

Ermittlung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung – Zur Problematik von Äquivalenzwerten und der Berechnung des Heizwertes –

Michael Beckmann und Reinhard Scholz

1.	Grundsätzliches zur Bilanzierung.....	145
2.	Äquivalenzwerte zur Ermittlung der Primärenergie	147
3.	Berechnung des Heizwertes	151
3.1.	Heizwertberechnung aus der Brennstoffzusammensetzung	151
3.2.	Ermittlung von Heizwerten aus Anlagendaten	152
3.2.1.	Bilanzierung längerer Betriebsabschnitte	152
3.2.2.	Online-Bilanzierung	154
4.	Vorschlag der Abfallrahmenrichtlinie im Entwurf	156
4.1.	Äquivalenzwerte	156
4.2.	Heizwert.....	158
5.	Zusammenfassung	161
6.	Symbolverzeichnis	161
7.	Literatur	162

1. Grundsätzliches zur Bilanzierung

Eine wichtige Grundlage für die Bewertung und weitere Optimierung von verfahrenstechnischen Anlagen allgemein – so auch von Abfallverbrennungsanlagen im Besonderen – stellt die Bilanzierung von Stoff-, Massen- und Energieströmen dar. Die Methode der Bilanzierung wurde bereits ausführlich z.B. in [18, 1, 17] beschrieben. Daher sei hier nur zusammenfassend auf die wesentlichen Schritte eingegangen.

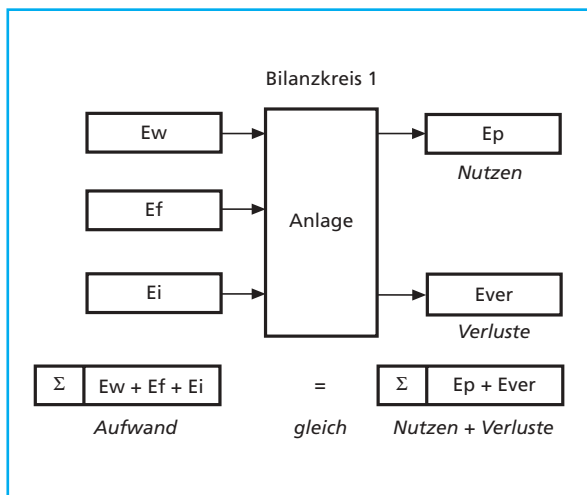


Bild 1: Prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz mit den ein- und austretenden Strömen zur Erläuterung der Vorgehensweise bei der Ermittlung der Energieeffizienz, d.h. des zugehörigen Wirkungsgrades der Anlage η_A , Formelzeichen nach [12]

Zunächst erfolgt die Festlegung der Systemgrenzen¹. Damit wird deutlich, was bewertet werden soll: ein Anlagenteil, eine Anlagengruppe, eine gesamte Anlage, eine Verfahrenskette usw. An den Systemgrenzen werden alle ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströme angetragen. Das Bild 1 zeigt die prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz einer gesamten Anlage mit den wesentlichen ein- und austretenden Energieströmen. Wichtig erscheint der Hinweis, dass für die Erstellung einer Energiebilanz im ersten Schritt i.d.R. eine Massenbilanz und ggf. auch eine Stoffbilanz (Plausibilität und Kompatibilität einer Bilanz, s.u.) erforderlich sind.

In Anlehnung an den Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [12] werden hier (Bild 1) die gleichen Formelzeichen verwendet (vgl. auch [6]). In die Anlagen treten ein:

- der Energiestrom² E_w im Abfall ($E_w = \dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF}$, mit \dot{m}_{AF} Abfallmassenstrom und $h_{u,AF}$ unterer Heizwert des Abfalls),
- der Energiestrom E_f in den Brennstoffen *die zur Erzeugung von Dampf beitragen*,
- sonstige eintretende (*importierte*) Energieströme E_i , z.B. in Hilfsstoffen, als Kondensatrückläufe, in Form von elektrischer Energie usw.

Aus der Anlage treten aus

- der nutzbare (*produzierte*) Energiestrom E_p ,
- der nicht nutzbare Energiestrom, d.h. die Anlagenverluste E_{ver} , z.B. Abgasverluste, Verluste in den festen Rückständen, Abstrahlungsverluste usw.

Die zugehörigen Werte für die einzelnen Ströme liegen entweder aus Messungen vor oder müssen durch eine entsprechende Bilanzierung auf der Grundlage der Erhaltungssätze³ für Masse und Energie usw. ermittelt werden. Bei Abfallverbrennungsanlagen ist der Abfall aufgrund der Schwankungen in der Brennstoff- (Abfall-)zusammensetzung in der Regel nur abschätzend bekannt. Er stellt

¹ Systemgrenze, Bilanzgrenze, Bilanzkreis haben begrifflich identische Bedeutung.

² Im Folgenden wird verkürzt auch von *Energien* anstelle von *Energieströmen* gesprochen.

³ Hierzu zählen u.a. die *Verbrennungsrechnung*, Berechnungsmethoden für Wärmeübertrager, Turbinen usw.

jedoch den maßgeblichen zugeführten Massen- und Energiestrom dar, daher ist auf die richtige Ermittlung des Abfallmassen- und Abfallenergiestromes entsprechend große Aufmerksamkeit zu legen. Bei Bilanzierungen längerer Zeitabschnitte lässt sich der Massenstrom durch die Messungen am Eingang der Anlage und der Kranwaage relativ gut bestimmen. Auf die Ermittlung des Heizwertes wird weiter unten noch getrennt eingegangen.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Bilanzierung ist die Festlegung eines *Nullpunktes* bzw. eines *Bezugszustandes*.

Besondere Aufmerksamkeit ist der *Plausibilität* einer Bilanz zu widmen [3]. Gegebenfalls sind bei fehlenden oder unsicher erscheinenden Daten *Kompatibilitäts-Betrachtungen* – z.B. Rückwärtsrechnungen mit Stoff- und Energiebilanzen an einzelnen Apparaten – durchzuführen.

Erst nach erfolgten Kompatibilitäts- und Plausibilitätsbetrachtungen werden mit den nun vorliegenden Massen-, Stoff- und Energieströmen Bewertungen durchgeführt. Wird nun ganz allgemein die Energieeffizienz mit einem Wirkungsgrad, der das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand darstellt, bestimmt, so ergibt sich für das Beispiel in Bild 1:

$$\eta_A = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{E_p}{E_w + E_f + E_i} \quad (1).$$

Die einzelnen Energien E_p , E_w , E_f und E_i sind unterschiedliche Energiearten, z.B. chemisch gebundene Energie, thermische und elektrische Energie und besitzen daher auch entsprechend unterschiedliche Wertigkeiten. Bei der Bewertung des Netto-Nutzens muss von dem erzeugten Nutzen der Aufwand abgezogen werden. Im Fall von elektrischer Energie ist das ohne weiteres möglich, d.h., die benötigte elektrische Zusatzenergie kann von der erzeugten elektrischen Energie einfach abgezogen werden. Erzeugt die Anlage jedoch nur thermische Energie oder soll der Aufwand an Zusatzbrennstoffen – chemisch gebundene Energie – abgezogen werden, so sind aufwendigere Betrachtungen zur Substitution unerlässlich. Die Wertigkeit einer bestimmten Energieart lässt sich z.B. mit dem *Energieaustauschverhältnis* ausdrücken, welches das Verhältnis der Substitutionsenergie (Beispiel oben: thermische Energie) zu der zu substituierenden Energie (Beispiel oben: elektrische Energie) darstellt. Zur Ermittlung solcher Energieaustauschverhältnisse sei z.B. auf [8, 10, 13, 14, 5] verwiesen.

