

Online-Analyseverfahren zur Ermittlung von Belagsstoffeigenschaften in Dampferzeugern

Online analysis method for determining deposit properties in steam generators

Dipl.-Ing. **Sebastian Grahl**, Prof. Dr.-Ing. **Michael Beckmann**,
Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik

Kurzfassung

Die Auslegung und der Betrieb von Verbrennungsanlagen für Biomasse und thermisch verwertbaren Abfallprodukten gelten als problematisch, da die Schwankungsbreite der Brennstoffzusammensetzung und der daraus resultierende Energiegehalt sehr groß sind. Darüber hinaus treten häufig Beläge an den Verdampferwänden auf, die sowohl die Wärmeübertragung behindern und somit die Dampferzeugerleistung reduzieren als auch in der Regel korrosionsfördernd sind.

In Hinsicht auf eine während des Betriebs optimierte Abreinigung, zum Beispiel durch Wasserlanzenbläser, sind Methoden erwünscht, mit denen die Verschmutzung online analysiert werden kann.

Das Temperaturfeld und die Wärmestromdichteverteilung in der Membranwand sind von deren Stoffeigenschaften Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sowie den Wärmeübergangsbedingungen vom Rauchgas auf die Wand abhängig. Gegenüber dem „sauberen“ Membranwandzustand werden durch das Vorhandensein von Belägen auftretende Temperaturschwankungen in Abhängigkeit der Stoffeigenschaften des Belags gedämpft und es erfolgt eine Phasenverschiebung des Messsignals. Daraus wurde eine Methode zur Online-Signalanalyse von Wärmestromdichte- und Temperaturmesssignalen entwickelt, die künftig dazu beitragen kann, während des Betriebs Informationen zur Art des Belags, dessen Schichtdicke und Korrosionsneigung sowie weiterer Eigenschaften für eine entsprechend optimierte Abreinigung zu erhalten.

1. Zusammenhang zwischen Belagswachstum und Messsignalen

Mit dem von Krüger [1] entwickelten Verfahren zur Messung der Wärmestromdichte an Membranwänden von Dampferzeugern sind mit zunehmender Verschmutzung charakteristische Signalverläufe für die Heizflächen in Dampferzeugern von Biomasse und Abfallverbrennungsanlagen zu beobachten. Dieses Verfahren nutzt die von der auftretenden Wärmestromdichte an der Membranwand abhängige Temperaturverteilung im Membranwandquerschnitt. Dazu wird mittels thermoelektrischen Effekts (Seebeck-Effekt) die zwischen der

Stegmitte und dem Rohrscheitel auf der feuerraumabgewandten Seite der Membranwand auftretende Thermospannung mit zwei Thermoelementen gemessen. Aus der resultierenden Thermospannung kann dann über den entsprechenden Proportionalitätsfaktor (Seebeck-Koeffizient) des Thermopaars die Temperaturdifferenz ermittelt werden. Ein auf diese Weise erhaltenes Messsignal zeigt nach einer Abreinigung der Beläge während des Betriebs einen plötzlichen und starken Anstieg. Anschließend verläuft das Messsignal zunächst auf höherem Niveau weiter, sinkt dabei jedoch kontinuierlich ab und erreicht dann, nach entsprechender Reisezeit der Anlage, näherungsweise wieder das Ursprungsniveau des verschmutzten Zustands. Dabei ist nach der Abreinigung nicht nur die aus dem gestiegenen Messsignalniveau folglich höhere Wärmestromdichte auffällig, sondern auch die größere Standardabweichung des Messsignals ausgehend vom erwarteten Mittelwert. Diese Beobachtung führt zu dem Schluss, dass ein Belag nicht nur den Wärmedurchgang behindert und damit die übertragene Wärmeleistung reduziert, sondern auch Schwankungen im Messsignal mit zunehmender Belagsstärke immer stärker dämpft. Daraus wurde die These abgeleitet, dass das Messsignal Informationen zum Belag liefert, die im folgenden Abschnitt physikalisch begründet wird.

