

# **Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen**

Beckmann, M., Krüger, S., Bauhaus-Universität Weimar,  
Spiegel, W., CheMin GmbH Augsburg

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen zur Online-Wärmestrommessung .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Schichtweiser Wandaufbau .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Ersatzschaltbild .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Aufbau des Versuchsstandes.....</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Versuchsstand .....</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>Messtechnik zur Ermittlung von Temperaturdifferenzen (<math>\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}</math>) .....</b>	<b>7</b>
<b>3.3</b>	<b>Vergleich der eingesetzten Messtechnik .....</b>	<b>9</b>
<b>3.4</b>	<b>Bestimmung der Wärmestromdichte mittels Bilanzierung .....</b>	<b>12</b>
<b>3.5</b>	<b>Wärmestrombestimmung durch Messung des Temperaturgradienten in einem bekannten Material.....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen .....</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Quellen.....</b>	<b>16</b>

## 1 Einleitung

Für die thermische Behandlung von Abfällen 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 MVA sind u. a.:

- Erhöhung des Wirkungsgrades,
- Primärmaßnahmen gegen Schadstoffentwicklung,
- 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 Müllzusammensetzung eine plötzliche Heizwerterhöhung ein, so kann es kurzfristig zu einem entsprechenden 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. Hierdurch können z.B. geeignete Abreinigungszeitpunkte wesentlich genauer durch das Betriebspersonal festgelegt und damit Temperaturverschiebungen im Kessel mit entsprechenden Korrosionsfolgen im Überhitzerbereich vermieden werden.

In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst kurz auf die theoretischen Grundlagen der Wärmeflussmessung eingegangen.

Danach wird die für die Untersuchung von Membranwandsegmenten vorhandene Versuchsanlage vorgestellt und die zugehörige Messtechnik beschrieben. Insbesondere werden verschiedene Möglichkeiten der Temperaturmessung diskutiert. Weiter erfolgt eine Gegenüberstellung von Ergebnissen aus der mathematischen Modellierung mit den experimentellen Ergebnissen.

## 2 Theoretische Grundlagen zur Online-Wärmestrommessung

Im Folgenden soll das Funktionsprinzip der Online-Wärmestrommessung vorgestellt werden. Grundlage hierfür ist zunächst ein theoretisches Modell zur Beschreibung der stationären Wärmeleitung, das sich selbstverständlich auf instationäre Vorgänge erweitern lässt.

### 2.1 Schichtweiser Wandaufbau

Der Wandaufbau einer Membranverdampferwand kann, wie Abb. 1 zeigt, aus mehreren Schichten (z.B. Feuerfestplatte, Kitt und Stahl) bestehen.

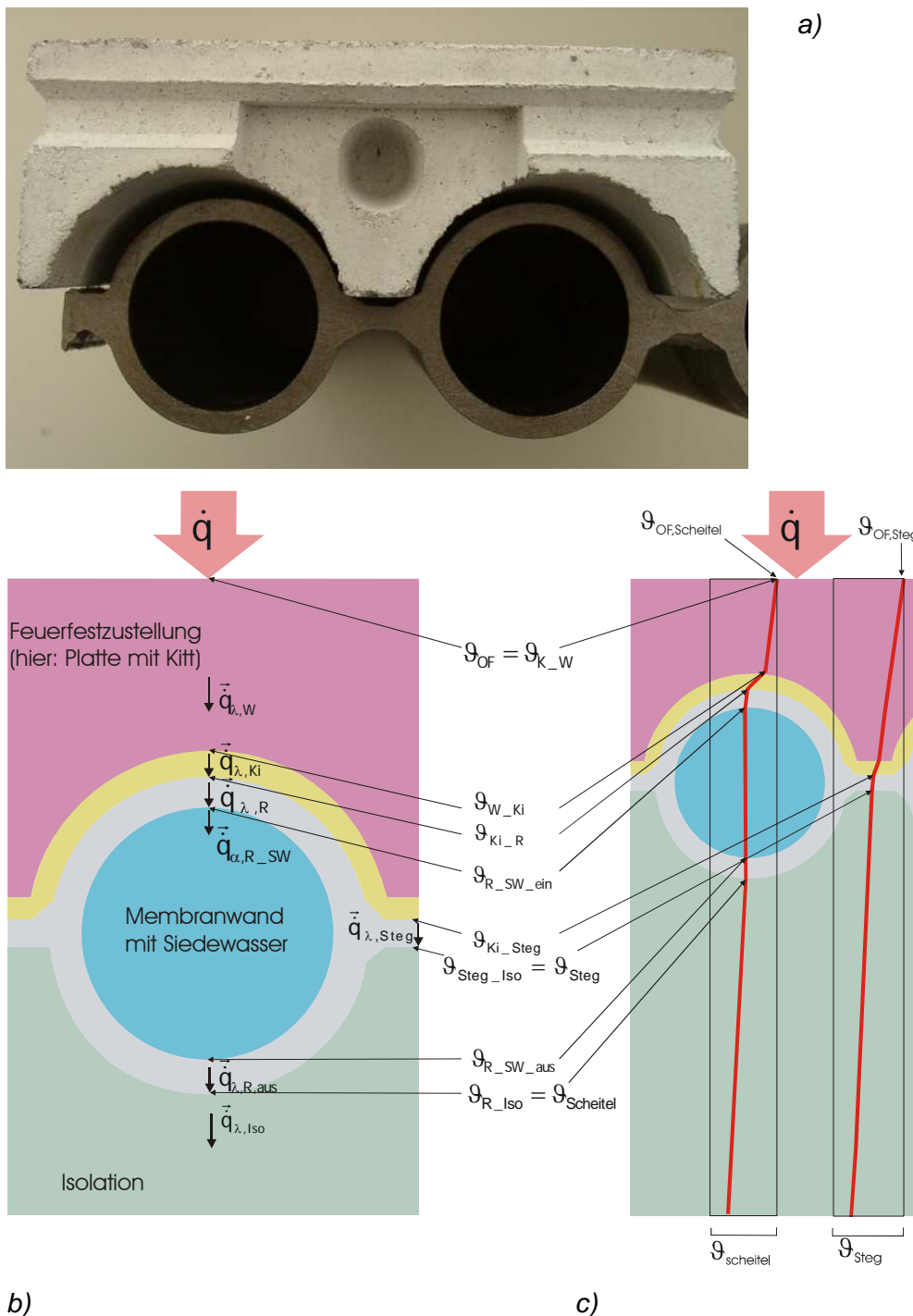


Abb. 1. Wandaufbau – reales System und Modellvorstellung.

