



J+G  
REFRATORIES

Wir sind die Guten!



Markus Dworschak  
Feuerungsmaurer, 26 Jahre bei J+G

Als Experten im Feuerfestbau schaffen wir innovative Lösungen für alle Industriebereiche. Seit mittlerweile 75 Jahren. Weltweit. Dabei hat uns immer die Nähe zu unseren Kunden stark gemacht. Denn wir konzentrieren uns auf die individuellen Bedürfnisse unserer Geschäftspartner und beantworten diese mit maßgeschneiderten Gesamtlösungen. Greneten im Feuerfestbau kennen wir nicht. In diesem Sinne sind wir gerne uneingeschränkt für Sie da. Jünger+Gräter GmbH • D-68723 Schwetzingen • [www.jg-refractories.com](http://www.jg-refractories.com)

J+G  
REFRATORIES

# Wärmeübertragungsverhalten von hinterlüfteten Platten am praktischen Beispiel einer Abfallverbrennungsanlage

Markus Horn, Hans-Peter Aleßio, Christian Bratzdrum,  
Joos Brell und Dominik Molitor

1.	Wärmeübertragung.....	326
1.1.	Grundlagen der Wärmeübertragung .....	326
1.2.	Einfluss der Belagsbildung.....	327
2.	Untersuchte Schutzsysteme .....	328
2.1.	Hinterlüftete Platte JuSySAir .....	329
2.2.	Cladding .....	331
3.	Wärmestromdichtemessung.....	331
3.1.	Steg-Rohr-Differenzmessung .....	332
3.2.	Messung in der hinterlüfteten Platte.....	332
3.3.	FE-Modellierung.....	333
3.3.1.	Hinterlüftete Platte.....	333
3.3.2.	Cladding .....	334
3.3.3.	Vergleich der Systeme.....	336
4.	Wärmeübertragungsverhalten der Schutzsysteme .....	339
4.1.	Hinterlüftete Platten.....	339
4.1.1.	Temperaturmessungen in der Platte.....	339
4.1.2.	Steg-Rohr-Differenzmessung hinter der Platte .....	341
4.2.	Cladding .....	341
4.3.	Vergleich mit dem Abgas-Temperaturverlauf.....	341
4.4.	Einfluss von Verschmutzung .....	342
5.	Fazit .....	342
5.1.	Messung und Auswertung.....	342
5.2.	JuSySAir im Vergleich mit anderen Systemen .....	343
5.3.	Verschmutzungsaufbau.....	343
6.	Formelzeichen.....	344
7.	Literatur .....	344

Ziel einer Abfallverbrennungsanlage ist es neben der Entsorgung der Abfälle, die durch die Verbrennung freigesetzte Energie so effizient wie möglich in eine nutzbare Form (Dampf zur Stromerzeugung, Prozessdampf für Industriestandorte, Fernwärme usw.) umzuwandeln. Für mit Ersatzbrennstoffen (EBS) betriebene Anlagen tritt das Entsorgungsmotiv hinter das der Energiewandlung sogar zurück.

Die Effizienz einer Anlage kann nicht ausschließlich durch ihren thermischen oder energetischen Wirkungsgrad bestimmt werden, sondern auch über Lebensdauer und Verfügbarkeit ihrer Komponenten.

Da die Abgase solcher Feuerungen bekanntermaßen eine Vielzahl von korrosionsfördernden Stoffen enthalten, ist es üblich die Rohrwände des der Feuerung nachgeschalteten Dampferzeugers zu schützen. Gesetzliche Bestimmungen erfordern zudem eine bestimmte Verweilzeit (üblich 2 Sekunden) oberhalb eines Temperaturgrenzwertes (üblich 850 °C) zur Verringerung des Schadstoffpotentials der Abgase aus der Abfallverbrennung.

Zum Schutz der Rohrwände werden keramische Feuerfestsysteme (Platten, Formsteine, Massen, Gießbetone), vorzugsweise auf SiC-Basis, sowie metallische Schutzschichten (Cladding und thermische Spritzschichten) eingesetzt. Bei den SiC-Formplatten wird nach geklebten, hintergossenen oder hinterlüfteten Feuerfestsystemen unterschieden.

Die unterschiedlichen Schutzsysteme und die sich darauf aufbauenden Verschmutzungsbeläge bestimmen den Wärmeübergang und insofern auch die Effizienz einer Anlage (ein besserer Wärmeübergang bedeutet eine kompaktere Anlage und damit geringere Investitionen).

Bei der beispielhaft betrachteten Anlage ist der erste Zug oberhalb der Sekundärluftdüsen mit hinterlüfteten Platten des Typs JuSySAir abgekleidet. Darüber erstreckt sich ein mit Cladding geschützter Rohrwandbereich. Da die Anlage im Betrieb eine Tendenz zu sehr hohen Abgastemperaturen an der Decke des ersten Zuges aufzeigte, entschlossen sich der Betreiber und der Kesselhersteller die Platten teilweise zurückzubauen und durch Cladding zu ersetzen. Obwohl die Claddingschicht wesentlich dünner als die Platten ist und demzufolge mehr Wärme übertragen werden müsste, war nahezu kein nachhaltiger Einfluss auf die Temperatur an der Decke des ersten Zuges feststellbar.

Dieses zunächst überraschende Ergebnis führte zu einer detaillierten Untersuchung des Wärmeübergangsverhaltens durch unterschiedliche Messungen und Berechnungen, welche im Folgenden vorgestellt werden.

## 1. Wärmeübertragung

### 1.1. Grundlagen der Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung vom Abgas auf das siedende, teilweise verdampfte Wasser in den den ersten Zug des Dampferzeugers bildenden Verdampferwänden ist neben den Abgas- und Wassertemperaturen in hohem Maße vom Wandaufbau

abhängig. Der Wandaufbau wird durch die konstruktiv bedingten – gewollten – Wärmewiderstände

- Rohrgeometrie (Durchmesser, Wand- und Stegdicken, Rohrteilung),
- Schutzsystem (Luftspalt, Mörtel, Platte, Cladding)

und die durch Verschmutzungen/Anbackungen/Korrosionsablagerungen gebildeten Beläge – ungewollte Wärmewiderstände – mit ihren jeweiligen Abmessungen und Eigenschaften (z.B. der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ ) geprägt.

Der durch Wärmeleitung übertragene Wärmestrom in einer ebenen Schicht  $l$  wird durch

$$\dot{Q}_1 = A \cdot \frac{\lambda_1}{s_1} \cdot \Delta\vartheta_1 \quad \text{Gleichung 1}$$

beschrieben.

Solange der Wandaufbau nur aus übereinander geschichteten, sich berührenden, unterschiedlichen Feststoffen besteht, kann der gesamte Wärmeleitungswiderstand durch die Addition der jeweiligen Quotienten aus Schichtdicke  $s_1$  und Einzelwärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ermittelt werden [5].

$$\dot{Q} = \frac{A \cdot \Delta\vartheta}{\sum_1 \frac{s_1}{\lambda_1}} \quad \text{Gleichung 2}$$

Rechentechisch komplexer wird es bei den hinterlüfteten Systemen, da die Wärme im Luftspalt überwiegend durch Strahlung nach einem anders definierten Wärmeübergangsgesetz [5] übertragen wird:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 A_1}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)\varphi_{12}\varphi_{21}} \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) = c_{\text{grau}} \cdot A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Gleichung 3}$$

Eine geschlossene Lösung des Gleichungssystems ist dann zwar leider nicht mehr möglich, aber die iterativen Ansätze konvergieren in der Regel recht gut.

Die Wärmeübertragung durch Leitung im Luftspalt zwischen Platte und Verdampferwand ist, wie bei Gasen üblich, vernachlässigbar gering. Je nach Geometrie und nach Durchströmung des Luftspaltes kann ein mehr oder weniger großer Konvektionsanteil, hervorgerufen durch die Gasströmung selbst oder thermisch bewirkte Turbulenzen, beobachtet werden [3].

