

Online-Bestimmung des Wärmestroms auf Membranverdampferwände von Dampferzeugern

Michael Beckmann, Sascha Krüger, Gabi Magel und Wolfgang Spiegel

1.	Theoretischer Hintergrund zur Online-Wärmestromdichtemessung	642
2.	Versuchsaufbauten	644
2.1.	Versuchsaufbau zur Validierung der Wärmestromdichtemessung	644
2.2.	Messtechnik zur Erfassung kleiner Temperaturdifferenzen ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$)	645
2.3.	Kalibrierung der Temperaturdifferenzmessung	646
3.	Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte und Vergleich mit Versuchsergebnissen	647
4.	Praxiseinsatz	649
4.1.	Installation der Messtechnik, Beispiel 1 – Abfallverbrennungsanlage –	649
4.2.	Messergebnisse, Beispiel 1	650
4.2.1.	Betriebsbedingte Änderungen	650
4.2.2.	Systembedingte Schwankungen	652
4.3.	Installation der Messtechnik, Beispiel 2 – Biomasseverbrennungsanlage –	654
4.4.	Messergebnisse, Beispiel 2 – Biomasseverbrennungsanlage –	656
5.	Zusammenfassung	657
6.	Symbole und Abkürzungen	658
7.	Quellen	658

Für die thermische Behandlung von Abfällen und die energetische Nutzung von Biomasse haben sich Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren mit Rostfeuerung (klassische MVA) über viele Jahrzehnte bewährt. Das Potential für

Weiterentwicklungen ist dabei noch nicht ausgeschöpft. Wesentliche Zielstellungen der kontinuierlichen Entwicklung in Abfallverbrennungsanlagen sind u.a.:

- Erhöhung des Wirkungsgrades,
- Primärmaßnahmen zur Schadstoffminderung,
- Senkung der Abgasmassenströme,
- Verbesserung der Aschequalität,
- Verminderung von Korrosion,
- Verlängerung der Reisezeit und
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.

Zur Vermeidung der Korrosion stellen Informationen zur Belagbildung im laufenden Betrieb – insbesondere Belagbildung an den Verdampferflächen – eine wichtige Grundlage dar.

Durch die Belagbildung entsteht aus Sicht der Wärmeübertragung ein zusätzlicher Widerstand, d.h. die Wärmeabfuhr im Verdampferbereich wird behindert. Tritt nun z.B. aufgrund der schwankenden Abfallzusammensetzung eine plötzliche Heizwerterhöhung ein, so kann es kurzfristig zu einem Temperaturanstieg in den Strahlungszügen kommen, was eine *Verschleppung* von Alkali-Schwermetallsalzverbindungen in den konvektiven Bereich zur Folge haben kann.

Mit Hilfe der Online-Wärmeflussmessung an den Verdampferwänden lassen sich der Belagaufbau über der Reisezeit, sowie der Zustand der Feuerfestzustellung – Gefügeveränderung, Defekte usw. – im laufenden Betrieb ermitteln, ohne dass Eingriffe an Druck tragenden Teilen des Dampferzeugers notwendig sind. Hierdurch können z.B. geeignete Abreinigungszeitpunkte wesentlich genauer durch das Betriebspersonal festgelegt und damit Temperaturverschiebungen im Kessel mit Korrosionsfolgen im Überhitzerbereich vermieden werden.

In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst auf die theoretischen Grundlagen der Wärmeflussmessung eingegangen. Danach wird die für die Untersuchung von Membranwandsegmenten vorhandene Versuchsanlage vorgestellt und die zugehörige Messtechnik beschrieben. Weiter folgt eine Gegenüberstellung von Ergebnissen aus der mathematischen Modellierung mit den experimentellen Ergebnissen. Abschließend werden die ersten Ergebnisse aus Versuchen an zwei ausgewählten Praxisanlagen diskutiert.

1. Theoretischer Hintergrund zur Online-Wärmestromdichtemessung

Die theoretischen Grundlagen zur Wärmestromdichtemessung an Membranverdampferwänden wurden bereits in [1] vorgestellt. Aus diesem Grund wird hier nur kurz auf das Funktionsprinzip eingegangen.

Bild 1 zeigt schematisch einen Wandaufbau mit Zustellung, Siederohr mit Siedewasser und Isolation. Der in die Wand eintretende Wärmestrom gelangt durch Wärmeleitung von der Zustellungsoberfläche zum Siedewasser. Das Siedewasser befindet sich abhängig vom eingestellten Druck des Speisewassersystems auf konstanter Verdampfungstemperatur.

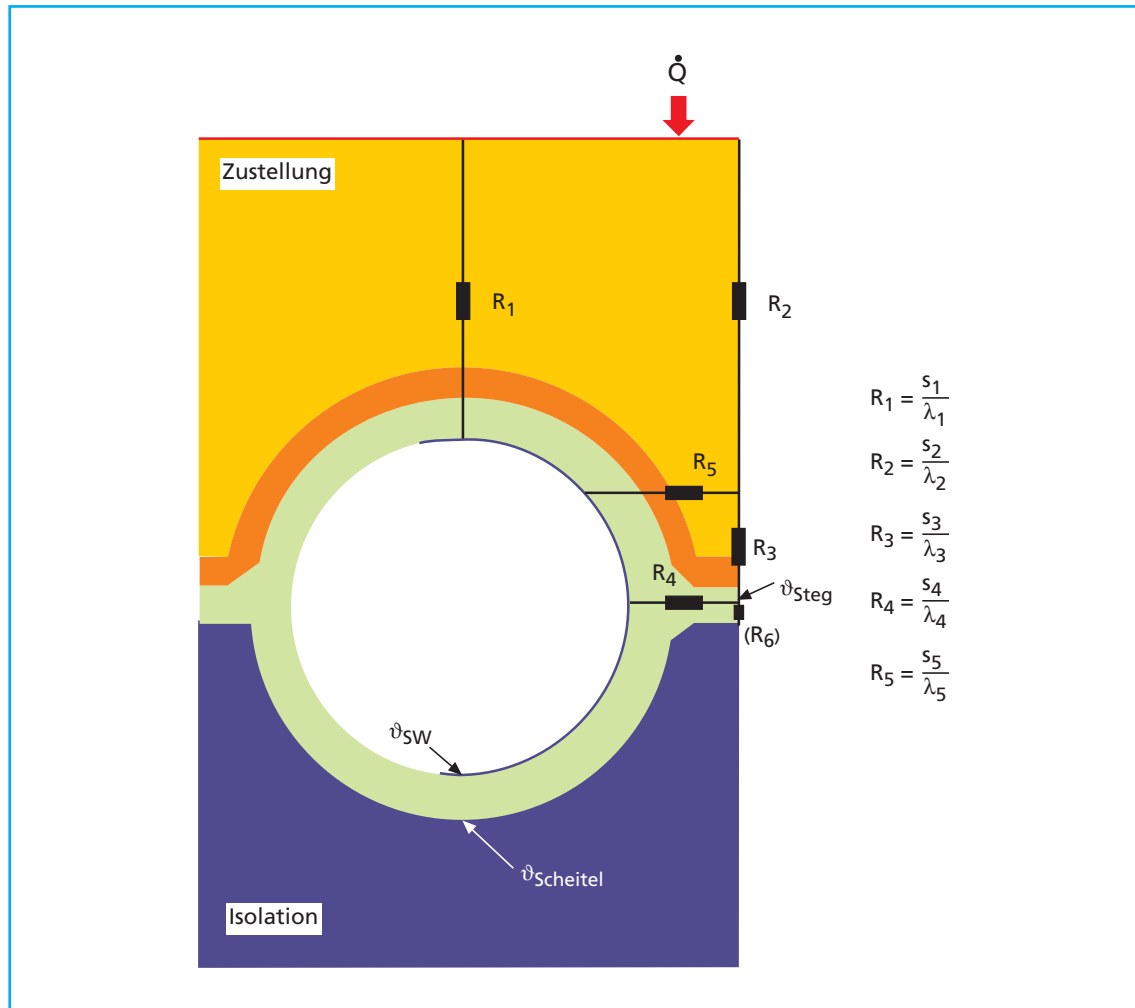


Bild 1: Ersatzschaltbild

Der Wärmestrom, der auf der Oberfläche der Zustellung im Bereich des Rohres eintritt, kann direkt über Wärmeleitung zum Siedewasser gelangen. Der Wärmestrom, der im Bereich des Steges auf der Zustellungsoberfläche eintritt, gelangt zu einem Teil in die Rohrflanke – dargestellt durch den Wärmeleitwiderstand R_5 (Bild 1). Ein weiterer Teil des Wärmestroms gelangt über den Steg zum Siedewasser – hier dargestellt durch den Wärmeleitwiderstand R_4 . Der Wärmeleitwiderstand R_4 beinhaltet zum einen den Wärmeleitwiderstand, der durch Wärmeleitung im Steg gebildet wird, zum anderen den Wärmewiderstand, der durch den konvektiven Übergang der Wärme zum Siedewasser hin zu Stande kommt. Somit kommt es hier zu einem *horizontalen* Wärmestrom im Steg. Da Wärme grundsätzlich von der höheren Temperatur zur niedrigeren *fließt*, muss die Stegtemperatur höher sein als die Temperatur des Siedewassers.