2. Äquivalenzwerte zur Ermittlung der Primärenergie

Im Zusammenhang mit der Bewertung unterschiedlicher Energiearten, wie elektrische Energie und thermische Energie, chemische Energie eines Brennstoffes usw. ergibt sich aus der unterschiedlichen Wertigkeit der Energiearten die Notwendigkeit, Energieaustauschverhältnisse, d.h. Äquivalenzwerte, zu bestimmen. Bei Umrechnungen der unterschiedlichen Energiearten mit Äquivalenzwerten ist jedoch sorgfältig auf den thermodynamischen Hintergrund, insbesondere auf die Erhaltungssätze zu achten. Werden bei der Verwendung von Äquivalenzwerten

die Erhaltungssätze verletzt, wie dies bei dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [12] der Fall ist (siehe Kapitel 4), ist das Ergebnis für eine Bewertung untauglich.

Zur prinzipiellen Verdeutlichung der Verwendung von Äquivalenzwerten sei von einem einfachen idealen thermodynamischen Kreisprozess⁴ ausgegangen. Verluste werden vernachlässigt. Für die beispielhafte Betrachtung werden anstelle der spezifischen Energie, Arbeit usw. absolute Ströme, d.h., Wärmeströme und die elektrische Leistung verwendet.

In einem ersten Fall sei nur die Abgabe von elektrischer Energie als Nutzen – reines Kraftwerk – und im zweiten Fall danach, zusätzlich die Abgabe von Wärme – Kraft-Wärme-Kopplung, KWK – betrachtet.

1. Fall (nur Abgabe elektrischer Energie, reines Kraftwerk)

Der erste Fall, in dem der Nutzen ausschließlich in der Abgabe elektrischer Energie besteht, ist in Bild 2 vereinfacht in einem T,S-Diagramm dargestellt. Für dieses Beispiel ergibt sich der Wirkungsgrad (vgl. auch Verhältnis der Flächen in Bild 2):

$$\eta_K = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (2).$$

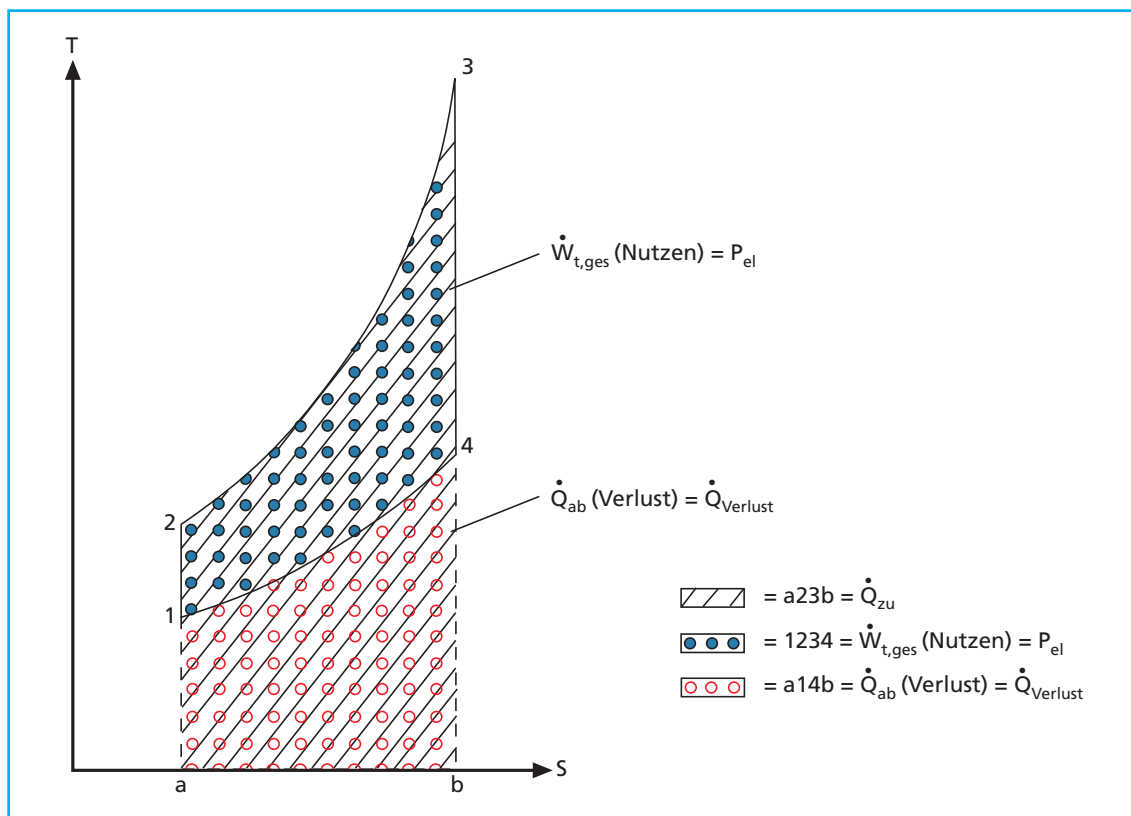


Bild 2: Idealer thermodynamischer Kreisprozess im T,S-Diagramm, nur elektrische Energie als Nutzen, Erklärung im Text

⁴ Zur Verdeutlichung des Prinzips wird hier ein einfacher idealer thermodynamischer Kreisprozess gewählt, die Aussagen sind auf jeden anderen thermodynamischen Kreisprozess, so auch auf spezielle Dampfkraftprozesse übertragbar.

Eine wichtige Kennzahl in der Praxis ist die Stromausbeute [20], die das Verhältnis von elektrischer Leistung zu dem eingesetzten Brennstoffenergiestrom ausdrückt:

$$\beta = \frac{P_{el}}{\dot{m}_B \cdot h_u} \quad (3).$$

Aus der Fragestellung, welche Primärenergie ($\dot{m}_B \cdot h_u$) einer bestimmten, abgegebenen elektrischen Leistung äquivalent ist,

$$P_{el} \cdot \ddot{a}_{el} = \dot{m}_B \cdot h_u \quad (4),$$

ergibt sich für den Äquivalenzwert:

$$\ddot{a}_{el} = \frac{\dot{m}_B \cdot h_u}{P_{el}} = \frac{1}{\beta} \quad (5).$$

Der im Kreisprozess benötigte thermische Energiestrom \dot{Q}_{zu} wird aus der Umwandlung von Primär- bzw. Brennstoffenergie ($\dot{m}_B \cdot h_u$) bereit gestellt. Die Güte der Umwandlung kann wieder durch einen entsprechenden Wirkungsgrad (Feuerungs-Kessel-Wirkungsgrad η_{F+K})

$$\eta_{F+K} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{m}_B \cdot h_u} \quad (6)$$

ausgedrückt werden. Zwischen dem Brennstoffenergiestrom ($\dot{m}_B \cdot h_u$) und dem thermischen Energiestrom \dot{Q}_{zu} besteht damit analog zu dem voran stehenden Äquivalenzwert \ddot{a}_{el} das Verhältnis:

$$\ddot{a}_{th} = \frac{\dot{m}_B \cdot h_u}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{1}{\eta_{F+K}} \quad (7),$$

womit sich für den Wirkungsgrad des Kreisprozesses

$$\eta_K = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{\ddot{a}_{th}}{\ddot{a}_{el}}$$

und zwischen dem Wirkungsgrad des Kreisprozesses und der Stromausbeute

$$\beta = \frac{P_{el}}{\dot{m}_B \cdot h_u} = \frac{1}{\ddot{a}_{el}} = \frac{\eta_K}{\ddot{a}_{th}} \quad (8)$$

ergeben.

