

Optimierung von Müllheizkraftwerken durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms

Michael Beckmann, Martin Horeni, Jörg Metschke, Jörg Krüger,
Georg Papa, Ludwig Englmaier und Michael Busch

1.	Grundlagen der Bilanzierung und Bewertung	220
2.	Online-Bilanzierungsprogramm am Beispiel des Müllheizkraftwerkes Schwandorf	222
2.1.	Verfahrensabschnitte im Müllheizkraftwerk Schwandorf	222
2.2.	Massen-, Stoff- und Energiebilanzen für ausgewählte Verfahrensabschnitte	223
2.3.	Anbindung des Online-Bilanzierungsprogramms an die Leittechnik der Anlage	226
3.	Ergebnisse der Bilanzierung, Bewertung	227
3.1.	Ergebnisse der Bilanzierung	227
3.2.	Bewertung der Bilanzierungsergebnisse	232
4.	Weiteres Vorgehen	236
5.	Zusammenfassung	237
6.	Symbolverzeichnis und Abkürzungen	238
7.	Quellen	239

In Müllheizkraftwerken können schwankende Abfallzusammensetzungen am Eintritt in die Anlage und Änderungen der Energieabnahme am Austritt (Fernwärme- und Dampfabnahme) auftreten. Dadurch ergeben sich jeweils unterschiedliche Betriebszustände.

Für die Optimierung dieser Anlagen sind für den jeweiligen Betriebszustand möglichst detaillierte Stoff-, Massen- und Energiebilanzen sowie weitere Informationen zum Anlagenverhalten (z.B. Korrosion) erforderlich. Die in modernen Müllheizkraftwerken über die Leittechnik messtechnisch erfassten Daten bezüglich Stoff- und Energieströmen sind i.d.R. geeignet, um mit Hilfe von verfahrenstechnischen Bilanzierungsmodellen und Berechnungsmethoden eine ebenfalls Online-Bilanzierung von einzelnen Verfahrensbausteinen und damit auch der Gesamtanlage durchzuführen. Eine solche Darstellung des Ist-Zustandes ist in Müllheizkraftwerken gegenwärtig noch nicht verfügbar, sie würde jedoch das

Betriebspersonal in die Lage versetzen, weitere Betriebsoptimierungen zunächst manuell durchzuführen. Ziele dieser manuellen Optimierung sind die Steigerung der Energieeffizienz, der sparsame Umgang mit Zusatzstoffen, die Verlängerung der Reisezeiten und damit insgesamt die Verbesserung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses.

Im vorliegenden Beitrag werden die Erstellung eines Online-Bilanzierungsprogramms, dessen Anbindung an die Leittechnik des Müllheizkraftwerkes Schwandorf und die Bewertung der erzielten Ergebnisse beschrieben. Dabei wird zunächst kurz auf die Grundlagen der Bilanzierung (Methode) eingegangen. Die Darstellung des betrieblichen Ist-Zustandes mit Hilfe eines Online-Bilanzierungsprogramms in den Müllheizkraftwerken Schwandorf, Burgkirchen und Coburg wird in dem Projekt *EU24 – Wirkungsgrad von Abfallverbrennungsanlagen; technische, ökologische und ökonomische Optimierung* durchgeführt. Dieses Projekt mit den Projektpartnern der drei Anlagen Schwandorf, Burgkirchen und Coburg sowie dem Anlagenhersteller Firma Martin GmbH für Energie- und Umwelttechnik München wird durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.

Kap. 1.

Grundlagen der Bilanzierung und Bewertung

Für die Durchführung der Online-Bilanzierung von Müllheizkraftwerken werden zunächst, wie in der Verfahrenstechnik üblich, Bilanzgrenzen für die einzelnen Bilanzkreise festgelegt. Im vorliegenden Fall ist die äußere Bilanzgrenze die Anlage selbst (Bild 1). In diesen Bilanzkreis treten von außen im Wesentlichen der Abfall, Luft, Zusatzenergien, Wasser und Betriebshilfsstoffe ein und das Abgas, Reststoffe, elektr. Energie, therm. Energie, sonstige Verluste aus.

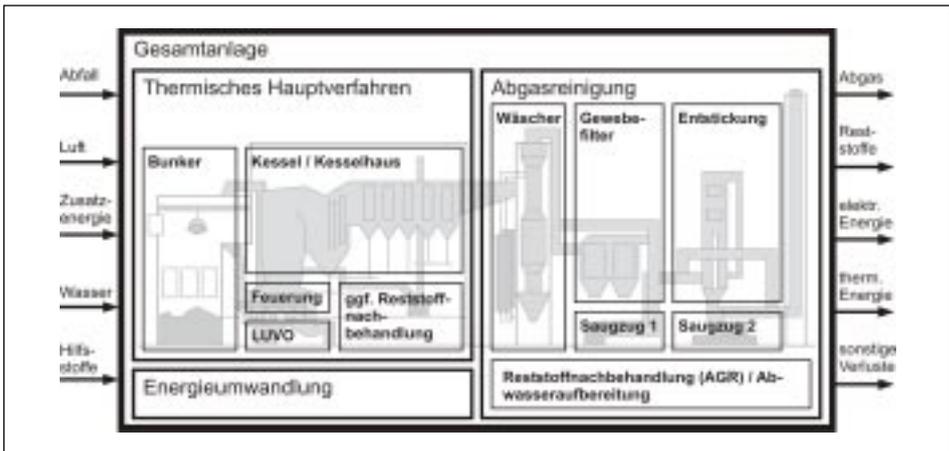


Bild 1: Bilanzkreise für die Bilanzierung des Müllheizkraftwerkes Schwandorf (Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme)

Für die detaillierte Bilanzierung ist es erforderlich, die Gesamtanlage in eine Vielzahl von Teilbilanzkreisen um einzelne Aggregate, Apparate usw. aufzuteilen [3]. Diese Teilbilanzkreise können dann in übergeordneten Bilanzkreisen zusammengefasst werden (Bild 1), die im Weiteren als Module z.B. für Bunker, Feuerung, Kessel, Wäscher usw. bezeichnet werden. Die Zusammenschaltung von Modulen wiederum ergibt einzelne Verfahrensbausteine und übergeordnet die Verfahrensabschnitte wie das Thermische Hauptverfahren, die Energieumwandlung, Abgasreinigung usw. (Bild 1).

Für die verschiedenen Müllverbrennungsanlagen findet man in dem Verfahrensabschnitt *Thermisches Hauptverfahren* auf der Ebene der Module, d.h. den Bilanzkreisen Bunker, Kessel usw., bereits einen hohen Grad an Übereinstimmungen im Hinblick auf die Bilanzierung, so dass damit eine mit geringem Aufwand verbundene gute Übertragbarkeit auf weitere Anlagen gegeben ist. D.h., dass die im Rahmen dieses Beitrages am Beispiel der Anlage Schwandorf vorgestellten Bilanzierungsmodule in gleicher oder geringfügig differenzierter Form auf die Anlagen Burgkirchen und Coburg, sowie auf weitere Anlagen übertragen werden können.

Im Verfahrensabschnitt *Abgasreinigung* ist, je nach Konfiguration, in Bilanzierungsmodulen wie Wäscher, Gewebefilter, DeNOx usw. zu unterteilen. Zusätzliche Module ergeben sich ggf. (in Bild 1 nicht näher dargestellt) für die Reststoffnachbehandlung und Abwasseraufbereitung.

