

Hinterlüftete Plattensysteme

– wärmetechnische Grundlagen und Erfahrungen in der KVA Oftringen –

Sebastian Grahl, Michael Beckmann und Karl-Ulrich Martin

1.	Modellvorstellung der Wärmeübertragung.....	464
2.	Übersicht zur eingesetzten Messtechnik an der KVA Oftringen.....	471
3.	Vergleich des Modells mit Messdaten hinsichtlich des Temperaturverlaufs und des auftretenden Wärmestroms	475
4.	Unterschiede bei der Belagsbildung zwischen hinterlüfteten und hintergossenen Plattensystemen	483
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	486
6.	Literaturverzeichnis.....	487

Keramische Feuerfest-Schutzsysteme für Membranwände in Dampferzeugern mit Abfall, Ersatzbrennstoff oder Biomasse als Brennstoff sind aufgrund des damit möglichen Schutzes vor Abrasion und Korrosion derzeit weit verbreitet. Sie zeichnen sich insbesondere durch schnelle Montage, planbare Wartungsintervalle, vergleichsweise lange Standzeiten und eine entsprechend hohe Wirtschaftlichkeit aus. Die Entwicklung ging dabei von geklebten über hintergossene bis hin zu hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystemen.

Entscheidend für den Einsatz keramischer Auskleidungssysteme in Dampferzeugern sowohl bei der Projektierung einer Neuanlage als auch beim Umbau bestehender Anlagen ist insbesondere die Kenntnis der wärmetechnischen Auswirkungen auf die gesamte Anlage. Ein durch Feuerfest-Plattensysteme gegenüber der ungeschützten Membranwand zusätzlich auftretender Wärmedurchgangswiderstand, führt im komplexen System Dampferzeuger zu einer Vielzahl an Konsequenzen, die dem Planer bekannt sein müssen, um korrekte Auslegung und hohe Verfügbarkeit der Anlage zu gewährleisten. Beispielhaft seien an dieser Stelle Auswirkungen auf den Wasser-Dampf-Kreislauf, den Temperaturverlauf in Abgasrichtung, das Korrosionspotential, die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten sowie die Verschmutzungseignung von nachgelagerten Heizflächen genannt.

Da zum einen der Wärmedurchgang von hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystemen in den vergangenen Jahren durch sehr unterschiedliche Betriebserfahrungen zur Diskussion stand und gleichzeitig an den Anlagenplaner immer höhere Anforderungen an wechselnde Brennstoffqualitäten, gutes Teillastverhalten und kostenoptimierte Auslegung der Anlage gestellt werden, erwies sich eine genaue Kenntnis der Wärmeübertragungsmechanismen als zwingend erforderlich. In einem ersten Schritt erfolgte deshalb im Rahmen eines gemeinsamen Projekts zwischen der Mokesa AG und der Technischen Universität Dresden, unter der Begleitung der Martin GmbH für Umwelttechnik sowie der CheMin GmbH eine Erstellung eines mathematischen Modells. Die daraus gezogenen Schlussfolgerungen sind in [1] veröffentlicht. Gleichzeitig fanden an der Schweizer KVA Oftringen Temperatur- und

Wärmestrommessungen einerseits direkt an den Rohrwänden des Verdampferbereichs und andererseits sowohl an hinterlüfteten als auch an hintergossenen Feuerfestplatten statt. Die Position der Messstellen, die eingesetzte Messtechnik und erste Messdaten sind in [2] zu finden.

In dem folgenden Beitrag werden zunächst die Grundlagen noch einmal zusammengefasst dargestellt, anschließend die erlangten Erkenntnisse weiter vertieft, die Simulationen aus [1] mit umfangreichen Messdaten validiert und abschließend Unterschiede der Verschmutzung zwischen hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfest-Plattensystemen diskutiert.

1. Modellvorstellung der Wärmeübertragung

Die mathematische Modellvorstellung sieht einen geometrisch identischen Aufbau des hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfest-Plattensystems für eine direkte Vergleichbarkeit vor.

In Bild 1 ist der Wandaufbau des hier betrachteten hintergossenen Feuerfest-Plattensystems schematisch dargestellt. Im oberen Teil des Bildes ist der Wandaufbau mit Belagschicht *B*, Feuerfestplatte *P*, Hintergussmasse *HGM*, Rohrwand *R* und Isolierung *I* im Querschnitt sowie im unteren Teil entlang der Schnittlinie *HG – HG* im Längsschnitt, mit den für die Modellvorstellungen erforderlichen Bezeichnungen, zu sehen.

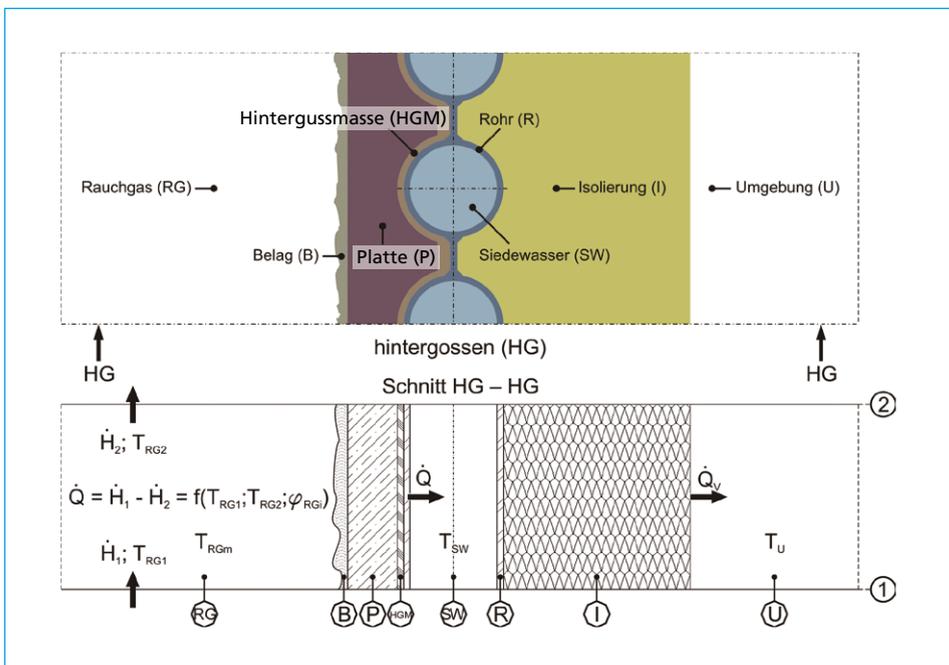


Bild 1: Membranwandaufbau mit hintergossenem Feuerfest-Plattensystem im Quer- und Längsschnitt

Das Bild 2 zeigt analog zu Bild 1 den Wandaufbau mit hinterlüftetem Feuerfest-Plattensystem. Anstelle der Hintergussmasse befindet sich nun ein Luftspalt *Sp*.

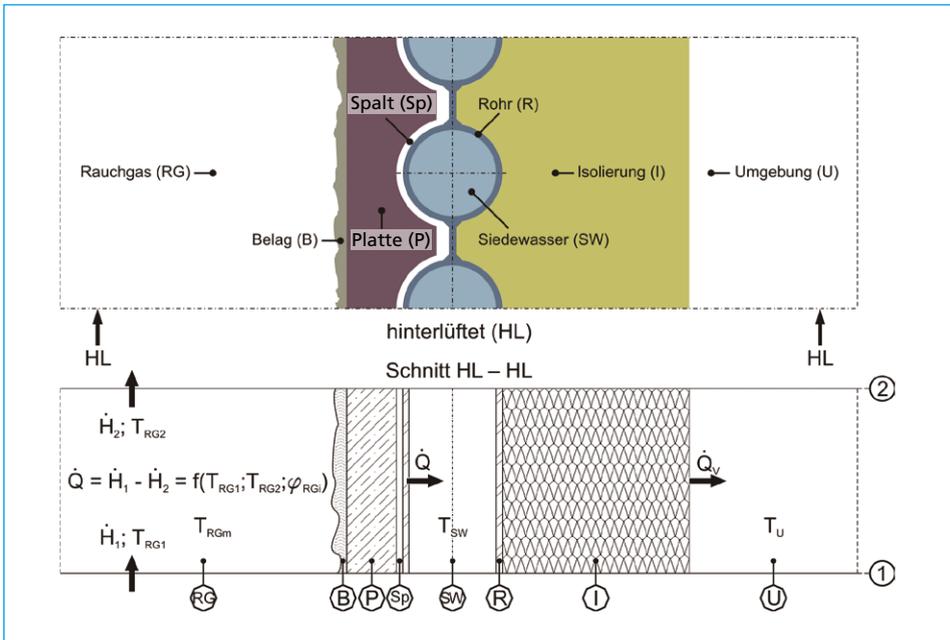


Bild 2: Membranwandaufbau mit hinterlüftetem Feuerfest-Plattensystem im Quer- und Längsschnitt

Der im jeweils unteren Teil (Längsschnitt) von Bild 1 und Bild 2 umschlossene Bilanzraum – im Folgenden als Segment bezeichnet – ist, je nach erforderlicher örtlicher Auflösung, in seiner Höhe variabel. Eintretend in das Segment (von unten) ist der Enthalpiestrom des Abgases (Eintrittszustand, \dot{H}_1). Abhängig vom übertragenen Wärmestrom \dot{Q} verlässt der Enthalpiestrom (Austrittszustand, \dot{H}_2) dieses Segment auf entsprechend niedrigerem Temperaturniveau im Vergleich zum Eintritt. Wird die Höhe des Wandsegments hinreichend klein gewählt, kann mit guter Genauigkeit ein arithmetischer Mittelwert für die Temperatur T_{RGm} zwischen Eintritt (T_{RG1}) und Austritt (T_{RG2}) mit der aus der Abgaszusammensetzung (φ_{RGI}) zu ermittelnden, temperaturabhängigen, spezifischen Wärmekapazität für die weiteren Betrachtungen angesetzt werden. Der vom Abgas übertragene Wärmestrom teilt sich auf in den an das Siedewasser übertragenen Wärmestrom \dot{Q}_{SW} und den Verlustwärmestrom an die Umgebung \dot{Q}_v .

Damit ergibt sich für den Wärmestrom über den Energieerhaltungssatz

$$\dot{Q} = \dot{H}_1 - \dot{H}_2 = f(T_{RG1}; T_{RG2}; \varphi_{RGI}) = \dot{Q}_{SW} + \dot{Q}_v \quad (1)$$

Für die Beschreibung des Wärmestroms müssen nun die Wärmetransportansätze (Wärmeübertragungsmechanismen) einbezogen werden. Hierzu wird im Folgenden ein Widerstandsersatzschaltbild in der Analogie zur elektrischen Leitung zugrunde gelegt. Nach einer ersten Abschätzung der wesentlichen Einflussparameter auf die Wärmeübertragung im Spalt einer hinterlüfteten Feuerfestplatte konnte die zweidimensionale Rohr-Steg-Rohr-Geometrie auf die ebene, eindimensionale Kanengeometrie aus Bild 3 vereinfacht werden. Dies entspricht schematisch dem Wärmetransport vom Abgas zum Siedewasser, entlang der jeweiligen Pfade der Schnittlinien des hintergossenen Feuerfest-Plattensystems aus

Bild 1 und des hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystems aus Bild 2. Der Wärmetransportvorgang reduziert sich somit auf die eindimensionale Gleichung für den resultierenden Wärmestrom über die Wand:

$$\dot{Q} = \frac{T_{RGm} - T_{SW}}{R_k} = k_P \cdot A_P \cdot (T_{RGm} - T_{SW}) \quad (2)$$

mit der mittleren Abgastemperatur T_{RGm} , der Temperatur des Siedewassers T_{SW} , dem Wärmedurchgangswiderstand durch alle Schichten R_k , beziehungsweise mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten k_p , der auf die projizierte Fläche – die mit der Plattenoberfläche A_p identisch ist – bezogen ist.

