

## Optimierung der Online-Reinigung

Slawomir Rostkowski, Michael Beckmann und Norbert Tanner

1.	Stand der Forschung und Technik.....	337
2.	Messung in MHKW Kassel.....	339
3.	Ausblick.....	343
4.	Literatur.....	343

Die Verfügbarkeit von Abfall-, Ersatzbrennstoff- und Biomasseverbrennungsanlagen ist deutlich von den Reisezeiten geprägt, die im Wesentlichen durch Abstellungen zur Reinigung von Heizflächen begrenzt sind. Die Ablagerungen an den Heizflächen führen zu einer Verminderung der Wärmeübertragung vom Abgas in den Wasser-Dampf-Kreislauf und können außerdem die Korrosion der Heizflächen beschleunigen.

Um die gewünschten Reisezeiten einhalten zu können, werden die Heizflächen während des Betriebs gereinigt. Bei der Reinigung der Strahlungszüge finden heutzutage die so genannten Wasserlanzenbläser Anwendung. Die Wirkung der Reinigung in den Strahlungszügen ist von den Reinigungsparametern und von den Eigenschaften der Belagsschicht abhängig. Die Reinigungsparameter sind: Wassermenge (durch Druck und Düsendurchmesser bestimmt), Verweilzeit des Wasserstrahls (abhängig von der Bewegung der Wasserlanze), Auftreffwinkel des Wasserstrahls und Reinigungszeitpunkt. Während die ersten zwei Parameter durch Auswahl und Einstellung des Reinigungssystems festgelegt sind und der Auftreffwinkel sich aus der Position der Wasserlanze gegenüber der zu reinigenden Wandfläche ergibt, wird der Reinigungszeitpunkt anhand der verfügbaren Betriebsdaten durch das Betriebspersonal bestimmt.

Zur Beurteilung des Verschmutzungsgrades des Kessels während des Betriebs und damit zur Bestimmung des Reinigungszeitpunkts wird heutzutage die Abgastemperatur genutzt. Diese steigt tendenziell mit wachsender Belagsschicht aufgrund der verschlechterten Wärmeauskopplung. Sie wird allerdings auch durch andere Faktoren beeinflusst, wie der Energieeintrag in den Kessel (Brennstoffdurchsatz, -heizwert) oder die Luftzufuhr.

Eine gezielte Reinigung der Stellen im Kessel, an denen die Ablagerungen einen für die Prozessführung relevanten, negativen Einfluss haben, ist anhand der herkömmlichen Betriebsdaten nicht möglich. Insbesondere in Müllheizkraftwerken aufgrund des sehr inhomogenen Brennstoffes wäre eine Online-Reinigung vorteilhaft, die sich nach dem aktuellen Verschmutzungsgrad der einzelnen Heizflächen richtet.

### 1. Stand der Forschung und Technik

Die Systeme zur Online-Reinigung von Dampferzeugern, darunter die Wasserlanzenbläser, sind heutzutage Stand der Technik. Sie werden sowohl in Biomasse- und Abfallverbrennungsanlagen, als auch in Kohlekraftwerken eingesetzt [10, 11].

In dem Block K des Braunkohlekraftwerks Niederaußem wurden zur zielgerichteten Ansteuerung der Online-Reinigungssysteme in der Brennkammer Infrarot-Kameras installiert. Mit den Infrarot-Kameras werden Wärmebilder der Brennkammerwandheizflächen aufgenommen. Diese stellen die Verteilung der Oberflächentemperatur dar. Da die Oberflächentemperatur mit der Isolationswirkung der Verschmutzungsschicht steigt, können damit verschmutzte Heizflächenbereiche lokalisiert und gezielt gereinigt werden. Dabei werden einzelne Blasfiguren abhängig von dem Verschmutzungszustand durch das Betriebspersonal ausgewählt und aktiviert. Der begrenzende Faktor beim Einsatz dieses Systems ist die Beeinflussung der Wärmebilder durch die Staubpartikel im Abgas [7].