Im Bereich der Energieumwandlung treten bei den verschiedenen Müllheizkraftwerken je nach Aufbau des Wasserdampfkreislaufes und der vorliegenden Energieabnahme – Strom, Dampf unterschiedlicher Druckstufen, Fernwärme – Unterschiede auf, die dann in speziellen Bilanzierungsmodulen berücksichtigt werden müssen.

Um die Anwendung des Online-Bilanzierungsprogramms in möglichst vielen Müllheizkraftwerken zu erreichen, werden für die einzelnen Verfahrensabschnitte – z.B. Thermisches Hauptverfahren, Abgasreinigung – eine Reihe vordefinierter Bilanzierungsmodule bereitgestellt und je nach Bedarf laufend ergänzt.¹

Für die einzelnen Bilanzkreise werden in einem nächsten Schritt, wie in der Verfahrenstechnik üblich, 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.

Mit den oben definierten Bilanzkreisen ist für die Bewertung festgelegt, was den 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 usw. zu geschehen (vgl. hierzu auch [3]).

¹ Auch in herkömmlichen Modellierungsprogrammen, z.B. für Großkraftwerke, werden einzelne Apparate vordefiniert und aus entsprechenden *Bibliotheken*, z.B. für den Wasserdampfkreislauf, wieder abgerufen.

Kap. 2.

Online-Bilanzierungsprogramm am Beispiel des Müllheizkraftwerkes Schwandorf

Das Online-Bilanzierungsprogramm wird im Folgenden am Beispiel des Müllheizkraftwerkes Schwandorf vorgestellt.

Kap. 2.1.

Verfahrensabschnitte im Müllheizkraftwerk Schwandorf

Entsprechend der in Kapitel 1 dargestellten Vorgehensweise bei der Bilanzierung können speziell für die Anlage Schwandorf zu den einzelnen Bilanzmodulen folgende ergänzende Angaben gegeben werden (Bild 1, vgl. [1] und [2])²:

Verfahrensabschnitt *Thermisches Hauptverfahren*

- Bunker: Durchsatz etwa 400.000 t/a Hausmüll, Sperrmüll und Gewerbeabfall, Absaugung eines Teilstromes für die Primärluft, Gesamtkapazität der Anlage 460.000 t/a bei einem Heizwert von etwa 10,5 MJ/kg,
- Luftvorwärmung: Luftvorwärmtemperaturen etwa 130 °C, Vorwärmung mit Niederdruckdampf 6 bar (Ofenlinie 1 bis 3) und Mitteldruckdampf 26 bar (Ofenlinie 4), Aufteilung vorgewärmter und nicht vorgewärmter Primärluft auf die vorderen und hinteren Rostzonen möglich,
- Feuerung: vier Ofenlinien (Ofenlinie 1 bis 3 baugleich, Ofenlinie 4 1992 nachgerüstet), Rost jeweils wassergekühlt (Wärmeauskopplung in der Kondensatvorwärmung),
- Kessel: Frischdampfproduktion etwa 1.300.000 t/a bei 72 bar (ü) und 410 °C (bei etwa 400.000 t Abfall/a).

Verfahrensabschnitt *Abgasreinigung*

- CDAS-Reaktor (quasitrockene Abgasreinigung): SO₂- und HCl-Absorption über Frisch- und Rezikalkeindüsung, Dioxin- und Schwermetalladsorption an Aktivkohle,
- Gewebefilter für die Partikelabscheidung,
- Entstickung: NO_x-Minderung in der SCR-Anlage, Wiederaufheizung des Abgases mit Hochdruckdampf, drei SCR-Anlagen für vier Ofenlinien.

Verfahrensabschnitt *Energieumwandlung*

- Energieabgabe in Form von elektrischer Energie (131.000 MWh/a), Fernwärme (37.000 MWh/a), Nieder- und Hochdruckdampf (282.000 MWh/a),

² Für die Energieabnahme gilt das Bezugsjahr 2003.

- Stromerzeugung über drei Entnahme-Kondensationsturbinen,
- diverse Verschaltungen innerhalb des Speisewasserkreislaufes für die Kondensat- und Speisewasservorwärmung.

Insbesondere durch die Nachrüstung der Ofenlinie 4 im Jahr 1992 bzw. deren Einbindung in die vorhandene Anlagentechnik ergibt sich im Bereich der Energieumwandlung eine Vielzahl von Verschaltungen der einzelnen Apparate. Allein in diesem Bereich werden insgesamt dreißig Teilbilanzkreise bilanziert (Hoch-, Mittel- und Niederdruckdampfschiene, Turbinen, Luftkondensator und Kühltürme, Kondensatvorwärmung, Kondensat- und Speisewasserpumpen, Speisewasservorwärmer usw.).

Die Aufnahme der Anlagenkonfigurationen und deren Umsetzung in das Online-Bilanzierungsprogramm für die Anlagen Burgkirchen und Coburg wird in gleicher Weise durchgeführt.

Kap. 2.2.

Massen-, Stoff- und Energiebilanzen für ausgewählte Verfahrensabschnitte

Zunächst wurden für die einzelnen Module und die übergeordneten Verfahrensbausteine in Abhängigkeit von den in der Anlage Schwandorf erfassten Messgrößen und den vorhandenen Messstellen geeignete Berechnungsstrategien entwickelt.

Die prinzipielle Vorgehensweise für die Erstellung dieser Berechnungsstrategien wird im Folgenden beispielhaft anhand der Berechnung des Massenstromes und des Heizwertes des Abfalls (Abfallenthalpiestrom) dargestellt. Der Abfallenthalpiestrom ist für die Bilanzierung eines Müllheizkraftwerkes von großer Bedeutung, da dieser einerseits für die Beschreibung des Betriebszustandes von Feuerung und Kessel sowie andererseits auch als **Aufwand** bei der Ermittlung der Anlagenwirkungsgrade eine wesentliche Grundgröße darstellt.

In dem für das Müllheizkraftwerk Schwandorf erstellten Online-Bilanzierungsprogramm werden der Massenstrom und der Heizwert des eingesetzten Abfalls innerhalb des Bilanzkreises für das Thermische Hauptverfahren berechnet.

Bild 2 zeigt für die drei Bilanzierungsmodule des Thermischen Hauptverfahrens – Luftvorwärmung, Feuerung und Kessel –, die ein- und austretenden Massen- und Energieströme und die zugehörig verfügbaren Messdaten sowie Parameter (z.B. Zusammensetzung der Luft). Daraus ist zu erkennen, dass sich für einen einzelnen Verfahrensbaustein (Bild 3) allein auf der Basis der Messwerte am Ein- und Austritt des Verfahrensbausteins oder am Ein- und Austritt der einzelnen, dem Verfahrensbaustein zugehörigen Module zunächst nicht unmittelbar eine geschlossene Bilanzierung ergeben muss. Es ist dann ein Berechnungsalgorithmus zu entwickeln, bei dem einzelne Module miteinander verknüpft sind.

