

Wärmestromdichtemessung an Membranwänden zur Charakterisierung von Belägen in Dampferzeugern für schwierige Brennstoffe

Sascha Krüger und Michael Beckmann

1.	Einfluss der Beläge auf die Energieeffizienz von Dampferzeugern	260
2.	Dynamik der Wärmestromdichtemessung	263
3.	Diskussion von Daten ausgewählter Wärmestromdichtemessungen in der Praxis	266
3.1.	Quantitative Beurteilung des Messsignals	267
3.2.	Signalanalyse	267
4.	Zusammenfassung	269
5.	Symbolverzeichnis	270
6.	Literaturangaben	271

Hausmüll und Biomasse sind als schwierige Brennstoffe einzuordnen. Die bei der Verbrennung entstehenden staub- und gasförmigen Produkte führen u.a. zu Belägen an abgasseitigen Dampferzeugerbauteilen. Diese Beläge haben einen negativen Einfluss auf die Effizienz und die Verfügbarkeit der Anlage, da sie zum einen Korrosionen von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen auslösen und darüber hinaus durch isolierende Schichten auf Wärmeübertragerflächen zur Erhöhung von abgasbedingten Wärmeverlusten führen.

In diesem Beitrag wird speziell auf die Anwendung der Wärmestromdichtemesstechnik zur Charakterisierung von Belägen insbesondere im Hinblick auf die Funktion eines Signalgebers für die Online-Kesselreinigung eingegangen. Vor diesem Hintergrund wird zunächst der Zusammenhang zwischen der Belagsituation und der Wärmestromdichte theoretisch dargestellt. Die theoretischen Überlegungen werden durch Messergebnisse in der Praxis validiert. Darüber hinaus erfolgt eine Betrachtung der Ansprechzeiten des Messsignals auf Änderungen der Wärmestromdichte z.B. durch veränderte Last- oder Belagssituationen. Aus den Ergebnissen in der Praxis lassen sich darüber hinaus durch die Analyse des Frequenz- und Amplitudenspektrums der Signale weitere Informationen zu den Belägen ableiten.

1. Einfluss der Beläge auf die Energieeffizienz von Dampferzeugern

Beläge auf Wärmeübertragerflächen im Strahlungsteil wirken sich negativ auf den Wärmedurchgang vom Abgas an das Siedewasser aus, da der Belag eine isolierende Wirkung hat. Charakteristisch für den Wärmedurchgang ist die Wärmestromdichte auf die Membranwand [1].

Die maximale Wärmestromdichte wird für einen Wandaufbau sowie feuerungs- und dampferzeugerseitige Bedingungen bei einer sauberen Membranwand, d.h. ohne Verschmutzung erreicht.

$$\dot{q}_{\max} = k_{\text{eff}} \cdot (\vartheta_{\text{AG}} - \vartheta_{\text{SW}}) \quad (1)$$

$$\dot{q}_{\max} = \frac{(\vartheta_{\text{AG}} - \vartheta_{\text{SW}})}{\sum_{\text{Wand}} \left(\frac{\lambda}{s} \right)^{-1} + \sum \alpha^{-1}} = \frac{(\vartheta_{\text{AG}} - \vartheta_{\text{SW}})}{R_{\text{sauber}}} \quad (2)$$

Tritt nun ein Belag auf der Wand $\left(\sum_{\text{Belag}} \frac{\lambda}{s} = \frac{1}{R_{\text{belegt}}} \right)$

ein, so ergibt sich eine entsprechend niedrigere Wärmestromdichte.

Zur Darstellung des Einflusses des Belages auf die Wärmestromdichte wird das Verhältnis der Wärmestromdichten

$$\left(\frac{\dot{q}_{\text{belegt}}}{\dot{q}_{\text{sauber}}} \right) \text{ angegeben.}$$

$$\frac{\dot{q}_{\text{belegt}}}{\dot{q}_{\text{sauber}}} = \frac{R_{\text{sauber}}}{R_{\text{sauber}} + R_{\text{belegt}}} \quad (3)$$

Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes zeigt Bild 1 beispielhaft die Auswirkung eines Belages an einer Rohrwand auf die Wärmestromdichte als Funktion der Belagsstärke für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Belages und effektive Wärmeübergangskoeffizienten. Die Kurven in Bild 1 zeigen erwartungsgemäß, dass bei hohen abgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten ($\alpha_{\text{außen}} = 200 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) die Wärmestromdichte bei anwachsendem Belag stärker abgeschwächt wird, als bei niedrigeren abgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten ($\alpha_{\text{außen}} = 50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

