

Theoretische Betrachtung der mechanischen Verformungen und Spannungen in vorgeformten feuerfesten Zustellungen

S. Krüger, M. Beckmann

TU Dresden, Institut für Energietechnik, Lehrstuhl für Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

1 Einleitung

Der Einsatz von keramischen, siliziumkarbidhaltigen Zustellungen an Membranwänden von Brennkammern und Strahlungszügen z.B. in Abfall- und Ersatzbrennstoffverbrennungsanlagen ist seit langem Stand der Technik. Mit Hilfe der Zustellungen kann die Wärmeabgabe aus der Verbrennung an das Siedewasser und somit die Gastemperatur in der Brennkammer und den Strahlungszügen eingestellt werden. Die keramischen Zustellungen schützen zudem die metallischen Membranwände vor Korrosion und Abrasion. Die Installation der Zustellungen erfolgt z.B. in Form von SiC-Massen oder Plattensystemen.

Bei den Plattensystemen wird eine keramische Platte zunächst mit metallischen Ankersystemen am Steg der Membranwand befestigt. Bei hintergossenen Plattensystemen wird der Spalt zwischen Membranwand und der Keramik mit einer SiC-haltigen Hintergussmasse befüllt, bei hinterlüfteten Systemen hingegen bleibt dieser Spalt frei. Während des Anlagenbetriebs erfolgt eine Spülung des Spaltes mit Spülluft, um so den Kontakt von korrosiven Gasen mit der metallischen Membranwand zu vermeiden.

Bei der thermischen Belastung des Wandaufbaus kommt es materialbedingt und aufgrund von Temperaturgradienten zu Spannungen und reversiblen Verformungen¹. Abhängig von der Ausführung des Befestigungssystems gibt es die Möglichkeit von Relativbewegungen zwischen Bauteilen, was zu einem teilweisen Abbau von Spannungen führt. Gerade hinterlüftete Plattensysteme, z.T. aber auch Systeme mit Hintergussmasse, zeichnen sich durch ein Befestigungssystem aus, das Verformungen zulässt und somit den Aufbau von Spannungen verhindert.

In dem hier vorliegenden Beitrag wird zunächst auf Stoffwerte von SiC-haltigen Zustellungsmaterialien zur Berechnung von thermomechanischen Spannungen und Verformungen eingegangen. Des Weiteren erfolgt eine Darstellung von vereinfachten mathematischen Modellen zur Abschätzung von Spannungen und Verformungen der keramischen Platte für stationäre Betriebszustände. Darüber hinaus erfolgt eine analoge Betrachtung für das Verbundsystem aus metallischer Membranwand und keramischer Platte.

2 Materialeigenschaften

Grundlage für die Berechnung von Temperaturprofilen, Spannungs- und Verformungszuständen in Wandaufbauten sind Materialkennwerte wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit, der thermische Längenausdehnungskoeffizient (Wärmedehnungskoeffizient), der Elastizitätsmodul usw. In dem vorliegenden Beitrag soll speziell auf die nitridgebundenen SiC-Materialien eingegangen werden, da diese sich in entsprechenden Verbrennungsanlagen bewährt haben. Nitridgebundenen SiC zeichnet sich im Allgemeinen durch eine große Festigkeit bei hohen Temperaturen, eine hohe Wärmeleitfähigkeit sowie durch eine gute Korrosionsbeständigkeit aus [2]. Mögliche Bindephasen sind hier das Siliziumoxinitrid (Si_2ON_2), das Siliziumnitrid (Si_3N_4) und Sialon (Siliziumaluminiumoxinitrid).

Bild 1 zeigt den temperaturabhängigen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten für ein nitridgebundenen Siliziumkarbid [1]. In [2] werden für SiC-Werkstoffe mit Siliziumnitridbindung Wärmedehnungskoeffizienten von $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ für einen Temperaturbereich von 20 bis 1100°C angegeben. Analog ist für SiC-Werkstoffe mit Sialonbindung ein Wert von $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ genannt. Ebenfalls in Bild 1 ist ein Bereich für den thermischen Längenausdehnungskoeffizient von Siliziumkarbidsteinen (90% SiC-Gehalt, oxidisch oder silikatisch

¹ Quelleffekte, d.h. irreversible Dehnungen aufgrund von Mineralreaktionen von SiC-Materialien werden in diesem Beitrag nicht weiter berücksichtigt.

gebunden) als Funktion von der Temperatur dargestellt. Es zeigt sich hier, dass die Wärmeausdehnungskoeffizienten von stickstoff- und oxidisch gebundenem SiC ähnlich sind. Somit sind die thermischen Längenausdehnungskoeffizienten der siliziumkarbidhaltigen Zustellungswerkstoffen ca. um den Faktor 3 niedriger als die der Kesselstähle mit ca. $13,3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

In Bild 2 sind Wärmeleitfähigkeiten der SiC-Werkstoffe als Funktion der Temperatur dargestellt. Für alle Materialien gilt, dass ihre Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur abnimmt. Weiter ist zu erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit deutlich mit dem SiC-Gehalt ansteigt, für stickstoffgebundene SiC-Materialien im Allgemeinen größer ist als bei oxidisch gebundenen Werkstoffen. Wie in Bild 2 gezeigt, gibt es auch bei den stickstoffgebundenen SiC-Materialien z.T. große Unterschiede bzgl. der Wärmeleitfähigkeit bei erhöhten Temperaturen. Die Werte von Sialon gebundenem SiC liegen hier deutlich unter denen mit Nitridbindung.