Ein System zur gezielten Reinigung von Heizflächen, d.h. abhängig von der lokalen Belagsituation, wurde bereits für den konvektiven Teil (Überhitzerpakete) entwickelt und in einem Steinkohlekraftwerk getestet. In dem System wird eine Gewichtsmessung in Verbindung mit einer Online-Bilanzierungsrechnung zur Ermittlung des Verschmutzungsgrades einzelner Überhitzerheizflächen angewendet. Die Online-Bilanzierungsrechnung nutzt zur Bestimmung des Verschmutzungsgrades aktuelle Prozessdaten aus dem Wasser-/Dampfkreislauf und dem Abgasstrom. Je nach dem Verschmutzungszustand der jeweiligen Zonen, erfolgt die Ansteuerung der Reinigungsgeräte. Dies erlaubt eine selektive und bedarfsgerechte Abreinigung der Heizflächen, was zur Steigerung der Dampferzeugereffizienz führt [9].

Eine Untersuchung der Belagsbildung, sowie der Belagsabreinigung mit verschiedenen Reinigungsverfahren, in Abfallverbrennungsanlagen wurde im Rahmen eines VGB-Forschungsvorhabens [3] durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden HT-Endoskopieaufnahmen zur Visualisierung der Schichtdicke/Belagsausmaße und zur Überprüfung der Wirkung von Online-Reinigungsverfahren durchgeführt. Während der HT-Endoskopieeinsätze wurden bei laufendem Anlagenbetrieb Belagsproben von den Heizflächen im Kessel entnommen, um die Zusammensetzung und insbesondere den Chlorgehalt der Beläge mittels einer RFA-Analyse zu bestimmen. Außerdem wurde Belagsbildung auf den im Kesselzug eingesetzten Testrohren untersucht. Die für dieses Vorhaben relevanten Ergebnisse lassen sich, wie folgt zusammenfassen:

- die Reinigung mit Wasser (Shower-Cleaning-System) hat unterschiedliche Wirkung abhängig von der Anordnung der Heizfläche gegenüber der Düse,
- die antransportierte Belagsmenge hängt deutlich von Rohrdurchmesser und Abgasgeschwindigkeit ab,
- es wurde unterschiedlicher Chlorgehalt bei unterschiedlichen Abgas- und Mediumtemperaturen und abhängig von den Strömungsverhältnissen auf der Abgasseite festgestellt.

Eine weitergehende Untersuchung der Belageigenschaften war das Thema eines IGF-Forschungsvorhabens, das an der Ruhr-Universität Bochum, am Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik durchgeführt wurde. Das Forschungsvorhaben lässt sich in zwei wesentliche Projektbereiche, zum einen in die Untersuchung der Strahlungseigenschaften und zum anderen in die Untersuchung der thermischen Leitfähigkeit von Mineralphasen und Kraftwerksablagerungen, unterteilen. Im Rahmen dieses Projektes wurde den Prototyp einer Apparatur zur Untersuchung der Strahlungs- sowie der Leitfähigkeitseigenschaften von sehr heterogenen Materialien wie Aschen und Schlacken entwickelt [2].

In [4] sind die unmittelbaren Auswirkungen der Online-Reinigung mit Wasser auf den Prozess beschrieben. Der Reinigungsvorgang beeinflusst demnach kurzzeitig den Verbrennungsvorgang, verändert das Verhalten einiger Regelkreise und führt zu einer Absenkung der Dampfmenge, die durch die Belastungsregelung nach einigen Sekunden wieder ausgeglichen wird. Das eingeblasene kalte Wasser wirkt sich auf die Abgastemperatur, die

Abgasmenge und die übertragene Wärmemenge aus. Die Brennkammeraustrittstemperatur (bzw. Austrittstemperatur der Leerzüge) sinkt nach der Reinigung um etwa 50 K, während die Abgastemperatur nahezu konstant bleibt. Das Abgasvolumen erhöht sich und die Verdampferleistung sinkt. Darüber hinaus wird auf mögliche Werkstoffbeanspruchung durch Thermoschock-Effekte beim Auftreffen des Wasserstrahls auf die Heizflächen während der Online-Reinigung hingewiesen.