Durch den starken Einfluss eines Belages auf die Wärmestromdichte in Kesselbereichen mit hohen abgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten ist es somit nicht ohne weiteres möglich, die Wärmestromdichte des sauberen Anfahrzustands der Anlage durch Online-Reinigung annähernd (d.h. > 90 Prozent) beizubehalten. Eine dünne Belagsschicht senkt schon nach sehr kurzer Betriebszeit die Wärmestromdichte sehr stark.

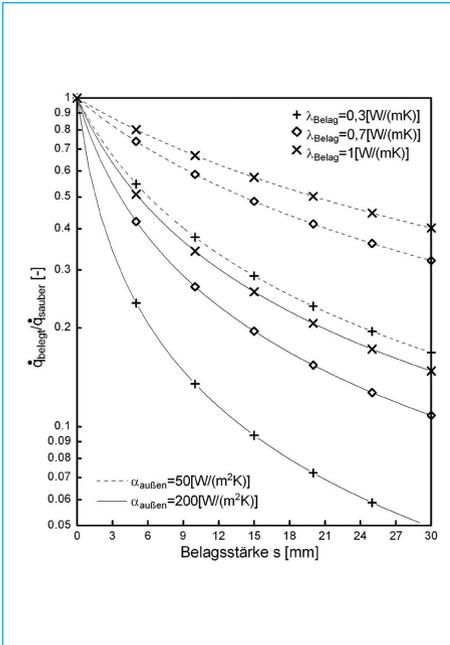


Bild 1: Einfluss eines Belages auf die Wärmestromdichte

Aus den Kurven in Bild 1 ist zu sehen, dass im weiteren Verlauf die Änderungen der Wärmestromdichte – bezogen auf den Ausgangszustand – geringer werden.

Hinsichtlich der Online-Reinigung von Membranverdampferwänden in den Strahlungszügen kann daher zusammengefasst werden, dass

- eine Reinigung in Kesselbereichen hoher Wärmeübergangskoeffizienten (z.B. erster Strahlungszug) effektiver auf die Abgaskühlung in den Strahlungszügen wirkt, als das Entfernen der Beläge in Kesselbereichen mit niedrigeren Wärmeübergangskoeffizienten,
- eine Reinigung nicht bzw. nur für kurze Zeit den Betriebszustand des sauberen Kessels – Zustand nach Reinigung im Stillstand – wieder herstellt.

2. Dynamik der Wärmestromdichtemessung

Bei der messtechnischen Erfassung der Wärmestromdichte ist die Ansprechdauer der Messtechnik bzw. die Verzögerung (d.h. die Dynamik der Messwert erfassung), mit der der Messsensor auf die Änderungen der Wärmestromdichte (z.B. durch Änderungen der Last- oder Belagssituation) reagiert, insbesondere zur Festlegung der Abtastrate der Messwert erfassung wichtig. Abhängig von der Dynamik der Messwert erfassung kann dann über die weitere Verwendung des Messsignals zur Beurteilung von z.B. der Wärmefreisetzung im Feuerraum, Belagsbildung auf der Membranwand oder Trommeldruckschwankungen [2] entschieden werden.

Die Entwicklung einer nicht invasiven Messtechnik zur Bestimmung der Wärmestromdichte auf Membranverdampferwände ist Gegenstand eines derzeitigen DBU-Projektes (DBU 23893-24) [1]. Grundlage dieser Methode ist die Messung von Temperaturdifferenzen an der abgasabgewandten Membranwandseite (zwischen Scheitel- und Stegtemperatur). Die Bestimmung der Differenztemperatur erfolgt mit geringem messtechnischen Aufwand und hoher Genauigkeit durch Nutzung des Membranwandmaterials als Teil zweier gegeneinander geschalteter Thermoelemente. Für einen gegebenen Wandaufbau ist die Wärmestromdichte direkt proportional (Systemkennkurven [2]) zur Wärmestromdichte.