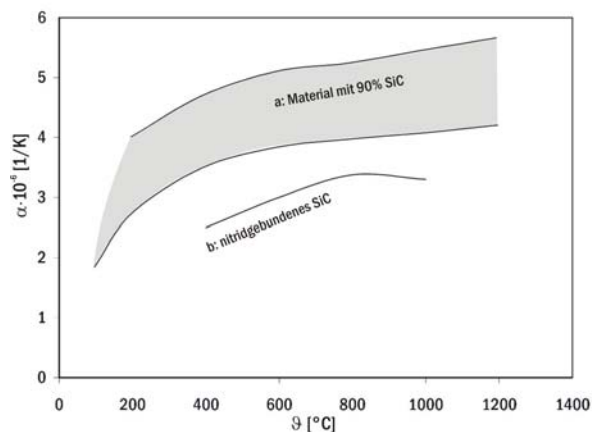


Bild 1. Thermischer Längenausdehnungskoeffizient als Funktion der Temperatur, a aus [2], b aus [1].

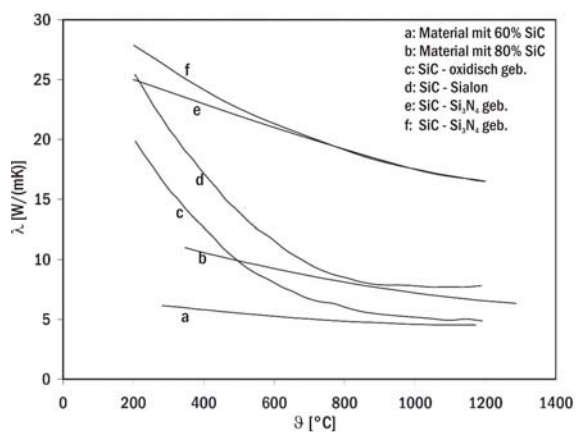


Bild 2. Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur, a bis e aus [2], f aus [1].

Für E-Module von stickstoffgebundenem SiC liegen nur wenige Daten vor. Für die in den folgenden Abschnitten durchgeführten Berechnungen wurde ein Wert von $147.000 N/mm^2$ [1] verwendet.

Generell gilt für feuerfeste keramische Werkstoffe, dass die Zusammensetzungen und die physikalischen Eigenschaften der Roh- und Endprodukte, d.h. insbesondere die Korngröße und die Porosität einen ausgeprägten Einfluss auf die Materialkennwerte wie den thermischen Längenausdehnungskoeffizient und den E-Modul haben. Des Weiteren gibt es Hinweise, dass sich feuerfeste Materialien nicht vollkommen elastisch verhalten. Belastungen – noch weit unterhalb der Bruchspannung – können zu bleibenden Verformungen führen. Dabei werden diese irreversiblen Verformungen durch nicht plastische Verformungen hervorgerufen. Es besteht die Möglichkeit, dass unter Belastung im Material kleine Risse und Brüche im Mikrobereich auftreten, die sich bei Entlastung nicht vollkommen schließen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass bei Zug- bzw. Druckbelastung unterschiedliche Elastizitätsmodule gelten können. Beispielsweise kann der E-Modul bei Druckbelastung ein Vielfaches größer sein, als der E-Modul bei Zugbelastung [3].

Auch wenn möglicherweise bei der Festlegung von Materialeigenschaften für die Berechnung von Spannungen und Verformungen von Feuerfestprodukten keine vollkommene Sicherheit vorliegt, soll dennoch im Folgenden anhand vereinfachter Modellvorstellungen das grundsätzliche Verhalten von feuerfesten Zustellungen (hier: keramische Plattensysteme) an Membranwänden dargestellt werden. Hierbei wird die zumeist komplexe Geometrie der keramischen Platte und der Membranwand vereinfacht als rechteckige Platte dargestellt.

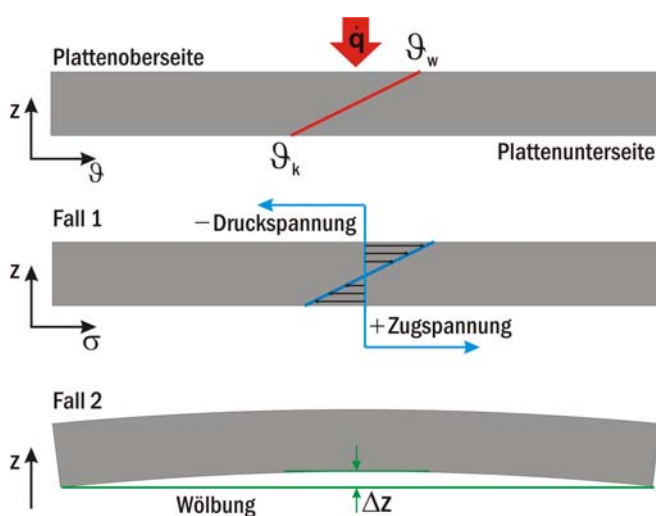
3 Auswirkung des Temperaturfeldes auf die Spannungen und Verformungen der Platte

Grundsätzlich ändern alle Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur ihre äußeren Abmessungen. Mit steigender Temperatur nimmt die Schwingungsamplitude der Atome im Gitter zu, was bei Temperaturerhöhung üblicherweise zu einer Ausdehnung führt. Bei festen Stoffen wird die thermisch bedingte Formänderung durch die Längenänderung ausgedrückt (Gl. (1)),

$$\varepsilon_{th} = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta \vartheta \quad (1)$$

wobei ε_{th} die Längenänderung Δl bezogen auf die Ausgangslänge l_0 , α den thermischen Längenausdehnungskoeffizienten und $\Delta \vartheta$ die Änderung der Temperatur ($\Delta \vartheta > 0 \rightarrow$ Aufheizung, $\Delta \vartheta < 0 \rightarrow$ Abkühlen) beschreiben [5].

