

Wärmestromdichtemessung zur Belagsbestimmung

Sebastian Grahl und Michael Beckmann

1.	Ergebnisse aus Felduntersuchungen	728
2.	Theorie der Belagscharakterisierung	731
3.	Praktische Umsetzung der Charakterisierung und Validierung des Ansatzes	737
4.	Zusammenfassung	741
5.	Referenzen	742

Verfahren zur Wärmestromdichtemessung sind seit längerer Zeit bekannt, was sich auch in der Vielzahl der unterschiedlichen Messverfahren widerspiegelt. Eine Anwendung in Dampferzeugern erfolgte in der Vergangenheit vor allem im Zusammenhang mit der Festlegung und Kontrolle bestimmter Grenzwerte für die Flächen-, Querschnitts- und Volumenbelastungen, die als Kriterien für die Dimensionierung von Dampferzeugern dienen. Für einen wirtschaftlichen und stabilen Betrieb bei hoher Verfügbarkeit – auch unter Teillast – müssen bei der Auslegung die dafür wichtigsten Parameter berücksichtigt werden. Namentlich sind das die Wärmeübertragung, also der Verdampfungsprozess, die thermische Belastung der Überhitzer, die Kesselaustrittstemperatur, Schadstoffbildungsprozesse bei der Verbrennung und die während des Betriebs auftretenden Verschmutzungen der Wärmeübertragungsflächen. Dementsprechend kann bei festgelegter Brennstoffart über die Brennstoffaufbereitung, Brenneranordnung und -konstruktion, den Ort beziehungsweise die Menge der Brennstoff- und Oxidationsmittelzugabe sowie der Dampferzeugergeometrie und den bereits angesprochenen Belastungskennzahlen eine Anpassung an die geforderten Bedingungen ermöglicht werden. Für die Festlegung der Geometrien ist es jedoch nicht ausreichend Mittelwerte für Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit am Kesselaustritt zu benennen, sondern es muss ein möglichst exaktes Strömungsgeschwindigkeits- und Temperaturprofil über dem Querschnitt entlang des Rauchgasweges ermittelt werden. Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit besitzen jedoch eine komplexe Abhängigkeit von einer Vielzahl von unterschiedlichsten Parametern, die in den in der Praxis üblichen Simulationswerkzeugen überwiegend als *black box* dargestellt werden. Der *black box* dienen dann bestimmte Eigenschaften als Randbedingungen, die meist aus Erfahrungswerten oder empirischen Ansätzen stammen. Eine möglichst exakte mathematische Betrachtung liefert im Allgemeinen unübersichtliche Auslegungsansätze, in denen oftmals die wesentlichen Einflussparameter nicht ohne Weiteres zu erkennen sind und die große Menge an erforderlichen Randbedingungen einen für den Planer nicht befriedigenden Lösungsansatz bildet.

Insbesondere die Auslegung von Verbrennungsanlagen für Biomasse und thermisch verwertbaren Abfallprodukten gilt dabei als problematisch, da die Schwankungsbreite der Brennstoffzusammensetzung und der daraus resultierende Energiegehalt sehr groß sind. Das führt häufig zu besonders korrosionsfördernden Belägen an den Verdampferwänden, wodurch zeitgleich auch der in das Siedewasser eingekoppelte Wärmestrom an diesen Stellen durch schlechteren Wärmeübergang vom Gas auf die Wand sowie schlechtere Wärmeleitung im Belagsmaterial zum Teil sehr stark absinkt. Dies kann in der Folge größere Abgasverluste oder unzulässig hohe Materialbelastungen an nachfolgenden Komponenten verursachen. Dies gilt es mit geeigneten Maßnahmen zu verhindern.

Neben den derzeit angewendeten Lösungen wie Auftragsschweißschichten aus Nickelbasiswerkstoffen und verschiedenen Reinigungsmaßnahmen sind zusätzliche Möglichkeiten und Methoden erwünscht mit denen direkt in das Betriebsverhalten von Anlagen eingegriffen, beziehungsweise Korrosion und Verschmutzung konkret analysiert werden können.

Bei der vom Belag verursachten Behinderung der Wärmeauskopplung und den großen Temperaturgradienten zwischen Rohroberfläche und Abgas auf der einen Seite und das Auftreten eines Belagsmaterials mit korrosiven, temperaturabhängigen Eigenschaften auf der anderen, existiert ein qualitativer Zusammenhang zwischen Bildung und Aufbau von Belägen und dem auf die Verdampferwand auftreffenden Wärmestrom. Letzterer kann somit einerseits dazu genutzt werden, Beläge an Membranwänden von Dampferzeugern zu charakterisieren und den Zeitpunkt der Abreinigung festzulegen sowie andererseits das Korrosionspotential des Belags abzuschätzen.

In [6] wurde über den Informationsgewinn durch Wärmestromdichtemessungen, insbesondere über die Charakterisierung von Belägen an Dampferzeugerwänden, zunächst hinsichtlich der theoretischen Grundlagen berichtet. Aufbauend auf diesem Beitrag, wird an dieser Stelle im Zusammenhang mit der Signalauswertung und mit experimentellen Ergebnissen angeknüpft.

1. Ergebnisse aus Felduntersuchungen

Für den Signalverlauf der Wärmestromdichte ist – wie sich aus Abbildung 1 schlussfolgern lässt – eine eindeutige Abhängigkeit von der Belagsbildung auf Heizflächen in Dampferzeugern zu erkennen. Die mit der Zeit (Abszisse) zunehmende Belagsstärke sorgt einerseits für einen kontinuierlich anwachsenden Wärmeleitwiderstand – damit abhängig von den Materialeigenschaften sowie der Schichtdicke zu einem geringeren Wärmestrom – und führt so zu einem niedrigeren Messsignalniveau (Die gemessene Thermospannung zwischen Rohrsteg und Rohrscheitel ist direkt proportional zur Temperaturdifferenz zwischen diesen Punkten und entspricht somit einer bestimmten, auf die Membranwand

übertragenen Wärmestromdichte.). Andererseits ergibt sich daraus ein materialabhängiges Wärmespeicher- sowie Wärmetransportvermögen, wodurch bei einer aufgeprägten Schwankung der Wärmestromdichte ein dämpfender Einfluss auf die Schwankung der Temperaturdifferenz zwischen Rohrsteig und Rohrscheitel resultiert. Somit ist es möglich, Informationen zur Belagssituation abzuleiten, nämlich aus dem Amplituden- und Frequenzspektrum sowie bei höherer zeitlicher Auflösung auch aus der Phasenverschiebung des Messsignals. Linkerhand in Abbildung 1 ist die isolierende und speichernde Wirkung eines Belags an der vergleichsweise niedrigen Wärmestromdichte (resultierend aus dem niedrigeren Messsignalniveau) und der großen Signaldämpfung zu erkennen. Auf der rechten Seite von Abbildung 1 hingegen – bei sauberem Zustand –, erreicht das Messsignal ein im Vergleich höheres Niveau und die Dämpfung der Amplitude ist entsprechend geringer.