2. Physikalische Modellierung des Temperaturfelds und der Wärmestromdichteverteilung von Belägen anhand harmonischer Schwingungen

Zunächst wird das Problem stark vereinfacht um überschaubare Randbedingungen definieren zu können. Dazu erhält die Membranwand eine feuerfeste Zustellung mit ebener Oberfläche. Mit der Annahme, dass sämtliche übertragene Wärme vom Rauchgas auf das Siedewasser übergeht, dieses dabei verdampft und die Wärmeverluste durch eine gute äußere Isolierung der Membranwand vernachlässigbar klein sind, wird aus der zweidimensionalen Rohr-Steg-Rohr-Geometrie mit der Zustellung ein einseitig unendlich ausgedehnter Körper. Die Unendlichkeit wird für diesen Fall durch eine gegen unendlich gehende Wärmekapazität des Wassers bei der Verdampfung erreicht, die eine rasche Dämpfung von auftretenden Temperaturschwingungen bis auf die konstant bleibende Siedewassertemperatur – gleich der mittleren Temperatur einer unendlich ausgedehnten Platte – bewirkt. Für eine in der Regel große Schichtdicke der Zustellung mit guter Wärmeleitfähigkeit liegt an deren Oberfläche eine einheitliche Temperatur vor. [1] Der Belag auf diesem Körper und dessen Temperaturverteilung kann nun als eben angesehen werden und es wird Homogenität und Isotropie vorausgesetzt.

Zur Berücksichtigung der ständig wechselnden Heizflächenbelastungen in einem Dampferzeuger dient ein periodischer, zeitabhängiger Wärmeeintrag an der Oberfläche des Belags,

der durch eine sich nach dem folgenden periodischen Zeitgesetz ändernde Rauchgas-temperatur hervorgerufen wird:

$$\vartheta_{RG} = \vartheta_m + \Delta\vartheta \cdot \cos(\omega \cdot \tau). \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet ϑ_m eine konstante Mitteltemperatur des Rauchgases, $\Delta\vartheta$ die Temperaturschwankungsamplitude, τ die Beobachtungszeitdauer sowie ω die Kreisfrequenz der Schwingung. Mit dem Übergang der Wärme vom Rauchgas auf den Belag tritt Wärmeleitung ein, wofür die Fourierschen Differentialgleichung für das instationäre, eindimensionale Temperaturfeld

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2} \quad (2)$$

mit der Ortskoordinate x und der Temperaturleitfähigkeit a gilt. Wird weiterhin die Temperaturleitfähigkeit durch den Ausdruck

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (3)$$

ersetzt, so ist der Verlauf des Temperaturfeldes schließlich abhängig von der mittleren Temperatur im Feuerraum, der Temperaturschwankungsamplitude, der Periodendauer und den Stoffeigenschaften der Belagsschicht, die in der Temperaturleitfähigkeit zusammengefasst werden können. Gelingt es also aus den Temperaturschwankungen die Temperaturleitfähigkeit zu ermitteln, ist eine Aussage über die Eigenschaften des Belags möglich.

Die aus der Literatur [2] und [3] bekannte Lösung für die Differentialgleichung für einseitig unendlich ausgedehnte Körper wird nach Einsetzen von Gleichungen (1) und (3) in (2), durch Überlagerung mit einer linearen Differentialgleichung, die zusätzlich einen im Mittel konstanten, somit quasistatischen Wärmestrom \dot{q}_m vom Feuerraum zum Siedewasser berücksichtigt, bei dem sich die mittleren Temperaturen auf beiden Seiten des ebenen Belags über der Zeit nicht ändern, erweitert. Mit der mittleren Oberflächentemperatur $\vartheta_{m,B,a}$ ergibt sich für das Temperaturfeld des Belags in abgekürzter Schreibweise

$$\vartheta(x, \tau)_{\tau \rightarrow \infty} = \vartheta_{m,B,a} - \frac{x}{\lambda} \dot{q}_m + \frac{\Delta\vartheta \cdot \exp(-\xi)}{\sqrt{1 + 2\beta + 2\beta^2}} \cos(\omega \cdot \tau - \varepsilon - \xi), \quad (4)$$

mit den Abkürzungen

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right), \quad \beta = \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{\omega}{2a}} = \frac{b}{\alpha} \sqrt{\frac{\omega}{2}} \quad \text{und} \quad \xi = x \sqrt{\frac{\omega}{2a}}.$$