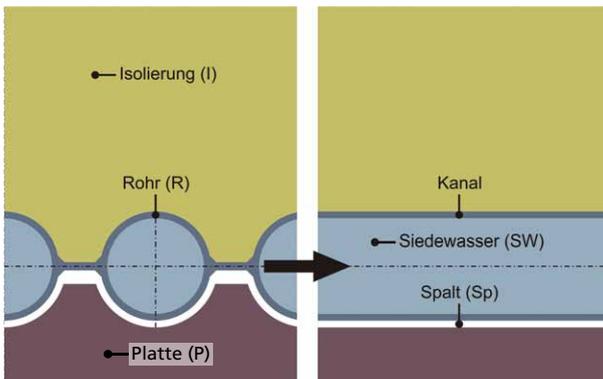


Bild 3:

Vereinfachung der zweidimensionalen Rohr-Steg-Rohr-Geometrie zu einem ebenen, eindimensionalen Kanal

Bild 4 zeigt die Widerstandsersatzschaltbilder für den Wandaufbau mit Hintergussmasse und Luftspalt für die vereinfachte Modellvorstellung. Es wird unterschieden zwischen Wärmeübergang – Index α , Wärmeleitung – Index λ sowie Wärmestrahlung – Index ϵ . Der Index $RG - B$ weist darauf hin, dass Wärme von einem Medium auf ein anderes übergeht; in diesem Fall vom Abgas (RG) auf den Belag (B). Da die einzelnen Wärmeübertragungsvorgänge immer simultan auftreten, kann für die Widerstände in Parallelschaltung auch ein Ersatzwiderstand angegeben werden. Dieser trägt den Index eff , da er den effektiven Widerstand in Hinblick auf eine Reihenschaltung darstellt.

Für den Wandaufbau vor und hinter dem hintergussenen und hinterlüfteten Spalt treten die gleichen Einzelwiderstände für den Wärmedurchgang in beiden Systemen auf. Dennoch ist es nicht ausreichend ausschließlich den Einzelwiderstand für die Hintergussmasse $R_{\lambda,HGM}$ und den effektiven Widerstand des Luftspalts $R_{eff,PR}$ zu vergleichen, da für eine Reihenschaltung der Widerstände das Verhältnis zum Gesamtwiderstand maßgebend ist.

Der gesamte Wärmedurchgangswiderstand ergibt sich für die Reihenschaltung allgemein aus

$$R_k = \sum_i R_i \quad (3)$$

und für die Parallelschaltung aus

$$\frac{1}{R_k} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (4)$$

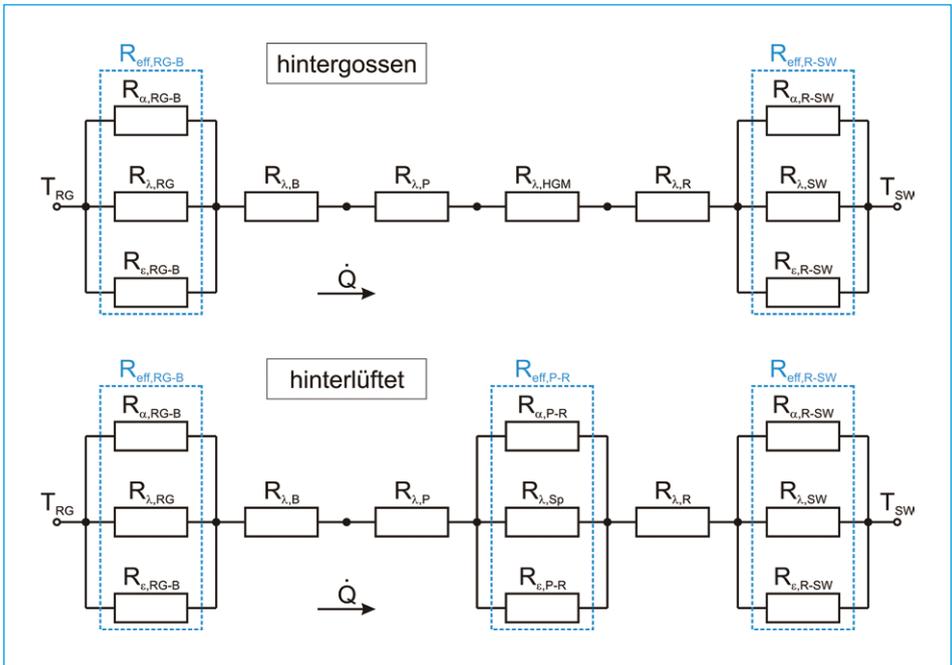


Bild 4: Ersatzschaltbild für die Wärmetransportwiderstände bei hintergossenen und hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystemen

woraus für den Wandaufbau mit hintergossenem Plattensystem

$$R_{k,HG} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\alpha, RG-B}} + \frac{1}{R_{\lambda, RG}} + \frac{1}{R_{\epsilon, RG-B}}} + R_{\lambda, B} + R_{\lambda, P} + R_{\lambda, HGM} + R_{\lambda, R} + \frac{1}{\frac{1}{R_{\alpha, R-SW}} + \frac{1}{R_{\lambda, SW}} + \frac{1}{R_{\epsilon, R-SW}}} \quad (5)$$

und für den Wandaufbau mit hinterlüftetem Plattensystem

$$R_{k,HL} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\alpha, RG-B}} + \frac{1}{R_{\lambda, RG}} + \frac{1}{R_{\epsilon, RG-B}}} + R_{\lambda, B} + R_{\lambda, P} + \frac{1}{\frac{1}{R_{\alpha, P-R}} + \frac{1}{R_{\lambda, Sp}} + \frac{1}{R_{\epsilon, P-R}}} + R_{\lambda, R} + \frac{1}{\frac{1}{R_{\alpha, R-SW}} + \frac{1}{R_{\lambda, SW}} + \frac{1}{R_{\epsilon, R-SW}}} \quad (6)$$

folgen.

Für die weiteren Betrachtungen werden für die einzelnen Stoffe, in den für sie geltenden Temperaturbereichen, mittlere Wärmeleitfähigkeiten angenommen. Der sich daraus ergebende Fehler in der Berechnung ist jedoch verhältnismäßig gering und führt daher nicht zu prinzipiell falschen Ergebnissen.

Da für die Wärmestrahlung und die Konvektion nicht, wie bereits weiter oben erwähnt, näherungsweise von einer linearen Abhängigkeit zwischen Temperaturgradient und Wärmestrom ausgegangen werden kann, müssen diese Wärmeübertragungsvorgänge genauer untersucht werden. Für den effektiven Widerstand vom Abgas auf den Belag ($R_{\text{eff},RG-B}$) kommt der Wärmeleitung kaum Bedeutung zu und kann damit vernachlässigt werden. Berechnungsgleichungen für Strahlung und Konvektion sind in der Literatur verfügbar [3]. Durch die ebene Oberfläche des Feuerfest-Plattensystems sind sie dabei recht einfacher Form. Bei der Wärmeübertragung von der Rohrrinnenwand auf das Siedewasser dominiert die Konvektion. Wärmeleitung und Wärmestrahlung spielen dort kaum eine Rolle, sodass mit den verfügbaren empirischen Gleichungen für den Wärmeübergang in Abhängigkeit von der Siedetemperatur oder des Siededrucks und des auftretenden Wärmestroms die Wärmeübertragung ausreichend beschrieben werden kann.

Weitaus schwieriger ist die Betrachtung des Spalts, weil aufgrund komplexer Zusammenhänge nicht von der idealisierten, ebenen Geometrie, sondern von der realen Spaltform ausgegangen werden muss. Die Plattenkontur ist nicht vollständig geometrisch ähnlich zur Rohr-Steg-Rohr-Kontur, wodurch die Spaltbreite variiert und sich komplizierte Ausdrücke für die Einstrahlzahlen zur Berechnung des Strahlungsaustauschs zwischen Feuerfestplatte und Rohrwand ergeben.

Die bislang angewendeten praxistauglichen Berechnungsmethoden für die hinterlüfteten Feuerfest-Plattensysteme erwiesen sich nach heutigem Erkenntnisstand als unbefriedigend. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit die Wärmeübertragung im Spalt von hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystemen näher zu untersuchen, worauf im Folgenden zunächst mithilfe einer Modellvorstellung eingegangen wird.

Mit dem Modell sollen zunächst die Haupteinflussgrößen auf den Wärmetransportvorgang an der Membranwand mit hinterlüftetem Feuerfest-Plattensystem identifiziert werden. Dazu wurde ein vereinfachtes aber für die Praxis tragfähiges Modell entwickelt, das bekannte empirische Gleichungen zur Berechnung der Wärmeübertragung nutzt. Es handelt sich um ein sogenanntes Maximum-Gradienten-Modell. Das heißt, es wird die Enthalpieabnahme vom Abgas – durch Wärmeabgabe an die Membranwand – entlang der Gasströmungsrichtung betrachtet. Der wie in Gleichung (1) beschriebene, vom Gas übertragene Wärmestrom \dot{Q} setzt sich ausgehend von den verwendeten Gleichungen [3] aus einem kombinierten Anteil Wärmeleitung und Konvektion sowie einem Strahlungsanteil zusammen.

Die Berechnung erfolgt abschnittsweise durch Zerlegung des Dampferzeugers in sogenannte Segmente über der Höhe (entlang des Strömungsweges des Gases), siehe Bild 2, wobei die Austrittszustände eines jeden Segments die Eintrittsbedingungen des nachfolgenden Segments bilden. Damit entstehen identische Bilanzräume mit unterschiedlichen Randbedingungen. Diese lassen sich dann über ein iteratives Verfahren Schritt für Schritt berechnen. Die so ermittelten Temperaturverläufe, Wärmestromdichten und Wärmeübergangskoeffizienten wurden mit Erfahrungswerten aus der Praxis auf ihre Plausibilität geprüft. Für die Berechnungen wurden typische geometrische und betriebliche Randbedingungen zugrunde gelegt.

Um die getroffenen Vereinfachungen in der Simulation zu überprüfen, wurden separate CFD- und FEM-Modellierungen durchgeführt. Der zweidimensionale Wärmetransport in Umgebung der Siederohre stellt dabei eine große Unsicherheit dar, da, wie bereits erwähnt, weder gesicherte Kenntnisse über die Strömungsbedingungen im Spalt zwischen

Membranwand und hinterlüftetem Feuerfest-Plattensystem vorliegen, noch die Wärmeübertragungsvorgänge in diesem Spalt in Abhängigkeit der Geometrie nachgewiesen wurden und zudem eine exakte Nachbildung der natürlichen Gegebenheiten nicht über der gesamten Membranwandhöhe ohne Weiteres möglich ist (unterschiedliche Abstände Platte – Wand, Leckagespalte, Plattenhalterungen u.ä.). Das in einem ersten Schritt als Ansatz gewählte einfache Bilanzsystem, das die Membranwand sowie den Spalt zwischen dieser und der hinterlüfteten Feuerfestplatte als eben und damit eindimensional betrachtet, war somit zunächst an den Messergebnissen aus der Praxis, siehe [2], zu validieren. In dem Modell wachsen die Siederohre wie bereits erwähnt, und in Bild 3 dargestellt, zu einem Rechteckkanal zusammen. Der Unterschied bei der Wärmeübertragung zwischen der größeren Wärmeübertragungsfläche des Rohr-Steg-Rohr-Systems gegenüber dem ebenen Kanal wurde dann in einem zweiten Schritt mittels einer FEM-Modellierung untersucht und die konvektive Wärmeübertragung, speziell im Bereich der Stege, durch eine CFD-Modellierung überprüft.