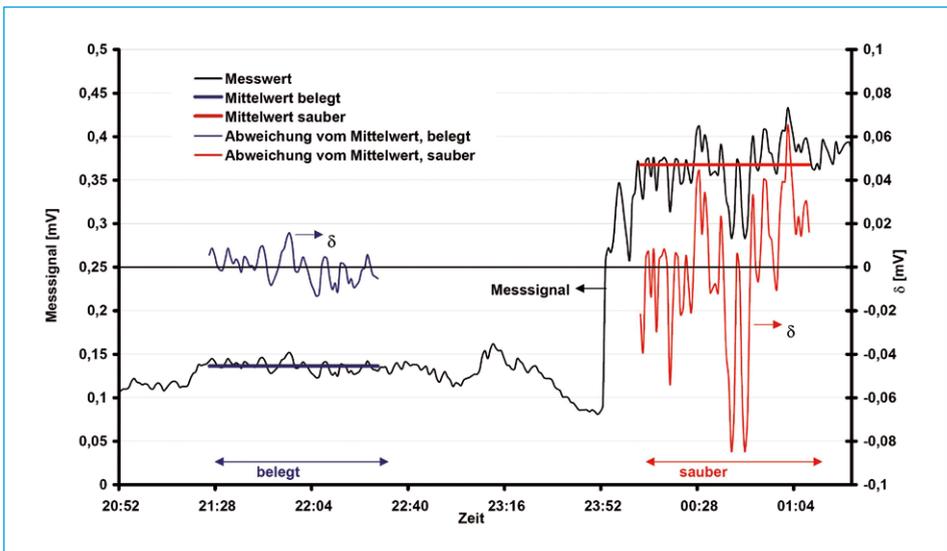


Abb. 1: Einfluss des Belags auf die Messsignaldynamik

Quelle: Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden: s.n., 2009, Dissertation

Abbildung 2a und b zeigen das Amplitudenspektrum einer diskreten Fourier-Analyse der Fluktuationen für die in Abbildung 1 dargestellten belegten (Abbildung 2a) und *sauberen* (Abbildung 2b) Bereiche. Im Gegensatz zum belegten Fall (Abbildung 2a) ergibt die Analyse im sauberen Fall (Abbildung 2b) eine höhere Anzahl von Frequenzen – mit ähnlicher Amplitude – zwischen ein und zwei Minuten. Da sich die Fluktuation der Wärmestromdichte (siehe Abbildung 1) aus allen in Abbildung 2a (für den belegten Fall) beziehungsweise Abbildung 2b (für den sauberen Fall) gezeigten Amplituden beziehungsweise Frequenzen zusammensetzt, ergibt sich im sauberen Fall eine ausgeprägtere Fluktuationsamplitude.

Als Resultat der beschriebenen Beobachtungen hat sich die Frage ergeben, ob eine Analyse der Wärmestromdichtemesssignale Hinweise auf die Art des Belags, die Schichtdicke, Abreinigung, Korrosionsneigung und andere wichtige Informationen für einen sicheren, stabilen und möglichst störungsfreien Anlagenbetrieb geben kann.

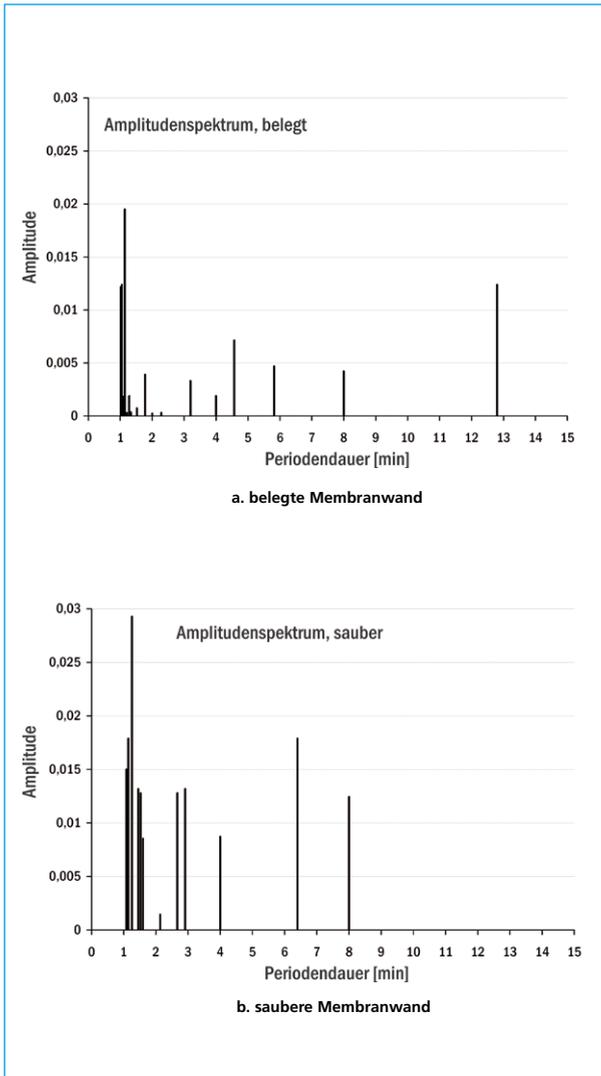


Abb. 2:

Einfluss des Belags auf die Messsignaldynamik – Fourier-Analyse

Quelle: Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden: s.n., 2009, Dissertation

Der aus den Beobachtungen evidente Zusammenhang zwischen Belag, dessen Schichtdicke und Materialeigenschaften sowie dem daraus resultierenden Verhalten des Wärmestromdichtemesssignals sind somit physikalisch zu begründen, was im folgenden Abschnitt erfolgen soll.