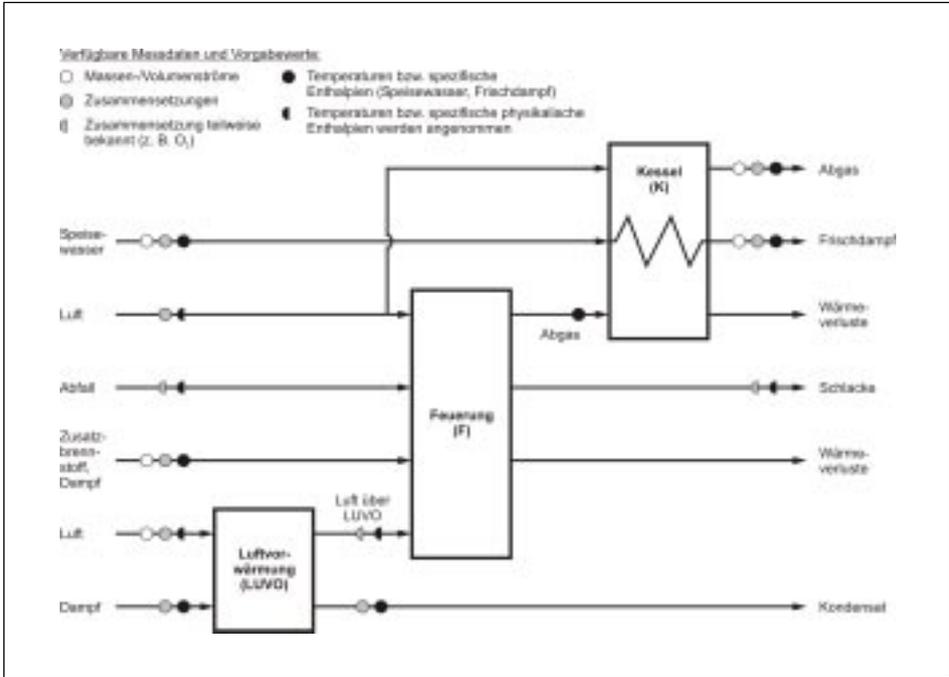


Bild 2: In der Anlage Schwandorf verfügbare Messdaten und Vorgabewerte (hinreichend genaue Annahmen) für die Berechnung der Module Luftvorwärmung, Feuerung und Kessel (Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme)

Bild 3 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 (Bild 3) 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 ≤ 1 Masseprozent 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.

Anschließend wird im Schritt 4 der Gesamtmassenstrom des Abfalls berechnet.

Im Schritt 5 (Bild 4) wird die Luftvorwärmung bilanziert, um den über die vorgewärmte Primärluft in die Feuerung eingetragenen Enthalpiestrom zu erhalten.

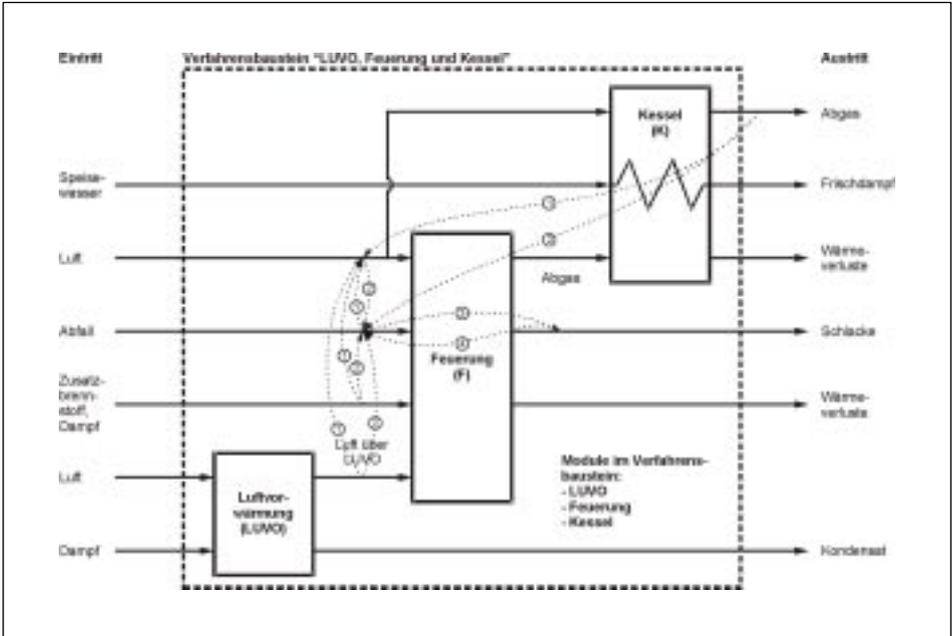


Bild 3: Bilanzierung des Verfahrensbausteins *LUV, Feuerung und Kessel* – im Müllheizkraftwerk Schwandorf verwendeter Berechnungsablauf Schritt 1 bis 4 (Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme)

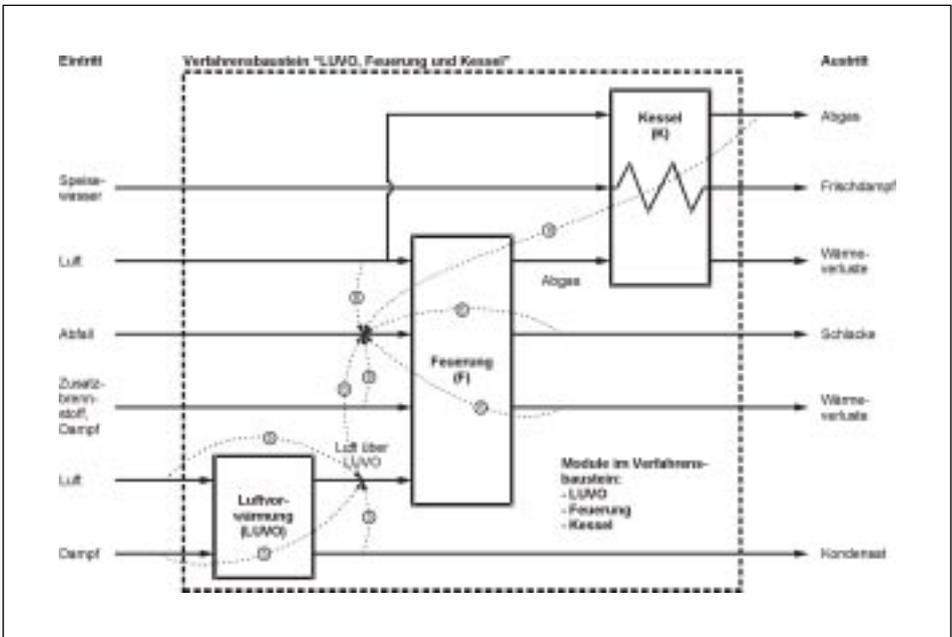


Bild 4: Bilanzierung des Verfahrensbausteins *LUV, Feuerung und Kessel* – im Müllheizkraftwerk Schwandorf verwendeter Berechnungsablauf Schritt 5 und 6 (Darstellung der wesentlichen Massen- und Energieströme)

Im Schritt 6 lässt sich schließlich der Heizwert des auf dem Rost befindlichen Abfalls rechnerisch bestimmen.

In gleicher Weise sind für die übrigen Module der jeweiligen Verfahrensabschnitte, ausgehend von den zur Verfügung stehenden Messwerten und bekannten Parametern, Berechnungsstrategien entwickelt und in dem Online-Bilanzierungsprogramm umgesetzt worden [1].

Kap. 2.3.

Anbindung des Online-Bilanzierungsprogramms an die Leittechnik der Anlage

Im Müllheizkraftwerk Schwandorf wird die Anbindung des Programms unmittelbar an die Leittechnik über einen eigens hierfür installierten OPC-Server³ realisiert. Dadurch werden die aktuellen Messwerte ohne Umwege über eine Datenbank für die Bilanzierung verfügbar gemacht.

Für die Bilanzierung ist zu berücksichtigen, dass nur validierte Messwerte in die Berechnung einfließen dürfen. Die Messdatenvalidierung wird innerhalb des Online-Bilanzierungsprogramms in folgenden Schritten durchgeführt:

- Einlesen des Messdatensignals über die OPC-Serveranbindung,
- Umrechnen des Messdatensignals entsprechend der Einstellung des Messgerätes falls erforderlich,
- Überprüfung des Messwertes, ob dieser innerhalb eines individuell festgelegten Messwertbereiches liegt (Unter- und Obergrenze) und
- Überprüfung des Messwertes, ob dieser – wenn als Leitparameter (s. unten) festgelegt – einem quasistationären Zustand zugeordnet werden kann.

