

Ermittlung von Betriebsparametern in Abfallverbrennungsanlagen als Voraussetzung für die weitere Optimierung

Martin Horeni, Michael Beckmann, Hans Fleischmann und Erhard Barth

1.	Beschreibung des Anlagen-Ist-Zustandes	214
2.	Ermittlung ausgewählter Betriebsparameter in der Praxis	216
2.1.	Ermittlung des aktuellen Abfallmassenstromes	216
2.2.	Ermittlung des aktuellen Abfallheizwertes	217
2.3.	Ermittlung des aktuellen Kesselwirkungsgrades	221
3.	Anwendungsbeispiel – Nachweis des Einflusses einer Wassereindüsung in die Feuerung	224
4.	Zusammenfassung	227
5.	Literatur	229

An thermische Abfallbehandlungsanlagen werden heute in Bezug auf die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten, die Entsorgungssicherheit, die Wirtschaftlichkeit, den sicheren Betrieb usw. sehr hohe Anforderungen gestellt und auch sicher erfüllt. Hierzu ist in der Vergangenheit eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben z.B. im Hinblick auf Primärmaßnahmen zum Schadstoffabbau, zur Schlackequitätsverbesserung und zur Korrosionsminderung durchgeführt worden. Ein Potential zur weiteren Verbesserung der Prozessführung ist dennoch vorhanden, insbesondere im Hinblick auf die Abstimmung der verschiedenen Optimierungsmaßnahmen zur Schadstoffminderung, zur Energieeffizienzsteigerung, zur Verringerung der Korrosion usw. untereinander. Für diese Optimierung ist die Darstellung des betrieblichen Anlagen-Ist-Zustandes eine wichtige Voraussetzung.

Für die betriebstechnische Überwachung des Anlagen-Ist-Zustandes steht in Abfallverbrennungsanlagen eine Vielzahl von Messwerten *online* zur Verfügung – Emissionswerte, Dampfparameter, elektrische Leistungen usw. Wesentliche Betriebsparameter für die Optimierung wie z.B. der Massenstrom und Heizwert des aktuell auf dem Rost verbrennenden Abfalls, Wirkungsgrade des Kessels und der Gesamtanlage, spezifische Verbräuche von Betriebshilfsstoffen können allerdings nicht unmittelbar gemessen werden, sondern sind rechnerisch – ebenfalls *online* – durch Bilanzen zu bestimmen. Bei Abfallverbrennungsanlagen wird

die detaillierte und zeitnahe Bilanzierung dadurch erschwert, dass für eine geschlossene Bilanzierung teilweise Messwerte fehlen, dass in den einzelnen Anlagenabschnitten unterschiedliche Verweilzeiten auftreten und dass der Anlagenbetrieb ständigen Schwankungen unterworfen ist, bedingt durch die inhomogenen und zunehmend wechselhaften Eigenschaften der eingesetzten Abfälle.

Vor diesem Hintergrund wurde ein so genanntes Online-Bilanzierungsprogramm entwickelt, mit dem die detaillierte und zeitnahe Ermittlung von nicht unmittelbar messtechnisch erfassbaren, für die Optimierung allerdings wesentlichen Betriebsparametern möglich ist. Eine weitere Entwicklung, die derzeit in der Praxis getestet wird, ist ein Sensor für die Messung von Wärmestromdichten an Membranverdampferwänden, mit dem u.a. Aussagen zur Belagsbildung, Feuerlage, thermischen Belastung usw. im Kessel getroffen werden können.

Über die Grundlagen dieser beiden Entwicklungen – Online-Bilanzierung und Wärmestrommessung – wurde bereits getrennt berichtet [z.B. 1, 2, 3, 5]. In dem vorliegenden Beitrag wird für das Abfallheizkraftwerk der Abfallverwertungsanlage Augsburg (AVA Augsburg) anhand der für die Optimierung wichtigen Betriebsparameter Abfallheizwert, Abfallmassenstrom und Kesselwirkungsgrad zunächst grundlegend und im Anschluss anhand mit Hilfe eines praktischen Beispiels dargestellt, welche Verbesserungen sich bei der Beschreibung des betrieblichen Anlagen-Ist-Zustandes durch beide Untersuchungsmethoden für den Anlagenbetrieb ergeben.

1. Beschreibung des Anlagen-Ist-Zustandes

Die Kenntnis des Anlagen-Ist-Zustandes stellt für die Optimierung eine wichtige Grundlage dar. Der Anlagen-Ist-Zustand wird dabei von konstruktiven Parametern – Anlagentechnik – und von betrieblichen Parametern charakterisiert. Für die Verfügbarkeit der Betriebsparameter und damit für die Beschreibung des Anlagen-Ist-Zustandes ist es von Bedeutung, ob die Betriebsparameter unmittelbar als Betriebsmesswerte erfasst werden, oder ob hierfür zusätzliche Berechnungen und Messungen erforderlich sind.

Klassische Betriebsmesswerte, die für die Regelung der Anlage, für den Nachweis der Einhaltung von Grenzwerten, für sicherheitstechnische Belange usw. wichtige Bedeutung haben, sind z.B. der O_2 -Gehalt des Abgases, der Massenstrom des produzierten Frischdampfes und die abgegebene elektrische Leistung (Bild 1). Diese Messwerte können ohne weiteres erfasst und während des Anlagenbetriebes zeitnah dargestellt werden, lassen zum tatsächlichen Betriebszustand der Gesamtanlage – insbesondere zu den Prozessbedingungen im Dampferzeuger (Feststoffumsatz, Energiefreisetzung, Korrosion, Belagsbildung) – allerdings nur begrenzt Aussagen zu.

Weitere Betriebsparameter wie z.B. der Kesselwirkungsgrad, der Anlagenwirkungsgrad, der Massenstrom und der Heizwert des aktuell auf dem Rost verbrennenden Abfalls können nicht unmittelbar gemessen werden, lassen sich aber

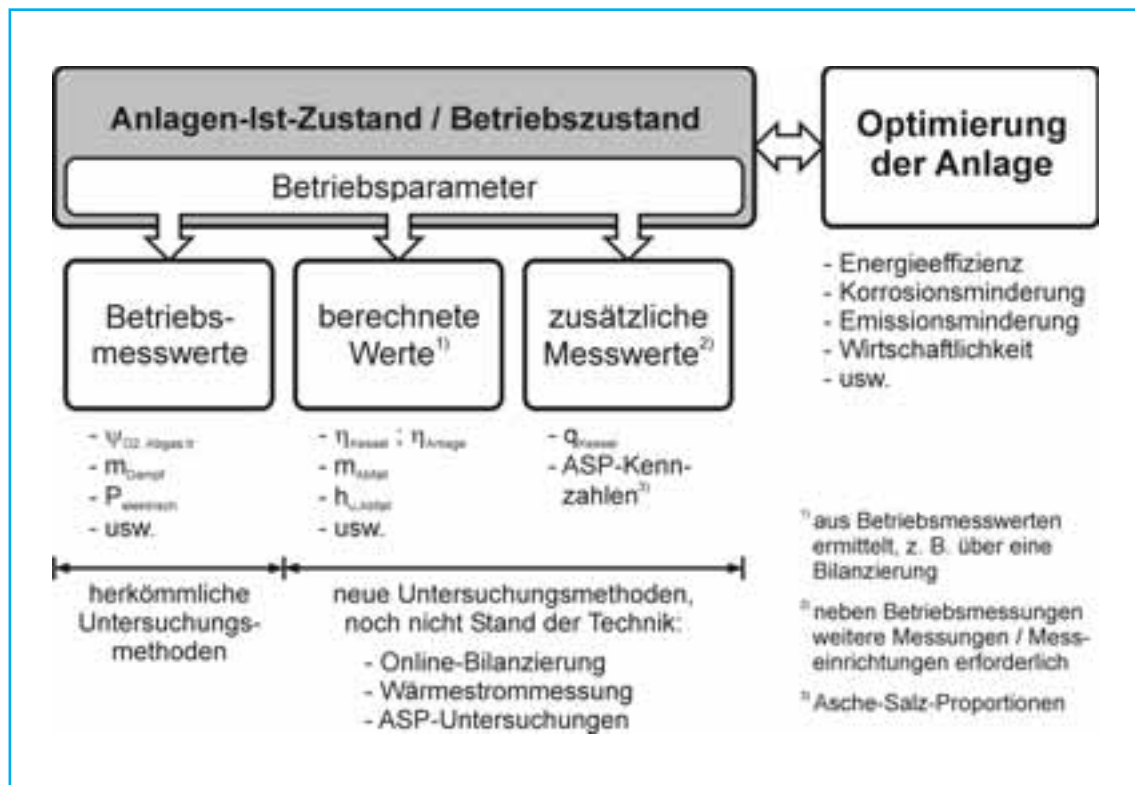


Bild 1: Beschreibung des Anlagen-Ist-Zustandes durch Betriebsparameter als Voraussetzung für die weitere Optimierung

aus den Betriebsmesswerten rechnerisch ermitteln. Hierfür wurde ein so genanntes Online-Bilanzierungsprogramm entwickelt. Bei der Online-Bilanzierung wird das Gesamtverfahren in Verfahrensabschnitte und -bausteine aufgeteilt, an den einzelnen Teilbilanzräumen alle ein- und austretenden Ströme sowie die jeweiligen Messwerte angetragen und auf Grundlage der an den verschiedenen Teilbilanzräumen verfügbaren Werte die unbekanntenen Werte bilanziert [1, 2].