Damit gilt, wie auch aus Gleichung (5) ersichtlich ist:

$$\beta \cdot \ddot{a}_{el} = 1 = 100 \% \quad (9).$$

2. Fall (Abgabe elektrischer und thermischer Energie, KWK-Prozess)

Im Fall 2 wird zusätzlich zu der elektrischen Energie auch thermische Energie als Nutzen abgegeben (KWK-Prozess). Im Bild 3 ist zur Veranschaulichung durch die Flächen wieder beispielhaft ein idealer thermodynamischer Kreisprozess im

T,S-Diagramm dargestellt. Die Fläche $a14b = \dot{Q}_{ab}$ in Bild 2 (Fall 1) ist nun im Bild 3 kein Verlust mehr sondern Nutzen $\dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_{Nutz} = \dot{Q}_{th}$. Für den Fall der Kraft-Wärmekopplung tritt bei der Bewertung zusätzlich zu der Stromausbeute (Gleichung (3)) nun die Wärmeausbeute [20] hinzu:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{m}_B \cdot h_u} \quad (10).$$

Die Stromkennzahl [20] drückt das Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Energie aus:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}} = \frac{\beta}{\alpha} \quad (11).$$

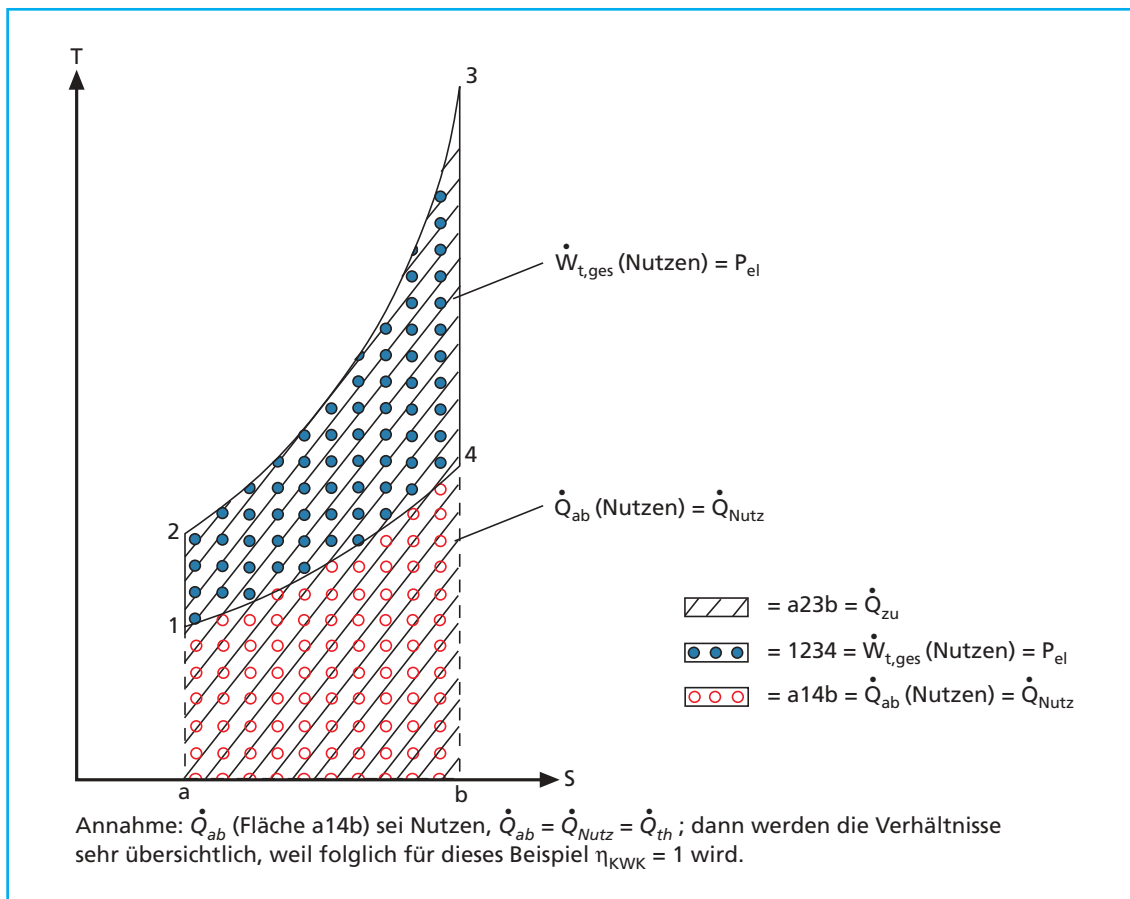


Bild 3: Idealer thermodynamischer Kreisprozess im T,S-Diagramm, elektrische und thermische Energie als Nutzen, Erklärung im Text

Der Brennstoffausnutzungsgrad [20] sagt aus, mit welcher Güte aus dem Brennstoffenergiestrom ein Nutzen erzielt wird:

$$\omega = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{m}_B \cdot h_u} = \beta + \alpha \quad (12).$$

Für den Kreisprozess gilt für die Wirkungsgrade

$$\eta_{KWK} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (13),$$

$$\eta_K = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (14),$$

$$\eta_{WK} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (15),$$

$$\text{und } \eta_{KWK} = \eta_K + \eta_{WK} \quad (16).$$

Für diesen Kreisprozess existiert ebenso wie voran stehend ein Wirkungsgrad (Feuerungs-Kessel-Wirkungsgrad η_{F+K}) bei der Umwandlung der Brennstoffenergie ($\dot{m}_B \cdot h_u$) in thermische Energie \dot{Q}_{zu} (Gleichung (6)), und damit auch genauso ein Äquivalenzwert \ddot{a}_{th} (Gleichung (7)).

Damit lässt sich für den Wirkungsgrad des Kreisprozesses auch schreiben:

$$\eta_{KWK} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{el} \cdot \ddot{a}_{th}}{\dot{m}_B \cdot h_u} + \frac{\dot{Q}_{Nutz} \cdot \ddot{a}_{th}}{\dot{m}_B \cdot h_u} = (\beta + \alpha) \cdot \ddot{a}_{th} = \omega \cdot \ddot{a}_{th} \quad (17).$$

Damit ist die Verbindung zwischen dem Wirkungsgrad des Kreisprozesses und dem Brennstoffausnutzungsgrad gegeben:

$$\eta_{KWK} = \omega \cdot \ddot{a}_{th} \quad (18).$$

Zu Anwendungsbeispielen der vorgenannten Zusammenhänge sei auf Kapitel 4 und [6] verwiesen. Die Auswirkungen aus juristischer Sicht werden in [2] diskutiert.

3. Berechnung des Heizwertes

3.1. Heizwertberechnung aus der Brennstoffzusammensetzung

Bei der Bilanzierung von Verbrennungsanlagen stellt der Heizwert der eingesetzten Brennstoffe eine wesentliche Voraussetzung dar. Im Schrifttum sind verschiedene *Heizwertformeln* bekannt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Brennstoffzusammensetzung und dem Heizwert entweder

- über die Heizwerte der einzelnen Brennstoffbestandteile oder aber
- durch Koeffizienten, mit denen der betreffende Brennstoffanteil am Gesamtheizwert beteiligt ist,

gebildet. Ein exakter Zusammenhang zwischen der Brennstoffzusammensetzung und dem Heizwert lässt sich jedoch nur für Brenngase herstellen. Bei der als *Verbandsformel* oder als *Dulong'sche Formel* [7] bekannten *Heizwertformel* für feste Brennstoffe wird der Gesamtheizwert aus den jeweiligen Brennstoffanteilen (Massenanteile) und zugehörigen Einzelheizwerten ermittelt, dabei bleibt

Lässt man in einem ersten Schritt (Bild 4) zur Vereinfachung Quellen und Senken unberücksichtigt (stationärer Zustand), gilt: Summe Eintritt (Masse, Energie) ist gleich Summe Austritt (Masse, Energie). **Gesamtenergiebilanz für den stationären Fall**

$$\dot{H}_{\text{Eintritt}} = \dot{H}_{\text{Austritt}} \quad (21).$$

Im hier dargestellten Fall (Bild 4) gilt für die Summe der Energieströme am Eintritt: **Gesamtenergiebilanz, Eintritt**

