

Nutzung der Wärmestrommessungen in MVA, Biomasse- und EBS-Verbrennungsanlagen zur Einflussnahme auf die Dampferzeugerkorrosion

Dr. Wolfgang Spiegel, Dr. Gabriele Magel; CheMin GmbH; Augsburg

Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik und

Dr.-Ing. Sascha Krüger, H.C. Starck GmbH, Goslar

Abstract

Experiences with the use of heat flow sensors for the evaluation of combustion control and for diagnosis of corrosion is the subject of this report. Areas with raised corrosion in all examined grate-fired boilers correlate with an accordant uneven dispersion of energy output coupling from waste gas. The degree of subsidence slope "back to front" and "left to right" varies depending on operating time and load but also regulated by the settings of combustion control. Fluctuations are depending on energy density of waste gas modified/overlaid by effects of pollution.

The location of the fire on the grate can be displayed with the help of heat flow sensors.

Judging by latest experiences with this sensor technology an application in many areas could be possible where highly time resolved information about heat flow density is valuable for actuator processes. These areas of application may as well exceed the sector of power plants with complex fuels.

Die Anwendung der Wärmestromdichtemessung seitens der CheMin GmbH und der TU Dresden an Kraftwerksstandorten mit schwierigen Brennstoffen (Abfall, Biomasse, EBS) erfolgt seit nunmehr vier Jahren.

Die Motive zur Anwendung ergeben sich bisher zum einen aus gutachterlichen Fragestellungen im Zuge von unerwartet heftiger Korrosion von Verdampferheizflächen und zum anderen aus Interessen von Anlagenbauern bzw. Betreibern bei der Optimierung der Feuerung in Bezug auf Feuerlage bzw. Rauchgas-Schief lagen im 1. Zug. In der Tendenz lässt sich eine Häufung des Einsatzes der Wärmestromdichtemessung bei großen Anlagen, bei Anlagen mit höherkalorischen Brennstoffen und bei Anlagen mit energiedichten Feuerungen feststellen. Damit steht vor allem die „moderne“ Generation von Kraftwerksstandorten mit dem Einsatz der Wärmestromdichtemessung in Zusammenhang.

Der Weg von einer mit wissenschaftlichen Methoden entwickelten und verifizierten Methode zur Messung der Wärmestromdichte hin zu einer sensorischen Nutzenanwendung an Kraftwerksstandorten wird durch die CheMin GmbH und die TU Dresden gemeinsam beschritten, unterstützt durch die Kraftwerke, die eine Entwicklung an dem jeweiligen Standort mittragen. Die Wärmestromdichtemessung und die daraus ableitbaren sensorischen Anwendungen sind im europäischen Patent Nr. EP 060 17393.7 geschützt.

Die Mehrzahl der bisherigen Anwendungen der Wärmestromsensorik war veranlasst durch den Verdacht, dass am jeweiligen Standort ausgeprägte Schief lagen die Strömung des Rauchgases im 1. Zug überprägen und dadurch an Teilbereichen der Verdampferwände

Korrosionsangriffe intensiviert werden. Korrosion auf Verdampferheizflächen im 1. Zug tritt in vielen Fällen einseitig auf, d.h. die Verteilung der betroffenen Flächen ist asymmetrisch in Bezug auf den Querschnitt des Zuges. Betroffen sind typischerweise Teilflächen der ungeschützten Flächen anschließend an die feuerfeste Auskleidung.

Durch den Einsatz von Wärmestromsensoren lässt sich die querschnittsbezogene Verteilung der Energiedichte abbilden. Bereiche mit erhöhter Abzehrung korrelieren in allen bisher untersuchten Rostfeuerungskesseln mit einer entsprechenden ungleichen Verteilung der Energieauskopplung aus dem Rauchgas, d.h. der höhere Wärmefluss korreliert mit einer dort gegebenen erhöhten Abzehrung.