Die Ergebnisse bestätigen prinzipiell die theoretischen Betrachtungen der vorangegangenen Abschnitte und deuten darauf hin, dass sich die zweidimensionale Rohr-Steg-Rohr-Geometrie in einen ebenen Kanal überführen lässt, mit dem über einen weiten Wertebereich eine gute Annäherung erreicht werden kann. Voraussetzung dafür ist eine Anpassung der Dicke der Feuerfestplatte des eindimensionalen Modells, über die sich dann effektiv der gleiche Wärmedurchgangswiderstand für den Wandaufbau einstellt wie für den mittleren Wärmedurchgangswiderstand der Rohrwand mit Feuerfest-Plattensystem. An dieser Stelle wurde im letztjährigen Beitrag [1] darauf hingewiesen, dass dieses Modell bis dato noch nicht vollständig mit Messergebnissen validiert wurde und aus diesem Grund auch keine Allgemeingültigkeit festgestellt werden konnte. An diesem Punkt knüpft der vorliegende Beitrag nun im weiteren Verlauf an. Es folgt deshalb ein kurzer Überblick zu den Parametern der Anlage, an der die Messungen durchgeführt wurden sowie zu der dort eingesetzten Messtechnik, bevor auf die Validierung des mathematischen Modells und Erfahrungen in der Praxis eingegangen wird.

2. Übersicht zur eingesetzten Messtechnik an der KVA Oftringen

Die praktischen Messungen wurden an der Kehrrechtverbrennungsanlage (KVA) Oftringen im Schweizer Kanton Aargau durchgeführt. Diese Anlage gehört der erzo – Entsorgung Region Zofingen und dient zum einen der Entsorgung von Abfällen und zum anderen zur Behandlung von Siedlungsabwässern aus Haushalt und Industrie. Die KVA besteht aus einer Linie mit einer thermischen Leistung von 27,9 MW bei einem Durchsatz von 8 bis 10 t/h und einem Heizwert des Brennstoffs von etwa 13 MJ/kg. Der 3-zügige Dampferzeuger in Dackelbauweise wurde 1992 von der Firma WAMSER Kesselbau errichtet und mit einem wassergekühlten Vorschubrost der Firma Noell KRC ausgestattet. Die Feuerraumtemperatur beträgt mindestens 850 °C bei einer Verweilzeit von 3 Sekunden, die Frischdampfparameter liegen bei 40 bar, 400 °C und einer zulässigen Frischdampfmenge von 34,6 t/h. Für die durchgeführten Messungen im Bereich des Verdampferteils ist die vergleichsweise große Rohrteilung von 100 mm, bei einem Rohrdurchmesser von 57 mm, sehr vorteilhaft. Der entstehende Dampf wird mittels Entnahme-Kondensationsturbine und daran angeschlossenen Generator zur Stromerzeugung genutzt. Die elektrische Bruttoleistung beträgt 7,69 MW. Darüber hinaus findet eine Fernwärmeversorgung der angrenzenden Gemeinde Oftringen mit einem Teil der anfallenden Abwärme statt. [4]

Als Besonderheit ist ein Drehrohrföfen zur Klärschlammverbrennung zu erwähnen, für dessen Betrieb an der linken Seitenwand, unterhalb des Übertritts in den 2. Zug, Abgas mit

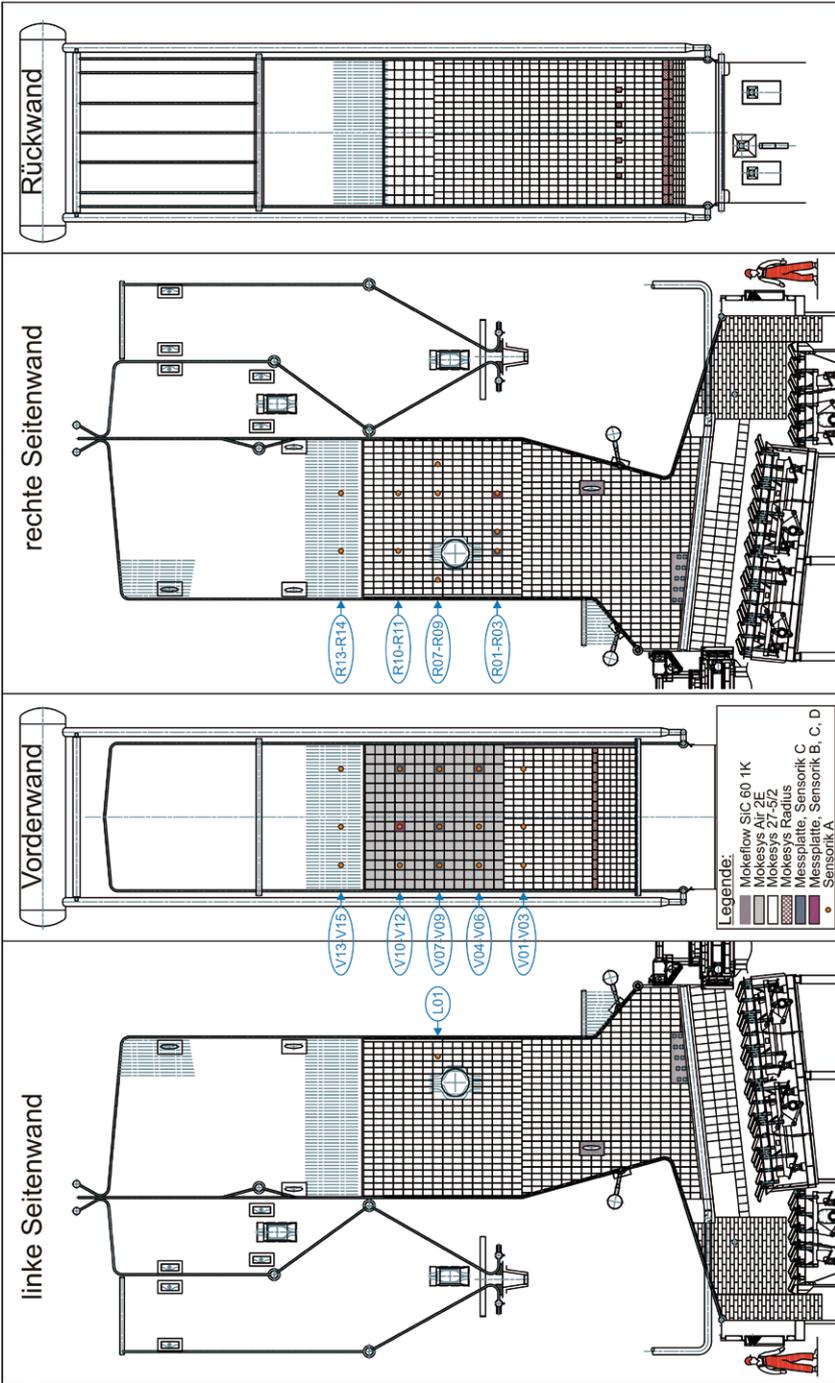
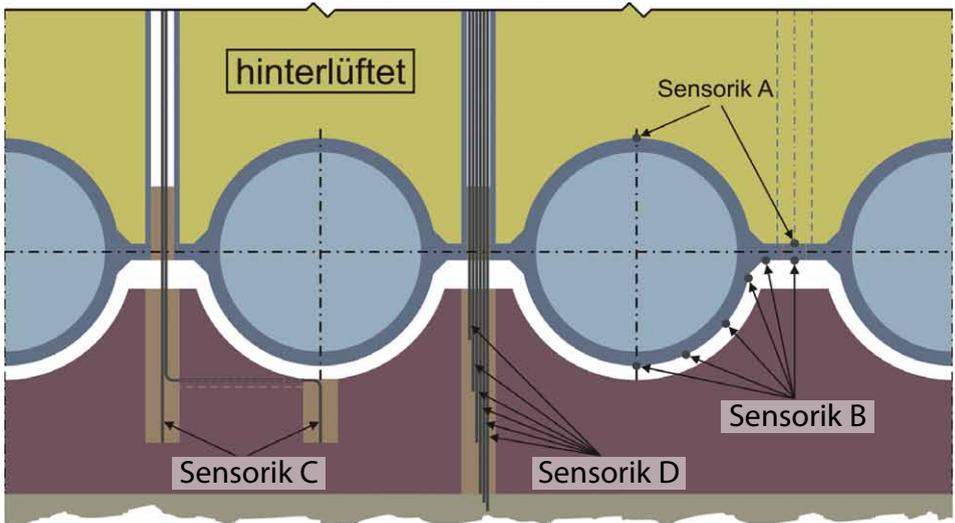


Bild 5: Einbauposition der Messsensorik

einer Temperatur von über 800 °C aus dem 1. Zug des Dampferzeugers abgesaugt wird. Die Rückführung des Abgases aus der Klärschlammverbrennung in den Dampferzeuger erfolgt über kleine Öffnungen an den Seitenwänden unmittelbar über dem Rost.

Im Laufe der Untersuchungen zum Wärmetransport mit hinterlüfteten Platten wurde eine ganze Reihe an Messtechnik unterschiedlicher Funktion installiert. Bild 5 gibt eine Übersicht der Einbaupositionen und Bild 6 liefert zudem den schematischen Aufbau.



Sensorik A

Sensorik B

Sensorik C (λ_A, λ_B) und D (C, D)



Bild 6: Aufbau und Anordnung der Messsensoren

Eine jede Messstelle auf der Außenseite der Rohrwand (am Übergang zur Isolierung) ist nach Bild 6 mit einer Differenzmessung der Thermospannung von Eisen-Konstantan-Thermoelementen zwischen Rohrscheitel und Stegmitte nach [5] (Sensorik A) versehen. Diese kann in eine entsprechende Temperaturdifferenz zwischen den beiden Messpunkten umgewandelt werden. Das dann gemessene Signal korreliert sowohl mit der Abgastemperatur, der Temperatur in der hinterlüfteten Platte sowie der lokalen Wärmestromdichte über dem Wandaufbau. Nach selbigem Messprinzip sind, wie in Bild 6 dargestellt, des Weiteren Messpunkte entlang der feuerraumseitigen Steg-Rohr-Geometrie (Sensorik B),

einmal an einer hinterlüfteten Platte (Bild 5, Messstelle *V11*) und einmal an einer hintergossenen Platte (Messstelle *R03*), installiert. Diese dienen dazu den Temperaturverlauf an der Oberfläche zu ermitteln, der später zur Validierung des mathematischen Modells sowie der Simulationsergebnisse verwendet werden kann. Zur Überprüfung der angenommenen Randbedingung, dass im Rohrrinneren Blasensieden vorliege, wurde nach dem obig erwähnten Messprinzip auch die Temperaturdifferenz des feuerraumabgewandten Rohrscheitels über der Rohrhöhe, also in Fließrichtung des Siedewassers, gemessen (*Sensorik E*, ohne Bild). Ist das Blasensieden erreicht, stellt sich eine sehr kleine Temperaturdifferenz infolge des nach oben hin zunehmenden Druckverlustes ein. Wäre das Wasser an dieser Stelle noch unterkühlt oder läge unterkühltes Sieden vor, würden Temperaturdifferenzen in einer Größenordnung von bis zu einigen Kelvin auftreten. Im Bereich der Hinterlüftung und des Hintergusses sind in den Feuerfestplatten zur Temperaturmessung Thermoelemente *Typ K* (*Sensorik C*), wie in Bild 6 dargestellt, eingesetzt. Weiterhin gibt es jeweils eine Messplatte im hinterlüfteten Bereich (Bild 5, Messstelle *V11*) und im hintergossenen Bereich (*R03*) mit gebündelten Thermoelementen (*Typ K*), die einen definierten Abstand der Messpunkte zueinander besitzen und senkrecht zum Steg, sowohl über dem Steg als auch über dem Rohrscheitel, in Platte und Belag, installiert sind (*Sensorik D*). Diese dienen zum einen der Untersuchung der örtlichen Wärmestromdichte und zum anderen der Ermittlung von Materialeigenschaften des Belags, insbesondere der Wärmeleitfähigkeit.