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\text{Eintritt}} = & \\ & \dot{m}_{SW} \cdot h_{SW} + \\ & \dot{m}_{AF} \cdot [h_{u,AF} + c_{p,AF} \cdot (\vartheta_{AF} - \vartheta_0)] + \dot{m}_{L,AF} \cdot c_{p,L,AF} \cdot (\vartheta_{L,AF} - \vartheta_0) + \\ & \dot{m}_{ZBS} \cdot [h_{u,ZBS} + c_{p,ZBS} \cdot (\vartheta_{ZBS} - \vartheta_0)] + \dot{m}_{L,ZBS} \cdot c_{p,L,ZBS} \cdot (\vartheta_{L,ZBS} - \vartheta_0) \end{aligned} \quad (22)$$

und für den Austritt: **Gesamtenergiebilanz, Austritt**

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\text{Austritt}} = & \\ & \dot{m}_D \cdot h_D + \dot{m}_{SW,A} \cdot h_{SW,A} + \\ & \dot{m}_{AG,K} \cdot [h_{u,AG,K} + c_{p,AG,K} \cdot (\vartheta_{AG,K} - \vartheta_0)] + \\ & \dot{m}_{A'} \cdot [h_{u,A'} + c_{p,A'} \cdot (\vartheta_{A'} - \vartheta_0)] + \\ & \dot{Q}_{V,F+K} \end{aligned} \quad (23).$$

Aus den Gleichungen (21) bis (23) erhält man für den Heizwert $h_{u,AF}$

$$\begin{aligned} h_{u,AF} = & \frac{\dot{m}_D \cdot h_D + \dot{m}_{SW,A} \cdot h_{SW,A} - \dot{m}_{SW} \cdot h_{SW}}{\dot{m}_{AF}} + \frac{\dot{m}_{AG,K}}{\dot{m}_{AF}} \cdot [h_{u,AG,K} + c_{p,AG,K} \cdot (\vartheta_{AG,K} - \vartheta_0)] \\ & + \frac{\dot{m}_{A'}}{\dot{m}_{AF}} \cdot [h_{u,A'} + c_{p,A'} \cdot (\vartheta_{A'} - \vartheta_0)] - \frac{\dot{m}_{L,AF}}{\dot{m}_{AF}} \cdot c_{p,L,AF} \cdot (\vartheta_{L,AF} - \vartheta_0) - c_{p,AF} \cdot (\vartheta_{AF} - \vartheta_0) \\ & - \frac{\dot{m}_{ZBS}}{\dot{m}_{AF}} \cdot [h_{u,ZBS} + c_{p,ZBS} \cdot (\vartheta_{ZBS} - \vartheta_0)] - \frac{\dot{m}_{L,ZBS}}{\dot{m}_{AF}} \cdot c_{p,L,ZBS} \cdot (\vartheta_{L,ZBS} - \vartheta_0) + \frac{\dot{Q}_{V,F+K}}{\dot{m}_{AF}} \end{aligned} \quad (24).$$

Unbekannt in dieser Gleichung sind neben dem Heizwert $h_{u,AF}$ der Verlustwärmestrom (Feuerung und Kessel) $\dot{Q}_{V,F+K}$. Der Verlustwärmestrom lässt sich jedoch auf eine einfache Weise z.B. im Anfahrbetrieb einer Anlage ermitteln. Dabei wird kein Abfall ($\dot{m}_{AF} \cdot h_{u,AF} = 0$), sondern ausschließlich Zusatzbrennstoff ($\dot{m}_{ZBS} \cdot h_{u,ZBS}$) mit bekanntem Massenstrom, bekannter Zusammensetzung und bekanntem Heizwert verbrannt. Durch eine Rückwärtsrechnung (siehe Kompatibilitätsbetrachtung) ergibt sich aus den Messwerten und aus Gleichung (22) und (23) der gesuchte Verlustwärmestrom.

Wie erwähnt kann der Abfallmassenstrom \dot{m}_{AF} für längere Bilanzzeiträume relativ zuverlässig aus den Messungen am Eingang und der Kranwaage ermittelt werden. Für eine ganz bestimmte Anlage sind bei bestimmungsgemäßem Betrieb eine Reihe von Randbedingungen, wie Dampfparameter, Abschlämmwasser, Luftzahl und Verlustwärmestrom näherungsweise konstant. Für die

Ermittlung eines durchschnittlichen Abfallheizwertes über einen längeren Bilanzierungszeitraum (z.B. Tagesmittelwert) für eine bestimmte Anlage lässt sich die Gleichung (24) weiter zusammenfassen und man erhält eine einfache Beziehung, in die als variable Parameter der Abfallmassenstrom, der Dampfmassenstrom, die Dampfenenthalpie, die Abgastemperatur am Kesselaustritt und die Luftvorwärmtemperatur eingehen⁵:

$$h_{u,AF} = k_1 \cdot \frac{\dot{m}_{D,AF}}{\dot{m}_{AF}} \cdot h_D + k_2 \cdot \vartheta_{AG,K} - k_3 \cdot \vartheta_{L,AF} + k_4 \quad (25).$$

Bei kürzeren Zeiträumen ergeben sich jedoch i.d.R. Unsicherheiten aufgrund der Mittelwertbildung über mehrere Stunden bei der Bestimmung des Abfallmassenstromes durch die Kranwaage. Mit den in Abfallverbrennungsanlagen messtechnisch erfassten Daten kann jedoch auch für einen aktuellen Momentanzustand über eine Bilanzierung, die Rückwärtsrechnungen einschließt, der aktuell auf dem Rost verbrennende Abfallmassenstrom und der zugehörige Heizwert ermittelt werden. Aufgrund des Umfangs der benötigten Daten ist hierbei eine Datenübertragung vom Datenerfassungssystem der Anlage zu dem Berechnungsprogramm zweckmäßig. Auf diese Weise gelangt man zur *Online-Bilanzierung* [3], [4]. Auf die Ermittlung des Abfallmassenstromes und des Heizwertes wird in [9] anhand eines Praxisbeispiels näher eingegangen. In dem hier gesteckten Rahmen wird ähnlich wie in den voran stehenden Betrachtungen zur Heizwertformel und der Heizwertermittlung aus Anlagendaten nur auf die prinzipielle Vorgehensweise der Ermittlung des Abfallmassenstromes und des Abfallheizwertes bei der Online-Bilanzierung eingegangen.

3.2.2. Online-Bilanzierung

Die Ermittlung des Heizwertes aus Anlagendaten kann mit der ausführlichen Energiebilanz (je nach Anlagenkonfiguration, Beispiel Gleichung (24)) und einer ausführlichen Massenbilanz (s.u.) aus den in einer Abfallverbrennungsanlage zur Verfügung stehenden Messwerten auch für kürzere Bilanzzeiträume (kleiner eine Stunde, abhängig vom stationären Zustand bis hin zu Momentanwerten) erfolgen. Aufgrund der großen Anzahl der dafür benötigten Messwerte und der umfangreichen Berechnungsschritte ist die direkte Anbindung des Berechnungsprogramms an ein Betriebsdatenerfassungssystem zweckmäßig. Ein solches Bilanzierungsprogramm (*Online-Bilanzierungsprogramm*) ist in Zusammenarbeit mit mehreren Betreibern von Abfallverbrennungsanlagen und dem Anlagenbau entwickelt und inzwischen in die Praxis überführt worden (z.B. [3, 4, 9]). Ähnliche Vorgehensweisen sind z.B. in [19, 11, 22] beschrieben.

In dem hier gesteckten Rahmen sei kurz zusammenfassend speziell auf die Ermittlung des Heizwertes eingegangen. Je nach Anlagenkonfiguration wird die Energiebilanz für den Bilanzkreis Feuerung und Kessel (Beispiel Gleichung (24)) gelöst. Der für diese Berechnung erforderliche Massenstrom des Abfalls wird über eine Stoff- und Massenbilanz ermittelt.

⁵ Vereinfacht ohne Berücksichtigung von Zusatzbrennstoff

Betrachtet man die zur Verfügung stehenden Messwerte, so wird deutlich, dass sich allein auf der Basis der Messwerte am Ein- und Austritt des Verfahrensbausteins zunächst nicht unmittelbar eine geschlossene Bilanzierung ergibt (Bild 5). Es sind einzelne Module so miteinander zu verknüpfen, dass mit Hilfe von Stoff- und Massenbilanzen und unter Verwendung von Parametern eine Berechnung der gesuchten Größen möglich wird.

