich ist. In den folgenden Anwendungsbeispielen

- Überprüfung von Messstellen in der Abgasreinigung,
- Ermittlung von Chlor-Frachten und
- Nachweis des Einflusses einer Wassereindüsung in die Feuerung

wird gezeigt, wie das Online-Bilanzierungsprogramm für solche Untersuchungen verwendet werden kann. Weitere Beispiele wie z. B. die Ermittlung von CO<sub>2</sub>-Emissionsfrachten wurden bereits u. a. in [4] und [5] veröffentlicht.

Die hier dargestellten Beispiele beziehen sich auf das Abfallheizkraftwerk der Abfallverwertungsanlage Augsburg (AVA Augsburg). Bei dieser Anlage handelt es sich um eine „klassische“ Müllverbrennungsanlage, d.h. der Feststoffumsatz in der 1. und 2. Stufe des Thermischen Hauptverfahrens wird als Verbrennungs-Nachverbrennungsverfahren realisiert. In der AVA Augsburg wird für die Abgasreinigung ein elektrostatischer Abscheider, ein 2-stufiger Nasswäscher, eine Entstickungsanlage, ein Flugstromadsorber und abschließend ein Gewebefilter verwendet. Für die Förderung des Abgases werden zwei Saugzüge (angeordnet nach dem Nasswäscher und nach dem Gewebefilter) eingesetzt.

#### 4.1 Überprüfung von Messstellen in der Abgasreinigung

Für die laufende Überprüfung der Emissionen aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen wie z. B.  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$ , PCDD/F usw. werden eine Vielzahl unterschiedlicher kontinuierlich und diskontinuierlich arbeitender Messstellen herangezogen. Als so genannte „Reingas-Messstellen“ bzw. „17.-BlmSchV-Messstellen“ berühren diese genehmigungsrechtliche Belange und werden deshalb regelmäßig überprüft und ggf. unmittelbar an der Messstelle oder (rechnerisch) im Emissionsrechner kalibriert. Demgegenüber erfolgt die Kalibrierung von Rohgasmessstellen sowie anderen Messstellen in der Abgasreinigung weniger häufig. Die zugehörigen Messungen sind allerdings eine wichtige Voraussetzung, um (in Verbindung mit Bilanzierungsrechnungen in der Abgasreinigung) z. B. Optimierungsmaßnahmen an einzelnen Abgasreinigungsapparaten zu beurteilen oder Frachten, die über den Brennstoff in die Feuerung eingetragen werden, ermitteln zu können.

Abb. 5 zeigt in diesem Zusammenhang beispielhaft für einen Zeitraum von zwei Stunden die  $\text{HCl}$ -Rohgas- und Reingasemissionen an der Ofenlinie 1 der AVA Augsburg. Aufgrund dieser Messwerte allein ist selbstverständlich noch keine Aussage zur Genauigkeit der (Rohgas-) Messungen möglich.