Weiter ist es für die Bilanzierung erforderlich, dass sich die Anlage zu dem betrachteten Zeitpunkt in einem quasistationären Zustand, d.h. einem **Beharrungszustand** befindet. Instationäre Vorgänge – z.B. das Aufheizen und Abkühlen von Wärmetauscherflächen oder das Speichern und Entspeichern von Behältern – werden in dem Online-Bilanzierungsprogramm nicht berücksichtigt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass alle für die Berechnung verwendeten Messwerte – im vorliegenden Fall 285 Messgrößen – zu einem bestimmten Zeitpunkt einem Beharrungszustand zugeordnet werden können, der den Kriterien eines Abnahmeversuches für Dampfkraftwerke nach Richtlinie VDI 3986 [4] entspricht, ist im laufenden Anlagenbetrieb gering. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass nicht alle Messwerte einen relevanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse, insbesondere auf den Anlagenwirkungsgrad, haben.

³ 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.

In dem hier vorgestellten Online-Bilanzierungsprogramm wird deshalb in

- Messwerte, die repräsentativ für das dynamische Anlagenverhalten sind und relevanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben – im Folgenden *Leitparameter* genannt – und
- Messwerte, bei denen dies nicht der Fall ist

unterschieden.

Für die Leitparameter wird eine Überprüfung auf die Einhaltung des quasi-stationären Betriebszustandes nach Richtlinie VDI 3986 [4], allerdings mit höher gewählten Toleranzkriterien, durchgeführt (Kapitel 3.2.). Messwerte, die keine Leitparameter darstellen, werden einer Varianzanalyse nach Richtlinie VDI 2048 [5] (Prüfung der Konfidenzintervalle) unterzogen. Dabei stellt die Varianz kein Prüfkriterium für den Beharrungszustand dar, sondern wird nur für zusätzliche Auswertungszwecke mit zur Verfügung gestellt.

Der aktuelle Betriebszustand wird nur dann berechnet, wenn sich ein wie vorstehend geschilderter Beharrungszustand für alle Leitparameter einstellt.

Kap. 3.

Ergebnisse der Bilanzierung, Bewertung

Betriebsdatenerfassungssysteme zeigen die aktuell in der Anlage vorliegenden Messwerte sowie deren zeitliche Verläufe an. Dies betrifft z.B. Luft- und Abgasvolumenströme, Abgaskonzentrationen, Dampfmengen und Dampfparameter.

Kap. 3.1.

Ergebnisse der Bilanzierung

Mit dem 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.

Von besonderem Interesse sind dabei:

- Wirkungsgrade für die Gesamtanlage (gesamt, elektrisch, thermisch) und für Teilbilanzkreise (Kesselwirkungsgrad, Turbinen, Kondensatvorwärmung usw.),
- Massenstrom, Zusammensetzung und Heizwert des Abfalls auf dem Rost,

- Eintritt von Prozess- und Falschlufft in die Feuerung und den Kessel sowie in die Apparate der Abgasreinigung,
- Luftvolumenströme und Luftvorwärmtemperaturen vor der Feuerung,
- usw.

Damit steht dem Betriebspersonal eine Vielzahl zusätzlicher Informationen für die Optimierung der Fahrweise der Anlage zur Verfügung. Weiter ist auch die direkte Einbindung dieser Informationen als zusätzliche Regelgrößen in bestehende Regelungskonzepte der Anlage möglich (z.B. Einbindung des Abfallheizwerts in die Feuerungsleistungsregelung).

Von den vorgenannten Größen, die von dem Online-Bilanzierungsprogramm ermittelt werden, wird hier zunächst auf den Anlagenwirkungsgrad (gesamt, thermisch und elektrisch) eingegangen. Bei dem Gesamtanlagenwirkungsgrad wird die Summe der Nutzenergie auf die Summe aller eintretenden Energien bezogen.

Bei den eintretenden Energieströmen kann grob in die Energieströme Abfall (etwa 80 % des Gesamtenergieinputs), Zusatzenergie (elektrisch, etwa 5 %), Kondensat aus der Dampfabgabe (etwa 5 %) und dem Rücklauf Fernwärmewasser (etwa 10 %) unterschieden werden. Als Nutzenergie werden in der Anlage Schwandorf thermisch (Nieder- und Hochdruckdampf, Vorlauf Fernwärme und sonstige Verbraucher) etwa 45 % des Gesamtenergieinputs und elektrische Energie (etwa 15 %) abgegeben.

Die im Folgenden diskutierten Anlagenwirkungsgrade sind mit Bezug auf Bild 1 wie folgt definiert:

$$\eta_{A, \text{gesamt}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\sum \dot{E}_{\text{Nutzenergie}}}{\sum \dot{E}_{\text{Eintritt}}} = \frac{\sum \dot{E}_{\text{Nutzenergie, elektrisch}} + \sum \dot{E}_{\text{Nutzenergie, thermisch}}}{\sum \dot{E}_{\text{Eintritt}}} \quad (1),$$

$$\eta_{A, \text{elektrisch}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\sum \dot{E}_{\text{Nutzenergie, elektrisch}}}{\sum \dot{E}_{\text{Eintritt}}} \quad (2)$$

und

$$\eta_{A, \text{thermisch}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\sum \dot{E}_{\text{Nutzenergie, thermisch}}}{\sum \dot{E}_{\text{Eintritt}}} \quad (3).$$

Bild 5 zeigt beispielhaft für den Zeitraum von eineinhalb Stunden die mit dem Online-Bilanzierungsprogramm ermittelten Anlagenwirkungsgrade für das Müllheizkraftwerk Schwandorf. Aus dem Verlauf ist zunächst zu erkennen, dass

- sich ein Gesamtanlagenwirkungsgrad von etwa 60 % ergibt,
- der Gesamtanlagenwirkungsgrad innerhalb des kurzen Zeitraumes von eineinhalb Stunden um etwa 3,5 % (absolut) schwankt, und
- die Schwankungen eine aus energiewirtschaftlicher Sicht relevante Größenordnung darstellen.

Im Hinblick auf die Optimierung der Anlage ergeben sich nun Fragestellungen zu den Ursachen dieser Schwankungen des Anlagenwirkungsgrades. Um diese Fragestellungen zu untersuchen, ist es erforderlich, die Zusammenhänge zwischen dem jeweiligen Anlagenwirkungsgrad und dem zugehörigen Anlagenbetriebszustand näher zu betrachten. Der Anlagenbetriebszustand kann durch eine Reihe von Messgrößen sowie durch Werte, die mit dem Online-Bilanzierungsprogramm berechnet werden, charakterisiert werden.

Das Online-Bilanzierungsprogramm wurde Mitte Januar 2005 das erste Mal in Betrieb genommen. Insofern handelt es sich hier um erste Ergebnisse, eine weitere Analyse steht derzeit noch aus. Die Schwankungen im Gesamtanlagenwirkungsgrad sowie im elektrischen und thermischen Anlagenwirkungsgrad können im vorliegenden Fall in bestimmten Zeitabschnitten jedoch bereits anhand einzelner, ebenfalls mit dem Online-Bilanzierungsprogramm ermittelter Größen – Massenstrom und Heizwert des Abfalls sowie Energieabgabe gesamt, thermisch und elektrisch – diskutiert werden.

