

# Erhöhung der Lebensdauer metallischer Komponenten im Industrieofenbau (z. B. Strahlheizrohre, Muffeln, Brennerkomponenten, Rollen)

Bölling, R.; Hellenkamp, M.; Pfeifer, H.

Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, RWTH Aachen

Kopernikusstr.10, 52074 Aachen

Kontakt: [boelling@iob.rwth-aachen.de](mailto:boelling@iob.rwth-aachen.de)

## Zusammenfassung

Hohe Temperaturen sowie vor allem lokale Temperaturspitzen und deren Gradienten in den unterschiedlichen Komponenten des Industrieofens stellen ein Problem für die Haltbarkeit der Ofenkonstruktion oder einzelner Ofenkomponenten dar. Um Ofenkomponenten zu optimieren und damit ihre Lebensdauer zu erhöhen ist daher die exakte Kenntnis der Temperaturverteilung auf dem entsprechenden Bauteil von entscheidender Bedeutung. Dies führt zu einer gekoppelten Betrachtung der strömungs- und wärmetechnischen Verhältnisse im Ofen mit der Spannungsberechnung im betrachteten Bauteil. Für die Einführung der so genannten Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) im Bereich Anlagenbau/Industrieofenbau werden Berechnungen zur Temperatur- und Spannungsverteilung auf einem Strahlheizrohr durchgeführt, da diese unter besonderer thermischer Belastung stehen.

High temperatures as well as local temperature peaks and their gradients within the different components of industrial furnaces are a problem for the durability of the furnace construction or single components. In order to optimize furnace component design and thereby increase the life expectancy of the considered component the exact knowledge of local temperature distributions is indispensable. This leads to a coupled examination of fluid flow and thermal processes with stress calculation in the considered component.

In order to introduce the so-called Fluid-Structure-Interaction (FSI) in the field of plant engineering and industrial furnace engineering a radiant heating tube was selected for calculations concerning temperature- and stress distribution, since particularly radiant heating tubes are subject to considerable thermal loading.

Industrieofenanlagen sind abhängig von ihrem Einsatzgebiet unterschiedlichen thermischen Belastungen ausgesetzt. Anlagen zur Wärmebehandlung von Aluminium werden z.B. im Temperaturbereich von 200-600°C betrieben. In Anlagen der Stahlindustrie werden zum Teil

Guttemperaturen von über 1000 °C benötigt, und in der keramischen Industrie sind Temperaturen um 1500 °C keine Seltenheit.

Allein aus diesen unterschiedlichen Ofenraumtemperaturen ergeben sich erhebliche Anforderungen an die eingesetzten Materialien, da die mechanischen Festigkeitswerte mit zunehmender Temperatur stark abnehmen.

Allerdings stellt nicht die mittlere Anwendungstemperatur des Ofens ein Problem für die Haltbarkeit der Ofenkonstruktion oder einzelner Ofenkomponenten dar, sondern vor allem die lokalen Temperaturspitzen und deren Gradienten in den unterschiedlichen Komponenten des Industrieofens. Besonders belastet sind hierbei Strahlheizrohre.

Der Wärmeübergang auf der Innenseite eines brennstoffbeheizten Strahlheizrohres folgt aus Flammenausbreitung, Wärmestrahlung und Konvektion im Rohr. Bei einer diathermanen Ofenatmosphäre, z.B. Stickstoff ( $N_2$ ), hängt der Wärmeübergang auf der Außenseite des Strahlheizrohres von der konvektiven „Kühlung“ der Strahlheizrohroberfläche und dem Strahlungsaustausch mit den als Hilfsheizflächen dienenden Ofenwänden ab. Die Wärmeabfuhr an den Hilfsheizflächen geschieht wiederum über Konvektion (Bild 1).

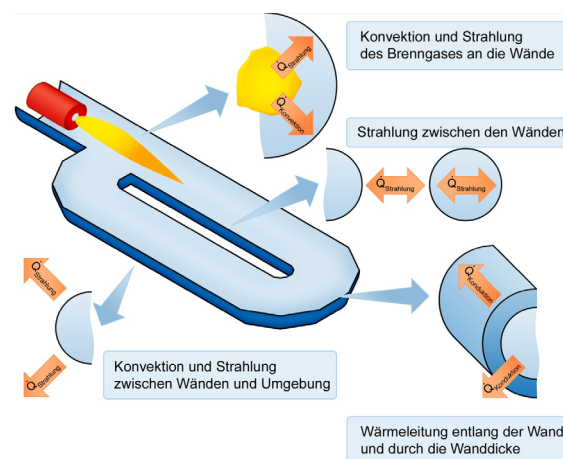


Bild 1: Wärmeübertragungsmechanismen am Strahlheizrohr

### Belastungsmechanismen

Bild 2 zeigt beispielhaft die mittels CFD berechnete Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Strahlheizrohre eines Schwebebandofens. Als Randbedingung für die Simulation wurde die Oberfläche der Strahlheizrohre mit einer konstanten Wärmestromdichte belegt. Die Bereiche unterschiedlicher Temperaturen kennzeichnen somit die Bereiche unterschiedlicher Wärmeübergangsbedingungen auf der Außenseite.