Die Variable b bezeichnet den für die weiteren Untersuchungen wichtigen Wärmeeindringkoeffizienten

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}. \quad (5)$$

Da wie in [1] beschrieben, keine einheitliche Temperatur an Membranwänden aufgrund ihrer Geometrie und der Wärmeabfuhr in den Siederohren ermittelt werden kann, sich jedoch die Wärmestromdichte mit geringem Aufwand ermittelt lässt, erfolgt darüber die Charakterisierung der Beläge. Deshalb ist neben dem Temperaturfeld vor allem der Zusammenhang von Wärmestromdichte und Schwingung der Temperatur im Belag von Bedeutung. Dieser Zusammenhang ist dadurch gegeben, dass der negative Gradient des Temperaturfelds über den Proportionalitätsfaktor Wärmeleitfähigkeit λ proportional zur Wärmestromdichte \dot{q} ist. Es ergibt sich aus dieser Kenntnis unter Verwendung von Gleichung (4) folglich die Gleichung für die Wärmestromdichte mit

$$\dot{q}(x, \tau) = \dot{q}_m + \frac{\Delta\vartheta \cdot b \cdot \sqrt{\omega} \cdot e^{-\xi}}{\sqrt{1 + 2\beta + 2\beta^2}} \cos\left(\omega \cdot \tau - \varepsilon - \xi - \frac{\pi}{4}\right). \quad (6)$$

Aus den Gleichungen (4) und (6) geht hervor, dass am Übergang zwischen Gas und Belag die Schwingungen ihre maximale Amplitude besitzen. Mit wachsender Eindringtiefe x beziehungsweise dem Wert ξ wird zusätzlich eine Dämpfung der Schwingung mit Phasenverschiebung hervorgerufen, bei der jedoch ebenfalls die Schwingungsdauer konstant bleibt und der Anregungsschwingung der Umgebungstemperatur entspricht (vgl. Gleichung (1) mit (4) und (6)). Die Temperatur fällt – betrachtet man sie für eine gleichmäßige Schwingung als quasistatisch – im Mittel linear mit zunehmender Eindringtiefe in den Belag. Die Wärmestromdichte hingegen oszilliert um einen konstanten Mittelwert \dot{q}_m , resultierend aus Temperaturgradient, Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicke des Belagsmaterials. Amplitude und Phasenverschiebung der Wärmestromdichte sind wie bei der Temperaturschwingung abhängig vom Material des Belags und dessen Schichtdicke. Eine ausführlichere Beschreibung des Rechenwegs ist in [4] sowie demnächst unter [5] zu finden.

3. Methode der Signalcharakterisierung und experimentelle Validierung

Für die experimentelle Validierung wird an einer Versuchsanlage die thermische Leistung eines Gasbrenners variiert und damit eine sinusförmige Schwingung von Temperatur und Wärmestrom im Belag aufgeprägt. Die oszillierende Wärmestromdichte setzt sich von der Oberfläche des Belags bis zum Übergang auf die feuerfeste Zustellung der Versuchsanlage nach Gleichung (6) gedämpft fort. Es liegt somit bei der Messung der Wärmestromdichte nach der Steg-Rohr-Methode [1] ein sinusförmiges Messsignal vor.