2. Theorie der Belagscharakterisierung

Wie bereits in [6] berichtet, wurden in der Vergangenheit Berechnungsansätze zur Beschreibung des Temperaturverlaufs beziehungsweise der Wärmeleitung, speziell im Erdreich sowie in Zylinderwänden von Verbrennungsmotoren [1], formuliert. Diese Ansätze können prinzipiell auf den Membranwandaufbau beziehungsweise den Steg der Membranwand übertragen werden; selbst dann, wenn die Fluktuation der Temperatur aperiodisch ist, wofür in der Regel eine Laplace- beziehungsweise im speziellen Fall eine Fourier-Transformation anzuwenden ist.

In einem ersten, möglichst einfachen Schritt soll die Abhängigkeit des Verlaufs einer Temperaturschwingung von den Materialeigenschaften des wärmeleitenden Materials gezeigt werden. Dazu wurden die bereits aus der Literatur bekannten Gleichungen [1] entsprechend erweitert und die Randbedingungen auf den speziellen Fall einer vollständigen Dämpfung der Temperaturschwingung – äquivalent zu einer halbbunendlichen Wand –, jedoch nicht durch einen entsprechend unendlich großen Wärmeleitwiderstand, sondern durch die Annahme eines Verdampfungsvorgangs, bei dem sämtliche, durch die Wand transportierte Wärme den Phasenwechsel bewirkt, angepasst.

Als Ansatz dient ein periodischer, zeitabhängiger Wärmeeintrag in ein System, wodurch sich die Temperatur des an die Körperoberfläche angrenzenden Fluids (Gleichung (1)) und damit die eingebrachte Wärmestromdichte nach einem periodischen Zeitgesetz ändert.

$$\vartheta_F = \vartheta_m + \Delta\vartheta \cdot \cos(\omega \cdot \tau) \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet ϑ_m eine konstante Mitteltemperatur, $\Delta\vartheta$ die Temperaturschwankungsamplitude, τ die Zeitdauer, von einem beliebigen Zeitpunkt t_0 bis zum Zeitpunkt t gezählt sowie ω die Kreisfrequenz der Schwingung, welche wiederum mit

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \frac{1}{\tau_0} \quad (2)$$

von der Frequenz f beziehungsweise der Dauer einer Periode τ_0 abhängig ist. Für die konstante Mitteltemperatur ϑ_m ist zu beachten, dass aufgrund von unterschiedlichen Wärmeübergangsverhältnissen bei Erwärmung und Abkühlung diese nur näherungsweise auch für einen angrenzenden Feststoff gilt und deshalb separat betrachtet werden muss.

Geht man nun für einen Belag im Sinne eines Feststoffs von einem einseitig unendlich ausgedehnten Körper aus, bei dem Homogenität und Isotropie vorausgesetzt wird, muss das Temperaturfeld in der Belagsschicht der Fourierschen Differentialgleichung

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad (3)$$

mit der Ortskoordinate x und der Temperaturleitfähigkeit a genügen. Die Annahme eines einseitig unendlich ausgedehnten Körpers auch bei geringer Belagstärke, kann für eine Membranwand mit Zustellung deshalb getroffen werden, weil die Temperaturschwingungen rasch erfolgen, eine zunächst gleichmäßige Temperaturverteilung an der feuerraumzugewandten Seite durch in der Regel große Schichtdicken der Zustellung vorliegt und die Siedewassertemperatur in den Verdampferrohren einen konstanten Wert beträgt.

Für den Wärmeübergang auf den Belag wird die Randbedingung 3. Art vorgegeben, woraus folgt, dass für den Wärmeübergang an der Oberfläche des Belags ($x = 0$) folgende Beziehung gelten muss:

$$\alpha(\vartheta_F - \vartheta(0, \tau)) = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{x=0}. \quad (4)$$

Darin ist mit λ der Wärmeleitkoeffizient des Belagsmaterials sowie mit α der effektive Wärmeübergangskoeffizient bezeichnet, der sowohl die konvektiv übertragene Wärme beinhaltet, als auch äquivalent den Anteil der an der Oberfläche effektiv eingetragenen Strahlungswärme.

Wird weiterhin die Temperaturleitfähigkeit durch den Ausdruck

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

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 beziehungsweise aus der Schwankung der Wärmestromdichte die Temperaturleitfähigkeit zu ermitteln, kann somit eine Aussage über die Eigenschaften des Belags getroffen werden. Für eine genauere Analyse sind mindestens zwei weitere in der Temperaturleitfähigkeit enthaltene Stoffeigenschaften zu ermitteln, um eine genauere Aussage über die Art des Belags zu ermöglichen.

Die Lösung der Differentialgleichung kann über Laplace-Transformation [2] oder über partikuläre Integrale, die durch Probieren zu finden sind, ermittelt werden.

Dazu wird in der Literatur für die Schwingung der Temperatur zunächst das Produkt einer von der Zeit abhängigen Exponentialfunktion der Form $\varphi(t) = e^{i\omega t}$ und einer nur von den Koordinaten des Raumes abhängigen Funktion $\psi(x, y, z)$ als Ansatz vorgeschlagen [1], da somit nicht nur die Anzahl der unabhängigen Veränderlichen für die beiden Gleichungen reduziert werden kann, sondern unter letzterer in vielen Fällen das Temperaturfeld nur von einer Koordinate abhängig ist und sich somit mit einer gewöhnlichen Differentialgleichung lösen lässt. An dieser Stelle kann durch Überlagerung von linearen Differentialgleichungen ein im Mittel konstanter, somit quasistatischer Wärmestrom \dot{q}_m vom Feuerraum zum Siedewasser, bei dem sich die mittleren Temperaturen am Ein- und Austritt des Körpers über der Zeit nicht ändern, berücksichtigt werden. Durch aufwändige analytische Lösung der Differentialgleichungen [1] und Einsetzen der Randbedingungen an der Stelle der Oberfläche des Belags ($x = 0$), mit der mittleren Oberflächentemperatur $\vartheta_{m,B,a}$, ergibt sich für das Temperaturfeld des Belags in abgekürzter Schreibweise