Der Wärmestrom gelangt durch die einzelnen Schichten bis zur inneren Oberfläche des Siedewasserrohres. Dort erfolgt der Wärmeübergang konvektiv von der Rohrinnenfläche an die siedende Flüssigkeit. Je nach Siededruck stellt sich eine konstante Siedetemperatur ein. Aufgrund der Turbulenz im Siederohr kann angenommen werden, dass die Siedewassertemperatur über den Querschnitt konstant ist.

Je nach Leitfähigkeit der Schicht und der Geometrie (Platte, Kitt oder Stahl) stellen sich im System unterschiedliche Temperaturgradienten ein. Der Temperaturgradient ist umso steiler, je schlechter die Leitfähigkeit der entsprechenden Schicht ist. Dieser Zusammenhang wird in Abb. 1c durch die rot eingezeichneten Temperaturprofile verdeutlicht. Im Bereich des Kitts (Schicht mit schlechter Leitfähigkeit  $\lambda_{\text{Kitt}} \approx 1,5$  bis  $5 \text{ W/mK}$ ) ist der Temperaturgradient steiler als im Bereich der Stahlwand (Schicht mit guter Leitfähigkeit  $\lambda_{\text{Stahl}} \approx 50 \text{ W/mK}$ ).

Durch die Isolation tritt ein vergleichsweise kleiner Wärmestrom an die Umgebung aus, die treibende Temperaturdifferenz hierfür wird durch die Temperaturen  $\vartheta_{\text{R_Iso}}$  bzw.  $\vartheta_{\text{Steg_Iso}}$  und die Oberflächentemperatur der Außenwand  $\vartheta_{\text{Iso_Umg}}$  gebildet.

Bei einer genaueren Betrachtung der Temperaturprofile durch den Steg der Membranwand bzw. den Rohrscheitel aus Abb. 1b und c ergibt sich eine – vom spezifischen Wärmestrom abhängige und von außen gut messbare – Temperaturdifferenz, die im Folgenden als  $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$  bezeichnet wird.

Aus dieser messbaren Temperaturdifferenz kann dann in einer „Rückwärtsrechnung“ (numerische Simulation) die spezifische Wärmestromdichte bestimmt werden. Auf diese Weise können Systemkenngeraden für verschiedene Wandaufbauten mittels der numerischen Simulation erstellt werden. Das Funktionsprinzip dieser Messmethode ist auf alle Arten von Membranwandaufbauten anwendbar, da die Randbedingungen - für das System der stationären Wärmeleitung - identisch sind.

## 2.2 Ersatzschaltbild

Mit Hilfe eines sog. Ersatzschaltbilds, welches die Wärmeleitungswiderstände aus den einzelnen Schichten wiedergibt (Abb. 2a und b), lässt sich zunächst anhand eines vereinfachten Modells darstellen, dass die Stegtemperatur eine Funktion der spezifischen Widerstände ist.

Für den Wärmefluss durch eine Schicht gilt allgemein:

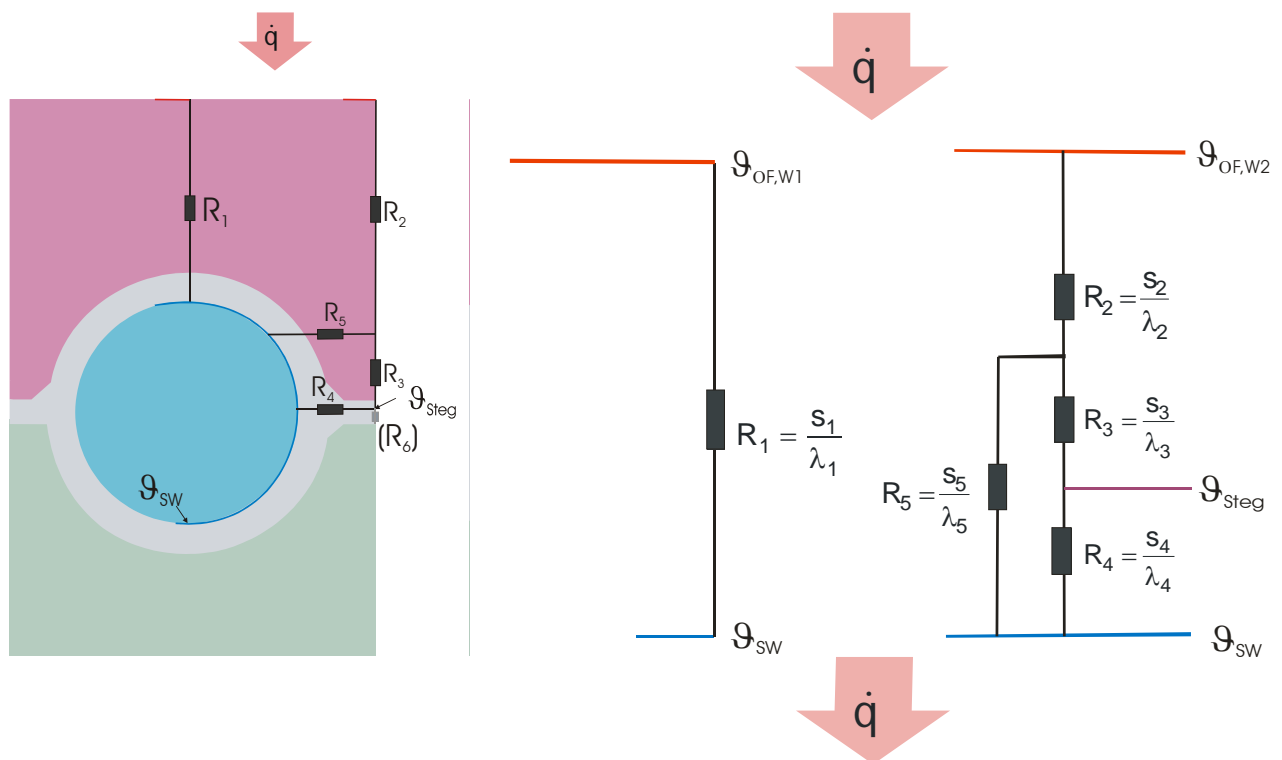
$$\dot{q} = \frac{\lambda}{s} \cdot \Delta\vartheta \text{ bzw. } \Delta\vartheta = \dot{q} \cdot \frac{s}{\lambda}, \quad (1)$$

wobei  $\Delta\vartheta$  die Temperaturdifferenz – treibende Kraft für den Wärmestrom –,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit,  $s$  die Schichtdicke des Materials und  $\dot{q}$  den Wärmefluss darstellen.