Die Ergebnisse aus Bild 2 zeigen, dass hohe Temperaturgradienten auf der Oberfläche von Strahlheizrohren zu erwarten sind. Diese Temperaturgradienten erzeugen thermisch induzierte Spannungen im Strahlheizrohr, die zu Verformungen und letztendlich zum Ausfall führen können.

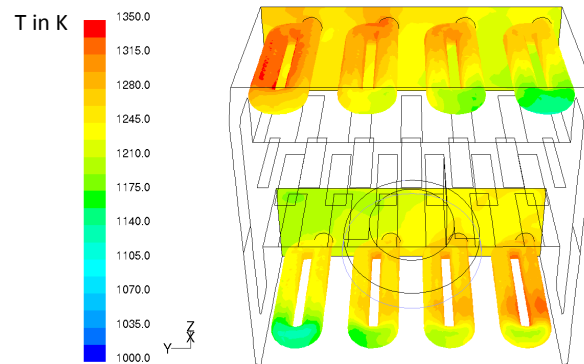


Bild 2: Oberflächentemperatur auf P-Strahlheizrohren [1]

Schäden an Strahlheizrohren in thermischen Anlagen gehören zum Alltag von Anlagenbetreibern. Die Mechanismen, die für Schädigungen verantwortlich sind, lassen sich im Wesentlichen in vier Phänomene einteilen:

**1. Wechselbelastungen der Ofenkomponenten durch Aufheizen und Abkühlen:**

Besonders kritisch beim chargenweisen Betrieb (Batch-Betrieb; jeder Ofenzyklus besteht aus Aufheizen  $\Rightarrow$  Halten  $\Rightarrow$  Kühlen). Chargenweise betriebene Öfen zeichnen sich durch häufiges Aufheizen und Abkühlen des Ofens aus. Hierbei treten extreme thermische Wechselbelastungen im Ofen auf, welche die Lebensdauer der Anlage stark beeinflussen.

**2. Inhomogene Temperaturfelder im Ofen:**

Treten auch in kontinuierlich betriebenen Ofenanlagen auf. Durch z. B. unterschiedliche Abstände der Heizelemente (z. B. Brenner, elektrische Widerstandsheizelemente, usw.) zum betrachteten Bauteil werden dreidimensionale Temperaturfelder mit daraus resultierenden thermisch induzierten Spannungen im Ofen erzeugt (Bild 2).

**3. Instationäre Zustände im Ofen:**

Durch z. B. getaktete Brenner (Aus-Ein oder Min-Max Regelung) werden auch im stationären Betrieb einer Ofenanlage instationäre Zustände erzeugt, welche Wechselbelastungen im Bauteil hervorrufen.

**4. Alterungserscheinungen:**

Durch thermisches Kriechen verändern Bauteile ihre Form und Lage, wodurch ebenfalls Schädigungen resultieren können.

Bei den Alterungserscheinungen handelt es sich, anders als bei den Phänomenen 1 bis 3, um eine Langzeitercheinung, bei der Verformungen ohne Überschreiten der Zugfestigkeit  $R_m$  oder  $R_{p0,2}$  zu beobachten sind. Da die zugrunde liegenden Kriechmodelle in der Regel noch Gegenstand der Forschung sind, bleiben sie im Rahmen dieses Berichtes unberücksichtigt.

## Fluid-Struktur-Interaktion

Bei Betrachtung der oben genannten Phänomene wird klar, dass die exakte Kenntnis der Temperaturverteilung unabdingbar ist, um Ofenkomponenten zu optimieren und damit ihre Lebensdauer zu erhöhen. Dies führt zu einer Kopplung der strömungs- und wärmetechnischen Berechnungen im Ofen mit der Spannungsberechnung im betrachteten Bauteil. Strömungs- und Wärmetechnik werden hierbei mittels CFD (**C**omputational-**F**luid-**D**ynamics – numerische Strömungssimulation) berechnet, während die Spannungsberechnung mittels CSD (**C**omputational-**S**tructural-**D**ynamics – Strukturmechanik Simulation) erfolgt. Diese so genannte **Fluid-Struktur-Interaktion (FSI)**, vgl. Bild 3, stellt eine innovative Vorgehensweise zur Beschreibung gekoppelter Probleme dar. Durch die mittels FSI erlangten detaillierten Aussagen über die Belastungen und Verformungen im Bauteil kann die Gefahr des Versagens bereits in der Konstruktionsphase berücksichtigt werden.