Der Zusammenhang zwischen Wärmefluss und Korrosion ist durch den Temperaturgradienten im Belag in Abhängigkeit von der darüber fließenden Energie gegeben. Höherer Wärmefluss erzeugt höhere Temperaturniveaus im Belag und damit höhere Chlorpartialdrücke im Porenraum des Belags in der Nähe der Korrosionsfront und damit höhere Korrosionsdynamik. Übertragen in das Bild von Höhenlinien einer Wanderkarte ist die Korrosionsfront die Talsohle (tiefste Temperatur) und der Belag der davon ausgehende Hügel (ansteigende Temperatur). Die Steilheit des Hügels ist Ausdruck der gegebenen Wärmestromdichte. Mit der Annahme einer konstanten Belagsdicke und einer konstanten Wärmeleitfähigkeit des Belags ist die Temperatur im Belag im Abstand von z.B. 500 μm von der Korrosionsfront im Wesentlichen eine Funktion der Wärmestromdichte. Wenn z.B. der Temperaturbereich von 400 bis 450°C für die Einlagerung von Kalium-Blei-Chlorid aus thermodynamischen Gründen besonders bevorzugt ist, so entscheidet die Wärmestromdichte, wie nahe an der Korrosionsfront diese Zone liegt (je näher, desto besser erreicht der Chlorpartialdruck, der von diesen Salzen ausgeht, die Korrosionsfront).

Das Beispiel in Abb. 1 zeigt die Messdaten von 4 Wärmestromsensoren im Laufe von ca. 9 Monaten, die auf einer Ebene im 1. Zug angebracht sind (insgesamt 4 Sensoren auf einer Ebene, je zwei an jeder Seitenwand). Die y-Achse ist in Kelvin skaliert, d.h. es ist der Temperaturunterschied zwischen Rohr und Steg pro Sensor dargestellt. Je höher der Wert in Kelvin, desto höher ist der Wärmefluss. Die Kurvenverläufe der jeweiligen Sensoren zeigen im längerfristigen Trendverhalten gravierende Unterschiede. An der linken Seitenwand sind die Wärmestromdichten deutlich höher als an der rechten Seitenwand (vgl. die beiden unteren Diagramme in der Abb. 1). Zudem ist an der linken Seitenwand auch ein ausgeprägter Unterschied zwischen dem vorderwandnahen Bereich (Sensor 109) und dem rückwandnahen Bereich (Sensor 111) zu erkennen. Diese Vorderwandlastigkeit ist in dem Ausmaß an der rechten Seitenwand nicht gegeben. Die Intensität der Schieflagen „vorne-hinten“ und „links-rechts“ ändert sich in Abhängigkeit von Reisezeit und Last, aber auch in Abhängigkeit von Einstellungen der Feuerführung (Verteilung Primär- zu Sekundärluft und Anteile der Primärluft auf den Rostzonen) im Laufe von Tagen und Wochen. Die kurzfristigen Schwankungen im Bereich von Minuten, also die Breite des „Bandes“ eines Sensors, ist abhängig von den Schwankungen der Energiedichte im Rauchgas, die bei abfallartigen Brennstoffen unvermeidlich ist, überprägt durch Effekte der Verschmutzung. Zu Beginn der Reisezeit, also am linken Rand der vier Diagramme in der Abb. 1 war der Kessel gereinigt. In den ersten Wochen sind die „Bänder“ der vier Sensoren in etwa gleich breit und die Schieflagen in Bezug auf den vorderwandnahen Bereich der linken Seitenwand sind gut zu erkennen.