Der analytische Zusammenhang für das Ersatzschaltbild wird durch die Gleichung (1) wiedergegeben.

$$\vartheta_{Steg} = \left(\frac{s}{\lambda}\right)_4 \cdot \dot{q} \cdot \frac{\left(\frac{s}{\lambda}\right)_5}{\left(\frac{s}{\lambda}\right)_3 + \left(\frac{s}{\lambda}\right)_4 + \left(\frac{s}{\lambda}\right)_5} + \vartheta_{SW} \quad \text{bzw.} \quad \vartheta_{Steg} - \vartheta_{SW} = \dot{q} \cdot \left(\frac{s}{\lambda}\right)_{eff} \quad (1)$$

Gleichung (1) zeigt, dass sich die Stegtemperatur bei bekanntem Wandaufbau und gegebener Siedewassertemperatur ϑ_{SW} als eine Funktion des aufgeprägten Wärmestroms darstellen lässt.

Mit Hilfe dieses wärmetechnischen Zusammenhangs besteht nun die Möglichkeit, aus der Differenz zwischen der Stegtemperatur und der Siedewassertemperatur den spezifischen Wärmestrom, der in die Wand eintritt, zu bestimmen. Aus praktischen Gründen wird allerdings anstatt der Siedewassertemperatur die Temperatur des äußeren Rohrscheitels zur Bestimmung der Temperaturdifferenz¹ herangezogen.

2. Versuchsaufbauten

Im Folgenden werden Versuchsanordnungen dargestellt und beschrieben, die zum einen die Validierung einer Wärmestromdichtemessung mittels Temperaturdifferenzmessung und zum anderen die messtechnische Erfassung von kleinen Temperaturdifferenzen auf der Rückseite der Membranwand ermöglichen.

2.1. Versuchsaufbau zur Validierung der Wärmestromdichtemessung

Zur Überprüfung der in Kapitel 1 dargestellten Modellvorstellung zur Temperaturverteilung im Wandaufbau und auf der Rückseite von Membranverdampferwänden wurde eine Versuchsanlage (Fließschema, Bild 2) aufgebaut.

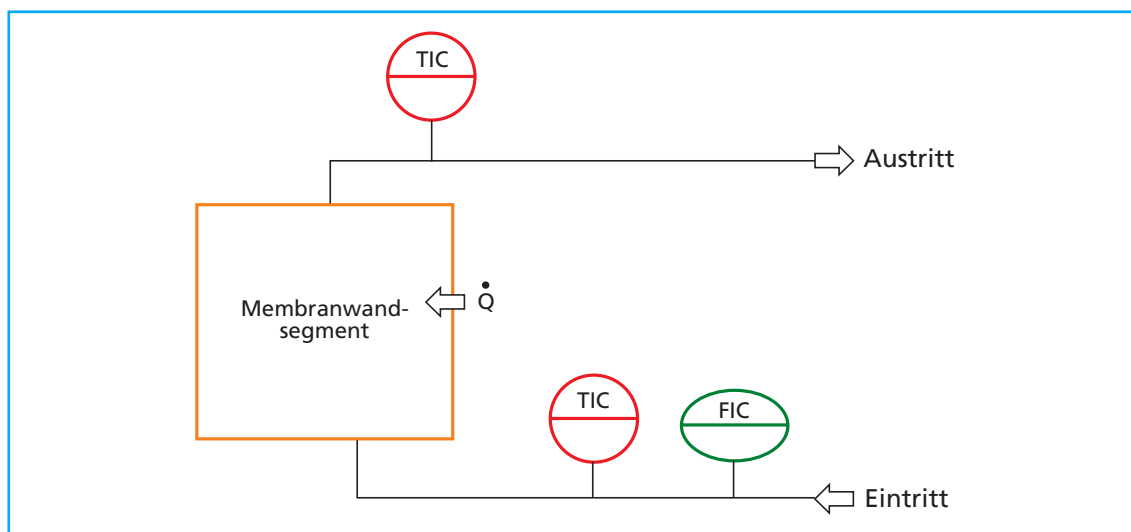


Bild 2: Schematischer Aufbau des Versuchsaufbaus zur Validierung der Online-Wärmestromdichtemessung

¹ Die Temperaturdifferenz zwischen Steg und Scheitel wird im Folgenden als $\Delta\vartheta_{Steg-Scheitel}$ bezeichnet.

An der Versuchsanlage können Wärmestromdichten mittels Bilanzierung der zugeführten Energie je Zeit und Fläche ermittelt werden. Gleichzeitig werden die Temperaturdifferenzen $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ an der Rückseite der Membranwand messtechnisch erfasst [1].

An der Versuchsanlage werden u.a. der Volumenstrom und die Temperaturdifferenz des Arbeitsmediums am Eintritt und am Austritt der Anlage gemessen (Bild 2). Aus Gleichung (2) kann der eingebrachte Wärmestrom über eine Bilanz ermittelt werden.

$$\dot{Q} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot \dot{V}_{\text{Wasser}} \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot (T_{\text{Eintritt}} - T_{\text{Austritt}}) \quad (2)$$

Die Durchflussmenge wird entsprechend der eingebrachten Leistung so eingestellt, dass die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt nur wenige Grad beträgt, um den Bedingungen, die im Verdampfer herrschen, möglichst nahe zu kommen.

2.2. Messtechnik zur Erfassung kleiner Temperaturdifferenzen ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$)

Wie aus Kapitel 1 ersichtlich ist, kommt es bei der in diesem Beitrag vorgestellten Wärmestromdichtemessung auf die genaue Bestimmung von Temperaturdifferenzen auf der Rückseite der Membranwand an. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Verfahren und Anordnungen zur Temperaturmessung untersucht worden. Da in [1] ausführlich über die unterschiedlichen Möglichkeiten und Installationsvarianten berichtet wurde, wird hier nur noch die nun implementierte Messtechnik und deren Validierung dargestellt.

Die Temperaturdifferenz wird über die unmittelbare Nutzung des Thermoelektrischen-Effektes durch *aufgepunktete* Konstantandrähte ermittelt.

Zur Bestimmung der Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$) lässt sich analog zu einem Thermoelement der *thermoelektrische Effekt* zur Erzeugung von Thermospannungen ausnutzen. Anders als bei einem herkömmlichen NiCrNi-Thermoelement wird in dem hier vorliegenden Anwendungsfall die Thermospannung zwischen dem Grundmaterial – Membranwand – und einem Konstantandraht erzeugt (Bild 3 a).

Die Thermospannung entsteht hierbei nur im Berührungspunkt des Konstantandrahtes mit dem Grundmaterial. Werden – wie in Bild 3 a gezeigt – mehrere Konstantandrähte auf dem Grundmaterial aufgebracht – z.B. auf dem Steg und dem Scheitel –, so können Thermospannungsdifferenzen entsprechend den unterschiedlichen Temperaturen der Kontaktpunkte an der Membranwand gemessen werden. Um den Zusammenhang zwischen den gemessenen Thermospannungsdifferenzen und den zugehörigen Differenztemperaturen ermitteln zu können, wurden die Temperaturen des Steges und des Scheitels mit Pt100 Widerstandsthermometern gemessen.

Pt100-Sensoren weisen in dem hier vorliegenden Temperaturbereich eine hohe Genauigkeit auf und sind für die Zuordnung von Temperaturen zu den mit den *aufgepunkteten* Konstantandrähten bestimmten Thermospannungen

– Thermokraft – verwendet worden (Kapitel 2.3.). Da der Sensor dabei auf ein gut leitendes Grundmaterial aufgebracht ist und die Erwärmungsleistung des Pt100 Sensors 0,1 mW beträgt, kann der Einfluss der Eigenerwärmung vernachlässigt werden.