Messtechnische und numerische Untersuchungen eines hinterlüfteten Plattensystems können zu einem besseren Verständnis des Wärmeübertragungsverhaltens beitragen.

## 1.2. Einfluss der Belagsbildung

Während der gewollte Wandaufbau hinsichtlich Abmessungen und Wärmeleitfähigkeiten weitestgehend als bekannt vorausgesetzt werden darf, ist dies bei den

Belägen (Verschmutzungen, Anbackungen, ggf. Korrosionsprodukte, usw.) nicht der Fall. Um die Wärmeübertragung durch verschmutzte Wandaufbauten dennoch abschätzen zu können, gibt es erste Ansätze, die sich die Veränderung von Messsignalen infolge eines Belagsaufbaus zu Nutze machen. Anhand mathematischer Modelle werden die Eigenschaften und die Dicke des Belags aufgrund der Phasenverschiebung und Dämpfung von Wärmestrommessungen bestimmt [6].

Je nach Temperaturbereich können sich aufgeschmolzene Schlacken, gesinterte harte Beläge, durch Chlor-Salze gebundene, unterschiedlich dichte Beläge (von hart/wenig porös bis fluffig-locker) bilden. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Belägen, wird mit zunehmender Belagsdicke deren Oberflächentemperatur immer heißer. Schließlich beginnen einzelne Bestandteile wieder zu schmelzen, was zunächst zu dichten, versinterten Belägen führt und schließlich sogar zur Ausbildung von Schlackeschmelzen.

Dichtere, ggf. sogar aufgeschmolzene Beläge können bei Erreichen einer bestimmten Mächtigkeit von den kälteren, fluffigeren rohrwandnahen Bereichen nicht mehr gehalten werden und brechen von der Wand ab. Mit zunehmender Reisezeit (Zeit nach der letzten Grundreinigung) einer Abfallverbrennungsanlage stellt sich somit ein *Gleichgewicht* ein, um das die Verschmutzung pendelt. Somit erreichen auch die Abgastemperaturen in den Strahlungszügen vor den Konvektivheizflächen einen Maximalwert. Bei einer Vielzahl von Anlagen setzt dieses Gleichgewicht erst auf einem zu hohen Abgastemperaturniveau ein, sodass die Beläge durch unterschiedliche Maßnahmen (Explosions- oder Schalldruckwellen, Wasser- oder Dampfbläser, *Shower Cleaning* usw.) während des Betriebs zusätzlich abgereinigt werden (müssen).

Der Belagsaufbau bestimmt auch die Korrosionsneigung von Verdampferwänden. Bei den Verschmutzungen muss davon ausgegangen werden, dass die Beläge eine mehr oder weniger offene Porosität besitzen, die es erlaubt, dass Salze in der Gasphase in die Beläge eindringen. Beim Unterschreiten einer für das jeweilige Salz bzw. dessen Gehalt im Abgas spezifischen Temperatur im Belag kondensiert Salz aus dem Abgas und konzentriert sich dort auf, ähnlich wie die Luftfeuchtigkeit sich auf kalten Oberflächen niederschlägt. Je schlechter die Wärmeleitfähigkeit des Belages ist, umso steiler ist (bei vergleichbaren Wärmestromdichten) der Temperaturgradient und umso näher rückt die Zone mit den korrosiven Salzen an die Rohroberfläche [7].

## 2. Untersuchte Schutzsysteme

Die Wirkung der beiden stark unterschiedlichen Rohrwandschutzsysteme gegen Korrosion beruht auf sehr differenzierten Ansätzen. Beim Cladding wird der Korrosionsangriff auf den Stahlwerkstoff der Rohrwand durch eine dichte, aufgeschweißte Schicht aus einer Nickelbasislegierung verhindert. Der Schutz der hinterlüfteten Platten beruht auf den hohen Temperaturen auf der feuerraumseitigen Oberfläche. Diese hemmen die Bildung einer Salzsicht. Die Spül- bzw. Sperrluft im Spalt verhindert zudem, dass Abgase eindringen und die Salze auf der Rohroberfläche kondensieren können.

## 2.1. Hinterlüftete Platte JuSySAir

Die Funktionsweise des hinterlüfteten Plattensystems beruht auf einem einfachen Prinzip, bei welchem versucht wird das korrosive Verbrennungsgas möglichst optimal von der Rohrwand fernzuhalten. Dies gelingt am besten, indem in einem Spalt zwischen Rohrwand und keramischer Rohrwandplatte Umgebungsluft eingespeist wird. In diversen Veröffentlichungen wurde dieses Prinzip bereits eingehend erläutert [6], so dass im Folgenden das vereinfachte Prinzip dargestellt wird.

Wie in Bild 1 erkennbar, wird im Verbrennungsraum des Abfallkessels eine keramische Rohrwandplatte über ein spezielles Verankerungssystem mit der Kesselwand verbunden. Die Rohrwandplatte hängt somit in einem definierten Abstand als geschlossene Schutzschicht vor der Kesselwand. Diese geschlossene Schutzschicht lässt ein Austreten der Sperrluft nur über die werkstoffbedingte Porosität sowie natürliche Haarrisse und systembedingte Undichtigkeiten zu. Der sich somit ergebende Spalt zwischen Kesselwand und Rohrplatte wird über ein Luftverteilersystem mit Sperrluft versorgt. Der Luftdruck der Sperrluft im Spalt ist derart bemessen, dass er höher liegt als der im Verbrennungsraum. Dadurch wird eine Art Luftschleier gebildet, der verhindert, dass die korrosiven Gase aus dem Abgas in den Luftspalt gelangen und die Kesselwand korrosiv schädigen können.

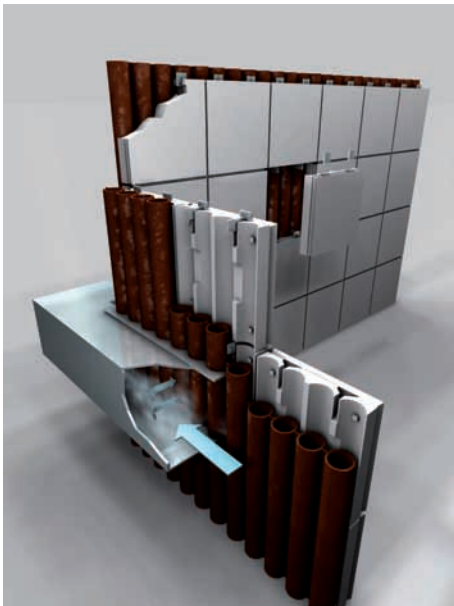


Bild 1:

Hinterlüftetes Plattensystem JuSySAir

Die Abdichtung der Stoßfugen zwischen den Rohrformplatten, die aus nitridgebundenem Siliziumcarbid hergestellt sind, erfolgt mit einer Fugenmasse, die ebenfalls aus Siliziumcarbid als Hauptrohstoffkomponente besteht. Die hohe Funktionalität des Systems beruht hauptsächlich in seiner extrem guten Abdichtung, welche nicht für jedes keramische Plattensystem selbstverständlich ist.

Da die Platte nur der Kesselwand vorgehängt wird, ist sie mit dem Kessel nicht starr verbunden und besitzt damit eine weitere hervorzuhebende Eigenschaft, nämlich die der maximalen Entkopplung von metallischer Rohrwand und keramischem Schutzsystem. Dadurch ist das System annähernd völlig unabhängig von jeglicher Kesselbewegung und weist somit eine extrem geringe Rissanfälligkeit auf, so dass der Korrosionsschutz vollständig über lange Laufzeiten der Anlagen erhalten und intakt bleibt.