Die Wärmestromdichte stellt eine wichtige Kenngröße zur Abschätzung der thermomechanischen Belastungen der Bauteile dar. Die Grundlagen zur Entwicklung einer Messtechnik zur Erfassung der Wärmestromdichte an Membranwänden sowie der praktischer Einsatz dieser Technik in Verbrennungsanlagen sind Teil eines derzeit laufenden Forschungsvorhabens [6]. In Zustellungen an Kesselwänden stellen sich die Temperaturen und die Temperaturgradienten im Wandaufbau (z.B. zwischen der Vorder- und Rückseite der keramischen Feuerfestplatte) entsprechend der Wärmestromdichte vom Gas zum Siedewasser und der materialspezifischen Wärmeleitfähigkeiten sowie die Plattenstärke ein. Aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen der Vorder- und Rückseite der Platte und des spezifischen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten resultiert eine unterschiedliche Längenänderung der Plattenseiten. Im Folgenden müssen hier zwei grundsätzlich unterschiedliche Fälle betrachtet werden. Für den Fall, dass die keramische Platte in ihrer freien Dehnung behindert wird (Fall 1), d.h. dass die Ober- und Unterseite der Platte sich gegenseitig in ihrer freien Verformung hindern, kommt es zu Spannungen (siehe Bild 3). Diese Art der Wärmespannung tritt überall dort auf, wo Bauteile über der Wanddicke einen Temperaturgradienten aufweisen und ihre freie Dehnung nicht möglich ist. Wie in Bild 3 gezeigt, entstehen auf der wärmeren Plattenseite Druckspannungen, auf der kälteren Seite der Platte entsprechende Zugspannungen.



Für den Fall, dass die keramische Platte in ihrer Bewegung frei ist (Fall 2), wird sie sich entsprechend den Temperaturen und somit der Wärmedehnungen verformen. In dem in Bild 3 gezeigten Fall 2 ist die thermische Dehnung der kälteren Unterseite kleiner als die der Oberseite. Die Platte würde sich durchbiegen bzw. aufwölben. Im Folgenden wird auf diese beiden Fälle, d.h. die Berechnung der Spannungen im Fall 1, sowie die Berechnung der Aufwölbung in Fall 2 getrennt von einander eingegangen.

Bild 3. Fallunterscheidung.

3.1 Fall 1 - Wärmespannung

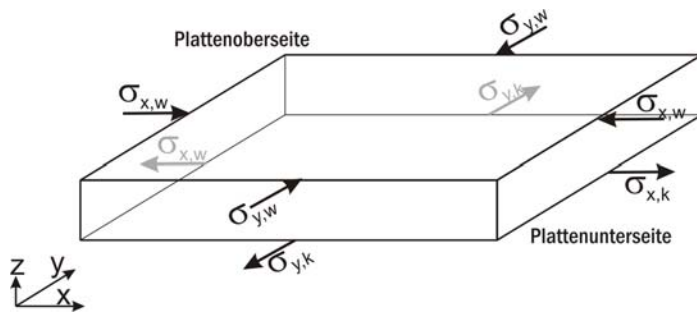


Bild 4. Kräfte durch verhinderte freie Dehnung.

Zur Berechnung der resultierenden Druckspannung in der Plattenoberseite (wärmere Plattenseite) bzw. Zugspannung in der Plattenunterseite (kältere Plattenseite) werden zunächst die Einzelkomponenten der Verformungen bestimmt (siehe auch Bild 4), [5]. Die Einzelkomponenten setzen sich aus den folgenden Verformungen V1 bis V3 (hier: wärmere Plattenoberseite (w)) wie folgt zusammen.

- Rein thermische Verformung (V1).

Ausgehend von der über den Querschnitt konstanten Starttemperatur ϑ_α wird der Platte ein Temperaturprofil (siehe Bild 3) aufgeprägt. Für die thermische Dehnung der warmen Plattenoberseite in x-Richtung gilt nach der Einstellung eines stationären Temperaturprofils (Zustand Ω) Gl. (1).

$$\varepsilon_{x,w,V1} = \alpha \cdot (\vartheta_{\Omega,w} - \vartheta_\alpha) \quad (2)$$

- Verformung der Platte aufgrund der Normalspannungen in x-Richtung (V2)

Die Verformung der Platte in x-Richtung durch die Normalspannung in x-Richtung können nach dem Hook'schen Gesetz für die Oberseite nach Gl. (3) angegeben werden.

$$\varepsilon_{x,w,V2} = \frac{\sigma_{x,w}}{E} \quad (3)$$

Die Normalspannung in x-Richtung hat aufgrund der Querkontraktion² auch eine Verformung in y-Richtung zur Folge (Gl. (4)). Da die Ober- und Unterseite der Platten sich gegenseitig in ihrer freien Dehnung behindern, entstehen auf der Plattenober- bzw. Unterseite Druck- bzw. Zugspannungen.

$$\varepsilon_{y,w,V2} = -\nu \cdot \frac{\sigma_{x,w}}{E} \quad (4)$$

Hierbei wirkt die Verformung in y-Richtung (Querkontraktion) aufgrund der Normalspannung in x-Richtung (somit der Verformung in x-Richtung) vom Vorzeichen her jeweils entgegengesetzt („-“ in Gl. (4)).

