

## Messmethode zur Ermittlung von Stoffeigenschaften von Ablagerungen an Dampferzeuger-Membranwänden

Sebastian Grahl, Michael Beckmann und Wolfgang Spiegel

1.	Modellvorstellung der Mess- und Analyseverfahren.....	456
2.	Anpassung der Modellvorstellung an die praktischen Messbedingungen .....	461
3.	Ergebnisse der Untersuchungen an einer Versuchsanlage und an einem großtechnischen Dampferzeuger.....	462
4.	Zusammenfassung und Ausblick.....	465
5.	Referenzen.....	466

Für die Auslegung und den Betrieb von Dampferzeugern stellt die Verschmutzung der Heizflächen stets eine besondere Problematik dar. Grundsätzliche Einflussgrößen auf die Verschmutzung sind zum einen die chemischen und physikalischen Eigenschaften der im Brennstoff enthaltenen Bestandteile, die die angesprochenen Verschmutzungen bilden sowie zum anderen die betriebsbedingten, feuerungstechnischen und konstruktiven Gegebenheiten der jeweiligen Anlage [1, 2, 3, 4, 5]. Von einer Problematik ist deshalb zu sprechen, da

- das Zusammenwirken der einzelnen Einflussgrößen, aufgrund der hohen Komplexität und Dynamik der Wechselwirkungen, bislang weder in einer einheitlichen physikalischen Theorie noch empirisch hinreichend genau für eine allgemeine Anwendung erfasst werden kann;
- die Entstehung, der Transport und die Mechanismen, die zu einer Ablagerung an den Heizflächen führen, nicht vollständig aufgeklärt sind;
- die Menge, Struktur und stoffliche Zusammensetzung der Verschmutzungen auf den Heizflächen im Betrieb unbekannt sind;
- vorhandene Beläge ebenfalls einen Einfluss auf den Verlauf der weiteren Belagsbildung haben, wie beispielsweise der Wärmedurchgangswiderstand und der freie Strömungsquerschnitt auf die Temperatur beziehungsweise die Strömungsbedingungen;
- natürliches und künstlich herbeigeführtes Abfallen von Ablagerungen, Änderungen der Heizflächenbelastung (brennstoffbedingt oder durch Lastwechsel), An- und Abfahrvorgänge, Phasenwechsel, Sintervorgänge, chemische Reaktionen im Feststoff (mit der Gasphase oder einer vorliegenden Salzsäure) usw. permanente nicht vorhersehbare Änderungen an der Ablagerungsschichtdicke, Struktur und Zusammensetzung bewirken sowie
- die Verschmutzungen zu Schäden an feuerfesten Zustellungen und Rohrwänden, ausgelöst durch Abzehrungen, Korrosion und mechanische Überbeanspruchung, führen.

Für besonders heterogene Brennstoffe verstärkt sich die Problematik durch das diffizile Zusammenspiel der zuvor genannten Punkte, sodass vor allem für Abfallverbrennungsanlagen eine genauere Kenntnis der Ablagerungssituation an den Heizflächen eine entscheidende Bedingung hinsichtlich einer hohen Verfügbarkeit und eines wirtschaftlichen Betriebs ist. Um die Abgasverluste gering zu halten und Schwierigkeiten im Anlagenbetrieb zu vermeiden, ist es deshalb notwendig, Beläge während des Betriebs nach Bedarf zu entfernen. Für eine gezielte Reinigung muss sowohl bekannt sein wo und in welcher Menge Ablagerungen auftreten als auch die Intensität beziehungsweise die Verweilzeit der Reinigungsmaßnahme richtig eingestellt werden. Dies gelingt jedoch nur dann, wenn insbesondere die örtliche vorliegende Struktur, Dichte und Schichtdicke, d.h. die Art der Ablagerung, bekannt sind.

In der Vergangenheit wurde deshalb bereits eine Reihe verschiedener Lösungsansätze zur Charakterisierung von Ablagerungen entwickelt (vgl. [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]), die sich jedoch zumeist entweder durch einen hohen Installations- beziehungsweise Kostenaufwand nicht durchsetzen konnten oder die aufgrund fehlender Stoffeigenschaften keine detaillierte Kenntnis zu bestimmten Belagseigenschaften zulassen. Das in diesem Beitrag vorgestellte Mess- und Analyseverfahren basiert auf der Bestimmung von Stoffeigenschaften durch eine Analyse transienter Temperatur- und Wärmestromdichtemesssignale, die bei der schwankenden Energiefreisetzung von heterogenen Brennstoffen stets inhärent vorhanden sind. Um gleichzeitig die große Anzahl unbekannter Stoffeigenschaften zu reduzieren, fließt in die Analyse eine Beschränkung möglicher Wertebereiche aufgrund von Zusammenhängen auf atomarer und molekularer Ebene zwischen den Stoffeigenschaften mit ein. Diese Zusammenhänge werden anhand eines Ablagerungscharakterisierungsdiagramms visualisiert. Zudem lässt sich darin eine weitere Beschränkung des Wertebereichs von Stoffeigenschaften mittels geeigneter Modellvorstellungen zum Wärmetransport in porösen Schichten zeigen. Abschließend werden für eine Validierung der Mess- und Analyseverfahren die Ergebnisse erster Untersuchungen im Technikumsmaßstab an einer Versuchsanlage und in der Praxis an einem großtechnischen Dampferzeuger vorgestellt.

## 1. Modellvorstellung der Mess- und Analyseverfahren

Die in diesem Beitrag vorgestellte Möglichkeit, Stoffeigenschaften von Ablagerungen zu charakterisieren, kann in zwei Bereiche unterteilt werden: der Aufzeichnung der zeitlichen Verläufe von Temperatur- und Wärmestromdichtemesssignalen mit geeigneten **Messmethoden** sowie der Auswertung dieser Messsignale in Hinblick auf die Ermittlung von Stoffeigenschaften der Ablagerung mit einer speziellen **Analyseverfahren**. Die transienten Verläufe von Temperatur- und Wärmestromdichtemesssignalen werden dazu verwendet, um über ein zeitlich veränderliches Temperaturfeld Stoffeigenschaften der Ablagerung zu ermitteln. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise ist z.B. in [1] und [13] enthalten. Die wesentlichen Grundzüge werden im Folgenden noch einmal dargelegt.

Zur Beschreibung des instationären Temperaturfelds wird die Fouriersche Erfahrungsgleichung der Wärmeleitung angesetzt. Um die Betrachtungen etwas zu vereinfachen werden zunächst folgende Annahmen getroffen:

- Der Wärmeeintrag in die Ablagerungsschicht erfolgt über ein angrenzendes Fluid nach einem periodischen Zeitgesetz.
- Innerhalb der Ablagerungsschicht tritt ausschließlich Wärmeleitung auf und es existieren weder Quellen noch Senken.
- Der gesamte Membranwandaufbau kann aus mehreren Schichten bestehen, deren geometrische Verhältnisse und Stoffeigenschaften als bekannt vorausgesetzt werden.