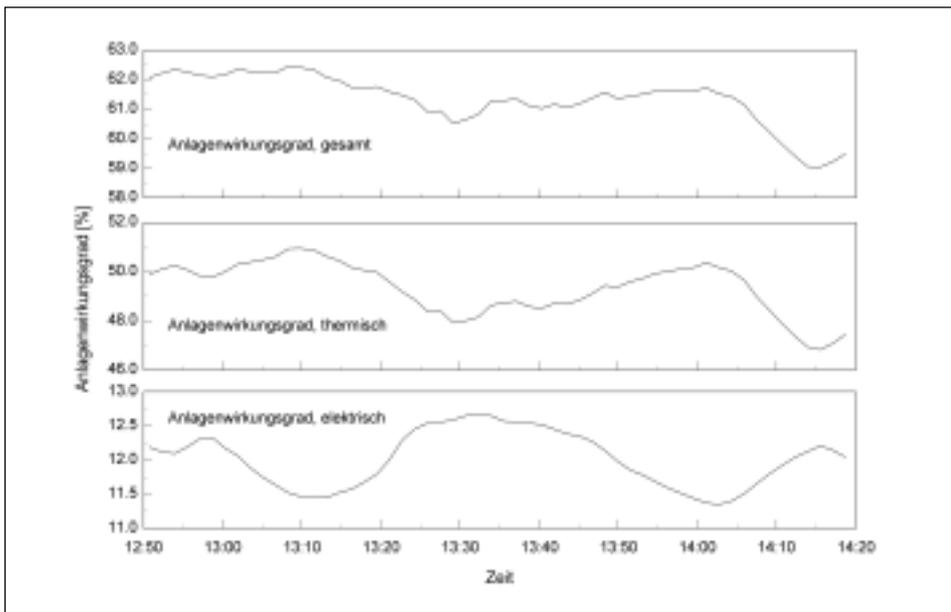


Bild 5: Berechnete Anlagenwirkungsgrade für das Müllheizkraftwerk Schwandorf, am 11.01.2005 um 12:50 bis 14:20 Uhr

Dies soll hier beispielhaft anhand des Zeitabschnittes 13:00 bis 13:10 Uhr (am 11.01.2005) in Verbindung mit einer betrieblichen Störung der Ofenlinie 1 geschehen. Im betrachteten Zeitraum sind die Ofenlinien 2 und 3 annähernd konstant. D.h., dass Änderungen in den Anlagenwirkungsgraden hauptsächlich auf Änderungen im Betrieb der Ofenlinie 1 zurückzuführen sind. Die Ofenlinie 4 war in diesem Zeitabschnitt außer Betrieb.

Zunächst zeigt sich, dass im Zeitraum 13:00 bis 13:10 Uhr der thermische Anlagenwirkungsgrad nur gering zunimmt (von 50 % auf 51 %) und der elektrische Anlagenwirkungsgrad ebenfalls nur gering abnimmt (von 12,5 % auf 11,5 %). In diesem Zeitraum bleibt der Gesamtanlagenwirkungsgrad näherungsweise konstant bei 62 %.

Wird die insgesamt abgegebene Energie betrachtet, so ergibt sich hier im betrachteten Zeitraum 13:00 Uhr bis 13:10 Uhr eine deutliche Verminderung der abgegebenen Energie ist auf einen ebenfalls deutlich verminderten Abfallenergiestrom und den daraus resultierenden verminderten Frischdampfenthalpiestrom zurückzuführen (s. unten). Im vorliegenden Zeitabschnitt wird insbesondere weniger elektrische Energie (Voraussetzung: Hochdruckdampf) erzeugt. Im Bezug auf den Gesamtwirkungsgrad ist anzumerken, dass mit einem Rückgang der Erzeugung elektrischer Energie auch eine Abnahme der absoluten Umwandlungsverluste verbunden ist. Im vorliegenden Fall handelt es sich nicht um eine Verschiebung von elektrischer und thermischer Energie.

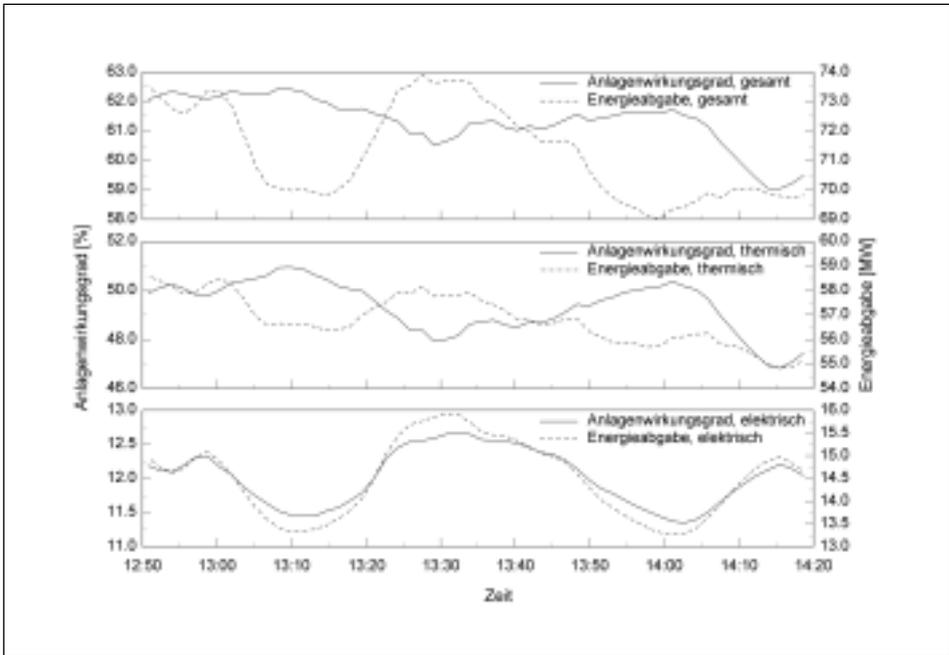


Bild 6: Anlagenwirkungsgrade im Vergleich zur Energieabgabe für das Müllheizkraftwerk Schwandorf

Bild 7 zeigt für die Ofenlinie 1 die Verläufe von Massenstrom und Heizwert des Abfalls, der Sauerstoffkonzentration nach Kessel und dem Abgasvolumenstrom nach Gewebefilter. Die Ursache für die im Zeitraum 13:00 bis 13:10 Uhr eingetretene Verminderung der produzierten Frischdampfmenge von etwa 42 auf 32 t/h ist, wie aus Bild 7 hervorgeht, auf die Abnahme des auf dem Rost umgesetzten Abfalls bei näherungsweise gleichbleibendem Heizwert zurückzuführen. D.h., der mit dem Abfall zugeführte Enthalpiestrom verringert sich damit insgesamt. Die Verminderung des Massenstroms Abfall ist im vorliegenden Fall auf eine Störung zurückzuführen. Diese Störung macht sich im Gesamtanlagenwirkungsgrad im selben Zeitraum zunächst nicht bemerkbar.

Der weitere Verlauf des Anlagenwirkungsgrades kann nicht mehr nur aufgrund des Anlagenzustandes der Ofenlinie 1 ausgewertet werden, da in dem folgenden Zeitbereich auch bei der Ofenlinie 2 und 3 Änderungen im Betriebszustand aufgetreten sind. Die Auswertung und die Interpretation werden damit komplexer und bedürfen noch einer weiteren Analyse.