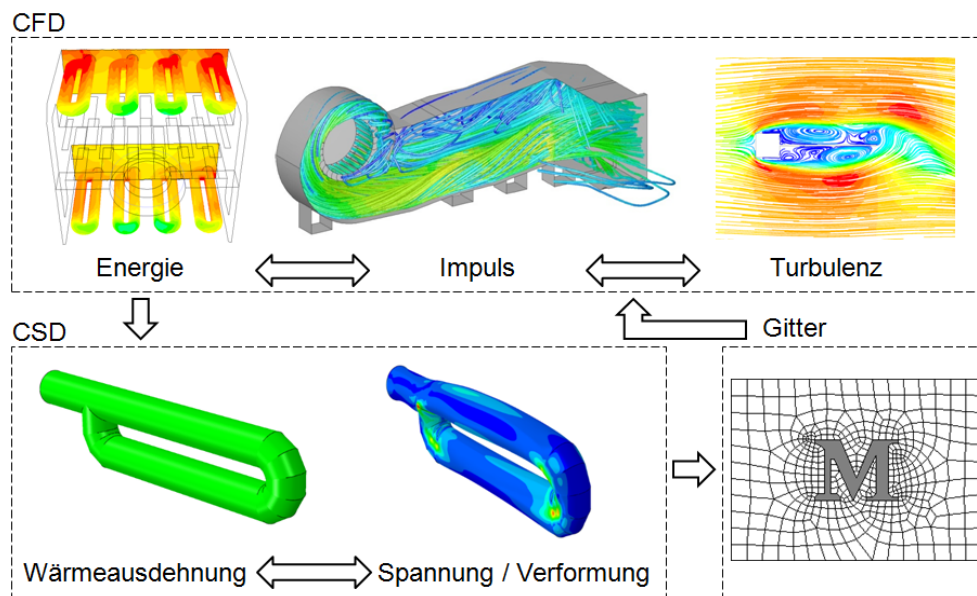


Bild 3: Fluid-Struktur-Interaktion

Für die Einführung dieser Methode im Bereich Industrieofenbau wurde als zu untersuchende Ofenkomponente das Strahlheizrohr ausgewählt. Die numerisch ermittelten wärmetechnischen Verhältnisse wurden an einem Versuchsstand experimentell validiert.

## Experimenteller Aufbau und Simulation

Dieser Versuchsstand besteht aus einem geschlossenen Ofenraum mit einem metallischen Strahlheizrohr in P-Form, siehe Bild 4. Beheizt wird dieses durch einen Erdgasbrenner mit Rekuperator und einer Nennleistung von 90 kW. Mit der Strahlrohroberfläche von  $2,7 \text{ m}^2$  wird unter Berücksichtigung der Abgasverluste mit einem feuerungstechnischen Wirkungsgrad von 0,75 eine Oberflächenleistung von rund  $25 \text{ kW/m}^2$  erreicht, was üblichen Praxiswerten entspricht [2]. Durch den Einsatz von luftgekühlten Wärmesenken in der Decke bzw. dem Boden des Versuchsofens kann ein Guteintrag simuliert werden, der der Erzeugung

eines Temperaturgradienten und damit thermisch induzierter Spannungen im untersuchten Strahlheizrohr dient.

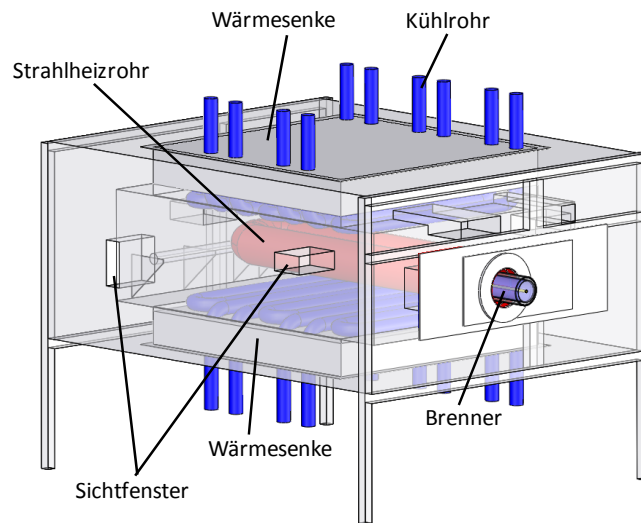


Bild 4: CAD-Modell des Versuchsstandes

Die CFD-Simulationen werden mit dem kommerziellen Simulationsprogramm FLUENT durchgeführt. Dafür wird die Strömung mit Hilfe der Reynolds-Gleichungen unter Berücksichtigung der Energiegleichung berechnet. Die Modellierung der Turbulenz erfolgt mit dem  $k-\varepsilon$  Turbulenzmodell und Wandfunktionen für die wandnahen Bereiche. Die auftretende Strahlung wird über den „Discrete Ordinates“ Ansatz berechnet, während die Verbrennung des Gas/Luft-Gemisches mit Hilfe der „Non-Premixed-Combustion“ simuliert wird.

Bei der Simulation im Ofen dient das CAD-Modell aus Bild 4 als Grundlage. Hier sind das Strahlrohr, der Ofenraum, die Kühlrohre und ein Teil der Isolationsschicht mit vergittert, um möglichst nah am realen Vorbild zu bleiben.