- Für alle Schichten, einschließlich der Ablagerung, liegt Homogenität und Isotropie vor. Die mathematische Modellvorstellung gilt für jede Schicht und an den Übergängen der einzelnen Schichten liegen keine Sprünge vor.
- Der aus allen Einzelschichten und der Ablagerung gebildete Körper entspricht dem Modell der einseitig unendlich ausgedehnten Wand.
- Der Wärmetransport innerhalb der Ablagerungsschicht wird als eindimensional betrachtet, d.h. er findet ausschließlich in umgekehrter Richtung des Normalenvektors auf die Wärmeübertragungsfläche statt, die durch eine gedachte Rohrwandebene gebildet wird, in welcher alle Rohrachsen liegen.
- Um die zuvor genannten drei Forderungen zu erfüllen, muss die Geometrie der Ablagerungsschicht einer ebenen Platte entsprechen. Die Ablagerungsschicht haftet dabei kontaktwiderstandslos auf einer, der Steg-Rohr-Geometrie vorgelagerten, Zwischenschicht. Diese besitzt am Übergang zur Ablagerung eine ebene Oberfläche parallel zur Rohrwandebene.

Diese vorerst recht umfangreichen Einschränkungen können unter bestimmten Voraussetzungen oder durch erweiterte Modellvorstellungen beziehungsweise -präzisierungen zum Teil später wieder aufgehoben werden. Ein typischer Wandaufbau eines Dampferzeugers zur Abfallverbrennung ist eine mit feuerfesten keramischen Platten zugestellte Rohrwand. Dieser Wandaufbau erfüllt die oben genannten Punkte hinreichend gut, wenn angenommen wird, dass die Temperaturschwingungen rasch erfolgen, die über die Wand transportierte Wärme zu einem vollständigen Phasenwechsel der im Inneren der Siederohre befindlichen Flüssigphase des Wassers führt, die Siedewassertemperatur dabei stets konstant bleibt sowie eine gleichmäßige Temperaturverteilung zwischen der Rohrwandgeometrie und der feuerraumzugewandten Oberfläche der Feuerfestplatte durch eine in der Regel große Schichtdicke der Zustellung mit gleichzeitig hoher Wärmeleitfähigkeit eintritt.

Für das entsprechend dieser Modellvorstellungen [1] vom Ort  $x$  und der Zeit  $t$  abhängige Temperaturfeld  $\vartheta(x, t)$  der Ablagerungsschicht ergibt sich nach Auflösung der Anfangsbedingungen für eine hinreichend große Zeit ( $t \rightarrow \infty$ ) folgende Gleichung:

$$\vartheta(x,t)_{t \rightarrow \infty} = \vartheta_{m,B,a} - \frac{x}{\lambda} \dot{q}_m + \Delta\vartheta_B \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi}{a \tau_0}}\right) \cos\left(2\pi \frac{t}{\tau_0} - x \sqrt{\frac{\pi}{a \tau_0}}\right). \quad (1)$$

Darin bezeichnen  $\vartheta_{m,B,a}$  die mittlere Temperatur der dem Rauchgas zugewandten Ablagerungsoberfläche,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit der Ablagerung,  $\dot{q}_m$  einen im Mittel konstanten und somit quasistatischen Wärmestrom vom Rauchgas zum Siedewasser,  $\Delta\vartheta_B$  die Amplitude der Temperaturschwankung an der Ablagerungsoberfläche,  $a$  die Temperaturleitfähigkeit der Ablagerung und  $\tau_0$  die Dauer einer Schwingungsperiode. Die ersten beiden Terme auf der rechten Seite von Gleichung (1) entsprechen einem stationären Wärmetransport über der Membranwand mit Ablagerung, der durch den dritten Term mit einer periodischen Schwingung der Temperatur überlagert wird.

Bei der Ermittlung von Gleichung (1) wurde an der Oberfläche der Ablagerung eine Randbedingung 1. Art angenommen. Diese liegt beispielsweise dann vor, wenn die Temperatur der Belagsoberfläche mittels einer Infrarot-Kamera direkt bestimmt wird. Dieses Messverfahren kann in der Praxis großflächig Informationen zu den vorliegenden Temperaturen liefern. Gleichzeitig ist es auf diese Weise möglich, eine Vielzahl an messtechnischen Schwierigkeiten bei der Berechnung des Wärmeübergangs vom Rauchgas auf die Ablagerung zu umgehen, weshalb sich dieses Messverfahren besonders gut zur Bestimmung

der Belagsoberflächentemperatur als Eingangsgröße für eine Signalanalyse eignet. Da zur eindeutigen Festlegung des Temperaturfelds eine zweite Temperaturmessung notwendig ist, muss diese in Richtung des Wärmestroms örtlich nach der Temperaturmessung stattfinden. Dies kann entweder direkt im Bereich der Ablagerung oder in einer nachgelagerten Schicht (Hintergussmasse, Feuerfestplatte, Rohrwand) erfolgen. Um im Sinne einer langlebigen Messtechnik, ohne sicherheitskritische Eingriffe in den Druckkörper des Dampferzeugers eine allgemein einfache und kostengünstige Netzmessung zu ermöglichen, erweisen sich die Signale der Wärmestromdichtemessung nach der Steg-Rohr-Methode [14] (weitere Details zu diesem Messverfahren sind [15] zu entnehmen) an der feuerraumabgewandten Seite der Membranwand als gut geeignet. Aus dem Temperaturfeld ist deshalb im nächsten Schritt die Wärmestromdichte zu ermitteln, die über die Wärmeleitfähigkeit und den Gradienten der Temperatur an jeder Stelle des Temperaturfelds miteinander verknüpft sind. Für die Wärmestromdichte ergibt sich unter den gleichen Bedingungen wie für Gleichung (1):

$$\dot{q}(x,t) = \dot{q}_m + \Delta \Theta_B b \sqrt{\frac{2\pi}{\tau_0}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi}{a \tau_0}}\right) \cos\left(2\pi \frac{t}{\tau_0} - x \sqrt{\frac{\pi}{a \tau_0}} + \frac{\pi}{4}\right). \quad (2)$$

Gleichung (2) enthält den Wärmeeindringkoeffizienten

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} = \frac{\lambda}{a}, \quad (3)$$

der die Stoffwerte Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , Dichte  $\rho$  und spezifische Wärmekapazität  $c$  der Ablagerung enthält.