Für den Wärmestrom im Ersatzschaltbild (Abb. 2a und b) gilt:

- über die gesamte Fläche wird ein konstanter Wärmestrom aufgeprägt,
- die Temperatur des Siedewassers im Verdampfer ist abhängig vom Verdampferdruck konstant,
- die Siedewassertemperatur ist aufgrund der hohen Turbulenz im Rohr über dem Querschnitt konstant,
- die Temperatur des Scheitels  $\vartheta_{\text{Scheitel}}$  entspricht der Temperatur des Siedewassers  $\vartheta_{\text{SW}}$  (Hier zunächst vereinfachte Annahme  $\alpha_{\text{Innen}} \rightarrow \infty$ , in der detaillierten Modellierung wird ein endlicher Wärmeübergang zwischen der Rohrrinnenfläche und dem Siedewasser angenommen.),
- der Wärmeleitwiderstand  $R_6$  ist aufgrund hoher Materialeitfähigkeit und geringer Schichtdicke sehr klein und kann für das vereinfachte Modell vernachlässigt werden, somit ist die Temperatur  $\vartheta_{\text{Steg}}$  aus Abb. 2a gleichzusetzen mit der Temperatur  $\vartheta_{\text{Steg\_Iso}}$  aus Abb. 2a bzw. b.

Mit Hilfe des Ersatzschaltbildes in Abb. 2a und b wird deutlich, dass die Temperatur  $\vartheta_{\text{Steg}}$  höher sein muss als die Temperatur  $\vartheta_{\text{SW}}$ .



a) Realschaltbild

b) Ersatzschaltbild

Abb. 2. Wandaufbau – Ersatzschaltbilder.

Der analytische Zusammenhang für das Ersatzschaltbild wird durch die Gleichung (2) wiedergegeben.

$$\vartheta_{\text{Steg}} = \left(\frac{s}{\lambda}\right)_4 \cdot \dot{q} \cdot \frac{\left(\frac{s}{\lambda}\right)_5}{\left(\frac{s}{\lambda}\right)_3 + \left(\frac{s}{\lambda}\right)_4 + \left(\frac{s}{\lambda}\right)_5} + \vartheta_{\text{SW}} \quad \text{bzw.} \quad \vartheta_{\text{Steg}} = \dot{q} \cdot \left(\frac{s}{\lambda}\right)_{\text{eff}} + \vartheta_{\text{SW}} \quad (2)$$

Gleichung (2) zeigt, dass sich die Stegtemperatur bei bekanntem Wandaufbau ( $\lambda_{\text{eff}}$ ) und gegebener Siedewassertemperatur  $\vartheta_{\text{SW}}$  nur als eine Funktion des aufgeprägten Wärmestroms darstellen lässt.

### 3 Aufbau des Versuchsstandes

#### 3.1 Versuchsstand

Zur Überprüfung der in Abschnitt 2 dargestellten Modellvorstellung zur Temperaturverteilung im Wandaufbau und auf der Rückseite von Membranverdampferwänden wurde eine Versuchsanlage (Fließschema, siehe Abb. 3a) aufgebaut. Mit Hilfe dieser Versuchsanlage können Wärmestromdichten über die Bilanz der einer Membranwand mit unterschiedlichem Wandaufbau (Probekörper, Belag, usw.) zugeführten Energie je Zeit und Fläche ermittelt werden. Gleichzeitig wird die Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$  gemessen.

Die Versuchsanlage besteht aus den Hauptkomponenten:

1. Membranwandsegment,
2. Brennkammer,
3. Trommel,
4. Wärmeübertrager 1 / Heizkreislauf,
5. Wärmeübertrager 2 / Kühlkreislauf.

Zu 1. Membranwandsegment: Das Membranwandsegment besteht aus fünf Rohren mit einer Rohrlänge von jeweils

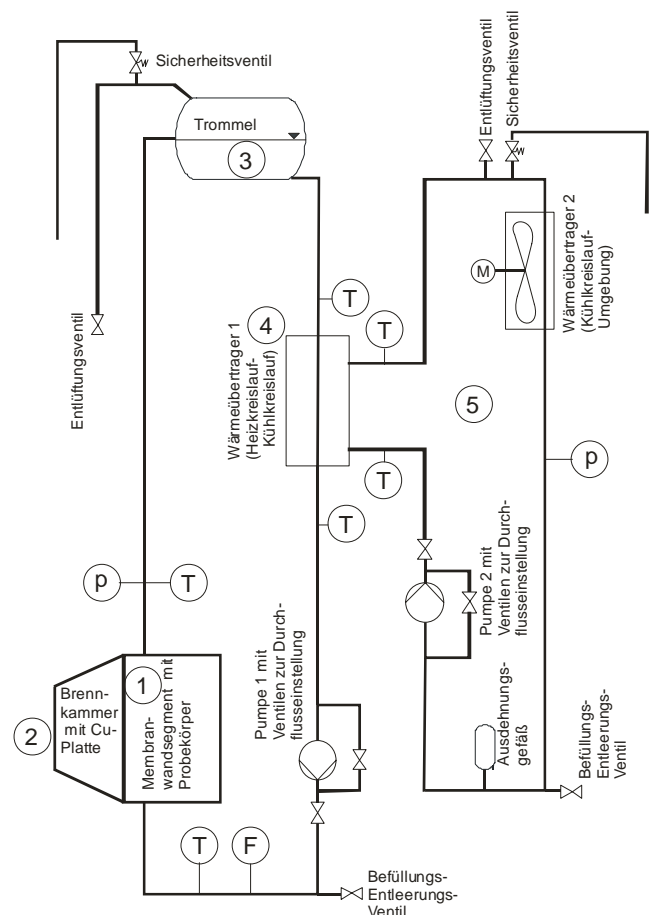


Abb. 3a. Versuchsanlage, Fließschema.

500 mm und einer Teilung von 75 mm. An das Segment können verschiedene Probekörper (z.B. Feuerfestplatten) oder „künstlich“ erzeugte Beläge angebracht werden.

Zu 2. Brennkammer: Der Wärmestrom wird über eine schwenkbar an dem Membranwandsegment angebrachte Brennkammer (siehe Abb. 3b) mit zwei Gasbrennern (max. Durchsatz: 8 kg/h) auf das Membranwandsegment aufgeprägt. Zur Vergleichmäßigung der Wärmestromdichte dient eine senkrecht in der Brennkammer stehende Kupferplatte (Strahlerplatte) von 50 mm Stärke.

