

In-situ-Analyse von Ablagerungseigenschaften in Dampferzeugern

Dipl.-Ing. **S. Grahl**, Prof. Dr.-Ing. **M. Beckmann**, Technische Universität Dresden;

Kurzfassung

Verschmutzungen an den Heizflächen stellen für die Auslegung und den Betrieb von Dampferzeugern eine große Herausforderung dar. Die grundsätzlichen Einflussgrößen auf die Verschmutzungen sind die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Brennstoffbestandteile aus denen sich die Ablagerungen bilden sowie die betriebsbedingten, feuerungstechnischen und konstruktiven Gegebenheiten der jeweiligen Anlage.

Besonders für heterogene Brennstoffe verstärkt sich die Herausforderung durch das diffizile Zusammenspiel der Einflussgrößen aufgrund der hohen Komplexität und Dynamik der Wechselwirkungen, die bislang weder mit einer einheitlichen physikalischen Theorie noch hinreichend genau empirisch erfassbar sind. Vor allem Abfallverbrennungsanlagen erfordern daher hinsichtlich einer hohen Verfügbarkeit und eines wirtschaftlichen Betriebs eine genauere Kenntnis der Ablagerungssituation an den Heizflächen. Um große Abgasverluste und Schwierigkeiten im Anlagenbetrieb zu vermeiden, ist es folglich notwendig, Beläge während des Betriebs nach Bedarf zu entfernen. Für eine gezielte Reinigung muss sowohl die örtliche Lage und Menge von auftretenden Ablagerungen bekannt sein als auch die Intensität und Verweilzeit der Reinigungsmaßnahme richtig eingestellt werden. Dies gelingt jedoch nur dann, wenn insbesondere die lokal vorliegende Struktur, Dichte und Schichtdicke als Hinweis auf die mechanische Festigkeit der Ablagerung bekannt sind.

In der Vergangenheit wurden deshalb bereits verschiedene Lösungsansätze zur Charakterisierung von Ablagerungen entwickelt, die sich bislang entweder begründet durch einen hohen Installations- bzw. Kostenaufwand nicht durchsetzen konnten oder die aufgrund unbekannter Stoffeigenschaften keine detaillierten Auskünfte zu bestimmten Belageigenschaften liefern. Das diesbezüglich im folgenden Beitrag vorgestellte Mess- und Analyseverfahren basiert auf der Analyse transienter Temperatur- und Wärmestromdichtemesssignale, die aufgrund der schwankenden Energiefreisetzung heterogener Brennstoffe stets inhärent vorhanden sind. Um gleichzeitig die zunächst große Anzahl unbekannter Stoffeigenschaften zu reduzieren, fließt in die Analyse eine Beschränkung der möglichen Wertebereiche über Zusammenhänge auf atomarer und molekularer Ebene mit ein. Diese Zusammenhänge werden anhand eines dafür entwickelten Ablagerungscharakterisierungsdiagramms visualisiert. Zudem lassen sich damit weitere Beschränkungen des

Wertebereichs von Stoffeigenschaften mittels geeigneter Modellvorstellungen zum Wärmetransport in porösen Schichten zeigen. Abschließend erfolgt eine Validierung der Mess- und Analyseverfahren mit den Ergebnissen erster Untersuchungen an einem großtechnischen Dampferzeuger.

1. Einleitung

Verschmutzungen an den Heizflächen von Dampferzeugern behindern die Wärmeauskopplung und verringern über infolgedessen steigende Abgasverluste den effizienten Einsatz des Brennstoffs. Darüber hinaus führen sie häufig auch zu einer verstärkten Korrosion der Membranwände, Überhitzer und Economiser. Insbesondere für Abfall und Brennstoffe biogenen Ursprungs stellt das durch den Verschleiß mit entsprechendem Wartungs- und Instandhaltungsaufwand sowie die beeinträchtigte Anlagenverfügbarkeit eine große Problematik dar, die sich dementsprechend negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Daher wurden in der Vergangenheit Online-Reinigungssysteme entwickelt und kontinuierlich verbessert, um im Betrieb Verschmutzungen der Heizflächen entfernen zu können. Damit ist es bislang möglich, Verschmutzungen zu lokalisieren und gezielt abzureinigen. Eine weitere Optimierung wäre möglich, wenn zudem die Ablagerungseigenschaften, insbesondere die Schichtdicke und die Festigkeit, ermittelt werden könnten, da sich hierüber Parameter der Online-Reinigung, wie lokale Verweilzeit und Druck des eingesetzten Reinigungsmediums, an die jeweiligen Gegebenheiten anpassen ließen. Auf diese Weise wäre es möglich, Schäden durch Abrasion und Thermoschocks an den Membranwänden und feuerfesten Zustellungen zu vermeiden, bereits ausgebildete Passivierungsschichten zu belassen, dadurch einen weiteren Korrosionsangriff auf das Heizflächenmaterial zu hemmen, die Menge des eingesetzten Reinigungsmediums zu reduzieren und damit in der Regel auch den Anlagenwirkungsgrad deutlich zu steigern.