Für den Einsatz in der Praxis sind Pt100 Sensoren zu Bestimmung der Temperaturen jedoch aus verschiedenen Gründen – z.B. Schwierigkeiten beim elektrischen Anschluss sehr kleiner Sensoren, erforderliche Messumformer – weniger gut geeignet.

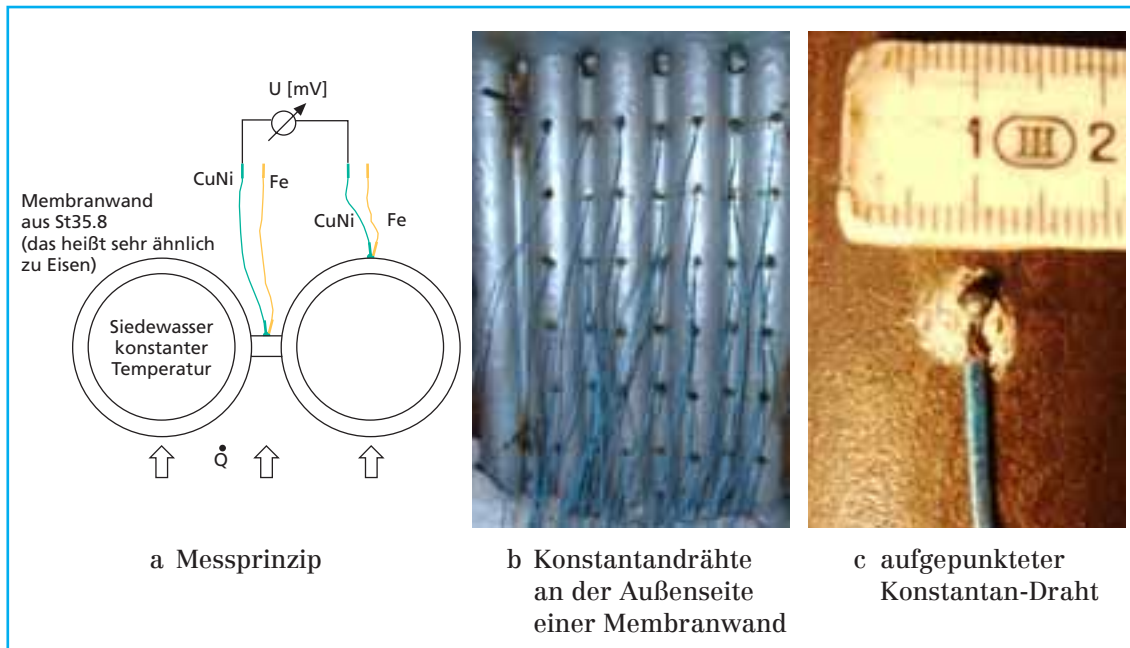


Bild 3: Messtechnik zur Erfassung kleiner Temperaturdifferenzen ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$)

2.3. Kalibrierung der Temperaturdifferenzmessung

Zur Kalibrierung der Temperaturdifferenzmessung werden zeitgleich das thermoelektrische Potential (mit Konstantandrähten) und die wahren Temperaturen (mit Pt100 Widerstandsthermometern) zweier Messstellen mit unterschiedlichen Temperaturen aufgezeichnet. Bild 4 zeigt die Differenztemperatur $\Delta\vartheta_{\text{Pt100}}$ der Widerstandsthermometer über dem thermoelektrischen Potential. Die Messwerte in Bild 4 zeigen einen sehr guten linearen Zusammenhang zwischen der Thermodifferenzspannung und der Temperaturdifferenz. Bild 4 zeigt den messtechnisch erfassten Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz der Pt100 Sensoren und dem thermoelektrischen Potential. Im Verlauf der Kalibrierung werden die beiden Messstellen abwechselnd erwärmt und abgekühlt. Für das thermoelektrische Potential bedeutet dieser Vorgang aus messtechnischer Sicht einen Nulldurchgang. Der in Bild 4 dargestellte lineare Zusammenhang zwischen dem thermoelektrischen Potential und der Temperaturdifferenz der Pt100 Sensoren zeigt bei dem beschriebenen Nulldurchgang keine Unstetigkeit. D.h. das in Bild 3 dargestellte Messverfahren kann für die Erfassung kleinster Temperaturdifferenzen angewendet werden.

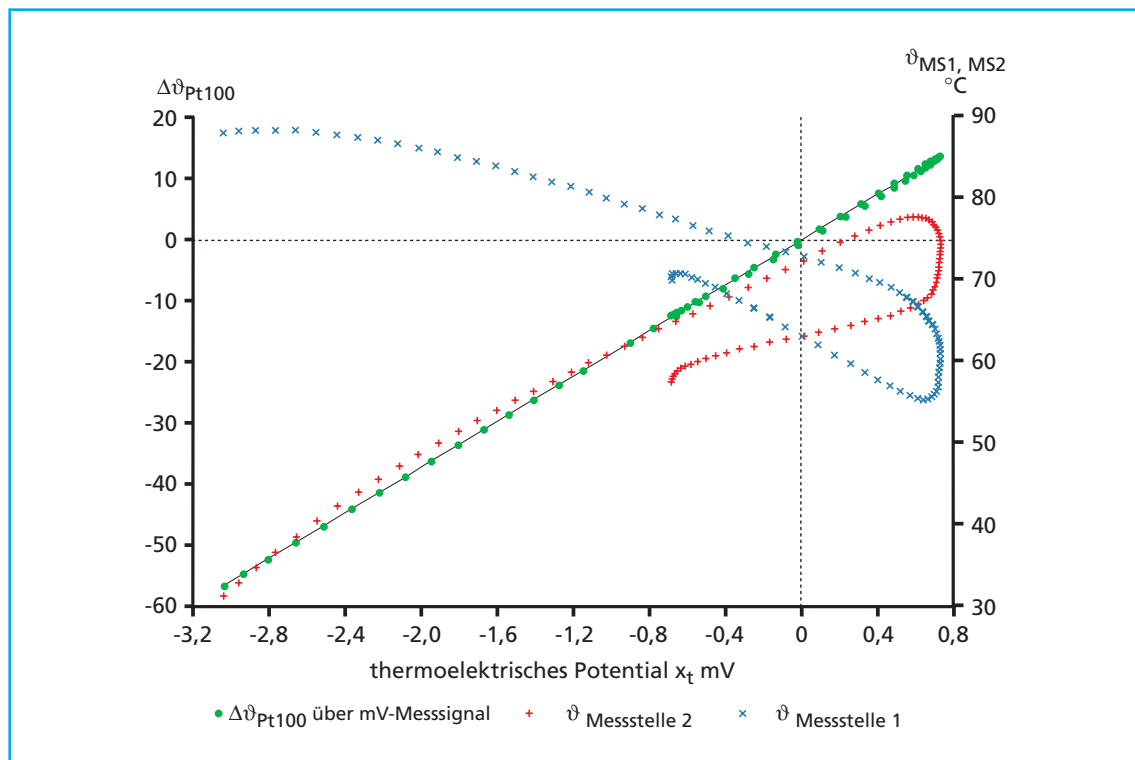


Bild 4: Darstellung der gemessenen Temperaturdifferenz über dem thermoelektrischen Potential

Abweichungen der Messpunkte ($\Delta\vartheta_{\text{Pt100}}$ über mV-Messsignal) von der Kalibriergeraden treten auf, wenn die Temperaturänderung einer Messstelle in zu kurzer Zeit erfolgt. D.h. selbst die geringe Masse des Pt100 Sensors bzw. des Verbindungspunktes zwischen Konstantendraht und Grundmaterial kann bei instationären Erwärmungs- bzw. Abkühlvorgängen zu einer Verfälschung der Kalibriergeraden führen.

3. Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte und Vergleich mit Versuchsergebnissen

Wie in Kapitel 1 erläutert, stellt sich auf der Rückseite der Membranwand eine bestimmte Temperaturdifferenz ein. Diese Temperaturdifferenz ist vom Wandaufbau und der Wärmestromdichte abhängig.

Analog zu dem Wandaufbau der Versuchsanlage ist ein mathematisches Modell (FemLab) [1] erarbeitet worden, mit dem u.a. der Wandaufbau eines Membranwandsegmentes mit einer hintergossenen JuSyS SL-Platte [4, 5] numerisch simuliert wurde.

Bild 5 zeigt beispielhaft die numerische Simulation des stationären Temperaturfeldes für eine JuSyS SL-Platte. In dem numerischen Modell können verschiedene Wärmestromdichten aufgeprägt werden. An der Außenseite der Membranwand ergibt sich dann – wie bereits erwähnt – eine im Vergleich zum äußeren Rohrscheitel erhöhte Stegtemperatur.