Um einen Referenzzustand der Schwingung ohne Dämpfung des Belags zu ermitteln, wird die Oberflächentemperatur des Belags mit einer Infrarotkamera direkt gemessen, wofür der

Messwert abhängig vom Emissionsgrad, aber unabhängig von den Belagseigenschaften, der Belagsstärke sowie den Wärmeübergangsbedingungen vom Gas auf die umschließenden Wände ist; da in all diesen Größen Messfehler, die zu gewissen Unsicherheiten im Messwert führen, stecken. Durch die direkte Messung der Oberflächentemperatur wird in den Gleichungen (4) und (6) Null, da aus der Randbedingung 3. Art eine Randbedingung 1. Art mit $\theta = 0$ entsteht. Es resultiert eine Schwingung um die mittlere Oberflächentemperatur mit der Amplitude $\Delta\theta$. Die Phasenverschiebung der Messwerte zwischen Oberflächentemperatur des Belags und dem Wärmestromdichtesignal beträgt somit wie in **Bild 1** für ein Experiment dargestellt: $\Delta\theta$. Die Phasenverschiebung setzt sich dabei sowohl aus der Phasenverschiebung des Belags als auch durch die der feuerfesten Zustellung vor der Rohrwand und das Rohrwandmaterial selbst zusammen, die zur Ermittlung der Totzeit für die Messungen berücksichtigt werden müssen.