Wärmestromsensoren im 1. Zug

Rohr-Steg-Temperaturdifferenzen
 Schiefelage der Rauchgasströmung

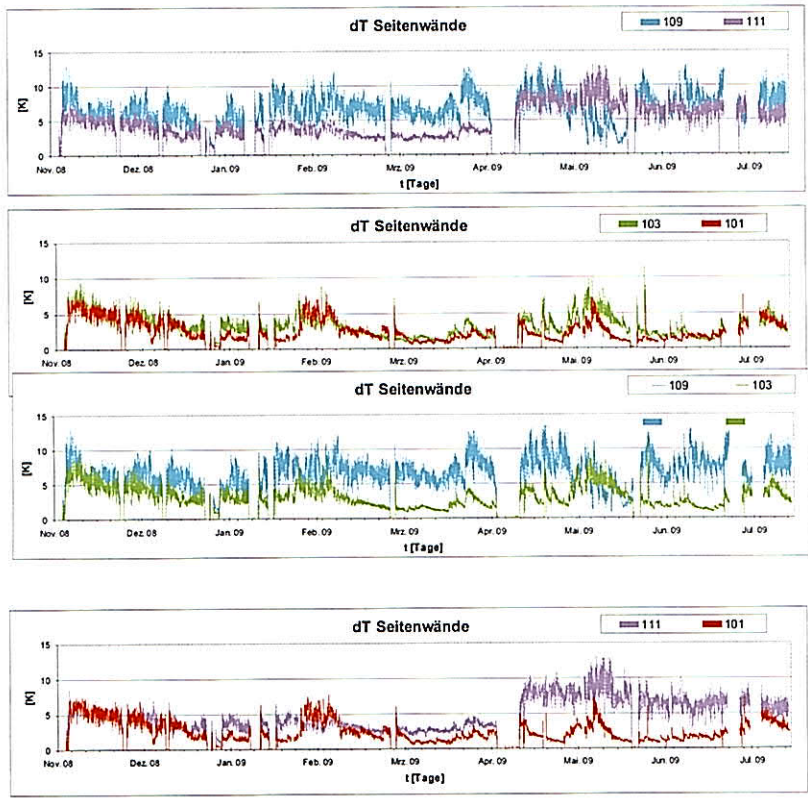
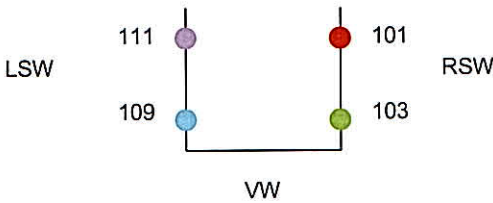


Abbildung 1: Beispiel für die Anwendung von Methoden zur Korrosionsfrüherkennung. Einsatz des Schieflagen-Sensors im 1. Zug

Aus dem Blickwinkel bisheriger Anwendungen der Wärmestromsensoren ist ergänzend zu den Schieflagen im 1. Zug auch die „Beobachtung“ der Feuerlage zu nennen. Auch hier wird die Sensorik aus Gründen der Korrosionsminderung eingesetzt. Denn die Abhängigkeiten der Korrosion von den Prozessgrößen Brennstoff und Feuerung legen es nahe, ein

kurzes und heißes Feuer zu vermeiden und bevorzugt ein in die Länge gezogenes und damit kühleres Feuer anzustreben, wobei insbesondere ein relativ hoher Anteil der Primärluft für die Verfügbarkeit des Sauerstoffs in allen Phasen der Verbrennung anzustreben ist, um „durchoxidierte“ Gasphasen, wie z.B. SO_3 , mit möglichst hoher Ausbeute zu erhalten. Diese zur Korrosionsminderung günstigen Randbedingungen lassen sich bei einem kurzen / heißen Feuer schlechter verwirklichen.

Durch den Einsatz von Wärmestromsensoren lässt sich die Lage des Feuers auf dem Rost abbilden. Anmerkung: Störungen der Signalqualität durch starke Verschmutzung / Schlackeweichten erfordern ggf. ein nachträgliches Verlagern der Messorte.