Nach den Gleichungen (1) und (2) treten die maximalen Amplituden der Schwingungen an der rauchgaszugewandten Oberfläche der Ablagerung auf. Mit wachsender Eindringtiefe in den Belag  $x$  erfolgt sowohl eine Dämpfung der Schwingungen als auch eine Phasenverschiebung. Die Schwingungsdauer bleibt dabei innerhalb der gesamten Ablagerungsschicht unverändert und folgt der Umgebungstemperatur. Das Temperaturfeld fällt Richtung Siedewasser mit zunehmender Eindringtiefe in den Belag im Mittel linear ab und wird dabei von einer Temperaturschwingung überlagert. Die Wärmestromdichte hingegen oszilliert um einen konstanten Mittelwert  $\dot{q}_m$ , der den quasistatischen Wärmetransport über die Ablagerungsschicht beschreibt. Amplitude und Phasenverschiebung der Wärmestromdichte sind wie bei der Temperaturschwingung abhängig vom Material des Belags und dessen Schichtdicke. Gegenüber der Temperaturschwingung resultiert eine weitere, negative Phasenverschiebung um  $\frac{\pi}{4}$ .

Es ist demzufolge möglich, Stoffeigenschaften einer unbekanntenen Ablagerungsschicht zu ermitteln, indem eine beliebige Kombination zweier Temperatur- oder Wärmestromdichteverläufe (u.a. auch Kombinationen von jeweils zwei Temperatur- oder Wärmestromdichtemesssignalen) zum Vergleich herangezogen werden. Allerdings offenbart sich an dieser Stelle ein Problem, weshalb über diesen Zusammenhang in der Praxis bislang keine Messmethode zur Bestimmung von Stoffeigenschaften oder der Schichtdicke von Ablagerungen vorliegt: Temperaturleitfähigkeit beziehungsweise Wärmeeindringkoeffizient können nicht unabhängig von der Schichtdicke ermittelt werden. Anders betrachtet lässt sich zwar – wie für den stationären Fall – der Wärmetransportwiderstand ermitteln, aber Rückschlüsse auf die Größenordnung von Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicke sind nicht möglich, da mehr unbekannte Größen existieren als Lösungsgleichungen zur Verfügung stehen.

In [1] wird deshalb eine Analyseverfahren vorgestellt, mit der auf Grundlage von Zusammenhängen auf atomarer und molekularer Ebene die Stoffgrößen nicht willkürlich miteinander kombinierbar sind, sondern die Wertebereiche der möglichen Stoffwerte innerhalb bestimmter Grenzen liegen müssen. Um dies zu verdeutlichen wurde ein spezielles

Ablagerungscharakterisierungsdiagramm entwickelt, in dem die Zusammenhänge, wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, bildlich darstellbar sind [16]. Das Diagramm ist so aufgebaut, dass aus einem bekannten Wärmeindringkoeffizienten zunächst die Wärmeleitfähigkeit hinreichend genau ermittelt werden kann und sich unter weiteren statistisch gesicherten Annahmen und Modellen zum Wärmetransport in porösen Schichten auch Rückschlüsse auf Dichte und Schichtdicke der Ablagerung ziehen lassen. Darüber hinaus kann auch die Temperaturleitfähigkeit als Ausgangsgröße zur Bestimmung von Ablagerungseigenschaften verwendet werden. Der Wärmeindringkoeffizient hat für die Signalanalyse demgegenüber jedoch den Vorteil, dass dieser ohne Kenntnis der Ablagerungsschichtdicke direkt aus einem Koeffizientenvergleich zwischen Gleichung (1) und (2) hervorgeht.

Das Diagramm besitzt zur übersichtlichen Darstellung großer Wertebereiche eine doppeltlogarithmische Achseneinteilung. Um die Wärmeleitfähigkeit auf der unteren Abszisse ermitteln zu können, sollte der auf der linken Ordinate ablesbare Wärmeindringkoeffizient gegeben sein. Darüber hinaus können aber auch andere Kombinationen aus Eingangswerten wie der Dichte, der spezifischen Wärmekapazität, der Ablagerungsschichtdicke und der Phasenverschiebung der Ablagerung zur Berechnung der Parameter dienen. In der Praxis ist jedoch in der Regel nur die Phasenverschiebung bekannt, weshalb auf die weiteren Möglichkeiten zur Nutzung dieses Diagramms an dieser Stelle nicht eingegangen und hierfür auf die Ausführungen in [1] verwiesen wird. Wichtige Größen für die Ermittlung von Stoffwerten sind zudem die volumetrische Wärmekapazität, die für konstante Werte in unterbrochenen magentafarbenen Geraden eingezeichnet ist und die Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmeindringkoeffizienten verknüpft sowie analog dazu Werte konstanter Temperaturleitfähigkeit, in unterbrochenen blauen Geraden, die von der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität abhängig sind.

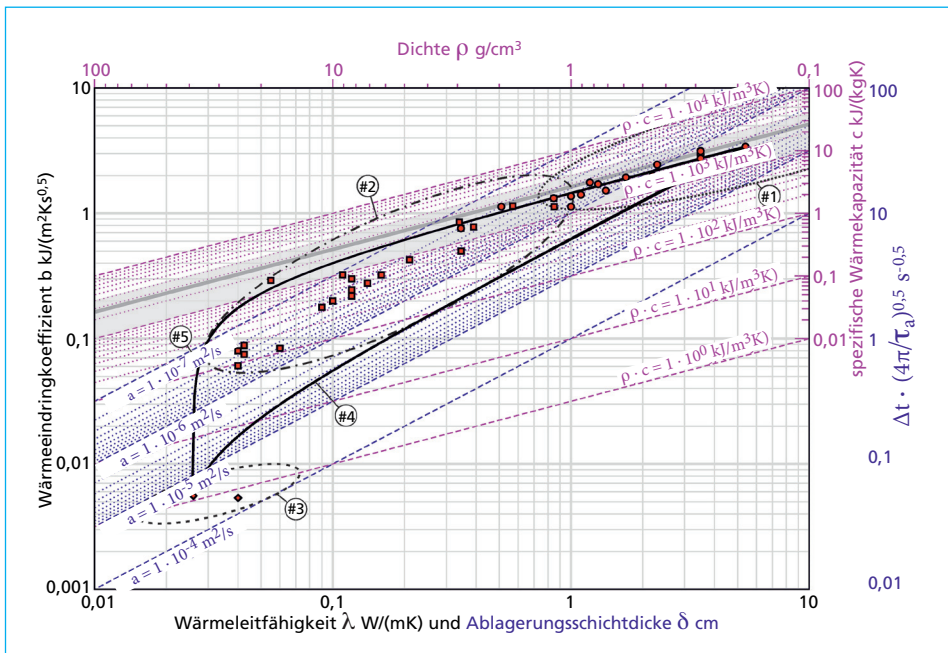


Abb. 1: Diagramm zur Abschätzung von Ablagerungseigenschaften anhand des Wärmeindringkoeffizienten