Zu 3. Trommel: Die Trommel ist über ein Steigrohr mit der Membranwand verbunden. Die Trommel dient als Wasserspeicher und zur Abtrennung der in der Membranwand entstehenden Dampfblasen.

Zu 4. Wärmeübertrager 1 / Heizkreislauf: Die über die Brennkammer in die Membranwand eingebrachte Wärme (Heizkreislauf) wird über einen indirekten Wärmeübertrager an den Kühlkreislauf übertragen.

Zu 5. Wärmeübertrager 2 / Kühlkreislauf: Die Wärmeabfuhr an die Umgebung erfolgt im Kühlkreislauf über einen Luftkühler.

Die Versuchsanlage ist mit der notwendigen Messtechnik zur Erfassung von Temperaturen und Durchfluss ausgestattet, so dass die Bilanzierung der dem Probekörper jeweils zugeführten Wärmestromdichte möglich ist.

Auf die Messtechnik zur Ermittlung von Temperaturdifferenzen ( $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ ) wird im Folgenden getrennt eingegangen.

### 3.2 Messtechnik zur Ermittlung von Temperaturdifferenzen ( $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ )

Wie aus Abschnitt 2 ersichtlich ist, kommt es bei der in diesem Beitrag vorgestellten Online-Wärmestrommessung auf die genaue Bestimmung von Temperaturdifferenzen auf der Rückseite der Membranwand an. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Verfahren und Anordnungen zur Temperaturmessung untersucht worden,

- Einfluss der Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Einsteckhülsen für NiCrNi-Thermoelemente,
- Unmittelbare Nutzung des Seebeck-Effektes durch „aufgepunktete“ Konstantdrähte,

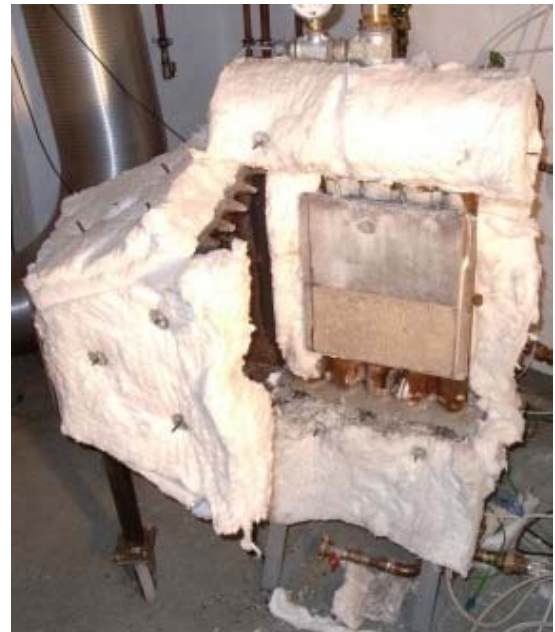


Abb. 3b Brennkammer und Membranwandsegment.

- Einfluss der Installation und Isolation auf das Messsignal bei Nutzung von „aufgepunkteten“ FeCO-Thermoelementen,

die im Folgenden zunächst kurz getrennt beschrieben und nachfolgend zusammenfassend beurteilt werden.

### Einsteckhülsen mit NiCrNi-Thermoelementen

Zur Messung von Temperaturen an der Außenseite der Membranwand wurden zunächst herkömmliche NiCrNi-Thermoelemente verwendet. Die Thermoelemente (3 mm Durchmesser) sind mit Hülsen aus Kupfer (Cu-Hülsen), Stahl (St-Hülsen) und Edelstahl (VA-Hülsen) an der Membranwand befestigt worden (siehe Abb. 4).



Abb. 4. Membranwand von der Rückseite mit CuNi-Drähten und Hülsen

### „Aufgepunktete“ Konstantandrähte

Zur Bestimmung der Temperaturdifferenz ( $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ ) lässt sich analog zu einem Thermoelement der sog. thermoelektrische Effekt (Seebeck-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 (siehe Abb. 5a).

Die Thermospannung entsteht hierbei nur im Berührungspunkt des Konstantandrahtes mit dem Grundmaterial. Werden - wie in Abb. 5b gezeigt - mehrere Konstantandrähte auf dem Grundmaterial aufgebracht (z.B. auf dem Steg und dem Scheitel), so können Thermospannungsdifferenzen entsprechend der unterschiedlichen Temperaturen der Kontaktpunkte an der Membranwand gemessen werden. Um den Zusammenhang zwischen den gemessenen Thermospannungen und den zugehörigen Diffe-

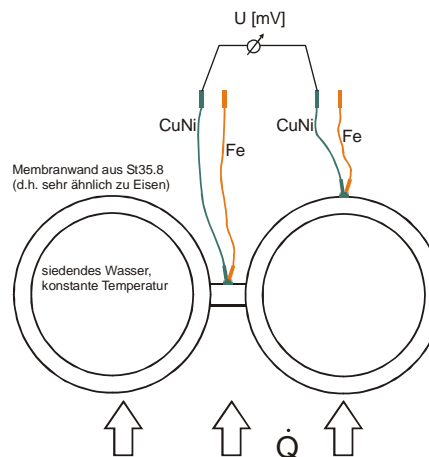


Abb. 5a. Messprinzip.



Abb. 5b. Konstantandrähte auf der Rückseite der Membranwand.



renztemperaturen ermitteln zu können, wurden die Temperaturen des Steges bzw. des Scheitels mit Pt-100 Widerstandsthermometern gemessen. Pt-100-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 Thermodifferenzspannungen verwendet worden. Da der Sensor dabei auf ein gut leitendes Grundmaterial aufgebracht ist und die Erwärmungsleistung des Pt-100-Sensors bei 0,1 mW liegt, kann der Einfluss der Eigenerwärmung vernachlässigt werden.

Für den Einsatz in der Praxis zu Bestimmung der Wärmestromdichte sind Pt-100-Sensoren jedoch aus verschiedenen Gründen (wie. z.B. Schwierigkeiten beim elektrischen Anschluss sehr kleiner Sensoren, erforderliche Messumformer) weniger gut geeignet.

Die Abb. 5b zeigt die Anordnung der Konstantandrähte auf der Rückseite der Membranwand. Die hohe Anzahl (42 Stück, MS1 bis MS42) der Temperaturmessstellen diente der Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Wärmestromdichte.