Die korrosionsschützenden Eigenschaften des Systems werden durch die beispielhafte Darstellung in Bild 2 am besten erkennbar. Hier ist das verschmutzungsgradabhängige Temperaturniveau der Platte dargestellt. Dieses kann je nach Eigenschaft und Dicke der Verschmutzung bis zu 200 K variieren. Im Falle einer nicht sowie gering verschmutzten Platte gelingt es den Salzen in dem Verbrennungsgas nicht, aufgrund des Temperaturniveaus der Platte innerhalb des Plattengefüges zu kondensieren. Eine Ablagerung im Spalt wird durch den Überdruck der Sperrluft verhindert. Diese wichtige Eigenschaft des hinterlüfteten Systems kann selbsterklärend von allen anderen keramischen Schutzsystemen, welche direkt mit der Rohrwand verbunden sind, nicht geleistet werden, da bei diesen der für die Kondensation der Salze relevante Temperaturbereich deutlich näher an der Rohrwand liegt.

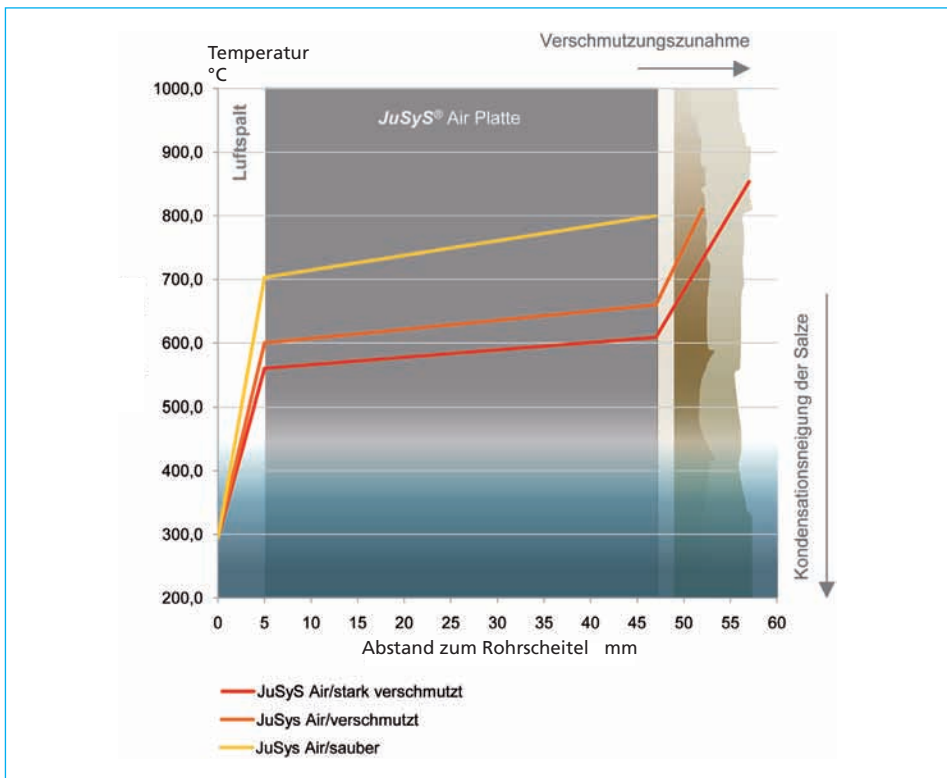


Bild 2: Beispielhafte Temperaturverläufe bei unterschiedlicher Verschmutzung von JuSySAir-Platten

Des Weiteren konnte über die langjährigen Erfahrungen mit JuSySAir festgestellt werden, dass die feuerraumseitigen Beläge, die auf hinterlüfteten Platten entstehen, recht homogen und gleichmäßig wachsen.

Eine weitere besondere Eigenschaft von JuSySAir besteht darin, dass diese hinterlüfteten Platten – im Unterschied zu vielen anderen Schutzsystemen auf SiC-Basis – mittels *Shower Cleaning* abgereinigt werden dürfen.

## 2.2. Cladding

In der thermischen Behandlung von Brennstoffen mit hohem korrosiven Potential hat sich die Verwendung von Auftragsschweißungen aus hochlegierten Werkstoffen bewährt. Bei diesem Verfahren der Schweißplattierung werden häufig Nickelbasislegierungen verwendet. In der untersuchten Anlage werden die Kesselrohre oberhalb der Feuerfestzustellung über mehrere Meter durch Cladding geschützt. Die Schichtdicke beträgt im Mittel etwa 2 mm gleichmäßig über das Steg-Rohrprofil verteilt.

Somit ergibt sich ein guter Wärmeaustausch mit dem Abgas bei hoher chemischer Beständigkeit gegen Korrosionsangriffe.

Ähnlich wie bei Verdampferwänden aus schwarzem Material, ist auch bei geclassdeten Rohren sehr häufig eine ungleichmäßig über dem Oberflächenprofil verteilte Verschmutzung zu beobachten. Die Stegbereiche sind zumeist stärker verschmutzt als die Rohrscheitel.



Bild 3: Verschmutzungsverhalten

## 3. Wärmestromdichtemessung

Wärmeströme lassen sich nur in Ausnahmefällen direkt messen. Bei den im Folgenden vorgestellten Messungen wird die Wärmestromdichte (Quotient aus Wärmestrom und Fläche) aus den Temperaturdifferenzen zwischen zwei verschiedenen Messpunkten bestimmt. Die Messpunkte sind durch Materialien mit bekannten Wärmeleiteigenschaften verbunden.

### 3.1. Steg-Rohr-Differenzmessung

Diese Methode nutzt den Effekt, dass sich die Temperaturdifferenz zwischen benachbartem Steg und Rohrscheitel (jeweils auf der Kesselaußenseite) einer Verdampferrohrwand proportional zum übertragenen Wärmestrom verhält. Durch die direkte Messung von Temperaturdifferenzen lassen sich die Werte mit großer Genauigkeit (Fehler < 0,1 K) ermitteln [1, 2, 3, 4]. Der Proportionalitätsfaktor zur Ermittlung der Wärmeströme aus den Temperaturdifferenzen ist u.a. auch abhängig vom inneren Wärmeübergangskoeffizienten ( $\alpha_i$ ). Dies ist jedoch nur im Einlaufbereich bis zum Einsetzen der Verdampfung von Bedeutung. Bei ausreichend langer Verdampferstrecke geht dieser Einfluss durch das dann stark zunehmende  $\alpha_i$  deutlich zurück, so dass der Wärmestrom zuverlässig ermittelt werden kann.

### 3.2. Messung in der hinterlüfteten Platte

Die zuvor beschriebene Methode ist für Wärmeströme auf Verdampferwände aus bekannten Feststoffen mit Belägen entwickelt worden. Wegen des anderen Wärmeübergangsverhaltens von hinterlüfteten Platten (siehe Kapitel 1) muss die Gültigkeit dieser Beziehungen validiert werden. Zur Überprüfung wurden daher in einzelnen Platten Bohrungen mit Thermoelementen parallel zur Plattenoberfläche ausgestattet (Bild 4). Diese erlauben es, den Temperaturverlauf senkrecht zur Plattenoberfläche im Betrieb zu erfassen. Da der Wärmewiderstand der SiC-Platte sehr viel größer als der der Verdampferrohrwand ist, sind auch die Temperaturdifferenzen deutlich größer, so dass die Messungen mit NiCr-Ni (Typ K) Thermoelementen der Klasse 1 (DIN/IEC 584) mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden können.