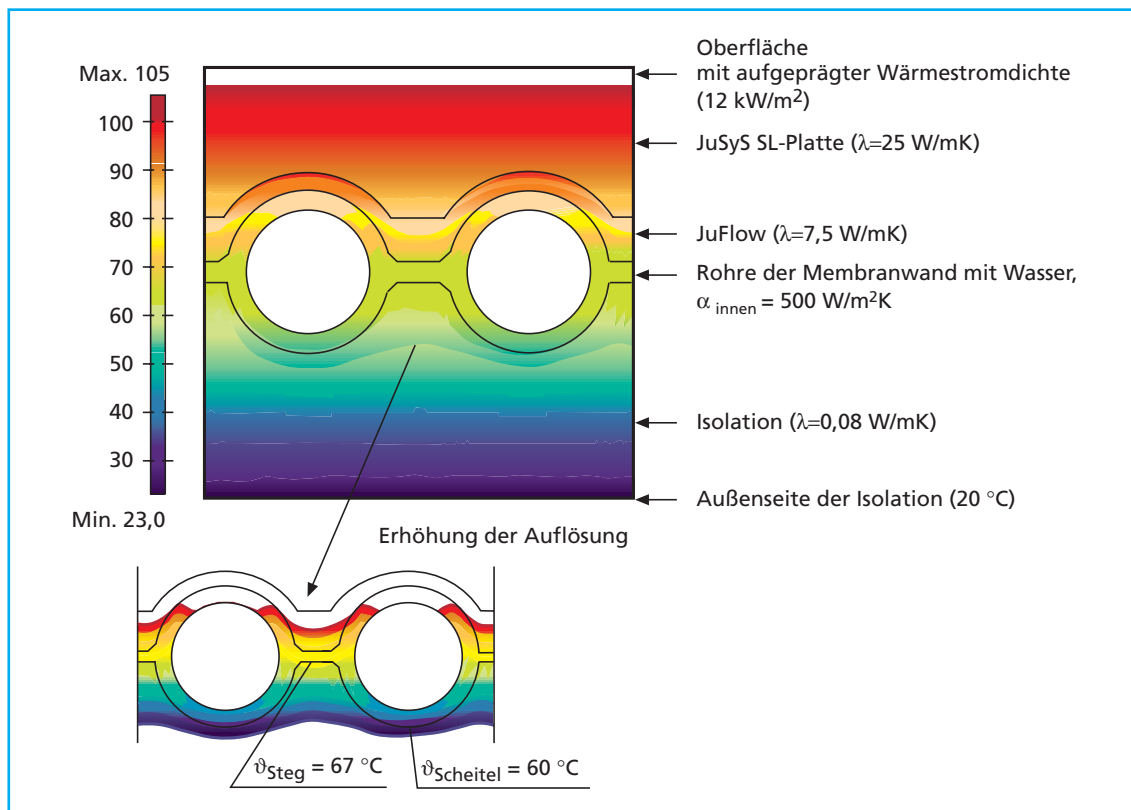


Bild 5: Temperaturverteilung in einem Membranwandquerschnitt bestehend aus JuSys SL-Platte, Kitt, Membranwand und Isolation

Beim Auftragen der aufgeprägten Wärmestromdichte über den berechneten Temperaturdifferenzen zwischen Steg- und Scheiteltemperatur (Bild 6 a) zeigt sich ein linearer Zusammenhang, wie er aufgrund der Gleichung (1) zu erwarten ist. Die Steigung der Gerade ist spezifisch für das betrachtete System, d.h. für bestimmte Membranwandaufbauten – unterschiedliche Teilung, Platten, Massen, Beschichtungen usw. – und für bestimmte Wärmeübergänge auf der Innenseite der Siederohre². Somit können die mit dem mathematischen Modell berechneten Geraden als Systemkenngeraden bezeichnet werden. Dabei ist entscheidend, dass bei einem belegten System mit Feuerfestplatten oder Feuerfestmassen die Systemkenngeraden weiterhin verwendet werden können [1].

Aus den Versuchen lässt sich eine Systemkenngerade auch als Ergebnis der Bilanzierung ermitteln.

Bild 6 b zeigt die über die Bilanz bestimmte Wärmestromdichte über der gemessenen Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$). Gut zu erkennen ist der lineare Zusammenhang zwischen eingebrachter Leistung und gemessener Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$. Die Systemkenngerade der numerischen Simulation und die experimentell aus der Bilanz bestimmte Systemkenngerade stimmen in ihrem Anstieg überein. Mit der Systemkenngeraden (Bild 6 a) aus der numerischen Simulation und der experimentell ermittelten Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$) kann somit direkt der spezifische Wärmestrom bestimmt werden.

² In den Membranrohren der Versuchsanlage herrscht eine Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion. Im Verdampfer eines Dampferzeugers wird die Konvektion maßgeblich durch das turbulente Blasenieden in den Rohren beeinflusst.

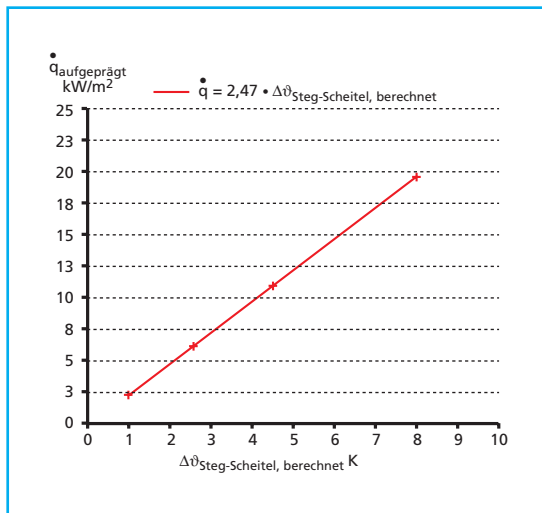


Bild 6 a: Systemkenngerade für ein JuSyS SL-System aus numerischer Simulation

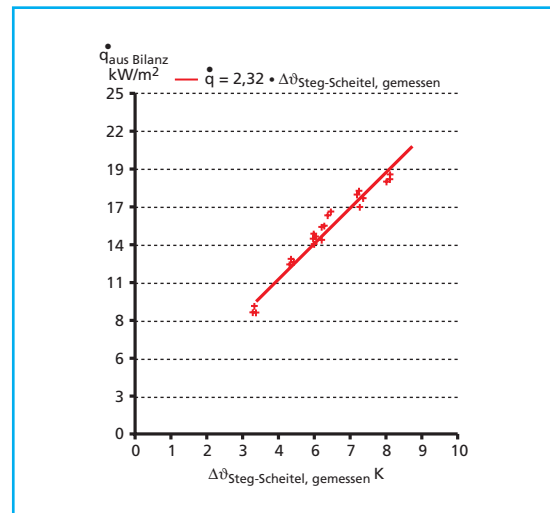


Bild 6 b: Systemkenngerade für ein JuSyS SL-System aus Versuch und Bilanzierung

Im Folgenden wird auf den Praxiseinsatz der Messtechnik an zwei verschiedenen Dampferzeugern (Anlage 1 und Anlage 2) eingegangen.

4. Praxiseinsatz

Die Sensoren für die Wärmestrommessung wurden bereits in mehreren Praxisanlagen installiert und befinden sich derzeit in der Erprobung. Im Folgenden wird beispielhaft auf zwei Anwendungen und die zugehörigen Messergebnisse eingegangen.

4.1. Installation der Messtechnik, Beispiel 1 – Abfallverbrennungsanlage –

Auf der Außenseite der Vorderwand eines Dampferzeugers (Dampfleistung: 40 t/h) wurden etwa 8 m über der Sekundärluftzugabe an fünf Steg-Rohr-Paaren Thermoelemente aufepunktet (Bild 7 a). Die Kesselwand ist im Bereich der Temperaturmessungen mit einer SIC85 Karrelit-Masse zugestellt, die in einer *5er-Anordnung* aufgebracht ist (siehe auch Bild 11).



Bild 7 a: Ausschnitt der Kesselisolation zur Installation der Konstantandrähte

Die Thermodrähte sind bis zur Vergleichsstelle – Signaleingang Datenlogger – in Konstantan ausgeführt, um Signalverfälschungen und Parasitärspannungen beim Übergang auf andere Leitungswerkstoffe zu vermeiden.

Das Rechteck in Bild 7 b zeigt die lichte Messöffnung über der gesamten Breite der Vorderwand.