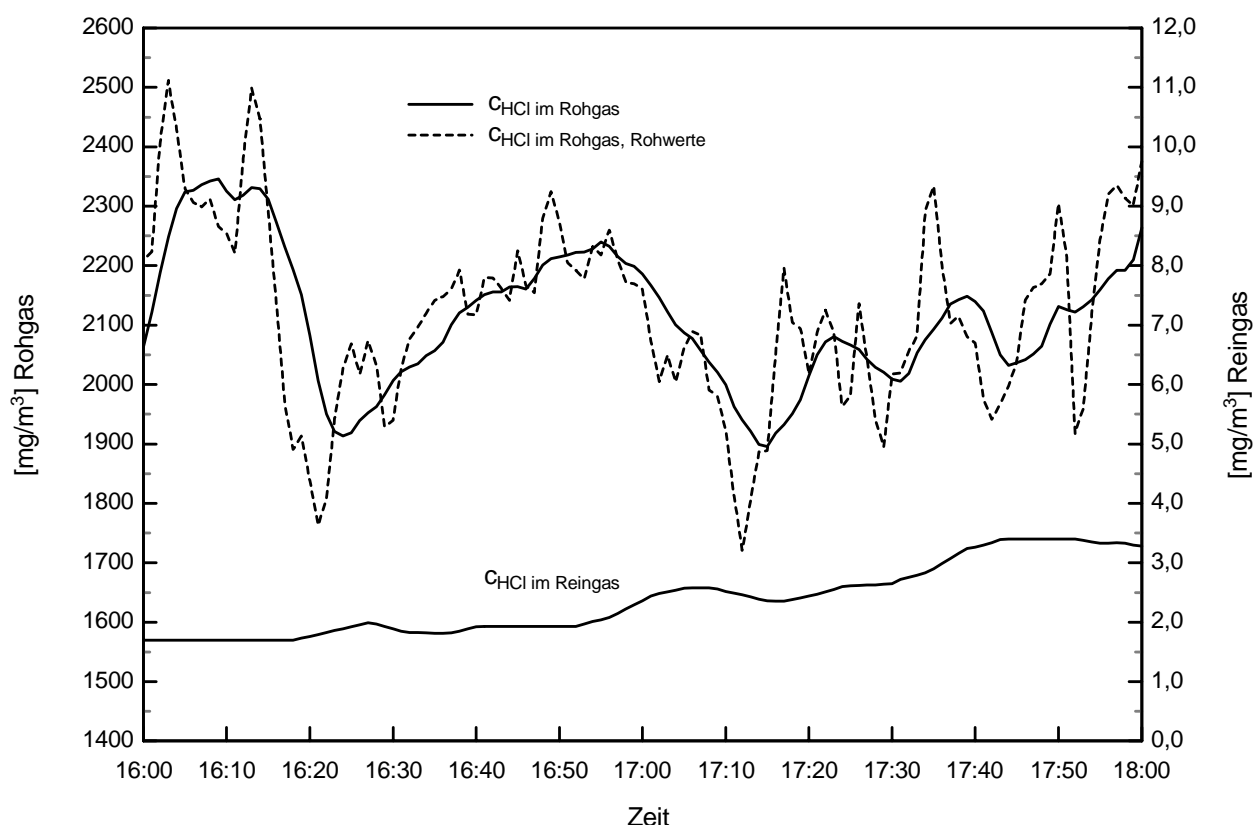


Abb. 5. Messwerte für die  $\text{HCl}$ -Konzentrationen (trocken) im Rohgas und im Reingas für die Ofenlinie 1 der AVA Augsburg im Untersuchungszeitraum (die „Rohwerte“ stellen 1-Minuten-Mittelwerte aus dem Messdatenerfassungssystem der Anlage dar, alle anderen Werte sind gleitende Mittelwerte aus jeweils 10 Rohwerten, d.h. jeweils über 10 Minuten).

Für eine Überprüfung dieser Messstellen ist die Bilanzierung

- des Abgasvolumenstromes (trocken) nach dem Kessel,
- des Cl-Massenstromes im Rohgas am Eintritt in den Wäscher,
- des Cl-Massenstromes im Reingas am Austritt aus dem Wäscher,
- des Cl-Massenstromes im Abwasser der saueren HCl-Stufe am Austritt aus dem Wäscher und
- des Cl-Massenstromes im Abwasser der neutralen SO<sub>2</sub>-Stufe am Austritt aus dem Wäscher

erforderlich (Abb. 6).

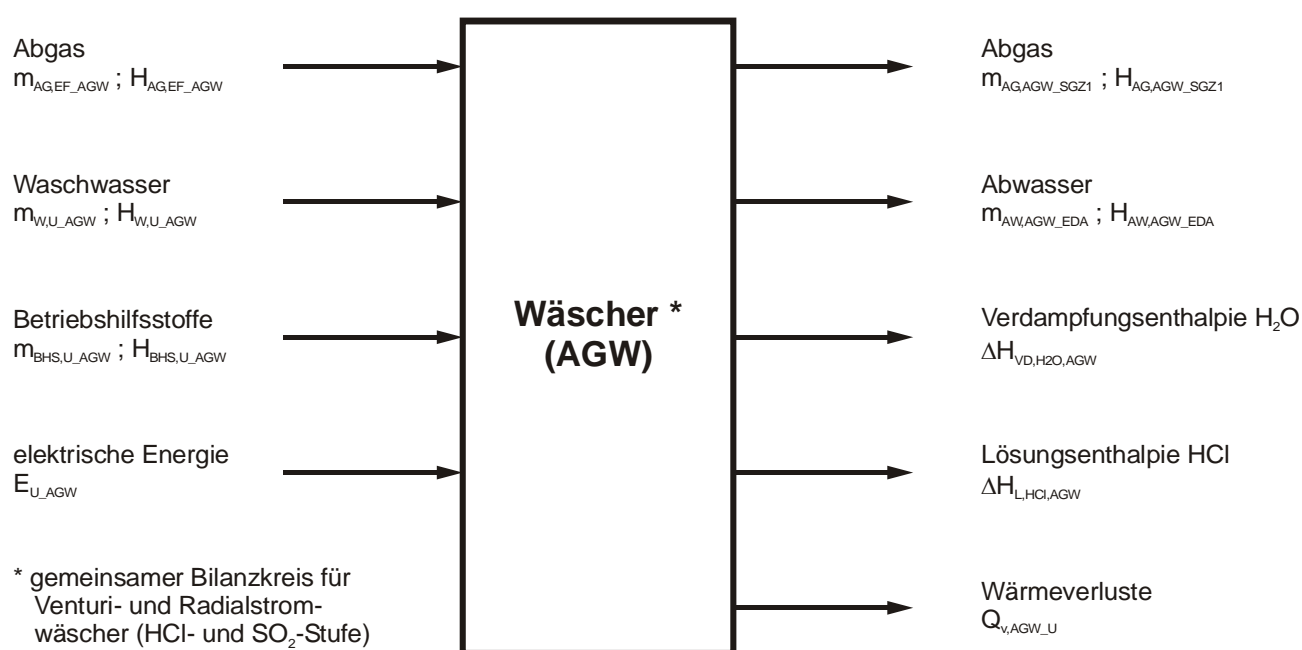


Abb. 6. Bilanzkreis für die Bilanzierung des Nasswäschers in der AVA Augsburg.

Der Chlormassenstrom im Abwasser am Austritt aus der SO<sub>2</sub>-Stufe muss ermittelt werden, da HCl, das nicht in der saueren Stufe absorbiert wurde, unter Umständen erst in der neutralen Stufe unter Bildung von Natriumchlorid abgeschieden wird. Ungünstig für den Betrieb ist, dass hierdurch der Verbrauch an Natronlauge in der neutralen SO<sub>2</sub>-Stufe erhöht wird, um dort einer pH-Wert-Absenkung entgegenzuwirken. Sowohl der Trockensubstanzgehalt des Abwassers aus der SO<sub>2</sub>-Stufe (durchschnittlich 12 Ma.-%) als auch die HCl-Konzentration des Abwassers aus der HCl-Stufe (durchschnittlich 6 Ma.-%) sind als Messwerte verfügbar.

Abb. 7 zeigt für den gewählten Untersuchungszeitraum die so ermittelten Chlormassenströme<sup>5</sup>. Die sich aus der Bilanz ergebende, näherungsweise gleich bleibende Abweichung von durchschnittlich ca. 17 kg/h Chlor weist daraufhin, dass eine systematische Abweichung bei der Messwerterfassung vorliegt, die nun über eine detaillierte Untersuchung der verschiedenen für die Bilanzierung herangezogenen Messstellen vermindert bzw. beseitigt werden sollte.