Ein dynamisches Modell der Belagsbildung in einem Kessel eines Kohlekraftwerks wird in [5] beschrieben. Mit dem Modell wird die Wirkung der Belagsbildung und der Online-Reinigung auf die Wärmeauskopplung entlang des Abgaswegs und die zugeführte Brennstoffmenge bei konstant gehaltener Kesselleistung untersucht. Anschließend wird eine Kostenrechnung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine Erhöhung der Abgastemperatur am Kesselaustritt und eine Erhöhung der zugeführten Brennstoffmenge mit fortschreitender Verschmutzung der Heizflächen. Das führt zur Senkung des Kesselwirkungsgrades. Die Online-Reinigung bewirkt das Gegenteil. Aus der Kostenrechnung wird das optimale Zeitintervall der Reinigung abgeleitet.

## 2. Messung in MHKW Kassel

Das Müllheizkraftwerk (MHKW) Kassel wurde mit einem System zur Ermittlung der lokalen Wärmestromdichte in Kesselwänden ausgerüstet. Die Bestimmung der Wärmestromdichte erfolgt über die Messung der Temperaturdifferenz zwischen dem feuerraumabgewandten Steg und dem Scheitel der Membranwand [8]. Anhand eines mathematischen Modells kann aus der gemessenen Temperaturdifferenz die Wärmestromdichte berechnet werden. Anhand des Messsignals ist es möglich, den lokalen Verschmutzungszustand und dessen Einfluss auf die Wärmeübertragung zu bewerten. Damit kann auch die Wirkung der Reinigung stellenbezogen bewertet werden.

Als weiteres Instrument zum Prozessmonitoring wurde im MHKW Kassel das so genannte Online-Bilanzierungsprogramm [6] installiert. Mit dem Online-Bilanzierungsprogramm kann der Anlagen-Ist-Zustand, hinsichtlich aller in die Anlage ein- und aus der Anlage ausgehenden Massen- und Energieströme, ermittelt werden. Damit ist eine zeitnahe Aussage zur Betriebscharakteristik möglich. Das Online-Bilanzierungsprogramm wurde im Rahmen des vom Freistaat Bayern geförderten Forschungsvorhabens EU24 *Wirkungsgrad von Abfallverbrennungsanlagen; technische, ökologische und ökonomische Bewertung* entwickelt [1]. Mit diesem Bilanzierungsprogramm können online u.a.:

- der aktuelle Brennstoffdurchsatz und Heizwert,
- der Kesselwirkungsgrad,
- der Anlagenwirkungsgrad, elektrisch, thermisch und gesamt,
- Wärmeleistung und Wirkungsgrad bestimmter Kesselkomponenten (Verdampfer, Überhitzer, Economiser)

ermittelt und dargestellt werden.

Damit ist es einerseits möglich, den Einfluss der Änderungen in der Anlage, wie speziell die Bildung und die Abreinigung der Belagsschichten, auf den Betriebszustand der Anlage zu analysieren. Andererseits können Ursachen der Betriebszustandsänderung, wie z.B. die Änderung der Abgastemperatur durch veränderten Brennstoffheizwert, identifiziert werden.

Das Ziel der im MHKW Kassel durchgeführten Messkampagne war, das Verhalten der Prozessgrößen einschließlich der lokalen Wärmestromdichte im Hinblick auf die Belagsbildung und die Online-Reinigungsmaßnahmen zu untersuchen. Die Ergebnisse sollen

zeigen, inwieweit die Signale der Wärmestromdichtemessung zur Bewertung des lokalen Verschmutzungszustandes und der Reinigungseffektivität geeignet sind. Gleichzeitig sollte geprüft werden, wie die bisher zur Bewertung des Verschmutzungszustandes genutzten Abgastemperaturen nach dem ersten Zug (Kesseldecke) und nach dem zweiten Zug (vor Überhitzer) durch die Belagsbildung und die Reinigung der Heizflächen und durch andere Faktoren beeinflusst werden. Die Anordnung der Wärmestromdichte-Sensoren, der Online-Reinigungssysteme und der relevanten Temperaturmessstellen im Kessel der Linie 2 des MHKW Kassel ist in Bild 1 dargestellt.