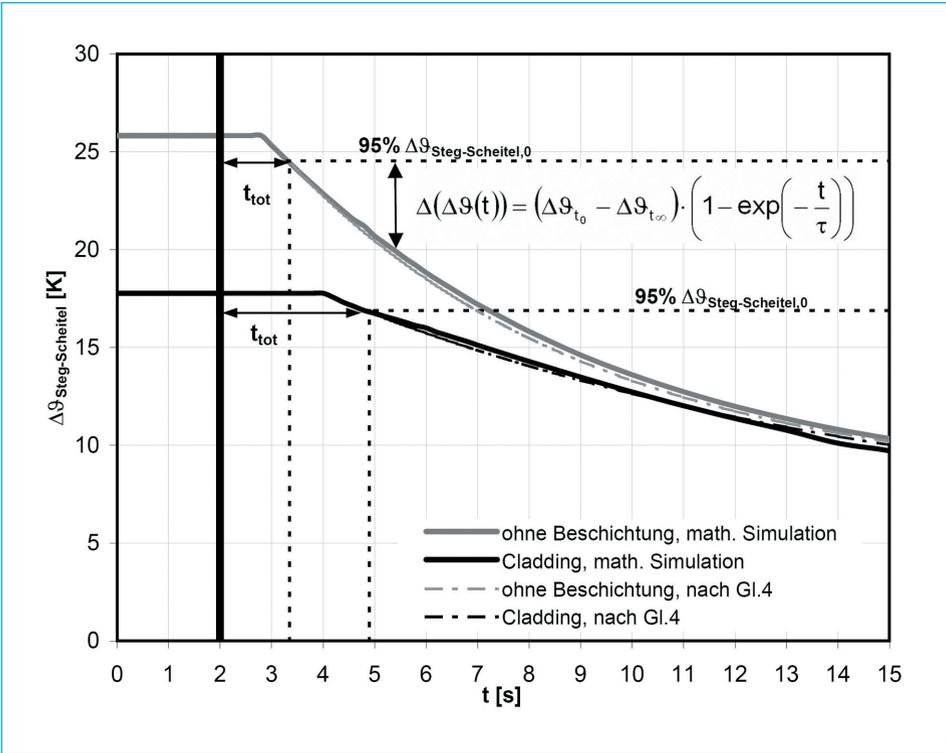


Bild 2: Ansprechdauer der Messtechnik – Simulation

Die Dynamik der Messtechnik sei zunächst anhand einer mathematischen Simulation untersucht.

Betrachtet werden zwei unterschiedliche Membranwandaufbauten mit einer Teilung von 75 mm – eines mit Auftragsschweißung (hier: Inconel 625), das andere ohne Beschichtung (siehe Bild 2).

Beide werden mit einer Wärmestromdichte von 100 kW/m² beaufschlagt. Bei dem auftragsgeschweißten Membranwandsegment ergibt sich für die genannte Wärmestromdichte eine Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ von etwa 18 K, für das nicht beschichtete Membranwandsegment eine Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ von etwa 26 K (siehe Bild 2). Wird nun die Wärmestromdichte sprunghaft von 100 auf 20 kW/m² reduziert, so nimmt das Messsignal nach einer Totzeit¹ t_{tot} aufgrund der im Steg gespeicherten Wärmeenergie (Kapazität) von etwa 1,5 Sekunden bei der nicht beschichteten Membranwand und etwa drei Sekunden bei der auftragsgeschweißten Membranwand ab.

Eine derartige Reduzierung der Wärmestromdichte kann beispielsweise bei Abschalten oder Ausfall eines Brenners auftreten.

¹ Die Totzeit t_{tot} wird hier als die Zeit für die Änderung des konstanten Signals auf 95 Prozent des Ausgangswertes bezeichnet.

Der Verlauf des Messsignals folgt dem aus der Mess- und Regelungstechnik [3] grundlegend bekannten Zusammenhang

$$(\Delta\vartheta_{t_0} - \Delta\vartheta_t) = (\Delta\vartheta_{t_0} - \Delta\vartheta_{t_{\infty}}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (4)$$

wobei

$\Delta\vartheta_{t_0}$ die Temperaturdifferenz vor dem Absinken,

$\Delta\vartheta_{t_{\infty}}$ die Temperaturdifferenz nach Absinken (für den stationären Fall),

$\Delta\vartheta_t$ die Temperaturdifferenz zu einem beliebigen Zeitpunkt während des Absinkens und

τ die so genannte Zeitkonstante darstellen.