Nachfolgend wird diesbezüglich eine Mess- und Analyseverfahren vorgestellt, mit der es möglich ist, die Stoffeigenschaften und somit auch die Schichtdicke und Festigkeit von Ablagerungen mit guter Genauigkeit abzuschätzen. Damit lässt sich zukünftig der Instandhaltungsaufwand senken, Betriebsmittel einsparen und folglich die Wirtschaftlichkeit von Anlagen mit Biomasse und Abfall als Brennstoff insgesamt steigern.

2. Grundlagen

Den Ausgangspunkt der im Folgenden vorgestellten Mess- und Analyseverfahren stellt die insbesondere in Dampferzeugern unter Einsatz von sehr heterogenen Brennstoffen, wie

Abfall und Biomasse, stets inhärent vorliegende schwankende Energiefreisetzung während des Verbrennungsprozesses dar. Die daraus resultierende transiente Variation der Energiedichte im Kessel führt zu lokal permanent schwankenden Rauchgastemperaturen und – entsprechend des FOURIERSCHEN Erfahrungsgesetzes der Wärmeleitung – auch zu einem instationären Verhalten der Wärmestromdichte.

Die an den Wärmeübertragungsflächen örtlich auftretenden Schwankungen von Temperatur und Wärmestromdichte setzen sich entgegen der Richtung des Temperaturgradienten, damit hin zu einem niedrigeren Temperaturniveau, fort. Aus der Theorie der instationären Wärmeleitung ist bekannt, dass zum einen, wegen des Energietransports mit endlicher Geschwindigkeit, eine zeitliche Verschiebung des Temperatur- und Wärmestromdichteverlaufs auftritt und zum anderen, aufgrund einer von Null verschiedenen Wärmekapazität des leitenden Materials, ein ständiges Ein- und Ausspeichern von Energie erfolgt, wodurch eine gewisse Dämpfung der Schwankungen in Transportrichtung auftritt.

Die Proportionalität zwischen zeitlicher Temperaturänderung und örtlichem Temperaturgradienten ist durch die Temperaturleitfähigkeit

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (1)$$

gegeben, die das Verhältnis zwischen Wärmeleitfähigkeit λ und volumetrischem Wärmespeichervermögen $\rho \cdot c$, welches sich aus dem Produkt der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c ergibt, beschreibt. Damit enthält ein über zwei Randbedingungen und eine Anfangsbedingung eindeutig definiertes eindimensionales Temperaturfeld einer Ablagerung alle Stoffeigenschaften sowie den Abstand zwischen den beiden Bestimmungsorten (den Randbedingungen). Dieses recht einfache Prinzip wird nachfolgend über entsprechende Modellvorstellungen auf die komplizierteren Bedingungen in der Praxis angewendet, um damit Ablagerungen in situ charakterisieren zu können.

2.1. Modellvorstellung für den instationären Wärmetransport

Um das Modell möglichst einfach zu halten und im ersten Schritt eine in der Regel komplizierte Lösung eines mehrdimensionalen instationären Temperaturfelds zu vermeiden, beziehen sich die folgenden Betrachtungen zunächst auf eine Feuerfestplatte. Diese bietet bei hinreichender Schichtdicke, einer feuerraumseitig ebenen Oberfläche und einer hohen Wärmeleitfähigkeit – wie sie für die derzeit gewöhnlich eingesetzten nitridgebundenen Feuerfestplatten aus Siliciumcarbid (SiC) vorliegen – bei einer sich eben und gleichmäßig dick ausbildenden Ablagerungsschicht eine eindimensionale Betrachtung des Temperaturfelds. Dabei werden die folgenden Grundbedingungen vorausgesetzt:

- Das Temperaturfeld weist keine Wärmequellen oder -senken auf und die Stoffeigenschaften können im vorliegenden Temperaturbereich als temperaturunabhängig angenommen werden.
- Die einzelnen Schichten lassen sich als aneinandergereihte Temperaturfelder betrachten, die Isotropie und Homogenität aufweisen.
- Die gesamte schichtförmig aufgebaute Membranwand soll sich wie eine einseitig unendlich ausgedehnte Wand verhalten. Dies kann angenommen werden, wenn der gesamte, über die Wand transportierte Wärmestrom, abgesehen von einem im Verhältnis vernachlässigbar kleinen Wärmeverlust an die Umgebung, zur Verdampfung des Wassers in den Siederohren des Dampferzeugers führt.

Ein besonders ebenes Temperaturprofil ergibt sich in der Regel an der Oberfläche von hinterlüfteten Feuerfestplatten, wie aus Untersuchungen zum Energietransport am Spalt von entsprechenden Plattensystemen gezeigt werden konnte [1]. Der Grund hierfür liegt in den verhältnismäßig kleinen Temperaturunterschieden sowohl auf der feuerraumseitigen als auch auf der feuerraumabgewandten Seite der Plattenoberflächen im Bezug zu den wesentlich größeren Temperaturdifferenzen zwischen Rauchgas und Plattenoberfläche bzw. Plattenoberfläche und Rohrwandoberfläche infolge des dominierenden Strahlungseinflusses auf den Energietransport. Somit resultiert für eine ebenmäßige Ablagerungsschicht auf einer hinterlüfteten Feuerfestplatte ein näherungsweise eindimensionales Temperaturfeld, das sich nach der folgenden instationären Gleichung ermitteln lässt:

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

Darin bezeichnen $\vartheta_{m,B,a}$ die mittlere Temperatur der feuerraumseitigen Ablagerungsoberfläche, x die Schichtdicke und λ die Wärmeleitfähigkeit der Ablagerung, \dot{q}_m einen im Mittel konstanten und somit quasistatischen Wärmestrom vom Rauchgas zum Siedewasser, $\Delta\vartheta_n$ die Amplitude einer Einzeltemperaturschwankung an der Ablagerungsoberfläche sowie n die jeweilige Harmonische, N die Periodenlänge und τ_A die Zeitdauer des Abtastintervalls für eine zeitdiskrete Digitalisierung eines kontinuierlichen analogen Temperaturmesssignals. Zudem wird eine hinreichende Beobachtungszeit ($t \rightarrow \infty$) gefordert, sodass der aus einer inhomogenen Anfangsbedingung resultierende transiente Teil der Gleichung bereits abgeklungen ist. Für weiterführende Erläuterungen und eine ausführliche Herleitung dieser Gleichung sei auf [2] verwiesen.

Eine direkte Ermittlung der Stoffeigenschaften bzw. der Ablagerungsschichtdicke ist nach dieser Methode jedoch nicht möglich, da für die Anzahl an Unbekannten zu wenige

Gleichungen verfügbar sind. Damit existieren unendlich viele Lösungen, bei denen die Schichtdicke stets direkt proportional zur Wurzel der Temperaturleitfähigkeit ist. Eine Zusammenfassung der nicht ermittelbaren Größen kann dieses Problem zunächst vereinfachen. Eine in diesem Sinne günstigere Darstellung resultiert aus der Ermittlung der Wärmestromdichte nach folgender Gleichung:

$$\dot{q}(x, t)_{t \rightarrow \infty} = \dot{q}_m + \sum_{n=1}^{\infty} \Delta \vartheta_n b \sqrt{\frac{2\pi}{N\tau_A}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi n}{aN\tau_A}}\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{N\tau_A} t - x \sqrt{\frac{\pi n}{aN\tau_A}} + \frac{\pi}{4}\right). \quad (3)$$