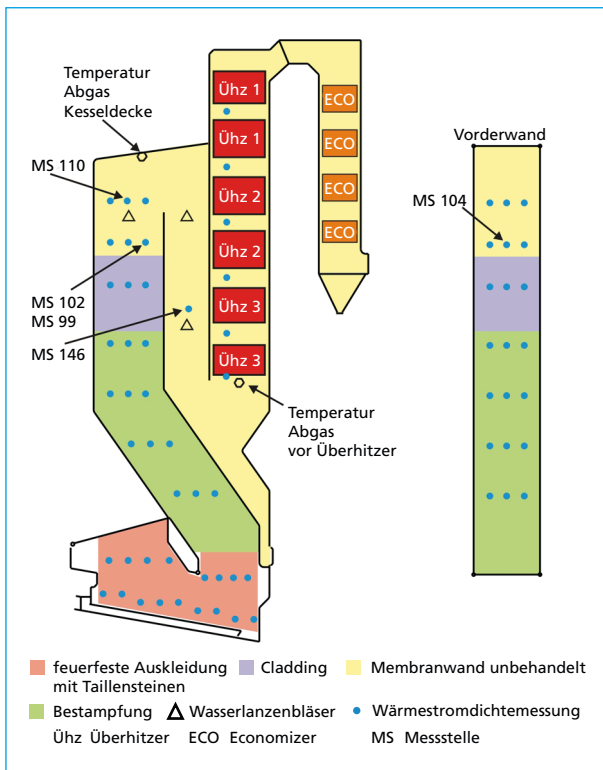


Bild 1:  
Kesselaufbau und relevante Messstellen

Die Signale der Wärmestromdichtemessung zeigen, dass die Kesselreinigung in den Strahlungszügen lokal eine sehr unterschiedliche Wirkung hat. In Bild 2 sind die Signalverläufe der Wärmestromdichtemessung für drei Messstellen dargestellt, die sich auf der gleichen Höhe des 1. Kesselzuges befinden. Während sich die Wärmeübertragung an den Messstellen 104 und 99 infolge der Reinigung deutlich verbessert (Signalsprung nach oben), kommt es an der Messstelle 102 lediglich zu einer kurzfristigen Abkühlung der Membranwand durch den Wasserstrahl (2 Signalsprünge nach unten), ohne dass danach die Wärmestromdichte steigt. Das deutet auf lokal unterschiedlichen Belagszustand bzw. auf unterschiedliche Qualität der Reinigungsmaßnahmen hin.

In Bild 3 ist der Verlauf des Messsignals der Wärmestromdichtemessung von einer Messstelle im 1. Zug (MS-110) und einer Messstelle im 2. Zug (MS-146) dargestellt. Darunter eingetragen sind die Abgastemperaturen nach dem ersten Zug (an der Kesseldecke) und nach dem zweiten Zug (vor Überhitzer) sowie der mittels Online-Bilanzierung ermittelte Enthalpiestrom des als Brennstoff zugeführten Abfalls.