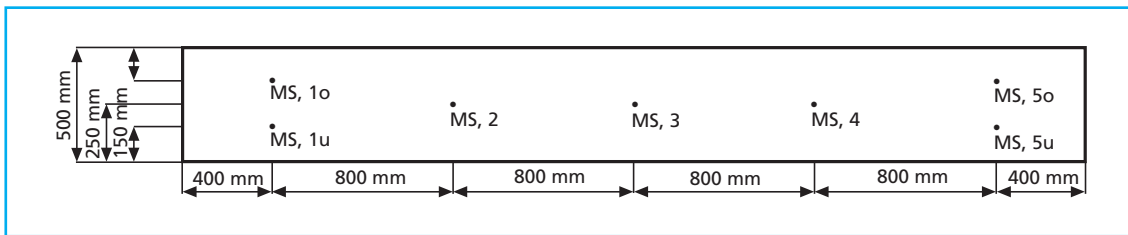


Bild 7 b: Anordnung und Nummerierung der Messstellen an der Membranwand für Beispiel 1 – Abfallverbrennungsanlage –

4.2. Messergebnisse, Beispiel 1

Die im Folgenden gezeigten und diskutierten Daten wurden während einer Anfahrphase aufgezeichnet. Während dieses Betriebszustandes wurde der Dampferzeuger erst mit Fremddampf beheizt und dann für einen langen Zeitraum mit den Stützbrennern betrieben. Im Folgenden werden verschiedene Charakteristiken der Messsignale³ und deren Ursprung diskutiert. Dabei wird eine Aufteilung in **betriebsbedingte Änderungen** und **systembedingte Schwankungen** unterschieden.

4.2.1. Betriebsbedingte Änderungen

Bild 8 zeigt die Messsignale der Messstellen 1 oben (MS,1o), 3 (MS,3) und 5 oben (MS,5o). Die Zuordnung der Messstellen zu den jeweiligen Orten kann Bild 7 b entnommen werden.

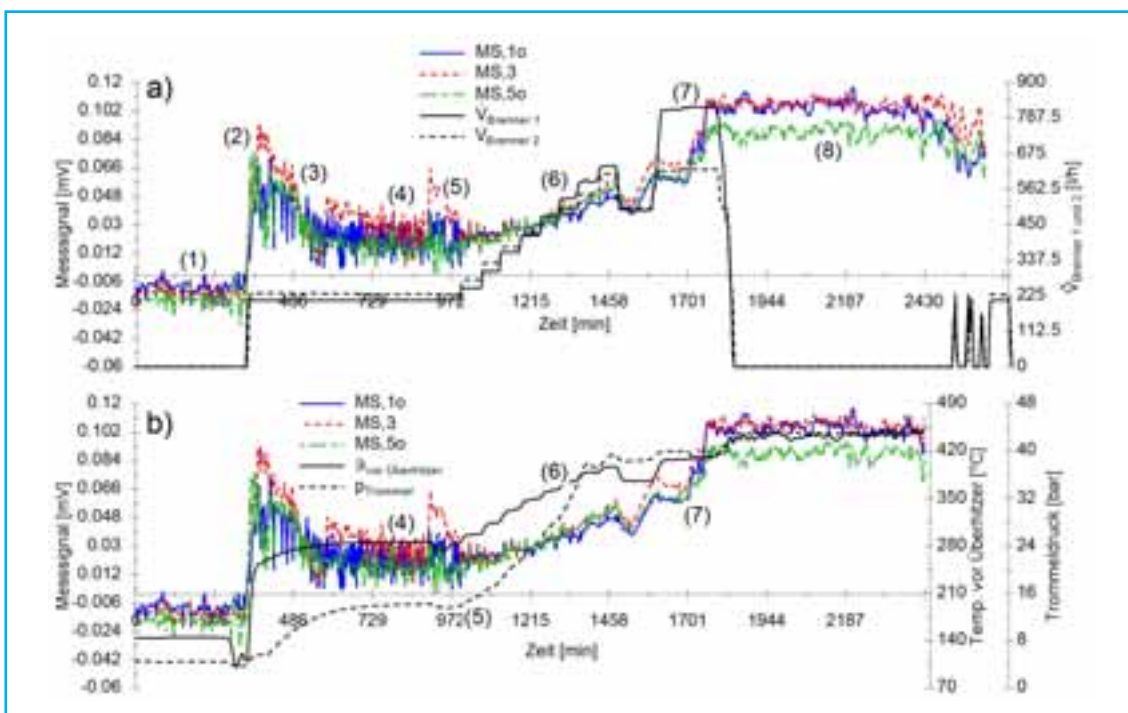


Bild 8: Messsignale, Beispiel 1 – Abfallverbrennungsanlage – Teil 1

³ Die Messsignale sind als Spannungssignale in mV dargestellt. Diese entsprechen Temperaturdifferenzen (Kapitel 2.3.) und verhalten sich proportional zu den Wärmestromdichten.

Vor dem Zünden der Brenner wurde der Dampferzeuger wie bereits erwähnt mit Fremddampf beheizt. In diesem Betriebszustand empfängt der Steg keinen Wärmestrom von der Feuerraumseite, wie es bei Normalbetrieb der Fall ist. Die Stege werden zu *Rippen*, die Wärme vom Rohr an den Wandaufbau abgeben. Die Stege weisen daher eine niedrigere Temperatur als die Rohre auf, die Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$) wird somit negativ, d.h. die aufgenommenen Messsignale sind mit negativen Vorzeichen behaftet (siehe (1), Bild 8 a).

Das Zünden der Brenner ist in Bild 8 a sehr gut durch den plötzlichen Anstieg der Kurven für die Ölvolumenströme ($\dot{V}_{\text{Brenner 1}}$ und $\dot{V}_{\text{Brenner 2}}$) zu erkennen. Analog zum sprunghaften Anstieg des Ölvolumenstromes wechseln die Messsignale der Temperaturdifferenzen ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$) ihre Vorzeichen. Die Stege weisen nun eine höhere Temperatur als die Rohre auf (siehe (2), Bild 8 a).

Bei gleich bleibender Brennerlast nehmen die Messsignale erst nach 4,5 h annähernd konstante Werte an (siehe (3), Bild 8 a). Das ist darauf zurückzuführen, dass mit dem Einschalten der Brenner eine Umstellung einer internen Wärmequelle – mit Dampf durchströmtes Rohr – zu einer externen Wärmequelle – Wärmestrom aus Verbrennung, Feuerraumseite – stattfindet. Zunächst muss eine weitere Erwärmung des gesamten Wandaufbaus – Ausmauerung, Membranwand und Siedewasser – mit entsprechenden Speichereffekten stattfinden (siehe (4), Bild 8 a). Dieser Vorgang ist aufgrund der Speichereffekte instationär. Auch die Gastemperatur vor Überhitzer (siehe (4), Bild 8 b) zeigt durch ihr langsames Ansteigen, dass hier ein instationärer Vorgang abläuft.

Bild 8 a zeigt bei (5) eine Fluktuation der Messsignale. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Anfahrchieber des Dampferzeugers (in Richtung des Überhitzers) geöffnet, was an einem Absinken des Trommeldruckes zu erkennen ist. Aus Darstellungsgründen wurde hierzu der relevante Bereich in Bild 9 vergrößert, um das Absinken des Trommeldruckes besser zu verdeutlichen. Es ist zu erwarten,

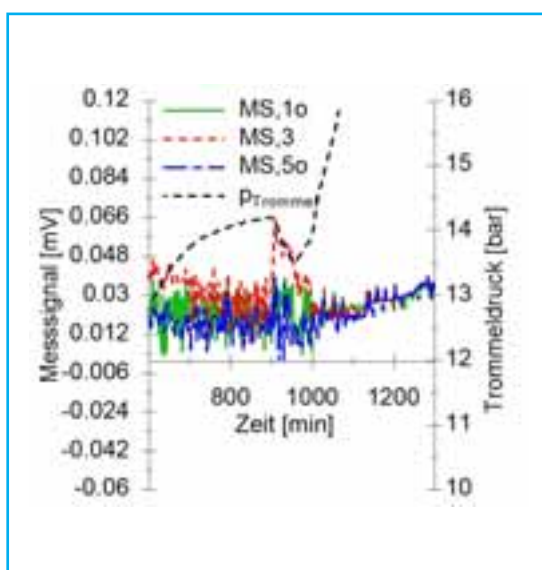


Bild 9: Korrelation des Trommeldruckes und der Messdaten

den, dass bei Absinken des Systemdruckes eine vermehrte Dampfbildung stattfindet. Damit einhergehend stellen sich eine Temperaturänderung und veränderte Wärmeübergangsbedingungen an der Innenseite des Siederohres ein. Die Fluktuationen der Messsignale in diesem Zeitabschnitt sind auf diesen Vorgang zurückzuführen (siehe (5), Bild 8 b und Bild 9).