Die Korrosion und Belagsbildung im Dampferzeuger von Abfallverbrennungsanlagen kann nur mit Hilfe zusätzlicher Messungen – neben den Betriebsmessungen, siehe Bild 1 – beurteilt werden. Während des Betriebes können z.B. Untersuchungen zu den Asche-Salz-Proportionen (ASP) in den Flugstäuben im Rohgas und Wärmestrommessungen an den Membranverdampferwänden des Kessels durchgeführt werden. Erste Aussagen zum Korrosionsverhalten sind darüber hinaus auch mit Hilfe von Untersuchungen der Beläge im Kessel möglich [4, 5].

Für die Gesamtoptimierung von Abfallverbrennungsanlagen ist die Berücksichtigung herkömmlicher Untersuchungsmethoden auf Grundlage der Messwerte allein nicht ausreichend. Vielmehr müssen neue Untersuchungsmethoden – hier: ASP-Untersuchung, Wärmestrommessung, Online-Bilanzierung – für die umfassende Bewertung der jeweils vorliegenden Betriebszustände mit hinzugezogen werden.

2. Ermittlung ausgewählter Betriebsparameter in der Praxis

2.1. Ermittlung des aktuellen Abfallmassenstromes

In Abfallverbrennungsanlagen wird der Brennstoff mittels Greifern über einen Abfalltrichter aufgegeben. Der Abfalltrichter muss den luftdichten Abschluss des Kessels zum Abfallbunker gewährleisten und weist deshalb einen hohen Füllstand auf. Da die Verweilzeit des Abfalls in dem Abfalltrichter entsprechend lang¹ und – in Abhängigkeit von der Zuteilung des Abfalls auf den Rost – nicht konstant ist, kann aus der aufgegebenen Abfallmenge nicht unmittelbar der zu einem bestimmten Zeitpunkt verbrennende Abfall ermittelt werden. In der Praxis wird deshalb ein mittlerer Abfallmassenstrom bestimmt. Hierbei werden die Einzelwerte der Kranwaagenmessungen – kg Abfall pro Brennstoffaufgabe – mit der Anzahl der Abfallaufgaben – Brennstoffaufgaben pro Stunde – multipliziert. Da pro Stunde nur eine geringe Anzahl von Abfallaufgaben erforderlich ist – etwa 3 bis 5 in Abhängigkeit von Anlagendurchsatz und Greiferinhalt – muss für die Mittelwertbildung ein entsprechend großer Zeitraum gewählt werden – z.B. in [6] zwei Stunden, in der AVA Augsburg vier Stunden.

Einen aktuellen Wert für den momentanen Abfallmassenstrom erhält man, wenn der Abfallmassenstrom aus den Betriebsmesswerten über eine Massen- und Stoffbilanz ermittelt wird. Voraussetzung für diese in [2] ausführlich dargestellte Vorgehensweise ist, dass alle neben dem Abfall in Feuerung und Kessel eintretenden Ströme die in das Abgas übergehen – Zusatzbrennstoff, Dampf, Sickerwasser, Klärschlamm usw. – ermittelt werden können und der Anteil Inertstoff im Abfall vorgegeben wird. Der Einfluss einer Abweichung des vorgegebenen Inertstoffanteils auf den bilanzierten Abfallmassenstrom ist beispielhaft in Bild 2 dargestellt. Über einen längeren Zeitraum kann diese Abweichung dadurch vermindert werden, dass der aus den Kranwaagenmessungen ermittelte, durchschnittliche Abfallmassenstrom mit dem bilanzierten *inertstofffreien* Abfallmassenstrom laufend verglichen wird. Der Inertstoffanteil lässt sich dann näherungsweise als

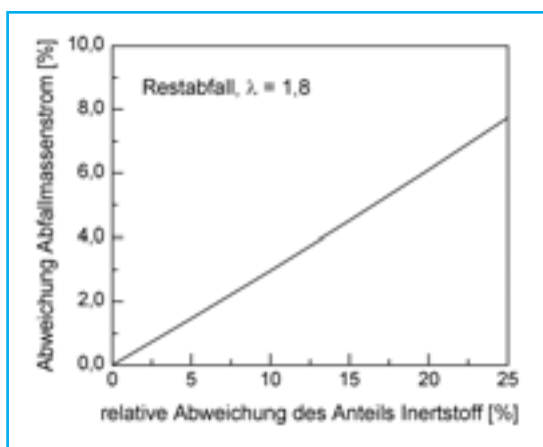


Bild 2: Abweichung des bilanzierten Abfallmassenstromes bei Abweichungen des vorgegebenen Inertstoffanteils

mittlerer Inertstoffanteil errechnen. Damit kann gleichzeitig die Bilanzierung geprüft werden, da der so ermittelte Inertstoffanteil i.d.R. in einem Bereich von etwa 25 bis 35 Ma.-% liegen muss.

Bild 3 zeigt beispielhaft über einen Zeitraum von 1,5 Stunden den in der AVA Augsburg bilanzierten Abfallmassenstrom und im Vergleich dazu den aus den Kranwaagenmesswerten bestimmten Abfallmassenstrom. Der aus den

¹ In [6] wird der Zeitraum von der Brennstoffaufgabe bis zur Hauptverbrennungszone mit 1 bis 1,5 Stunden angegeben.

Kranwaagenmesswerten bestimmte Abfallmassenstrom liegt in der Leittechnik der AVA Augsburg als Betriebswert vor. Die starke Verminderung der Leistung des Dampferzeugers – Bild 3 oben, Abnahme der Nutzwärmeleistung um etwa zwanzig Prozent – kann im praktischen Betrieb an der produzierten Frischdampfmenge als Messwert abgelesen werden, auf sie weist aber auch der Verlauf des bilanzierten Abfallmassenstromes deutlich hin. Der als 4-Stunden-Mittelwert aus den Kranwaagenmesswerten ermittelte Abfallmassenstrom zeigt dies nicht.

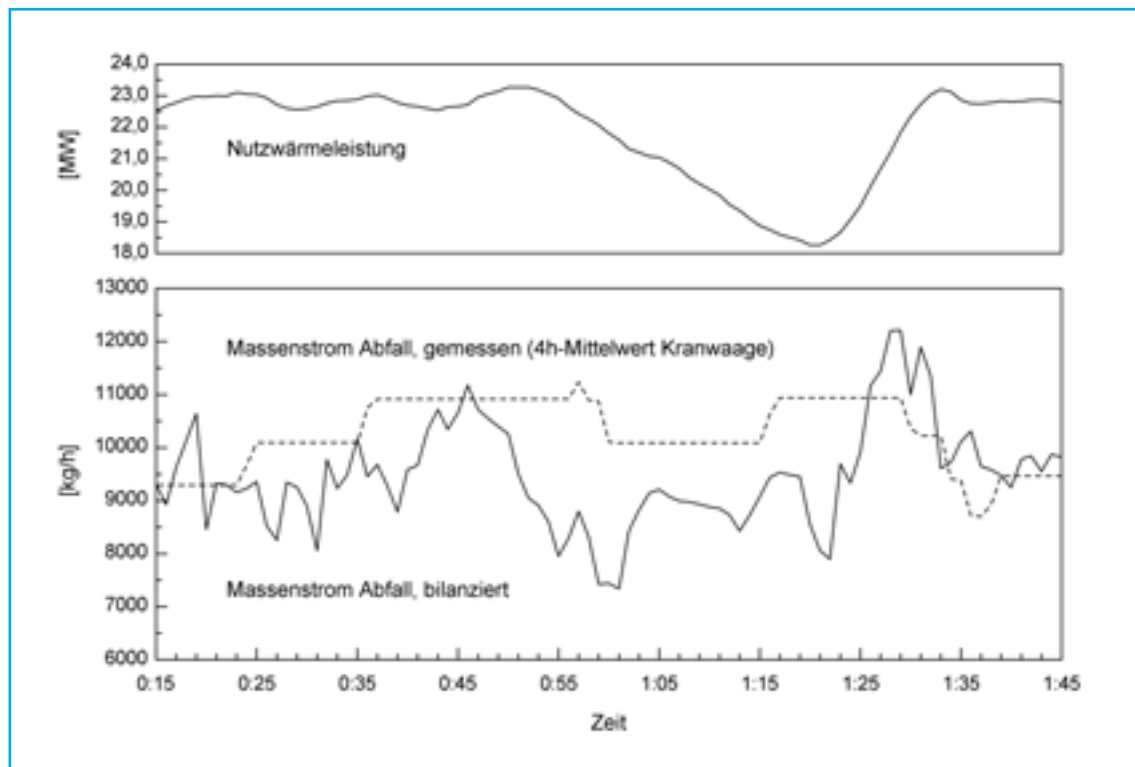


Bild 3: Gegenüberstellung verschiedener Ansätze für die Abfallmassenstromermittlung