Typischerweise werden auf jeder Seitenwand im Feuerraum ca. 3 bis 12 Sensoren angebracht. Die Abb. 2 zeigt eine derartige Anwendung über einen Zeitraum von ca. 6 Monaten. Die gemessenen Wärmestromdichten an den sechs Positionen (drei an der linken und drei an der rechten Feuerraumwand) sind in den Diagrammen in unterschiedlichen Paarungen graphisch aufbereitet. Die Y-Achse ist - wie in der Abb. 1 - in Kelvin skaliert (in allen Diagrammen von Abb. 2 mit gleicher Skala von 0 bis 12 Kelvin, zur besseren Vergleichbarkeit). Die Energiedichte im Rauchgas entlang des Rostes ist über den betrachteten Zeitraum von 6 Monaten relativ konstant verteilt, wobei zur linken Seite hin die „Feuerlage“, also die höchste Wärmestromdichte eher bei Messposition 102 liegt und zur rechten Seite hin eher bei Messposition 107. Damit ergibt sich in der Tendenz links eine frühere Feuerlage als rechts. Insgesamt ist auf der linken Seite des Rostes eine gleichmäßigere Wärmeauskopplung zu beobachten als auf der rechten Seite. Rechts ist auch der Ausbrandbereich des Rostes (Messposition 108) von vielen kurzfristigen hohen Wärmestromdichten geprägt, also ein sich phasenweise „nach hinten“ verschiebendes, sehr langes Feuer.

Unabhängig von der Qualität und Zielsetzung der in diesem Beispiel gegebenen Feuerungsleistungsregelung und dem gegebenen Brennstoff, erlaubt die Information aus den Wärmestromsensoren die Verifizierung und Kontrolle einer optimierenden Anpassung der Regelung in Richtung auf ein möglichst konstant lang gezogenes Feuer.

Diese Anwendungsarten der Wärmestromsensorik können auch als Erweiterung des Spektrums an Messverfahren zur Erfassung von energetischen Zuständen - wie Thermoelemente, IR-Kameras oder Pyrodetektoren oder die akustische Erfassung der Temperaturverteilung im Rauchgas - aufgefasst werden. Welche Vorzüge die jeweilige Messtechnik bei einer konkreten Aufgabenstellung hat, und damit welche „Anwendungs-Nischen“ der Wärmestromsensorik sinnvollerweise zugewiesen werden können, kann erst anhand von praktischen Erfahrungen gewichtet werden.

Nach heutigem Erfahrungsstand mit der Anwendung dieser Sensorik lässt sich darüber hinaus eine Vielzahl von Einsatzbereichen vorstellen, wo hoch zeitaufgelöste Informationen zur Wärmestromdichte für aktorische Prozesse wertvoll sein können. Diese Anwendungsmöglichkeiten reichen auch weit über das Segment der Kraftwerke mit schwierigen Brennstoffen hinaus.

In den zurückliegenden Jahren stand im Vordergrund der gemeinsamen Entwicklungsarbeit, die Potentiale des Messverfahrens zu erkennen, zu verifizieren und in konkrete Messtechnik zu übertragen.