Im weiteren Verlauf des Anfahrvorgangs ist deutlich der Zusammenhang zwischen der gesteigerten Brennerlast, der steigenden Gastemperatur und der Messsignale zu erkennen (siehe (6), Bild 8 a und b).

Während der zweiten Hälfte des Brennevolllastbetriebes wird der Abfall aufgegeben (siehe (7), Bild 8 a). Deutlich zu sehen ist hier ein Anstieg der Messsignale (siehe (7), Bild 8 a und b). In diesem Zeitabschnitt ist dann eine Korrelation zwischen der Brennerlast und den Messsignalen nur noch schwer heraus zu arbeiten, da die in die Wand eintretende Wärmestromdichte zum einen durch die Ölverbrennung und zum andern durch die Verbrennung des Abfalls gebildet wird.

4.2.2. Systembedingte Schwankungen

Bei dieser Art der Schwankung handelt es sich um Änderungen der Wärmestromdichte aufgrund von Einflussgrößen innerhalb des Systems Membranwand (z.B. unterschiedliche Siedezustände oder Strömungszustände in den Verdampferrohren). Beispielhaft sei auf den bleibenden Unterschied in den Messsignalen bei konstanter Kessellast (siehe (8), Bild 8 a) verwiesen. Zur Interpretation dieser Fluktuationen werden im Folgenden besonders benachbarte Messstellen betrachtet.

Bild 10 zeigt die Messwerte der Messstellen MS,1o, MS,1u, MS,5o und MS,5u (siehe auch Bild 7 b). Die Messstellen MS,1o und MS,1u sind in etwa 200 mm vertikaler Entfernung von einander angebracht. Wie Bild 10 zeigt, sind die Werte der Messsignale der genannten Messstellen während des Brenner gestützten Anfahrvorgangs nahezu identisch (siehe (1), Bild 10 a). Während der Laststeigerung der Brenner driften die Messsignale der benachbarten Messstellen MS,1o und MS,1u auseinander (siehe (2), Bild 10 a). Beim Betrieb des Dampferzeugers mit Abfall zeigt Bild 10 a eine deutliche, nahezu gleich bleibende Differenz der Messsignale der Messstellen MS,1o und MS,1u (siehe (3), Bild 10 a).

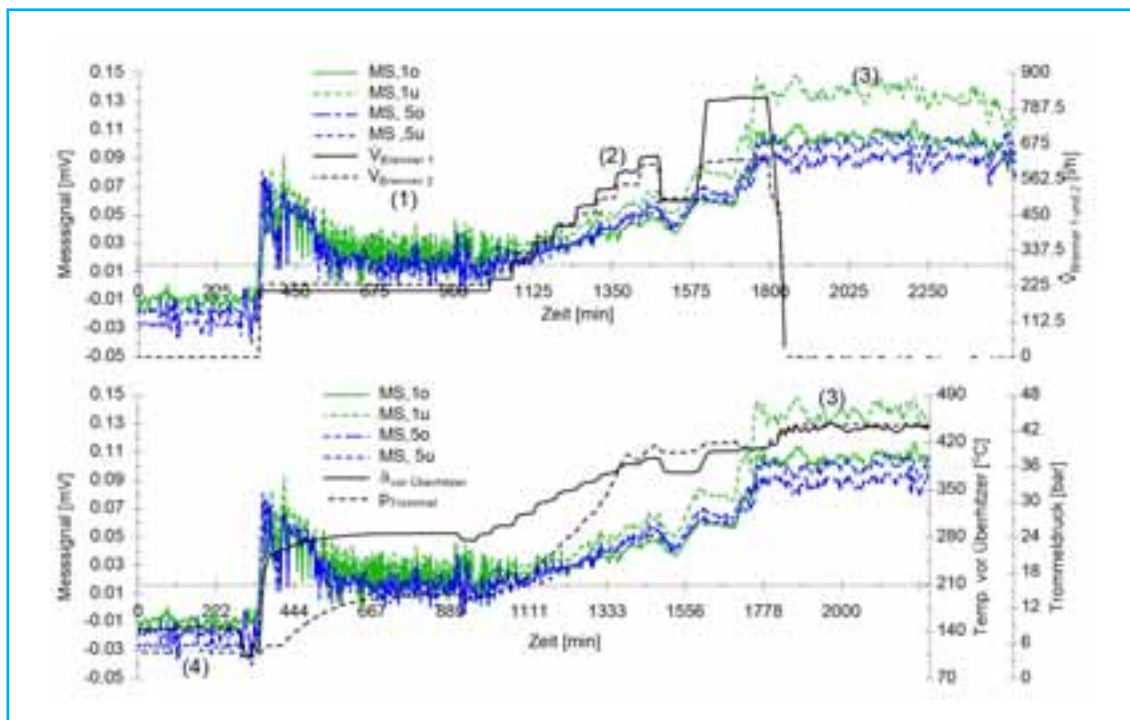


Bild 10: Messsignale, Beispiel 1 – Abfallverbrennungsanlage – Teil 2

Die Gastemperatur vor Überhitzer und der Trommeldruck sind, wie Bild 10 b zu entnehmen, während dieses Zeitabschnitts nahezu konstant.

Die Messstellen MS,5o und MS,5u – hier ebenfalls 200 mm vertikaler Abstand voneinander – weisen ein ähnliches Verhalten auf. Allerdings ist hier schon während der Betriebsphase mit Fremddampf ein Unterschied in der Signalstärke zu erkennen. Die Messsignale zeigen, dass an der Messstelle MS,5u sowohl während der Anfahrphase (siehe (4), Bild 10 b) als auch während des regulären Betriebs eine höhere Wärmestromdichte vorliegt als an den anderen Messstellen.

Im Folgenden soll ein Überblick über die möglichen Ursachen für die systembedingten Schwankungen gegeben werden.

- Unterschiedliche Wärmeübergangsbedingungen an der Kesselinnenseite

Die untersuchte Fläche und die Abstände zwischen den Messstellen (z.B. zwischen MS,1o und MS,1u) sind zu klein, um Differenzen von 35 Prozent bezüglich der Signalstärke zu erhalten (vgl. MS,1o und MS,1u, siehe (3), Bild 10 a).

- Konstruktive Unregelmäßigkeiten im Wandaufbau

Für diese Erklärung der Signalabweichungen spricht, dass durch die Bestiftung in einer *5er-Anordnung* auf der Kesselinnenseite (Bild 11) abhängig von der Höhe über den Siederohren unterschiedliche Wandaufbauten entstehen. Somit ergibt sich für jede Höhe eine unterschiedliche Systemkenngerade. An welcher Stelle die Thermoelemente installiert sind, kann während des Kesselbetriebs nicht nachvollzogen werden. Zur Klärung des Einflusses der Bestiftung wurde eine 3D-FEM Simulation angefertigt (Bild 11).

Bild 11 zeigt, dass die Art der Bestiftung keinen nennenswerten Einfluss auf die Temperaturdifferenzen der verschiedenen Messstellen haben kann. Die berechneten Stegtemperaturen sind, wie Bild 11 zeigt, im Schnittbereich A sowie B identisch (bei einer Wärmestromdichte von 20 kW/m²).