Der aus der Bilanz ermittelte Abfallmassenstrom und der als 4-Stunden-Mittelwert aus den Kranwaagenmesswerten ermittelte Abfallmassenstrom stimmen für einen genügend großen Zeitraum annähernd überein. Je größer der betrachtete Zeitraum ist, desto geringer wird die verbleibende Differenz beider Massenströme. Ursachen für solche Abweichungen – in den untersuchten Fällen ≤ 2 bis 5 Prozent – sind z.B. Messabweichungen, Abweichungen bei der Annahme des Inertstoffanteils des Abfalls oder auch Unregelmäßigkeiten bei der 4h-Mittelwertbildung, z.B. wenn über einen längeren Zeitraum keine Aufgabe erfolgt und dann in kurzer Zeit sehr viel Abfall aufgegeben wird.

2.2. Ermittlung des aktuellen Abfallheizwertes

Der Heizwert des Abfalls ist eine von anderen Betriebsparametern unabhängige Größe, die im laufenden Betrieb nicht beeinflusst werden kann, im Vergleich z.B. zu dem Abfallmassenstrom oder der zugeführten Primär- und Sekundärluftmenge. Zentrale Stellgrößen der Feuerungsleistungsregelung wie Hubweg

und Geschwindigkeit der Zuteiler, Klappenstellung der Luftzuführungen, Bewegung des Rostes usw. sind deshalb v.a. abhängig von dem Abfallheizwert bzw. – da dieser als aktueller Wert nicht bekannt ist – abhängig von Messgrößen, die auf den Heizwert des Abfalls schließen lassen (O_2 -Gehalt des Abgases, Feuerraumtemperatur, erzeugter Massenstrom Dampf usw.).

In der betrieblichen Praxis von Abfallverbrennungsanlagen wird oft ein durchschnittlicher Abfallheizwert über den – aus den Kranwaagenmessungen ermittelten, siehe Abschnitt zuvor – durchschnittlichen Abfallmassenstrom, der aktuellen Frischdampfmenge und weiteren Werten wie z.B. der gemessenen Abgastemperatur nach dem Kessel und der zugeführten Primärluftmenge ermittelt. Bei dieser Vorgehensweise werden Werte mit unterschiedlichen zeitlichem Bezug miteinander verrechnet, weshalb insbesondere bei schwankenden Betriebszuständen keine genauen Aussagen zum aktuellen Abfallheizwert gemacht werden können.

Eine detaillierte und zeitnahe Ermittlung des Abfallheizwertes im praktischen Betrieb ist auf zwei Weisen möglich:

1. Durchführung einer Energiebilanz für die Ermittlung des Abfallenthalpiestromes als Produkt von Abfallmassenstrom und Abfallheizwert, sowie einer Massen- und Stoffbilanz für die Ermittlung des Abfallmassenstromes (siehe Abschnitt zuvor) und Berechnung des Heizwertes als Quotient aus Enthalpie- und Massenstrom.
2. Durchführung einer Massen- und Stoffbilanz für die Ermittlung der Abfallzusammensetzung und Anwendung einer geeigneten, empirischen Näherungsgleichung für die Ermittlung des Abfallheizwertes auf Grundlage der Zusammensetzung.

Bild 4 zeigt beispielhaft über einen Zeitraum von 1,5 Stunden (Zeitraum wie in 1,5 Stunden Bild 3) die so in der AVA Augsburg ermittelten Abfallheizwerte ($h_{u,AF,1}$ und $h_{u,AF,2}$) und im Vergleich dazu den unmittelbar in der Leittechnik der Anlage ermittelten Abfallheizwert ($h_{u,AF,3}$), der wie oben beschrieben ebenfalls über eine Energiebilanz und mit dem Abfallmassenstrom als 4-Stunden-Mittelwert aus den Kranwaagenmesswerten berechnet wird. Da der als 4-Stunden-Mittelwert ermittelte Abfallmassenstrom zunächst steigt und dann näherungsweise konstant bleibt (siehe Bild 3), der Abfallenthalpiestrom im gleichen Zeitraum erst näherungsweise konstant bleibt und dann sinkt, nimmt der auf diese Weise ermittelte Heizwert $h_{u,AF,3}$ von etwa 10 auf 7 MJ/kg entsprechend ab. Aus den Bilanzierungsrechnungen ergibt sich, dass der Heizwert des aktuell verbrennenden Abfalls deutlich schwankt und vor dem Leistungseinbruch sogar auf über 13 MJ/kg steigt. Die gegenläufige Tendenz sowie die hohe Abweichung des Heizwertes $h_{u,AF,3}$ gegenüber den bilanzierten Heizwerten $h_{u,AF,1}$ und $h_{u,AF,2}$ von bis etwa 5 MJ/kg zeigen, dass die bilanzierten Heizwerte $h_{u,AF,1}$ und $h_{u,AF,2}$ als Eingangsgrößen für die Feuerungsleistungsregelung besser geeignet sind.

Bild 4 zeigt auch, dass der Heizwert $h_{u,AF,1}$ (mit Berücksichtigung der ein- und austretenden Energieströme) zeitlich verzögert dem Heizwert $h_{u,AF,2}$ – ohne Berücksichtigung der ein- und austretenden Energieströme – folgt. Dies ist auf das

dynamische Verhalten des Dampferzeugers zurückzuführen, der über ein erhebliches Wärmespeichervermögen verfügt. Das Wärmespeichervermögen des Dampferzeugers wirkt sich insbesondere auf den Massenstrom des produzierten Frischdampfes aus, der über die Energiebilanz maßgeblich in die Berechnung des Heizwertes $h_{u,AF1}$ eingeht.