Für die in Bild 2 simulierten Messsignalverläufe ergeben sich somit aus Gleichung (4) Zeitkonstanten von zehn Sekunden für den auftragsgeschweißten Wandaufbau und sechs Sekunden für den nicht beschichteten Wandaufbau.

Die größere Verzögerung im Fall der auftragsgeschweißten Membranwand ist auf die größere Masse – Kapazität – des Wandaufbaus zurück zu führen.



Zur Validierung der Simulation und zur weiteren Analyse der Dynamik der Messtechnik wurden am Versuchsstand zur Wärmestromdichtemessung [2] Messungen durchgeführt. Hierbei wurde die Ansprechdauer vier verschiedener Thermoelemente zur Ermittlung der Brennkammertemperatur (Bild 3) mit der einer Wärmestromdichtemessung an einem auftragsgeschweißten Membranwandsegment verglichen.

Bild 3: Einbausituation der Thermoelemente

NiCr-Ni-3mm: NiCr-Ni-Mantelthermoelement mit Edelstahlmantel, 3 mm Außendurchmesser,
 NiCr-Ni-12mm: NiCr-Ni-Mantelthermoelement mit Edelstahlmantel, 12 mm Außendurchmesser,
 NiCr-Ni-22mm: NiCr-Ni-Mantelthermoelement mit Keramikmantel, 22 mm Außendurchmesser,
 Fe-CuNi-18mm: Fe-CuNi-Mantelthermoelement mit Stahlmantel, 18 mm Außendurchmesser.

Bild 4 zeigt die Auswirkungen des Abschaltens des Brenners mit anschließendem Kühlen der Brennkammer durch einen Luftstrom auf die Temperaturverläufe der vier Thermoelemente und die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ einer Wärmestromdichtemessung.

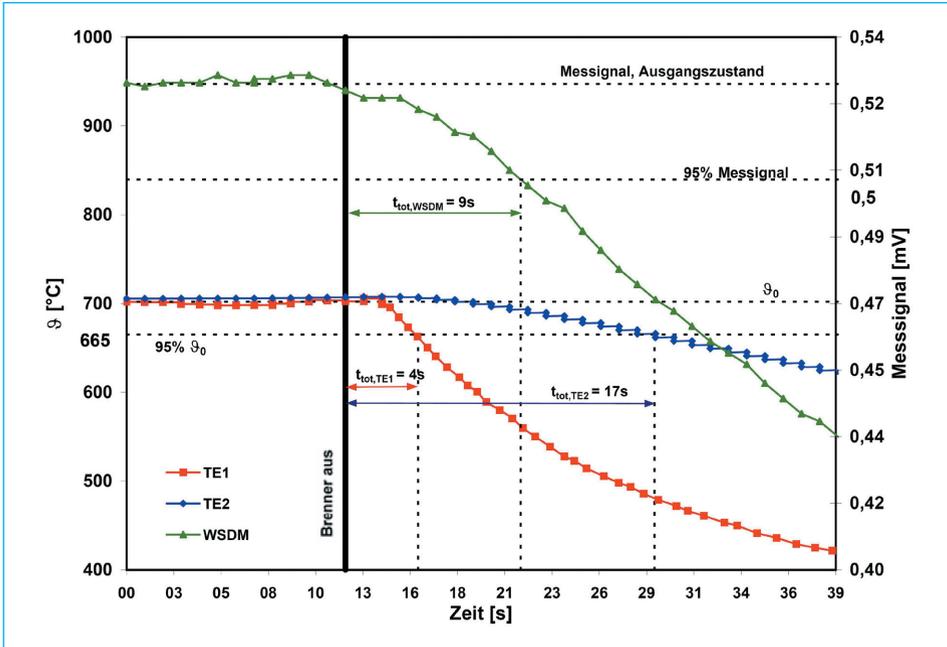


Bild 4: Ansprechdauer der Messtechnik – Versuch

Aus Bild 4 ist zu sehen, dass das Mantelthermoelement TE1 mit etwa vier Sekunden die geringste Ansprechdauer (siehe auch Tabelle 1) aufweist. Diese Totzeit vom Abschalten des Brenners bis zum Erreichen des 95 %-Wertes (siehe Fußnote 1) wird durch die thermische Trägheit des Thermoelementes des Brenn- und Strahlungskammersystems des Versuchsstandes hervorgerufen. Die Totzeit für das Mantelthermoelement TE2 nimmt aufgrund der größeren Trägheit gegenüber TE1 zu. Die aus dem Versuch ermittelte Totzeit für die Wärmestromdichtemessung an einer schweißplattierten Membranwand beträgt etwa 9 Sekunden.