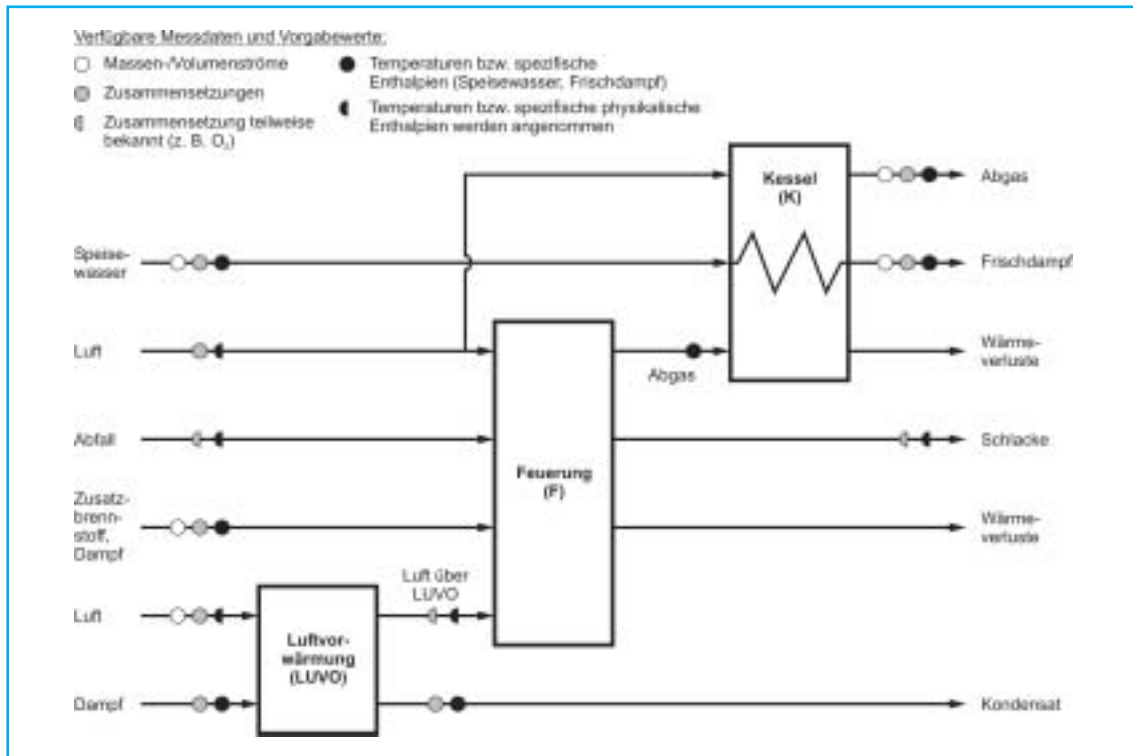


Bild 5: Beispiel Anlage Schwandorf – verfügbare Messdaten und Vorgabewerte (hinreichend genaue Annahmen) für die Berechnung der Verfahrensbausteine Luftvorwärmung, Feuerung und Kessel, Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme

Bild 6 macht deutlich, in welchen Schritten zunächst mit der bekannten Abgaszusammensetzung nach dem Kessel (die zuvor im Rahmen der Berechnung der Abgasreinigung ermittelt wurde) auf den Massenstrom des momentan auf dem Rost befindlichen Abfalls geschlossen wird.

Im Schritt 1 (in Bild 6) wird aus dem Gesamtmassenstrom Abgas, der aus dem Kessel austritt, und aus den Massenströmen, die in Feuerung und Kessel eintreten und in das Abgas übergehen, der Gesamtmassenstrom Luft zu Feuerung und Kessel ermittelt. Dabei wird neben der Massenbilanz eine Stoffbilanz für den im Abgas enthaltenen Stickstoff (da dieser als inert betrachtet werden kann) durchgeführt, wobei näherungsweise davon ausgegangen wird, dass der Massenanteil Stickstoff im Abfall $\leq 1 \text{ Ma.-%}$ beträgt.

Im Schritt 2 wird nun erneut über die Massenbilanz um Feuerung und Kessel der Massenstrom des reagierenden Anteils des auf dem Rost befindlichen Abfalls berechnet. Nach Vorgabe eines Ascheanteils des Abfalls und eines Flugstaubgehaltes werden im Schritt 3 der Massenstrom der Schlacke und der Massenstrom des Flugstaubes ermittelt.

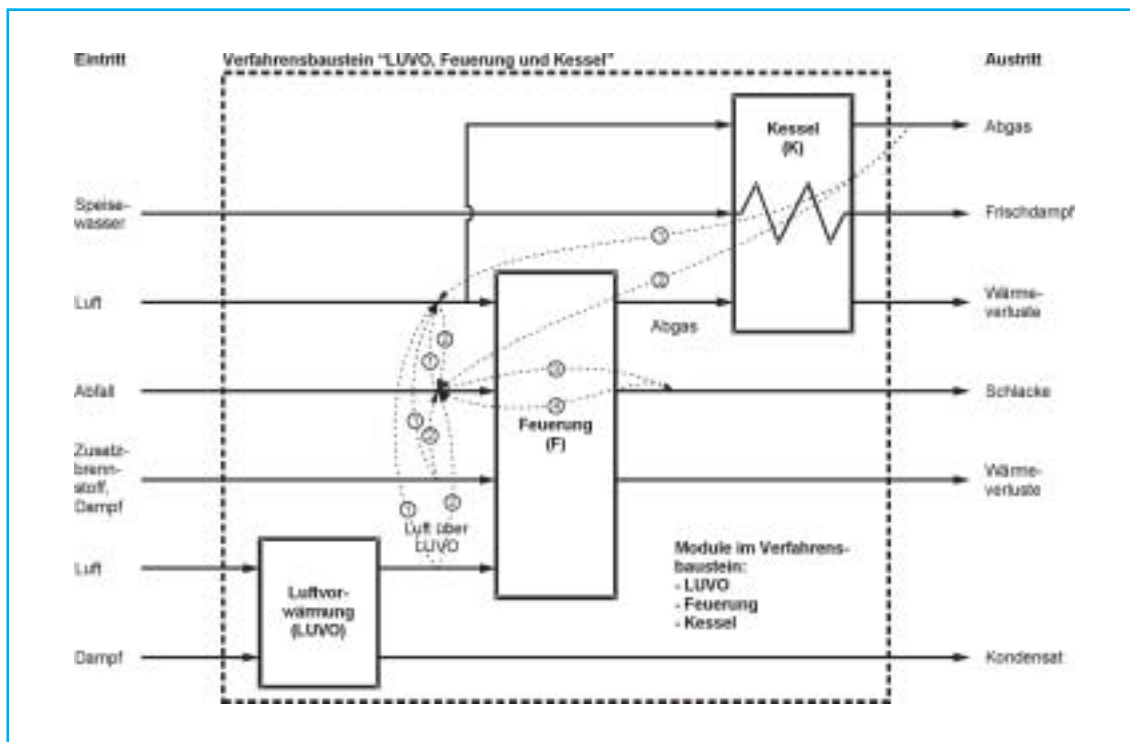


Bild 6: Bilanzierung der Verfahrensbausteine *LUVO*, *Feuerung* und *Kessel* – im Müllheizkraftwerk Schwandorf verwendeter Berechnungsablauf Schritt 1 bis 4 (Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme)

Anschließend wird im Schritt 4 der Gesamtmassenstrom des Abfalls berechnet.

Je nach Anlagenkonfiguration und Messwerterfassung müssen, bevor schließlich die Energiebilanz zur Ermittlung des Heizwertes gelöst werden kann, neben dem Abfallmassenstrom weitere Größen, z.B. die Temperatur der vorgewärmten Luft, über ähnliche Bilanzierungsalgorithmen ermittelt werden.