- Verformung der Platte aufgrund der Normalspannungen in y-Richtung (V3)

Für die Verformungen - hervorgerufen durch die Normalspannung in y-Richtung - gelten prinzipiell die analogen Ansätze wie für die Verformungen, die durch die Normalspannungen in x-Richtung verursacht werden. Für die Verformung in y-Richtung aufgrund der Normalspannung in y-Richtung gilt Gl. (5)

$$\varepsilon_{y,w,V3} = \frac{\sigma_{y,w}}{E} \quad (5)$$

Gl. (6) gibt analog zu Gl. (4) die Verformung in x-Richtung (Querkontraktion) aufgrund der Normalspannung in y-Richtung an.

² Die Längenänderung Δl eines elastischen Körpers, die durch eine Kraft hervorgerufen wird, hat zur Folge, dass senkrecht zur Längenänderung der Querschnitt des Körpers Δd ändert. Das Verhältnis der relativen Änderung des Querschnitts $\Delta d/d$ zur der relativen Längenänderung $\Delta l/l$ wird als Querkontraktionszahl ν bezeichnet.

$$\varepsilon_{x,w,V3} = -\nu \cdot \frac{\sigma_{y,w}}{E} \quad (6)$$

Unter der Voraussetzung, dass die E-Module in x- und y-Richtung gleich sind, gilt auch, dass die Spannungen in x- und y-Richtung identisch sind. Die Addition der einzelnen Verformungen V1 bis V3 ergibt die Gesamtverformung nach Gl. (7).

$$\varepsilon_{x,w} = \varepsilon_{x,w,V1} + \varepsilon_{x,w,V2} + \varepsilon_{x,w,V3} = \alpha \cdot (\vartheta_{\Omega,w} - \vartheta_{\alpha}) + \frac{\sigma_w}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_w}{E} \quad (7)$$

Da für Fall 1 (siehe Bild 3) keine Biegung zugelassen ist, müssen die Verformungen in x- und y-Richtung auf der warmen und kalten Seite der Platte in ihrer Summe identisch sein (Verformungleichheit, Gl. (8)).

$$\varepsilon_{x,w} = \varepsilon_{y,w} = \varepsilon_{x,k} = \varepsilon_{y,k} \quad (8)$$

Unter der Voraussetzung, dass die E-Module über den Querschnitt der Platte konstant sind, gilt:

$$-\sigma_w = \sigma_k \quad (9)$$

Aus den Gleichungen Gl. (7) bis Gl. (9) können dann die Wärmespannungen, d.h. Druckspannungen in der warmen und Zugspannungen in der kalten Plattenseite berechnet werden.

$$\sigma_k = -\sigma_w = \frac{E \cdot (\alpha_{\vartheta_{\Omega,w}} \cdot \vartheta_{\Omega,w} - \alpha_{\vartheta_{\Omega,k}} \cdot \vartheta_{\Omega,k})}{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (10)$$

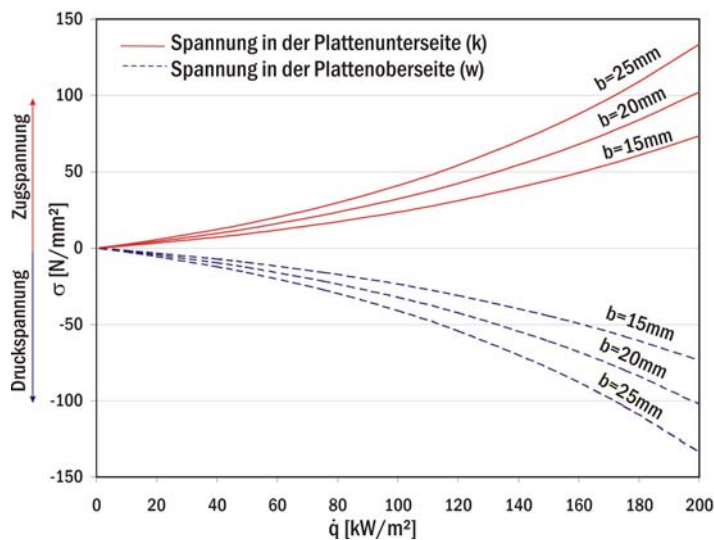


Bild 5. Kräfte in der Platte durch verhinderte freie Dehnung.

Bild 5 zeigt die Zug- und Druckspannungen, die sich in der Platte aufgrund der verhinderten freien Dehnung ergeben. Bei der Erhöhung der Temperaturdifferenz über der Plattenhöhe nimmt die Spannung naturgemäß zu (siehe auch Gl. (10)). Beeinflusst wird diese Temperaturdifferenz durch die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmestromdichte und die Stärke der Platte. Die Kurven in Bild 5 zeigen den Einfluss der Plattenstärke und der Wärmestromdichte auf die Spannungen. Als Berechnungsgrundlage für die in Bild 5 gezeigten Kurven wurden Materialeigenschaften aus [1] verwendet. Im Praxiseinsatz treten die in Bild 5 gezeigten

Spannungsverläufe prinzipiell auf, wenn durch das Befestigungssystem der Platte an der Membranwand die freie Verformung verhindert wird (Befestigung über die gesamte Länge der Platte).

3.2 Fall 2 – freie Verformung

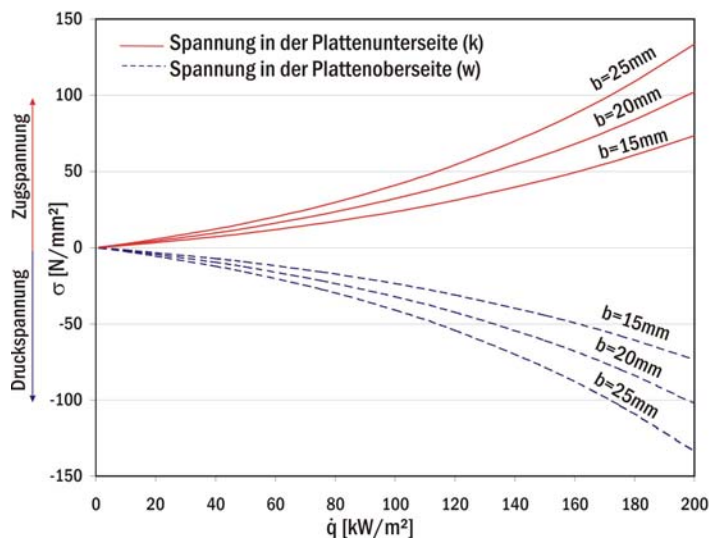


Bild 6. Berechnung der Höhe der Durchbiegung.