Die CSD-Berechnung der Spannungszustände erfolgt mit dem Programm ABAQUS für Schalen-elemente. Dabei wird ein rein elastisches Werkstoffverhalten angenommen. In der Finite-Elemente-Simulation wird ein identisches Oberflächengitter im Vergleich zur CFD verwendet, um die Knotentemperaturen aus der FLUENT Simulation 1:1 an die FEM-Simulation übergeben zu können. Die Berechnungen erfolgen für den stationären Zustand unter Berücksichtigung der Schwerkraft. Die Kopplung zwischen CFD und Finite-Elemente-Analyse wird als Einweg-Kopplung durchgeführt. Dies ist zulässig, da die erreichte Ausdehnung ca. 1% beträgt und keine signifikanten Rückwirkungen auf die Strömung zu erwarten sind.

## Ergebnisse

Im Rahmen dieses Berichtes werden die Ergebnisse für die beidseitige Kühlung des Strahlheizrohres durch den kombinierten Einsatz der oberen und unteren Wärmesenken vorgestellt. Dabei gelten die in Tabelle 1 genannten Randbedingungen:

Tabelle 1: Randbedingungen

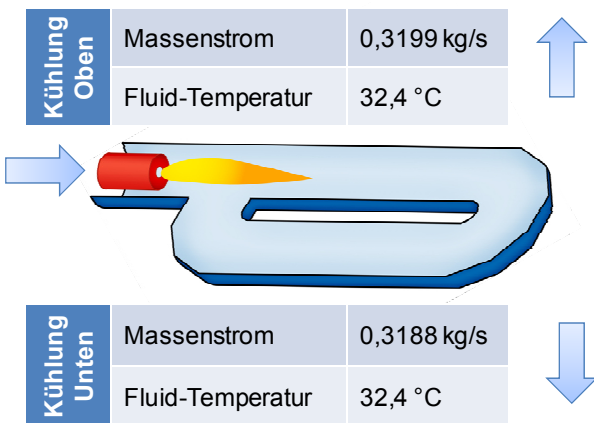
Eintritt	Leistung Brenner	82 kW	
	Luftverhältnis $\lambda$	1,08	
	Leistung Luftvorwärmung	12 kW	
	Gas-Temperatur	30,0 °C	
	Gas-Massenstrom	0,001756 kg/s	
	Luft-Temperatur	423,8 °C	
	Luft-Massenstrom	0,03031 kg/s	
Kühlung Oben	Massenstrom	0,3199 kg/s	↑
	Fluid-Temperatur	32,4 °C	
Kühlung Unten	Massenstrom	0,3188 kg/s	↓
	Fluid-Temperatur	32,4 °C	

Bild 5 a) zeigt die Geschwindigkeitsverteilung auf dem Mittelschnitt. Hinter der Reaktionszone homogenisiert sich das Geschwindigkeitsfeld. Beim Erreichen des Krümmers beschleunigt die Strömung auf der Innenseite des Rohres und löst hinter dem Krümmer ab, was anhand des Rezirkulationsgebiets in Bild 5 b) zu sehen ist.

Im unteren Schenkel des P-Strahlheizröhres strömt das Gasgemisch auf der Innenseite etwas langsamer als auf der Außenseite und schnürt auf dem Weg zum zweiten Krümmer wieder auf der Innenseite ein. Hinter dem zweiten Krümmer rezirkuliert ein Teil der Strömung, der vom Brennerfreistrahle eingezogen wird, während das restliche Gasgemisch vorbei am Rekuperator als Abgas abgeführt wird. Auch hinter dem zweiten Krümmer löst die Strömung auf der Innenseite ab, und es entsteht ein Wirbelgebiet.