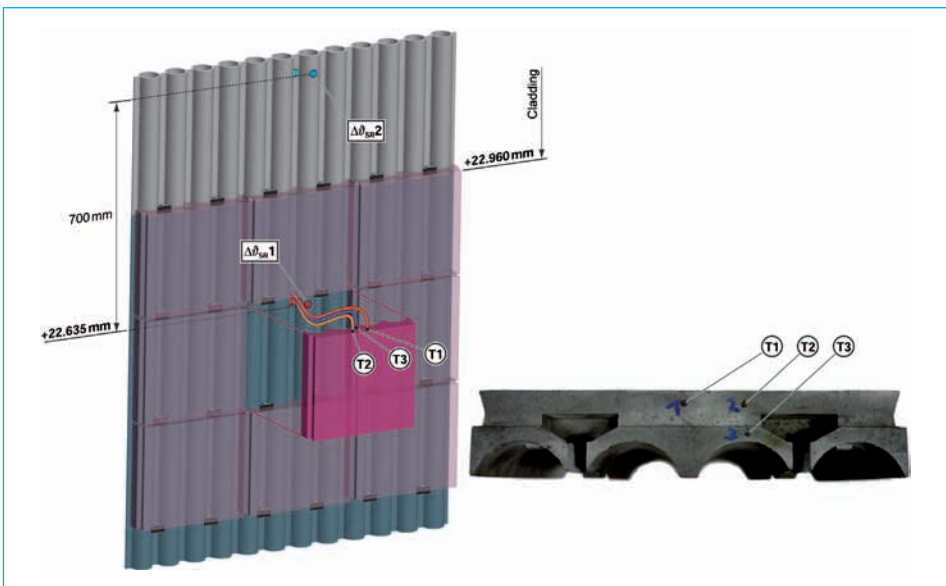


Bild 4: Anordnung der Messstellen

Die JuSySAir-Platte

- besitzt eine ebene Oberfläche zum Abgaszug hin,
- ist mit 35 mm über dem Rohrscheitel relativ dick und
- der Luftspalt vergleichmäßig den Wärmeübergang.

Daraus ergeben sich an den Messorten nahezu parallel zur abgasseitigen Oberfläche verlaufende Isothermen. Diese ermöglichen es, aus den Differenzen der gemessenen Temperaturen auf den Wärmestrom zu schließen.

### 3.3. FE-Modellierung

Die Finite-Elemente-(FE) Modellierung eignet sich, um viele physikalische Problemstellungen numerisch zu beschreiben. Durch Variation lassen sich die Einflüsse der unterschiedlichen Randbedingungen (z.B. unterschiedliche aufgeprägte Wärmestromdichte) aufzeigen.

Die in der ausgewählten Anlage vorhandenen Wandaufbauten (Verdampferrohrwand, Feuerfestplatten, Cladding, Verschmutzungen) wurden mit solchen numerischen Modellen nachgebildet.

Wegen der oben beschriebenen ungleichmäßigen Verschmutzung wurden für das Cladding sowohl Modelle für den unverschmutzten als auch für den verschmutzten Zustand betrachtet. Im Fall der hinterlüfteten Platte wurde nur der unverschmutzte Zustand modelliert, da diese gleichmäßiger verschmutzen. Eine gleichmäßige Verschmutzung stellt zwar einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand dar, der aber den Zusammenhang zwischen Wärmeströmen und Temperaturverlauf von der Plattenoberfläche bis hin zur Rohrwand nicht verändert. Die Erklärung dafür lässt sich grafisch anhand des Bildes 8 (Kap. 3.3.3.) veranschaulichen. Den numerischen Modellen wurde eine aufgeprägte Wärmestromdichte zugrunde gelegt. Dabei ist zu beachten, dass die durch Strahlung aufgeprägte Wärmestromdichte neben der Abgastemperatur auch von der Oberflächentemperatur des vom Abgas berührten Belages abhängig ist.

#### 3.3.1. Hinterlüftete Platte

Für die hier verwendeten Berechnungsmodelle ist eine mittige Plattenposition betrachtet worden, so dass die thermischen Einflüsse der Halterungen zu vernachlässigen sind. Als thermische Lasten sind die gemessenen Plattentemperaturen herangezogen worden (vgl. Kap. 4.1.1.), die im Strahlungsaustausch mit der Membranwandoberfläche stehen. Bild 5a zeigt die Temperaturverteilung in der Rohrwand sowie der JuSySAir-Platte im Fall einer feuerraumnahen Plattenoberflächentemperatur von 800 °C. In Bild 5b ist die Wärmestromdichteverteilung für diesen Lastfall dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Wärmestromdichte im Stegbereich aufgrund der sich verjüngenden Geometrie in der Platte erhöht. In der Membranwand wird der größte Wärmefluss etwa auf der 45°-Position zwischen Rohr und Steg verzeichnet.

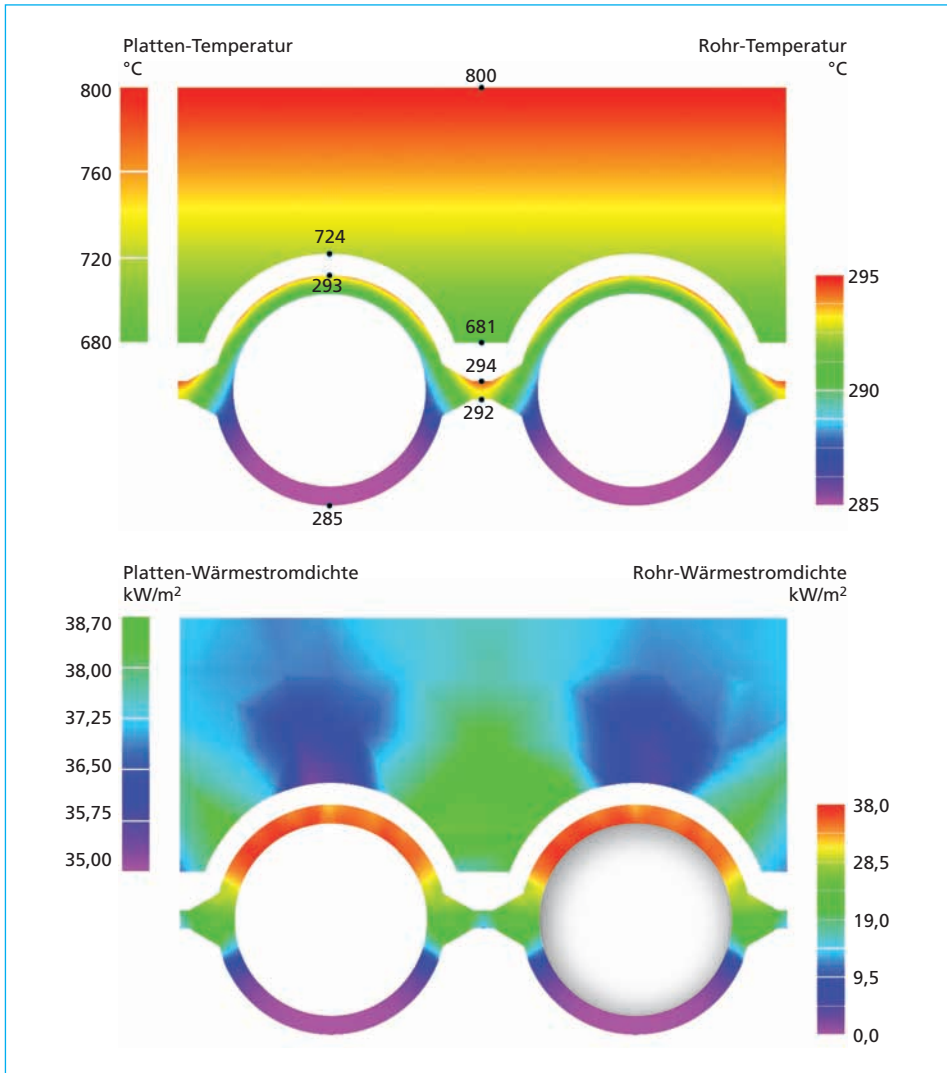


Bild 5: a) Temperaturprofil hinterlüftete Platte, b) Wärmestromdichte hinterlüftete Platte

### 3.3.2. Cladding

Die berechneten Temperaturprofile sowohl für das unverschmutzte als auch für das verschmutzte Cladding sind in Bild 6a und in Bild 7a zu sehen. Die modellierte Claddingschicht besteht in beiden Fällen aus einer idealen, 2 mm dicken Alloy 625-Schicht, d.h. eine gegebenenfalls unregelmäßige Schichtdicke aufgrund der Applikation (Schweißraupen) und eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Aufmischung des Grundwerkstoffes wurden nicht berücksichtigt.