$$\vartheta(x,\tau)_{\tau \rightarrow \infty} = \vartheta_{m,B,a} - \frac{x}{\lambda} \dot{q}_m + \frac{\Delta\vartheta \cdot \exp(-\xi)}{\sqrt{1 + 2\beta + 2\beta^2}} \cos(\omega \cdot \tau - \varepsilon - \xi) \quad (6)$$

in der

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right) \quad (7)$$

mit

$$\beta = \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot \tau_0}} = \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{\omega}{2a}} = \frac{b}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\tau_0}} \quad (8)$$

und

$$\xi = x \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot \tau_0}} = x \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad (9)$$

sind. Die Abwandlung der Gleichung (8) enthält zudem den Wärmeeindringkoeffizienten

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}. \quad (10)$$

Im Unterschied zu den aus der Literatur bekannten Lösungen für einen Körper mit einseitiger Unendlichkeit [1], [2] – für den kein Wärmetransport durch den Körper aufgrund einer nicht vernachlässigbaren Wärmeleitfähigkeit und des

demzufolge unendlich großen Wärmeleitwiderstands erfolgt – beschreibt Gleichung (6) gleichzeitig den Wärmetransport aus dem Feuerraum zum Siedewasser. Dabei liegt für die Verdampfung des Wassers als Phasenübergang 1. Ordnung eine unendlich große spezifische Wärmekapazität vor, wodurch der gleiche Effekt wie bei einem unendlich ausgedehnten Körper auftritt, bei dem die Temperaturschwingung bis zur Grenzfläche des Siedewassers auf die Temperatur des Siedewassers nahezu vollständig gedämpft wird. Somit unterscheiden sich diese beiden Fälle durch das Auftreten eines Temperaturgradienten, der den Verlauf der mittleren Temperatur ϑ_m im Wandaufbau beschreibt und aus dem der übertragene mittlere Wärmestrom errechnet werden kann. Für den einseitig unendlich ausgedehnten Körper wird keine Wärme durch den Körper transportiert und somit ist der Gradient der Temperatur Null, woraus die bekannte Gleichung für das Temperaturfeld aus [1] und [2] resultiert.

Eine nähere Betrachtung von Gleichung (6) ergibt, dass die Oberflächentemperatur, wie die Umgebungstemperatur, einer harmonischen Schwingung entspricht, bei der auch die Periodendauer den gleichen Wert wie diejenige für die Schwingung der Umgebungstemperatur besitzt. Die Oberflächentemperatur folgt dabei der Umgebungstemperatur mit einer zeitlichen Verzögerung, d.h. einer Phasenverschiebung um den Wert ε . Zudem tritt in der Praxis mit Werten von $\beta > 1$ eine Dämpfung der Schwingung auf. Für das gesamte Temperaturfeld wird mit wachsender Eindringtiefe x beziehungsweise dem Wert ξ zusätzlich eine Dämpfung der Schwingung mit Phasenverschiebung hervorgerufen, bei der jedoch ebenfalls die Frequenz derer der Schwingung der Umgebungstemperatur entspricht. Unabhängig vom Einfluss der Eindringtiefe x wirkt sich der Wärmeübergangskoeffizient α auf die Amplitude und Phasenverschiebung der Temperaturschwingung aus. Für den Grenzfall eines unendlich großen Wertes für α – zum Beispiel bei direkter Messung der Oberflächentemperatur – verschwindet dieser Einfluss. In der Praxis liegt der Wärmeübergangskoeffizient α jedoch weitaus niedriger und mit sinkendem Wert kommt es für die Temperaturschwingung zunehmend zu einer Verschiebung der Phase sowie einer gleichzeitigen Dämpfung der Amplitude.

Da wie in Abschnitt 2 beschrieben, keine einheitliche Temperatur an Membranwänden aufgrund ihrer Geometrie und der Wärmeabfuhr in den Siederohren ermittelt werden kann, aber die Wärmestromdichte als Messgröße vorliegt, soll darüber die Charakterisierung der Beläge erfolgen. Deshalb ist neben dem Temperaturfeld vor allem der Zusammenhang von Wärmestromdichte und Schwingung der Temperatur im Belag von Bedeutung. Für die Berechnung der oszillierenden Wärmestromdichte wird deshalb zunächst angenommen, dass ein Temperaturgradient an der Oberfläche ($x = 0$) vorliegt und somit im Belag Wärmeleitung eintritt. Es ergibt sich aus Gleichung (4) folglich

$$\dot{q} = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{x=0}, \quad (11)$$

woraus unter Verwendung von Gleichung (6), anschließendem Differenzieren nach x und letztlich Einsetzen der Bedingung $x = 0$ die Gleichung für die Wärmestromdichte

$$\dot{q}(x, \tau) = \dot{q}_m + \frac{\Delta\vartheta \cdot b \cdot \sqrt{\omega} \cdot e^{-\xi}}{\sqrt{1 + 2\beta + 2\beta^2}} \cos(\omega \cdot \tau - \varepsilon - \xi + \frac{\pi}{4}) \quad (12)$$

formuliert werden kann. Die im Mittel auftretende Wärmestromdichte kann für die quasistatische Wärmeübertragung durch

$$\dot{q}_m = \frac{\lambda}{x_{B,a} - x_{B,i}} (\vartheta_{m,B,a} - \vartheta_{m,B,i}) \quad (13)$$

ersetzt werden, worin $x_{B,a}$ die Position, beziehungsweise $\vartheta_{m,B,a}$ die mittlere Temperatur der Belagsoberfläche außen und $x_{B,i}$ die Position, beziehungsweise $\vartheta_{m,B,i}$ die Temperatur am Übergang zum Wandaufbau, bezeichnet.