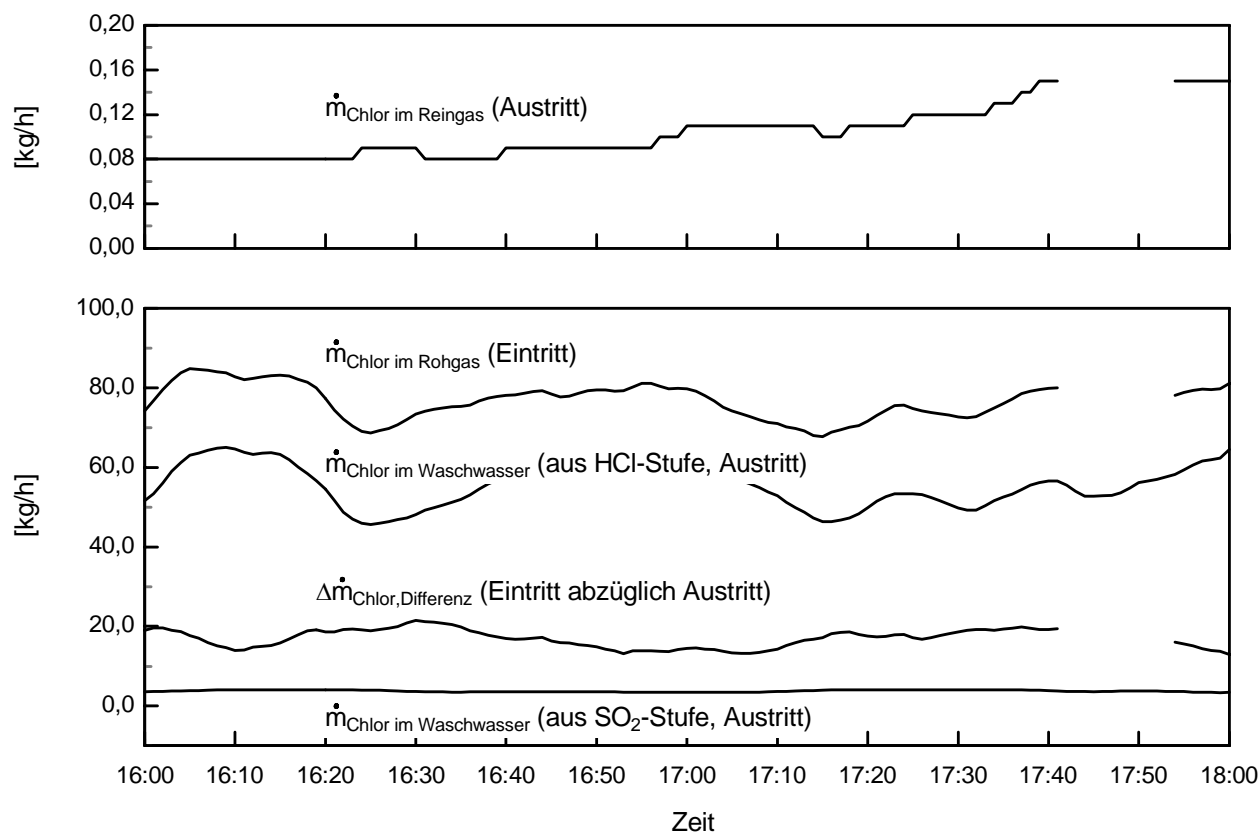


Abb. 7. Bilanzierte Chlormassenströme an Eintritt und Austritt der Abgasreinigung sowie die sich ergebende Differenz (17:41 bis 17:54 Uhr kein Messsignal für die Abgasvolumenstrommessung).

<sup>5</sup> Die zeitlichen Unterbrechungen in den Verläufen sind auf automatisierte Messstellenkalibrationen zurückzuführen. Im Zeitraum der Kalibrierung wird kein Messsignal gesendet (16:54 bis 17:08 Uhr CO<sub>2</sub>-Messstelle, 17:41 bis 17:54 Uhr Volumenstrommessstelle), siehe auch folgende Abbildungen.

## 4.2 Ermittlung von Chlor-Frachten

Eine wichtige Voraussetzung für die weitere Optimierung von Müllverbrennungsanlagen hinsichtlich eines wirtschaftlichen und umweltverträglichen Betriebs ist die Kenntnis der brennstofftechnischen Eigenschaften des eingesetzten Abfalls. Stand der Technik in MVA ist, dass diese Eigenschaften gar nicht oder nur teilweise (z. B. mittlerer Heizwert „rückblickend“ als 4-Stunden-Mittelwert oder indirekt, z. B. über den Sauerstoffgehalt des Abgases nach Kessel) in die Regelung der Anlage einfließen. Die Ursache hierfür liegt im Wesentlichen – im Unterschied z. B. fossil befeuerten Kraftwerken – in der starken Inhomogenität der Eigenschaften des Brennstoffes Abfall bzw. deren schwierigen Bestimmbarkeit (z. B. im Labor).