Über Miniatursteckverbindungen, die zu Wartungszwecken angebracht sind, wird das Messsignal über daran angeschlossene Ausgleichsleitungen an zwei Datenlogger weitergegeben, von wo aus die Messwerte in Tagesdateien auf einem angeschlossenen Computer gespeichert werden. Die Messwertabfrage erfolgt dabei über die beiden Datenlogger in unterschiedlichen Zyklen. Ein Zyklus im Zwei-Sekunden-Takt zeichnet die Werte der für die Validierung des Modells unerlässlichen Messstellen *V11* und *R03* mit der *Sensorik A* bis *E* auf. Für alle anderen Messstellen mit *Sensorik A* und *C* erfolgt der Messwertabruf aller zwei Minuten.

Da sich mit der Bohrung der Aufnahmelöcher für die Thermoelemente der *Sensorik C* und *D* der Aufbau der Feuerfestplatte ändert, erfordert die Bestimmung der Temperaturen der unbeeinflussten Feuerfestplatten nicht nur eine Korrektur der systematischen Messfehler der Thermoelemente, sondern auch eine Korrektur der in der Schnittebene von Bild 6 liegenden Isothermen gegenüber denen des ungestörten Aufbaus der Feuerfestplatte. Diese nehmen infolge der im Vergleich zur Feuerfestplatte geringeren Wärmeleitfähigkeit der SiC60-Masse, die zum Verguss der Bohrlöcher verwendet wurde, einen anderen Verlauf. Der somit entstehende Messfehler der Messplatte gegenüber den unveränderten Feuerfestplatten kann über eine Simulation des Wärmetransports nach der Finite-Elemente-Methode korrigiert werden. Die dazu benötigten Parameter sind die gemessenen Temperaturen, die lokalen Temperaturgradienten (und damit die Wärmestromdichte), die Stoffwerte der eingesetzten Materialien sowie die Geometrie der Feuerfestplatte, der Bohrung und des Thermoelements.

In Bild 7 ist eine solche Simulation beispielhaft dargestellt. Simuliert wurde eine Membranwand mit hintergossener Feuerfestplatte, über die aus einer Wärmequelle auf einem Temperaturniveau von 1.200 °C Wärme zum Siedewasser transportiert wird. Für den äußeren Wärmeübergang wurden die Randbedingungen so angenommen, dass der theoretisch maximal mögliche Wärmestrom über diesen Wandaufbau erreicht werden kann. Folglich ergibt sich aus den unterschiedlichen Temperaturgradienten der SiC60-Masse im Bohrloch und der Feuerfestplatte, in Abhängigkeit, des auftretenden Wärmestroms, der maximale Fehler der beschriebenen Messanordnung. In der Schnittdarstellung der Bild 7 ist auf der linken Seite die Bohrung für *Sensorik D* und auf der rechten Seite die Bohrung für *Sensorik C* (vgl. Bild 6) zu erkennen. Die Farbskala zeigt die Temperaturverteilung der

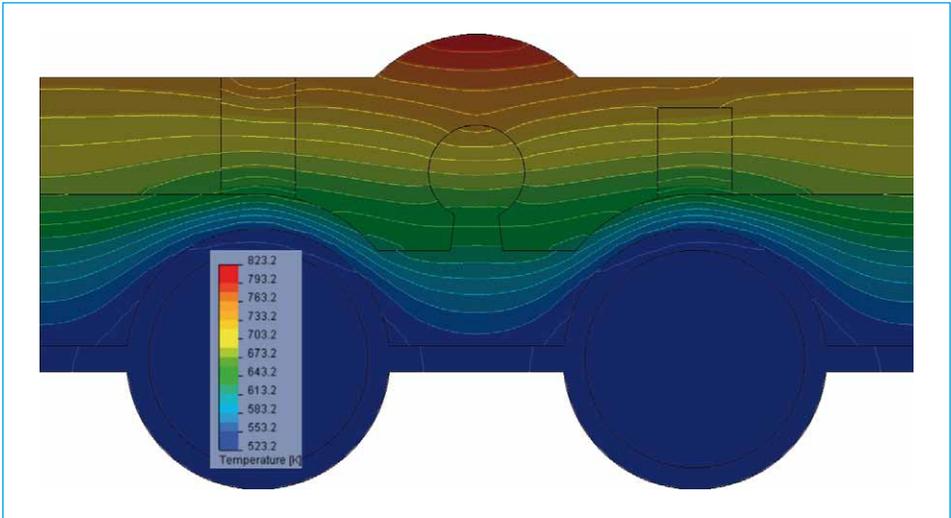


Bild 7: Vergleich der Isothermen im ungestörten und durch Bohrungen gestörten Bereich des Feuerfestplatten-Querschnitts

im Aufbau ungestörter Feuerfestplatte. Überlagert wird dies mit den Isothermen aus der Simulation der Feuerfestplatte mit Bohrlöchern. Der so ermittelbare maximale Fehler in der Bestimmung der Temperatur liegt bei 1,1 % des Messwertes. Im Regelfall liegt er jedoch deutlich darunter. Auf eine Korrektur der Messwerte für *Sensorik C* wurde aufgrund dieses relativ kleinen Messfehlers deshalb verzichtet.

Vorausgesetzt ein näherungsweise stationärer Zustand bei der Messung der Temperaturen liegt vor, kann während des Betriebs zu jeder beliebigen Temperatur der Feuerfestplatte eine entsprechende Wärmestromdichte eindeutig zugeordnet werden, da nach dem Anfahrvorgang des Dampferzeugers der Verdampfungsdruck konstant gehalten wird, und somit die Siedetemperatur, also das kühlere Ende des Wärmetransportweges, festgelegt ist. Es ist somit nicht notwendig jede mit *Sensorik C* ausgerüstete Messplatte auch mit *Sensorik D* auszustatten. Aus diesem Grund wird – für den hinterlüfteten wie für den hintergossenen Bereich – jeweils nur eine Messplatte (*V11* beziehungsweise *R03*) eingesetzt.

3. Vergleich des Modells mit Messdaten hinsichtlich des Temperaturverlaufs und des auftretenden Wärmestroms

Nachdem die Beschreibung der mathematischen Modellvorstellung und deren entsprechende Umsetzung – in Kurzform des letztjährigen Beitrags [1] – in Abschnitt 2 sowie der eingesetzten Messtechnik in Abschnitt 3 erfolgte, werden im Folgenden die Modelle anhand der Messdaten aus Oftringen validiert. Ein direkter Vergleich der beiden Systeme ist jedoch stets nur für einen kurzen Zeitraum nach erfolgtem Wiederanfahren der Anlage nach einem Stillstand möglich, da dann die hier verglichenen Feuerfest-Plattensysteme im *sauberen* Zustand vorzufinden sind. Während des Betriebs des Dampferzeugers lagert sich ein Belag an, dessen Schichtdicke, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität von sehr vielen feuerungstechnischen und anlagenspezifischen Parametern abhängt, was dazu führt, dass

eine generelle Vergleichbarkeit der Feuerfest-Plattensysteme im verschmutzten Zustand nicht objektiv möglich ist, sondern von Anlage zu Anlage sehr unterschiedlich ausfallen kann. Aus diesem Grund beschränkt sich der nachstehende Vergleich zunächst auf einen vergleichsweise kurzen Zeitraum nach dem Anfahren des Dampferzeugers. In Abschnitt 5 wird dazu auf die Entwicklung der Verschmutzung von hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfestplatten am Beispiel der KVA *Ofringen* noch einmal detaillierter eingegangen.

Ausgehend von den Prozessparametern des Siedewassers von 40 bar, 250,4 °C und den simulierten Eintrittstemperaturen des Abgases von 600 °C, 900 °C und 1.200 °C in das Berechnungssegment, ergeben sich bezogen auf eine Einheitsfläche von 1 m² mit den eingesetzten Stoffwerten aus Tabelle 1 die in Bild 8 angegebenen Temperaturverläufe und Werte für die jeweilige Wärmestromdichte des hintergossenen sowie des hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystems in Bild 9. Größere Unsicherheiten bei der Berechnung sind nur für die effektiven Wärmeübergangswiderstände von der hinterlüfteten Platte zur Rohrwand und vom Abgas auf die Membranwand, durch eine erheblich abweichende Abgaszusammensetzung, andere Strömungsbedingungen für das Abgas, ungleichmäßige Temperaturverteilungen innerhalb eines Segments, große Partikelstrahlung sowie eine deutliche Abweichung vom angenommenen Emissionsgrad des Belags, zu erwarten. Die erhaltenen Messdaten können jedoch auch dazu genutzt werden, solche Abweichungen zu erkennen.

Da das Reziproke der Summe der Einzelwiderstände den Wärmedurchgang durch die Membranwand bestimmt, ist der größte auftretende Einzelwiderstand, bzw. bei mehreren annähernd gleich großen Einzelwiderständen das Vielfache der Anzahl dieser gleichartigen Widerstände, maßgebend. Für die Membranwand mit hintergossenem Feuerfest-Plattensystem ergibt sich der weitaus größte Widerstand für den Wärmeübergang vom Abgas auf die umschließenden Wände. Der Wärmedurchgangswiderstand der Feuerfestplatte ist deutlich kleiner. Trotz einer, im Gegensatz zur Hintergussmasse, etwa anderthalbfachen Schichtdicke der Feuerfestplatte, nimmt der Wärmedurchgangswiderstand aufgrund der wesentlich höheren Wärmeleitfähigkeit lediglich den halben Wert an. Der Wärmeübergangswiderstand vom Rohr bzw. – für die hier berechneten Werte – des Kanals auf das Siedewasser sowie der Wärmedurchgangswiderstand von Rohr bzw. Kanal selbst, sind in Hinblick auf die anderen Widerstände vernachlässigbar klein.

Bei dem hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystem ist nicht nur der äußere Wärmeübergangswiderstand, sondern auch der effektive Wärmedurchgangswiderstand des Spalts entscheidend für die Größe des Wärmestroms über die Membranwand. Beide Widerstände haben dabei annähernd den gleichen Wert und führen in Summe dazu, dass alle anderen Widerstände in diesem System unbedeutend sind.

Mit steigender Abgastemperatur wird jedoch der Wärmeübergangswiderstand vom Abgas zur Feuerfestplatte aufgrund des höheren Temperaturniveaus in stärkerem Maße kleiner als der Widerstand des Spalts. Damit ist bei ausreichend hohen Abgastemperaturen der Wärmeübergangswiderstand des Spalts der limitierende Widerstand. Mit anderen Worten: um mit dem hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystem die gleiche Wärmeübertragungsleistung wie mit dem hintergossenen Feuerfest-Plattensystem zu erreichen, ist für das hier betrachtete Beispiel mit den zugehörigen Randbedingungen eine anderthalbfache Wärmeübertragungsfläche notwendig.