Quelle: Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden, unveröffentlichte Dissertation, 2012

Im Vergleich zu den separaten Werten für spezifische Wärmekapazität und Dichte besitzt die volumetrische Wärmekapazität von Feststoffen einen wesentlich kleineren Wertebereich zwischen 1 bis 4 MJ/(m<sup>3</sup>K) (in Abbildung 1 hellgrau unterlegt). Gleichzeitig liegen die Werte der Wärmeleitfähigkeit für die gewöhnlich in Ablagerungen auftretenden mineralischen Feststoffe ebenfalls in einem eng begrenzten Bereich (Abbildung 1, # 1). Dies erlaubt die Wärmeleitfähigkeit eines Belags aus reinen Feststoffen über den Wärmeeindringkoeffizienten mit guter Genauigkeit zu ermitteln. Verschiedene reine Feststoffe, vorwiegend Gesteine, sind durch rote Punkte in Abbildung 1 markiert. Da Beläge stets eine gewisse Menge an Gaseinschlüssen enthalten, lässt sich die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wärmeeindringkoeffizienten nur dann hinreichend genau bestimmen, wenn die Werte der Temperaturleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität innerhalb eines bestimmten Bereichs eingegrenzt werden können (Abbildung 1, # 2). Aus diesem Grund ist für die Ablagerung zunächst von einer Mischung aus einer Gas- und einer Feststoffphase auszugehen, wobei der Wertebereich reiner Gase (Abbildung 1, # 3) sowohl für den Wärmeeindringkoeffizienten als auch für die Wärmeleitfähigkeit mehrere Zehnerpotenzen unter dem reiner Feststoffe liegt. Zudem sind in Abbildung 1 als Beispiele für Stoffwerte von Gasen zum einen eine typische Rauchgaszusammensetzung bei 900 °C und zum anderen Luft bei Umgebungstemperatur eingetragen (rote Rhomben). Letztere dient für die in der Regel bei Umgebungstemperatur ermittelten Stoffeigenschaften von porösen Feststoffen (rote Quadrate) als Ausgangswert. Während sich die spezifische Wärmekapazität und die Dichte einer Mischung entsprechend des jeweiligen Masseanteils mit guter Genauigkeit über eine Mischungsgerade ermitteln lassen, wird für die Wärmeleitfähigkeit ein geeignetes Modell, das die Struktur des Belags beschreibt, benötigt. Eine prinzipielle Beschränkung auftretender Werte resultiert daraus, dass die Mischung aus Feststoff und Gas entweder als reine Parallelschaltung oder als reine Reihenschaltung von Wärmeleitwiderständen angesehen werden kann. Die gleichzeitige Variation des Gasanteils im Gemisch zwischen 0 % und 100 %, liefert für Gas und Feststoff die Begrenzungskurven (Abbildung 1, Parallelschaltung – # 4, Reihenschaltung – # 5) des Wertebereichs der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wärmeeindringkoeffizienten zwischen den beiden Punkten der Reinstoffe.

In dem Diagramm (Abbildung 1) ist zudem zu erkennen, dass zwar für die einzelnen Parameter sehr große Bereiche über mehrere Zehnerpotenzen existieren, aber für Paarungen der Stoffeigenschaften, die die Temperaturleitfähigkeit beziehungsweise den Wärmeeindringkoeffizienten ergeben, stets wesentlich kleinere Wertebereiche zu erwarten sind.

Um mit dem Diagramm die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wärmeeindringkoeffizienten bestimmen zu können, muss dieser zunächst ermittelt und ein geeignetes Modell für den Wärmetransport in der porösen Ablagerungsschicht gefunden werden (vgl. [17, 18, 19, 20]). Entsprechend des vorliegenden Temperaturniveaus, des eingesetzten Brennstoffs, des Aufbaus und der Anordnung der Heizflächen sollten zur Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten für die jeweiligen Ablagerungen angepasste Modelle zur Anwendung kommen (vgl. [1]). Auf diese Weise kann die ursprüngliche Annahme, dass in der Belagsschicht ausschließlich Wärmeleitung vorliegen darf durch ein mathematisches Modell für poröse Strukturen unter Berücksichtigung von Strahlung ersetzt werden. Die Forderung nach Homogenität und Isotropie für ein einheitliches Temperaturprofil muss darüber hinaus nur in der Ebene senkrecht zum Wärmestrom erfüllt sein. In Richtung des Wärmestroms kann die Ablagerung somit aus einzelnen Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften bestehen.

Der gesuchte Wärmeeindringkoeffizient kann aus einem Koeffizientenvergleich der Gleichungen (1) und (2) wie folgt ermittelt werden:

$$b = \frac{\hat{q}(\delta_B, t_2)}{\hat{\Theta}(0, t_1)} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{\tau_0}{t}} e^{\xi}. \quad (4)$$



Hierin ist die Amplitude der Wärmestromdichte am Übergang zwischen Belag und Membranwand

$$\hat{q}(\delta_B, t_2) = \Delta \vartheta_B b \sqrt{2\pi \frac{t}{\tau_0}} e^{-\xi}, \quad (5)$$

die Amplitude der Oberflächentemperatur des Belags  $\hat{\vartheta}(0, t_1) = \Delta \vartheta_B$ , der Proportionalitätsfaktor zwischen den beiden Amplituden  $(2\pi t/\tau_0)^{-0.5}$  sowie der Zusammenhang zwischen der Temperatur- und der Wärmestromdichtemesstelle über die durch den Belag verursachte Dämpfung  $e^{-\xi}$  enthalten. Der aus der Phasenverschiebung der Messsignale ermittelbare Exponent  $\xi$  der Dämpfung ersetzt in den Gleichungen (1) und (2) den Term der Phasenverschiebung

$$\xi = 2\pi \frac{\Delta t}{\tau_0} = x \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} = \varpi \sqrt{\frac{\pi}{\tau_0}} \quad (6)$$

mit dem später verwendeten Ablagerungsparameter  $\varpi = x/\sqrt{a}$ . Die Annahme, dass der Wärmeeintrag in die Ablagerungsschicht über ein angrenzendes Fluid nach einem periodischen Zeitgesetz erfolgt, wird in der Praxis gewöhnlich nicht erfüllt. Vielmehr liegt für den Verbrennungsprozess, vor allem bei Abfallverbrennungsanlagen, eine stochastische Energiefreisetzung durch die starke Heterogenität des Brennstoffs stets inhärent vor. Eine Anpassung der Modellvorstellung an diese Bedingungen ist daher notwendig.