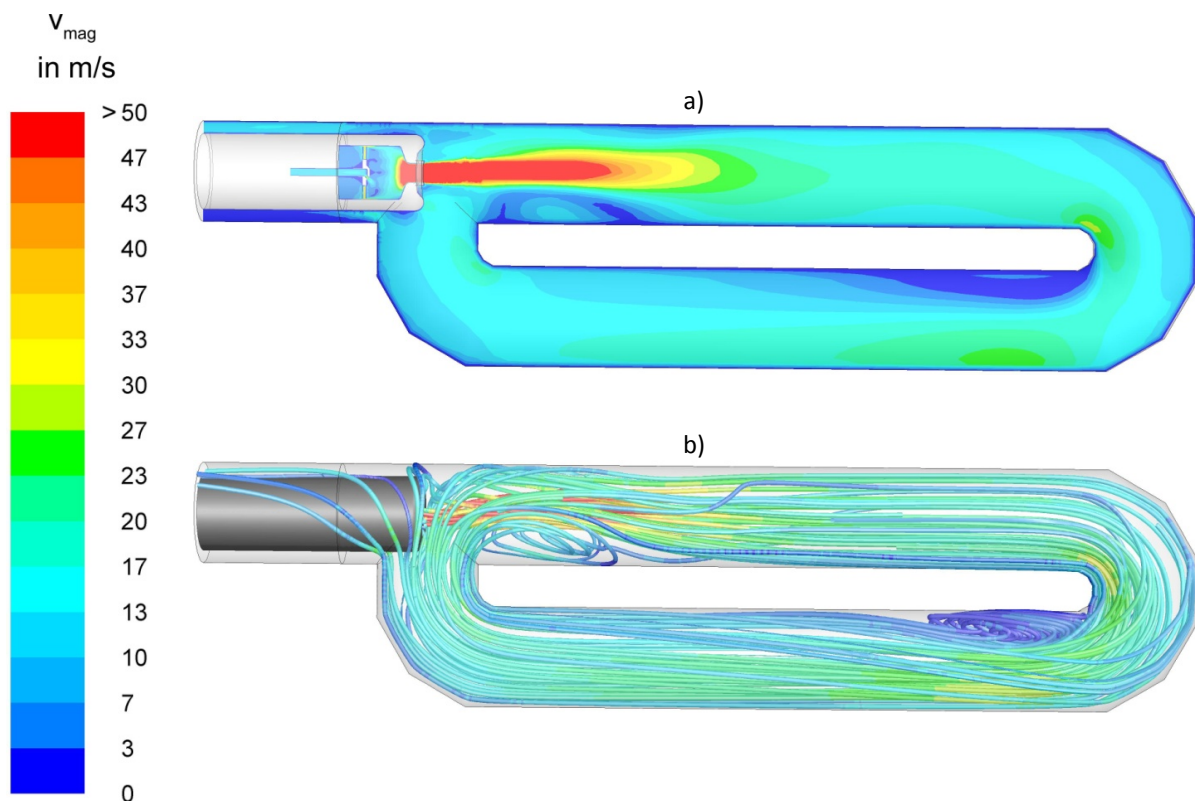


Bild 5: Geschwindigkeitsverteilung im Strahlheizröhre bei  $P_{Br} = 82 \text{ kW}$   
 a) auf dem Mittelschnitt b) für 3D-Stromlinien

Die Temperaturverteilung auf der Strahlrohroberfläche wird neben den externen Randbedingungen auch vom Wärmeübergang auf der Rohrinneenseite beeinflusst. Die auftretenden Phänomene lassen sich in Konvektion und Strahlung unterteilen, wobei auf der Innenseite des Rohres Strahlung sowohl durch das Gas als auch durch die anderen Wände emittiert und absorbiert wird. Wegen der Proportionalität der Strahlungsintensität zur vierten Potenz der Temperatur ist Gasstrahlung besonders im Bereich der Brennerflamme relevant. In weiten Teilen der Rohrinneenseite dominiert hingegen der konvektive Wärmeübergang. So beträgt der Anteil der Wärmestrahlung im Mittel ca. 45% des gesamten Wärmestroms. Die Temperaturverteilung innerhalb des Strahlrohres ist für zwei Schnitte in Bild 6 abgebildet.

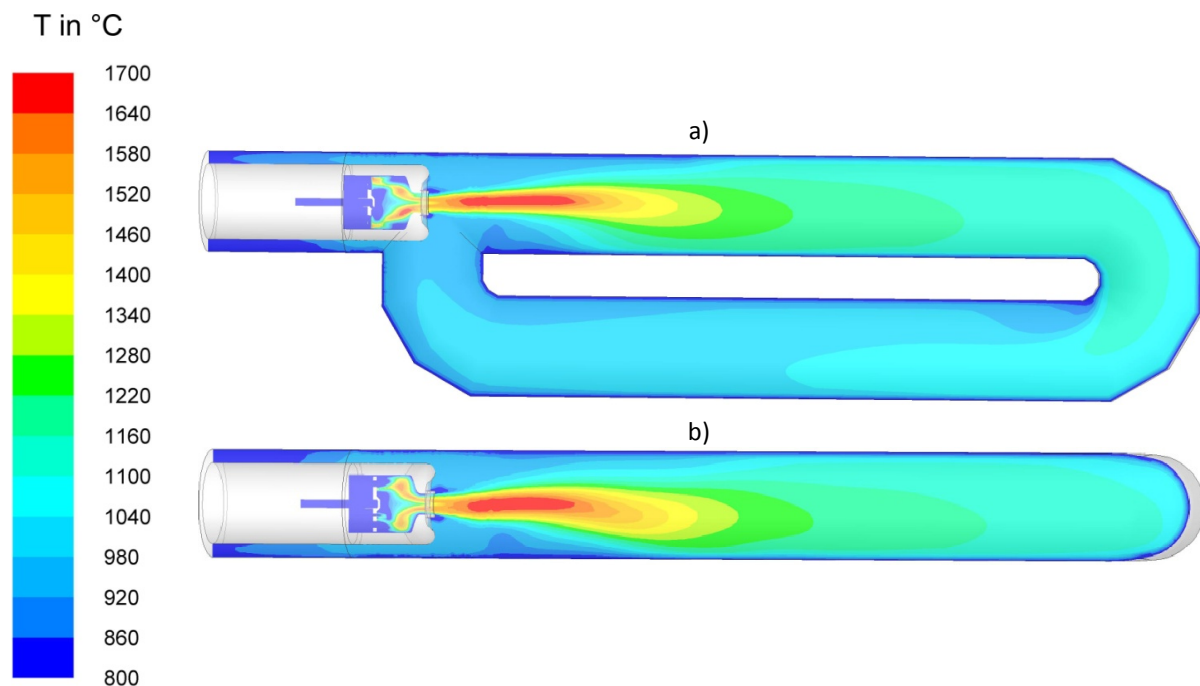


Bild 6: Temperaturen innerhalb des Strahlrohres a) auf dem Mittelschnitt von oben b) Temperatur auf Schnitt von der Seite