Hierin tritt die Wärmeleitfähigkeit nicht mehr explizit auf, wenn der Wärmeeindringkoeffizient

$$b = \sqrt{(\lambda \rho c)} = \lambda / \sqrt{a} \quad (4)$$

eingeführt wird. Dieser lässt sich aus einem Vergleich der Koeffizienten in Gleichung (2) und Gleichung (3) direkt ermitteln:

$$b = \frac{\hat{q}_n(\delta_B, t_2)}{\hat{\vartheta}_n(0, t_1)} \sqrt{\frac{N\tau_A}{2\pi n}} \exp\left(x \sqrt{\frac{\pi n}{aN\tau_A}}\right). \quad (5)$$

Darüber hinaus geht aus Gleichung (4) hervor, dass nach deren Einsetzen in Gleichung (2) bei einer Gegenüberstellung zweier Temperaturen an örtlich verschiedenen Positionen lediglich der flächenspezifische Wärmetransportwiderstand

$$r = x / \lambda \quad (6)$$

der Ablagerungsschicht bekannt sein muss. Hierfür liefert Gleichung (2) mit Gleichung (6)

$$x / \sqrt{a} = b / (\lambda x) = b \cdot r = \varpi, \quad (7)$$

worin zunächst alle unbekanntenen Größen zu dem später nützlichen Ablagerungsparameter ϖ zusammengefasst werden. Die ersten beiden Glieder auf der rechten Seite von Gleichung (2) geben den quasi-stationären Temperaturverlauf über der Ablagerungsschicht bei einer effektiv auftretenden mittleren Wärmestromdichte \dot{q}_m an. Der flächenspezifische Wärmetransportwiderstand kann aus dieser mittleren Wärmestromdichte bei Kenntnis von zwei an unterschiedlichen Orten des Temperaturfelds auftretenden mittleren Temperaturen wie folgt bestimmt werden:

$$r = \dot{q}_m / (\vartheta_{m,B,a} - \vartheta_{m,B,i}). \quad (8)$$

Darin gibt $\vartheta_{m,B,i}$ die mittlere Temperatur an der Grenzfläche zwischen Ablagerung und hinterlüfteter Feuerfestplatte an.

Auf die gezeigte Weise können daher zwei beliebige Paarungen von Wärmestromdichte- und Temperaturfeldern an jeweils unterschiedlichen Beobachtungspunkten dazu genutzt werden,

die Anzahl der Unbekannten mit den während des Betriebs von Dampferzeugern messbaren Größen auf eine Unbekannte, nämlich den Ablagerungsparameter ϖ , zu reduzieren. Um darüber hinaus Stoffeigenschaften und die Ablagerungsschichtdicke ermitteln zu können, ist mindestens ein weiterer Stoffwert zu bestimmen. Nachfolgend wird hierfür ein Weg vorgestellt, die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wärmeeindringkoeffizienten hinreichend genau abzuschätzen, um die für eine Optimierung der Abreinigungsparameter notwendigen Belagsstoffeigenschaften ermitteln zu können.

2.2. Einführung des Ablagerungscharakterisierungsdiagramms

Ausgehend von dem Ziel, eine weitere Belagsstoffeigenschaft zu ermitteln, offerieren die miteinander auf atomarer und molekularer Ebene verknüpften Größen Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeiten einen Lösungsweg [3]. Dabei treten nicht beliebige sondern stets nur bestimmte Kombinationen von Stoffeigenschaften auf. Diese Tatsache lässt sich dazu nutzen, aus der Kenntnis eines kombinierten Parameters, wie beispielsweise dem Wärmeeindringkoeffizienten, in Kombination mit geeigneten Modellvorstellungen, einzelne Stoffeigenschaften in guter Näherung abzuschätzen.