Wärmestromsensoren im 1. Zug

Rohr-Steg-Temperaturdifferenzen
Brennkammer Feuerlage

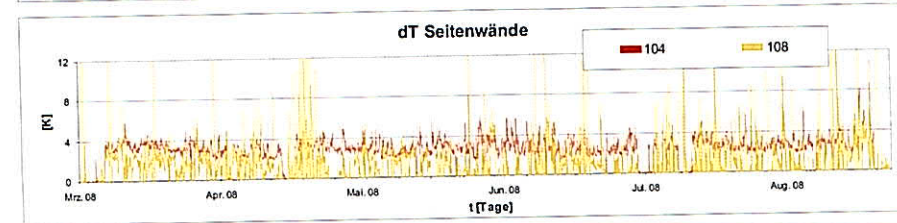
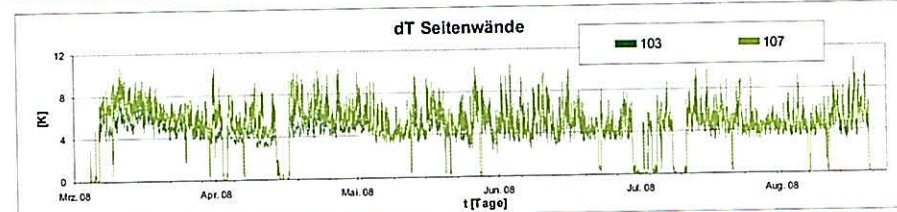
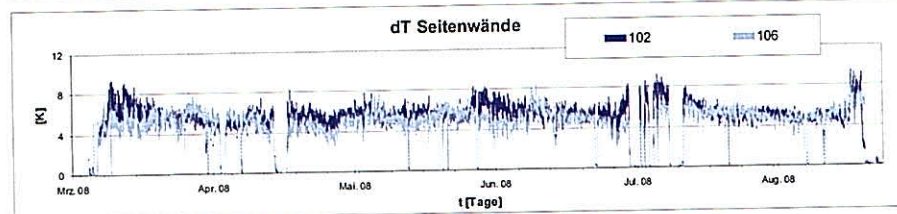
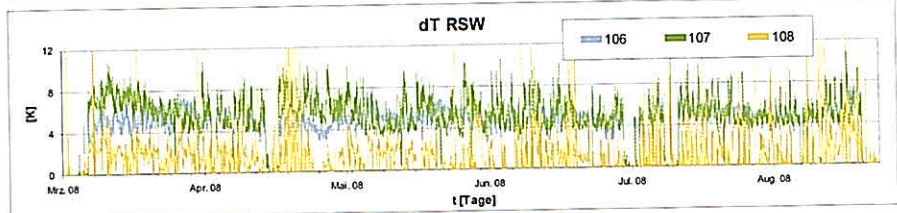
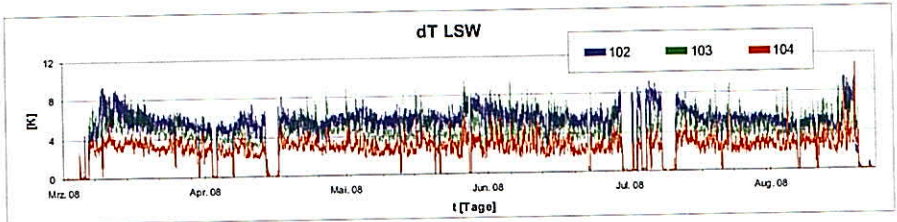


Abbildung 2: Beispiel für die Anwendung von Methoden zur Korrosionsfrüherkennung. Einsatz des Feuerlagen-Sensors im Feuerraum

Die stetige Verbesserung und Verfeinerung der Nutzbarmachung dieser Sensorik gliedert sich aus Sicht der Autoren aktuell in mehrere, ineinander verwobene Handlungsstränge:

1. Weiterführung der wissenschaftlichen Grundlagen
2. Stabile und variable Applikation der Wärmestromsensorik in Kraftwerken
3. Einbindung der Signale der Wärmestromsensorik in die Leittechnik und damit online-Verfügbarkeit der jeweiligen Zielinformation (z.B. Feuerlage, Schiefelage) für das Betriebspersonal
4. Visualisierung der Signale aus vernetzten Wärmestromsensoren
5. Einsatz der Wärmestromsensorik zur Kontrolle der Belagsbildung und der Reinigungserfolge im Strahlungsteil
6. Weiterentwicklung der Wärmestromsensorik für die Ermittlung von Werkstoff- und Belageigenschaften
7. Einsatz der Wärmestromsensorik im Versuchsstand zur Optimierung von Eigenschaften von Feuerfestsystemen, z.B. bei hinterlüfteten Systemen
8. Weiterentwicklung der Wärmestromsensorik zur Bestimmung der Wärmestromdichte pro Abschnitt eines Rohres in einer Verdampferwand

Im Zusammenspiel mit anderen sensorischen Hilfsmitteln (Belagsmonitor, Belagssonde, ASP; vgl. [1, 2, 3, 4, 5]) und mit Stillstandsbegehungen im ungereinigten und gereinigten Zustand setzen die Autoren die Wärmestromsensorik auch als Teil übergeordneter betrieblicher Unterstützungsmaßnahmen ein, z.B. im Rahmen der „Korrosionsfrüherkennung“ [2, 3, 4] und der „vorausschauenden Instandhaltung“ [1, 5].