### Einfluss der Installation und Isolation

Bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen an festen Wänden ist bei der Installation generell der Einfluss der Wärmeleitung auf die Temperatur im Messpunkt des Thermoelements zu beachten (siehe Abb. 6). Die Thermospannung entsteht zwar – wie für den vorliegenden Fall bereits erläutert – nur im Berührungspunkt zwischen Konstantandraht und Grundmaterial, allerdings kommt es zu einer Beeinflussung der gemessenen Temperaturen durch Wärmeleitung im Thermoelement. Zur Bestimmung dieses Einflusses sind vier verschiedene Anordnungen

- rechtwinklige Installation ohne Isolation,
- rechtwinklige Installation mit Isolation,
- parallele Installation ohne Isolation,
- parallele Installation mit Isolation,

untersucht worden.

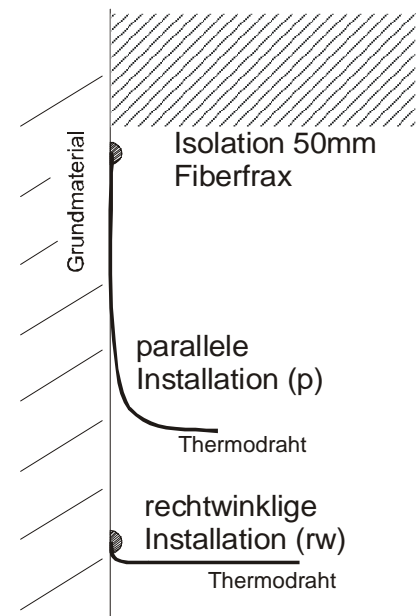


Abb. 6. Installationsvarianten für den Konstantandraht bzw. das FeCO-Thermoelement.

### 3.3 Vergleich der eingesetzten Messtechnik

Abb. 7a und b zeigen die Verläufe der am Steg und am Scheitel mittels NiCrNi-Thermoelement in einer Kupferhülse (Cu-Hülse) und die mit „aufgepunkteten“ FeCO-Thermoelementen in paralleler (FeCO, p) und rechtwinkliger (FeCO, rw) Anordnung bestimmten Temperaturen. Während des Versuches wurde durch Regulierung der Brenner-

leistung und durch Anbringen sowie Entfernen der Isolation ein entsprechender Temperaturbereich durchfahren.

Die vom Installationsaufwand her zunächst günstigste Variante, die Thermoelemente mit Hilfe von Hülsen (siehe Abb. 4) an der Membranwand zu befestigen, ist aufgrund der Wärmeabfuhr an die Umgebung (vergrößerte Oberfläche, höhere Wärmeleitfähigkeit usw.) und des Speichereffektes bei instationären Temperaturverläufen für die Anwendung zur Wärmestrommessung nicht geeignet. Bei einem Vergleich der Temperaturverläufe Cu-Hülse, Steg mit den Temperaturverläufen FeCO, p und rw zeigt sich erwartungsgemäß ein „Nachlaufen“ des Temperatursignals Cu-Hülse, Steg gegenüber den FeCO-Thermoelementen. Bei einem raschen Temperaturabfall, wie in Abb. 7a zu erkennen ist, kann aufgrund des Speicherungseffektes das Messsignal des Thermoelementes in der Cu-Hülse sogar kurzzeitig oberhalb der Messsignale der „aufgepunkteten“ FeCO-Thermoelemente verlaufen.

Das Entfernen der Isolation führt zu einer Zunahme des an die Umgebung abgeführten Verlustwärmestromes und wirkt sich erwartungsgemäß als Abnahme der Wandtemperatur aus. Die Abb. 7a zeigt, dass die Abnahme der Wandtemperatur nach einer Verminderung der Brennerleistung ( $P_{\text{therm},2} < P_{\text{therm},1}$ ) mit Isolation deutlich flacher verläuft als nach Entfernen der Isolation. Auf diesen zu erwartenden Sachverhalt sei mit Bezug auf die Wärmestromdichte insofern hingewiesen, als dass für deren Ermittlung aus der Differenztemperaturmessung im Fall ohne Isolation ein zusätzlicher Wärmeübergang auf der Außenseite der Membranwand auftritt und dieser in dem mathematischen Modell zu berücksichtigen ist. Dies bedeutet u. a. auch einen zusätzlichen Aufwand zur exakten Bestimmung der Randbedingungen (Umgebungsbedingungen) für das mathematische Modell. Daher erscheint die Verwendung von Thermoelementen und Isolation der Membranwände an der Außenseite im Vergleich zur berührungslosen Temperaturmessung z.B. mit einer IR-Kamera ohne Isolation der Membranwände günstiger.

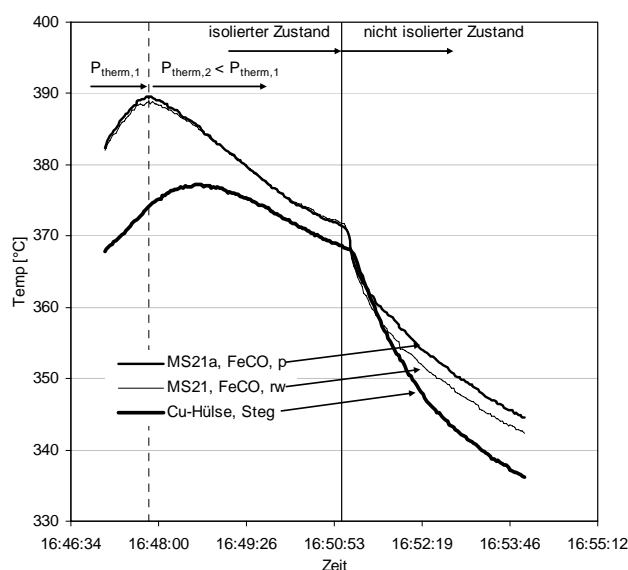


Abb. 7a. Vergleich von eingesetzten Temperaturmessmethoden (Steg).

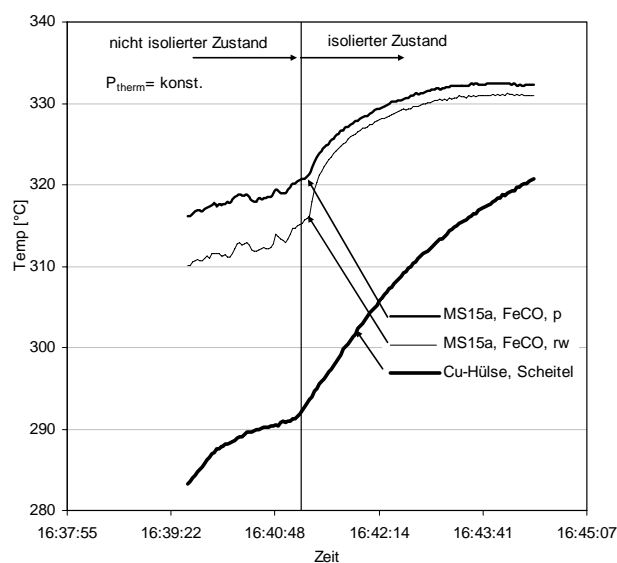


Abb. 7b. Vergleich von eingesetzten Temperaturmessmethoden (Scheitel).