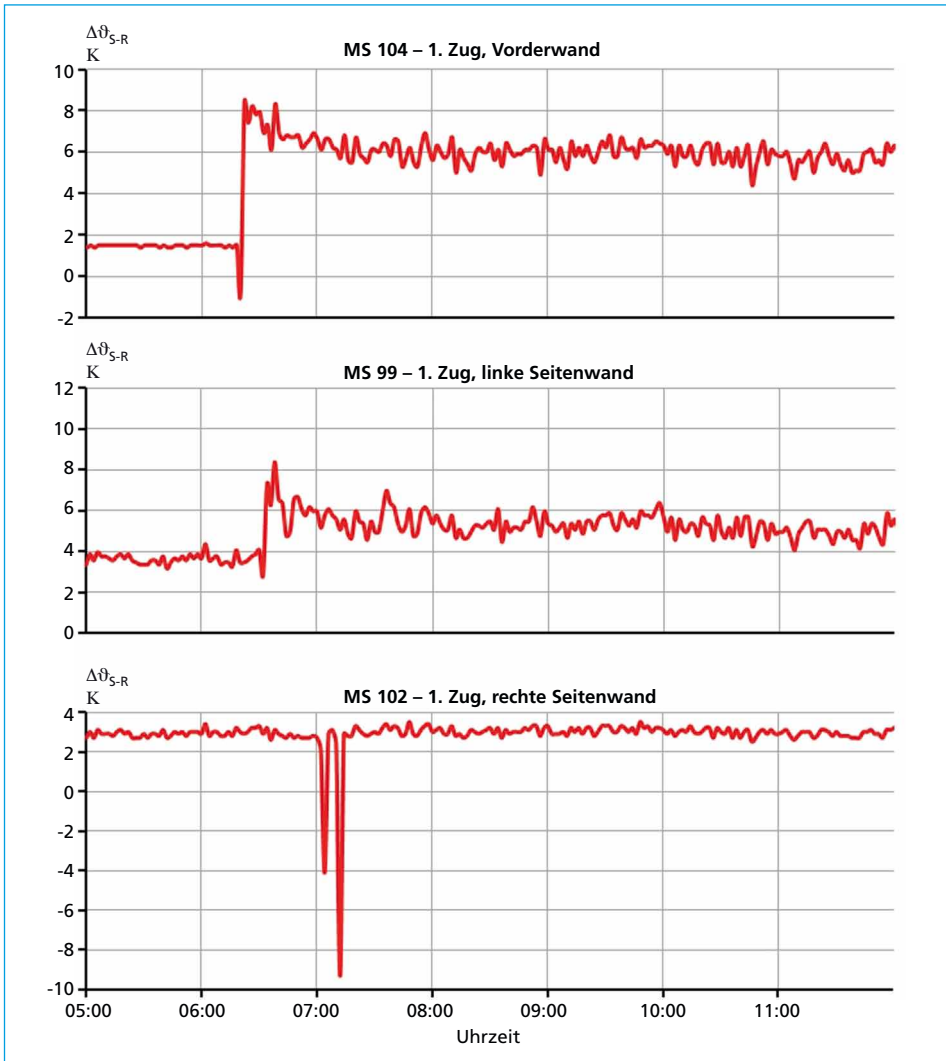


Bild 2: Unterschiedliches Verhalten der Messsignale der Wärmestromdichtemessung infolge der Online-Reinigung mit Wasser

Aus den Verläufen des Messsignals der Wärmestromdichtemessung ist die Wirkung der Belagsbildung und der Online-Reinigung gut zu erkennen. Die ersten zwei Sprünge des Messsignals von beiden Messstellen sind durch effektive Reinigung im ersten und im zweiten Zug verursacht. Das Messsignal der Messstelle MS-110 fällt nach beiden Reinigungsvorgängen infolge der Belagsbildung mit der Zeit ab. Das Messsignal der Messstelle MS-146 bleibt dagegen nach der zweiten Reinigung beinahe konstant. Die weiteren Reinigungsvorgänge im zweiten Zug verursachen lediglich kurzzeitige Abkühlung der Membranwand (Signalsprünge nach unten), aber keine Verbesserung der Wärmeauskopplung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass an der Stelle trotz geringer Verschmutzung gereinigt wurde. Dafür wurde in der gleichen Zeitperiode im ersten Zug keine Reinigung durchgeführt, obwohl das Messsignal auf eine starke Verschmutzung der Heizfläche deutet.