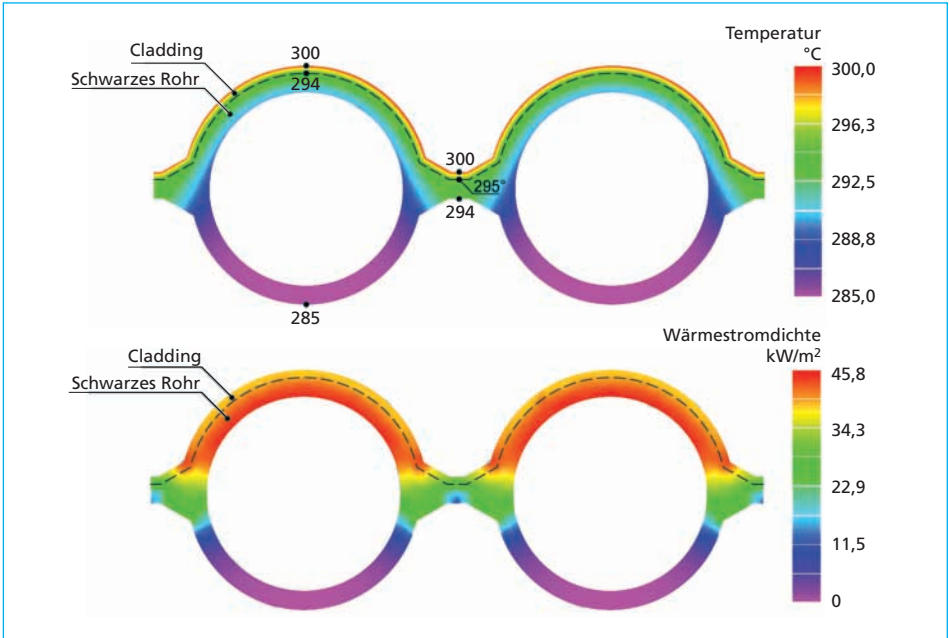


Bild 6: a) Temperaturprofil Cladding, sauber, b) Wärmestromdichte Cladding, sauber

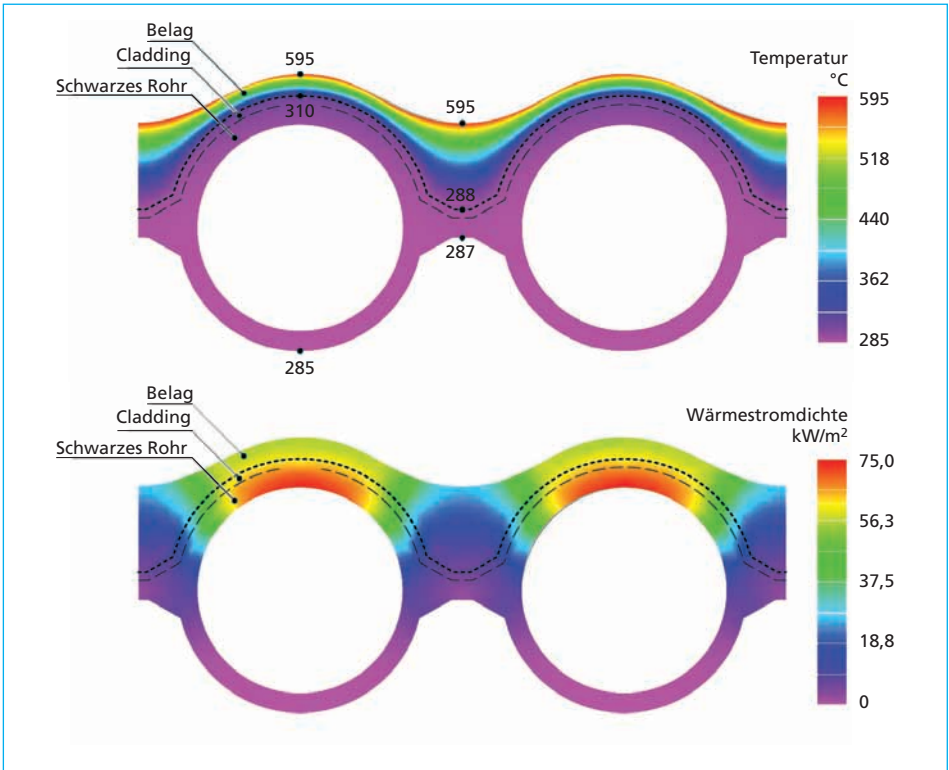


Bild 7: a) Temperaturprofil Cladding, verschmutzt, b) Wärmestromdichte Cladding, verschmutzt

Die Claddingschicht ist ideal mit dem schwarzen Rohr verbunden. Die modellierten Beläge (Anbackungen) sind im Stegbereich dicker als auf dem Rohr (vgl. Kapitel 4.4.) und weisen eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit [3] auf. Bei einer (angenommenen) identischen Wärmestromdichte von  $50 \text{ kW/m}^2$  sowohl im verschmutzten wie im sauberen Zustand steigt die Oberflächentemperatur im Belag auf  $595 \text{ °C}$  an, während sie am unverschmutzten Cladding  $300 \text{ °C}$  erreicht. Die Temperaturdifferenz zwischen Steg und Rohrscheitel außen am Kessel sinkt ab. Die Erklärung dafür ist der relativ gleichmäßige Wärmeeintrag in das Rohr im unverschmutzten Zustand, während sich der Wärmeeintrag beim verschmutzten Cladding stärker auf den Rohrscheitel des Rohres konzentriert (Bilder 6b und 7b). Dies führt im Modell zu einer gesteigerten Rohrscheiteltemperatur der Claddingoberfläche von  $310 \text{ °C}$  und einer verminderten Stegtemperatur von  $288 \text{ °C}$ . Die verstärkten Anbackungen im Stegbereich haben ihre Ursache in der Oberflächengeometrie und werden selbstverständlich auch bei ungeschützten Rohren oder ähnlichen Oberflächenformen beobachtet.

### 3.3.3. Vergleich der Systeme

Wird die Berechnung mit unterschiedlichen thermischen Lasten wiederholt, können Systemkennlinien für die unterschiedlichen Wandaufbauten erstellt werden. Bild 8 zeigt exemplarisch drei Systemkennlinien, eine für hinterlüftete Platten und zwei für Cladding im sauberen bzw. verschmutzten Zustand. Die Systemkennlinie gibt für die spezifischen Anlagenparameter und Wandaufbauten Aufschluss darüber, wie hoch die Wärmestromdichte bei der jeweils gemessenen Temperaturdifferenz auf der Kesselaußenseite ist. Die durchgezogenen Linien zeigen den Bereich der gemessenen Temperaturdifferenzen und die daraus resultierenden Wärmestromdichten der Anlage. Gestrichelt dargestellt ist die theoretische, modellierte Wärmeauskopplung bei höheren Temperaturdifferenzen.