Tabelle 1: Totzeiten

Sensor	t_{tot} s
NiCr-Ni-3 mm (TE1)	4
NiCr-Ni-12 mm (TE2)	17
Wärmestromdichtemessung (WSDM)	9

Dieser im Vergleich zur Simulation höhere Wert ergibt sich durch die thermische Trägheit des Brenn- und Strahlungskammersystems. Tabelle 1 zeigt zusammengefasst die Totzeiten der unterschiedlichen Messsensoren.

3. Diskussion von Daten ausgewählter Wärmestromdichtemessungen in der Praxis

Im Folgenden werden Messwerte von Wärmestromdichtemessungen aus einer Abfallverbrennungsanlage und einer Biomasseverbrennungsanlage im Hinblick auf die Bewertung der Belagsituation diskutiert.

3.1. Quantitative Beurteilung des Messsignals

Bild 5 zeigt das Messsignal einer Wärmestromdichtemessung an einer Abfallverbrennungsanlage. Der Installationsort befindet sich im Übergang vom Feuerraum zum ersten Strahlungszug. Über einen Zeitraum von 18 Stunden nimmt das Messsignal stetig von 160 auf 60 kW/m² ab, bis es sprunghaft erneut auf 160 kW/m² ansteigt. In diesem Zeitraum sind die Dampfplast und die Feuerraumtemperatur der Anlage konstant geblieben, so dass unter Annahme einer konstanten Wärmeleitfähigkeit (0,7 W/(mK)) und gleich bleibender abgasseitiger Wärmeübergangsbedingungen die Belagsstärke berechnet werden kann.

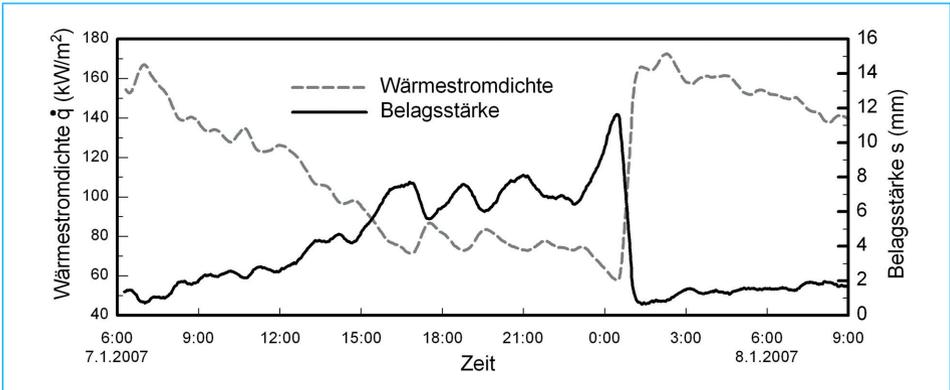


Bild 5: Übertragene Wärmestromdichte und berechnete Belagsstärke

Das sprunghafte Ansteigen der Wärmestromdichte tritt aufgrund des schlagartigen Abfallens von Belägen ein. Ein solches plötzliches Abfallen von Belägen ist typisch bei nitridgebundenen SiC-Platten im Bereich hoher Wärmestromdichten. Aus Bild 5 ist – wie anhand der theoretischen Ergebnisse (siehe Abschnitt 1) gezeigt – zu sehen, dass ein Anwachsen der Belagsstärke bei geringen Belagschichtdicken (z.B. von 1 mm auf 4 mm Belagsstärke) ein stärkeres Abfallen der Wärmestromdichte bewirkt, als ein Anwachsen der Belagschicht bei bereits vorhandenen Belägen (z.B. von 5 mm auf 11 mm Belagsstärke).

3.2. Signalanalyse

In Abschnitt 2 wurde im Zusammenhang mit der Dynamik der Messwerterfassung eine sprunghafte Änderung der Wärmestromdichte untersucht. Bei dem in Bild 6 gezeigten Signalverlauf treten die Schwankungen aufgrund verschiedener Einflüsse auf.