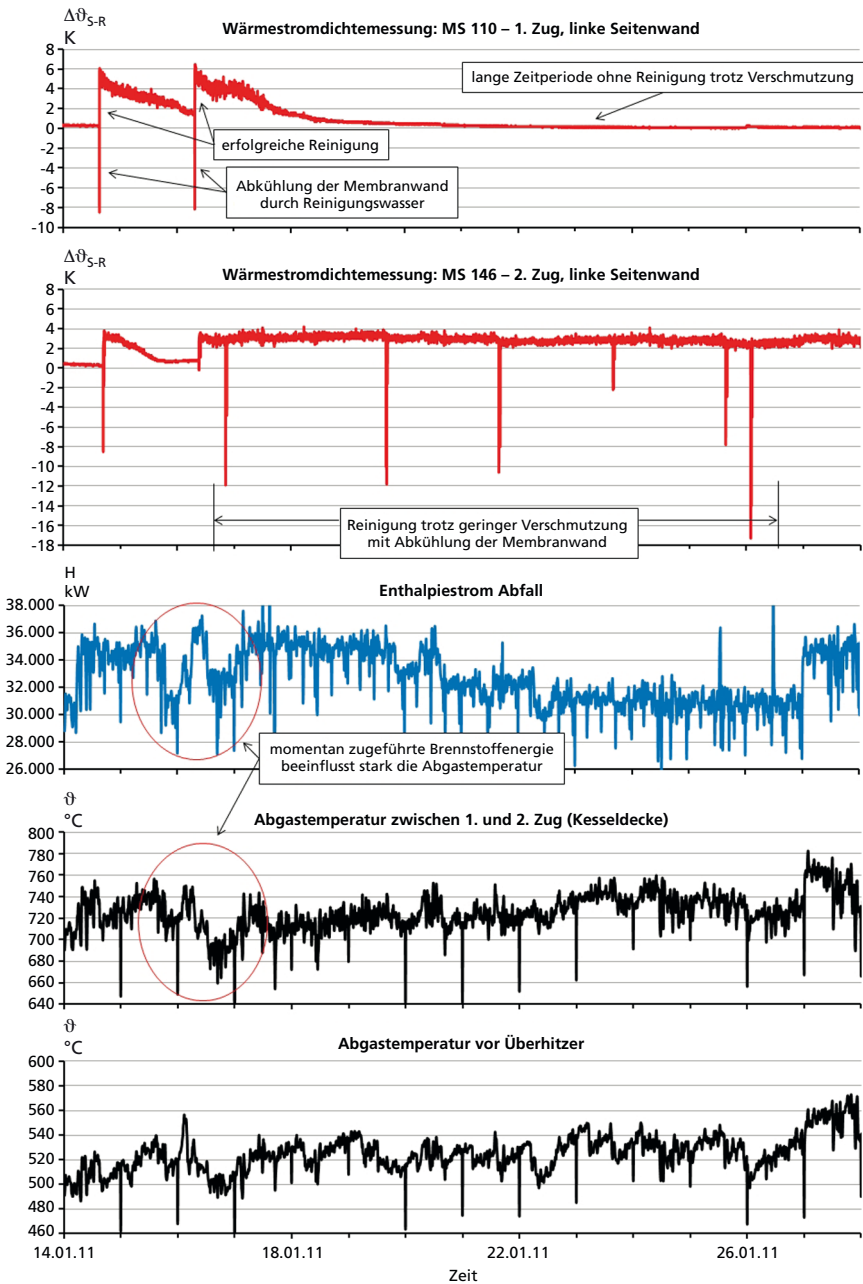


Bild 3: Einfluss der Belagsbildung und der Online-Reinigung auf die Signale der Wärmestromdichtemessung und auf die Abgastemperatur

Die Abgastemperaturen steigen tendenziell mit zunehmender Verschmutzung der Heizflächen und fallen sprunghaft infolge einer wirksamen Reinigung wieder ab. Es ist jedoch zu erkennen, dass es zu Änderungen der Abgastemperaturen kommt, die nicht mit der Belagsbildung bzw. -abreinigung zusammenhängen, sondern auf den veränderten Energieeintrag (Enthalpiestrom des Abfalls) in den Kessel zurückzuführen sind. Darüber hinaus beeinflussen die Änderungen der Abgastemperatur im ersten Zug die Abgastemperatur im zweiten Zug sehr stark. Damit ist die Differenzierung zwischen dem ersten und dem zweiten Zug bei der Bewertung der Belagssituation nur anhand der Abgastemperaturen erschwert.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die lokale Belagssituation und die Effektivität der Reinigung anhand der Signale der Wärmestromdichtemessung gut bewerten lassen. Die Durchführung der Online-Reinigung in festgelegten Zeitintervallen oder nur anhand der integralen Größen wie die Abgastemperaturen ist nicht zielführend.