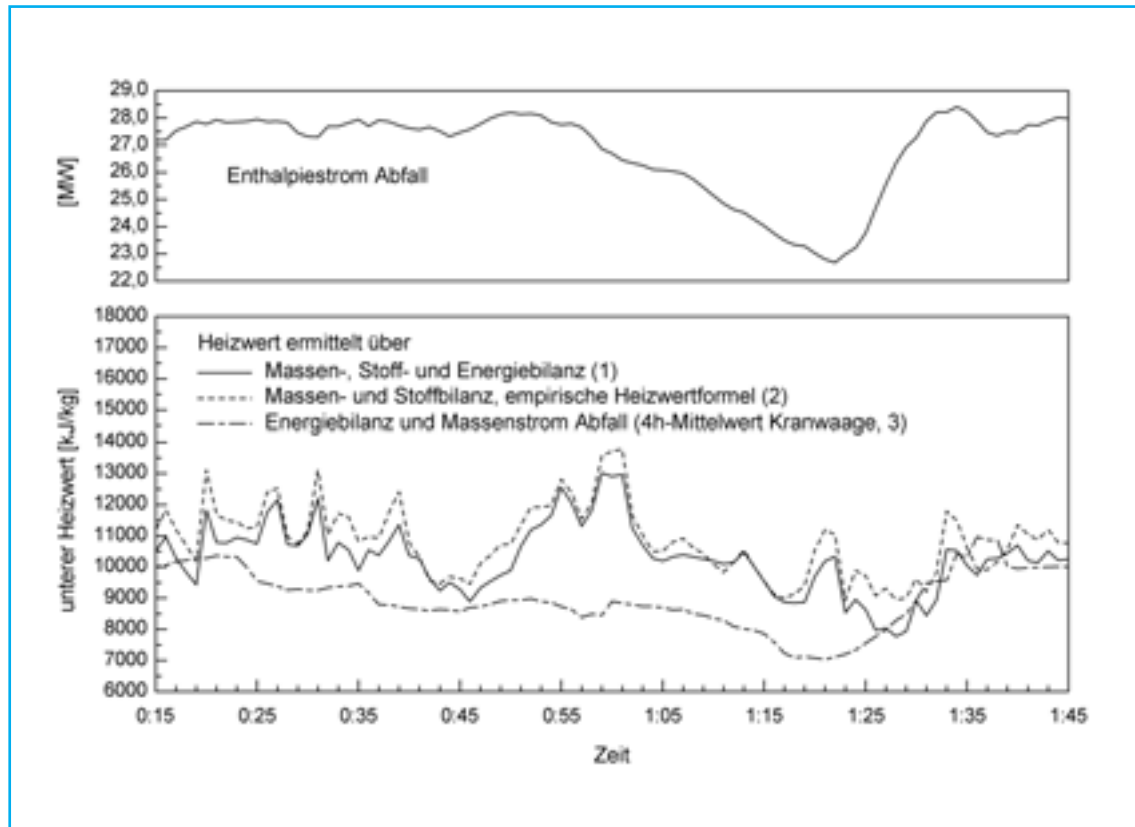


Bild 4: Gegenüberstellung verschiedener Ansätze für die Heizwertermittlung

Bei den dargestellten Berechnungsansätzen 1 und 2 ist zu beachten, dass der bilanzierte Heizwert den Heizwert des aktuell auf dem Rost verbrennenden Abfalls darstellt. Will man den mittleren Heizwert des Abfalls über einen bestimmten Zeitraum ermitteln, der annähernd der Verweilzeit des Abfalls auf dem Rost – etwa 0,5 bis 1 Stunde – entspricht, so ist aus den aktuellen Werten ein zugehöriger Mittelwert zu bilden. Wie bei der Bilanzierung des Abfallmassenstromes auch wird die Abweichung beider Heizwerte umso geringer, desto länger die hierfür gewählten Betrachtungszeiträume sind.

Die Möglichkeit, die Wärmeströme an Membranverdampferwänden in Kesseln zu messen, wird in [3] beschrieben. Zugehörige Untersuchungen finden u.a. in der AVA Augsburg statt, in der auch die Online-Bilanzierung eingerichtet wurde. Durch die gleichzeitige Einrichtung der Online-Bilanzierung und der Wärmestrommessung besteht die Möglichkeit, die gemessenen Wärmeströme mit den im selben Zeitraum ermittelten Abfallheizwerten zu vergleichen. Hierauf wird im Folgenden näher eingegangen.

Bild 5 zeigt für die Ofenlinie 3 der AVA Augsburg die Anordnung der Messstellen 301 und 310. Diese Messstellen befinden sich etwa 2,25 m oberhalb des Rostes, wobei aus Sicht der Bewegung des Brennstoffbettes die Messstelle 310 eher vorn und die Messstelle 301 eher hinten angeordnet ist.

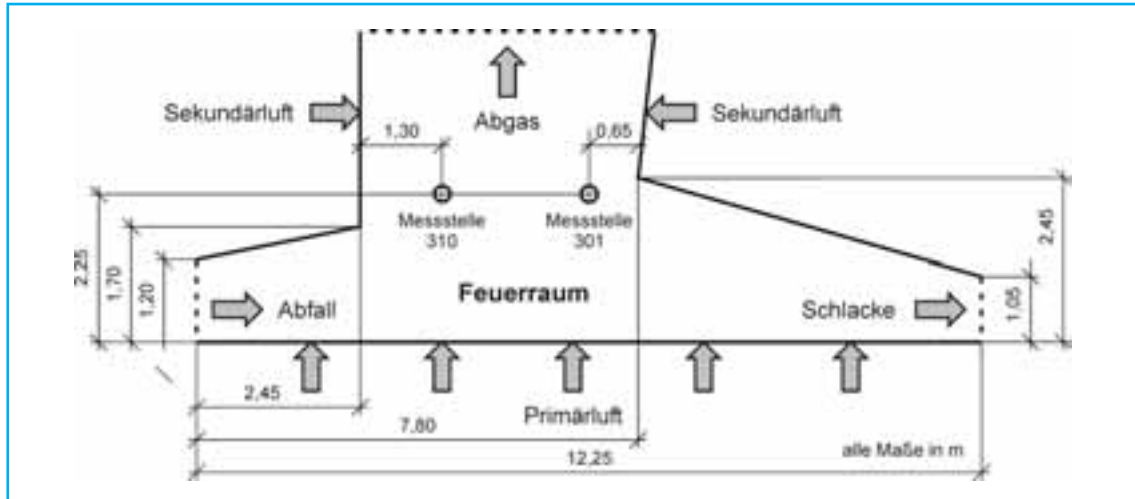


Bild 5: Anordnung der Messstellen 301 und 310 für die Messung von Wärmestromdichten an den Membranverdamperwänden des Kessels in der AVA Augsburg, Ofenlinie 3

Für die Darstellung des Zusammenhangs zwischen bilanziertem Abfallheizwert und dem gemessenen auf die Kesselwände übertragenen Wärmestrom wurde ein Zeitraum von fünf Stunden gewählt, indem – bedingt durch starke Änderungen des Heizwertes – größere Schwankungen in der produzierten Nutzwärmeleistung auftraten (Bild 6).

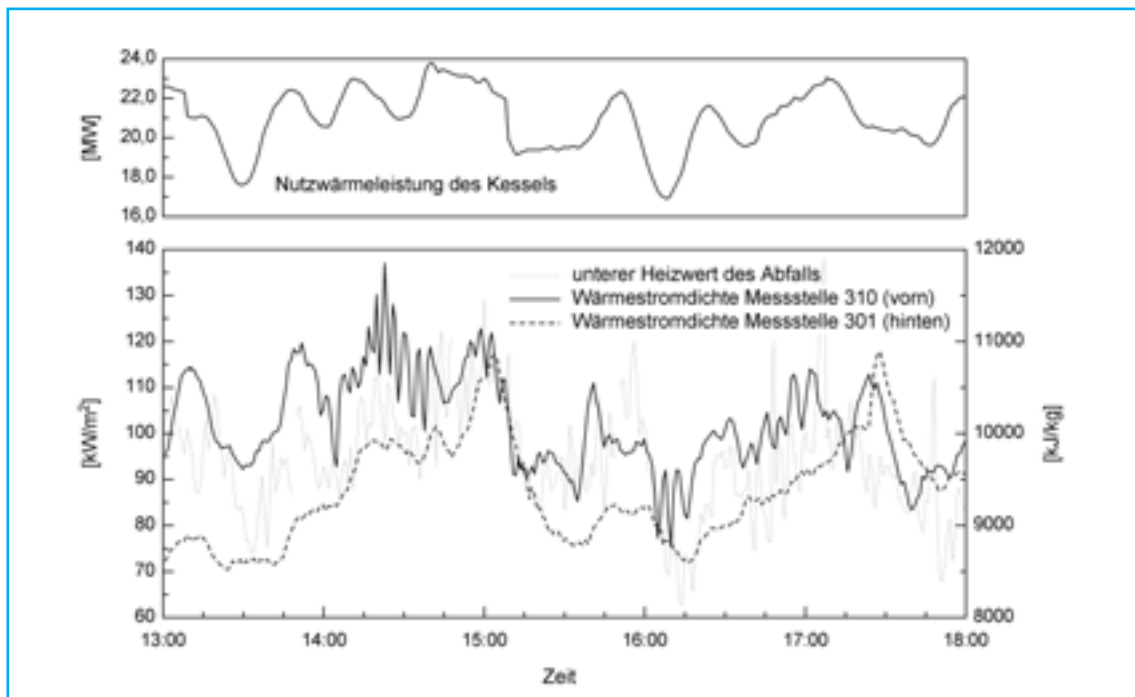


Bild 6: Gegenüberstellung des bilanzierten Abfallheizwertes und der gemessenen Wärmestromdichten