4. Vorschlag der Abfallrahmenrichtlinie im Entwurf

4.1. Äquivalenzwerte

Wendet man die in Kapitel 2 dargestellten Beziehungen auf das Beispiel in Bild 1 bzw. auf Gleichung (1) an, werden die Verhältnisse besonders übersichtlich, wenn man E_f und E_i vernachlässigt. Es wird dann:

$$\eta_A = \frac{E_p}{E_w} \quad (26).$$

Der Nutzen E_p ist elektrische Energie P_{el} und thermische Energie

$$\dot{Q}_{th} = \dot{Q}_{Nutz} \quad (27).$$

E_w ist die im Abfall gebundene Energie:

$$E_w = \dot{m}_B \cdot h_u \quad (28).$$

Mithin wird (siehe auch Gleichung (12)):

$$\eta_A = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{m}_B \cdot h_u} = \beta + \alpha = \omega \quad (29).$$

In dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [12] wird vorgeschlagen:

$$\text{Energieeffizienz nach [12]} = \frac{P_{el} \cdot \ddot{a}_{el} + \dot{Q}_{th} \cdot \ddot{a}_{th}}{\dot{m}_B \cdot h_u} = \beta \cdot \ddot{a}_{el} + \alpha \cdot \ddot{a}_{th} \quad (30).$$

Diese *Energieeffizienz nach [12]* sei im Unterschied zu dem Brennstoffausnutzungsgrad ω (Gleichung (12)) mit ω^* abgekürzt:

$$\omega^* = \beta \cdot \ddot{a}_{el} + \alpha \cdot \ddot{a}_{th} \quad (31).$$

Was an dieser Gleichung vom Prinzip her nicht richtig ist, sieht man in dem weiter vereinfachten Fall, in dem $\ddot{a}_{th} = 1$ gesetzt wird (keine Verluste bei der thermischen Energie). Dann erhält man:

$$\omega^* = \beta \cdot \ddot{a}_{el} + \alpha \quad (32).$$

Mit Gleichung (8) und (9) ergibt sich dann, dass $\omega^* > 1$ wird:

$$\omega^* = 1 + \alpha \quad (33).$$

Der Äquivalenzwert \ddot{a}_{el} bezieht sich auf die gesamte zugeführte Energie, was durch die 1 bzw. 100 % in Gleichung (33) zum Ausdruck kommt. Über diese 100 % hinaus wird derzeit in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [12] die Wärmenutzung zusätzlich in Ansatz gebracht. Man kann den Verlust \dot{Q}_{ab} bei der Bewertung der elektrischen Energie in ein und derselben Gleichung nicht nochmals als Nutzen, d.h. als \dot{Q}_{Nutz} bewerten. Das folgende **Beispiel** soll diesen Sachverhalt verdeutlichen.

Es sei:

$$\beta = 38,5 \% \quad d.h. \quad \ddot{a}_{el} = 2,6$$

$$\alpha = 20,0 \% \quad \ddot{a}_{th} = 1,0$$

Dann wird mit den Beziehungen in Kapitel 2:

$$\omega = \beta + \alpha = 58,5 \%$$

$$\beta = \frac{\eta_K}{\ddot{a}_{th}} = \frac{\eta_K}{1,0} = \eta_K$$

$$\alpha = \eta_{WK}$$

$$\eta_{KWK} = \eta_K + \eta_{WK} = \beta + \alpha = 58,55 = \omega$$

Mit dem derzeitigen Vorschlag in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [12] hingegen ergibt sich:

$$\omega^* = \beta \cdot \ddot{a}_{el} + \alpha \cdot \ddot{a}_{th} = 100 \% + 20 \% = 120 \%$$

Es sei weiter darauf hingewiesen, dass in dem derzeitigen Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [12] \ddot{a}_{el} als fester Durchschnittswert über alle Kraftwerke festgelegt und auch \ddot{a}_{th} als fester Durchschnittswert angegeben werden. Wenn nun eine Einzelanlage betrachtet wird, die nicht einer Durchschnittsanlage entspricht, wird zusätzlich zu der prinzipiell unsachgemäßen Verwendung der Äquivalenzwerte der Fehler gemacht, dass an dieser Anlage β (d.h. P_{el}) und α (d.h. \dot{Q}_{Nutz}) jeweils nicht mehr zu den Äquivalenzwerten passen, die für die Anlage gelten, wie das folgende **Beispiel** zeigt.

Wenn man eine reale Abfallverbrennungsanlage z.B. mit $\beta = 10\%$ und $\alpha = 20\%$ bewertet, dann ist bei $\ddot{a}_{el} = 2,6$ und $\ddot{a}_{th} = 1,1$:

$$\omega^* = \beta \cdot \ddot{a}_{el} + \alpha \cdot \ddot{a}_{th} = 10\% \cdot 2,6 + 20\% \cdot 1,1 = 26\% + 22\% = 48\%$$

Der prinzipielle Fehler kann hier, da der Wert ω^* kleiner Eins bzw. kleiner 100% ist, nicht unmittelbar erkannt werden; aus dem Voranstehenden wird jedoch deutlich, dass der Wert ω^* zu hoch ist. Der richtige Wert aus thermodynamischer Sicht (siehe [20]) ist:

$$\omega = \beta + \alpha = 10\% + 20\% = 30\%$$

In [6] sind im Hinblick auf den Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie weitere praktische Beispiele enthalten.

4.2. Heizwert

Zur Ermittlung des Heizwertes von Abfällen werden *Heizwert-Regressionsformeln* diskutiert. Als Beispiel sei hier eine der Formeln [16], [15] genannt:

$$h_{u,AF} = 1,133 \cdot \frac{\dot{m}_{D,AF}}{\dot{m}_{AF}} \cdot \Delta h_D + 0,008 \cdot \vartheta_{AG,K} - 0,801 \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (34).$$

In diesem Ansatz sind im Gegensatz zu den vorgenannten *Heizwertformeln* keine Brennstoff- sondern Anlagenparameter⁶ enthalten. *Heizwert-Regressionsformeln* sind daher nicht auf einen Brennstoff – im vorliegenden Fall den Abfall – sondern auf eine Anlage bezogen.

Die Gleichung (34) lässt sich in ihrer Form einfach aus einer Energiebilanz für eine Anlage herleiten. Hierzu sei auf Kapitel 3.2. verwiesen. Die Form der Gleichung (25) stimmt zunächst bis auf den Term $k_3 \cdot \vartheta_{L,AF}$, der die Luftvorwärmung berücksichtigt, mit der *Heizwert-Regressionsformel* Gleichung (34) überein. Anzumerken ist zu den Koeffizienten k_1 bis k_4 , dass diese wie in Kapitel 3.2. erwähnt, anlagenspezifische Parameter enthalten. So geht z.B. (vgl. Gleichung (25) in Kapitel 3.2.) in k_1 die Differenz aus Speisewasserzufuhr, Dampfmassenstrom und dem Abschlämmsmassenstrom ein. Der Koeffizient k_2 beinhaltet u.a. das Verhältnis aus Abgasmassenstrom und Abfallmassenstrom sowie die mittlere spezifische Wärmekapazität des Abgases. Der Abgasmassenstrom ist zum einen eine Funktion des Abfallheizwertes selbst und zum anderen von der Luftzahl, Abgasrückführung, Sauerstoffanreicherung usw. abhängig und somit von Fall

⁶ Hierzu gehört auch der eingesetzte Brennstoffmassenstrom.

zu Fall verschieden. Die spezifische Wärmekapazität ist eine Funktion der Zusammensetzung und der Temperatur des Abgases und kann in guter Annäherung hier als konstant angenommen werden. Der Koeffizient k_3 beinhaltet u.a. das Verhältnis von Luftmassenstrom und Abfallmassenstrom sowie die spezifische Wärmekapazität der zugeführten Luft. Für den Luftmassenstrom gilt gleiches wie im Zusammenhang mit dem Abgasmassenstrom bereits erwähnt, die spezifische Wärmekapazität sollte hier in Abhängigkeit von der Temperatur eingesetzt werden – jedoch sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass der gesamte Term für die Luftvorwärmung in der *Regressions-Heizwertformel* (Gleichung (34)) nicht berücksichtigt ist. Der Koeffizient k_4 fasst die Verluste zusammen. In der *Regressions-Heizwertformel* (Gleichung (34)) wird der aus dem Abfall erzeugte Dampfmassenstrom nun wiederum über die Gleichung:

$$\dot{m}_{D,AF} = \dot{m}_D - \dot{m}_{ZBS} \cdot \frac{h_{u,ZBS}}{\Delta h_D} \cdot \eta_K \quad (35).$$

ermittelt, in die bereits der Kesselwirkungsgrad η_K einfließt, was eigentlich eine iterative Berechnung des Heizwertes erforderlich macht (der Kesselwirkungsgrad ist ebenfalls unbekannt).