Um die angesprochenen Verknüpfungen der Stoffeigenschaften zu verdeutlichen, wurde ein spezielles Ablagerungscharakterisierungsdiagramm entwickelt, das in Bild 1 veranschaulicht ist. Das Diagramm besitzt zur übersichtlichen Darstellung großer Wertebereiche eine doppeltlogarithmische Skalierung. Hierin lässt sich die Wärmeleitfähigkeit auf der unteren Abszisse in Abhängigkeit eines gegebenen und auf der linken Ordinate ablesbaren Wärmeeindringkoeffizienten ermitteln. Darüber hinaus können aber auch andere Kombinationen von Größen wie der Dichte, der spezifischen Wärmekapazität, der Schichtdicke und der Phasenverschiebung der Ablagerung zur Berechnung der Parameter dienen. In der Praxis ist jedoch häufig nur die Phasenverschiebung bekannt, weshalb an dieser Stelle auf die weiteren Nutzungsmöglichkeiten dieses Diagrammes nicht eingegangen wird und hierfür auf die Ausführungen in [2] verwiesen sei. Um die einzelnen Stoffwerte miteinander zu verbinden, sind zudem die volumetrische Wärmekapazität und die Temperaturleitfähigkeit eingetragen. Erstere verknüpft die Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmeeindringkoeffizienten und ist für konstante Werte in unterbrochenen magentafarbenen Geraden eingezeichnet. Letztere ist von der Wärmeleitfähigkeit sowie der volumetrischen Wärmekapazität abhängig und in unterbrochenen blauen Geraden dargestellt.

Die Ablagerungsminerale können allgemein den dielektrischen Feststoffen zugeordnet werden. Für Reinstoffe liegt deren volumetrische Wärmekapazität (Bereich #1) in einem schmalen Band (grau dargestellt) zwischen $1 \text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$ und $4 \text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$. Einige Beispiele für

reine dielektrische Feststoffe sind als Punkte abgebildet. Da praktisch stets poröse Feststoffe (Bereich #2, Quadrate) vorliegen, sind innerhalb der Poren Gase (Bereich #3, Rhomben) eingeschlossen. Während sich die Dichte und die spezifische Wärmekapazität eines porösen Feststoffs mit der Mischungsregel in guter Näherung bestimmen lassen, sind für die Wärmeleitfähigkeit spezielle Modelle notwendig, die im Allgemeinen empirischen Ansätzen unter Berücksichtigung der Struktur folgen. Diese empirischen Gleichungen sollten dabei möglichst lokale Gegebenheiten mit einem entsprechend an die jeweilige Ablagerung angepassten Modell für das vorliegende Temperaturniveau, den eingesetzten Brennstoff, den Aufbau und die Anordnung der Heizflächen berücksichtigen. Damit kann die Annahme, dass in der Belagsschicht ausschließlich Wärmeleitung auftreten darf, im mathematisches Modell um einen Energietransport durch Strahlung innerhalb der porösen Strukturen erweitert werden. In Richtung des Wärmestroms kann die Ablagerung darüber hinaus aus einzelnen Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften bestehen.