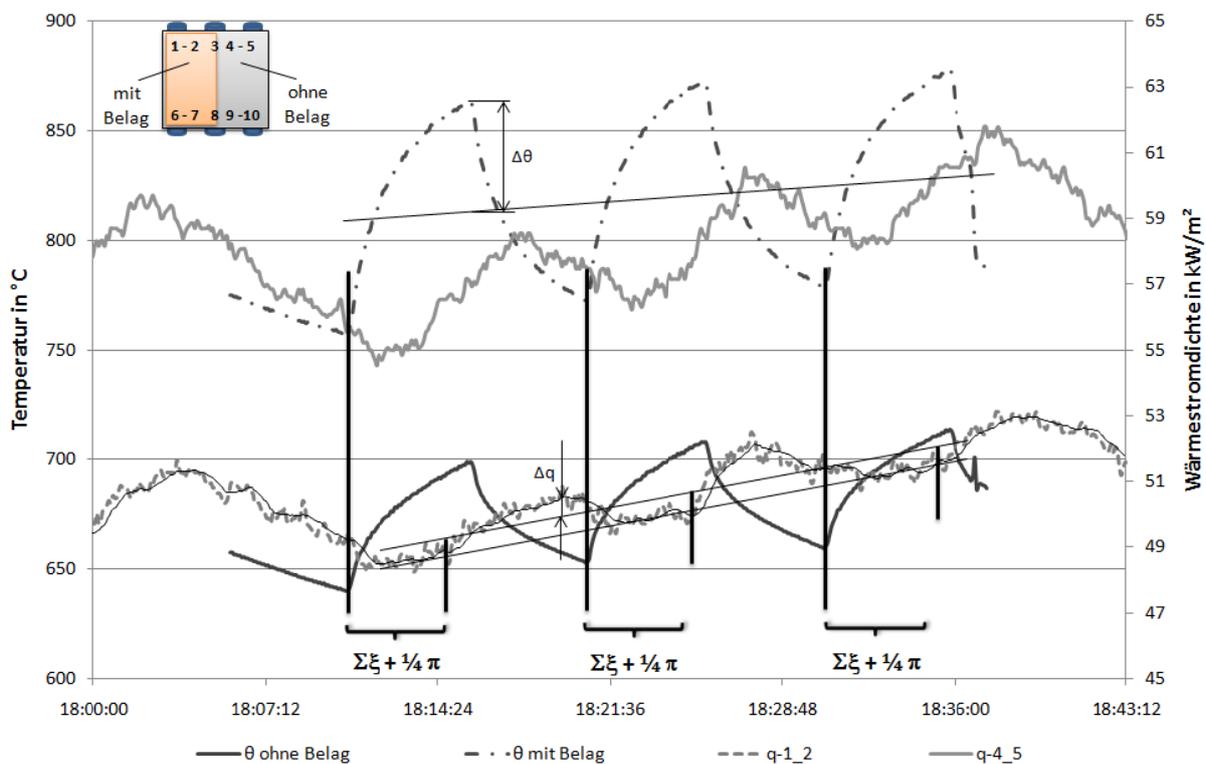


Bild 1: Phasenverläufe zur Bestimmung der Phasenverschiebung zwischen der Wärmestromdichte am Übergang Wandaufbau/ Belag und der Temperatur der Belagsoberfläche

Aus der Phasenverschiebung kann über $\Delta\theta$ nun der Wärmeeindringkoeffizient λ aus dem Amplitudenvergleich der Gleichungen (4) und (6) ermittelt werden. Die Berechnungs-

gleichung mit der Amplitude der Wärmestromdichte $\hat{q}(\delta_B, \tau_2)$ am Übergang zwischen Belag und Membranwand, der Amplitude der Oberflächentemperatur des Belags $\hat{\vartheta}(0, \tau_1)$ sowie der Korrektur der durch den Belag verursachten Dämpfung zwischen Temperatur- und Wärmestromschwingung e^ξ lautet:

$$b = \frac{\hat{q}(\delta_B, \tau_2)}{\hat{\vartheta}(0, \tau_1)} \sqrt{\frac{1}{\omega}} e^\xi. \quad (7)$$

Aus dem Wärmeeindringkoeffizienten b lässt sich nun die Schichtdicke des Belags in Abhängigkeit von dessen Wärmeleitfähigkeit bestimmen. Unter Annahme oder Kenntnis dieser Wärmeleitfähigkeit und Einsetzen von ξ in Gleichung (5) sowie anschließender Umformung nach der Schichtdicke δ_B wird diese wie folgt ermittelt:

$$\delta_B = \frac{\lambda}{b} \xi \sqrt{\frac{2}{\omega}}. \quad (8)$$

Eine iterative Bestimmung der Schichtdicke beziehungsweise der Wärmeleitfähigkeit ist jedoch auf diese Weise nicht möglich, da der Gradient des Temperaturfelds konstant bleibt, womit sich nach Gleichung (8) für eine größere Belagsstärke stets eine entsprechend höhere Wärmeleitfähigkeit des Belags ergibt. Da sowohl Belagsstärke als auch Wärmeleitfähigkeit im Betrieb jedoch in der Regel nicht bekannt sind, kann auf diese mittels der Messdaten über das hier besprochene nicht-invasive Messverfahren nicht direkt geschlossen werden. Eine Lösung dafür bietet die volumetrische Wärmekapazität, die in Abhängigkeit vom Wärmeeindringkoeffizienten durch das Sammeln und analysieren von Belagsproben im Stillstand in guter Näherung vorausgesagt werden kann. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methode erscheint in Kürze unter [5]. Im nächsten Schritt ist schließlich die Verallgemeinerung der vorgestellten Methode auf nichtharmonische Schwingungen geplant.

4. Literaturverzeichnis

- [1] **Krüger, Sascha.** *Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern.* Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen. 978-3-935317-41-2.
- [2] **Gröber, Heinrich, Erk, Siegmund und Grigull, Ulrich.** *Die Grundgesetze der Wärmeübertragung.* 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1988.
- [3] **Carlsaw, Horatio Scott und Jaeger, John Conrad.** *Conduction of Heat in Solids.* 2. Auflage. New York : Oxford University Press, 1959. 0-19-853368-3.
- [4] **Grahl, Sebastian und Beckmann, Michael.** Wärmestromdichtemessung zur Belagsbestimmung. [Hrsg.] Michael Beckmann und Antonio Hurtado. *Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung* -. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, Bd. 2, S. 727-742.
- [5] **Grahl, Sebastian und Beckmann, Michael.** In-situ analysis of deposit properties in steam generators.