Die Berechnungsergebnisse der Temperaturverläufe sind für das hintergossene Feuerfest-Plattensystem in Bild 8 und für das hinterlüftete Feuerfest-Plattensystem in Bild 9 eingezeichnet. Das Temperaturprofil ist für die Wärmeübergänge vom Abgas zur Platte sowie von der Platte zur Rohrwand nicht dargestellt, da eine exakte Abbildung die genaue Kenntnis des Strömungsprofils und der Gaseigenschaften in der Nähe der an das jeweilige Gas angrenzenden Wand voraussetzen würde.

Tabelle 1: Randbedingungen und Stoffeigenschaften zur Berechnung der Einzelwiderstände des Wärmedurchgangs

Stoff	Schichtdicke δ	Wärmeleitfähigkeit λ	Emissionsgrad ε
Abgas	2.915 mm	berechnet nach VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt [6]	berechnet nach VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen [3]
Feuerfest-Platte aus nitridgebundenem Siliziumkarbid (SiC 95)	im Mittel 30 mm	200 °C: 25 W/mK 600 °C: 21 W/mK 1.000 °C: 17,5 W/mK 1.200 °C: 16,5 W/mK	0,8
Hintergussmasse (SiC 60)	im Mittel 21 mm*	500 °C: 7,6 W/mK 800 °C: 5,6 W/mK 1.100 °C: 4,1 W/mK	–
Luft	5 mm	berechnet nach VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt [6]	berechnet nach VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen [3]
(Rohr-) Kanalwand	5 mm	46 W/mK	0,8
Siedewasser	nicht berücksichtigt	berechnet nach The International Association for the Properties of Water and Steam [7]	nicht berücksichtigt
Isolierung	300 mm	0,04 W/mK	nicht berücksichtigt

* Die vergleichsweise große Schichtdicke resultiert daraus, dass die Bestiftung der zuvor zum Schutz der Rohrwand verwendeten Stampfmasse nicht vollständig entfernt wurde. Der Wärmedurchgang ist in diesem Bereich ausreichend, um die geforderten feuerungstechnischen Parameter der Anlage einzuhalten.

Quellen:

- [3] VDI-Gesellschaft, Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): VDI Wärmeatlas. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997
- [6] VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, VDI 4670 (Hrsg.): Verein Deutscher Ingenieure. Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen. s.l. Beuth Verlag GmbH, 2003, 2003-02-00
- [7] The International Association for the Properties of Water and Steam. IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. Luzern: International Association for the Properties of Water and Steam, 1997, URL: <http://www.iapws.org>.

Da für jedes Segment zur Berechnung eine mittlere Abgastemperatur zwischen Ein- und Austritt gebildet wird, ist zu beachten, dass die Temperaturkurven nicht genau bei 1.200 °C, 900 °C und 600 °C beginnen, sondern in Abhängigkeit der übertragenen Wärmemenge bei der sich einstellenden, jeweils niedriger liegenden mittleren Abgastemperatur.

Für das hinterlüftete Feuerfest-Plattensystem wurde der Wärmedurchgangswiderstand des Spalts als Effektivwiderstand, der sich aus Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung ergibt, dargestellt. Im mathematischen Modell sind die einzelnen Wärmeübertragungsvorgänge getrennt voneinander betrachtet worden; müssen dabei aber die Oberflächenbedingung mit gleicher Ausgangstemperatur für jeden Wärmetransportmechanismus sowie die Energiebilanz um die Spaltflächen erfüllen.

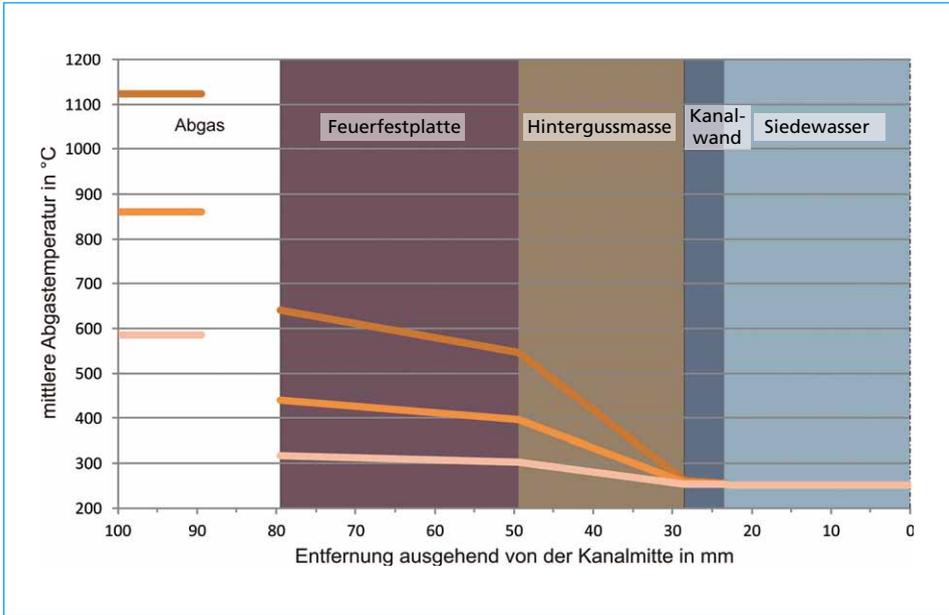


Bild 8: Temperaturverläufe über der Membranwand für das hintergossene Feuerfest-Plattensystem in Abhängigkeit der Abgastemperatur des berechneten Segments

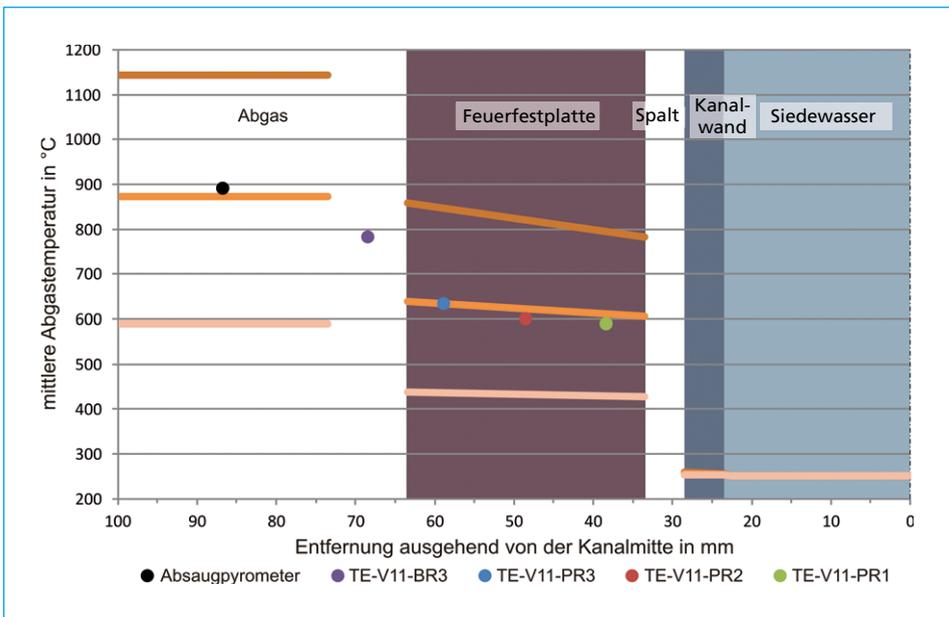


Bild 9: Temperaturverläufe über der Membranwand für das hinterlüftete Feuerfest-Plattensystem in Abhängigkeit der Abgastemperatur des berechneten Segments

Die Validierung von permanent instationären Wärmeübertragungsvorgängen erfordert eine sorgfältige Überprüfung der vorliegenden Randbedingungen. Das heißt, eine plötzliche Temperaturerhöhung im Feuerraum wirkt sich zeitlich versetzt auf die einzelnen Schichten des Wandaufbaus aus. Die Messung der Temperaturen findet dabei aber zeitgleich statt, wodurch stets die Gefahr besteht, dass die Temperaturwerte der Feuerfestplatten nicht den richtigen Werten der Abgastemperatur zugeordnet werden. Auch eine zeitliche Mittelung ist nur dann zulässig, wenn der Betriebszustand im beobachteten Zeitraum als annähernd stationär angesehen werden kann. Um dies zu überprüfen, wurden die in Bild 10 eingezeichneten Mittelwerte der Abgas- und der Feuerfestplatten-Temperatur den jeweils auftretenden Temperaturverteilungen gegenübergestellt. Wie sich aus dem Beispiel der gezeigten hinterlüfteten Feuerfestplatte entnehmen lässt, liegen für den betrachteten Zeitraum die Mittelwerte der Temperaturen im Bereich von deren größten Häufigkeiten, dabei sind die Temperaturbereiche links und rechts davon annähernd gleich groß und weisen ähnliche Häufigkeiten auf. Es kann somit von einem annähernd stationären Zustand ausgegangen werden. Die Häufigkeitsverteilungen korrelieren wie erwartet miteinander, so dass sich daraus entsprechende Paarungen von Abgas- und Feuerfestplatten-Temperaturen ermitteln lassen. Die jeweiligen Temperaturwerte mit der größten Häufigkeit aus Bild 10 sind in Bild 9 eingezeichnet und dienen somit der Validierung der Simulationsergebnisse. Analog dazu wurde für die hintergossene Feuerfestplatte vorgegangen. Da in dem Bereich des Dampferzeugers, in dem die untersuchten Feuerfest-Plattensysteme installiert sind, keine hinreichend genaue Messung der Abgastemperatur existiert, fand bereits zu einem früheren Zeitpunkt – unmittelbar nach einem Stillstand – eine Messung dieser mittels eines Absaugpyrometers statt. Die Feuerfestplatten waren zu diesem Zeitpunkt frei von Belägen. Die dabei erhaltenen Messwerte wurden bei gleichen Feuerfestplatten-Temperaturen wie sie in Bild 10 zu finden sind ermittelt, und können demgemäß entsprechend zugeordnet werden.

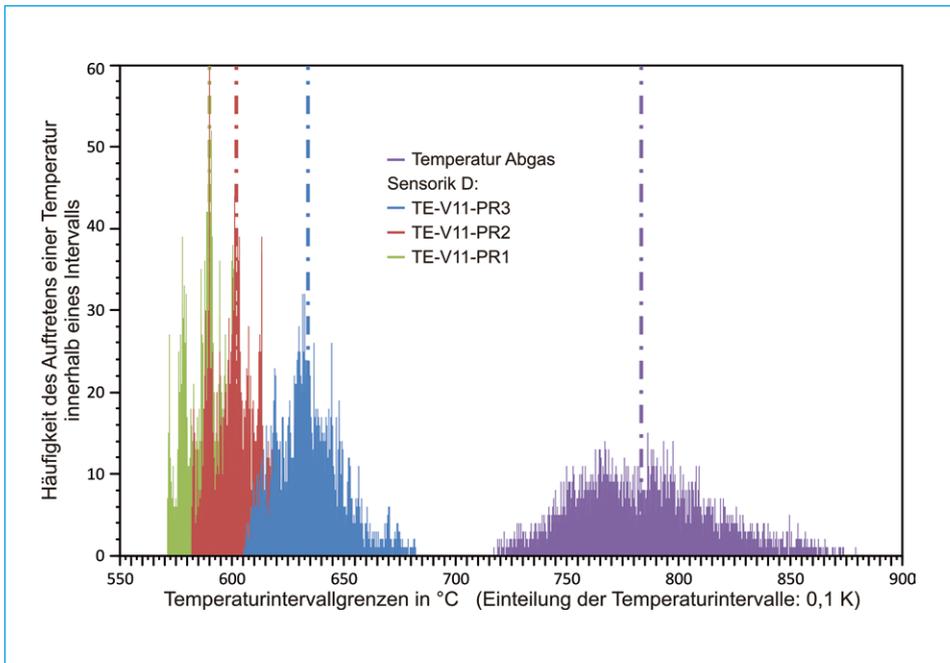


Bild 10: Häufigkeitsdiagramm der zeitlichen Temperaturverteilung

Aus Bild 9 geht somit eine gute Übereinstimmung der Temperaturmesswerte (TE) von Messstelle V11, für die in der Feuerfestplatte über dem Rohrscheitel (PR) liegenden drei Messpositionen (1 bis 3), mit den Werten der Absaugpyrometermessung hervor. Ergänzend sind zudem die Messwerte und der zugehörige Mittelwert eines weiteren Thermoelements (TE-V11-BR3) in Bild 9 und Bild 10 eingetragen, das sich in unmittelbarer Nähe der Feuerfestplatten-Oberfläche befindet. Das Thermoelement ist dazu vorgesehen, später die Temperatur der Belagsschicht in einer bestimmten Tiefe zu ermitteln. Messungen der Temperatur in der Feuerfestplatte über dem Steg zeigen geringfügig höhere Werte als für die Position über dem Rohrscheitel. Der Grund dafür ist die an dieser Stelle geringere Plattenstärke. Allgemein stellt sich für den gesamten Membranwandaufbau ein völlig anderes Temperaturprofil ein, wodurch sich unter anderem der Steg bei dem hier untersuchten hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystem im Vergleich zum hintergossenen deutlich stärker erwärmt.