Ebenso wie sich bei der Anwendung der *Heizwertformel* für andere als die bei der Ableitung der Koeffizienten zugrunde gelegten Brennstoffe Abweichungen ergeben, treten auch bei der Anwendung der *Heizwert-Regressionsformel* mehr oder weniger große Unterschiede auf, wenn diese für Anlagen mit anderen Parametern als bei der Ableitung der Koeffizienten benutzt wird. Insbesondere macht sich das bei Veränderung der Luftzahl, Luftvorwärmung und Sauerstoffanreicherung bemerkbar. Durch eine Bilanzierung – Massen- und Energiebilanz – mit vorgegebenen Heizwerten lassen sich diese Abweichungen für verschiedene Parametervariationen quantifizieren. Im Folgenden sind die Ergebnisse aus sechs verschiedenen Parametervariationen dem Basisfall gegenübergestellt:

Parameter – Basisfall I

- Abfall mit mittlerem Heizwert ($h_{u,AF} = 10,1 \text{ MJ/kg}$)
- Luftzahl $\lambda_{AF} = 1,8$
- Temperatur Verbrennungsluft $\vartheta_{L,AF} = 20 \text{ °C}$
- Sauerstoffkonzentration Verbrennungsluft $\psi_{O_2,L,AF} = 0,21 \text{ m}^3_{O_2}/\text{m}^3_L$

Parametervariation – Fall II bis VII

- II : I jedoch $\vartheta_{L,AF} = 300 \text{ °C}$
- III : I jedoch Luftzahl $\lambda_{AF} = 2,5$
- IV : I jedoch $\vartheta_{L,AF} = 300 \text{ °C}$ und Luftzahl $\lambda_{AF} = 2,5$
- V : I jedoch $\psi_{O_2,L,AF} = 0,30$
- VI : I jedoch $\vartheta_{L,AF} = 300 \text{ °C}$, $\lambda_{AF} = 2,5$ und $\psi_{O_2,L,AF} = 0,18$
- VII : $\vartheta_{L,AF} = 300 \text{ °C}$, $\lambda_{AF} = 2,5$ und $\psi_{O_2,L,AF} = 0,18$ und heizwertreicher Abfall ($h_{u,AF} = 21,0 \text{ MJ/kg}$)

Für alle Fälle sind die folgenden Parameter identisch:

- kein Zusatzbrennstoff
- Temperatur Abfall $\vartheta_{AF} = 20 \text{ °C}$
- Temperatur Abgas nach Kessel $\vartheta_{AG,K} = 220 \text{ °C}$
- Glühverlust Schlacke $\xi_{c,A'} = 2 \text{ %}$
- Temperatur Schlacke $\vartheta_{A',K} = 400 \text{ °C}$
- Abstrahlungsverluste in Feuerung und Kessel 5 %
- Dampfparameter 72 bar/400 °C (bei Speisewasser 72 bar/140 °C)

Die Ergebnisse dieser Parametervariation sind in Bild 7 dargestellt.

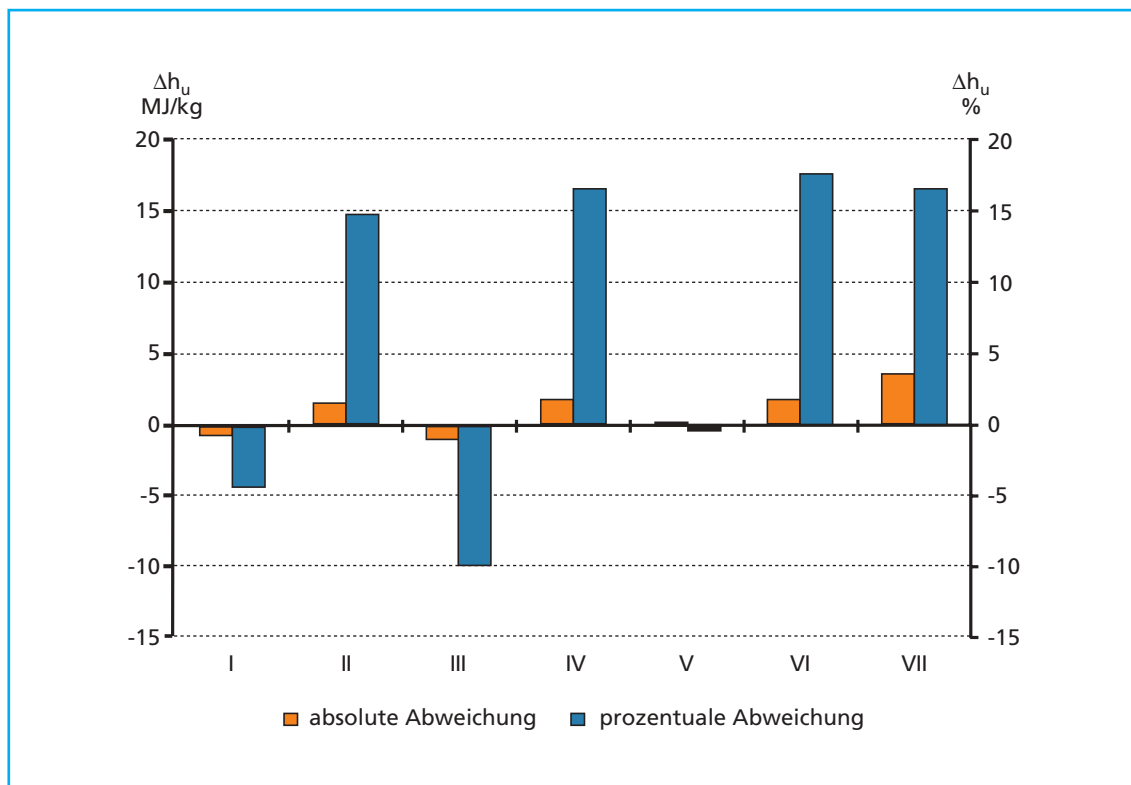


Bild 7: Ergebnisse der Parametervariation – Überprüfung der Regressions-Heizwertformel

Es sei an dieser Stelle nicht weiter auf die Abweichungen im Einzelnen eingegangen, die Ergebnisse sprechen für sich und zeigen, dass bei Anwendung der *Regressions-Heizwertformel* zunächst durch eine Bilanzierung zu prüfen ist, ob sich diese für die vorliegende Anlage eignet oder gegebenenfalls zu korrigieren ist – ebenso wie dies bei den *Heizwertformeln* (s.o.) gegebenenfalls bei sich ändernden Brennstoffen erforderlich ist. Darüber hinaus müssen für die jeweilige *Regressions-Heizwertformel* die Kriterien für deren Gültigkeit – Anlagenparameter – angegeben werden, ähnlich wie dies bei den *Heizwertformeln* für die jeweiligen Brennstoffe notwendig ist.

5. Zusammenfassung

Abfallbehandlungsmaßnahmen müssen aufgrund unterschiedlicher Rechtsfolgen als Maßnahmen zur Verwertung oder zur Beseitigung eingestuft werden. Die in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [12] enthaltenen Berechnungsgleichungen weisen derzeit prinzipielle Fehler auf, weshalb sie im Hinblick auf die Unterscheidung zwischen Verwertung und Beseitigung aus der Sicht von Ingenieurdisziplinen nicht tauglich sind.