Um die Verläufe von Temperaturfeld und Wärmestromdichte in Abhängigkeit von Ort und Zeit besser zu veranschaulichen wurden diese in Abbildung 3 und Abbildung 4 für die im Beispiel gegebenen Größen dargestellt. Am Übergang zwischen Gas und Belag besitzen die Schwingungen, die senkrecht zur Oberfläche im Belag kontinuierlich gedämpft werden, eine maximale Amplitude. Die Schwingungsdauer bleibt dabei konstant und es ist eine – wie bei der Temperaturschwingung beschriebene – Phasenverschiebung zwischen Oberfläche und zunehmender Eindringtiefe in den Belag zu erkennen. Die Temperatur fällt – betrachtet man sie für eine gleichmäßige Schwingung als quasistatisch – im Mittel linear mit

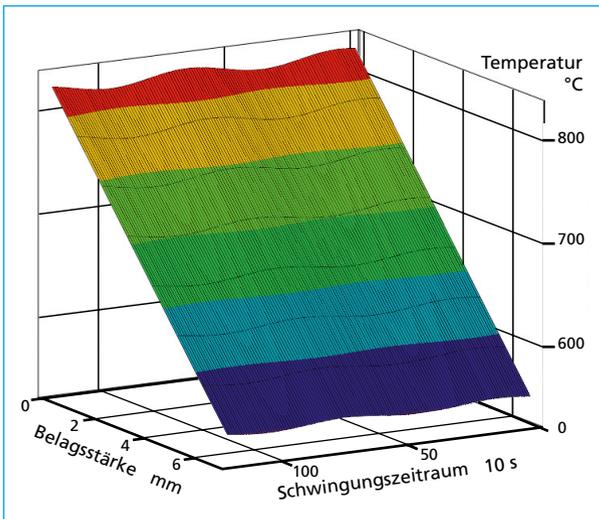


Abb.3:

Temperaturverlauf in Abhängigkeit von Ort und Zeit

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.

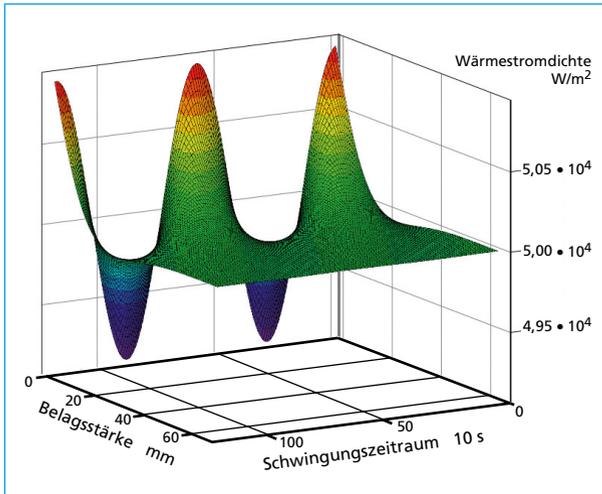


Abb. 4:

Wärmestromdichteverlauf in Abhängigkeit von Ort und Zeit

In Abbildung 3 ist die Temperaturschwingung und in Abbildung 4 die dazugehörige Schwingung der Wärmestromdichte für eine Periodendauer der Schwingung von 600 s, eine Mitteltemperatur von 820 °C, eine Temperaturschwankungsamplitude von 48,5 K sowie eine mittlere Wärmestromdichte von 45.825 W/m² in Abhängigkeit von Ort und Zeit in Diagrammen eingezeichnet. Der Temperaturverlauf ist beispielhaft für einen Belag von 6 mm Schichtdicke dargestellt. Das angenommene Belagsmaterial besitzt eine geringe Wärmeleitfähigkeit und ein großes Wärmespeichervermögen aufgrund seiner hohen Dichte. Dadurch werden die Schwingungen von Temperatur- und Wärmestromdichte sehr stark gedämpft. Die Temperaturschwingung liegt nach 6 mm Eindringtiefe entsprechend gedämpft und phasenverschoben, jedoch noch gut erkennbar, vor. Für die dazugehörige Wärmestromdichte wurde der dargestellte Bereich der Eindringtiefe größer gewählt, um die starke Dämpfung des Eingangssignals auf eine kaum erkennbare Schwingung bei einer Belagsdicke größer oder gleich der Wellenlänge der Temperatur- beziehungsweise der Wärmestromdichteschwingung zu verdeutlichen.

Für den Fall der Messung in der Praxis, ist es wahrscheinlich, dass der zeitliche Kurvenverlauf der Feuerraumtemperatur weder sinus- noch kosinusförmig, d.h. nicht einer harmonischen Schwingung, sondern einem beliebigen anderen zeitlichen Verlauf entspricht. Auch dann verliert die hier aufgestellte Theorie nicht ihre Gültigkeit, sondern es muss lediglich dieser spezielle zeitliche Verlauf der Feuerraumtemperatur einer harmonischen Analyse unterzogen werden. Die Laplace-Transformation kann dabei die Berechnung stark vereinfachen und führt bei elektronischer Datenverarbeitung recht schnell zum Ziel.

3. Praktische Umsetzung der Charakterisierung und Validierung des Ansatzes

Die Herangehensweise an die praktische Umsetzung der angestellten Überlegungen wird zunächst aus der im letzten Abschnitt entwickelten Theorie hergeleitet und folgend an drei einfachen Beispielfällen gezeigt. Abschließend erfolgt der Vergleich mit Ergebnissen eines Versuchs.

Für die Beispiele wird eine kosinusförmige Temperaturschwingung für das an einen Belag angrenzende, höher temperierte Gas vorgegeben und somit eine Schwingung von Temperatur und Wärmestrom im Belag induziert. Die oszillierende Wärmestromdichte setzt sich bis zum Übergang vom Belag auf einen für die Ermittlung der Wärmestromdichte simulierten Wandaufbau [3] – in Abhängigkeit vom Belagsmaterial – gedämpft fort. In der Praxis liegt ein Messsignal in Form einer Schwingung an. Die aus diesem Messsignal ermittelte Wärmestromdichte folgt der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Gleichung (12).