Zur Ermittlung des Wärmestroms an hinterlüfteten Platten

Um für den Planer eine möglichst einfache Gleichung zur näherungsweise Berechnung des Wärmedurchgangs an Membranwänden mit hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystemen zur Verfügung zu stellen, erfolgt derzeit eine Untersuchung dieser Plattensysteme im *sauberen* Zustand, in Abhängigkeit der Abgastemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Spalt sowie für unterschiedliche Geometrien und Materialeigenschaften. Die dabei berücksichtigten geometrischen Faktoren sind derzeit die Rohrteilung, der Rohrdurchmesser, die Spaltbreite sowie die mittlere Dicke der Feuerfestplatte. Bei den Materialeigenschaften sind die Wärmeleitfähigkeit der Feuerfestplatte und der Emissionsgrad der Oberflächen von Feuerfestplatte und Rohrwand zu beachten. Entsprechend des Einflusses der einzelnen Wärmetransportmechanismen, lässt sich dann daraus eine allgemeingültige Gleichung aufzustellen. Aufgrund des großen Umfangs dieser Arbeiten kann an dieser Stelle jedoch noch keine Gleichung präsentiert werden.

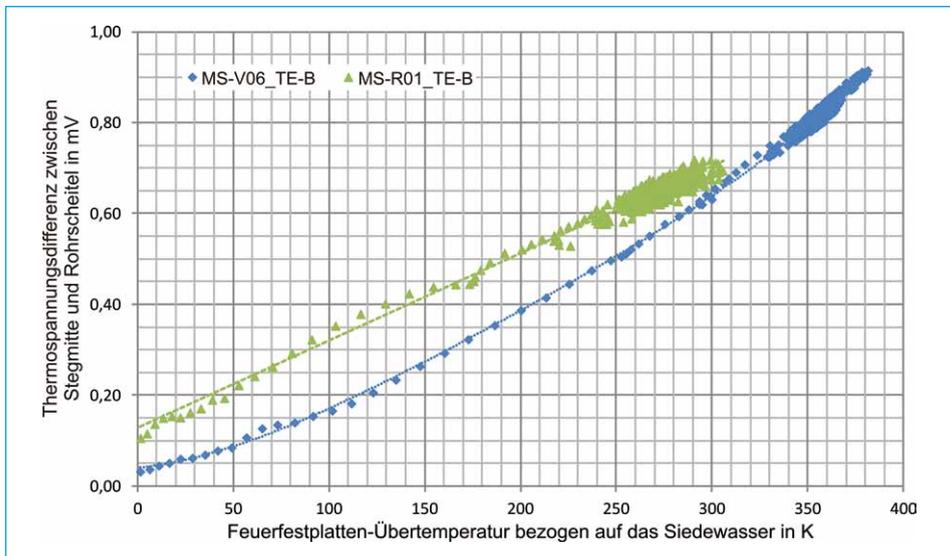


Bild 11: Vergleich der Thermoelemente-Spannungsdifferenz zwischen Stegmitte und Rohrscheitel in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz von hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfestplatten zum Siedewasser während des Anfahrvorgangs

Wird der von Krüger [5] beschriebene Messaufbau (*Sensorik A* in Bild 6) zur Messung der Thermospannungsdifferenz eines Thermoelementepaares, das zwischen Stegmitte und Rohrscheitel auf der isolierten Seite der Membranwand angebracht ist, genutzt, lässt sich der davon näherungsweise linear abhängige Wärmestrom über die Membranwand bestimmen. Bild 11 zeigt den der Wärmestromdichte annähernd proportionalen Wert der Thermolemente-Spannungsdifferenz in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz (Übertemperatur) zwischen der mittleren Temperatur der vorgelagerten Feuerfestplatte und der Siedewassertemperatur. Die Daten wurden während eines Abfahrvorgangs des Dampferzeugers der KVA *Ofringen* aufgenommen und gelten deshalb auch nur für die vorliegenden geometrischen und anlagenspezifischen Parameter sowie die eingesetzten Materialien. Es lässt sich daraus ein deutlicher Unterschied zwischen hinterlüftetem und hintergossenem Feuerfest-Plattensystem entnehmen. Während das hintergossene System einen annähernd linearen Anstieg des Thermospannungsdifferenzsignals über der Feuerfestplatten-Übertemperatur zeigt, weist die hinterlüftete Feuerfestplatte eine Abhängigkeit höherer Ordnung auf. Dies bestätigt ebenfalls die erhaltenen Simulationsergebnisse aus der mathematischen Modellierung. Im Bereich geringer Übertemperatur bis etwa 50 K ist die Wärmestrahlung von untergeordneter Bedeutung. Da durch die enge Spaltgeometrie auch nur laminare Strömungsbedingungen vorliegen und damit die Konvektion ebenfalls nur einen sehr geringen Beitrag zur Wärmeleitung leistet, ergibt sich in diesem Bereich ein näherungsweise linearer Zusammenhang für die dominierende Wärmeleitung. Bei höherer Übertemperatur wächst der Einfluss der Wärmestrahlung zunehmend, was zu einem nicht-linearen Kurvenverlauf führt. Für die Einsatzbedingungen sowie den typischen Installationsbereich von hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystemen im 1. Zug von Dampferzeugern, in dem Gebiet, wo eine Kondensation von im Abgas enthaltenen korrosionsfördernden Gaskomponenten möglich ist, kann, wie in Bild 11 gezeigt, im stationären Betrieb ganz allgemein näherungsweise von einer direkten Proportionalität des über die Membranwand transportierten Wärmestroms zur Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Siedewasser ausgegangen werden. Jedoch für eine genauere Beschreibung über dem gesamten Bereich möglicher Werte für die Übertemperatur der Feuerfestplatte, ausgehend von der Siedewassertemperatur, ist zu erwarten, dass eine Annäherung über eine Funktion höherer Ordnung der Abgastemperatur entwickelt werden kann; in welcher die Material- und Geometriefaktoren des Wandaufbaus in den Koeffizienten dieser Gleichung Berücksichtigung finden.

Zu Bild 11 seien noch ein paar Bemerkungen gestattet. Zum einen ist auffällig, dass bei verschwindender Übertemperatur der Feuerfestplatte die Thermospannung zwischen den an der Stegmitte und auf dem Rohrscheitel angebrachten Thermolementen nicht Null wird, und zum anderen scheint oberhalb einer Übertemperatur von etwa 240 K bei hinterlüfteten Feuerfestplatten und von etwa 340 K bei hintergossenen Feuerfestplatten eine über gewöhnliche Messunsicherheiten hinausreichende Messwertstreuung aufzutreten. Die Ursache dafür liegt in der Dynamik des Verbrennungsprozesses und der daraus resultierenden instationären Wärmeübertragung. Wird der Dampferzeuger angefahren, steigt zunächst die Abgastemperatur bevor sich allmählich die Feuerfestplatten und anschließend die Hintergussmasse sowie die Rohrwand erwärmen. Daraus resultiert ein zeitlicher Verzug zwischen der ursächlichen Temperaturerhöhung und dem resultierenden Messsignal zwischen Stegmitte und Rohrscheitel. Da jedoch sowohl die Temperatur der Feuerfestplatte als auch die Steg-Scheitel-Differenzspannung simultan gemessen werden, kann ein solches Wertepaar außerhalb eines stationären Betriebszustands keinen exakten Zusammenhang zwischen Übertemperatur und Differenzspannung liefern, sondern lediglich eine generelle Abhängigkeit aufzeigen. Eine Korrektur dieser zeitlichen Verschiebung ist insofern schwer möglich, als dass dafür die Temperaturleitfähigkeit des Wandaufbaus bekannt sein muss und gleichzeitig die Änderung des Betrags der Temperatur (Temperaturgradient) als auch

die Temperaturänderungsgeschwindigkeit (Lage des Ausgangszustands) maßgebliche Einflussfaktoren darstellen. Die bereits angesprochene starke Streuung der Messwerte oberhalb einer Übertemperatur von 300 K ist auf diese Ursache zurückzuführen. Selbst die kleineren Schwankungen während des Betriebs eines Dampferzeugers, mit annähernd stationärem Temperaturverlauf, bewirken somit einen gewissen Bereich auftretender Thermospannungen, die insbesondere davon abhängig sind, ob die Temperatur der Feuerfestplatte einen steigenden oder fallenden Trend aufweist.

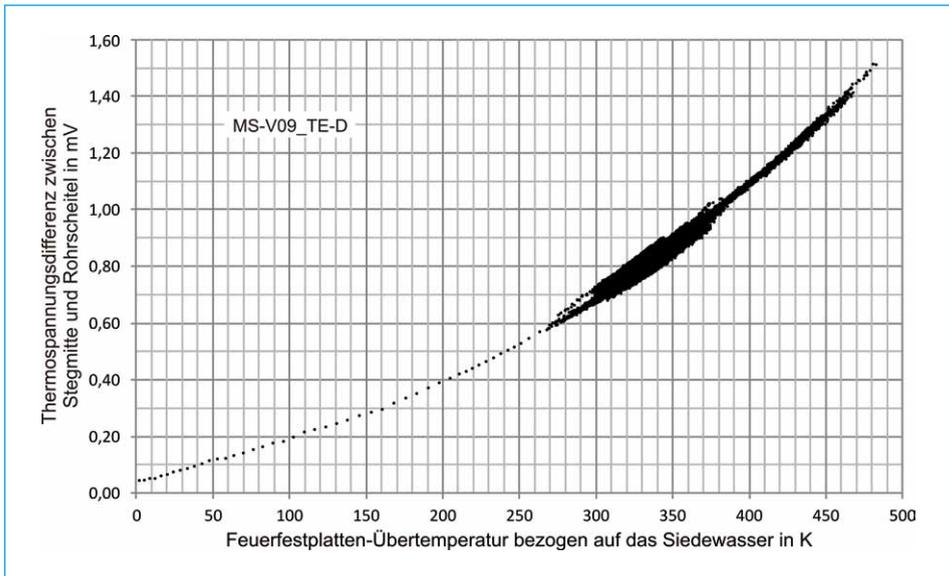


Bild 12: Thermoelemente-Spannungsdifferenz zwischen Stegmitte und Rohrscheitel in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz von hinterlüfteten Feuerfestplatten zum Siedewasser während des Abfahrvorgangs sowie nach Wiederanfahren