Wie bereits erwähnt, führt ein Temperaturunterschied zwischen der Plattenober- und Unterseite bei freier Dehnung zur Aufwölbung der Platte (siehe Bild 3 und Bild 6).

Im Folgenden soll beispielhaft für einen Längsschnitt durch die Feuerfestplatte (siehe Bild 7) die Aufwölbungshöhe (Δz) berechnet werden.

Bild 7 zeigt hierzu die geometrischen Randbedingungen. Die thermische Längung Δl der Plattenober- und Unterseite ausgehend vom Anfangszustand (α) lässt sich für den Endzustand (Ω) nach Gleichung (1) beschreiben. Aus der Differenz der Dehnungen δ der Plattenober- und Unterseite kann der Öffnungswinkel φ

$$\varphi = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\delta/2}{b}\right) \quad (11)$$

des Kreissegmentes (Gl. (11)) und somit die Höhe der Durchbiegung Δz berechnet werden (Gl. (12)).

$$\Delta z = \frac{l_{k,\Omega}}{2} \cdot \tan\left(\frac{\varphi}{4}\right) \quad (12)$$

Da die Höhe der Durchbiegung im Vergleich zur Stärke und Länge der Platte gering ist, ergibt sich vereinfachend:

$$\Delta z_{1.Vereinfachung} = \frac{l_{k,\Omega} \cdot \delta}{8b} \quad (13)$$

Die Differenz der Dehnungen δ hängt naturgemäß von dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten und von dem Temperaturgradienten in der Platte ab. Der Temperaturgradient in der Platte kann wiederum als Funktion der Wärmestromdichte und der Materialeitfähigkeit angesetzt werden. Unter der Annahme, dass die absolute Längenänderung der Platte im Vergleich zu der Länge im Ausgangszustand gering und der Wärmedehnungskoeffizient über dem betrachteten Querschnitt konstant sind, kann Gleichung (13) weiter vereinfacht werden (Gl. (14)).

$$\Delta z_{2.Vereinfachung} = \dot{q} \cdot l_{\alpha}^2 \cdot \frac{\alpha}{8\lambda} \quad (14)$$

Somit zeigt sich, dass zwischen der Wärmestromdichte und der Höhe der Durchbiegung ein linearer Zusammenhang besteht.

Bild 7 zeigt die aus den Gl. (12), (13) und (14) berechnete Höhe der Aufwölbung als eine Funktion der Wärmestromdichte (Materialdaten aus [1]). Die exakten Berechnungen nach Gl. (12) und die erste Vereinfachung nach Gl. (13) ergeben für die hier betrachteten Winkelbereiche identische Werte. Diese sind aufgrund der Berücksichtigung des temperaturabhängigen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten größer als die nach Gl. (14) berechneten Aufwölbungen.

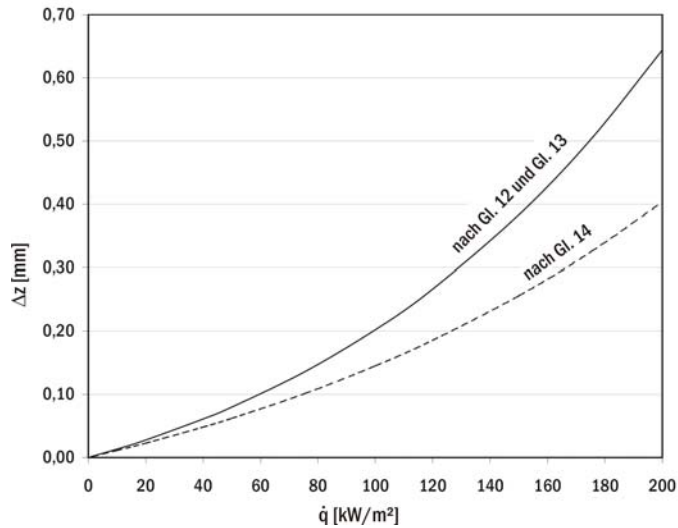


Bild 7. Höhe der Durchbiegung als Funktion der Wärmestromdichte für eine Plattenlänge von 300 mm.

Die bisher dargestellten Ergebnisse beschreiben die Spannungs- und Verformungszustände in der Keramikplatte. Hierbei wird deutlich, dass die Behinderung der Verformung u.U. hohe Zug- und Druckspannungen zur Folge haben kann. Im Folgenden werden die Spannungszustände in Materialverbund bestehend aus der keramischer Zustellung und der metallischen Membranwand betrachtet.