Bild 7 zeigt den Gesamtwärmestrom sowie den Wärmestrom durch Strahlung auf der Strahlrohraußenseite. Die Oberfläche hat die höchste Temperatur im Bereich des Rekuperators, da hier das Strahlrohr von außen mit einer Isolationsschicht umgeben ist, die die Wärmeabfuhr nahezu verhindert. Ansonsten ist in beiden Ansichten die Temperatur im Bereich der Brennerflamme maximal und nimmt entlang der Stromlinien stetig ab. Die Verläufe von Wärmestrahlung auf der Außenseite, des Gesamtwärmestroms sowie der Temperatur (a, b, d) ähneln sich stark, was darauf zurückzuführen ist, dass der Wärmetransport zur Umgebung zu über 90% durch Strahlung erfolgt, also proportional zur vierten Potenz der Temperatur ist. Auf der oberen Hälfte des Rohres in Bild 7 d) ist auf der Innenseite an der Flamme ein Strahlungsmaximum zu erkennen. Dieses Maximum ist auf die lokal vergleichsweise geringe Temperatur (vgl. Bild 7 c)) zurückzuführen. Im Gegensatz dazu zeigt sich auf der unteren Hälfte beim Temperaturmaximum im oberen Schenkel (Bild 7 c)) ein Minimum der Intensität des Wärmeübergangs durch Strahlung an der Stelle, an der die maximale Temperatur erzielt



wird. Das Temperaturmaximum entsteht durch die Neigung der Brennerflamme, die für einen starken konvektiven Wärmeübergang verantwortlich ist (Bild 6 b)).