Für den Praxisfall kann durch Aufprägen einer Temperaturschwingung im Feuerraum, mithilfe einer Variation der Brennerleistung über die zugeführte Brennstoffmenge, ein rechteckförmiger Verlauf der adiabaten Verbrennungstemperatur erzeugt werden. Dieser Verlauf der adiabaten Verbrennungstemperatur ist jedoch nicht direkt messbar, da durch Wechselwirkungen mit den umgebenden Wänden, infolge von Trägheiten durch das Wärmespeichervermögen des das Gas umschließenden Körpers und Wärmeübergangswiderständen an dessen Oberfläche, eine Folge von instationären Aufheiz- und Abkühlvorgängen zu einem sägezahnförmigen Temperaturverlauf der Oberfläche führt. Dabei verschwinden die höheren Harmonischen mit zunehmender Eindringtiefe in das Material – in diesem Fall der Belag – und ein sinus- beziehungsweise kosinusförmiger Temperaturverlauf resultiert. Eine genauere Beschreibung des Vorgangs erfolgt in [4].

Im Versuch ist es also durch Messung der Oberflächentemperatur des Belags möglich – beispielsweise mit einer Hochgeschwindigkeits-Infrarotkamera – einen Referenzzustand zu bestimmen, der unabhängig von den Belageigenschaften, der Belagsstärke sowie den Wärmeübergangsbedingungen vom Gas auf die umschließenden Wände ist; da in all diesen Werten gewisse Messunsicherheiten stecken können. Durch die direkte Messung der Oberflächentemperatur wird in den Gleichungen (6) und (12) ε Null, da aus der Randbedingung 3. Art eine Randbedingung 1. Art mit $\alpha \rightarrow \infty$ (vgl. Gleichung (4) und (8)) wird. Es resultiert eine Schwingung

$$\vartheta(0, \tau) \xrightarrow{\tau \rightarrow \infty} = \vartheta_{m,B,a} - \frac{0}{\lambda} \dot{q}_m + \frac{\Delta\vartheta \cdot \exp(-0)}{\sqrt{1+2 \cdot 0+2 \cdot 0^2}} \cos(\omega \cdot \tau - 0 - 0) \quad (14)$$

um die mittlere Oberflächentemperatur $\vartheta_{m,B,a}$ mit der Amplitude $\Delta\vartheta$.

Die Phasenverschiebung der Messwerte zwischen Oberflächentemperatur des Belags und dem Wärmestromdichtesignal beträgt somit – wie in Abbildung 5 für ein Beispiel theoretisch ermittelt und in Abbildung 6 für ein Experiment dargestellt –: $-\xi + 0,25 \pi$.

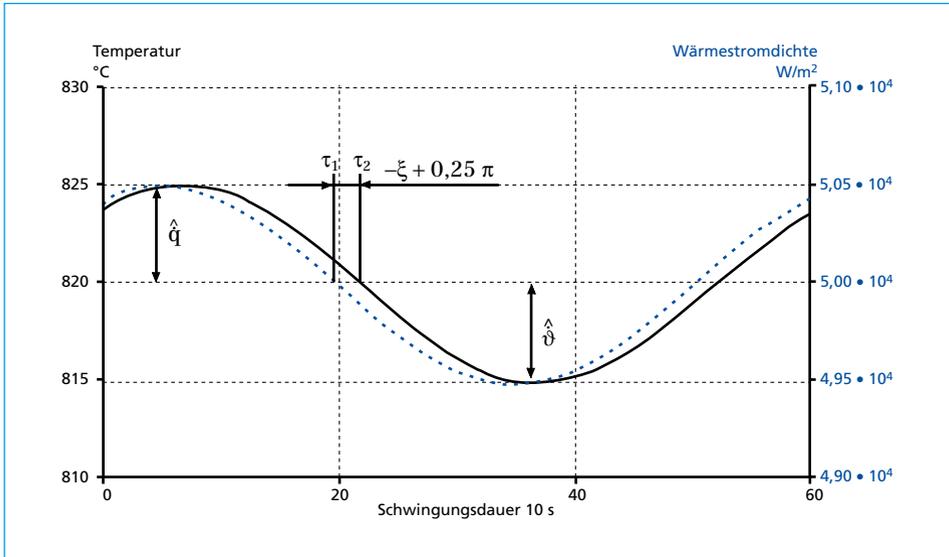


Abb. 5: Simulierte Phasenverläufe zur Bestimmung der Phasenverschiebung zwischen der Wärmestromdichte am Übergang Wandaufbau/Belag und der Temperatur der Belagsoberfläche

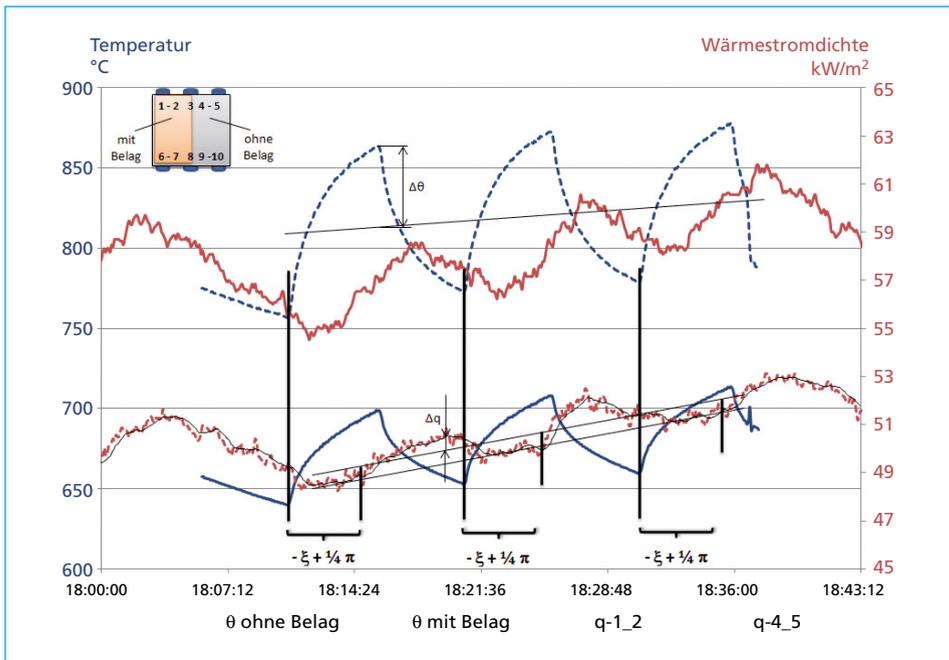


Abb. 6: Am Versuchsstand ermittelte Phasenverläufe zur Bestimmung der Phasenverschiebung zwischen der Wärmestromdichte am Übergang Wandaufbau/Belag und der Temperatur der Belagsoberfläche

Es ist zu erkennen, dass bei gleicher Temperaturschwankung an der Oberfläche für Simulation und Experiment gut übereinstimmende Resultate erzielt werden können. Der anscheinend große Unterschied bei der Phasenverschiebung entstammt der zusätzlichen Phasenverschiebung durch Feuerfestplatten vor der Rohrwand und das Rohrwandmaterial selbst, was als Totzeit für die Messung berücksichtigt werden muss. Die gemessene Wärmestromdichte gilt aufgrund der Simulationsweise dennoch mit exakter Verteilung für die Grenzfläche zwischen Belag und Wandmaterial.