Zu unterscheiden sind lang- und kurzfristige Fluktuationen der Messsignale. Kurzfristige, sprunghafte Erhöhungen der Wärmestromdichte ergeben sich naturgemäß durch die Online-Reinigung (Bild 6 a und b).

Nach dem sprunghaften Anstieg der Messsignale als Folge der Online-Reinigungen nehmen diese im weiteren Verlauf wieder ab, was auf ein Anwachsen eines Belages auf der Membranverdampferwand zurückzuführen ist. Es ist zu erkennen, dass das Signal der Wärmestromdichtemessung kurz nach der Reinigung

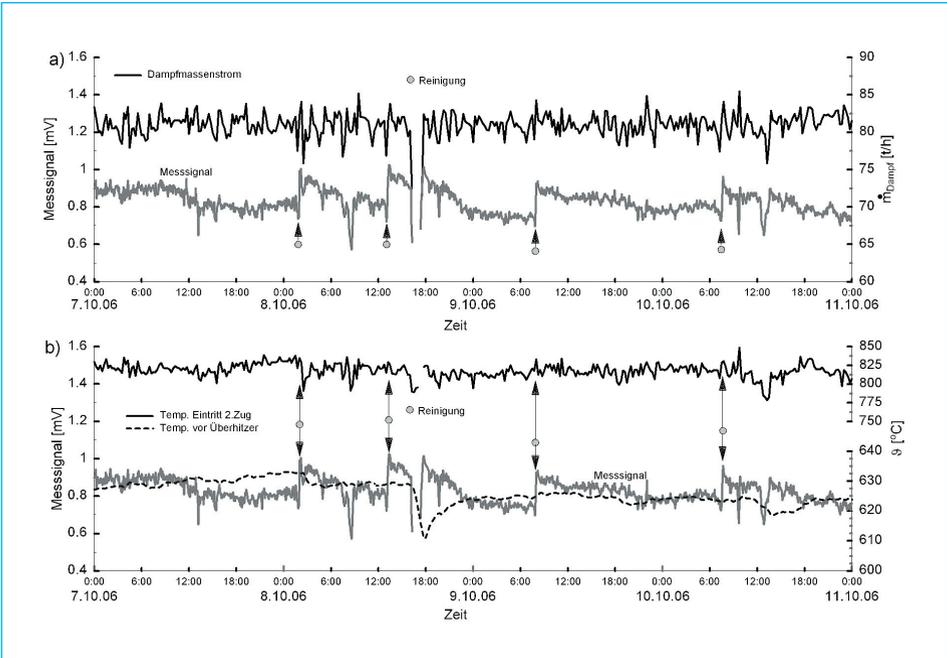


Bild 6: Einfluss der Online-Reinigung auf die Signale der Wärmestromdichtemessung

relativ stark und im weiteren Verlauf zunehmend flacher abfällt. Dieser Zusammenhang wurde bereits anhand der theoretischen Ergebnisse (siehe Abschnitt 1) vorausgesagt.

Neben den absoluten Werten des Messsignals können aus dem Signalverlauf, d.h. aus dem Amplituden- und Frequenzspektrum weitere Informationen zur Belagssituation abgeleitet werden. Der Belag hat abhängig von seiner Masse und seiner spezifischen Wärmekapazität einen dämpfenden Einfluss auf die wärmestromabhängigen Temperaturschwankungen des Steges der Membranwand.

Links in Bild 7 ist die isolierende und die speichernde Wirkung eines Belages zu erkennen. D.h. die Wärmestromdichte ist niedrig und die Signaldämpfung entsprechend groß. Rechts in Bild 7 hingegen – bei sauberem Zustand – ist das Messsignal vergleichsweise größer und die Dämpfung entsprechend kleiner.

Die Bilder 8 a und 8 b zeigen das Amplitudenspektrum einer diskreten Fourieranalyse der Fluktuationen δ für die in Bild 7 dargestellten belegten (Bild 8 a) und sauberen (Bild 8 b) Bereiche.