In [6] werden die prinzipiellen Fehler bei der Bilanzierung in dem Entwurf der Abfallrahmenrichtlinie [12], d.h. Festlegung eindeutiger Bilanzkreise und der zugehörigen ein- und austretenden Massen- und Energieströme und Ableitung der Energieeffizienz im Sinne eines Wirkungsgrades erörtert. Die Auswirkungen aus juristischer Sicht werden in [2] diskutiert.

Vor diesem Hintergrund wird in dem vorliegenden Beitrag nur zusammenfassend auf die grundsätzliche Methode der Bilanzierung eingegangen, wie sie in der Verfahrenstechnik allgemein üblich und im Zusammenhang mit Energieumwandlungsanlagen z.B. in [20] und für Abfallverbrennungsanlagen in [21] dargestellt ist.

Als Erweiterung zu [6] werden hier nun die Verwendung von Äquivalenzwerten bei der Bewertung unterschiedlicher Energiearten und die Berechnung des Heizwertes von Abfällen erörtert.

Zunächst wird die thermodynamische Bedeutung und die Verwendung (z.B. in [20]) von Äquivalenzwerten an einfachen Beispielen erläutert. Darauf aufbauend lässt sich zeigen, dass derzeit in [12] eine nicht mit den Grundlagen der Thermodynamik in Einklang stehende Verwendung von Äquivalenzwerten vorgesehen ist.

Im Hinblick auf den Heizwert werden in dem vorliegenden Beitrag ebenfalls zunächst grundsätzliche Vorgehensweisen beschrieben. Vor diesem Hintergrund erfolgt dann beispielhaft die qualitative und auch quantitative Diskussion von *Heizwert-Regressionsformeln* (z.B. [16, 15]).

6. Symbolverzeichnis

Symbole

α	Wärmeausbeute	ψ	Volumenanteil
β	Stromausbeute	ω	Brennstoffausnutzungsgrad
Δ	Differenz	\ddot{a}	Äquivalenzwert
η	Wirkungsgrad	c	spezifische Wärmekapazität
ϑ	Temperatur	E	Energie
λ	Luftzahl	H	Enthalpie
σ	Stromkennzahl	h	spezifische Enthalpie

k	Konstante	Indices hochgestellt
m	Masse	• Strom
P	elektrische Leistung	ˆ Asche, gesamt (einschl. Restkohlenstoff)
Q	Wärme	* modifiziert
S	Entropie	
T	Temperatur	
W	Arbeit	
ξ	Massenanteil	

c, h, o, n, s, a, w

Massenanteile Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Asche, Wasser

Indices tiefgestellt

A	Abschlammung	KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
A	Anlage	L	Luft
A	Asche	$Nutz$	Nutzen
A	Austritt	O_2	Sauerstoff
AG	Abgas	p	Druck (isobar)
AF	Abfall	p	produziert
ab	abgeführt	SW	Speisewasser
B	Brennstoff	t	technisch
D	Dampf	th	thermisch
el	elektrisch	u	unterer (Heizwert)
f	fuel	ver	Verlust
$F+K$	Feuerung und Kessel	V	Verlust
ges	gesamt	w	Waste
i	importiert	WK	Wärme-Kopplung
i	Komponente	ZBS	Zusatzbrennstoff
K	Kessel	zu	zugeführt
K	Kreisprozess	0	Bezugszustand

7. Literatur

- [1] Autorenkollektiv: Werkzeuge zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren; Methoden und Ergebnisse. Beckmann, M.; Scholz, R.: Kapitel 5: Massen- und Energiebilanzen. – VDI-GVC/DECHEMA/VDI-GET – Fachausschuss *Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung*
- [2] Baars, B.; Nottrodt, A.: Naturwissenschaftlich-technische und juristische Rationalität – Ein Widerspruch? – Anmerkungen zum Urteil des VGH Baden-Württemberg zur Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): *Energie aus Abfall*, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007

- [3] Beckmann, M.; Horeni, H.: Möglichkeiten zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. In: VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): 22. Deutscher Flammentag – Verbrennung und Feuerungen. Tagung Braunschweig, 21. und 22. September 2005. VDI-Berichte Nr. 1888, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2005, S. 643-652
- [4] Beckmann, M.; Horeni, M.; Metschke, J.; Krüger, J.; Papa, G.; Englmaier, L.; Busch, M.: Optimierung von Müllheizkraftwerken durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 219-239
- [5] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1: ZKG International 52 (1999), Nr. 6, S. 287-303, Teil 2: ZKG International 52 (1999), Nr. 8, S. 411-419
- [6] Beckmann, M.; Scholz, R.; Seifert, H.; Nottrodt, A.: Bewertung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung – Stellungnahme des Ausschusses VDI 3460. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007
- [7] Boie, W.: Vom Brennstoff zum Rauchgas. Leipzig: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1957
- [8] Görgen, R.; Kahnwal, H.: Vergleichende Bewertung von Gasen. In: Gas wärme International, Bd. 17 (1968), Nr. 2, S. 50-53
- [9] Horeni, M.; Beckmann, M.; Fleischmann, H.; Barth, E.: Ermittlung von Betriebsparametern in Abfallverbrennungsanlagen als Voraussetzung für die weitere Optimierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007
- [10] Kahnwald, H.: Wärmetechnische Bewertung von gasförmigen und flüssigen Austauschbrennstoffen. Archiv für das Eisenhüttenwesen. 35. Jahrg. (1964), Nr. 10
- [11] Kessel van, L.: Stochastic disturbances and dynamics of thermal processes with application to municipal solid waste combustion. Dissertation, Eindhoven University Press, 2000
- [12] Kommission der europäischen Gemeinschaften (Hrsg.): Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle (von der Kommission vorgelegt). Brüssel, den 21.12.2005 KOM(2005) 667 endgültig – 2005/0281 (COD), Anhang II, S. 34
- [13] Lüth, F.: Die Wertigkeit von Gasen gegenüber anderen Brennstoffen und Energien in der Industrie. In: Stahl und Eisen 78 (1958), Nr. 15
- [14] Michalowski, M.; Wessely, R.: Bewertung der komplexen Austauschbarkeit von Brenngasen in Hüttenwerken. Arch. Eisenhüttenwesens 54, Nr. 6, 1983
- [15] Reimann, D.O.: Entwicklung und Einsatz binärer Verfahrenskennzahlen ($\eta_{x/y}$) zur quasi-kontinuierlichen Bestimmung der einer prozeßgesteuerten Feuerung zugeführten Abfallmengen und -qualitäten. Dissertation am Fachbereich 21 – Umwelttechnik der Technischen Universität Berlin, 1992
- [16] Reimann, D.O.: Ermittlung und Bedeutung von Kennzahlen zur Energie- und Anlagenutzung sowie zu Wirkungsgraden für die Abfallverbrennung. In: VDI-Wissensforum GmbH (Hrsg.): BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/Dioxin-/Rauchgasreinigungstechniken 2003 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. Seminar-Nr. 435915, am 18.-19.09.2003 in München, VDI-Wissensforum GmbH, 2003
- [17] Scholz, R.; Beckmann, M.; Harnaut, T.; Horeni, M.: Zur systematischen Bewertung der Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, S. 203-235

- [18] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Teubner-Reihe UMWELT, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B. G. Teubner GmbH, 2001, S. 1-460
- [19] Seeger, H.; Urban, A.I: Online-Heizwertbestimmung in einer Müllverbrennungsanlage. In: Bilitewski, B.; Urban, A.I.; Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung. 10. Fachtagung, 22.-23. Februar 2005, Berlin, Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten der Technischen Universität Dresden, Band 40, S. 277-294.
- [20] VDI 4661: Energiekenngrößen – Definitionen – Begriffe – Methodik. Beuth-Verlag GmbH Berlin, September 2003
- [21] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): Richtlinie VDI 3460 Blatt 2 Emissionsminderung – Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung. Entwurf Mai 2006
- [22] Zwahr, H.: Kontinuierliches Monitoring der Energieflüsse in einer MVA. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): BAT- und preisorientierte Dioxin-/Rauchgasreinigungstechniken 2002 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. VDI-Seminar 435914, 19./20. September 2002, München