Aufgrund der für MVA charakteristischen Brennstoffaufgabe über den Mülltrichter mit zeitlich verzögertem (in Abhängigkeit von der jeweiligen Anlage mindestens 1 bis 2 Stunden) und diskontinuierlichem Eintritt in die Feuerung ist darüber hinaus auch der aktuell verbrannte Massenstrom Abfall unbekannt. Dadurch kann die Ermittlung von auf die Masse bezogenen Brennstoffgrößen wie der Heizwert ( $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{AF}}$ ) oder der Kohlenstoffgehalt ( $\text{kg}_{\text{C}}/\text{kg}_{\text{AF}}$ ) z. B. für eine Verwendung als Führungsgrößen in der Feuerungsleistungsregelung nicht ausreichend genau erfolgen. Außerdem ist es nicht möglich, Ergebnisse aus Rohgasanalysen (Asche-Salz-Proportionen [6], Schwefel- und Chlorfrachten usw.) oder Ergebnisse aus der Gesamtbilanzierung von MVA (Wirkungsgrade) mit den jeweils aktuellen Abfalleigenschaften und dem Abfallmassenstrom in Verbindung zu bringen.

Eine Verbesserung dieser Situation lässt sich erzielen, wenn

- Massenstrom,
- Zusammensetzung und
- Heizwert

des aktuell<sup>6</sup> verbrannten Abfalls ermittelt werden. Die hierfür erforderlichen Bilanzierungsrechnungen, die u. a. auf Grundlage der Abgaszusammensetzung ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )<sup>7</sup> und des Abgasvolumenstromes nach dem Kessel durchgeführt werden, sind ein wich-

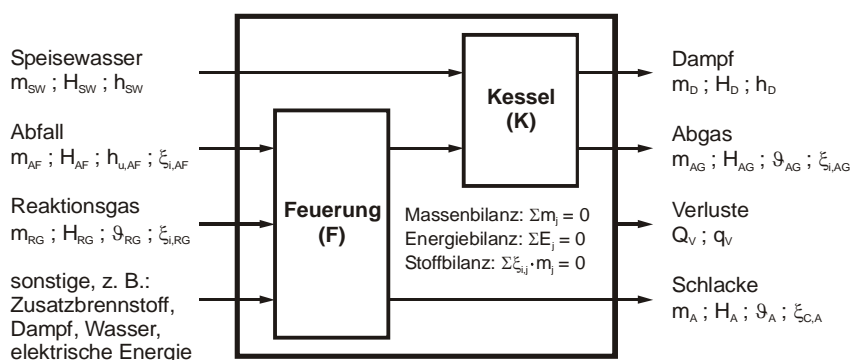


Abb. 8. Bilanzkreis um die Verfahrensbauweise „Feuerung“ und „Kessel“ für die Ermittlung von Massenstrom, Zusammensetzung und Heizwert des Abfalls, Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströmen.

<sup>6</sup> Die zeitliche Verzögerung beträgt ca. 1 bis 5 Minuten, in Abhängigkeit von den für die Messwertabfrage und -auswertung gewählten Parametern.

<sup>7</sup> Mit für die Praxis ausreichender Genauigkeit werden nur die wesentlichen Abgasbestandteile (gemessene bzw. bilanzierte Größen) zur Ermittlung des Abfallmassenstromes und -heizwertes berücksichtigt.

tiger Bestandteil des Online-Bilanzierungsprogramms. Der zugehörige Bilanzkreis für die Berechnung um Feuerung und Kessel ist in Abb. 8 dargestellt.

Im Betriebsdatenerfassungssystem der AVA Augsburg sind zunächst bezüglich einer Beurteilung der Chlorfreisetzung während des Verbrennungsprozesses nur die HCl-Rohgasmesswerte verfügbar (Abb. 5). Die Konzentration allein reicht jedoch für eine Beurteilung von Brennstoffeigenschaften oder der Korrosionsneigung des Kessels nicht aus. Vielmehr müssen die zugehörigen Frachten näher betrachtet werden und mit brennstoffspezifischen Größen wie z. B. dem Abfallheizwert in Verbindung gebracht werden. In Abb. 9 sind in diesem Zusammenhang der Massenstrom und der Heizwert des Abfalls sowie die im selben Zeitraum ermittelte Chlorfracht im Rohgas dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Chlor im Rohgas nur einen Teil des gesamten Chlorgehaltes des Abfalls darstellt. Darüber hinaus wird Chlor in verschiedenen Bindungsformen an den Kesselwänden abgelagert, oder über Schlacke, Aschen und Stäube ausgetragen.