Bild 6 zeigt den Verlauf von bilanziertem Abfallheizwert und den gemessenen Wärmestromdichten. Der Verlauf beider Wärmeströme entspricht dabei dem Verlauf des Abfallheizwertes. Erwartungsgemäß werden die Schwankungen des aktuellen Heizwertes durch die Messstelle 310 sehr viel deutlicher wiedergegeben als durch die Messstelle 301, da sich die Messstelle 310 näher an der Hauptverbrennungszone befindet. Aufgrund der Wärmespeichereffekte der heißen Wände des Feuerraums und des Brennstoffbettes tritt an der Messstelle 301 ein gegenüber den Heizwertschwankungen entsprechend geglättetes Signal auf. Dies weist darauf hin, dass mit Hilfe von Messungen der Wärmeströme durch die Kesselwände auch gezielte Untersuchungen von Teilbilanzräumen bzw. einzelner (Rost-) Zonen möglich sind, z.B. indem die zeitliche Änderung lokaler Wärmeströme mit der Änderung der Energiefreisetzung im Ofenraum in Verbindung gebracht wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine detaillierte und zeitnahe Bilanzierung des Abfallheizwertes zu Ergebnissen führt, die wesentlich besser für die Beschreibung der jeweils aktuellen Anlagen-Ist-Zustände geeignet erscheinen, als die derzeit hierzu verfügbaren Werte aus Betriebsdatenerfassungssystemen. Der bilanzierte Abfallmassenstrom und der bilanzierte Abfallheizwert sind somit Werte, die z.B. auch für eine *vorausschauende Regelung* des Dampferzeugers geeignet sind. Im Hinblick auf eine umfassende Beschreibung der Vorgänge in Feuerung und Kessel als Voraussetzung für verbesserte Regelstrategien und die Ableitung weiterführender Optimierungsmaßnahmen zeigt sich weiterhin, dass ein erhebliches Untersuchungspotential in der Verbindung von Online-Bilanzierung und Wärmestrommessung besteht.

2.3. Ermittlung des aktuellen Kesselwirkungsgrades

Für die Ermittlung des Abfallheizwertes gemäß dem Ansatz 1 im Abschnitt zuvor ist die Durchführung einer detaillierten Energiebilanz für das Thermische Hauptverfahren (Luftvorwärmung, Feuerung und Kessel) erforderlich. Mit Hilfe dieser Energiebilanz kann auch der Kesselwirkungsgrad ermittelt werden. Der Wirkungsgrad eines Dampferzeugers allgemein ergibt sich nach [4] als Verhältnis der erzeugten Nutzwärme zu der für die Erzeugung dieser Nutzwärme erforderlichen zugeführten Energie

$$\eta_{\text{Kessel}} = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{H}_{\text{Zu}}} \quad (1).$$

Die Nutzwärme \dot{Q}_N ist dabei die Summe der in dem Kessel auf das Arbeitsmedium – in Abfallverbrennungsanlagen das Speisewasser – übertragenen Wärme². Bei der erforderlichen zugeführten Energie \dot{H}_{Zu} werden in [4] neben der Brennstoffenergie sowie weiterer in die Feuerung eintretender Energieströme – Primärluft, Dampf usw. – zusätzliche Energieströme wie z.B. der Energiebedarf der

² Ob hierzu auch über die Rostkühlung abgeführte Wärmeströme zählen, die z.B. für die Kondensatorvorwärmung verwendet werden, wird in [4] nicht näher dargestellt.

Saugzüge, Gebläse und Umwälzpumpen hinzugerechnet, d.h. der Dampferzeuger insgesamt bilanziert. Da Abfallverbrennungsanlagen wesentlich komplexer aufgebaut sind als die in der Richtlinie betrachteten Kesselanlagen erscheint es zunächst sinnvoll, die Ermittlung des Kesselwirkungsgrades an einem gemeinsamen Bilanzkreis für die Verfahrensbausteine *Luftvorwärmung*, *Feuerung* und *Kessel* durchzuführen. Bild 7 zeigt beispielhaft die an diesem Bilanzkreis ein- und austretenden Energieströme für einen konkreten Betriebszustand (entspricht dem Zeitpunkt 01:30 Uhr in Bild 3 und Bild 4).

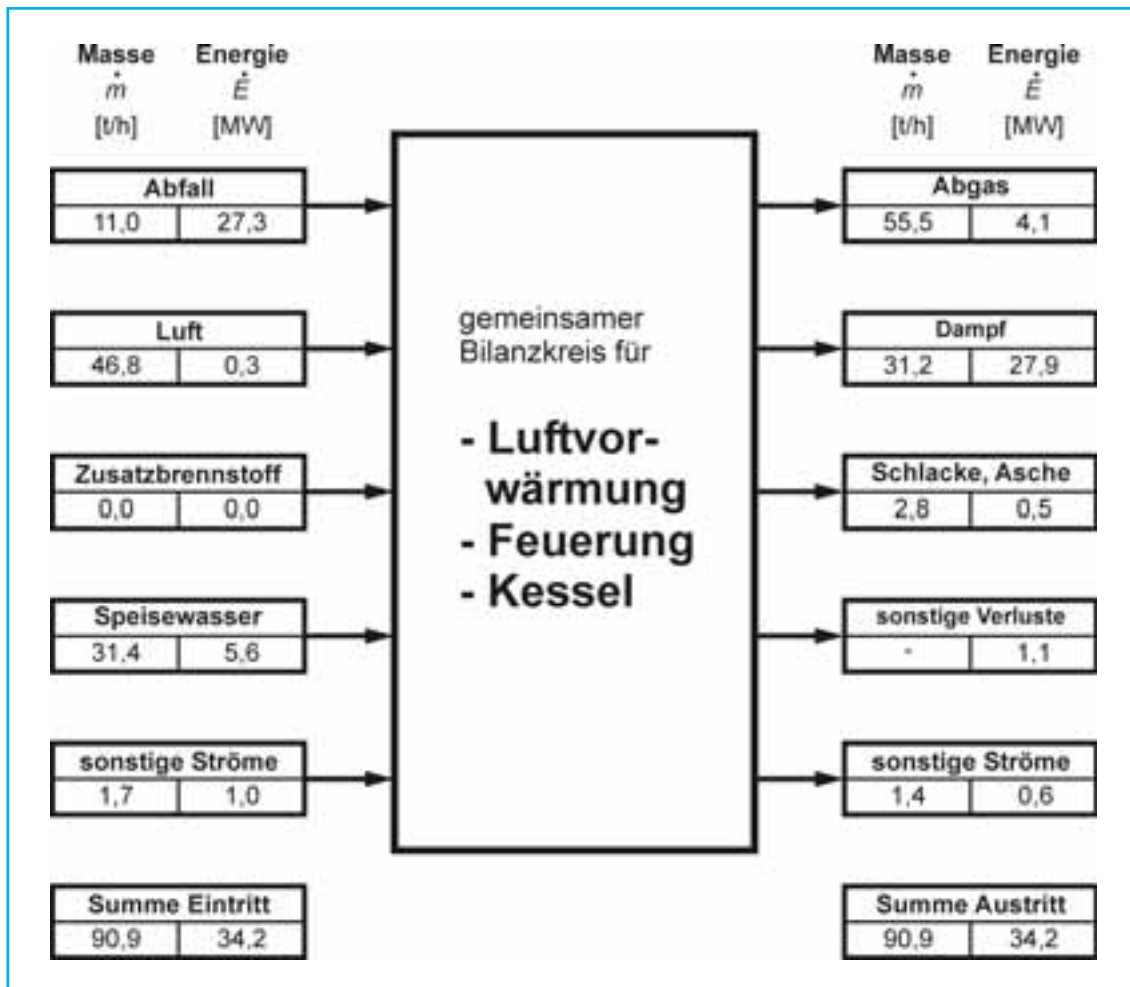


Bild 7: Bilanzkreis für die Bilanzierung von Luftvorwärmung, Feuerung und Kessel und Zahlenwerte für einen konkreten Betriebszustand in der Anlage AVA Augsburg

Anhand von Bild 7 wird deutlich, dass bis auf den Enthalpiestrom des eintretenden Abfalls und den sonstigen Verlusten – v.a. durch Abstrahlung – alle ein- und austretenden Energieströme im praktischen Betrieb ermittelt bzw. mit vernachlässigbarem Einfluss auf die Energiebilanz angenommen werden können. Für die Bilanzierung ist es deshalb sinnvoll, die *sonstigen Verluste* als Parameter vorzugeben. Diese insbesondere durch Abstrahlung von Wärme in das Kesselhaus entstehenden Verluste werden üblicherweise mit 2 bis 5 Prozent bezogen

auf den Gesamtenergieeintritt in den Kessel angenommen. Nach [4] können Verluste durch Strahlung und Leitung³ $\dot{Q}_{v,ST}$ über die Gleichung

$$\dot{Q}_{v,ST} = C \cdot \dot{Q}_N^{0,7} \quad (2)$$

ermittelt werden, wobei für die Konstante C die in Tabelle 1 dargestellten Faktoren angegeben werden. Für Abfallverbrennungsanlagen sind diese Konstanten zu gering. Detaillierte Untersuchungen bei dem Anfahren einer Ofenlinie mit Heizöl – d.h. bei *bekanntem* Brennstoff – Massenstrom, Zusammensetzung und Heizwert – in der AVA Augsburg haben gezeigt, dass die Abstrahlungsverluste etwa drei Prozent bezogen auf den Gesamtenergieeintritt betragen. Bild 8 zeigt zugehörig, wie hoch die Konstante C bei einem Verlust von drei Prozent und – z.B. lastabhängigen – Kesselwirkungsgraden von 75/80/85 Prozent in Abhängigkeit von der Nutzwärmeleistung angenommen werden müsste.