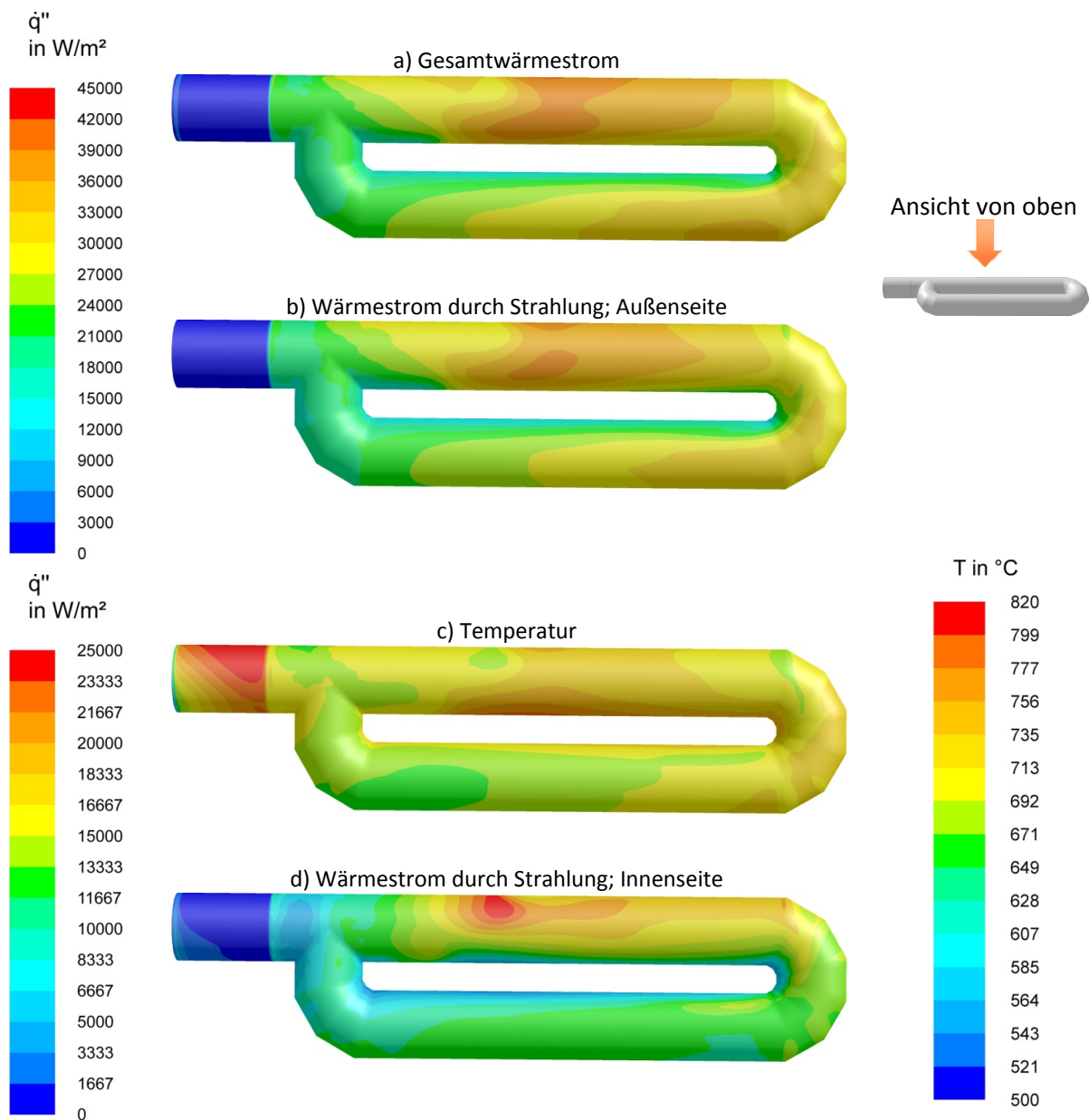


Bild 7: Wärmeströme und Temperatur der Strahlrohroberfläche bei einer Brennerleistung von 82 kW  
 a) Gesamtwärmestrom; 0-45000  $\text{W/m}^2$   
 b) Wärmestrom durch Strahlung; Außenseite; 0-45000  $\text{W/m}^2$   
 c) Temperatur; 500-800  $^\circ\text{C}$   
 d) Wärmestrom durch Strahlung; Innenseite; 0-25000  $\text{W/m}^2$

Für einen besseren Überblick werden die Oberflächentemperaturen entlang einer Linie gemäß Bild 8 visualisiert. Dabei wird zwischen den Temperaturen auf der oberen bzw. unteren Hälfte des Strahlrohres unterschieden. Die maximale Temperatur auf dem Strahlrohr beträgt 770  $^\circ\text{C}$  und wird im Bereich der Brennerflamme zwischen den Schenkeln erreicht. Die durchschnittliche Strahlrohrtemperatur beträgt 691  $^\circ\text{C}$ . Die untere Hälfte des Strahlrohres ist dabei im Mittel 2,5 K wärmer als die obere Hälfte, es gibt also einen sehr geringen Temperaturunterschied zwischen oben und unten.



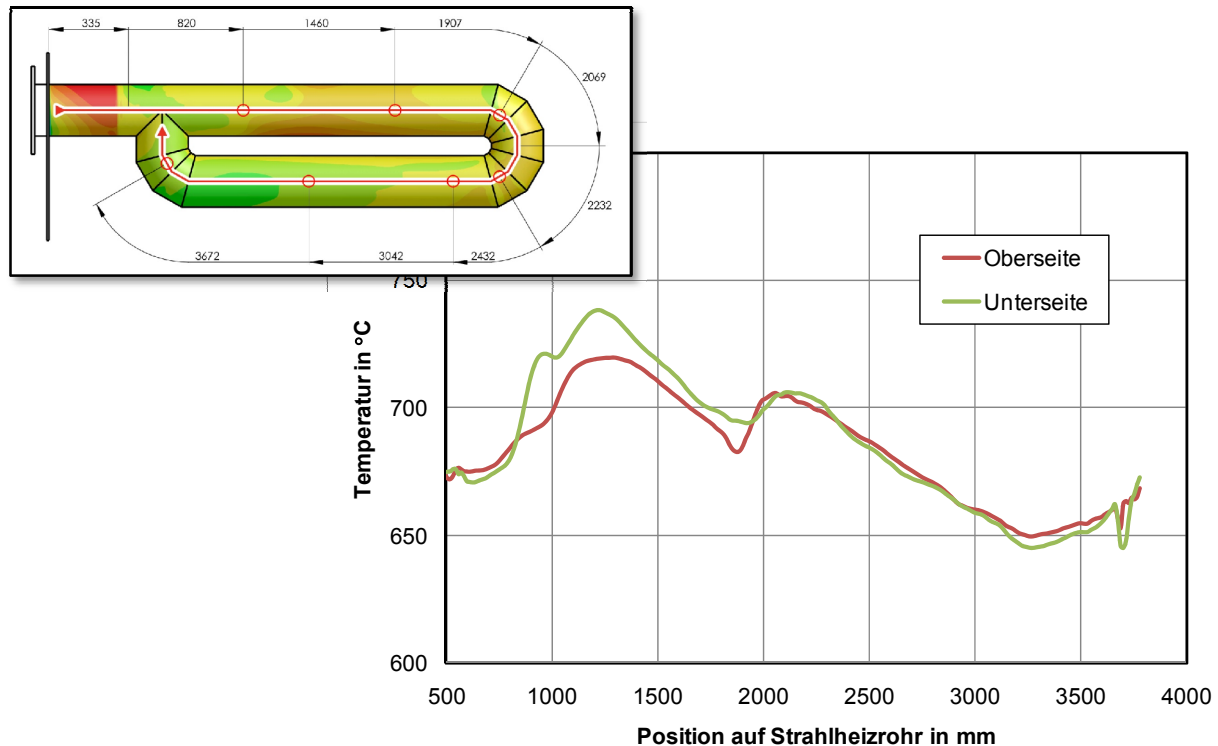


Bild 8: Temperaturverlauf für die Simulation beidseitiger Kühlung;  $P_{Br} = 82 \text{ kW}$