Die Messergebnisse in Abb. 7b bestätigen die aus Abb. 7a gewonnenen Erkenntnisse. Das Messsignal des Thermoelementes in der Cu-Hülse (Abb. 7b) verläuft unterhalb der Messsignale der „aufgepunkteten“ FeCO-Thermoelemente. Im nicht isolierten Zustand liegt der Temperaturverlauf des rechtwinklig installierten FeCO-Thermoelementes erwartungsgemäß deutlich unter dem des parallel installierten. Das Isolieren der Messstellen führt zu einem aufeinander Zustreben aller Messsignale, wobei auch hier das Temperatur-signal des NiCrNi-Thermoelementes in der Cu-Hülse „nachläuft“.

Hülsen aus anderen Materialien weisen z.T. je nach Temperaturleitzahl eine noch stärkere Verzögerung als die Cu-Hülsen auf, worauf hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll.

Insbesondere sei bei der Anwendung zur Bestimmung der Stegtemperatur erwähnt, dass die Hülse mit ca. 9 mm Breite ca. 50% der Stegbreite (18 mm) überdeckt und somit nicht die lokale Stegtemperatur in der Stegmitte, sondern eine gemittelte Stegtemperatur bestimmt wird.

Die Anordnung der Thermoelemente, parallel (p) oder rechtwinklig (rw), hat erwartungsgemäß Einfluss auf das Messsignal. Durch die parallele Anordnung wird der Messfehler aufgrund der Wärmeübertragung zwischen Sensor und Umgebung minimiert. Im Hinblick auf die Bestimmung der Differenztemperatur an Membranwänden mit Isolation ist die parallele Verlegung der Thermoelemente hinter der Isolation (Segment, siehe Abb. 8) auch aus praktischen Gesichtspunkten günstiger.

Im Vergleich mit den aufgepunkteten FeCO-Thermoelementen erscheint die unmittelbare Nutzung des Seebeck-Effektes durch „aufgepunktete“ Konstantandrähte zur Bestimmung der Temperaturdifferenz im Hinblick auf den Messaufwand und die Genauigkeit vorteilhafter.

Abb. 9 zeigt die mit den auf den Grundwerkstoff (=Membranwand) „aufgepunkteten“ Konstantandrähten erzeugte Thermo-differenzspannung ( $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ ) in Abhän-



Abb. 8. Isolierte Membranwand, Segmentöffnung zur Wärmestromdichtemessung, AVA Augsburg.

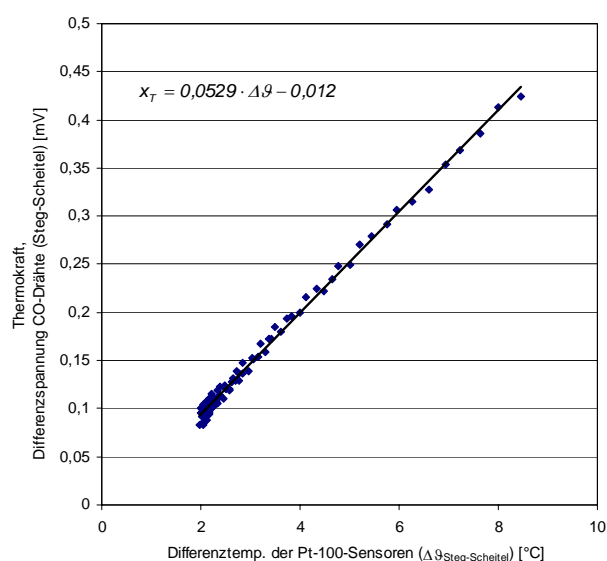


Abb. 9. Kalibriergerade für einen Temperaturbereich von ca. 50°C.

gigkeit der mit Pt-100 gemessenen Temperaturdifferenzen ( $\Delta \vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ ). Die Messwerte zeigen einen sehr guten linearen Zusammenhang zwischen der Thermodifferenzspannung und der Temperaturdifferenz. Zunächst wurde in einem ersten Schritt mit den Untersuchungen in einem Temperaturbereich von ca. 30 bis 50°C begonnen. Für diesen Temperaturbereich ergibt sich aus den Messwerten (Abb. 9) eine differentielle Thermokraft von 0,0529 mV/°C. Dieser Wert stimmt für den o.g. Temperaturbereich sehr gut mit der Grundwertreihe (DIN EN 60584-1) für ein Thermoelement des Typs J (FeCO) überein. Diese Untersuchungen sind in einem nächsten Schritt für höhere Temperaturbereiche entsprechend zu erweitern.

### 3.4 Bestimmung der Wärmestromdichte mittels Bilanzierung

An der Versuchsanlage (siehe Abb. 3a) werden u. a. der Volumenstrom und die Temperaturdifferenz des Arbeitsmediums am Eintritt und am Austritt der Anlage gemessen (siehe Abb. 10). Aus Gleichung (3) kann der eingebrachte Wärmestrom über eine Bilanz ermittelt werden.

$$\dot{Q} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot \dot{V}_{\text{Wasser}} \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot (T_{\text{Austritt}} - T_{\text{Eintritt}}) \quad (3)$$

Die Durchflussmenge wird möglichst hoch eingestellt, so dass die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt nur wenige °C beträgt, um den Bedingungen, die im Verdampfer herrschen, möglichst nahe zu kommen.

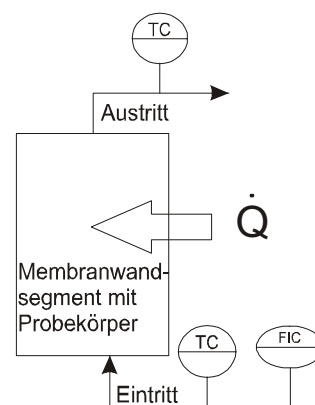


Abb. 10. Schematische Darstellung des Validierungssystems.

### 3.5 Wärmestrombestimmung durch Messung des Temperaturgradienten in einem bekannten Material

Mit Kenntnis über den Temperaturgradienten in einem Material bekannter Wärmeleitfähigkeit kann der spezifische Wärmestrom berechnet werden (siehe Gleichung (1)).