Tabelle 1: Konstante C für die Ermittlung der Abstrahlungsverluste des Kessels

Art des Kessels	Konstante C
Heizöl- und Erdgaskessel	$1,13 \cdot 10^2$
Steinkohlekessel	$2,20 \cdot 10^2$
Braunkohle- und Wirbelschichtkessel	$3,15 \cdot 10^2$

Quelle: Deutsches Institut für Normung e.V. DIN (Hrsg.): DIN 1942 – Abnahmeversuche an Dampferzeugern (VDI-Dampferzeugerregel). Berlin: Beuth Verlag GmbH, Februar 1994

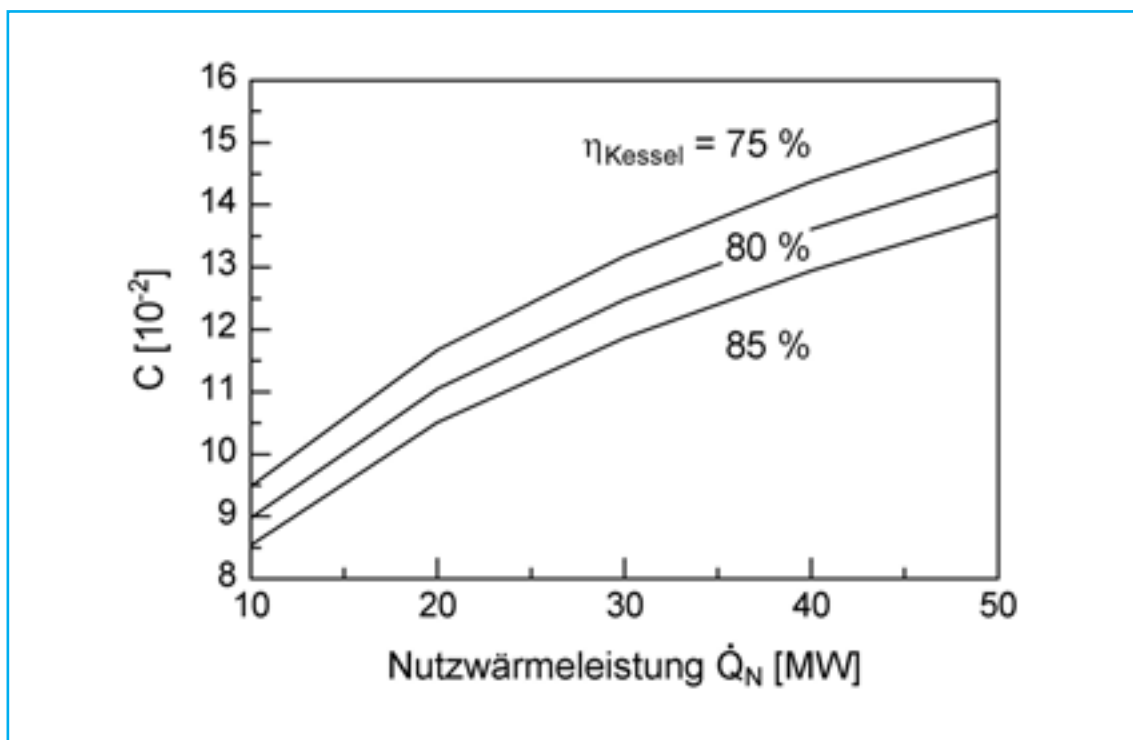


Bild 8: Ergebnisse für die Ermittlung der Konstante C bei einem Abstrahlungsverlust des Kessels von drei Prozent

³ Im Folgenden werden die Verluste des Kessels durch Abstrahlung und Leitung zusammengefasst als Abstrahlungsverluste bezeichnet.

Der Einfluss von Abweichungen bei der Annahme der Abstrahlungsverluste auf den ermittelten Abfallenthalpiestrom und damit auf den über Abfallenthalpiestrom und Abfallmassenstrom ermittelten Abfallheizwert – Ansatz 1 im Abschnitt zuvor – für einen durchschnittlichen Betriebszustand ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Änderung des Heizwertes beträgt hier näherungsweise 100 kJ/kg bei einer Änderung der Verluste von jeweils einem Prozent absolut. Im Vergleich zu den hohen Abweichungen, die bei der derzeit in Abfallverbrennungsanlagen angewendeten Ermittlung des Abfallheizwertes auftreten können (vergleiche Bild 4), wird deutlich, dass z.B. für die Feuerungsleistungsregelung die genaue Ermittlung des Abfallmassenstromes sehr viel wichtiger ist als die genaue Vorgabe der Abstrahlungsverluste. Bei der Diskussion der Abstrahlungsverluste ist darüber hinaus auch zu berücksichtigen, dass ein Großteil dieser Verluste wieder in Feuerung und Kessel rückgeführt wird, da ein wesentlicher Teil der als Sekundär-, Prozess- und Falschlufft zugeführten Luft unmittelbar dem Kesselhaus entnommen wird. Bei dem in Bild 7 dargestellten Betriebszustand beträgt diese *Rückführung* etwa 0,5 MW, d.h. etwa 1,5 Prozent bezogen auf den Gesamtenergieeintritt – im Bild als Rückführung innerhalb des Bilanzkreises nicht mit dargestellt.

Tabelle 2: Einfluss der vorgegebenen Abstrahlungsverluste auf den bilanzierten Abfallheizwert

Parameter	Einheit	Werte			
		1	2	3	4
Abstrahlungsverluste	%	1	2	3	4
Abfallenthalpiestrom	MW	27,87	27,53	27,18	26,84
Abfallmassenstrom	t/h	11,00			
Abfallheizwert	MJ/kg	9,12	9,01	8,90	8,79

3. Anwendungsbeispiel – Nachweis des Einflusses einer Wassereindüsung in die Feuerung

Im folgenden Anwendungsbeispiel wird gezeigt, wie mit Hilfe der zuvor beschriebenen Kenngrößen Abfallmassenstrom, Abfallheizwert und Kesselwirkungsgrad sowie weiterer Betriebsparameter – die für die Beschreibung der jeweils vorherrschenden Betriebszustände wesentlich besser geeignet sind als die Betriebsmesswerte allein – der aktuelle Anlagen-Ist-Zustand im Zusammenhang mit der Eindüsung von Wasser direkt in den Feuerraum beurteilt werden kann.

In einer Reihe von Abfallverbrennungsanlagen wird die Eindüsung von Wasser in den Feuerraum derzeit getestet oder schon 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 zu nehmen. Da für die Dampferzeugung nur die physikalische 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 dann mit einer entsprechenden Durchsaterhöhung ausgeglichen werden muss.

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 etwa 180 °C – eine ausreichend große Menge dort eingedüsten Washwassers verdampft werden (Quench-Wirkung). Dies ist allerdings nur möglich, wenn der Feuchtegehalt des eintretenden Abgases nicht zu hoch ist, d.h. das Abgas genug 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 dargestellten Untersuchungszeitraum wurde die Wassereindüsung zweimal für jeweils eine halbe Stunde abgestellt. Bild 9 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 Washwasser verdampft werden – die Abgastemperatur sinkt.