## 2. Anpassung der Modellvorstellung an die praktischen Messbedingungen

Aus der formalen mathematischen Betrachtung der Gleichungen (1) und (2) geht hervor, dass es sich hierbei um Lösungen von linearen Differentialgleichungen zweiter beziehungsweise erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten handelt. Diese besitzen die Eigenschaft, dass über Linearkombination von Lösungsgleichung neue Lösungen gebildet werden können. Damit lassen sich auch nahezu beliebige inhomogene Rand- und Anfangsbedingungen, wie sie für die Fouriersche Erfahrungsgleichung der Wärmeleitung bei transienten Temperatur- und Wärmestromdichtemesssignalen vorliegen, durch gezielte Superposition von Fundamentallösungen erfüllen. Eine Möglichkeit dies zu erreichen bietet die Überlagerung harmonischer Schwingungen, wie sie erstmals von Fourier beschrieben wurde, weshalb für die Analysemethode die Messsignalapproximation nach der sogenannten Fourierschen Reihenentwicklung angewendet wird. Der Vorteil dieser Methode besteht vor allem in der einfachen Anwendbarkeit auf das vorliegende Problem, da Fourier die Reihenentwicklung im Zusammenhang mit der Lösung von Wärmeleitproblemen entwickelte und deshalb zwischen der Fouriersynthese und der hier verwendeten Gleichung für das Temperaturfeld eine formale Ähnlichkeit besteht.

Eine entsprechende Anpassung des Temperaturfeldes über solche Basislösungen an die Rand- und Anfangsbedingungen geschieht durch:

- Zeitäquidistante Abtastung eines kontinuierlichen, analogen Temperatur- oder Wärmestromdichtesignals, woraus ein zeitdiskretes, digitales Messsignal resultiert.
- Wahl des Beobachtungszeitraums für die Messsignalanalyse unter der Maßgabe, dass stationäre Messsignale vorliegen.
- Entwicklung des diskreten Eingangssignalvektors (Messsignal, z.B. Temperaturverlauf, gemessen mit IR-Kamera) in eine Fourierreihe.

- Annahme entweder eines Ablagerungsparameters  $\varpi$  bei der Verwendung zweier Temperaturmesssignale oder eines Wärmeeindringkoeffizienten für eine Kombination aus Temperatur- und Wärmestromdichtemessung und Berechnung der entsprechenden Antwortapproximation.
- Fehlerquadratminimierung zwischen dem diskreten Ausgangssignal (Messsignal, z. B. Wärmestromdichtemessung, gemessen nach der Steg-Rohr-Methode) und seiner Approximation durch Anpassung des Ablagerungsparameters oder des Wärmeeindringkoeffizienten (abhängig davon, ob ein Temperatur-Temperatur- oder Temperatur-Wärmestromdichtevergleich erfolgt).

Alle weiteren Parameter in den Gleichungen (4) und (5) ergeben sich aus den gemessenen Werten beziehungsweise im Falle der Periodendauer der Einzelschwingungen aus dem gewählten Abtastintervall und dem zugrunde gelegten Beobachtungszeitraum. Diese Vorgehensweise liefert als Ergebnis entweder den gesuchten Wärmeeindringkoeffizienten, mit dem mittels der im Ablagerungscharakterisierungsdiagramm dargestellten Zusammenhänge direkt auf die Wärmeleitfähigkeit sowie die Schichtdicke des Belagsmaterials geschlossen werden kann oder den Ablagerungsparameter, mit dem aufgrund der unzureichenden Anzahl an Bestimmungsgleichungen keine direkte Ermittlung weiterer Parameter möglich ist. Letzterer hat deshalb vorerst nur für die Versuche im Technikum oder unter definierten Bedingungen (Kenntnis der Temperatur- oder Wärmeleitfähigkeit oder des räumlichen Abstands zweier Messstellen) eine praktische Bedeutung, worauf sich jedoch die im folgenden Abschnitt vorgestellten Untersuchungsergebnisse zur Validierung der Mess- und Analysemethoden stützen. Für detaillierte Erläuterungen zur Anpassung der Modellvorstellung an die vorliegenden Messbedingungen sowie der verwendeten Analysemethoden sei erneut auf [1] verwiesen.

### 3. Ergebnisse der Untersuchungen an einer Versuchsanlage und an einem großtechnischen Dampferzeuger

Zur Validierung der Modellvorstellung und Prüfung der Praxistauglichkeit der Mess- und Analysemethoden wurden zunächst Untersuchungen an einer vorhandenen Versuchsanlage durchgeführt. Diese besteht aus einer Brennkammer mit Brenner, der eine maximale thermische Leistung von 50 kW besitzt, aus einer daran angeschlossenen Strahlungskammer, die zu einer Seite durch ein Membranwandsegment zur Durchführung der Versuche abgeschlossen wird. Das Membranwandsegment besteht aus 5 Siederohren, die mit Stegen zu einem Paneel von einer Fläche von 0,09 m<sup>2</sup> verschweißt sind sowie aus einer Rezirkulationsschleife, um einen Naturumlauf zu ermöglichen. Zur Bestimmung der Wärmestromdichte sind an dem Rohrwandpaneel Wärmestrommessstellen nach der Steg-Rohr-Methode [15] angebracht. Die geringe Anlagen- und Heizflächengröße sowie die gleichzeitig hohe Eigendynamik stellen für Versuche mit schwankendem Energieeintrag in das Rohrwandpaneel eine große Herausforderung dar.

Während der Versuche wurde die Brennerleistung zur Erzeugung von Temperaturschwankungen im Membranwandaufbau periodisch oder aperiodisch variiert. Um ein ebenes Temperaturprofil in den eingesetzten Modellablagerungen zu erreichen, ist das Rohrwandpaneel mit einer hintergossenen und an der Oberfläche ebenen Feuerfestplatte aus nitridgebundenem Siliciumcarbid (SiC) zugestellt. Da sich ein stabiles Blasensieden, das entsprechend der Modellvorstellung zugrunde gelegt wird, zum einen nicht immer einstellen ließ und zum anderen häufig während der Versuche zusammenbrach, konnte die vorteilhafte Kombination aus Temperatur- und Wärmestromdichtemessung nur ansatzweise<sup>1</sup> getestet werden (vgl. [13]).