Da beim Anfahren des Dampferzeugers der Siededruck zunimmt bis der Nenndruck erreicht ist, treten andere Wärmeübergangsverhältnisse sowie eine in Hinblick auf die Steg-Rohr-Differenzspannungsmessung unbekanntes Temperatur des Arbeitsmediums im Inneren der Siederohre auf, woraus ebenfalls verschiedene Differenzspannungen für ein und dieselbe Übertemperatur resultieren können. Um solche Effekte auszuschließen wurde in Bild 11 für Übertemperaturen unter 300 K nicht der Anfahrvorgang ausgewertet, sondern der Abfahrvorgang, der solange sinnvolle und stabilere Ergebnisse liefert, wie der Siededruck konstant gehalten wird und die Abgastemperatur die Siedetemperatur nicht unterschreitet. Um gleichzeitig die Auswirkungen von Belägen auf den Signalverlauf zu prüfen, wurden in das Diagramm von Bild 12 sowohl Signale von Messstelle V09 während eines Abfahrvorgangs des Dampferzeugers als auch bei anschließender Wiederinbetriebnahme eingetragen. Die Anlage war bis zu Zeitpunkt des Stillstands vier Monate lang in Betrieb und das Temperaturniveau im Dampferzeuger vor der Abstellung kann als näherungsweise stationär betrachtet werden. Durch die Einleitung der Abgase aus der Verbrennung des Klärschlammes bilden sich sehr schnell nach dem Anfahren vergleichsweise große Belagsschichtdicken, weshalb jährlich zwei regelmäßige Stillstände durchgeführt werden. Während des benannten Stillstands wurde nun die rechte Hälfte der Vorderwand im Bereich der hinterlüfteten Platten gereinigt und die Messwerte von Messstelle V09 nach erfolgtem Wiederanfahren,

im nun *sauberen* Zustand, mit in Bild 12 aufgenommen. Als Resultat ergibt sich zunächst erst einmal ein geschlossener Linienzug ohne Sprünge, der somit unabhängig vom Belagszustand der Feuerfestplatte ist. Die Übertemperatur der Feuerfestplatte pegelt sich nach Erreichen einer Belagssituation, die sich im Mittel über der Zeit nur noch wenig ändert, auf anfangs Werte zwischen 370 K ein, die dann im Laufe der Zeit bis auf 300 K absinken. Die Fluktuationen in der Temperatur bewirken hier, wie bereits zuvor beschrieben, eine etwas stärkere Streuung der Messwerte. Zwischen 480 K und 460 K Übertemperatur liegt der Bereich der Messwerte unmittelbar nach dem Wiederanfahren des Dampferzeugers. Dort treten infolge noch vergleichsweise geringfügig verschmutzter Feuerfestplatten auch nur geringe Streuungen in den Messwerten auf. Die Streuungen nehmen dann mit der Reizeit der Anlage weiter zu und die Übertemperatur der Feuerfestplatte sinkt dabei wieder auf das Niveau des verschmutzten Zustands zum Zeitpunkt der vorherigen Abstellung. Als Resultat dieser Untersuchung ergibt sich wiederum die Möglichkeit, bei Kenntnis der Feuerfestplatten-Übertemperatur oder der Thermospannungsdifferenz und gleichzeitiger Messung der Abgastemperatur, den Wärmedurchgangswiderstand des Belags auf der Feuerfestplatte annähernd ermitteln zu können. Da die jeweilige Verschmutzungsneigung von hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfest-Plattensystemen für den Betrieb entscheidend sind, erfolgt eine nähere Untersuchung für den Dampferzeuger der *KVA Oftringen* im nächsten Abschnitt.

4. Unterschiede bei der Belagsbildung zwischen hinterlüfteten und hintergossenen Plattensystemen

Da sich in einem Dampferzeuger mit Beginn der Verbrennung von aschehaltigem Brennstoff Beläge an den Wärmeübertragungsflächen bilden, sind diese von besonderem Interesse in Hinblick auf den Vergleich zwischen hintergossenen und hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystemen, da durch diese zusätzlich ein mitunter recht großer Wärmedurchgangswiderstand auftritt. Auf die ungleichen Temperaturprofile der Wand mit hintergossenem und hinterlüftetem Feuerfest-Plattensystem kann dies unterschiedlich große Auswirkungen haben, was im Folgenden mit einer Sensitivitätsstudie untersucht wird.

In Tabelle 2 sind die Parameter für die durchgeführte Variantenrechnung bei einer Eintrittstemperatur des Abgases in das berechnete Segment von 900 °C angegeben. Im Referenzzustand beträgt dabei die Schichtdicke des Belags 10 mm, mit einer Wärmeleitfähigkeit des Belagsmaterials von 1,0 W/mK und einem Emissionsgrad für dessen Oberfläche von 0,8. Ausgehend von diesen Werten wurde in Variante A der Einfluss der Schichtdicke, in Variante B der Wärmeleitfähigkeit und in Variante C des Emissionsgrads untersucht.

Tabelle 2: Belagsparameter für eine Sensitivitätsstudie hinsichtlich des Wärmetransports durch die Membranwand

Bezeichnung	Schichtdicke δ mm	Wärmeleitfähigkeit λ W/mK	Emissionsgrad ε
Referenzzustand Ref	10	1,0	0,8
Variante A1 – kleinere Belagsstärke	1	1,0	0,8
Variante A2 – größere Belagsstärke	30	1,0	0,8
Variante B1 – kleinere Wärmeleitfähigkeit	10	0,5	0,8
Variante B2 – größere Wärmeleitfähigkeit	10	2,0	0,8
Variante C1 – kleinerer Emissionsgrad	10	1,0	0,3
Variante C2 – größerer Emissionsgrad	10	1,0	0,9

Um die Ergebnisse der Parametervariation bildhaft darzustellen, sind in Bild 13 und Bild 14 die Varianten *A1*, *B1* und *C1* im Vergleich zum Referenzzustand *Ref* eingezeichnet. Die nicht gezeigten Varianten *A2*, *B2* und *C2* wirken sich im Vergleich zu den abgebildeten Varianten – vom Referenzzustand ausgehend – gegensätzlich aus, weshalb auf ihre Darstellung zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet wurde. Es ist zu beachten, dass bei Variante *A1* eine verringerte Belagsstärke vorliegt. Wie in Bild 8 und Bild 9 sind aus den benannten Gründen die Temperaturprofile für den Wärmeübergang vom Abgas zur Platte und von der Platte zur Rohrwand nicht eingezeichnet.

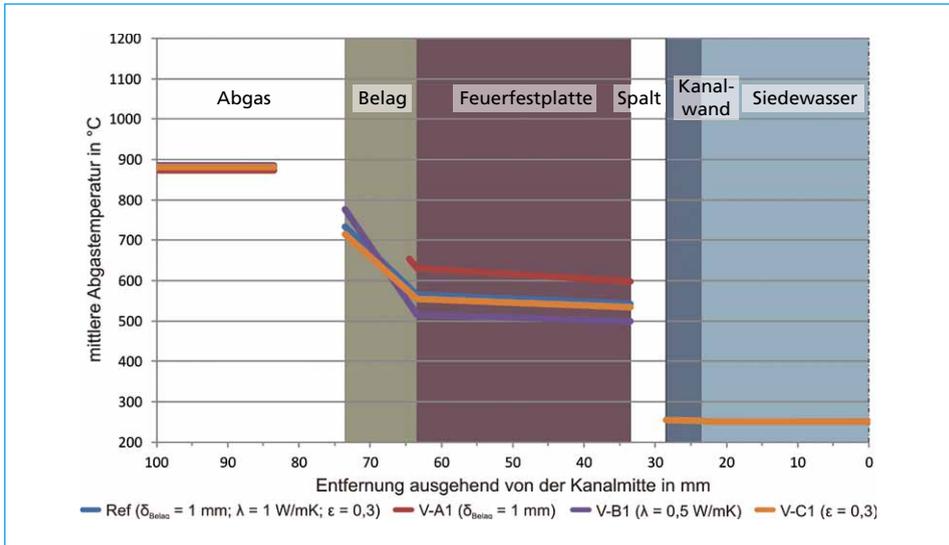


Bild 13: Temperaturverläufe über der Membranwand für das hinterlüftete Feuerfest-Plattensystem in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter bei einer Abgas-Eintrittstemperatur in das berechnete Segment von 900 °C

Prinzipiell haben eine kleinere Wärmeleitfähigkeit, eine größere Belagsstärke und ein geringerer Emissionsgrad des Belags die gleiche Tendenz. Im Rahmen der üblicherweise – in den hier besprochenen Dampferzeugern – auftretenden Werte der untersuchten Parameter, hat der Emissionsgrad des Belags in der Regel einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Wärmeübertragung, während die Wärmeleitfähigkeit des Belagsmaterials eine größere Rolle spielt. Aufgrund der teilweise recht großen Belagsstärken in Bereichen, die nicht oder schlecht gereinigt werden, liegt der wesentliche Einfluss auf die Wärmeübertragung bei der Schichtdicke des Belags. Gleichzeitig ist dies auch der einzige der untersuchten Parameter, der aktiv durch Reinigungseinrichtungen im Dampferzeuger beeinflusst werden kann.

Das Ergebnis der Simulation zeigt, dass sich bei einer Wärmeleitfähigkeit des Belagsmaterials von unter 1 W/mK – wovon in der Praxis häufig auszugehen ist – und bei gleichzeitig großen Belagsstärken von über 10 mm die Oberflächentemperaturen der Beläge an hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfest-Plattensystemen angleichen. Somit dominieren die beim Wärmeübergang vom Abgas auf den Belag und bei der Wärmeleitung in der Belagsschicht auftretenden Widerstände die des nachfolgenden Wärmetransportwegs. In der Folge ist aus Sicht des Wärmetransports kein spürbarer Unterschied zwischen hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfestplatten mehr vorhanden. Die auftretenden Wärmeströme sind dann ebenfalls nahezu identisch.

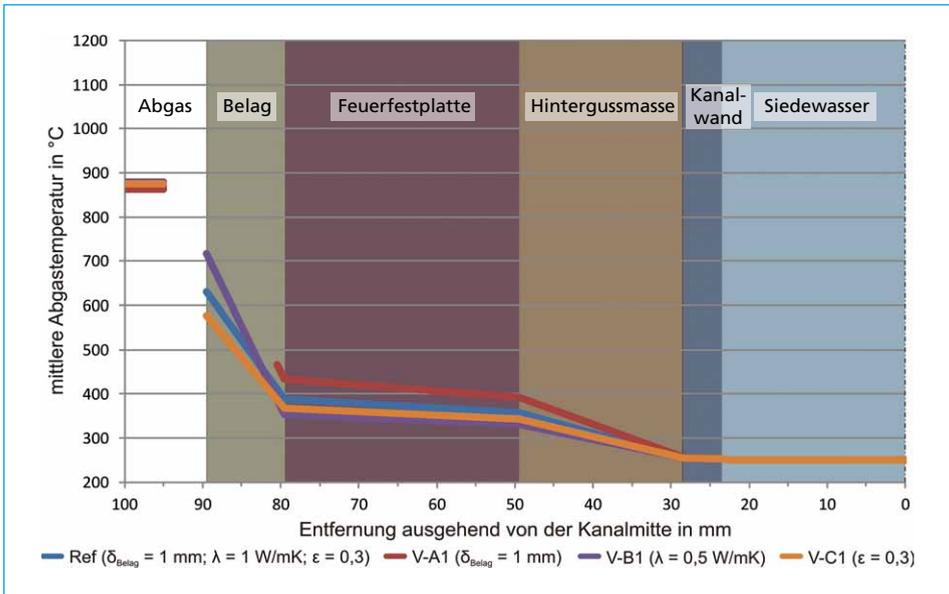


Bild 14: Temperaturverläufe über der Membranwand für das hintergossene Feuerfest-Plattensystem in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter bei einer Abgas-Eintrittstemperatur in das berechnete Segment von 900 °C

Beim Vergleich der Feuerfest-Plattensysteme hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Wärmeübertragung im Dampferzeuger sind nicht allein die Wärmeübertragungseigenschaften des jeweiligen Plattensystems ausschlaggebend, sondern es muss das gesamte Bilanzsystem Dampferzeuger betrachtet werden. Unterschiedliche Wärmedurchgänge führen zu unterschiedlicher Beheizung der Siederohre und damit im Verdampferteil zu anderen Strömungsverhältnissen. Zugleich bedingen andere Oberflächentemperaturen der Feuerfestplatten auch verschiedene Belagsstrukturen mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen. Zudem sind auch die Strömungsbedingungen im abgasführenden Inneren des Dampferzeugers von Bedeutung. Durch den Einbau von Feuerfest-Plattensystemen ändern sich der freie Strömungsquerschnitt im Dampferzeuger und die Oberflächenbeschaffenheit der Wände. Ersteres wirkt sich zusammen mit den veränderten Temperaturbedingungen auf die Strömungsgeschwindigkeit des Abgases aus, was entscheidend für den Transport des Aschepartikels aus dem Abgas auf die Wand ist und letzteres führt zu anderen Anhaftungsbedingungen bei der erstmaligen Belagsentstehung.