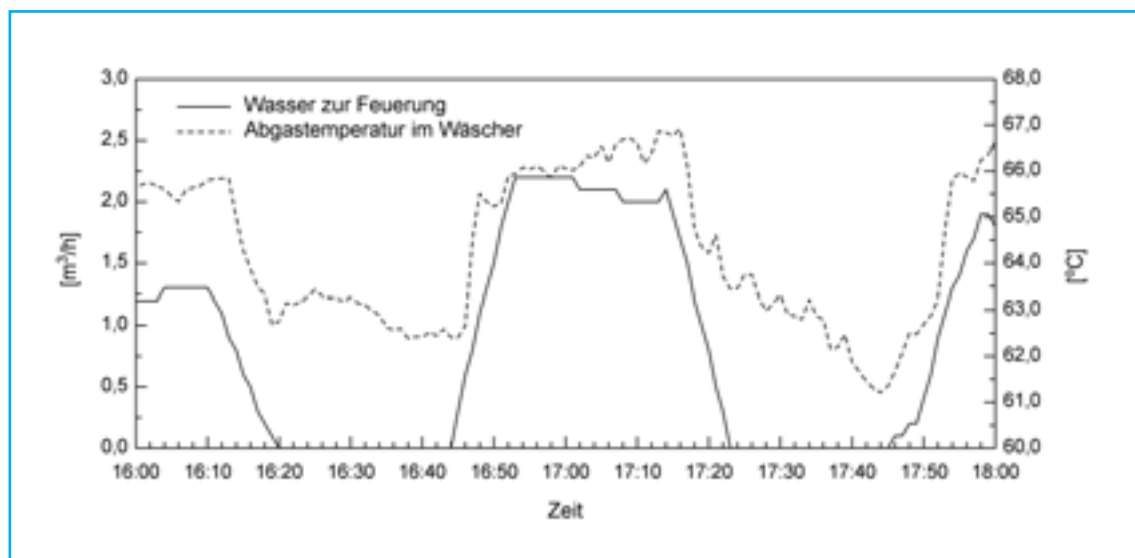


Bild 9: Wassereindüsung in die Feuerung und Abgastemperatur im Nasswäscher nach dem Quench-Vorgang während der Optimierungsmaßnahme *Wassereindüsung in die Feuerung*

Bild 10 zeigt den Zusammenhang zwischen der Wassereindüsung und dem während der Eindüsung erhöhten Energieaufwand über den Kesselwirkungsgrad. Der Kesselwirkungsgrad fällt in dem betrachteten Zeiträumen von durchschnittlich etwa 80 Prozent (maximal 84 Prozent) auf unter 76 Prozent. Dies entspricht

einer Erhöhung der einzubringenden Abfallenergie von etwa vier Prozent, unter der Maßgabe, dass die Nutzwärme konstant bleiben soll. Würde der Heizwert des Abfalls – entgegen den praktischen Gegebenheiten im Betrieb – konstant bleiben, müsste demzufolge etwa 4 Prozent mehr Abfall durchgesetzt werden. Bild 10 zeigt zusätzlich für diesen Zeitraum den Gesamtwirkungsgrad der AVA Augsburg, dessen Änderung zwischen 19,3 und 20 Prozent zwar gering ist, aber deutlich durch die Wassereindüsung beeinflusst wird.

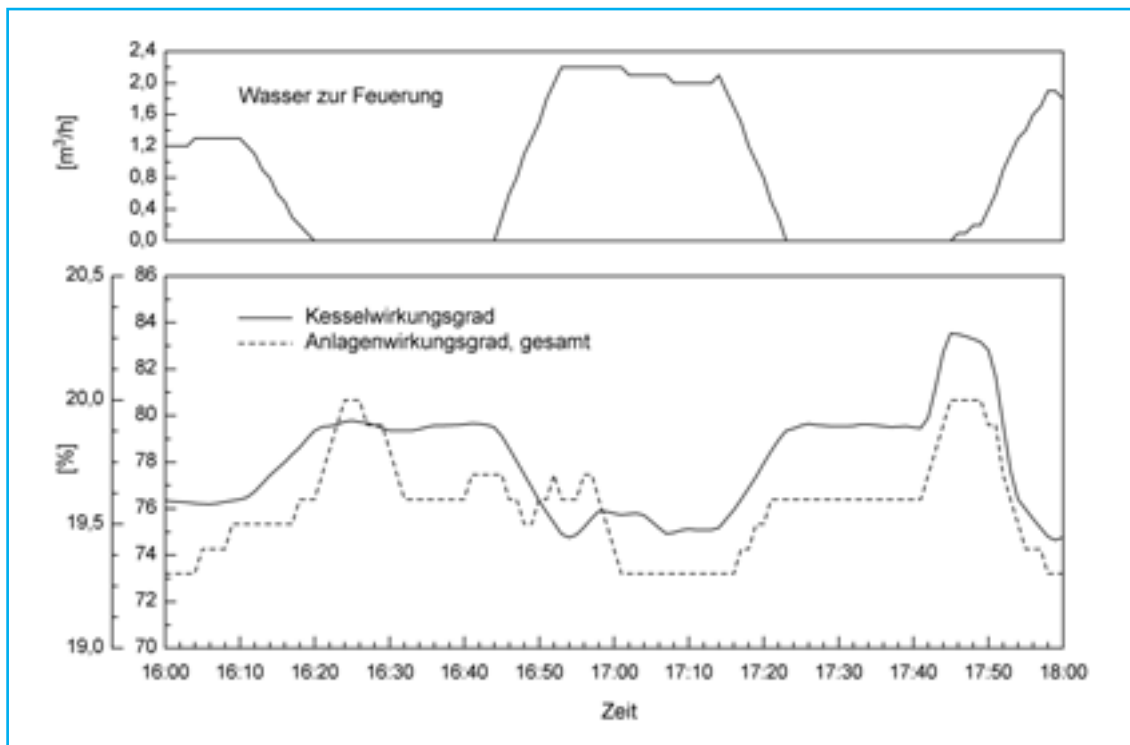


Bild 10: Wassereindüsung in die Feuerung Kesselwirkungsgrad der Ofenlinie 1 und Gesamtwirkungsgrad der Anlage während der Optimierungsmaßnahme *Wassereindüsung in die Feuerung*

In Bild 11 ist der Einfluss der Wassereindüsung über insgesamt fünf Tage dargestellt. In dem Zeitraum wurde die Wassereindüsung nach 1,5 Tagen mit etwa 1 m³/h in Betrieb genommen. Danach ändert sich die eingedüste Wassermenge vergleichsweise geringfügig. Wie bereits beschrieben, ist der Einfluss der Wassereindüsung auf den Durchsatz eher gering und quantitativ anhand der Abfallmenge kaum nachweisbar. Auch bei Sprüngen im Verlauf der Wassereindüsung (z.B. bei dem Einschalten, etwa 08:00 Uhr am Tag 2), zu denen man eine unmittelbare Steigerung des Durchsatzes – wenn auch nur um einen geringen Betrag – erwarten würde, ist keine solche Steigerung erkennbar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Wassereindüsung eine Verminderung der Effizienz des Dampferzeugers zur Folge hat (Verringerung des Kesselwirkungsgrades durch Erhöhung der Abgasverluste) – in dem hier dargestellten Fall etwa 2 Prozent-Punkte (1 m³/h Wassereindüsung) bis 4 Prozent-Punkte (2 m³/h). Allerdings ist der tatsächliche Einfluss auf den Durchsatz geringer als man dies bei einer flüchtigen Betrachtung (Verhältnis 1:10 der Menge Wasser zu der Menge Abfall) vermuten würden, und quantitativ – aufgrund der