### 3. Ausblick

Wie die bisherige Untersuchung gezeigt hat, wird die Online-Reinigung hinsichtlich des Zeitpunktes und der lokalen Belagssituation nicht immer optimal eingesetzt. Bisher ist die Kontrolle der Reinigungsqualität und -intensität im Betrieb praktisch nicht möglich, was dazu führt, dass bestimmte Bereiche des Kessels unzureichend gereinigt werden, während in anderen Bereichen die Reinigung zu oft oder zu intensiv durchgeführt wird, so dass die schützende Belagsschicht direkt an der Kesselwand zerstört und die Wand unnötig abgekühlt wird.

Ungeklärt bleibt auch die Frage, wie wirkt sich die Belagsbildung und die Online-Reinigung auf die energetische Effizienz der Anlage, da einerseits durch die Entfernung der Belagschichten die Wärmeauskopplung verbessert wird, aber andererseits der Reinigungsvorgang infolge von Eindüsung beträchtlicher Mengen des Reinigungswassers in die Kesselzüge Energieeinbuße nach sich zieht. Vor diesem Hintergrund sollen entsprechende Optimierungsstrategien erarbeitet werden.

Das Ziel der Optimierung ist, durch:

- Minimierung der bei einem Reinigungsvorgang eingesetzten Wassermenge,
- Reinigung der Heizflächen entsprechend dem Verschmutzungsgrad, im optimalen Zeitpunkt,
- Steuerung der Reinigung entsprechend der Reinigungsqualität und -intensität

die Anlageneffizienz weiter zu steigern und die Beanspruchung der Kesselwände zu minimieren.

Dazu ist eine weitere Untersuchung der komplexen Zusammenhänge zwischen der Belagsbildung, einschließlich der Belageigenschaften, der Belagsentfernung (Online-Reinigung), der Wärmeübertragung vom Abgas in den Wasser-Dampf-Kreislauf und dem Betriebszustand der Anlage erforderlich.

### 4. Literatur

- [1] Beckmann, M.; Horeni, M.: Möglichkeiten zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms. In: VDI Wissensforum IWB GmbH (Hrsg.): 22. Deutscher Flammentag – Verbrennung und Feuerungen. VDI-Berichte Nr. 1888. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2005, S. 643-652

- [2] Bohnes, S.; Wirtz, S.; Scherer, V.: Einfluss von Belägen in Hochtemperaturprozessen: Simultane Messung der Wärmeleitfähigkeit und der spektralen Emissionskoeffizienten in Abhängigkeit der stofflichen Eigenschaften. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben, Bochum, 2008
- [3] CUTEC: Instationäre Belagsbildung an Wärmetauschern von MVA. Vorläufiger Endbericht zum VGB-Projekt, 2005
- [4] Effenberger, H.: Dampferzeugung. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000
- [5] Hauschke, A.; Leithner, R.: Dynamic Simulation of Fouling and Optimization of Sootblowing Intervals in a Hard Coal Fired Power Plant. ENERGY, ENVIRONMENT, ECOSYSTEMS and SUSTAINABLE DEVELOPMENT (EEESD'09). Athens, 2009. S. 301-304
- [6] Horeni, M.: Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen – Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger, 2007
- [7] Koschack, R.; Fiehe, S.; Taj, P.: Einsatz von Infrarot-Kameras zur Lokalisierung von Brennkammerverschmutzungen am BoA-Block des Kraftwerkes Niederaußem und erste Betriebserfahrungen. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 495-504
- [8] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Dissertation, TU Dresden, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009
- [9] Mueller, C.; Frach, M.; Mußmann, B.; Schumacher, M.: Direkte Messung und dynamische Softwarealgorithmen – ideale Kombination für erhöhte Dampferzeugereffizienz. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 7, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 327-332
- [10] Schäfers, W.; Fey, W.; Simon, S.; Kahle, F.-D.: Einsatz von Wasserlanzenbläsern in Müllverbrennungsanlagen. In: Brennstoff, Wärme, Kraft (BWK) – Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure für Energietechnik und Energiewirtschaft, Ausgabe: 10.1999. S. 53-57
- [11] Simon, S.: Verlängerung der Reisezeit durch effektive Reinigung in den Leerzügen von Verbrennungsanlagen für Abfälle und Biomasse. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 7, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 659-672