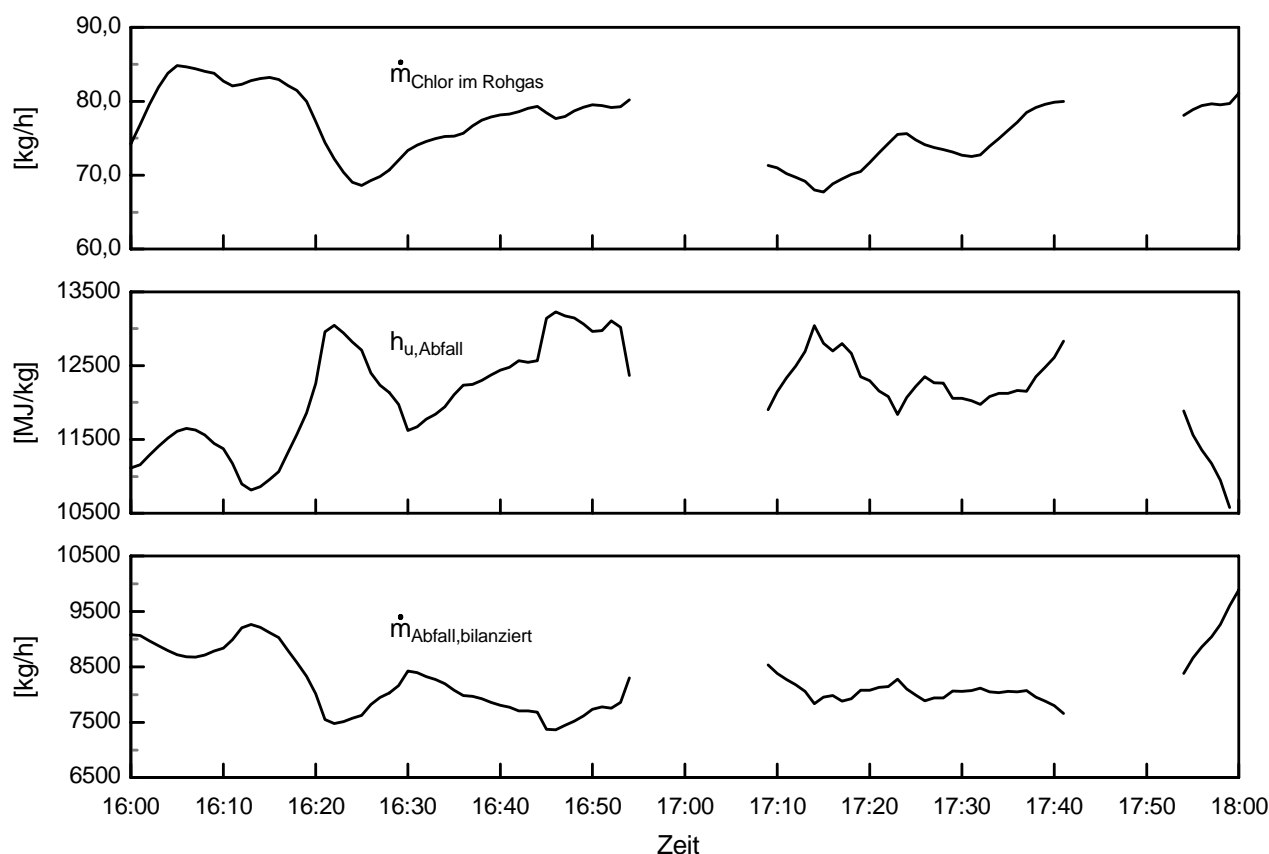


Abb. 9. Abfallmassenstrom und -heizwert sowie Massenstrom Chlor im Rohgas (16:54 bis 17:09 Uhr kein Messsignal für die  $\text{CO}_2$ -Messung, 17:41 bis 17:54 Uhr kein Messsignal für die Abgasvolumenstrommessung).

Zusammenhänge zwischen Massenstrom Abfall, Heizwert des Abfalls und Chlorfracht im Rohgas können allein auf Grundlage der Messwerte nicht hergestellt werden (z. B. Zusammenhang zwischen Massenstrom Abfall über die Kranwaage und HCl-Rohgaskonzentration, siehe Anmerkungen zur Brennstoffaufgabe oben). Bei näherer Be-

trachtung einzelner Betriebspunkte wird deutlich, dass Massenstrom und Heizwert des Abfalls, die HCl-Konzentration im Rohgas und die HCl-Rohgasfracht komplex zusammenwirken (Tab. 1). So geht in dem hier gezeigten Beispiel die Erhöhung der HCl-Rohgaskonzentration (Abb. 5) in Verbindung mit einem nahezu gleich bleibenden bilanziertem Massenstrom

Zeit	16:05 Uhr	16:25 Uhr	16:50 Uhr
$\dot{m}_{\text{Abfall, bilanziert}}$ [t/h]	8,7	7,6	7,7
$h_{u, \text{Abfall}}$ [MJ/kg]	11,6	12,7	13,0
$c_{\text{HCl im Rohgas}}$ [mg/m <sup>3</sup> *)	2.324	1.919	2.215
$\dot{m}_{\text{Chlor im Rohgas}}$ [kg/h]	84,8	68,6	79,5

\*) Messwert (alle anderen Werte wurden bilanziert)

Tab. 1. Gegenüberstellung verschiedener Betriebsparameter im Zusammenhang mit der Beurteilung der Chlorfracht im Rohgas.

Abfall und damit die Erhöhung der Chlorfracht im Rohgas nicht so deutlich mit einem höheren Heizwert einher, wie man dies unter Umständen erwarten würde (Abb. 9, Vergleich 16:25 Uhr und 16:50 Uhr). Andererseits führt ein höherer Heizwert nicht automatisch zu einer höheren HCl-Rohgaskonzentration (Vergleich 16:05 Uhr und 16:25 Uhr).

Dies zeigt, dass für die weiterführende Untersuchung von Korrosionsmechanismen in Verbindung mit den jeweils vorherrschenden Betriebszuständen die detaillierte Bilanzierung der Abgasreinigung und des Thermischen Hauptverfahrens von MVA von wichtiger Bedeutung ist. Die Erklärung des komplexen Zusammenwirkens von Chlorkonzentration und Chlorfracht im Rohgas, sowie Abfallmassenstrom und Abfallheizwert könnte z. B. durch Untersuchungen zum Korrosionsverhalten (insbesondere Einsatz von Belagssonden und Ermittlung der Asche-Salz-Proportionen [6], Einsatz von Wärmestromsensoren [7]) wirkungsvoll unterstützt werden.

### 4.3 Nachweis des Einflusses einer Wassereindüsung in die Feuerung

In einer Reihe von Müllverbrennungsanlagen wird derzeit die Eindüsung von Wasser in den Feuerraum getestet bzw. angewendet. Aufgrund der vergleichsweise hohen Energieaufnahme bei der Erwärmung und anschließenden Verdampfung erscheint die Eindüsung von Wasser sehr gut geeignet, um maßgeblichen Einfluss auf die Energiefreisetzung im Dampferzeuger (Feuerung und Kessel) zu nehmen. Da für die Dampferzeugung nur die physikalische („sensible“) Energie des entstehenden Abgases genutzt werden kann, diese aber um den Betrag der für die Verdampfung des Wassers benötigten Energie verringert wird (Umwandlung in latente Energie), muss dem Dampferzeuger bei konstanter Dampfleistung entsprechend mehr (Abfall-) Energie zugeführt werden. Rechnerisch kommt dies einer Verringerung des unteren Heizwertes des Brennstoffes gleich, die mit einer entsprechenden Durchsatzhöhung ausgeglichen werden muss [8].