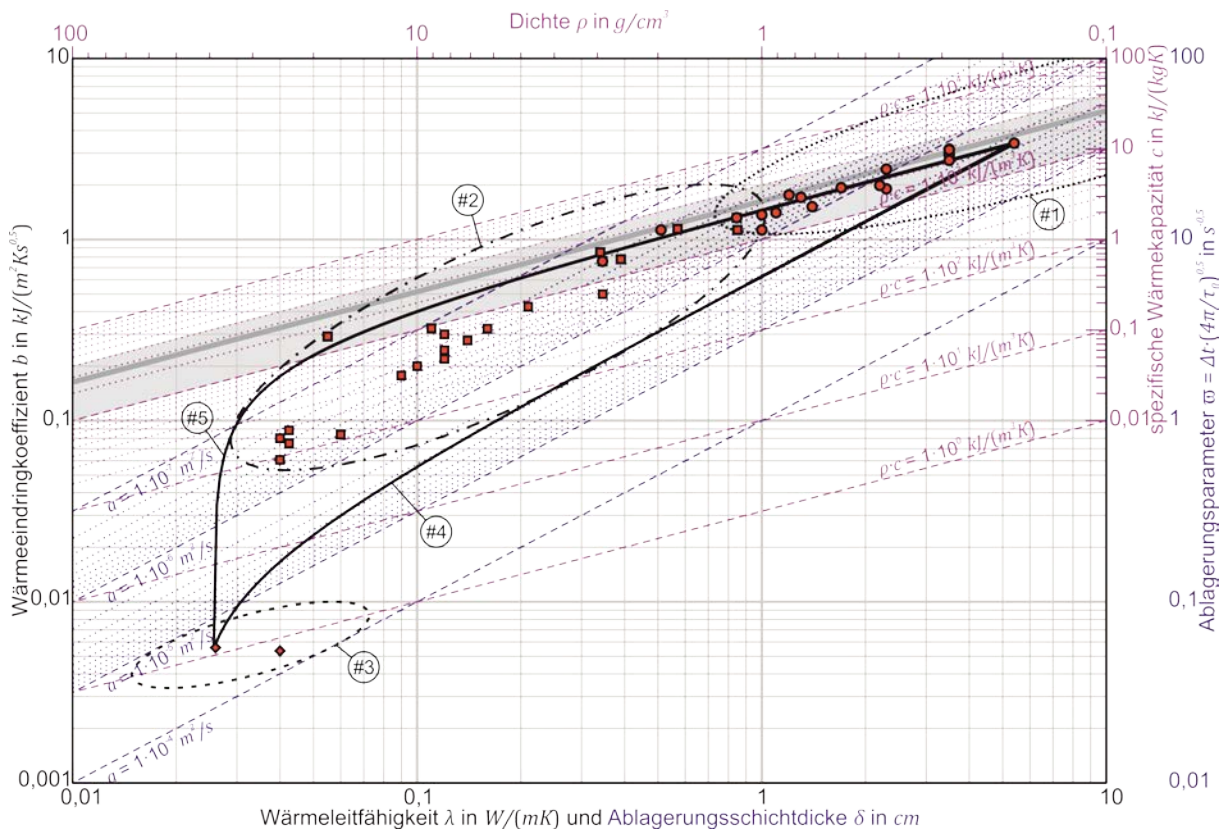


Bild 1: Diagramm zur Abschätzung von Ablagerungseigenschaften anhand des Wärmeindringkoeffizienten. [2]

Eine grundsätzliche Beschränkung des möglichen Wertebereichs der Wärmeleitfähigkeit ergibt sich aus den beiden Grenzfällen der reinen Parallelschaltung (#4) und der reinen Reihenschaltung (#5) von Wärmeleitwiderständen, wobei die Einzelwiderstände aus den

Feststoff- und Gasphasen gebildet werden. Die Begrenzungskurven zwischen den Endpunkten Feststoff und Gas spannen, unter Variation des Gasanteils zwischen 0 % und 100 % im Gemisch, den Wertebereich der Wärmeleitfähigkeit auf. Aus Bild 1 geht daraus hervor, dass sich die Wertebereiche der einzelnen Parameter prinzipiell über mehrere Zehnerpotenzen erstrecken können, jedoch im Hinblick auf die Begrenzungskurven stets wesentlich kleinere Wertebereiche zu erwarten sind. Ausgehend davon, dass die Stoffeigenschaften einer beliebigen Ablagerung in einem Dampferzeuger während des Betriebs vollkommen unbekannt sind, liefert dieser Lösungsansatz zumindest eine erste Näherung, die den möglichen Wertebereich der Wärmeleitfähigkeit auf weniger als eine Zehnerpotenz reduziert. Für eine Optimierung der Online-Reinigung genügt dies bereits. Mit geeigneten Modellen für den Energietransport innerhalb der porösen Ablagerungsschicht kann der Wertebereich jedoch deutlich weiter beschränkt und die Genauigkeit der Abschätzungen entsprechend erhöht werden. Im Anschluss lassen sich nach den Gleichungen (1), (4) und (7) oder unter Zuhilfenahme des Ablagerungscharakterisierungsdiagrammes die Schichtdicke sowie weitere Stoffeigenschaften von Belägen ermitteln.

3. Praktische Umsetzung der mathematischen Modellvorstellungen

Aus dem vorangegangenen Abschnitt wird deutlich, dass die notwendigen theoretischen Grundlagen für eine In-situ-Charakterisierung von Ablagerungen an einer hinterlüfteten Feuerfestplatte nunmehr vorliegen. Eine praktische Umsetzung erfordert schließlich noch passende Mess- und Analysemethoden.