Darüber hinaus lässt sich bei bekanntem Temperaturfeld die Oberflächentemperatur des Probekörpers berechnen.

Zur Messung des Temperaturfeldes in der Platte wurden in die Stirnseiten der JuSyS<sup>®</sup>SL-Platte ca. 65 mm tiefe Bohrungen gebohrt (siehe Abb. 11). Bei der Montage der Platte an der Membranwand wurden in die Bohrungen NiCrNi-Thermoelemente eingesetzt,



Abb. 11. JuSyS<sup>®</sup>SL-Platte mit Bohrungen zur Bestimmung des Temperaturgradienten in der Platte.

so dass beim späteren Betrieb die Temperaturen an zwei Stellen mit definiertem Abstand gemessen werden können.

#### 4 Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen

Wie in Abschnitt 2 erläutert und anhand der Messergebnisse in Abschnitt 3 (siehe Abb. 9) gezeigt, stellt sich auf der Rückseite der Membranwand eine bestimmte Temperaturdifferenz ein. Diese Temperaturdifferenz ist vom Wandaufbau und dem spezifischen Wärmestrom abhängig.

Für die Verhältnisse der Versuchsanlage ist ein mathematisches Modell (FemLab) [1] erarbeitet worden, mit dem u. a. der Wandaufbau eines Membranwandsegmentes mit einer hintergossenen JuSys<sup>®</sup>SL-Platte [2], [3] numerisch simuliert wurde.

Abb. 12 zeigt beispielhaft die numerische Simulation des stationären Temperaturfeldes für eine Ju-SyS<sup>®</sup>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.

Beim Auftragen der aufgeprägten Wärmestromdichte über den berechneten Temperaturdifferenzen zwischen Steg- und Scheiteltemperatur (Abb. 13)

zeigt sich ein linearer Zusammenhang, wie er aufgrund der Gleichung (2) zu erwarten ist. Die Steigung der Gerade ist spezifisch für das betrachtete System, d.h. für bestimmte Membranwandaufbauten (unterschiedliche Teilung, Platten, Massen, Beschichtungen

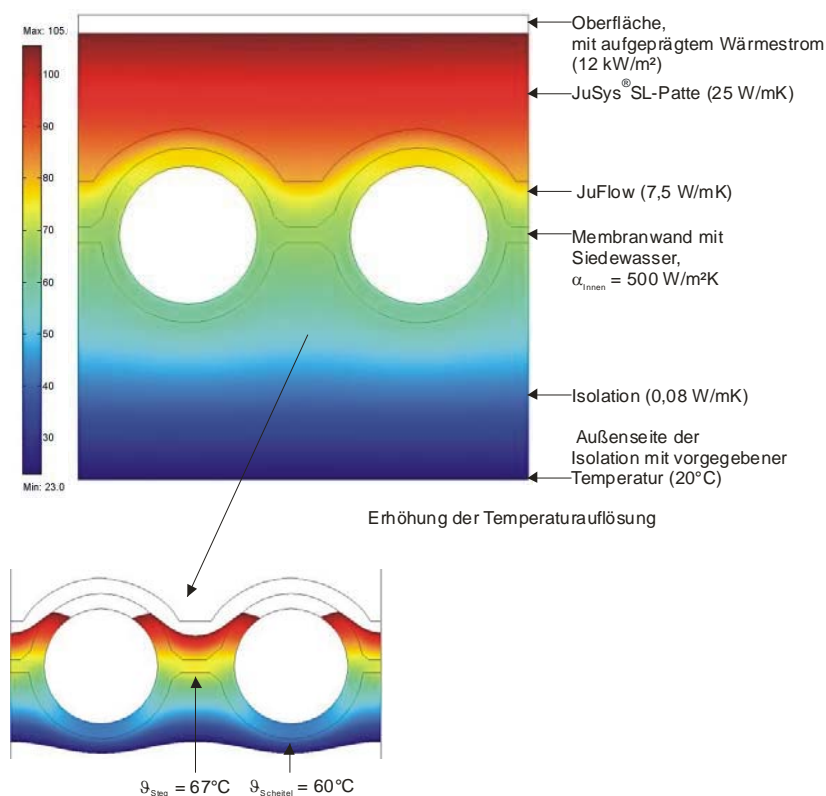


Abb. 12. FEM-Model

usw.) und für bestimmte Wärmeübergänge<sup>1</sup> auf der Innenseite der Siederohre. 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

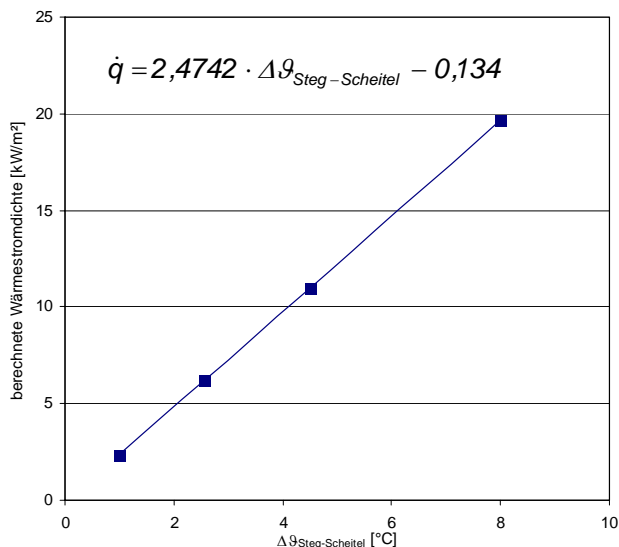


Abb. 13. Systemkenngerade für eine JuSyS<sup>®</sup>SL-Platte auf einer Membranwand mit 75 mm Teilung als Ergebnis der numerischen Simulation.

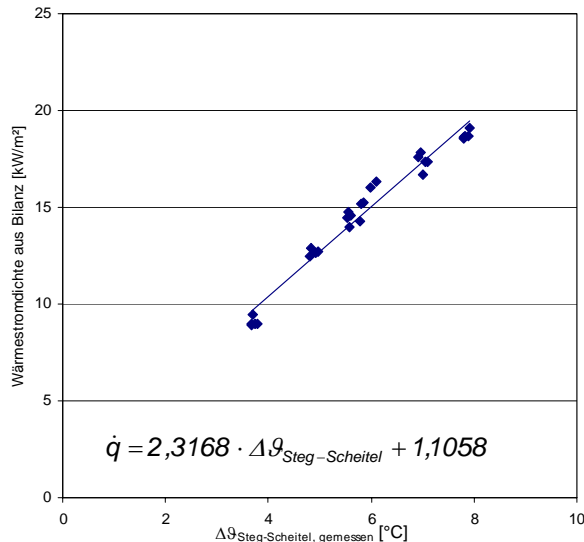


Abb. 14. Systemkenngerade für eine Ju-SyS<sup>®</sup>SL-Platte auf einer Membranwand mit 75 mm Teilung als Ergebnis der Bilanzierung.

können [1].