In der AVA Augsburg wird die Wassereindüsung in die Feuerung durch die Verhältnisse in der Abgasreinigung begrenzt. Um die Abgastemperatur im Nasswäscher (angeordnet nach Kessel und elektrostatischem Abscheider) unter einem durch das Betriebspersonal festgelegten Sollwert von 70 °C zu halten, muss am Eintritt in den Wäscher (Abgastemperatur vor dem Wäscher ca. 180 °C) eine ausreichend große Menge dort eingedüsten Waschwassers verdampft werden (Quench-Wirkung). Dies ist allerdings nur möglich, wenn der Feuchtegehalt des eintretenden Abgases nicht zu hoch ist, d.h. das Abgas ge-

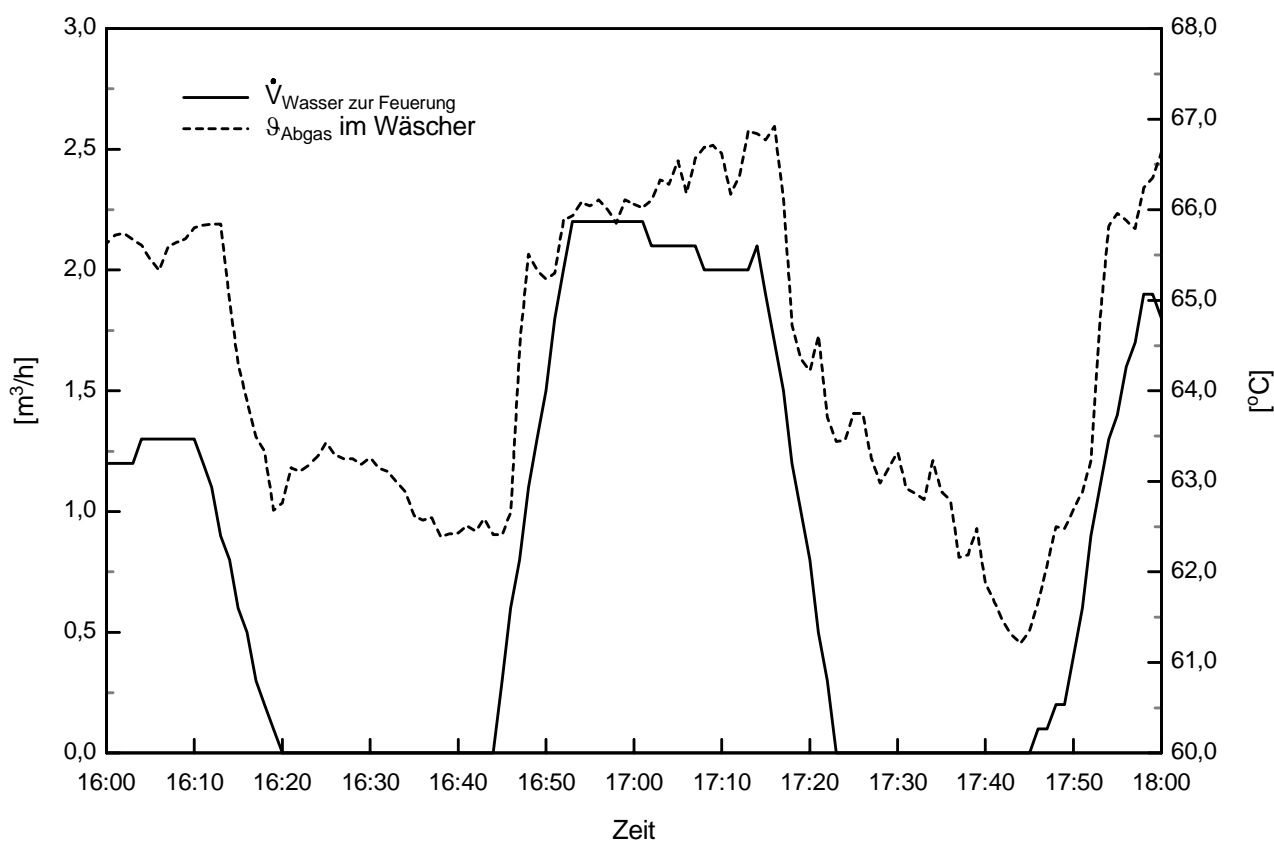


Abb. 10. Einfluss der Wassereindüsung in die Feuerung auf die Temperatur des Abgases nach dem Quench-Vorgang im Nasswäscher.



nug Wasser aufnehmen kann. Mit der unmittelbar nach der Eindüsung gemessenen Temperatur des Abgases kann auf den Feuchtegehalt des Abgases vor dem Wäscher geschlossen werden. Die Wassereindüsung ist deshalb regelungstechnisch mit dieser Abgastemperatur verbunden.

Im dem hier gewählten Untersuchungszeitraum (dieser entspricht den zuvor genannten Beispielen) wurde die Wassereindüsung zweimal für jeweils eine halbe Stunde abgestellt. Abb. 10 zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen der Abgastemperatur nach dem Quenchen und der eingedüsten Wassermenge: Durch die ohne Wassereindüsung in die Feuerung geringere Abgasfeuchte kann mehr Waschwasser verdampft werden – die Abgastemperatur sinkt.