<sup>1</sup> Das Nichterreichen eines stabilen Blasensiedens ist insbesondere auf die Größe der Versuchsanlage zurückzuführen. Für stabile Betriebsbedingungen müsste die überströmte Rohrlänge der Membranwand deutlich vergrößert und auftretende Druckschwankungen begrenzt werden. Diese Verbesserungen des Umlauf- und Siedeverhaltens sind in einem nächsten Schritt geplant.



In Abbildung 2 ist daher ein Versuchsverlauf für eine periodische Änderung der Brennerleistung dargestellt, in dem als Eingangssignal für die Analysemethode die Oberflächentemperatur einer Modellbelagsschicht – bestehend aus Gips – mit einer Infrarot-Kamera gemessen wurde. Die Ermittlung eines Vergleichssignals geschah durch ein Thermoelement am Übergang zwischen Modellbelag und feuerfester Zustellung. Zusätzlich ist als Referenzsignal der zeitliche Verlauf des Messsignals eines weiteren Thermoelements in der Strahlungskammer in Abbildung 2 eingetragen. Daraus geht erwartungsgemäß hervor, dass es zwischen Rauchgas und Oberfläche des Belags aufgrund des dominierenden Energietransports über Strahlung zu keiner messbaren Zeitverzögerung der Signalverläufe kommt. Hingegen ist eine deutliche Phasenverschiebung zwischen Belagsoberfläche und Übergang zur feuerfesten Zustellung zu erkennen. Da die Schichtdicke des Modellbelags bekannt ist, lassen sich über den Ablagerungsparameter die quasistatisch ermittelbare Wärmeleitfähigkeit und die zeitliche Verschiebung der Messsignale mithilfe des in Abbildung 3 dargestellten Ablagerungscharakterisierungsdiagramms der Wärmeeindringkoeffizient (entlang des blauen Pfads), die Dichte (entlang des grünen Pfads) und zur Kontrolle wiederum die Schichtdicke der Modellablagerung (entlang des braunen Pfads) bestimmen. Die farbigen Flächen geben jeweils die theoretisch möglichen Wertebereiche der zu ermittelnden Parameter an.

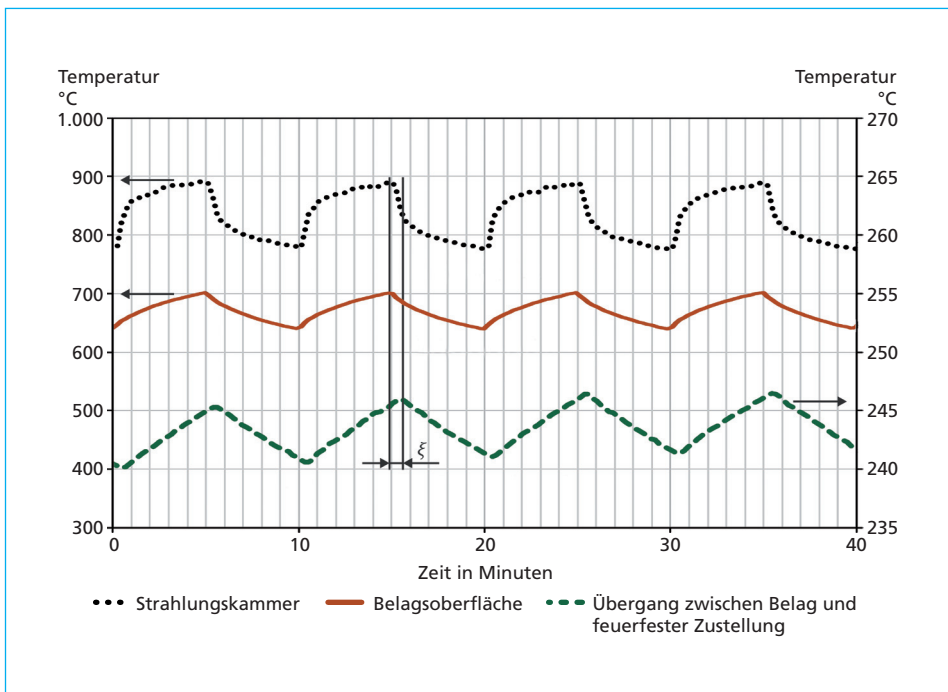


Abb. 2: Experimentell ermittelte Temperaturmesssignalverläufe für eine periodische Änderung der Brennerleistung an der Versuchsanlage mit Feuerfestsystem und Referenzbelag Gips zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit aus der Phasenverschiebung der Temperaturschwingungen zwischen der Oberfläche des Referenzbelags und dem Übergang zur feuerfesten Zustellung

Quelle: Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden, unveröffentlichte Dissertation, 2012

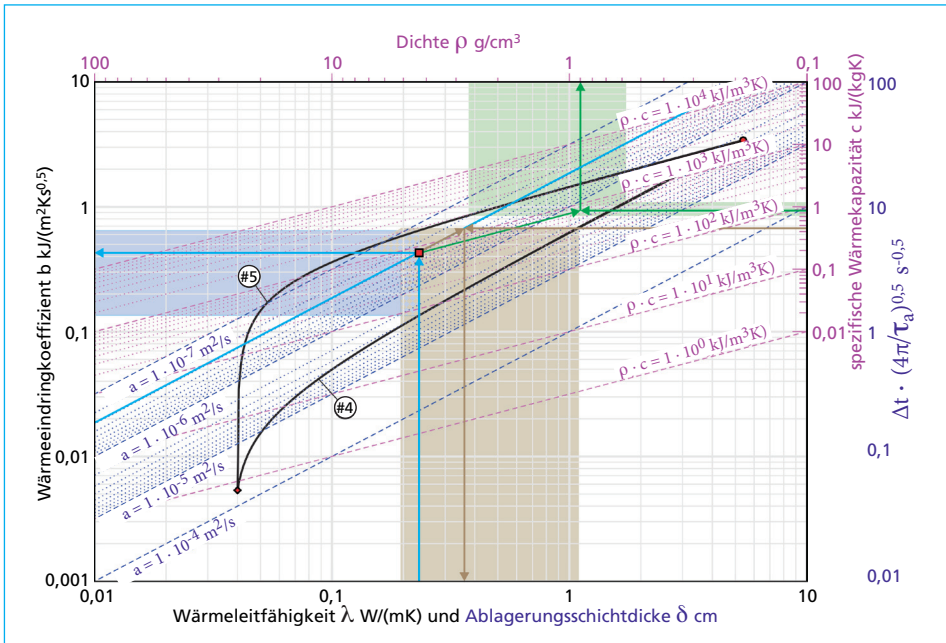


Abb. 3: Ablagerungscharakterisierungsdiagramm mit eingezeichneten Linien zur Erläuterung des Vorgehens beim Ablesen; die Pfeile markieren den Weg von als bekannt vorausgesetzten zu ablesbaren Größen; Pfeile bekannter Größen zeigen von den Achsen weg; die farbig hinterlegten Bereiche markieren das Spektrum der theoretisch möglichen Werte abhängig von den als bekannt vorausgesetzten Größen; die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt entlang des blauen, die der Dichte entlang des grünen und die der Ablagerungsschichtdicke entlang des braunen Pfades