Wie bereits erwähnt, wird der Betriebszustand in Müllheizkraftwerken derzeit i.d.R. durch das Anlagenpersonal über die in der Anlage erfassten Messwerte beschrieben. Diese werden über die Leittechnik der Anlage erfasst, und meist

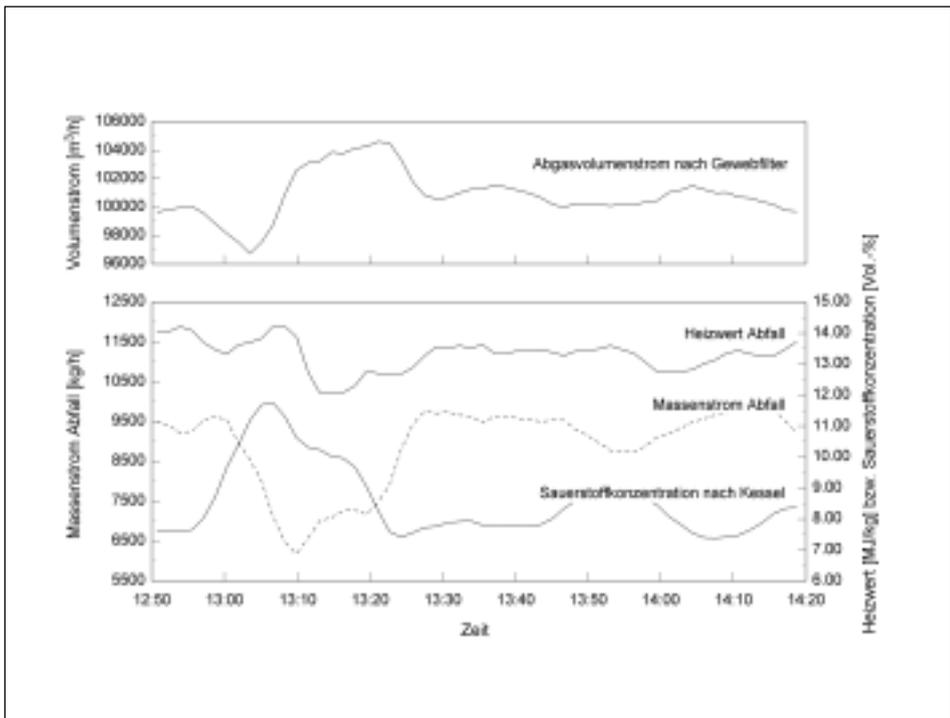


Bild 7: Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration nach Kessel, Massenstrom und Heizwert des auf dem Rost befindlichen Abfalls (unten) und Abgasvolumenstrom nach Gewebefilter (oben), Ofenlinie 1

über Betriebsdatenerfassungssysteme als aktuelle Werte oder im zeitlichen Verlauf angezeigt. Durch den Einsatz des hier dargestellten Online-Bilanzierungsprogramms ist es möglich, nicht nur die Messwerte selbst, sondern auch weitere, aus den Messwerten berechnete Werte⁴ darzustellen und in die Analyse einzubeziehen. Mit beiden – den gemessenen und den berechneten Werten (hier zusammengefasst als Betriebsgrößen bezeichnet) – kann nun der aktuelle Betriebszustand umfassender beschrieben werden.

Diese umfassende Beschreibung des Betriebszustandes ist u.a. vor dem Hintergrund der *vorausschauenden* Beeinflussung des Anlagenwirkungsgrades im Sinne der Optimierung hilfreich. Je mehr Betriebsgrößen zur Verfügung stehen, umso besser können die verschiedenen Wechselwirkungen beschrieben werden. Hierfür sind allerdings noch weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Kap. 3.2.

Bewertung der Bilanzierungsergebnisse

Für die Bewertung der Bilanzierungsergebnisse ergeben sich insbesondere zwei Fragestellungen bezüglich des Einflusses

- der Messungenauigkeiten und
 - der Toleranzkriterien auf die *Findung* des Beharrungszustandes
- auf die Berechnungsergebnisse, die im Folgenden erörtert werden.

Einfluss der Messungenauigkeiten auf die Berechnungsergebnisse

Von besonderer Bedeutung für die Bilanzierungsergebnisse ist der Einfluss der unvermeidbaren Messungenauigkeiten. So unterliegt jeder Messwert x_i der Messgröße X_i einer Vielzahl systematischer Einflüsse – z.B. Einbaufehler bei Temperaturmesssonden im Querschnitt des Abgaskanals – und unvermeidbarer zufälliger Einflüsse – Störungen, Umgebungseinflüsse. Der Messwert weicht damit immer mehr oder weniger vom *wahren* Wert der Messgröße ab. Der *beste* Schätzwert für den wahren Wert μ_i stellt der arithmetische Mittelwert $\bar{x}_{i,n}$ aus einer Anzahl n Einzelmesswerte x_i dar:

$$\bar{x}_{i,n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4).$$

⁴ über Massen-, Stoff- und Energiebilanzen für die einzelnen Anlagenteile und Teilsysteme

Der Fehler

$$\mu_i - \bar{X}_{i,n} \quad (5)$$

einer einzelnen Messgröße geht in die Berechnung der aus dieser Messgröße weiter berechneten Größen ein. Die Kombination der Fehler kann über das Fehlerfortpflanzungsgesetz ermittelt werden. Dies betrifft nicht nur die Ergebnisse der Bilanzierung selbst, sondern auch die Ergebnisse temperaturabhängiger Stoffwertberechnungen, wie spezifische Wärmekapazitäten oder auch Ergebnisse aus den im Online-Bilanzierungsprogramm hinterlegten Wasserdampfatafeln. Hier soll beispielhaft auf die Genauigkeit der Berechnung des Anlagenwirkungsgrades eingegangen werden:

Wie bereits dargestellt, wird der Gesamtanlagenwirkungsgrad hauptsächlich aus folgenden Größen ermittelt:

- am Eintritt: Enthalpiestrom des Abfalls, Enthalpiestrom des Kondensates aus der Dampfabgabe, Rücklauf Fernwärmewasser und Zusatzenergien,
- am Austritt: Energiestrom der erzeugten elektrischen Energie, Enthalpiestrom des abgegebenen Nieder- und Hochdruckdampfes und Vorlauf Fernwärmewasser.

Der so genannte Vertrauensbereich – das Konfidenzintervall $V_{\eta, A, G}$ – für den Anlagenwirkungsgrad – d.h. der Bereich, in dem mit einer statistischen Sicherheit p (p wird üblicherweise mit 95 % angesetzt) der wahre Wert für den Anlagenwirkungsgrad liegt – kann über das Fehlerfortpflanzungsgesetz aus den Ausgangsgrößen für die Wirkungsgradermittlung einschließlich deren Vertrauensbereichen berechnet werden. Der für die Messstellen selbst anzusetzende Vertrauensbereich lässt sich u.a. der Richtlinie VDI 3986 [4] entnehmen. Dort sind z.B. für verschiedene Messungen folgende Vertrauensbereiche angegeben: Massenströme ± 1 %, Temperaturmessungen ± 1 K, Druckmessungen (Überdruck) $\pm 0,25$ %, elektrische Leistungen $\pm 0,6$ % usw. Bei Annahme eines Vertrauensbereiches von ± 1 % für die Ausgangsgrößen für die Ermittlung des Anlagenwirkungsgrades ergibt sich der in Bild 8 dargestellte Verlauf.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass auch Bilanzierungsfehler, die durch eine messtechnische Überbestimmung des jeweiligen zu berechnenden Bilanzraumes entstehen, mit Hilfe eines geeigneten Bilanzausgleichsverfahrens behoben werden müssen (Berechnung der so genannten ausgeglichenen Messwerte). In der Anlage Schwandorf entstehen Bilanzfehler z.B. bei der Bilanzierung der Hochdruckschiene, an der alle ein- (Frischdampf von den Kesseln) und austretenden Massenströme (Frischdampf zu den Turbinen, zur Entstickungsanlage, zur Abgabe usw.) sowie die zugehörigen Dampfparameter gemessen werden. Der Bilanzfehler bewegt sich insgesamt, sowohl für die Massen- als auch für die Energiebilanz, im Bereich 1 bis 2 %, wodurch Bild 8 Gültigkeit behält. Der genaue Einfluss der ausgeglichenen Messwerte auf das Bilanzierungsergebnis ist noch zu untersuchen.