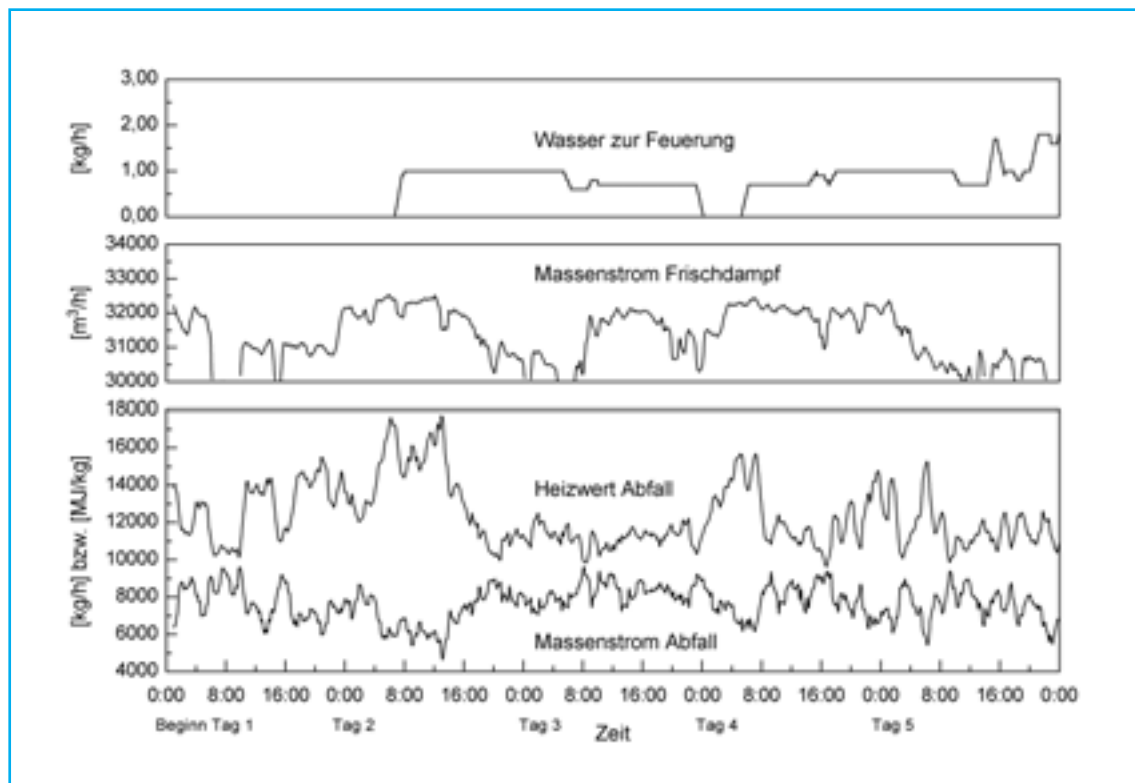


Bild 11: Wassereindüsung in die Feuerung, Massenstrom Frischdampf und Abfallmassenstrom während der Optimierungsmaßnahme *Wassereindüsung in die Feuerung*

Überlagerung einer Vielzahl von Einflussgrößen auf den durchgesetzten Abfallmassenstrom – im praktischen Betrieb kaum nachweisbar. Für die Optimierung der Anlagenauslastung und damit der Wirtschaftlichkeit durch eine Wassereindüsung in die Feuerung bzw. den ersten Zug des Kessels sollten deshalb z.B. auch Untersuchungen zum Einfluss auf die Korrosion bzw. die Belagsbildung im Kessel durch geänderte Wärmeübertragungsbedingungen durchgeführt werden.

4. Zusammenfassung

Die umfassende Untersuchung von Anlagen-Ist-Zuständen in Abfallverbrennungsanlagen ist für die weitere Optimierung von wichtiger Bedeutung. Da bei diesen Anlagen komplexe Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Haupteinflussgrößen auftreten, die auf Grundlage der Messwerte allein oft nicht nachvollzogen werden können ist es erforderlich, zunächst unbekannte Betriebsparameter aus den Betriebsmesswerten zu ermitteln. So ist es auch für das erfahrene Betriebspersonal nicht ohne weiteres möglich, die tatsächlichen Auswirkungen einer bestimmten Optimierungsmaßnahme – im vorliegenden Beitrag z.B. Einfluss einer Wassereindüsung in die Feuerung auf den aktuellen Anlagenwirkungsgrad oder die durchgesetzte Menge Abfall – zu bestimmen. Weitere Beispiele für die komplexen Wechselwirkungen bei der Prozessführung in Abfallverbrennungsanlagen betreffen u.a. die in den Dampferzeugern häufig auftretenden Korrosionserscheinungen.

Bei der Korrosion in Abfallverbrennungsanlagen besteht hinsichtlich der konkreten Zusammenhänge zwischen den Brennstoffeigenschaften, der Konstruktion des Dampferzeugers, einer bestimmten Prozessführung und dem jeweiligen Korrosionspotential nach wie vor ein erhebliches Untersuchungspotential. Die Ausschöpfung dieses Untersuchungspotentials lässt sich unterstützen, indem neben den derzeit für die Beschreibung von Betriebszuständen verwendeten Messwerten (insbesondere Massenstrom Dampf – stellvertretend für die Kesselbelastung) weitere bilanzierte Betriebsparameter wie z.B. brennstofftechnische Eigenschaften des Abfalls wie Heizwert und Zusammensetzung, Merkmale der Prozessführung wie Luftzahlen unmittelbar über dem Rost sowie insgesamt für die Verbrennung, Luftverteilung usw. hinzugezogen werden. Durch eine Zusammenführung dieser Betriebsparameter mit Informationen aus weiteren Untersuchungsverfahren (siehe auch Bild 12), wie der Bestimmung der Asche-Salzproportionen der Flugstäube und Kesselbeläge [5] und der Ermittlung von Wärmestromdichten, sowie von thermischen und mechanischen Belastungen an den Membranverdampferwänden des Kessels [3], können dann Optimierungsstrategien abgeleitet werden, die nicht nur einzelne Optimierungsziele, sondern eine Gesamtoptimierung der Anlage hinsichtlich Energieeffizienz, Durchsatzsteigerung, Korrosionsminderung usw. berücksichtigen.

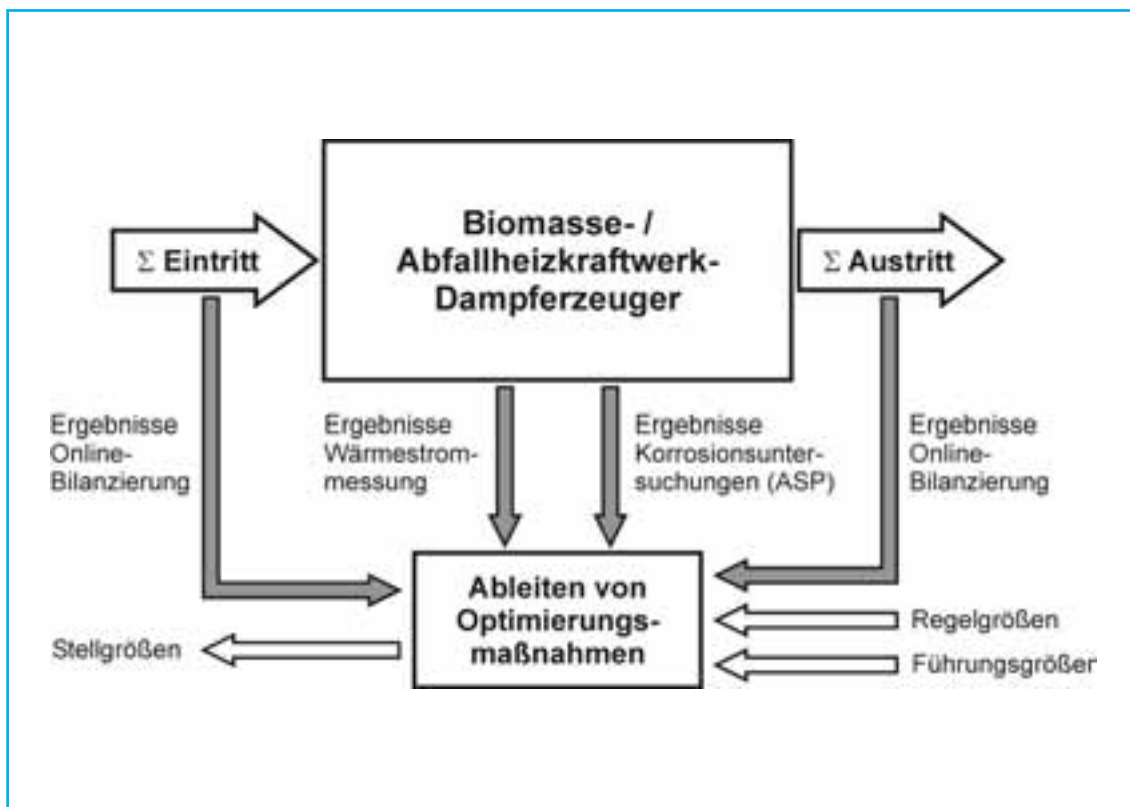


Bild 12: Verbindung von Online-Bilanzierung, Korrosionsuntersuchungen und Wärmestrommessung für die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen

5. Literatur

- [1] 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
- [2] 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. 219-240
- [3] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, SIDAF-Tagung 27.-28.10.2005, S. 273-288
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN (Hrsg.): DIN 1942 – Abnahmeversuche an Dampferzeugern (VDI-Dampferzeugerregel). Berlin: Beuth Verlag GmbH, Februar 1994
- [5] 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
- [6] Zwahr, H.: Kontinuierliches Monitoring der Energieflüsse in einer MVA. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): BAT- und preisorientierte Dioxin-/Rauchgasreinigungs-techniken 2002 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. VDI-Seminar 435914, 19./20. September, München