Zu 1) Wissenschaftliche Grundlagen:

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Wärmestromsensorik wurden am Institut für Energietechnik der TU Dresden im Rahmen einer Dissertation durch Dr. Sascha Krüger erarbeitet [8; vgl. auch 6, 7]. Für den Zeitraum von drei Jahren (2006-08) hat die Deutsche Bundesstiftung Umwelt im Rahmen des Vorhabens „Entwicklung eines Messsystems für die Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranwände von Dampferzeugern in Biomasseverbrennungsanlagen zur Erfassung der Beeinträchtigung der Anlageneffizienz aufgrund von Korrosion und Verschmutzung“ die Entwicklung der Wärmestromsensorik gefördert.

Zu 2) Stabile und variable Applikation der Wärmestromsensorik in Kraftwerken:

Die Applikation der Wärmestromsensoren in Kraftwerken erfolgte bisher im Rahmen gutachterlicher Aufgaben der CheMin GmbH oder als (Entwicklungs-)Kooperation zwischen dem Anlagenbetreiber bzw. dem Systemlieferanten und der CheMin GmbH bzw. der TU Dresden.

In den meisten Fällen werden zwischen 20 und 50 Wärmestromsensoren pro Kessel appliziert, um die Feuerlage und/oder mögliche Schiefelagen im 1. Zug zu erfassen. Ein typisches Beispiel einer sensorischen Ausstattung der Feuerung und des 1. Zuges mit Wärmestromsensoren zeigt die Abb. 3.

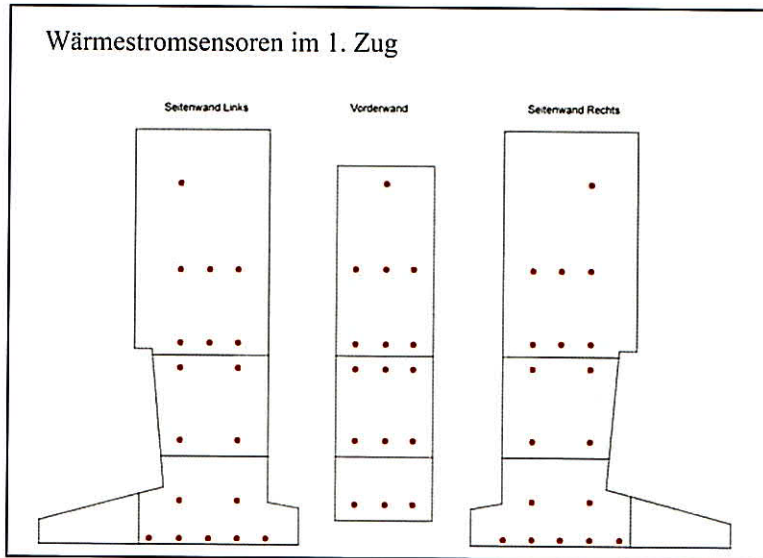


Abbildung 3: Beispiel für die Verteilung von Wärmestromsensoren im Feuerraum und 1. Zug einer MVA. Aus der Anordnung der Messpositionen ergeben sich „Ebenen“, die von mehreren Messpositionen begrenzt sind. Pro Ebene lässt sich die Verteilung der Wärmestromdichte graphisch darstellen.

Die Gegebenheiten auf der Rohraußen- und -innenseite erfordern bei der Applikation der Wärmestromsensoren differenzierte, einzelfallbezogene Vorgehensweisen. Die Verwertbarkeit der Signale eines Wärmestromsensors während des Betriebes im Kontext seiner „Nachbar-Sensoren“ ist von einer Vielzahl von Randbedingungen abhängig. Die hohe Zahl von bereits applizierten Wärmestromsensoren und die Auswertung von deren Signalen über längere Betriebszeiträume hat das Erkennen, Erfassen und Eliminieren von ungewünschten, artefaktischen Einflüssen unterstützt.