Aus der Phasenverschiebung kann über ξ nun der Wärmeeindringkoeffizient b aus dem Amplitudenvergleich der Gleichungen (12) und (14) ermittelt werden. Die Berechnungsgleichung hierfür lautet:

$$b = \frac{\hat{q}(\delta_B, \tau_2)}{\hat{\vartheta}(0, \tau_1)} \sqrt{\frac{1}{\omega}} e^{\xi} \quad (15)$$

mit der Amplitude der Wärmestromdichte $\hat{q}(\delta_B, \tau_2)$

$$\hat{q}(\delta_B, \tau_2) = \frac{\Delta\vartheta \cdot b \cdot \sqrt{\omega} \cdot e^{\xi}}{\sqrt{1 + 2\beta + 2\beta^2}} \quad (16)$$

am Übergang zwischen Belag und Membranwand, der Amplitude der Oberflächentemperatur des Belags $\hat{\vartheta}(0, \tau_1)$

$$\hat{\vartheta}(0, \tau_1) = \frac{\Delta\vartheta}{\sqrt{1 + 2\beta + 2\beta^2}}, \quad (17)$$

dem Proportionalitätsfaktor zwischen den beiden Amplituden $\omega^{-0.5}$ sowie der Korrektur der durch den Belag verursachten Dämpfung zwischen Temperatur- und Wärmestromschwungung e^{ξ} . Die Nenner in Gleichung (16) und (17) werden für die Randbedingung 1. Art gleich Eins.

Für die Messungen in der Praxis sind Fehler vor allem bei der Bestimmung der Phasenverschiebung sowie bei der Ermittlung der Amplitude der Wärmestromdichte zu erwarten. Eine zeitlich hohe Auflösung des Wärmestromdichtemesssignals zur Berechnung der Phasenverschiebung ist Voraussetzung für eine möglichst präzise Bestimmung der Belagseigenschaften. Eine hinreichend große Anzahl an Datensätzen aus Experimenten ist zurzeit noch nicht vorhanden, um gesicherte Aussagen zu der Genauigkeit dieses Bestimmungsverfahrens für Stoffeigenschaften treffen zu können.

Aus dem Wärmeeindringkoeffizienten lässt sich nun die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Schichtdicke des Belags bestimmen. Im ersten Schritt wird dazu die Wärmeleitfähigkeit des Belags nach Annahme einer Schichtdicke δ_B oder deren Kenntnis aus Umformung der Gleichung (9) ermittelt:

$$\lambda = \frac{\delta_B}{\xi} b \sqrt{\frac{\omega}{2}} . \quad (18)$$

Für die Betrachtung einer zeitlich gemittelten Wärmestromdichte vom Abgas an das Siedewasser als quasistatischen Zustand, bei dem im Mittel der die Schwingung enthaltende Anteil auf der rechten Seite von Gleichung (12) entfällt, kann im Falle einer vorherigen Annahme der Schichtdicke nun mit der in Gleichung (18) ermittelten Wärmeleitfähigkeit λ über Gleichung (13) wiederum die Plausibilität der Schichtdicke δ_B

$$\delta_B = \frac{\lambda}{\dot{q}_m} (\vartheta_{m,B,a} - \vartheta_{m,B,i}) \quad (19)$$

über die aus den Messwerten gebildete mittlere Wärmestromdichte \dot{q}_m durch die Membranwand, den mittleren Temperaturen an der Belagsoberfläche $\vartheta_{m,B,a}$ sowie zwischen Belag und Membranwandaufbau $\vartheta_{m,B,i}$ überprüft werden. In weiteren Schritten lassen sich nach entsprechenden Umformungen der Gleichung (9) die Temperaturleitfähigkeit a sowie die volumetrische Wärmekapazität $\rho \cdot c$ ermitteln.

Eine iterative Bestimmung der Schichtdicke beziehungsweise der Wärmeleitfähigkeit ist jedoch auf diese Weise nicht möglich, da zur Erfüllung von Gleichung (19) eine Vergrößerung der Wärmeleitfähigkeit immer auch zu einer Vergrößerung der Schichtdicke führt. Das heißt, bei wachsender Belagsstärke ergeben sich gleiche Bedingungen für die hier aufgeführten Gleichungen, wenn gleichzeitig die Wärmeleitfähigkeit des Belags zunimmt. Da diese im Betrieb jedoch in der Regel nicht bekannt ist, kann auf die Schichtdicke des Belags nicht direkt geschlossen werden.

Abschließend ist in Tabelle 1 ein Vergleich von Simulationen zwischen einem Referenzbelag und einem Belag im

- Fall 1: hoher Dichte bei gleicher Belagsstärke und Wärmeleitfähigkeit des Belagsmaterials,
- Fall 2: höherer Wärmeleitfähigkeit des Belagsmaterials bei gleicher Belagsstärke und volumetrischer Wärmekapazität,
- Fall 3: größerer Schichtdicke des Belags

aufgeführt. Die angenommene Temperaturdifferenz über dem Belag beträgt für den Referenz- sowie für alle drei Vergleichsfälle 750 K. Damit wurde vereinfachend zugrunde gelegt, dass Gas- und Siedewassertemperatur sowie die

Wärmeübergangswiderstände vom Gas auf den Belag sowie vom Rohr auf das Siedewasser näherungsweise konstant bleiben.