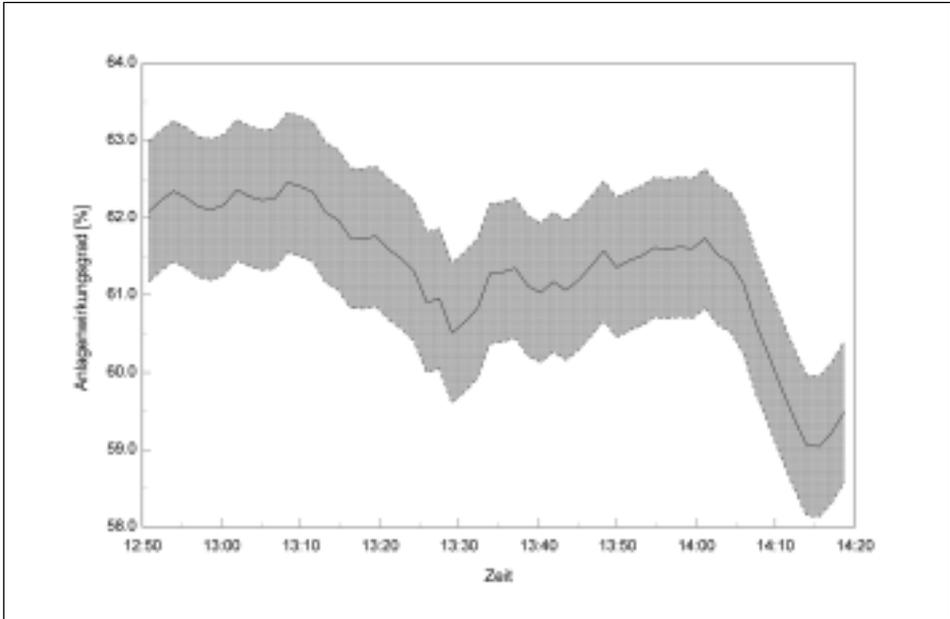


Bild 8: Gesamtanlagenwirkungsgrad für das Müllheizkraftwerk Schwandorf einschließlich dem berechneten Vertrauensbereich bei Annahme von $\pm 1\%$ für die Vertrauensbereiche der Ausgangsgrößen für die Wirkungsgradermittlung

Einfluss der Toleranzkriterien auf die Findung des Beharrungszustandes

Gemäß Richtlinie VDI 3986 [4] kann von einem quasistationären Betriebszustand ausgegangen werden, wenn für eine bestimmte Messgröße X_i die Abweichung des Mittelwertes der Messwerte aus der Gesamtanzahl Messvorgänge n und des Mittelwertes der Messwerte dieser Anzahl abzüglich einem Messvorgang ($n - 1$):

$$\bar{x}_{i,n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{und} \quad \bar{x}_{i,n-1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i}{n-1} \tag{6 a, b}$$

kleiner als eine für die Messgröße festzulegende Genauigkeit ϵ_i ist:

$$\left| \frac{\bar{x}_{i,n} - \bar{x}_{i,n-1}}{\bar{x}_{i,n}} \right| = \left| \frac{\Delta \bar{x}_i}{\bar{x}_{i,n}} \right| < \epsilon_i \tag{7}$$

In der Richtlinie VDI 3986 werden als Toleranzen bei zeitlichen Mittelwertbildungen für Druck- und Massenstrommessungen $\epsilon_i = 0,05 \%$ vorgeschlagen⁵. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Feststellung des stationären Zustandes für eine bestimmte Messung nach 15 bis 25 Messzyklen erreicht sein sollte.

Da der hier beschriebene Anlagenbetrieb ständigen Schwankungen unterworfen ist, muss für die Genauigkeit ϵ_i im Vergleich z.B. zu Abnahmeversuchen ein entsprechend höherer Wert gewählt werden. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass ϵ_i für alle als Leitparameter definierten Messgrößen gleich groß sein sollte. Bei einem hohen ϵ_i werden entsprechend mehr Beharrungszustände gefunden als bei einem niedrigen ϵ_i . Tabelle 1 zeigt für den Zeitraum 12:50 Uhr bis 14:20 Uhr (am 11.01.2005) beispielhaft verschiedene ϵ_i für die Findung einer vorgegebenen Anzahl von Beharrungszuständen bei der Verwendung von 10 und von 15 Werten für die Berechnung der Mittelwerte ($\bar{x}_{i, n=10}$ und $\bar{x}_{i, n=15}$) für die Messwertauswertungsprozedur.

Tabelle 1: Beispiel für den Anteil der *gefundenen* Beharrungszustände an den maximal möglich auffindbaren Beharrungszuständen in Abhängigkeit von der Anzahl n der für die Berechnung verwendeten Mittelwerte (n = 10 und n = 15)

	Einheit	Wert					
Anteil der <i>gefundenen</i> Beharrungszustände	%	0	5	10	20	50	100
Genauigkeit $\epsilon_{i, n=10}$	%	< 0,422	0,591	0,733	0,908	1,600	5,380
Genauigkeit $\epsilon_{i, n=15}$	%	< 0,325	0,464	0,543	0,706	1,148	3,479

Bild 9 zeigt, dass

- die Anzahl der auswertbaren Anlagenzustände mit sinkendem ϵ_i und geringem Umfang n der für die Berechnung der Mittelwerte herangezogenen Messwerte kleiner wird, und
- damit einhergehend nur in größeren Abständen Anlagenzustände berechnet werden können, d.h. Extremfälle u.U. nicht abgebildet werden.

Weiterhin zeigt sich, dass

- die unter Berücksichtigung des Beharrungszustandes ermittelten Anlagenzustände nur wenig von den Ergebnissen ohne Berücksichtigung des Beharrungszustandes abweichen.

⁵ Das vorgeschlagene Toleranzkriterium für Temperaturmessungen beträgt absolut 0,1 K. Temperaturmessungen werden hier für die Vereinheitlichung der Auswertungsprozedur gleichfalls über die Ermittlung der relativen Abweichung (in %) ausgewertet.