Für die Belagscharakterisierung durch eine Signalanalyse müssen zunächst Eingangsgrößen ermittelt werden. Dies geschieht innerhalb der Messebene an zwei örtlich getrennt voneinander liegenden Punkten, die sich in Richtung des Wärmestroms entweder direkt im Bereich der Ablagerung oder in einer nachgelagerten Schicht (Hintergussmasse, Feuerfestplatte, Rohrwand) befinden. Das Temperaturfeld ist bei bekannten Messpositionen damit eindeutig bestimmt. Nach der Herleitung in Abschnitt 2.1 können die Eingangsgrößen durch eine beliebige Kombination von Temperatur- und Wärmestromdichtemessungen ermittelt werden. Aus den Betrachtungen in [2] zeigte sich, dass zur Vermeidung von messtechnischen Schwierigkeiten bei der Berechnung des Wärmeübergangs vom Rauchgas auf die Ablagerung vor allem optische Temperaturmesssysteme zur direkten Bestimmung der Ablagerungsoberflächentemperatur geeignet sind. Hierfür können insbesondere Pyrometer und Infrarot-Kamerasysteme eingesetzt werden. Letztere ermöglichen zudem großflächige Messungen im Dampferzeuger. Aufgrund des unbekanntem Emissionsverhaltens der Ablagerungsschicht ist eine genaue Ermittlung des Temperaturverlaufs an der

Ablagerungsoberfläche nicht ohne Weiteres möglich. Für die Signalanalyse sind jedoch nach Gleichung (2) die Dämpfung der Amplitude und die zeitliche Verschiebung des Messsignals als gleichwertig zu betrachten. Da einerseits die Amplitudendämpfung innerhalb der Membranwand eine exponentielle Abhängigkeit von der Schichtdicke aufweist, andererseits die zeitliche Verschiebung des Temperatursignals linear mit der Schichtdicke wächst und sich darüber hinaus mit hoher Abtastrate bestimmen lässt, liefert eine qualitative Messung des Temperaturniveaus bei hoher Abtastfrequenz sehr gute Messergebnisse. Die zweite Eingangsgröße kann durch ein Thermoelement in der hinterlüfteten Feuerfestplatte bestimmt werden, was sich in Untersuchungen am Spalt von hinterlüfteten Feuerfestplatten als praxistauglich erwiesen hat [4]. Um die Ausfallwahrscheinlichkeit der Messtechnik weiter zu verringern, ist das Steg-Rohr-Temperaturmessverfahren zur Ermittlung der Wärmestromdichte an der feuerraumabgewandten Seite von Membranwänden [5] empfehlenswert. Es zeichnet sich insbesondere durch die langlebige Messtechnik ohne die Notwendigkeit eines sicherheitskritischen Eingriffs in den Druckkörper des Dampferzeugers sowie eine allgemein einfache und kostengünstige Netzmessung aus.

Zur Validierung der Analysemethode fanden Versuche an einem großtechnischen Dampferzeuger statt. Dazu wurden Bohrungen senkrecht zum Rohrscheitel bzw. zum Steg in Feuerfestplatten angebracht, darin Thermoelemente in unterschiedlichen Tiefen installiert und die verbleibenden Löcher mit einer SiC60-Gussmasse verschlossen. Ziel war es, die Wärmeleitfähigkeit der Gussmasse zu ermitteln. Die bei der Verbrennung von heterogenen Brennstoffen auftretenden Temperaturschwankungen werden an den verschiedenen Messpunkten innerhalb der Feuerfestplatte unterschiedlich stark gedämpft und phasenverschoben. Um die stochastisch schwankenden Messwerte analysieren zu können, wird zunächst ein Beobachtungsintervall festgelegt, das sich aus dem Produkt von Periodenlänge und Abtastintervall ergibt und für das Stationarität vorausgesetzt wird. Im Hinblick auf das Temperaturfeld entspricht dies einer zeitlich veränderlichen Randbedingung, deren Beschreibung durch eine gezielte Superposition harmonischer Einzelschwingungen gemäß einer FOURIERreihenentwicklung erfolgen kann. Das kontinuierliche, analoge Temperaturmesssignal wird zur Signalanalyse durch eine zeitäquidistante Abtastung mit dem festgelegten Abtastintervall in ein zeitdiskretes, digitales Eingangssignal überführt. Anschließend erfolgt die Entwicklung des diskreten Eingangssignalvektors in eine FOURIERreihe. Für die in Bild 2 dargestellte, näher in Richtung Rauchgas liegende Messstelle V11-PR3 ist der gemessene (rote Messkurve) und approximierte Kurvenverlauf (blau gestrichelt) dargestellt. Aus der Approximation wird im nächsten Schritt der zuvor digitalisierte Temperaturverlauf einer weiter entfernt liegenden Messstelle V11-PR1 (grüne

Messkurve) mittels Variation des Ablagerungsparameters in Gleichung (2) solange angenähert (violette Kurve), bis für die Abweichung nach der Methode des GAUßschen Fehlerquadrats ein Minimum vorliegt. Die Approximation des Messsignals der Messstelle *V11-PR1* aus der Approximation des Messsignals der Messstelle *V11-PR3* ist ausreichend, um zusammen mit den gegebenen Abständen zwischen den Thermoelementen eine gute Übereinstimmung der nach Gleichung (7) berechneten Temperaturleitfähigkeit mit dem Wert aus den Laboruntersuchungen zu erreichen.