Die Kennlinie für das verschmutzte Cladding zeigt, dass sich eine geringere Steg-Rohr-Temperaturdifferenz – gegenüber dem unverschmutzten Zustand – bei gleicher aufgeprägter Wärmestromdichte ergibt. Anders ausgedrückt: Im verschmutzten Zustand wird mehr Wärme übertragen als es sich aus der Kennlinie des sauberen Claddings ermitteln lässt. Nur im Anfahrbetrieb bzw. nach einem Abreinigungszyklus kann die *unverschmutzte* Kennlinie für die Wärmestromaussage herangezogen werden.

Im Fall der hinterlüfteten Platte sind die Kurven identisch. Dies ist auf die üblicherweise dort auftretende gleichmäßigere Verschmutzung der Plattenoberfläche zurückzuführen. Der zusätzliche Wärmeleitwiderstand der Verschmutzung ist mit den übrigen Wärmeleitwiderständen (Platte, Luftspalt, Rohrwand) in Reihe geschaltet und beeinflusst daher die Charakteristik nicht. Mathematisch ausgedrückt ergibt sich:

$$\dot{Q}_{\text{Platte}} = A \cdot \frac{\lambda_{\text{Platte}}}{s_{\text{Platte}}} \cdot \Delta\vartheta_{\text{Platte}} = A \cdot \frac{\lambda_{\text{Verschmutzung}}}{s_{\text{Verschmutzung}}} \cdot \Delta\vartheta_{\text{Verschmutzung}} = \dot{Q}_{\text{Verschmutzung}}$$

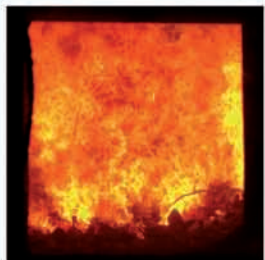
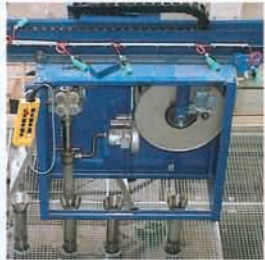
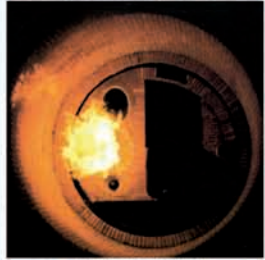
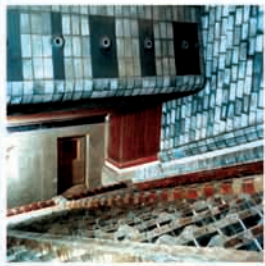
Gleichung 4

# Korrosionsdiagnose

## Sensorik: gekühlte Belagsmonitore

- Belagschemie
- Belagsgefüge
- Wärmestromdichte
- Temperatur-Fenster





## BERATUNG FÜR UMWELT UND ENERGIE

STRATEGIEENTWICKLUNG

WISSENSCHAFTLICHE UND INGENIEURTECHNISCHE EXPERTISEN

TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG VON  
INVESTITIONSVORHABEN

RISIKOABSCHÄTZUNG BEIM EINSTIEG IN TECHNOLOGIEN  
UND VERFAHREN

TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG

STOFFKREISLÄUFE

EMISSIONSMINDERUNG

ENERGIEEFFIZIENZ VON INDUSTRIELLEN PROZESSEN

TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHE BILANZIERUNG VON  
ENERGIEUMWANDLUNGS- UND STOFFBEHANDLUNGSPROZESSEN

UNTERSTÜTZUNG BEI GENEHMIGUNGSVERFAHREN

SCHADENSBEURTEILUNG

Die verminderte Wärmeaufnahme ist hauptsächlich durch den Strahlungsaustausch der Oberflächenschicht mit dem Abgas geprägt, dieser folgt den Gesetzmäßigkeiten der Gleichung 3.

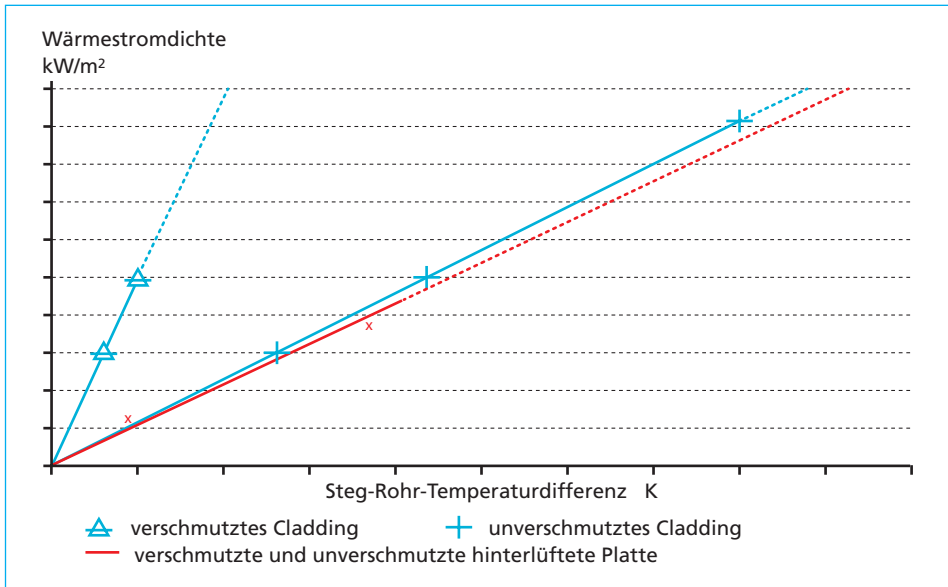


Bild 8: Systemkennlinien für Cladding sauber und verschmutzt sowie für hinterlüftete Platten

## 4. Wärmeübertragungsverhalten der Schutzsysteme

### 4.1. Hinterlüftete Platten

#### 4.1.1. Temperaturmessungen in der Platte

Die installierten Thermoelemente weisen im betrachteten Zeitraum von etwa dreieinhalb Monaten eine Schwankungsbreite zwischen 450 °C und 850 °C auf (Bild 9a). Interpoliert man die Messungen auf die Plattenoberfläche, kann an der feuerraumseitigen Plattenoberfläche eine maximale Temperatur von etwa 900 °C herrschen. Die starke Variation in den Messergebnissen ist auf unterschiedliche Belagsdicke auf der Plattenoberfläche zurückzuführen. Die sprunghaftigen Anstiege der Plattentemperaturen verbunden mit anschließend langsamem Absinken (Sägezahn-Muster) ist ein typisches Anzeichen für Belagsabfällen und Belagsaufbau. In der untersuchten Anlage finden in regelmäßigen Abständen Onlinereinigungen statt, weshalb dieses Muster besonders deutlich ausgeprägt ist. Die Temperaturmessungen lassen in den ersten acht Wochen Betriebszeitraum bis Mitte Dezember eine kontinuierlich abfallende Tendenz aufgrund von zunehmender, nicht abreinigbarer Belagsbildung erkennen.