4 Auswirkung des Temperaturfeldes auf die Spannungen im Werkstoffverbund

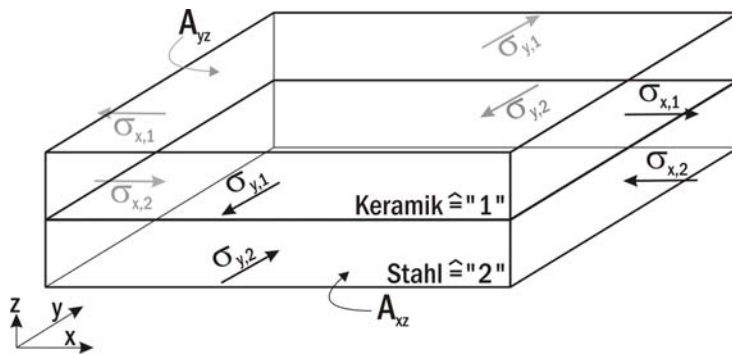


Bild 8. Randbedingungen für die Berechnung der Durchbiegung.

Bild 8 zeigt schematisch den Aufbau bestehend aus der metallischen Membranwand und keramischer Zustellung. Wird dieser Werkstoffverbund ausgehend von einer Starttemperatur auf eine konstante Temperatur erwärmt, kommt es aufgrund verschiedener thermischen Längenausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien zu unterschiedlichen Dehnungen. Da die Wärmedehnung des Metalls größer ist, als die der Keramik,

kommt es unter der Voraussetzung der Verformungsgleichheit (s.o.) zu Druckspannungen in der Keramik und zu Zugspannungen im Metall.

In dem hier gezeigten Beispiel wird vorausgesetzt, dass:

- über dem Querschnitt jedes Bauteils kein Temperaturgradient vorliegt,
- keine Biegungen auftreten und
- der thermische Längenausdehnungskoeffizient und der Elastizitätsmodul in x- und y-Richtung gleich sind.

Hieraus ergeben sich folgende Randbedingungen:

- Die Spannungen in x- und y-Richtung sind identisch:
($\sigma_{x,1} = \sigma_{y,1} = \sigma_1$ und $\sigma_{x,2} = \sigma_{y,2} = \sigma_2$).
- Es herrscht jeweils ein Kräftegleichgewicht in x- und y-Richtung:
 $\sigma_{x,1} \cdot A_{yz,1} = \sigma_{x,2} \cdot A_{yz,2}$ und $\sigma_{y,1} \cdot A_{xz,1} = \sigma_{y,2} \cdot A_{xz,2}$.
- Die Gesamtverformung der beiden Bauteile ist identisch:
($\varepsilon_{x,1} = \varepsilon_{x,2}$ und $\varepsilon_{y,1} = \varepsilon_{y,2}$).

Die Bestimmung der Verformungen der beiden Bauteile aufgrund der thermischen Dehnung und der Normalkräfte in x- und y-Richtung erfolgt analog zu Abschnitt 3.1, Gleichung (7).

Unter Beachtung der Verformungskompatibilität (Randbedingung 3) können die Normalspannungen in den Bauteilen berechnet werden (hier für die x-Richtung):

$$\sigma_{x,1} = \frac{E_2 \cdot [(\vartheta_{\Omega,2} - \vartheta_a) \cdot \alpha_2 - (\vartheta_{\Omega,1} - \vartheta_a) \cdot \alpha_1]}{(1 - \nu_1) \cdot \frac{E_2}{E_1} + (1 - \nu_2) \cdot \frac{A_{yz,2}}{A_{yz,1}}} \quad (15)$$

$$\sigma_{x,2} = \frac{E_1 \cdot [(\vartheta_{\Omega,1} - \vartheta_a) \cdot \alpha_1 - (\vartheta_{\Omega,2} - \vartheta_a) \cdot \alpha_2]}{(1 - \nu_2) \cdot \frac{E_1}{E_2} + (1 - \nu_1) \cdot \frac{A_{yz,1}}{A_{yz,2}}} \quad (16)$$

Die in Gleichung (15) und (16) aufgeführten Temperaturen stellen jeweils Mittelwerte für die beiden Bauteile - keramische Platte und Membranwand - dar. Somit müssen zur Berechnung der Spannungen im Materialverbund zunächst die mittleren Temperaturen der Bauteile 1 und 2 berechnet werden. Hierzu wird zwischen der keramischen Zustellung und der

Membranwand eine Hintergussmasse eingefügt. Die Stärke der Hintergussmasse und deren Wärmeleitfähigkeit haben naturgemäß einen starken Einfluss auf die mittlere Plattentemperatur. Die Hintergussmassen haben i.d.R. vergleichsweise geringe Festigkeiten und Schichtstärken und werden daher bei der Spannungsberechnung nicht weiter berücksichtigt.

Die Bilder 9a bis c zeigen die Spannungen in der keramischen Platte und der Membranwand. Bei den vorliegenden Randbedingungen (s.o.) wird die Dehnung der Membranwand von der keramischen Platte zurückgehalten. Somit treten in der keramischen Zustellung Zugspannungen und der Membranwand Druckspannungen auf.