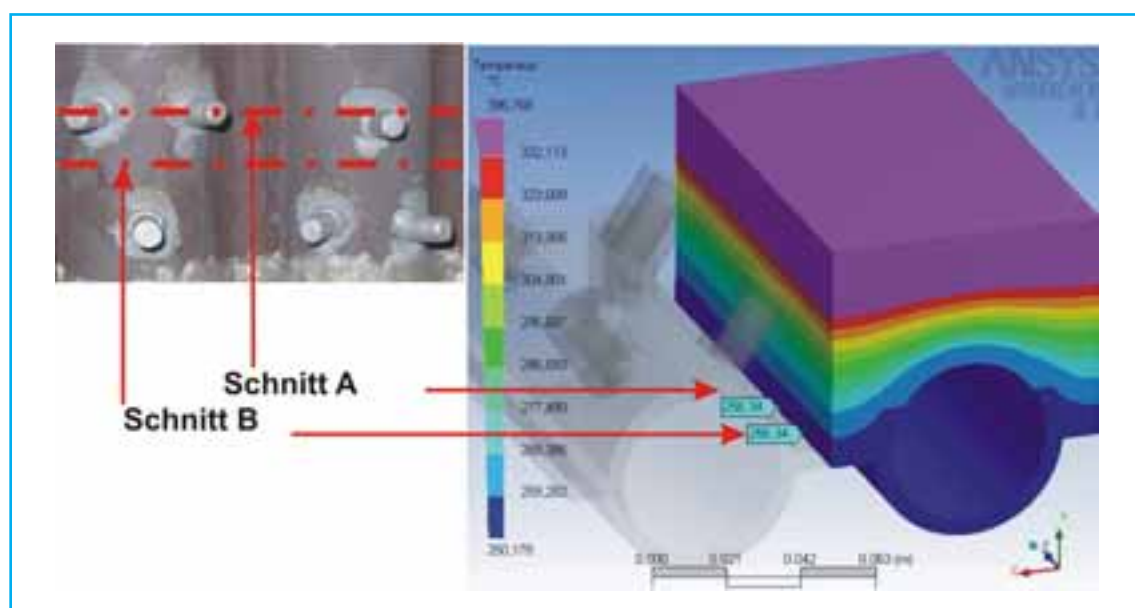


Bild 11: 3D-Simulation einer zugestellten Membranwand mit 80 mm Teilung

Eine weitere Ursache für die systembedingten Schwankungen können unregelmäßige Schichtdicken – manueller Installationsvorgang –, schlecht abgebundene Stellen oder Bereiche mit unterschiedlicher Porosität der Feuerfestauskleidung sein. Die genannten Effekte können zu einer Verzerrung des Temperaturprofils führen.

- Wärmestromabhängige Unregelmäßigkeiten im Wandaufbau (→ mechanische Verformungen)

Systembedingte Schwankungen können aufgrund von wärmestromabhängigen Unregelmäßigkeiten im Wandaufbau verursacht werden.

Wärmestromabhängige Unregelmäßigkeiten im Wandaufbau können sich aufgrund von Verformungen von Feuerfestprodukten während des Kesselbetriebs ergeben, da sich die Zustellung bei thermischer Belastung ausdehnt. Da die Zustellung an der Oberfläche eine höhere Temperatur aufweist als das rohrnahe Material, kann es zu einem Ablösen oder Aufwölben von Feuerfestmaterial von der Membranwand kommen [3]. Zur quantitativen Einschätzung des aufgezeigten Zusammenhangs sind Untersuchungen an der Technikanlage erforderlich.

- Unterschiedliche Siedezustände in den Rohren der Membranwand

Wie bereits erwähnt, können die systembedingten Schwankungen durch unterschiedliche Siedezustände in der Membranwand hervorgerufen werden. Z.B. besteht die Möglichkeit, dass die Rohre der Membranwand aufgrund konstruktiver Gegebenheiten – Ausbiegungen der Rohre an Schau-luken und Messstutzen, Verzweigungen von Rohren kurz nach den Anschlüssen an den Sammlern, o.ä. – unterschiedlich gut durchströmt werden. Die Folge unterschiedlicher Durchströmung würde sich z.B. in einer Veränderung der Siedetemperatur im Rohr bemerkbar machen.

4.3. Installation der Messtechnik, Beispiel 2 – Biomasseverbrennungsanlage –

Eine weitere Installation von Thermoelementen wurde an einem Biomasse befeuerten Dampferzeuger vorgenommen (Dampfleistung: 80 t/h). Die Installation wurde u.a. im ersten Strahlungszug an der rechten Seitenwand durchgeführt, die Messstellen sind in Bild 12 dargestellt.

Die gezeigte Membranwand ist bis zu einer Höhe von neun Metern über dem Seitenwandsammler mit einer Aufschweißung (Cladding) beschichtet (Bild 12). Darüber schließt sich eine nicht beschichtete Rohrwand an. Für beide Fälle des Wandaufbaus sind jeweils die Querschnitte in Bild 13 a (aufgeschweißt) und Bild 13 b (nicht beschichtet) dargestellt.

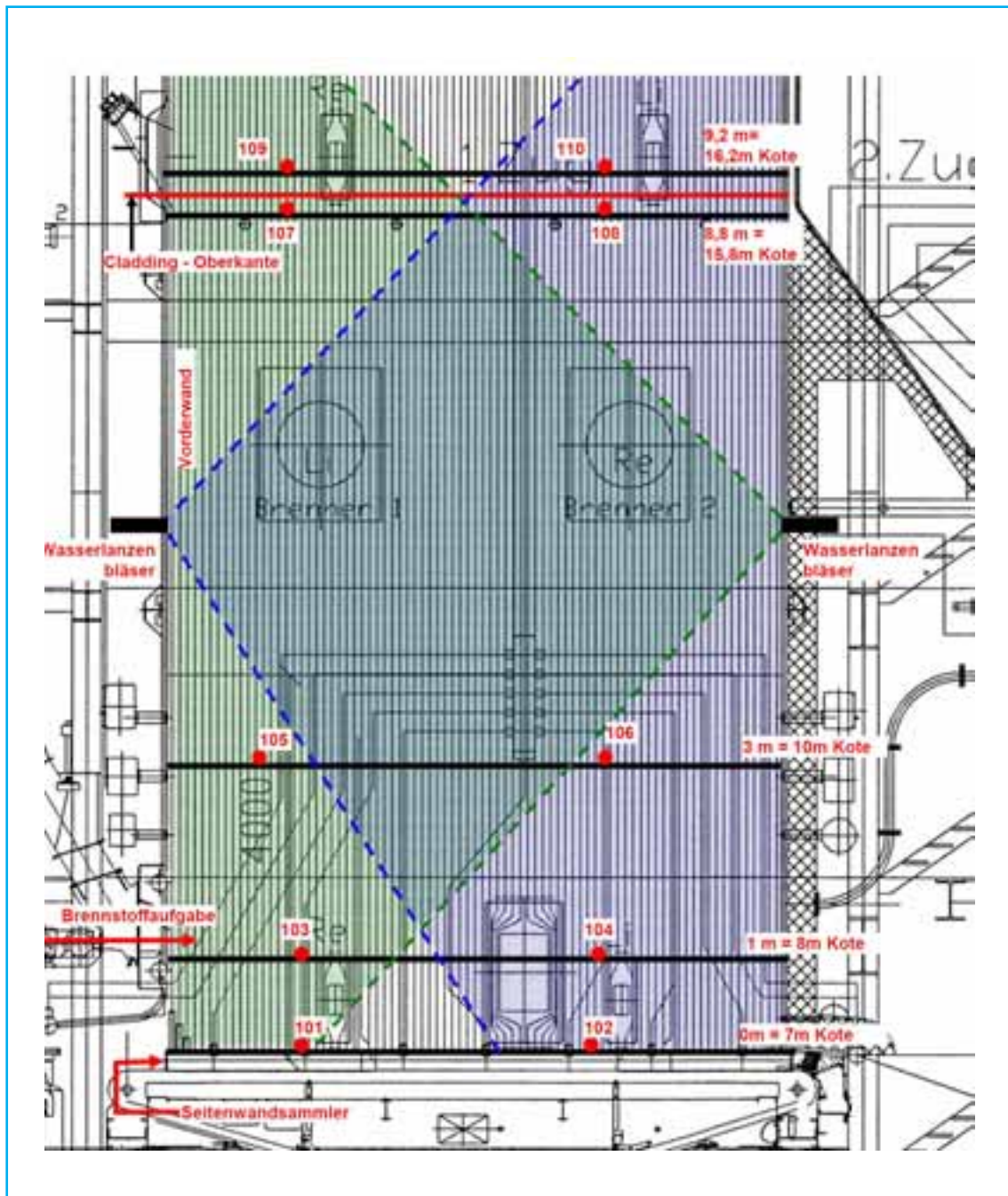


Bild 12: Anordnung und Nummerierung der Messstellen an der Membranwand und Darstellung der Abreinigungsbereiche für Beispiel 2 – Biomasseverbrennungsanlage –

Der Dampferzeuger ist im ersten Zug mit Wasserlanzenbläsern an der Vorder- und Rückwand zur Online-Reinigung der Membranverdampferwände ausgestattet (Bild 12). Die Bereiche an der Seitenwand der Anlage, die von der Online-Reinigung erfasst werden, sind in Bild 12 grün (Erfassungsbereich des rückseitigen Wasserlanzenbläserters an der Seitenwand) und blau (Erfassungsbereich des vorderseitigen Wasserlanzenbläserters an der Seitenwand) dargestellt.



a Rohrwand mit Aufschweißung



b nicht beschichtete Rohrwand

Bild 13: Wandaufbauten, Beispiel 2 – Biomasseverbrennungsanlage –

4.4. Messergebnisse, Beispiel 2 – Biomasseverbrennungsanlage –

Bei den im Folgenden gezeigten und diskutierten Daten soll speziell auf die Wirkung der Online-Reinigung auf die Messsignale der Wärmestromdichtemessung eingegangen werden. Die durch die Online-Reinigung hervorgerufenen charakteristischen Änderungen der Messsignale können den betriebsbedingten Änderungen (siehe Kapitel 4.2.1.) zugeordnet werden.