Abb. 11 zeigt im Vergleich zu der eingedüsten Wassermenge den in diesem Zeitraum ermittelten Massenstrom Abfall. Es wird deutlich, dass durch die Überlagerung verschiedener Einflussgrößen (v.a. Abfallheizwert, aber auch produzierte Nutzwärme bzw. Kesselleistung), erschwert durch deren ständige Änderung im zeitlichen Verlauf, kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Menge eingedüsten Wassers und der zugeführten Abfallmenge besteht, wie dies eigentlich zu erwarten wäre.

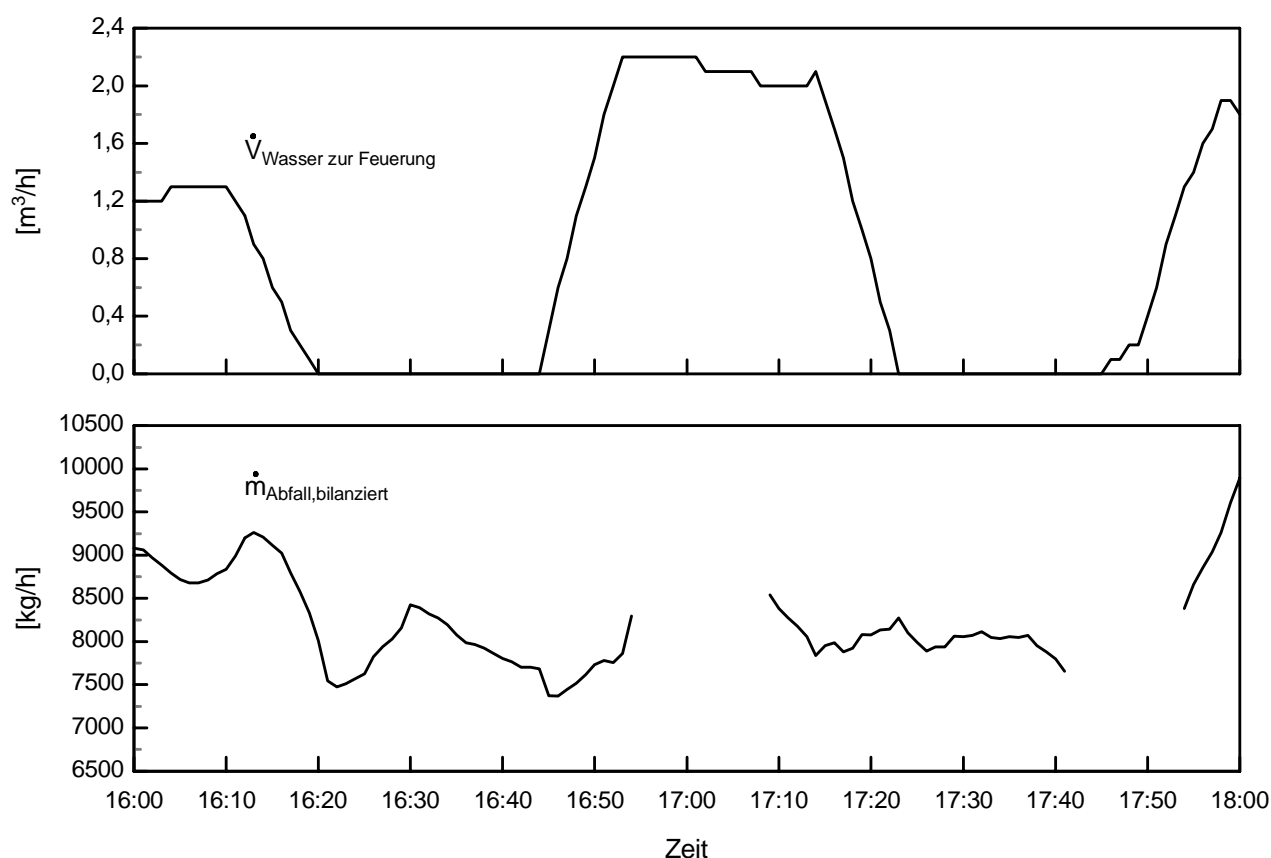


Abb. 11. Wassereindüsung in die Feuerung und Abfallmassenstrom (16:54 bis 17:09 Uhr kein Messsignal für die  $\text{CO}_2$ -Messung, 17:41 bis 17:54 Uhr kein Messsignal für die Abgasvolumenstrommessung).

Mit einer detaillierten Bilanzierung der Abgasreinigung und des Thermischen Hauptverfahrens ist es möglich, diesen Zusammenhang z. B. über den „online“ ermittelten Kesselwirkungsgrad deutlich zu machen (Abb. 12). Der Kesselwirkungsgrad als Verhältnis von produzierter Nutzwärme (Enthalpiestrom Frischdampf abzüglich Enthalpiestrom Speisewasser) zum Aufwand (hier maßgeblich der Enthalpiestrom Abfall) fällt in dem betrachteten Zeiträumen von durchschnittlich ca. 80 % (max. 84 %) auf unter 76 %. Dies entspricht einer Erhöhung der einzubringenden Abfallenergie von ca. 4 %, unter der Maßgabe, dass die Nutzwärme konstant bleiben soll. Würde der Heizwert des Abfalls (entgegen den praktischen Gegebenheiten im Betrieb) konstant bleiben, müsste demzufolge ca. 4 % mehr Abfall durchgesetzt werden. Abb. 12 zeigt zusätzlich auch den Gesamtwirkungsgrad der AVA Augsburg in diesem Zeitraum, dessen Änderung zwischen 19,3 und 20 % zwar gering ist, aber deutlich durch die Wassereindüsung beeinflusst wird.