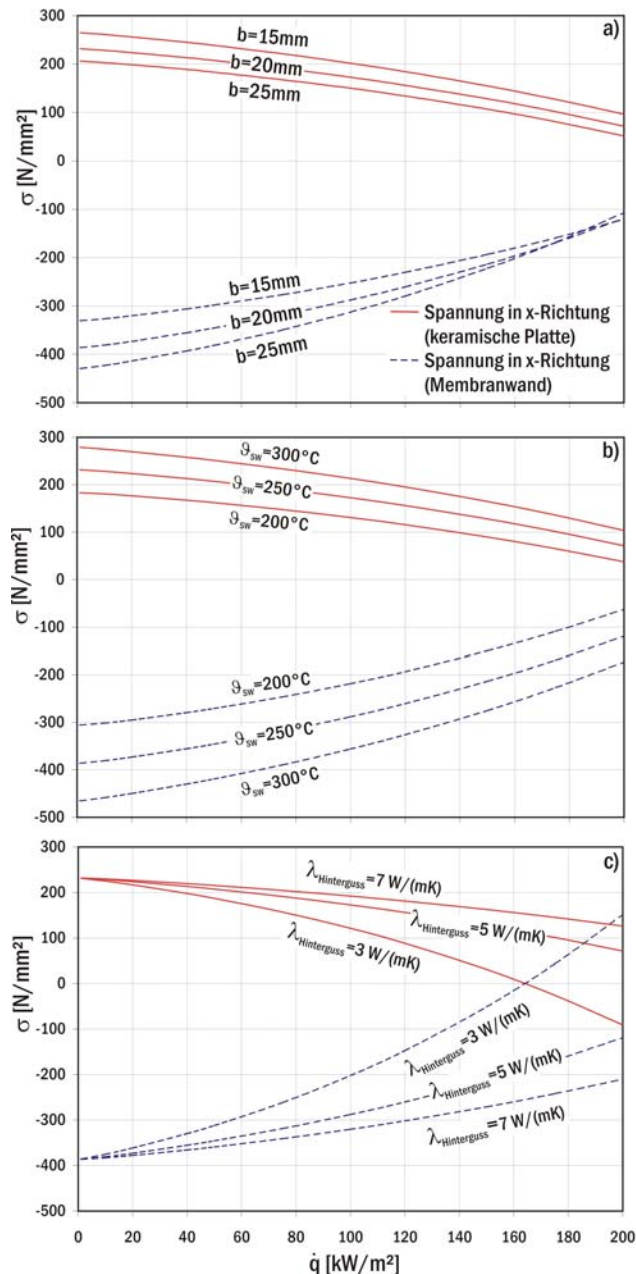


Bild 9. Darstellung der Spannungen im Werkstoffverbund, als Funktion der Wärmestromdichte und:

- der Plattenstärke,
- der Siedewassertemperatur,
- der Wärmeleitfähigkeit der Hintergussmasse.

Die Darstellung der Spannungsverläufe erfolgt über der eintretenden Wärmestromdichte. Wird zunächst davon ausgegangen, dass eine konstante Siedewassertemperatur vorliegt, so beeinflusst die Wärmestromdichte nur den Temperaturgradienten in der Platte und der Hintergussmasse und somit die mittlere Plattentemperatur. Ein Ansteigen der Wärmestromdichte führt zwangsläufig zur Erhöhung des Temperaturgradienten bzw. der mittleren Plattentemperatur. Für den Fall, dass keine Wärmestromdichte vom Feuerraum auf die Platte aufgeprägt wird (von Außen), entspricht die Temperatur des gesamten Wandaufbaus der Siedewassertemperatur (Temperaturgradient in Wandaufbau ist null). In allen Diagrammen aus Bild 9 ergeben sich für den Fall, dass keine Wärmestromdichte von Außen eintritt die höchsten Spannungen. Mit zunehmender Wärmestromdichte von Außen steigt die mittlere Temperatur der Platte bei gleich bleibender Membranwandtemperatur an. Durch die damit verbundene Dehnung der Platte werden die Zugspannungen verringert.

In Bild 9 a wird der Einfluss der Plattenstärke auf die Spannungen gezeigt. Aus Gründen des Kräftegleichgewichts zwischen Membranwand und Zustellung nimmt bei steigender Plattenstärke die Zugspannung ab. Verstärkt wird das Absinken der Spannung dadurch, dass die mittlere Plattentemperatur mit der Plattenstärke zunimmt. Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich eine Erhöhung der Plattentemperatur positiv auf den Abbau der Spannungen auswirkt. Bild 9 b beschreibt den Einfluss der Siedewassertemperatur auf die Spannungen im Wandaufbau. Wie hier zu entnehmen ist, steigen die Spannungen mit der Erhöhung der Siedewassertemperatur an. Je wärmer das Siedewasser ist, desto größer ist die Längung

des Wandaufbaus. Wie hier zu entnehmen ist, steigen die Spannungen mit der Erhöhung der Siedewassertemperatur an. Je wärmer das Siedewasser ist, desto größer ist die Längung

der Membranwand, was automatisch zu einem Ansteigen der Zug- und Druckspannung führt. Ein weiterer Einfluss auf die Spannungen im Wandaufbau beruht auf der Wärmeleitfähigkeit der keramischen Platte bzw. der Hintergussmasse. Nicht zuletzt aufgrund der Tatsache, dass die Hintergussmasse erst während des Montagevorgangs angerührt und eingefüllt wird, liegt bei diesem Konstruktionselement die am wenigsten gesicherte Datenlage vor. Aus diesem Grund soll hier der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Hintergussmasse gezeigt werden (siehe Bild 9 c). Eine Erniedrigung der Leitfähigkeit der Hintergussmasse führt zur Erhöhung der mittleren Plattentemperatur. Dies hat eine größere Längung der Platte und somit einen Abbau der Spannungen im Wandaufbau zur Folge. Bild 9 c zeigt, dass unter bestimmten Umständen (z.B. Wärmeleitfähigkeit von 3 W/(mK)) Druckspannungen in der Platte bzw. Zugspannungen im Membranwandaufbau entstehen können. Die thermische Dehnung der Platte kann somit u.U. größer sein, als die der Membranwand. Dies kann ebenfalls auftreten, für den Fall, dass die Wärmeleitfähigkeit der Platte entsprechend gering ist. Anhand der Diagramme in Bild 9 a bis c kann gezeigt werden, dass bei stationärem Kesselbetrieb Druckspannungen in der Platte erst bei sehr hohen Wärmestromdichten bzw. niedrigen Wärmeleitfähigkeiten der Hintergussmassen bzw. Platten auftreten. Darüber hinaus treten gerade bei instationären Betriebszuständen – auf die hier nicht weiter eingegangen wird – Druckspannungen in der Platte auf. Für den Fall, dass das Kesselwasser kalt ist und der Platte eine Wärmestromdichte aufgeprägt wird (z.B. Anfahren der Anlage mit Stützbrennerbetrieb oder massiver Druckabfall in den Siederohren bei konstanter Verbrennungsleistung) kommt es u.U. durch ein Schließen der Dehnfugen zu Druckspannungen in der Platte.