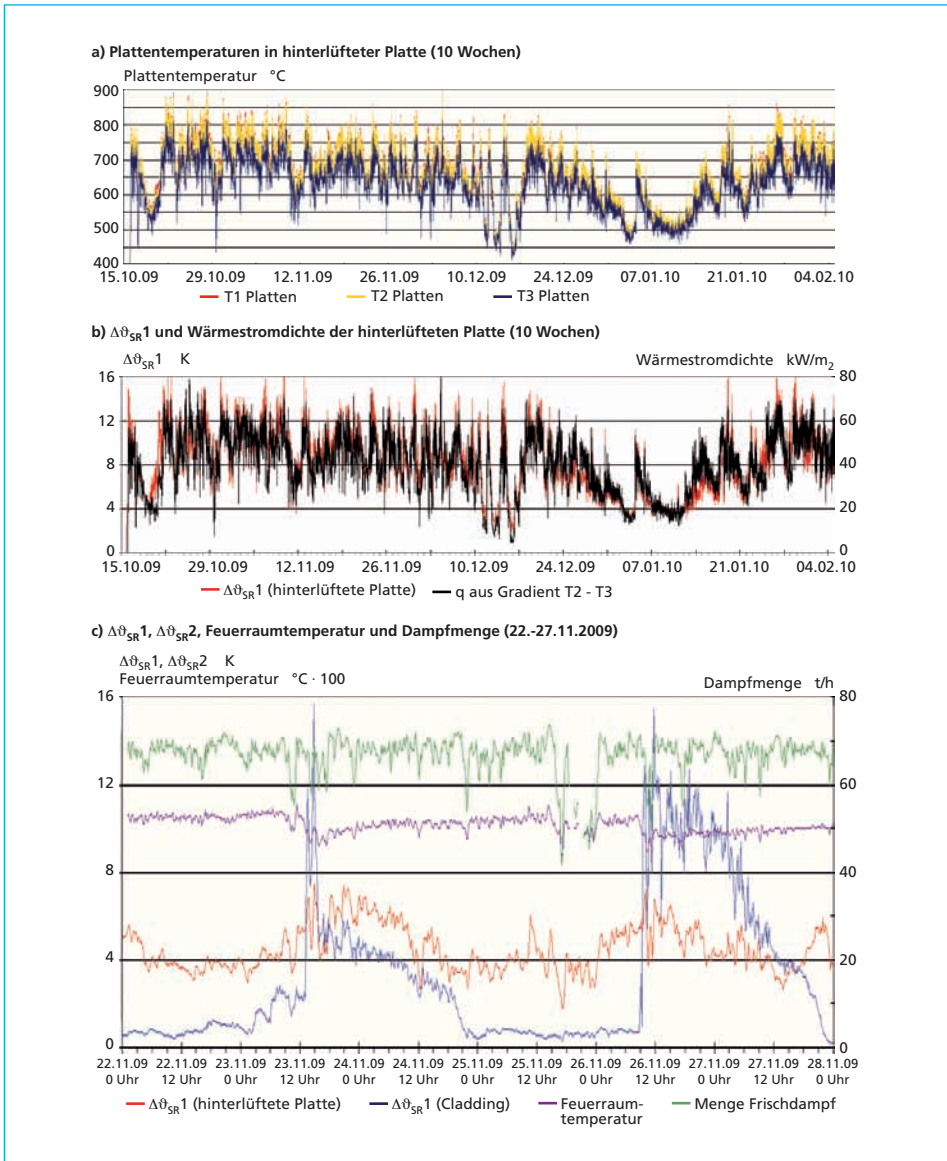


Bild 9: Darstellung der Messergebnisse

In der Platte werden Temperaturunterschiede zwischen Vorder- und Rückseite von etwa 30 K bis 150 K gemessen. Mit der werkstoffspezifischen Wärmeleitfähigkeit und dem bekannten Abstand der beiden Temperaturmessungen kann in der Platte die Wärmestromdichte berechnet werden (Gleichung 1). Die Ausstattung von SiC-Platten mit Thermoelementen kann somit als ein Instrument zur Bestimmung der Wärmestromdichte verwendet werden, sofern diese einen hinreichend gleichförmigen Temperaturverlauf aufweisen, wie er bei JuSySAir systembedingt vorliegt.

### 4.1.2. Steg-Rohr-Differenzmessung hinter der Platte

Die Steg-Rohr-Differenzmessung ist hinter der mit Thermoelementen ausgestatteten Platte auf der Membranwandaußenseite installiert (Bild 4). Mit Hilfe der nach Gleichung 1 bestimmten Wärmestromdichte in der Platte kann somit eine Kalibrierung der Wärmestromsensoren erfolgen. In Bild 9b ist der Verlauf der Steg-Rohr-Temperaturdifferenz und der in der Platte gemessenen Wärmestromdichte dargestellt. Es handelt sich dabei um einen annähernd linearen Zusammenhang, der von Belagsbildung und Last beeinflusst wird. Eine dicke Belagsschicht auf der Platte bedeutet ein Absinken der Temperaturdifferenzen und somit niedrigere Wärmestromdichte. Niedrigere Lastzustände resultieren ebenfalls in geringere Temperaturdifferenzen.

## 4.2. Cladding

Im Bereich des Claddings oberhalb der Feuerfestzustellung wird ebenfalls eine Steg-Rohr-Temperaturdifferenz aufgezeichnet. Im Vergleich zur Messung hinter den Platten ist die Bandbreite der Messsignale erheblich breiter, sie variiert zwischen weniger als 1 K bis zu 16 K (Bild 9c). Im Unterschied zur ebenen Plattenoberfläche neigt die Rohrgeometrie zu einer sehr ungleichmäßigen Belagsbildung, v.a. das Verschmutzen der Stegbereiche macht eine Analyse der Wärmestromsignale an geclassdeten Rohren schwieriger. In Kapitel 4.4. wird auf das Thema des Belageinflusses auf die Wärmeübertragung im Detail eingegangen.

### 4.3. Vergleich mit dem Abgas-Temperaturverlauf

In der ausgewählten Anlage werden die Temperaturen an der Decke des ersten Zuges kontinuierlich mit strahlungsgeschützten Thermoelementen erfasst und

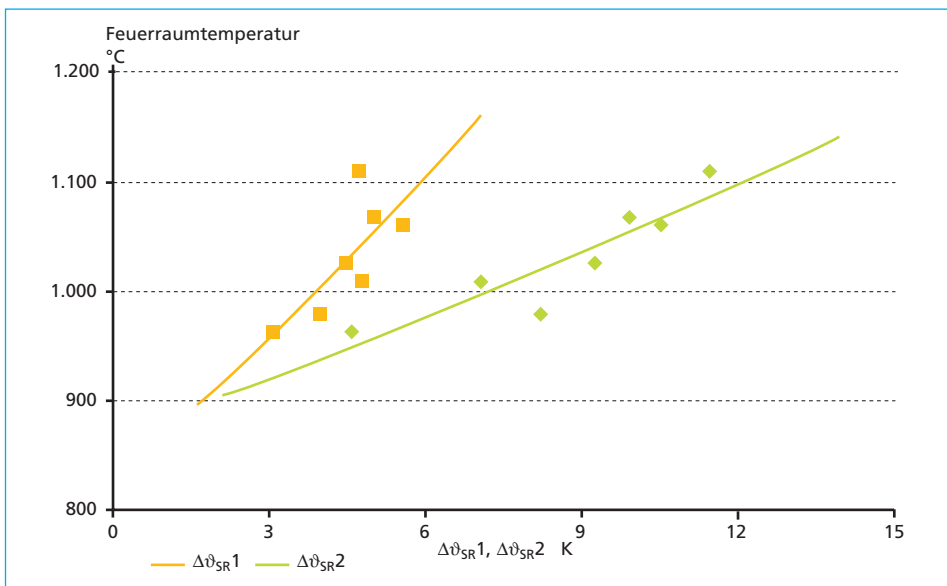


Bild 10: Korrelation Steg-Rohr-Temperaturdifferenzmessung und Feuerraumtemperatur

daraus auf die Feuerraumtemperatur geschlossen. Diese variiert etwa zwischen 800 °C und 1.100 °C. In Bild 9c ist zu sehen, dass der Einfluss der Onlinereinigung zu einem sprunghaftem Abfallen der Temperaturen um über 100 K führt. Bereits nach wenigen Stunden steigen die Signale wieder auf ihr Ausgangsniveau. Korreliert man die gemittelten Messwerte der Abgas-Temperaturen mit den aufgezeichneten Steg-Rohr-Temperaturdifferenzen hinter Cladding und hinterlüfteten Platten in gereinigten Zeiträumen von nur wenigen Stunden, erhält man einen annähernd linearen Zusammenhang (Bild 10). Die Platte stellt im Unterschied zum Cladding eine Isolationschicht dar, durch die der Wärmeübergang weitgehend gleichmäßig wird.