Zu 3) Einbindung der Signale der Wärmestromsensorik in die Leittechnik und damit online-Verfügbarkeit der jeweiligen Zielinformation (z.B. Feuerlage, Schiefelage) für das Betriebspersonal

An mehreren Kraftwerksstandorten (vgl. Beitrag von Sinn et.al. in diesem Tagungsband) werden die Signale der Wärmestromsensoren bereits der Leittechnik zugeführt und dort auch für Regelzwecke verwendet.

Zu 4) Visualisierung der Signale aus vernetzten Wärmestromsensoren

Gruppierungen von Wärmestromsensoren können in sinnvollem Zusammenhang vernetzt und visualisiert werden. So stellen beispielsweise zur Visualisierung der Schiefelage im 1. Zug die vernetzten Wärmestromsensoren auf einer Kesselhöhe eine „Ebene“ senkrecht zur Rauchgasrichtung dar. Bei der Vernetzung der Sensoren in der Brennkammer, und damit die Betrachtung der seitlichen Wärmetauscherflächen der Feuerung, können Rückschlüsse auf die Feuerlage in der Brennkammer gezogen werden. Die Visualisierung kann in Form einer farblichen Darstellung der jeweiligen Ebene erfolgen.

Zu 5) Einsatz der Wärmestromsensorik zur Kontrolle der Belagsbildung und der Reinigungserfolge im Strahlungsteil.

Aus dem Blickwinkel der Reisezeit und der Überhitzerkorrosion sind viele Kraftwerkstandorte schwieriger Brennstoffe gezwungen, die Verschmutzung der Strahlungsoberflächen durch online-Reinigungsmaßnahmen zu begrenzen. Das Maß an Reinigungswirkung der einzelnen Reinigungsmittel (z.B. in Abhängigkeit ihrer wählbaren Parameter) bleibt in der Regel unerkannt. Erfasst wird typischerweise das summarische Ergebnis aller Reinigungsmittel im Strahlungsteil des Kessels durch Einsatz von Thermoelementen am Ende des Strahlungsteils. Die Relation von eingesetzter Wassermenge zu dem damit erzielten Reinigungserfolg bleibt diffus. Ein „zu viel“ an Wasser hat u.U. negative Auswirkungen auf die Energienutzung, auf die Aggregate der Rauchgasreinigung und auch auf die Ausschleusbarkeit von Kesselstäuben. Im Kontext dieser Fragen nach der Effizienz von online-Reinigungseinrichtungen („soviel Wasser wie nötig, so wenig wie möglich“) ergeben sich für die Wärmestromsensorik Anwendungspotentiale. Einschränkend ist anzumerken, dass dies sich auf diejenigen Wärmetauscherflächen begrenzt, die von außen zugänglich sind.

Zu 6) Einsatz der Wärmestromsensorik im Versuchsstand zur Optimierung von Eigenschaften von Feuerfestsystemen, z.B. bei hinterlüfteten Systemen

Die Wärmeleiteigenschaften von feuerfesten Systemen lassen sich nicht anhand von werkstofflichen Kenngrößen der einzelnen Werkstoffkomponenten ermitteln, sobald die Wärme nicht ausschließlich durch Konvektion übertragen wird, sondern auch zu einem Anteil durch Strahlung. Dies trifft insbesondere für die zur Zeit häufig eingesetzten „hinterlüfteten“ SiC-Platten zu. Zudem beeinflusst die Belagsbildung (Schlackepezl, Ascheablagerungen, Salze) bei hinterlüfteten Systemen die Wärmeübertragungseigenschaften in anderer Weise als bei rein leitenden Feuerfestsystemen (z.B. hintergossene SiC-Platten).