Quelle: Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden, unveröffentlichte Dissertation, 2012

Die Ergebnisse der Messsignalanalyse wurden mit den im Labor ermittelten Stoffwerten Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit verglichen. Nach der hier beschriebenen Mess- und Analyseverfahren ergab sich im Vergleich zum Laborwert eine Abweichung von +32 % für die bestimmte Temperaturleitfähigkeit und von 24,6 % für den Wärmeeindringkoeffizienten. In Anbetracht dessen, dass für eine optimierte Abreinigung von Ablagerungen in Dampferzeugern die Kenntnis der Schichtdicke sowie der Dichte zur Abschätzung der Festigkeit des Belags und zur Festlegung der Verweilzeit sowie des Reinigungsimpulses benötigt wird, ist die Genauigkeit der ermittelten Werte ausreichend und im Vergleich zur theoretisch möglichen Spanne sogar sehr gut.

Zur Prüfung der Mess- und Analyseverfahren unter praktischen Einsatzbedingungen wurden Versuche an der Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA) Oftringen im Schweizer Kanton Aargau durchgeführt. Einerseits gestattete die stark korrosive Rauchgasatmosphäre bislang nicht den Einsatz von sehr dünnen und damit der Temperaturschwankungen hinreichend schnell folgenden Thermoelementen in der Ablagerungsschicht und andererseits existiert vor Ort keine Möglichkeit die Oberflächentemperatur während des Betriebs der Anlage zu messen. Deshalb wurden einige der in der Anlage eingesetzten hintergossen und hinterlüfteten Feuerfestplatten durch Bohrungen so präpariert, dass innerhalb dieser Thermoelemente mit definierten Abständen zur Bestimmung der Temperaturverläufe in unterschiedlichen Tiefen der Feuerfestplatten installiert werden konnten [21, 22, 23].

Durch diese Installationsweise ist es möglich mit den stochastischen Messsignalen, die aus der Verbrennung des eingesetzten heterogenen Brennstoffs herrühren und an den verschiedenen Tiefen der Messstellen innerhalb der Feuerfestplatten unterschiedlich stark gedämpft und phasenverschoben vorliegen, die Stoffeigenschaften des Vergussmaterials, bestehend aus SiC60-Gussmasse, das die Thermolemente umgibt, zu bestimmen. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt. Mittels der in Abschnitt 2 beschriebenen Analyseverfahren konnte mit einem näher in Richtung Rauchgas liegenden Thermolement (Messstelle V11-PR3, rote Messkurve, abzulesen an der linken Ordinate) der gemessene Kurvenverlauf eines weiter entfernt liegenden Thermolements (Messstelle V11-PR1, Messkurve in Magenta, abzulesen an der rechten Ordinate) durch die Entwicklung des Messsignals in Fourierreihen und eine entsprechende Anpassung des Ablagerungsparameters approximiert werden (grüne Approximationskurve, abzulesen an der rechten Ordinate). Die Approximation des Kurvenverlaufs mit dem gemessenen Signal ist ausreichend, um zusammen mit den gegebenen Abständen zwischen den Thermolementen eine gute Übereinstimmung der berechneten Temperaturleitfähigkeit mit dem Wert aus den Laboruntersuchungen zu erreichen.

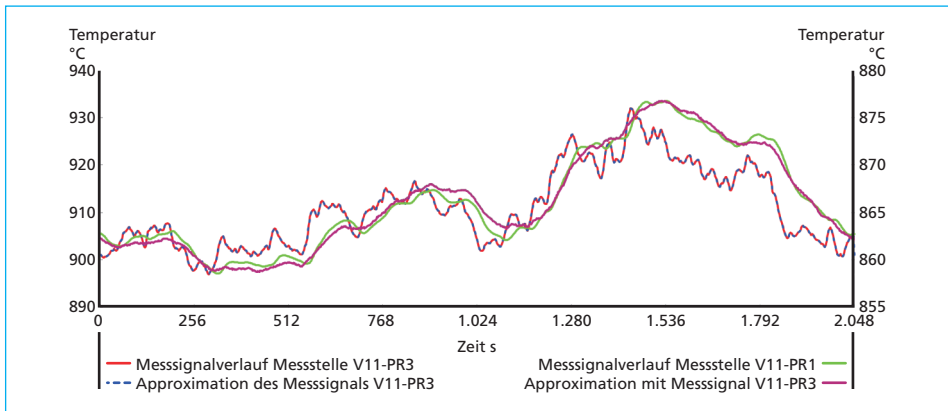


Abb. 4: Fourierreihen-Approximation für die Messstellen V11-PR3 und V11-PR1 bei einem Zeitintervall von 2.048 s für 1.024 Abtastwerte und einen Anpassungsparameterwert von  $8,681 \text{ s}^{0,5}$

Quelle: Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden, unveröffentlichte Dissertation, 2012

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag dargelegten Untersuchungen zeigen, dass eine Bestimmung von Ablagerungsparametern anhand von schwankenden Temperatur- und Wärmestromdichtesignalen prinzipiell möglich ist und eine Anwendbarkeit in der Praxis besteht. Die vorgestellte Mess- und Analyseverfahren konnte zudem im Technikum an unterschiedlichen Modellbelägen sowie in der Praxis an Feuerfestplatten erfolgreich getestet werden.

Die gemessenen Temperatursignale in den Feuerfestplatten korrelieren dabei sehr gut mit den Thermospannungsdifferenzen, die sich bei der Ermittlung der Wärmestromdichte an den Membranwänden in Anwendung der Steg-Rohr-Messmethode ergeben. Diese Thermospannungsdifferenzen sind den auftretenden Wärmestromdichten über einen großen Messbereich näherungsweise direkt proportional. Da die nichtinvasive und kostengünstige Installation des Steg-Rohr-Messverfahrens zwar eine großflächige Netzmessung der

Wärmestromdichte erlaubt, aber bislang nur eine quasistatische Betrachtung des Wärmetransports zulässt, kann diese noch nicht zur Ermittlung der Ablagerungsstoffeigenschaften hinzugezogen werden.