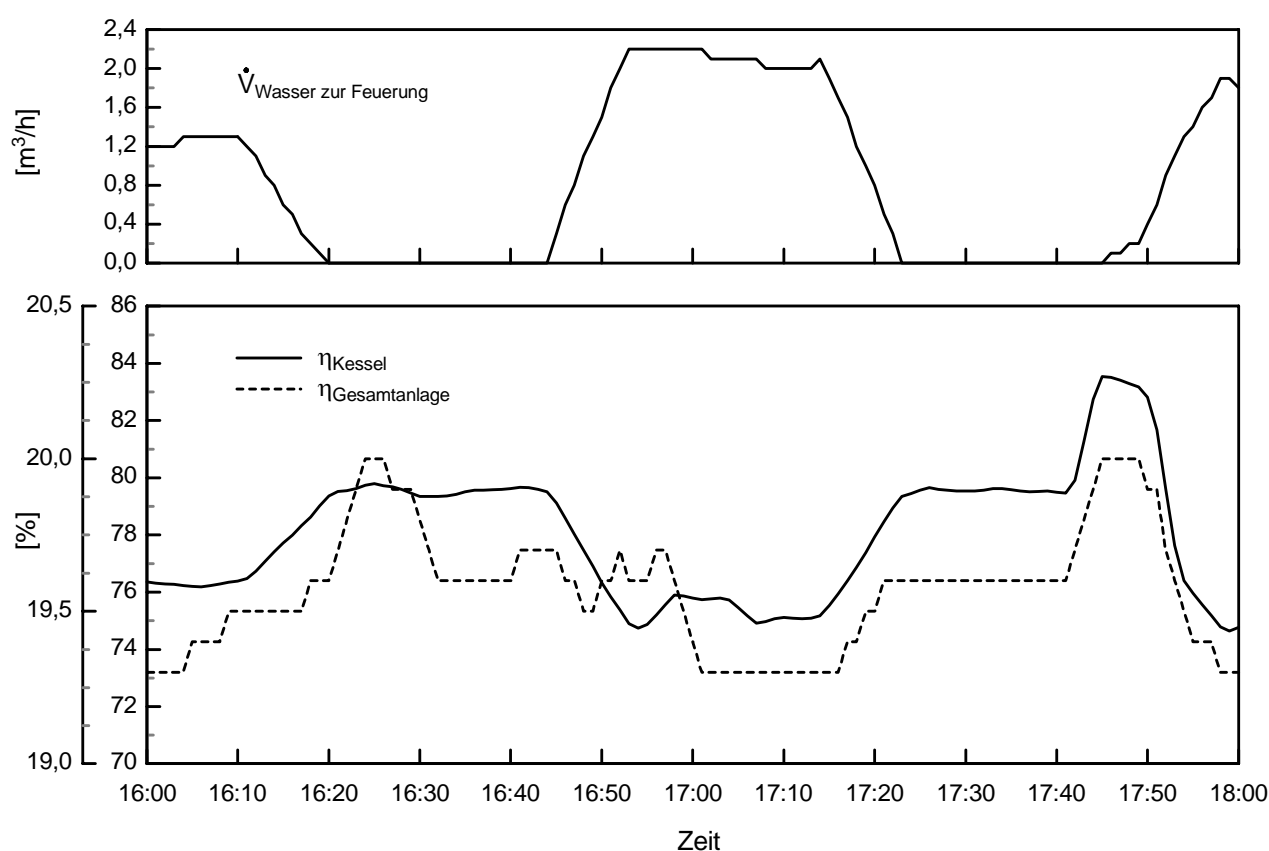


Abb. 12. Einfluss der Wassereindüsung in die Feuerung auf den ermittelten Kesselwirkungsgrad der Ofenlinie 1 sowie den Gesamtwirkungsgrad der Anlage.

## 5 Quellen

- [1] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren - Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. B.G. Teubner - Reihe Umwelt, 1. Auflage 2001, ISBN: 3-519-00402-X.
- [2] Beckmann, M.; Horeni, M.: Projekt EU24 "Wirkungsgrad von Abfallverbrennungsanlagen; technische, ökologische und ökonomische Optimierung" – Entwicklung von Berechnungsgrundlagen und deren numerische Umsetzung mit Erprobung an drei ausgewählten bayerischen Müllverbrennungsanlagen. Abschlussbericht 2005, erstellt für das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): VDI 3986 – Ermittlung des Wirkungsgrades von konventionellen Kraftwerken. Beuth Verlag Berlin, Oktober 2000.
- [4] Beckmann, M.; Horeni, M.; Metschke, J.; Krüger, J.; Papa, G.; Englmaier, L.; Busch, M.: Optimierung von Müllheizkraftwerken durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2005, ISBN: 3-935317-19-0. S. 219-240.
- [5] Beckmann, M.; Horeni, H.: Möglichkeiten zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. erschienen in: VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): 22. Deutscher Flammentag – Verbrennung und Feuerungen. Tagung Braunschweig, 21. und 22. September 2005. VDI-Berichte Nr. 1888, VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2005, ISBN: 3-18-091888-8, S. 643-652.
- [6] Spiegel, W.; Metschke, J.; Müller, W.; Magel, G.; Gruber, K.: Systematisierung und Bewertung von Maßnahmen zur Korrosionsminderung in der betrieblichen Praxis von MVA mittels partikelförmiger Rauchgasbestandteile. Abschlussbericht 2005, erstellt für das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.
- [7] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. erschienen in: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH. SIDAF-Tagung Freiberg, 27.-28.10.2005. ISBN: 3-934409-27-X, S. 273-288.
- [8] Treder, M.: Bedeutung von Abfallzusammensetzung und Heizwert für den MVA-Betrieb. VKS-News, 105. Ausgabe 04/2006, S. 9-12.