Aus den Versuchen lässt sich eine Systemkenngerade auch als Ergebnis der Bilanzierung (siehe Abschnitt 3.4) ermitteln.

Abb. 14 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 gut überein. Mit der Systemkenngeraden (siehe Abb. 13) aus der numerischen Simulation und der experimentell ermittelten Temperaturdifferenz ( $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ )<sup>2</sup> kann somit direkt der spezifische Wärmestrom bestimmt werden. Trägt man die auf diese Weise ermittelte Wärmestromdichte gegen die experimentell über die Bilanz ermittelte Wärmestromdichte auf (Abb. 15), so erkennt man eine gute Übereinstimmung beider Werte.

<sup>1</sup> In den Membranrohren der Versuchsanlage herrscht eine Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion. Im Verdampfer eines Dampferzeugers wird die Konvektion maßgeblich durch das turbulente Blasensieden in den Rohren beeinflusst.

<sup>2</sup> Die Temperaturdifferenzen ( $\Delta\vartheta_{\text{Steg-Scheitel}}$ ) lassen sich aus den gemessenen Thermospannungsdifferenzen mit Hilfe der Kalibriergeraden (Abb. 9) ermitteln.

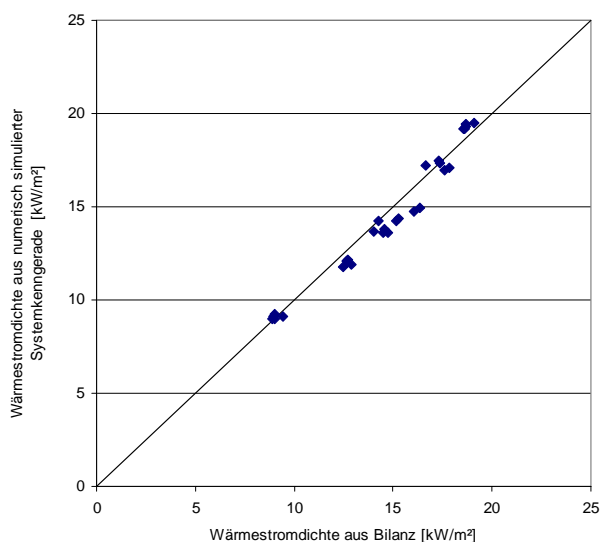


Abb. 15. Wärmestromdichte aus der numerisch simulierten Systemkenngeraden gegen Wärmestromdichte aus Bilanzierung.

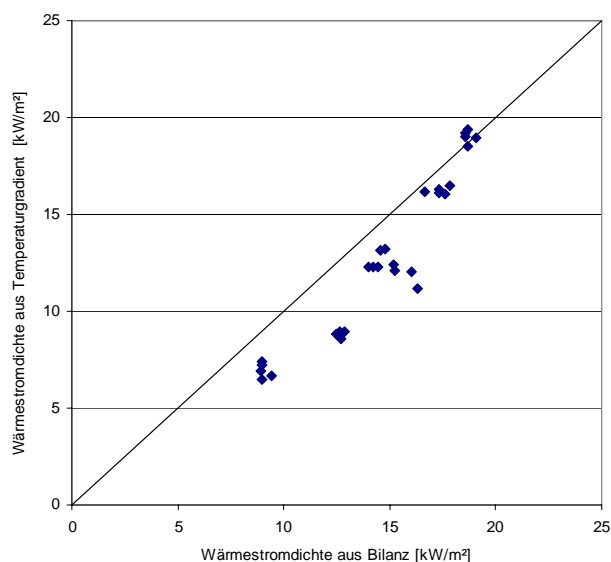


Abb. 16. Wärmestromdichte aus Temperaturgradient in der Platte gegen Wärmestromdichte aus Bilanzierung.

Abschließend sei auf den Vergleich der über die Bilanz ermittelten Wärmestromdichte mit der über den Temperaturgradienten ermittelten Wärmestromdichte (siehe Abschnitt 3.5) eingegangen. Abb. 16 zeigt analog zu Abb. 15 auf der Abszisse die über die Bilanz ermittelte Wärmestromdichte und auf der Ordinate die Wärmestromdichte, die über den gemessenen Temperaturgradienten in der Platte bestimmt wurde. Aus Abb. 16 ist zu erkennen, dass die Messpunkte von der Winkelhalbierenden abweichen. Die über den Temperaturgradienten ermittelte Wärmestromdichte ist somit niedriger als die über die Bilanz ermittelte Wärmestromdichte. Diese Abweichungen können u. a. durch eine ungenaue Bestimmung des Abstandes der Thermoelemente, Wärmeleitfehler usw. bedingt sein.

## 5 Symbolverzeichnis

lateinische Symbole			griechische Symbole		
c	kJ/kgK	spez. Wärmekapazität	$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	Wärmeübergangskoeffizient
p	-	parallel	$\lambda$	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
rw	-	rechtwinklig	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\dot{q}$	kW/m <sup>2</sup>	spezifischer Wärmestrom, Wärmestromdichte	$\vartheta$	°C	Temperatur
$\dot{Q}$	kW	Wärmestrom, Leistung	$\Delta$	-	Differenz
R	$\Omega$	elektrischer Widerstand			
s	m	Weg			
T	K	Temperatur			
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom			
$x_T$	[mV/°C]	Thermokraft			

### Indices

$\lambda$	Vorgang durch Wärmeleitung	R	Rohr
Iso	Isolation	Sch	Scheitel
Ki	Kitt	Steg	Steg
OF	Oberfläche	SW	Siedewasser
Pl	Platte	Umg.	Umgebung

## 6 Quellen

- [1] Beckmann, M.; Krüger, S: Online Heat Flux Measurement at Membrane Walls of Steam Generators of Municipal Solid Waste Incinerators, IT3 Conference, Houston, Texas, Mai 2005.
- [2] [www.jg-refractoty-systems.com](http://www.jg-refractoty-systems.com)
- [3] Martin, K., U.: Moderne Systeme zur Feuerfestauskleidung in Müllverbrennungen und Biomassekesseln - heutiger Stand der Technik. Uhlig-Symposium, Goslar, 10. / 11. Februar 2005.