5 Zusammenfassung

Die vereinfachten Berechnungsansätze geben einen guten Überblick über mögliche Spannungen und Verformungen für keramische Plattensysteme an Membranwänden von Dampferzeugern. Die Spannungen und Verformungen treten hierbei aufgrund ungleichmäßiger thermischer Dehnung z.B. der beiden Plattenseiten oder des Materialverbundes aus keramischer Platte und metallischer Membranwand auf.

Der Berechnungsansatz für den Fall, dass die keramische Platte über ihrer gesamten Länge an der Membranwand befestigt wird, zeigt, dass große innere Spannungen aufgrund des Temperaturgradienten in der Platte auftreten. Der Temperaturgradient wird hierbei durch die Plattenstärke, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmestromdichte beeinflusst. Es zeigt sich, dass eine Verringerung der Plattestärke bzw. eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu niedrigeren Spannungen in der Platte führen. Eine Installationsweise, bei der die keramische Platte nicht über der gesamten Länge an der Membranwand befestigt wird ist hingegen geeigneter, um die inneren Spannungen zu mindern. Beispielsweise besteht bei der hinterlüfteten Platte die Möglichkeit der freien Dehnung, hier kommt es zur Aufwölbung der Platte (weg von der Membranwand). Anhand der vereinfachten Betrachtung wird gezeigt, dass die Höhe der Aufwölbung linear mit der Wärmestromdichte und quadratisch mit der Plattenlänge ansteigt.

Bei der theoretischen Betrachtung der Spannungen im Materialverbund zwischen keramischer Platte und Membranwand zeigt sich, dass aufgrund der stark unterschiedlichen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten u.U. hohe Zuspansungen in der keramischen Zustellung entstehen. Maximale Zugspannungen in der Platte treten auf, wenn der gesamte Wandaufbau im aufgeheizten Zustand die Siedewassertemperatur annimmt, d.h. keine Wärmestromdichte von Außen eintritt. Mit steigender Wärmestromdichte erhöht sich dann im Wesentlichen nur die mittlere Plattentemperatur, die Temperatur der Membranwand ändert sich aufgrund der konstanten Siedewassertemperatur nur geringfügig. Somit ist die thermische Dehnung der Platte bei steigender Wärmestromdichte ausgeprägter, als die der Membranwand. Die Zugspannungen in der Platte sind dann entsprechend geringer. Wie schon bei der Betrachtung der Platte im Einzelnen (s.o.), zeigt sich auch hier, dass ein fester Materialverbund zwischen der Platte und der Membranwand nicht sinnvoll erscheint. Das Befestigungssystem der

Zustellung sollte eine gewisse Relativbewegung zwischen der Platte und der Membranwand zulassen. Die weitaus größere Dehnung der Membranwand im Vergleich zur keramischen Platte erfordern bei stationärem und regulärem Anlagenbetrieb keine Dehnfugen in der Zustellung. Allerdings kann es bei instationären Betriebszuständen (z.B. Anfahren der kalten Kesselanlage mit Stützbrennern oder massiver Druckabfall in den Siederohren bei konstanter Verbrennungsleistung) durch zu geringe Dehnfugen zu Druckspannungen in den Platten kommen.

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 Anhang

6.1 Symbole und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben			Griechische Symbole		
A	m ²	Fläche	α	1/K	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient
b	m	Stärke der Platte	δ	m	Dehnungsdifferenz
E	N/m ²	E-Modul	Δ	-	Differenz
l	m	Länge	ε	-	Längenänderung
\dot{q}	kW/m ²	Wärmestromdichte	ϑ	°C	Temperatur
x,y,z	-	Koordinaten/Richtungen	λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
			ν	-	Querkontraktionszahl
			σ	N/m ²	Spannung
			φ	°	Segmentwinkel

Indices

0	Ausgangszustand
1	Bauteil 1 (keramische Platte)
2	Bauteil 2 (Membranwand)
k	kalte Seite der Platte
w	warme Seite der Platte
SW	Siedewasser
x,y,z	Richtungsanzeige
α	Zustand vor einer Änderung
Ω	Zustand nach einer Änderung

6.2 Schrifttum

- [1] Herstellerangabe.
- [2] Routschka, G.: Taschenbuch Feuerfeste Werkstoffe. 1. Ausgabe, Essen, Vulkan-Verlag, 1996.
- [3] Kienow, S.; H. W. Hennicke: Elastizitäts- und Verformungsmodul bei feuerfesten Steinen. Tonind. Ztg., 90, No. 12, 575–577 (1966).
- [4] Das, T. K.; P. Jeschke: Spannungen und Verformungen in feuerfestem Mauerwerk. Ber. Dt. Keram. Ges., 52, No. 5, 126–130 (1975).

- [5] Bürgel, R.: Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik, Band 1.
- [6] Beckmann, M.; Krüger, S.; Magel, G.; Spiegel, W.: Online Bestimmung des Wärmestroms auf Membranverdampferwände von Dampferzeugern. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 978-3-93-5317-26-9. S. 641 – 658. Tagung Berlin 31.01. – 01.02.2007.