Die experimentelle Ermittlung der Wärmeübertragungseigenschaften (und ggf. auch deren Optimierung durch Anpassung konstruktiver Merkmale) ist unter diesen Gesichtspunkten der einzig Erfolg versprechende Weg, um das Betriebsverhalten dieser Systeme im Zuge des Engineering angemessen einbinden zu können. Der Versuchsstand der Wärmestromsensorik an der TU Dresden eignet sich für diese Aufgabenstellung.

Zu 7) Weiterentwicklung der Wärmestromsensorik für die Ermittlung von Werkstoff- und Belageigenschaften

Siehe hierzu den Beitrag von Beckmann et.al. in diesem Tagungsband.

Zu 8) Weiterentwicklung der Wärmestromsensorik zur Bestimmung der Wärmestromdichte pro Abschnitt eines Rohres in einer Verdampferwand

Die Messtechnik der Wärmestromsensorik nutzt das Signal aus einer Differenzmessung von zwei gleichen Thermodrähten, z.B. Konstantan, die an zwei unterschiedlichen Orten auf das gleiche metallische Medium, z.B. eine Verdampferwand „aufgepunktet“ sind. Sobald diese beiden Messorte eine Temperaturdifferenz aufweisen, lässt sich diese anhand der zugehörigen Thermospannung erfassen, die aus der beschriebenen Messanordnung zwischen den beiden „Thermodrähten“ hergebildet wird. Die Messempfindlichkeit erreicht dabei den Bereich von $< 10^{-1}$ K. Das Temperaturniveau, auf dem dieser kleine Temperaturunterschied zwischen den beiden Messorten gegeben ist, also z.B. 300°C, beeinflusst bzw. beeinträchtigt die Messempfindlichkeit nicht.

Somit können im Grundsatz beliebige Messortpaare auf einer Verdampferwand in Bezug auf ihren Temperaturunterschied hinterfragt werden.

Neben der benachbarten Positionierung auf Rohr und Steg ergibt sich z.B. auch eine Interpretationsmöglichkeit, wenn man die Positionierung auf dem gleichen Rohr in einem gewissen Abstand zueinander anordnet.

Aufgrund von systematisch sich ändernden Randbedingungen bezüglich Siedetemperatur und Dichte des Mediums im Rohr, ergeben sich Temperaturdifferenzen zwischen zwei Messorten auf dem gleichen Rohr, z.B. im Abstand von einigen Metern zueinander, die direkt mit der auf dieser Strecke aufgenommenen Energie korrelieren.

Der beschriebene Ansatz ließe sich als „integraler Wärmestrom“ benennen, im Sinne einer Streckeninformation zur Wärmestromdichte und im Unterschied zu der Punktinformation der bestehenden Wärmestromsensorik. Zur Zeit finden erste Anwendungstests an Kraftwerken statt. Über die Ergebnisse werden die Autoren zeitnah berichten.

Literatur

- [1] Herzog, T.: Belagsentwicklung und Korrosion auf Dampferzeugerrohren bei der Verbrennung von Abfällen und Biomasse. Freiburger Forschungshefte, Freiberg: Technische Universität Bergakademie 2007
- [2] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosions-Früherkennung bei Abfall-, Biomasse- und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 235-258
- [3] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosions-Früherkennung: Korrosionsminderung heute ist Effizienzsteigerung morgen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008, S. 509-524
- [4] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Anwendung sensorischer Prozessinformationen am Beispiel der Korrosionsfrüherkennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, S. 669-684
- [5] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosion in Biomasseverbrennungsanlagen und Strategien zur Minimierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008, S. 413-421
- [6] Krüger, S. & Beckmann, M.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden zur Charakterisierung von Belägen in Dampferzeugern für schwierige Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 259-271
- [7] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.; Magel, G.: Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranverdampferwände von Dampferzeugern. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 641-658
- [8] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Diss. Technische Universität Dresden, Mai 2009. Im Druck.