Andere Systeme zur Messung der Wärmestromdichte an Membranwänden sind bekannt, jedoch an der KVA Oftringen nicht vorhanden. Mobile Messmittel oder solche, die sich mit vertretbarem Aufwand installieren lassen, können in der Regel bei den vorliegenden Temperaturen und dem hohen Korrosionspotential diffundierender Gase nicht verwendet werden. Die direkte Bestimmung von Ablagerungsstoffeigenschaften über die vorgestellte Mess- und Analyseverfahren steht deshalb noch aus.

Die sehr gute Korrelation der Temperaturmesssignale der Thermoelemente in den Feuerfestplatten mit den gemessenen Thermospannungsdifferenzen zwischen Stegmitte und Rohrscheitel auf der rauchgasabgewandten Seite der Rohrwände weist darauf hin, dass aus der Kombination der Wärmestromdichtemessung mit der Messung der Belagsoberflächentemperatur die Stoffeigenschaften dieser Ablagerungen für eine praktische Nutzung hinreichend genau charakterisiert werden können.

Bislang basiert die Modellvorstellung auf einem ebenen Temperaturprofil unterhalb der Ablagerungsschicht, was in der Regel nur durch das Vorhandensein einer feuerfesten Zustellung erreicht wird. Eine Erweiterung auf zweidimensional zu betrachtende Membranwandgeometrien, wie nichtzugestellte Rohrwände, ist generell möglich, setzt jedoch bestimmte Voraussetzung zur Verteilung der Ablagerungsschichtdicke über der Steg-Rohr-Kontur voraus. Lösungsstrategien für eine solche Erweiterung des mathematischen Modells existieren bereits, der Fokus liegt jedoch weiterhin primär auf der Entwicklung einer praxistauglichen Messsensorik.

Für die Begrenzung der Wertebereiche von Stoffeigenschaften sind geeignete Modelle für den Energietransport in porösen Feststoffen notwendig. Aus der Fachliteratur sind hierfür entsprechende Modellvorstellungen bekannt und können zum Teil auch ohne Weiteres angewendet werden. Die Schwierigkeit besteht vielmehr in der passenden Wahl des Modells zum vorliegenden Ablagerungsfall, d. h. die Ablagerungszusammensetzung, der Ablagerungsort, das vorherrschende Temperaturniveau usw. entscheiden darüber, welches Modell zu verwenden ist.

Zukünftige Arbeiten sind im Hinblick auf eine In-situ-Messung des Temperaturverlaufs der Oberflächentemperatur von Ablagerungen im Betrieb von Verbrennungsanlagen geplant, womit eine direkte Bestimmung des Wärmeeindringkoeffizienten und eine hinreichend gute Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der Schichtdicke von Ablagerungen ermöglicht wird.

## 5. Referenzen

- [1] Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden, unveröffentlichte Dissertation, 2012
- [2] Gumz, W.; Kirsch, H.; Mackowsky, M.-T.: Schlackenkunde: Untersuchungen über die Minerale im Brennstoff und ihre Auswirkungen im Kesselbetrieb. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1958
- [3] Raask, E.: Mineral Impurities in Coal Combustion: Behaviour, Problems, and Remedial Measures. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1985
- [4] Bryers, R. W.: Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. Progress in Energy and Combustion Science. Jahrgang 22, 1996, Nummer 1, S. 29-120

- [5] Benson, S. A.; Sondreal, E. A.: Ash-related issues during combustion and gasification. In: Gupta, R. P.; Wall, T. F.; Baxter, L. (Hrsg.): Impact of Mineral Impurities in Solid Fuel Combustion. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999, S. 1-21
- [6] Wynnyckyj, J. R.; Rhodes, E.; Chambers, A. K.: Furnace Wall Ash Monitoring System. 4,408,568 USA, 11. Oktober 1983
- [7] Levert, F. E.; Robinson, J. C.; Golden, J.: Monitor For Deposition On Heat Transfer Surfaces. 4,722,610 USA, 2. Februar 1988
- [8] Farrell, D. M.; Robbins, B. J.: On-line Monitoring of Furnace Wall and Superheater Corrosion. In: Power Generation Boilers, VTER Technical Paper, CSS 98. University of Northumbria at Newcastle: 39th Corrosion Science Symposium, 8. September 1998
- [9] Bailey, R. T.; Carter, H. R.: Furnace Cleanliness Monitor For High Reflectivity Ash. 5,094,695 USA, 10. März 1992
- [10] Koschack, R.; Fiehe, S.; Taj, P.: Einsatz von Infrarot-Kameras zur Lokalisierung von Brennkammerverschmutzungen am BoA-Block des Kraftwerkes Niederaußen und erste Betriebserfahrungen. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 495-504
- [11] Taler, J.; Trojan, M.; Taler, D.: Computer System for On-Line Monitoring of Slagging and Fouling and Optimization of Sootblowing in Steam Boilers. Lissabon: 2nd International Conference on Engineering Optimization, 2010. S. 1-12
- [12] Mueller, C. et al.: Direkte Messung und dynamische Softwarealgorithmen – ideale Kombination für erhöhte Dampferzeugereffizienz. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010. S. 327-332
- [13] Grahl, S.; Beckmann, M.: Wärmestromdichtemessung zur Belagsbestimmung. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 727-742
- [14] 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
- [15] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen
- [16] Grahl, S.; Beckmann, M.: Online-Analyseverfahren zur Ermittlung von Belagsstoffeigenschaften in Dampferzeugern. 25. Deutscher Flammentag, 14.09.-15.09.2011. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011, S. 101-108
- [17] Gupta, R. P.; Wall, T. F.; Baxter, L.: The Thermal Conductivity of Ash Deposits. In: Gupta, R. P.; Wall, T. F.; Baxter, L. (Hrsg.): Impact of Mineral Impurities in Solid Fuel Combustion. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999, S. 65-84
- [18] Schlünder, E.-U.; Tsotsas, E.: Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag, 1988
- [19] Leach, A. G.: The thermal conductivity of foams. I: models for heat conduction. Journal of Physics D: Applied Physics. 1993, Jahrgang 26, S. 733-739
- [20] Godbee, H. W.; Ziegler, W. T.: Thermal conductivities of MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZrO<sub>2</sub> powders to 850 °C. II. Theoretical. Journal of Applied Physics. Nummer 1 (1966), Jahrgang 37, S. 56-65
- [21] Martin, K.-U.: Temperatur- und Wärmestrommessung bei hinterlüfteten und hintergesonnenen Feuerfest-Plattensystemen – Versuchsprogramm und erste Erkenntnisse. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 311-322

- [22] Grahl, S.; Beckmann, M.: Wärmeübertragung bei hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfest-Plattensystemen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 285-309
- [23] Grahl, S.; Beckmann, M.; Martin, K.-U.: Hinterlüftete Plattensysteme – wärmetechnische Grundlagen und Erfahrungen in der KVA Oftringen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 463-488