#### 4.4. Einfluss von Verschmutzung

Im Strahlungsteil ist der negative Einfluss von Belägen auf die Wärmeübertragung vom Abgas in die Kesselrohre bereits bekannt [2]. Wie bereits einleitend erwähnt, können sich entsprechend den Oberflächentemperaturen (Platte/Cladding) unterschiedliche Beläge ausbilden. Die isolierende Wirkung der Salz-Asche-Beläge mit niedriger Wärmeleitfähigkeit wird bei der Steg-Rohr-Differenzmessung besonders stark in den gecladdeten Bereichen deutlich. Auf den Platten entstehen meist dünne flächige, teilweise versinterte Aschebeläge. Auf der gecladdeten Rohrwand ist in der Regel direkt auf der Werkstoffoberfläche eine dünne Salzschiicht zu finden, darüber dann ein lockerer Aschebelag.

Die mit der Messtechnik ausgestattete Anlage verfügt über ein Onlinereinigungssystem im ersten Zug. Beim Abreinigen der Beläge kommt es zu einem sprunghaftem Anstieg der gemessenen Steg-Rohr-Differenztemperatur. Anhand der Daten sind die durchgeführten Reinigungszyklen in Form eines Sägezahnmodells gut zu erkennen (Bild 9c). Dies ist vor allem im Bereich der *Claddingsensoren* zu erkennen, aber auch im Bereich des hinterlüfteten Plattensystems ist dieser Effekt vorhanden. In den folgenden Stunden nach der Reinigung ist bei gleichbleibender Feuerraumtemperatur eine Abnahme der Signale zu erkennen. Dies ist auf eine schnelle Ausbildung von neuen Belägen zurückzuführen. Dabei sinkt die gemessene Temperaturdifferenz (Steg-Rohr) der *Claddingsensoren* meist rasch unter das Niveau der *Plattensensoren*.

Somit besitzt das hinterlüftete Plattensystem eine durchaus homogenisierende und stabilisierende Eigenschaft auf den gesamten Wärmeauskoppelungsprozess. Die Abreinigungszyklen können somit bei hinterlüfteten Plattensystemen länger als solche für unverkleidete Rohrwände sein. Eine Versinterung der Beläge ist jedoch nach Möglichkeit zu vermeiden.

## 5. Fazit

### 5.1. Messung und Auswertung

Die Ausstattung von keramischen Werkstoffen mit Thermoelementen ist ein wertvolles Instrument, um Informationen über die Wärmeleitungseigenschaften

und Wärmestromdichte im Praxiseinsatz zu gewinnen. Mit Hilfe der gewonnenen Daten zur Wärmestromdichte kann die Messung der Steg-Rohr-Temperaturdifferenzen an der Kesselaußenseite validiert und kalibriert werden. Die FE-Modellierung ermöglicht zudem ein besseres Verständnis der Temperatur- und Wärmestromverteilung in den jeweiligen Werkstoffen.

## 5.2. JuSySAir im Vergleich mit anderen Systemen

Leider ließ der Aufbau der untersuchten Anlage nur den Vergleich von JuSySAir mit Cladding zu. Für andere Systeme sind aber vergleichbare Ergebnisse zu erwarten.

Im sauberen Zustand wird erwartungsgemäß auf den gecladdeten Oberflächen sehr viel mehr Wärme übertragen, als es bei hinterlüfteten Platten der Fall ist. Dies ist auf die dünnere *Isolierschicht* gegenüber den Platten zurückzuführen. Mit zunehmender Verschmutzung hingegen, egalisiert sich das Wärmeübertragungsverhalten. Da die Anlagen auch auf den verschmutzten Zustand hin ausgelegt werden müssen, zeigt sich hier kein Nachteil der hinterlüfteten Platten. Somit kann auch erklärt werden, warum in einzelnen Anlagen (wie in der hier untersuchten) ein teilweiser Rückbau von Feuerfestsystemen nicht erfolgreich war.

Die Untersuchung wurde nur aus Sicht der Wärmeübertragung erstellt. Für die Wahl eines guten Korrosionsschutzsystems sind jedoch weitere Aspekte wie Standzeiten, Wartungsfreundlichkeit und Investitionshöhen maßgeblich, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Die Ausstattung der hinterlüfteten Platte mit Thermoelementen in Kombination mit einer Steg-Rohr-Temperaturdifferenzmessung liefert ebenfalls Erkenntnisse über das Verhalten der JuSySAir Platte bei unterschiedlichen Kesselbedingungen.

## 5.3. Verschmutzungsaufbau

Der Verschmutzungsaufbau ist stark von den geometrischen Gegebenheiten und von den Oberflächentemperaturen bzw. den Temperaturen im Belag abhängig.

Der Belagsaufbau ist bei Plattensystemen in der Regel anders als an Membranwandrohren (sowohl schwarz als auch gecladdet). Da im Vergleich zum Cladding die ebene Platte bereits für eine Vergleichmäßigung der Wärmeübertragung ins Rohr sorgt, ist der Einfluss von Belägen an der Oberfläche nur noch gering. Somit ist das System *nackte Rohrwand* – ob gecladdet oder nicht – als verschmutzungsensitiver anzusehen. Die Übertragung der Wärme kann hier nicht mehr über die gesamte Membranwandfläche gleichmäßig erfolgen, sondern konzentriert sich im Scheitelbereich. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass durch geeignete Annahmen des Verschmutzungsaufbaus der Zustand einer sich stabilisierenden Verschmutzung befriedigend nachgebildet werden kann.

## 6. Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$\dot{Q}_1$	Wärmestrom	kW
A	Fläche quer zum Wärmestrom	m <sup>2</sup>
T		
(T = $\vartheta + 273,15$ K)	Temperatur	K
$\vartheta$	Temperatur	°C
$\Delta\vartheta_1$	Temperaturdifferenz in der Schicht I	K
$\lambda_1$	Wärmeleitfähigkeit der Schicht I	W/m K
$s_1$	Dicke der Schicht I	m
$\varepsilon_1$	Emissionskoeffizient der strahlenden Oberfläche I	–
$\varphi_{12}$	Einstrahlzahl	–
$\sigma = 5,67 \text{ E-}8 \text{ W/m}^2\text{K}^4$	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
$c_{\text{grau}}$	Strahlungskoeffizient	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
$\alpha_1$ (alpha i)	Innerer Wärmeübergangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> K

## 7. Literatur

- [1] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.; Magel, G.: Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranverdampferwände von Dampferzeugern. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 641-658
- [2] Krüger, S.; Beckmann, M.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden zur Charakterisierung von Belägen in Dampferzeugern für schwierige Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 259-271
- [3] Krüger, S.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden von Dampferzeugern. Diss. Technische Universität Dresden, Mai 2009
- [4] Spiegel, W.; Magel, G.; Beckmann, M.; Krüger, S.: Nutzung der Wärmestrommessungen in MVA, Biomasse- und EBS-Verbrennungsanlagen zur Einflussnahme auf die Dampferzeugerkorrosion. In: Dampferzeugerkorrosion 2009. SAXONIA GmbH, Freiberg, S. 97-105
- [5] VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage, 2006
- [6] 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
- [7] Spiegel, W.; Herzog, T.; Kaiser, M.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosionsproblematik und Wärmestrommessungen in Biomassekraftwerken: Korrosionsvorbeugung und Schutzschichten. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Erneuerbare Energien, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 65-83
- [8] Imle, J.: Hinterlüftetes keramisches Rohrwandschutzsystem – Problemlöser für kritische Bereiche von Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 681-697