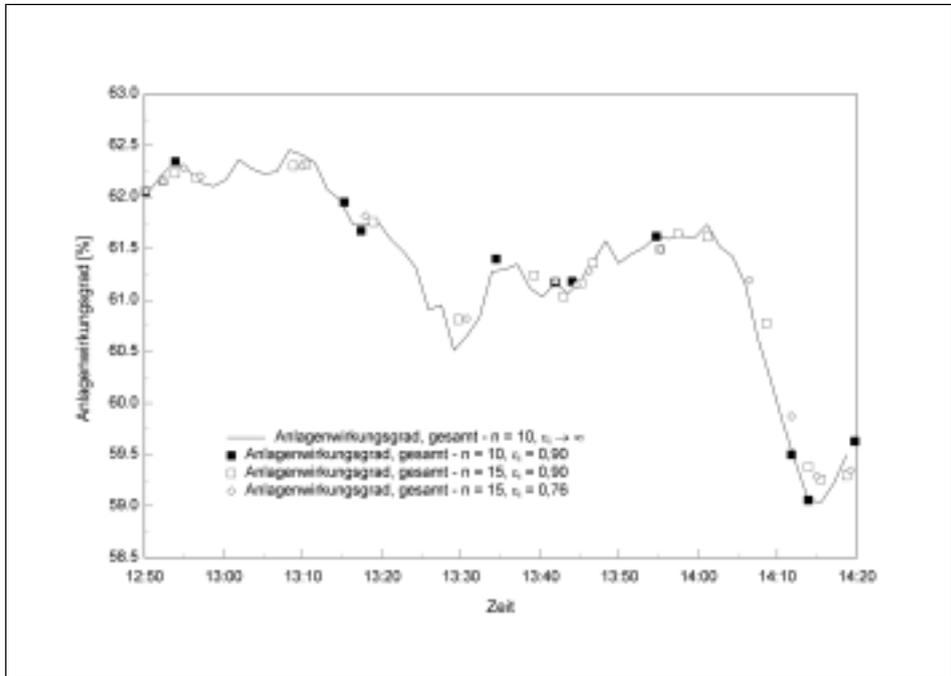


Bild 9: Einfluss der Berücksichtigung des Beharrungszustandes in Abhängigkeit verschiedener Genauigkeiten ϵ_i und Anzahlen n der für die Mittelwertbildung verwendeten Messwerte

Kap. 4.

Weiteres Vorgehen

Das hier vorgestellte Online-Bilanzierungsprogramm wird derzeit im Müllheizkraftwerk Schwandorf erprobt und weiter validiert. Im weiteren Verlauf des Projektes *EU24 – Wirkungsgrad von Abfallverbrennungsanlagen; technische, ökologische und ökonomische Optimierung* wird das Programm außerdem in den Müllheizkraftwerken Burgkirchen und Coburg eingesetzt. Dabei wird bei der Erstellung der Benutzeroberfläche sowie der Berechnungsalgorithmen auf Berechnungsmodule und -bausteine zurückgegriffen, die zuvor bei der Projektbearbeitung in Schwandorf erstellt wurden bzw. derzeit werden. Dadurch kann die Konfiguration und Anpassung des Programms an andere Anlagen (einfache Übertragbarkeit) insgesamt in kürzerer Zeit vorgenommen werden.

Durch die Anwendung einer einfach zu erschließenden Benutzeroberfläche kann das Programm durch das Betriebspersonal ohne großen Aufwand angepasst und gleichzeitig auch in einzelnen Teilbilanzkreisen weiter detailliert werden (z.B. Speisewasserkreislauf, Abwasserreinigung usw.). Dies ist insbesondere dort von Vorteil, wo zusätzliche, u.U. auch schon in den Anlagen bestehende Auswertungsschritte eingefügt werden sollen. Bei der Auswertung der Berechnungsergebnisse

hat sich gezeigt, dass das Online-Bilanzierungsprogramm auch sehr gut geeignet ist, Abweichungen und Widersprüche in der Messdatenerfassung zu ermitteln. Dies ist in Müllheizkraftwerken bisher nicht ohne weiteres möglich da die verwendeten Betriebsdatenerfassungssysteme i.d.R. nicht über eine Plausibilitätsprüfung verfügen.

Um über die Abbildung des Ist-Zustandes hinaus die Auswirkungen der komplex ineinander greifenden, wesentlichen betrieblichen Einflussgrößen sowie den Einfluss unterschiedlicher Anlagenkonfigurationen für eine Optimierung der Gesamtanlage beurteilen zu können, ist das Programm im Hinblick auf eine Online-Optimierung auf der Basis von vereinfachten Berechnungsansätzen (für Feuerung, Kessel, Abgasreinigung usw.) in einem nächsten Schritt zu erweitern. Insgesamt entsteht für das Betriebspersonal damit ein Werkzeug, mit dem der Anlagenbetrieb auf Grundlage der umfassenden Kenntnis des aktuellen Betriebszustandes im Hinblick auf Energieeffizienz, Erhöhung der Durchsatzleistung, Korrosion, Betriebskosten usw. verbessert werden kann.

Kap. 5.

Zusammenfassung

In Müllheizkraftwerken können infolge schwankender Abfallzusammensetzungen am Eintritt in die Anlage und Änderungen der Energieabnahme am Austritt unterschiedliche Betriebszustände auftreten.

Zur Anlagenoptimierung sind für den jeweiligen Betriebszustand möglichst detaillierte Stoff-, Massen- und Energiebilanzen sowie weitere Informationen zum Anlagenverhalten erforderlich. Die in modernen Müllheizkraftwerken über die Leittechnik messtechnisch erfassten Daten bezüglich Stoff- und Energieströmen sind i.d.R. geeignet, um mit Hilfe von verfahrenstechnischen Bilanzierungsmodellen und Berechnungsmethoden eine Online-Bilanzierung von einzelnen Verfahrensbausteinen und damit auch der Gesamtanlage durchzuführen. Eine solche Darstellung des Ist-Zustandes ist in Müllheizkraftwerken gegenwärtig noch nicht verfügbar.

Im Rahmen des Projektes *EU24 – Wirkungsgrad von Abfallverbrennungsanlagen; technische, ökologische und ökonomische Optimierung*, das durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert wird, wird der betriebliche Ist-Zustand in den Müllheizkraftwerken Schwandorf, Burgkirchen und Coburg mit Hilfe eines Online-Bilanzierungsprogramms dargestellt.

Damit wird das Betriebspersonal in die Lage versetzt, weitere Betriebsoptimierungen zunächst manuell durchzuführen. Ziele dieser manuellen Optimierung sind die Steigerung der Energieeffizienz, der sparsame Umgang mit Zusatzstoffen, die Verlängerung der Reisezeiten und damit insgesamt die Verbesserung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses.

Kap. 6.

Symbolverzeichnis und Abkürzungen

Symbole und Abkürzungen

Δ	Differenz
ε	Genauigkeit für die Prüfung auf den Beharrungszustand
η	Wirkungsgrad
μ	wahrer Wert einer Messgröße
AGR	Abgasreinigung
CDAS	Conditioned Dry Absorption System
E	Energie
F	Feuerung
LUV0	Luftvorwärmung
K	Kessel
n	Anzahl
OPC	Object Linking and Embedding for Process Control
p	Wahrscheinlichkeit
V	Konfidenzintervall
x	Messwert (für die jeweilige Messgröße)
X	Messgröße

Indizes tiefgestellt

η	Wirkungsgrad
A	Anlage
elektrisch	elektrische Nutzenergie
G	Gesamt
i	Index für die jeweilige Messgröße und den zugehörigen Messwert
thermisch	thermische Nutzenergie

Indizes hochgestellt

–	Mittelwert
•	Strom (Massen-, Energiestrom usw.)

Kap. 7.

Quellen

- [1] 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. Zwischenbericht 2004, erstellt für das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz
- [2] Metschke, J.: Kostenoptimierung bei thermischen Abfallbehandlungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): *Optimierung der Abfallverbrennung 2*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, in diesem Buch
- [3] 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
- [4] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): VDI 3986 – Ermittlung des Wirkungsgrades von konventionellen Kraftwerken. Berlin: Beuth Verlag, Oktober 2000
- [5] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): VDI 2048, Blatt 1 – Messunsicherheiten bei Abnahmemessungen an energie- und kraftwerkstechnischen Anlagen – Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag, Oktober 2000