Die Bilder 14 a und b zeigen die Messsignale der Messstellen MS,106, MS,108 und MS,110 (siehe auch Bild 12). An den Messsignalen der Bilder 14 a und b ist deutlich die Auswirkung der Online-Reinigung auf die Messsignale zu sehen. Mit dem Reinigungszyklus steigen die Messsignale sprunghaft und simultan an.

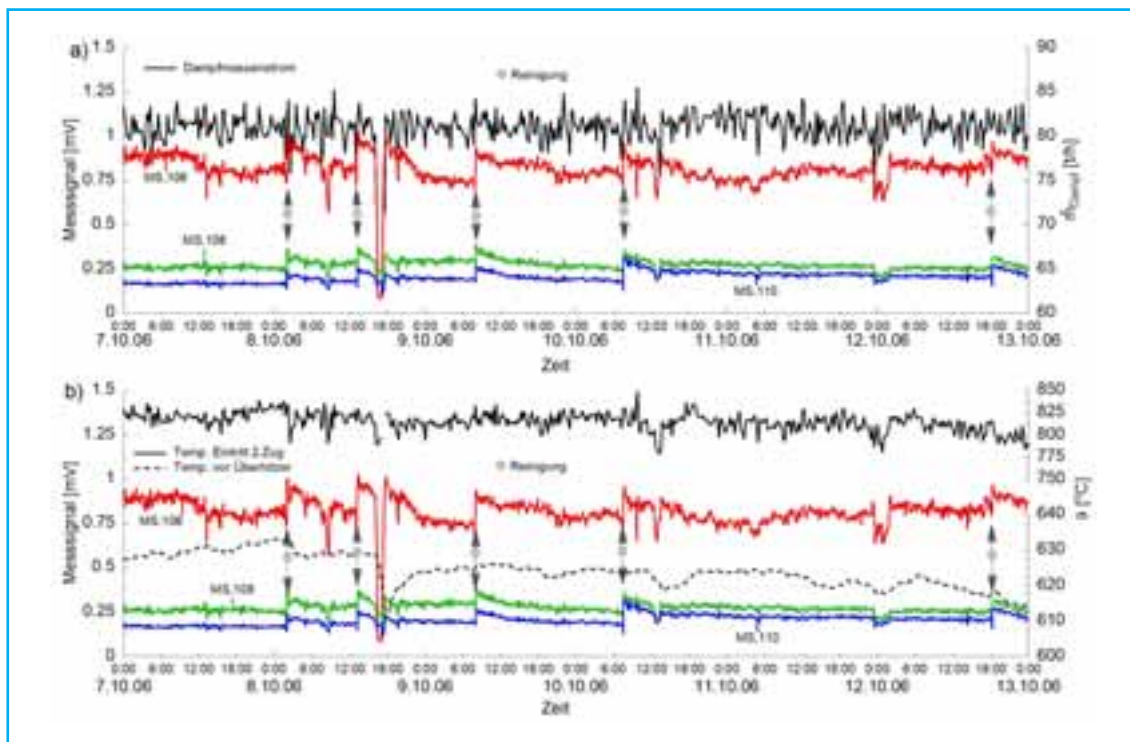


Bild 14: Messsignale, Beispiel 2 – Biomasseverbrennungsanlage –

Nach der Reinigung nehmen die Messsignale wieder ab, was auf ein Anwachsen eines Belages auf der Membranverdampferwand schließen lässt.

Darüber hinaus zeigen die Diagramme der Bilder 14 a und b auch die Dampfleistung (Bild 14 a) und die Gastemperaturen im Eintritt zum zweiten Strahlungszug und vor dem Überhitzer (Bild 14 b). Deutlich zu sehen ist, dass die Messsignale der Wärmestromdichtemessung wesentlich stärker auf das Reinigen und das erneute Anwachsen der Beläge reagieren als die Dampfleistung und die Gastemperaturen.

Die Gastemperatur vor Überhitzer wird in vielen Fällen für die Beurteilung des Verschmutzungszustandes eines Dampferzeugers verwendet. Die in Bild 14 dargestellten Messergebnisse zeigen jedoch, dass die Messsignale der Wärmestromdichtemessung eine deutlichere Beurteilung des Belegungszustandes zulassen. Darüber hinaus kann an Hand der Messsignale zeit- und orts aufgelöst das Anwachsen der Beläge beobachtet werden.

Aus dem Vergleich der Messsignale untereinander können darüber hinaus Aussagen zu Bereichen unterschiedlicher Wärmeabgabe getroffen werden. So z.B. ist in Bild 14 zu sehen, dass im Bereich der Messstelle MS,106 im Vergleich zu den Messstellen MS,108 und MS,110 etwa die dreifache Wärmestromdichte an die Membranwand übergeht. Hieraus lassen sich Hinweise zum Temperaturabbau in den Strahlungszügen ableiten.

5. Zusammenfassung

Der Beitrag gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Entwicklung einer nicht invasiven Wärmestromdichtemessung. Die Temperaturdifferenz zwischen dem außenseitigen Steg und dem Scheitel der Membranwand gibt Aufschluss über die feuerraumseitige Wärmestromdichte auf die Membranwand. Dabei ist der Zusammenhang zwischen der Wärmestromdichte und Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ charakteristisch für bestimmte Membranwandaufbauten (Systemkenngerade). Zur Validierung der Wärmestromdichtemessung wurde ein Versuchsstand aufgebaut. Erste Versuche zeigen eine Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten Systemkenngeraden und numerisch ermittelten Systemkenngeraden. Die Messtechnik zur Bestimmung von Temperaturdifferenzen ($\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$) mit aufgepunkteten Konstantandrähten – auf Steg und Scheitel der Membranwand – wurde erfolgreich im Kraftwerksbetrieb installiert. Die ersten in der Praxis gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass betriebsbedingte Änderungen der Wärmestromdichte – hervorgerufen durch Brennerzündungen, Belagsbildung, Online-Reinigung usw. – mit dem Messsystem erfasst werden können. Zur weiteren Bestimmung von Ursachen systembedingter Schwankungen werden derzeit neben den Messungen in Kraftwerken auch Untersuchungen am Versuchsstand durchgeführt.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die finanzielle Unterstützung bei dem Projekt (Aktenkennzeichen: 23893-24) *Entwicklung eines Messsystems für die Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranwände von Dampferzeugern in Biomasseverbrennungsanlagen*.

6. Symbole und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

c	kJ/kgK	spezifische Wärme
m	–	Geradensteigung
\dot{q}	kW/m^2	Wärmestromdichte
\dot{Q}	kW	Wärmestrom
R	Ω	Wärmeleitwiderstand
s	m	Abstand
T	K	Temperatur
U	mV	Spannung
\dot{V}	m^3/s	Durchfluss
x_t	mV	thermoelektrisches Potential

Griechische Symbole

α	$\text{W/m}^2\text{K}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
ρ	kg/m^3	Dichte
Δ	–	Differenz

Indices

eff	effektiv
innen	Innenseite des Siederohres
Steg	Steg der Membranwand
Scheitel	Scheitel der Membranwand
SW	Siedewasser

7. Quellen

- [1] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. In: Born, M. (Hrsg.): Korrosionsforum. 2. Oktober 2005
- [2] Beckmann, M.; Krüger, S.: Online Heat Flux Measurement on Membrane Walls of Steam Generators of Municipal Solid Waste Incinerators. IT3 Conference, Houston, Texas, May 2005
- [3] Krüger, J.: Thermische und mechanische Beanspruchung von Feuerfestmaterialien in Müllverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, S. 565-580
- [4] Martin, K. U.: Moderne Systeme zur Feuerfestauskleidung in Müllverbrennungen und Biomassekesseln – heutiger Stand der Technik. Uhlig-Symposium, Goslar, 10./11. Februar 2005
- [5] www.jg-refractory-systems.com