In beiden Fällen tritt eine Kumulation von Periodendauern zwischen ein und zwei Minuten auf. Im Gegensatz zum belegten Fall (Bild 8 a) ergibt die Analyse im sauberen Fall (Bild 8 b) eine höhere Anzahl von Frequenzen – mit ähnlicher Amplitude – zwischen einer und zwei Minuten. Bei den aufgezeichneten Messdaten betrug die Abtastrate eine Minute, d.h. eine weitere Auswertung des Frequenz- und Amplitudenspektrums erscheint mit diesen Daten nicht sinnvoll. Die

Kumulation der Amplituden bei der Periodendauer von einer Minute weisen darauf hin, dass die Abtastrate zur Erfassung aller auftretenden Wärmestromdichtefluktuation weniger als eine Minuten betragen sollte.

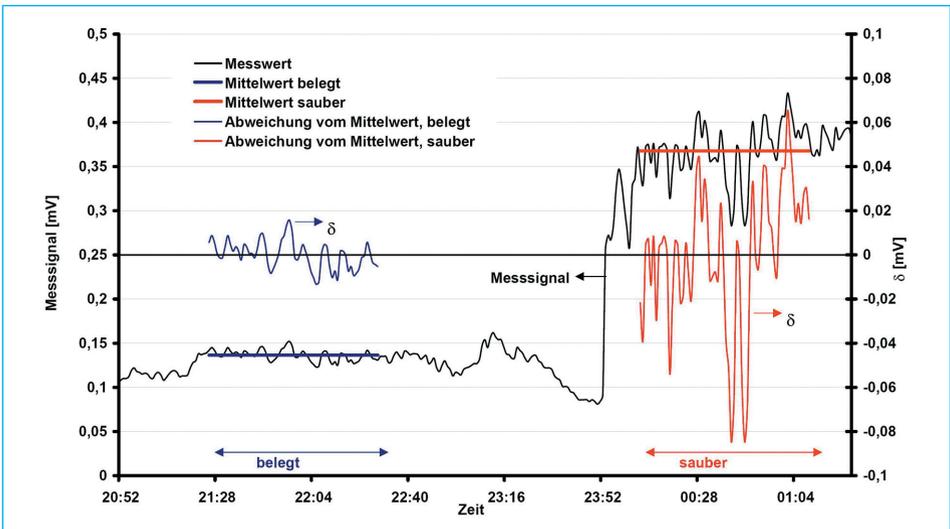


Bild 7: Einfluss des Belages auf die Messsignaldynamik

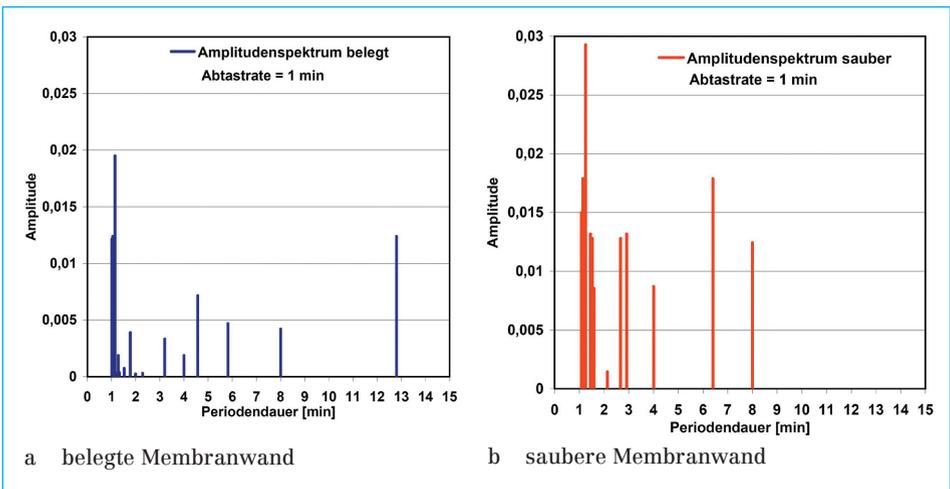


Bild 8: Einfluss des Belages auf die Messsignaldynamik – Fourieranalyse

4. Zusammenfassung

Die Verbrennung von Abfall und Biomasse führt zu abgasseitigen Belägen auf Wärmeübertragerflächen, die als Ursache für Korrosionen die Verfügbarkeit der Anlagen reduzieren. Darüber hinaus beeinträchtigen sie die Anlageneffizienz, da ein zusätzlicher Wärmeleitwiderstand auf den Wärmeübertragerflächen gebildet wird.