Während in einem großzügig ausgelegten Dampferzeuger der Einbau hinterlüfteter Plattensysteme in den meisten Fällen unkritisch ist, kann es unter anderem bei Anlagen mit hohen thermischen Flächen- und Querschnittsbelastungen, hohem Heizwert des Brennstoffs sowie großem Anteil an nichtbrennbaren Bestandteilen zu diversen Schwierigkeiten im Betrieb kommen. Ist der untere Bereich eines Dampferzeugers mit dem hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystem ausgerüstet, wirkt dieses im Vergleich zum hintergossenen System isolierend. Aufgrund unterschiedlicher Plattentemperaturen und auch anderen Strömungsbedingungen für das Abgas bei den betrachteten Systemen, ergeben sich zudem voneinander verschiedene Belagssituationen. Durch die isolierende Wirkung des hinterlüfteten Feuerfest-Plattensystems vergrößert sich für den nachfolgenden Bereich – beispielsweise aus schwarzem Rohr oder Rohr mit Schweißplattierung – der Temperaturgradient zwischen Abgas und

Rohrwand. Dies kann zum einen die bis zu diesem Bereich geringfügigere Wärmeauskopplung etwas kompensieren, aber führt möglicherweise auch zu stärkeren Korrosionen durch eine Verschiebung der Temperaturisothermen – und damit der kondensierbaren korrosionsfördernden Stoffe – im Belag zum Siederohr hin. Detailliertere Ausführungen zu diesem Thema sind den Praxisbefunden aus [8] zu entnehmen. Des Weiteren verschiebt sich generell das Verhältnis zwischen den im Verdampfer und im Überhitzer zugeführten Wärmeströmen, was letztendlich beim Wasserumlauf zu beachten ist.

Die KVA Oftringen bietet die Möglichkeit ein hinterlüftetes Feuerfest-Plattensystem mit einem hintergossenen in gleicher Höhenlage bei identischen Abgasparametern und Strömungsverhältnissen zu vergleichen. Zudem ist es auch möglich die Systeme in Abhängigkeit der Feuerfestplatten-Temperatur zu betrachten. Dieser eher ungewöhnliche Umstand ähnliche Feuerfestplatten-Temperaturen für das hintergossene wie für das hinterlüftete System zu erreichen ist damit zu begründen, dass – wie in der Anmerkung zu Tabelle 1 bereits beschrieben – die Bestiftung der zuvor zum Schutz der Rohrwand verwendeten Stampfmasse nicht vollständig entfernt wurde. Der Wärmedurchgang ist in diesem Bereich ausreichend, um die geforderten feuerungstechnischen Parameter einzuhalten. Aus diesem Grund ergibt sich eine sehr große mittlere Schichtdicke der Hintergussmasse und somit ein verhältnismäßig großer Wärmedurchgangswiderstand für den gesamten Wandaufbau, der in diesem Fall für bestimmte Abgastemperaturen, das heißt für verschiedene Höhenlagen, vergleichbar mit dem des in dieser Anlage eingebauten hinterlüfteten Plattensystems ist. Die Betriebszeit der Anlage bis zur ersten Besichtigung, in der beide Feuerfest-Plattensysteme in einer Höhenlage installiert sind, betrug drei Monate. Nach den bisherigen Beobachtungen der Belagsschichtdicken, -positionen und der äußeren Struktur kann kein wesentlicher Unterschied zwischen Belägen auf hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfestplatten festgestellt werden. Dies lässt vermuten, dass sich aufgrund der nahezu identischen Randbedingungen und geringen Temperaturunterschiede auch eine einheitliche Belagssituation einstellt und damit die Belagsentwicklung abhängig von den genannten Rand- und Anfangsbedingungen ist, aber nicht als spezifisches Resultat eines bestimmten Wandaufbaus gesehen werden kann. Jedoch beeinflusst das jeweilige Wärmetransportvermögen eines Wandaufbaus selbstverständlich entsprechend dessen Belagssituation, das heißt bei gleichem Wärmedurchgangswiderstand der Membranwand und ansonsten identischen Randbedingungen sind für unterschiedliche Wandsysteme gleichartige Beläge zu erwarten. Diese Vermutung gilt es, mit den derzeit erhaltenen Messdaten und einer späteren Beurteilung der Beläge während des nächsten Stillstands, zu überprüfen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des in diesem Beitrag vorgestellten Projekts wurden eine ganze Reihe von Untersuchungen an hinterlüfteten und hintergossenen Platten durchgeführt. Die Schwerpunkte lagen insbesondere einerseits in der Aufklärung der Wärmeübertragungsmechanismen im Spalt von hinterlüfteten Platten, um damit Grundlagen für die Auslegung solcher Feuerfestsysteme zu schaffen, sowie andererseits in der Vergleichbarkeit der Messergebnisse für hinterlüftete und hintergossene Feuerfest-Plattensysteme. So wurden alle praktischen Versuche am Dampferzeuger der KVA *Oftringen* durchgeführt. Als Besonderheit dieser Anlage ist zu nennen, dass in identischer Höhenlage des 1. Zuges sowohl hinterlüftete Feuerfestplatten auf der Vorderwand als auch hintergossene Feuerfestplatten auf den Seitenwänden sowie der Rückwand installiert sind. Damit können die beiden Feuerfestsysteme unmittelbar in Hinblick auf Temperaturverläufe, übertragene Wärmeleistung, Verschmutzungsneigung, Korrosionsschutz und Standzeiten miteinander verglichen werden. Eine Verallgemeinerung auf andere Anlagen und Feuerfestsysteme ist dabei jedoch nur in begrenztem Maße möglich.

So sind die aufgezeigten Wärmeübertragungsmechanismen auch bei anderen Herstellern gültig, die ermittelten Kurvenverläufe der Abhängigkeit des Wärmestroms von Abgas- und Siedewassertemperatur können jedoch durch eine andere Feuerfestplatten-Geometrie und Materialwahl innerhalb eines begrenzten Bereichs abweichen. Standzeiten, Korrosionsschutz und Verschmutzungsneigung der Feuerfestplatten sind vor allem abhängig von feuerungstechnischen Parametern wie der Temperatur, der Brennstoffzusammensetzung, An- und Abfahrvorgängen, installierten Reinigungsmechanismen, lokalen Abgasgeschwindigkeiten und der generellen Fahrweise der Anlage. Diese Erfahrungen können somit nicht ohne Weiteres auf andere Anlagen übertragen werden, zeigen aber bei konsequenter Beobachtung Tendenzen und auch mögliche Gefahren im Betrieb auf.

Anhand von Untersuchungen mit einem eigens erstellten mathematischen Modell, das die zweidimensionale Rohrwandgeometrie auf eine ebene, eindimensionale Kanalgeometrie vereinfacht, sind Parameterstudien durchgeführt worden, mit denen die Haupteinflussgrößen auf die Wärmeübertragung analysiert werden können.

Demnach zeigte sich, dass die Wärmeübertragung im Spalt zum größten Teil durch Zweiflächenstrahlungsaustausch zwischen Feuerfestplatte und Rohrwand und zu einem wesentlich geringeren Anteil über Wärmeleitung erfolgt. Konvektion und Wärmeübertragung durch Gasstrahlung im Spalt sind dabei vernachlässigbar klein.

Alle Simulationen wurden mit den Messungen an der KVA Oftringen validiert. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung des Modells mit den Messergebnissen in der Praxis. Es ist davon auszugehen, dass das Modell auch bei anderer Geometrie des Wandaufbaus angewendet werden kann.

Nach den bisherigen Beobachtungen aus einer dreimonatigen Betriebszeit von hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfestplatten, in einer Ebene des Dampferzeugers der KVA Oftringen, stellen sich für beide Systeme einheitliche Beläge ein. Durch die relativ geringen Unterschiede der Feuerfestplatten-Temperaturen scheint die Belagsentwicklung nicht ein spezifisches Resultat eines bestimmten Wandaufbaus, sondern abhängig von den vorliegenden Rand- und Anfangsbedingungen zu sein. Eine Überprüfung dieser Hypothese findet gegenwärtig statt.

Nachdem das gesteckte Projektziel zur Aufklärung der Wärmeübertragung an hinterlüfteten Platten nunmehr erreicht wurde, ergaben sich durch die Untersuchungen und Messungen weitere forschungswürdige Aspekte, die als zukünftiges Anschlussprojekt geplant sind. So kann zum einen der Wärmedurchgang durch Membranwände mit hinterlüfteten Feuerfestplatten optimiert und gezielt verändert werden, zum anderen bietet es sich an, die Messtechnik in der Art weiterzuentwickeln, dass damit ein Zustandsmonitoring des Feuerfestsystems (Standzeit, Schäden, Beläge) möglich ist.

Danksagung

Für die großartige, bereitwillige und aktive Unterstützung bei der Installation der Messtechnik und den Messungen selbst, möchten wir den Mitarbeitern der KVA Oftringen sowie allen beteiligten Firmen danken. Ein ganz besonderer Dank gilt dabei Herrn Hanspeter Hochuli, der uns die Installationen ermöglicht hat und stets mit einem offenen Ohr sowie Rat und Tat zur Seite steht.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Grahl, S.; Beckmann, M.: Wärmeübertragung bei hinterlüfteten und hintergossenen Feuerfest-Plattensystemen. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: (Hrsg.): Energie aus Abfall 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 285-309

- [2] 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 8. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 311-322.
- [3] VDI-Gesellschaft, Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI Wärmeatlas (Hrsg.): 8. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1997. 3-540-62900-9
- [4] erzo – Entsorgung Region Zofingen. [Online] [Zitat vom: 10. November 2011.] <http://www.erzo.ch>.
- [5] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen. 978-3-935317-41-2
- [6] VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt. VDI 4670. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen. s.l. : Beuth Verlag GmbH, 2003. 2003-02-00
- [7] The International Association for the Properties of Water and Steam. IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. Luzern: International Association for the Properties of Water and Steam, 1997. URL: <http://www.iapws.org>
- [8] Spiegel, W., et al.: Empirische Befunde am Kessel – Wärmestromdichte korreliert mit Korrosionsdynamik –. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: (Hrsg.): Energie aus Abfall 7. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 271-286