Tab. 1: Vergleich der Stoffeigenschaften von unterschiedlichen Belägen

Größe	λ	ρ	c	δ_b	a	b	\dot{q}_m
Einheit	$\frac{W}{mK}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{J}{kgK}$	mm	$\frac{m^2}{s}$	$\frac{J}{m^2Ks^{0,5}}$	$\frac{W}{m^2}$
Referenz	0,20	20	800	5	$1,25 \cdot 10^{-5}$	57	30.000
Fall 1	0,20	200	800	5	$1,25 \cdot 10^{-6}$	179	30.000
Fall 2	2,00	20	800	5	$1,25 \cdot 10^{-4}$	179	50.000
Fall 3	0,20	20	800	10	$1,25 \cdot 10^{-5}$	57	15.000
Simulation	1,30	2.550	900	6	$5,664 \cdot 10^{-7}$	1.727	50.000
Experiment	1,39				$6,057 \cdot 10^{-7}$	1.742	50.660

Vergleichend wurden die Werte um die Simulationsergebnisse für eine Fliese mit bekannten Stoffeigenschaften und 6 mm Stärke sowie die Resultate eines den Randbedingungen der Simulation entsprechenden Experiments ergängt.

Es zeigt sich für den Fall 1, dass eine hohe Dichte zu geringerer Temperaturleitfähigkeit, aber zu einem größerem Wärmeeindringkoeffizienten führt. Der mittlere Wärmestrom über die Wand bleibt davon unbeeinflusst. Im Fall 2 steigen für eine höhere Wärmeleitfähigkeit des Belagsmaterials sowohl die mittlere Wärmestromdichte, die Temperaturleitfähigkeit als auch der Wärmeeindringkoeffizient. Für Fall 3 verringert sich lediglich die mittlere Wärmestromdichte über der Wand durch den höheren Wärmeleitwiderstand der größeren Belagsstärke.

Aus den aufgeführten drei Fällen lässt sich eine ganze Reihe an wichtigen Informationen durch eindeutige Tendenzen gewinnen, wenn verschiedene Beläge analysiert und katalogisiert werden. Dies stellt eines der nächsten Ziele unseres Schaffens dar.

Der Vergleich von Simulation und Versuch ergibt eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse, die jedoch – wie oben erwähnt – durch das noch geringe Messdatenvolumen nicht generalisiert werden können und müssen demgemäß durch die folgenden Tests erst bestätigt werden.

4. Zusammenfassung

Bei der Signalanalyse handelt es sich um den Versuch, aus periodischen Schwankungen des Messsignals – die wiederum aus den Schwankungen des Verbrennungsablaufs resultieren – Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Belags (Schichtdicke, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitzahl) zu ziehen. Durch den Belag werden die Schwankungen gegenüber dem *sauberen* Membranwandzustand gedämpft und es erfolgt eine Phasenverschiebung des Messsignals. Je nach Belagsdicke, Wärmeleit- sowie Wärmespeichereigenschaften werden die Dämpfung und die Phasenverschiebung beeinflusst. Über ein mathematisches Modell, das sich aus den bekannten Grundlagen der Wärmeleitung bei periodischen Schwankungen herleiten lässt, können aus den Messwerten schließlich die oben genannten Eigenschaften des Belags abgeschätzt werden.

Für die Wärmestromdichte zeigt sich, analog zum Temperaturfeld, dass diese – unter der Voraussetzung einer bekannten Temperaturschwankungsamplitude, die aus dem Temperaturverlauf des Feuerraums über Amplitudenspektren einer diskreten Fourier-Analyse ermittelt werden kann – lediglich von den Belagseigenschaften Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sowie dem Wärmeübergangskoeffizienten abhängig ist. Wenn die Oberflächentemperatur der Belagsschicht bekannt ist, lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient aus der Wärmestromdichte ermitteln, was für einige Anwendungsfälle interessant sein dürfte.

In den bislang erfolgten Versuchen wurde die Oberflächentemperatur des Belags über eine zeitlich hochauflösende Infrarotkamera ermittelt und in Abhängigkeit von der Schichtdicke des Belags die Wärmeleitfähigkeit berechnet. Das Produkt der für eine Charakterisierung von Belägen ebenso wichtigen und noch verbleibenden Stoffeigenschaften spezifische Wärmekapazität und Dichte kann dann aus der Temperaturleitfähigkeit beziehungsweise dem Wärmeeindringkoeffizienten berechnet werden. Weitere Hilfsgrößen zur Ermittlung sind denkbar. Beispielsweise könnte über Ultraschall in Abhängigkeit der Belagsdicke die Dichte des Belags bestimmt werden oder umgekehrt.

Die gewonnenen Informationen dienen der Online-Messung von Belägen und unterstützen den Betreiber bei der Optimierung der Prozessführung, der Festlegung von Abreinigungszyklen sowie der orientierenden Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Belägen.

Eine vielfältige Anwendung dieses Mess- und Auswerteverfahrens ist auch in anderen Einsatzgebieten bei ähnlichen Randbedingungen denkbar.

Zukünftige Ziele sind Untersuchungen zur Übertragbarkeit auf nichtperiodische Schwankungen der Temperatur und die Überprüfung der Nutzbarkeit dieser Erkenntnisse in der Praxis sowie das Anlegen einer Datenbank zu Belagsarten und deren Stoffeigenschaften.

5. Referenzen

- [1] Grigull, U.; Sandner, H.: Wärmeleitung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1990
- [2] Gröber, H.; Erk, S.; Grigull, U.: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1988
- [3] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden: s.n., 2009, Dissertation
- [4] Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C.: Conduction of Heat in Solids. 2. Auflage. New York: Oxford University Press, 1959
- [5] Spiegel, W. et al.: Entwicklung eines Messsystems für die Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranwände von Dampferzeugern in Biomasseverbrennungsanlagen zur Erfassung der Beeinträchtigungen der Anlageneffizienz aufgrund von Korrosion und Verschmutzung. Dez. 2008. Abschlussbericht DBU-Projekt AZ: 23893-24
- [6] Grahl, S.; Beckmann, M.; Krüger, S.; Magel, G.; Spiegel, W.: Charakterisierung von Belägen an Membranwänden von Dampferzeugern durch Wärmestromdichtemessung. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, S. 527-542