Der Einfluss des Belages ist abhängig von der Intensität des effektiven abgasseitigen Wärmeübergangs. In Kesselbereichen mit hohen Wärmeübergangskoeffizienten ist der Einfluss des Belags stärker, als in Bereichen schlechterer Wärmeübergangskoeffizienten. Somit folgt, dass sich eine Online-Reinigung von Kesselbereichen mit guten Wärmeübergangskoeffizienten effektiver auf die Abgaskühlung auswirkt als die Reinigung von Bereichen geringer Wärmeübergänge. In vielen Fällen wird die Gastemperatur vor Überhitzer und der Dampfmassenstrom für die Beurteilung des Verschmutzungszustandes eines Dampferzeugers im Bereich der Strahlungszüge verwendet. Prinzipiell ist der Dampfmassenstrom als Führungsgröße für die Online-Reinigung geeignet, da bei Anwachsen von Belägen auf Wärmeübertragerflächen die Dampfproduktion nachlässt. Dieser Parameter wird jedoch häufig als Führungsgröße von der Feuerungsleistungsregelung durch Regelung des Brennstoffmassenstroms konstant gehalten. D.h. eine belagsbedingte Verminderung der Dampfproduktion wird durch einen höheren Brennstoffmassenstrom ausgeglichen, was zwangsläufig zu einer Erhöhung der Abgastemperatur vor Überhitzer führt. Dieser Effekt wird jedoch bei großzügig ausgelegten Kesselanlagen gedämpft, so dass der Dampfmassenstrom und die Temperatur vor Überhitzer und nach Kessel nur bedingt als Führungsgrößen für die Online-Reinigung geeignet sind. Darüber hinaus haben der Dampfmassenstrom und die Gastemperaturen vor Überhitzer bezüglich der Belagssituation naturgemäß einen integralen Charakter, d.h. es kann anhand dieser Parameter keine Aussage über den genauen Ort der Belagsbildung und der zu reinigenden Bereiche gemacht werden.

Zur Bestimmung der abgasseitigen Belagssituation und damit auch als Signal für die Online-Reinigung von Membranverdampferwänden kann die Wärmestromdichte verwendet werden. Beispiele von Wärmestromdichtemessungen verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Wärmestromdichte und Belagssituation bzw. den Einfluss der Online-Reinigung auf die Wärmestromdichte. Darüber hinaus können aus der Fluktuation der Wärmestromdichte, d.h. aus der Frequenzanalyse der Wärmestromdaten, weitere Informationen über die feuerraumseitige Belagssituation abgeleitet werden.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die finanzielle Unterstützung bei dem Projekt (Aktenkennzeichen: 23893-24) *Entwicklung eines Messsystems für die Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranwände von Dampferzeugern in Biomasseverbrennungsanlagen*.

5. Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

k	$W/(m^2K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
\dot{m}	t/h	Massenstrom
\dot{q}	kW/m^2	Wärmestromdichte

R	(m ² K)/W	Wärmeleitwiderstand
s	m	Abstand, Weg
t	s	Zeit

Griechische Symbole

α	W/(m ² K)	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
δ	mV	Fluktuation
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
ϑ	°C	Temperatur
Δ	–	Differenz
τ	s	Zeitkonstante

Indices

AG	Abgas
außen	Feuerraumseite
Belag	Belag
belegt	belegter Zustand der Wand
Dampf	Dampf
eff	effektiv
max	maximal
tot	t_{tot} – Totzeit
sauber	sauberer Zustand der Wand
Steg-Scheitel	$\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ – Differenz zwischen Scheitel- und Stegtemperatur
SW	Siedewasser
O	t_0 – Ausgangszustand
∞	t_∞ – Zeitpunkt des stationären Zustandes nach Änderung

6. Literaturangaben

- [1] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.; Magel, G.: Online-Reinigung von Membranwänden in Abhängigkeit der Wärmestromdichte. Beitrag zum 23. Deutschen Flammentag
- [2] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.; Magel, G.: Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranverdampferwände von Dampferzeugern. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 641-658
- [3] Hengstenberg, J.; Sturm, B.; Winkler, O.: Messen, Steuern und Regeln in der Chemischen Technik. Band II, dritte überarbeitete Auflage, Berlin: Springer Verlag, 1982