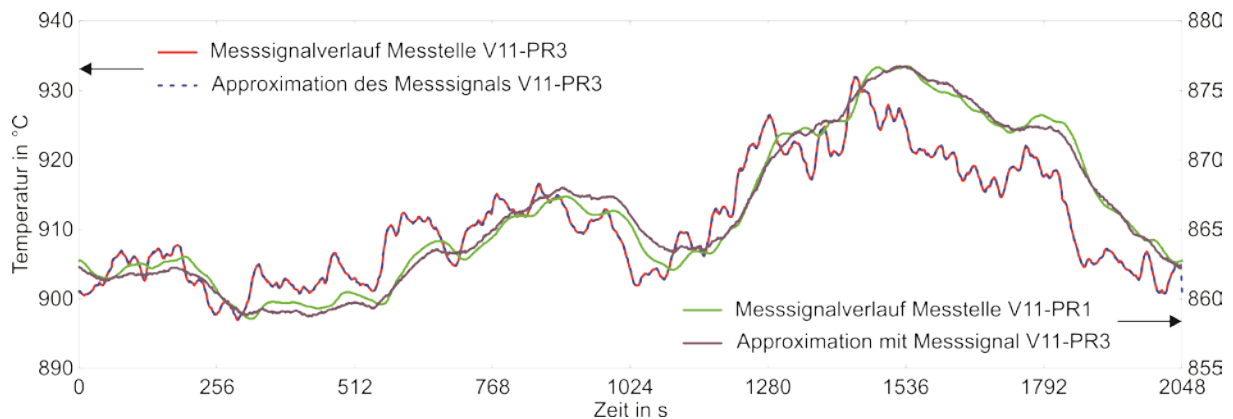


Bild 2: FOURIERreihen-Approximation der Messstellen *V11-PR3* und *V11-PR1* in einem Zeitintervall von 2048 s und einen Ablagerungsparameterwert von $8,681 \text{ s}^{0,5}$. [2]

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen an Feuerfestplatten einer Abfallverbrennungsanlage zeigen, dass eine Bestimmung von Ablagerungsparametern anhand einer Analyse von fluktuierenden Temperatur- und Wärmestromdichtesignalen möglich ist. Damit lässt sich die vorgestellte Mess- und Analysemethode potentiell dazu nutzen, Online-Reinigungsverfahren zu steuern und zu optimieren. Zukünftige Arbeiten sind im Hinblick auf eine In-situ-Messung des Temperaturverlaufs der Oberflächentemperatur von Ablagerungen im Betrieb von Verbrennungsanlagen und eine Erweiterung auf zweidimensional zu betrachtende Membranwandgeometrien, wie nichtzugestellte Rohrwände, geplant, womit eine direkte Bestimmung des Wärmeeindringkoeffizienten und eine hinreichend gute Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der Schichtdicke von Ablagerungen ermöglicht wird.

[1] 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, Bd. 9. Neuruppin: TK Verlag, 2012, S. 463-488

- [2] Grahl, S.: Charakterisierung von Ablagerungen an Membranwänden von Dampferzeugern. Technische Universität Dresden Diss. 2013
- [3] Grahl, S.; Beckmann, M.: In-situ analysis of deposit properties in steam generators. *International Journal of Thermal Sciences* 72 (2013) S. 172-183
- [4] Martin, K.-U.: Temperatur- und Wärmestrommessung bei hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfest-Plattensystemen - Versuchsprogramm und erste Erkenntnisse -. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann M. [Hrsg.]: *Energie aus Abfall*, Bd. 8. Neuruppin: TK Verlag, 2011, S. 311-322
- [5] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Neuruppin: TK Verlag, 2009