Bild 9 zeigt die auftretenden Spannungen, die aus den Temperaturberechnungen resultieren. Verschiedene Spannungsspitzen lassen sich dabei durch verschiedene Phänomene erklären. So wird die Spannung bei a) durch den steilen Temperaturgradienten an der Grenze zwischen Isolation und Ofenraum erreicht. Auf wenigen Zentimetern ändert sich hier die Oberflächentemperatur um über 100 K, wodurch unterschiedliche Ausdehnungen entstehen, die im Übergang in Spannungen resultieren. Die Wärmeabfuhr an der Rekuperatorwand wird durch die Isolation stark behindert, so dass die Wandtemperatur nahe an der Fluidtemperatur liegt. Am Übergang zwischen Isolation und Ofenraum beträgt der Temperaturunterschied zwischen den Knoten der verschiedenen Zonen ca. 80 K. Der gegenteilige Effekt tritt im Bereich der Einspannung auf. Da von den Randzellen die Wärme ungehindert an die Umgebung abgegeben werden kann, kommt es zwischen den ersten beiden Knoten der Strahlrohroberfläche zu einer Temperaturdifferenz von 60 K.

Die Spannungen bei b) und c) entstehen durch lokale Temperaturgradienten auf der Oberfläche, z. B. durch ein Temperaturminimum bei b). Die Spannungen bei c) lassen sich durch die hohen Temperaturen der Innenseiten der beiden Schenkel erklären. Eine Ursache für die Spannungen im T-Stück bei d) und im ersten Krümmer e) liegt in den unterschiedlichen Temperaturen der beiden Schenkel des Strahlrohres. Die mittleren Temperaturen unterscheiden sich in der Numerik um rund 30 K und führen dazu, dass sich der wärmere Schenkel stärker ausdehnt als der kältere wodurch es zu einer Biegung des P-Rohres kommt. Da die Kraft für diese Biegung durch den Krümmer und das T-Stück übertragen werden muss, treten dort Spannungen auf.

Eine weitere Ursache für die Spannungen liegt in der höheren Temperatur im Bereich zwischen den Schenkeln, in denen nur bedingt eine Wärmeabgabe an die Umgebung möglich ist. Dieser wärmere Bereich dehnt sich stärker aus und biegt so die Schenkel auseinander. Auch diese Biegung überträgt eine Kraft auf das T-Stück und erhöht so die Spannungsspitze.

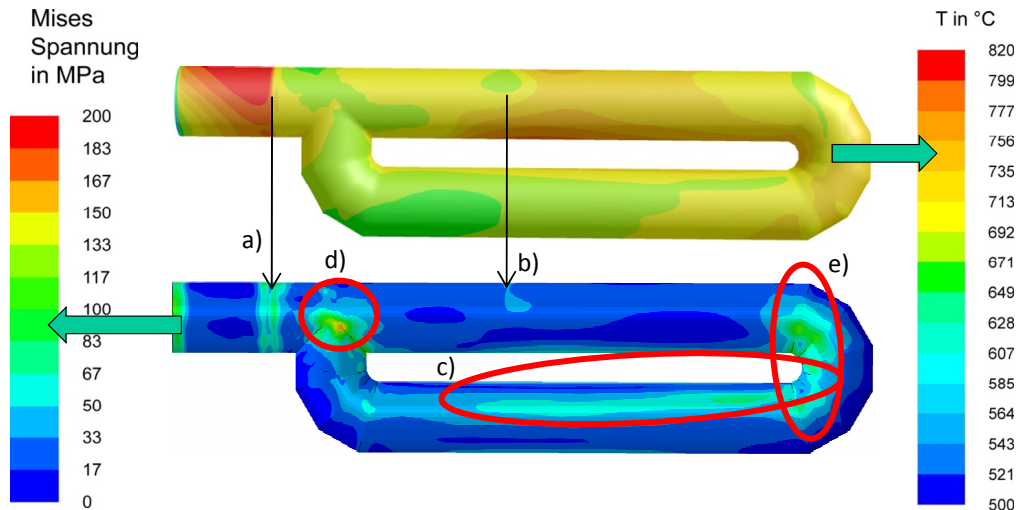


Bild 9: Temperaturverlauf für Simulation und Experiment nach Randbedingungen aus Fall 1;  $P_{Br} = 82 \text{ kW}$  und beidseitige Kühlung

## Fazit

Die Kopplung zwischen CFD und Finite-Elemente-Analyse wurde in eine Richtung durchgeführt. Dies ist zulässig, da die erreichte Ausdehnung ca. 1% beträgt und keine signifikanten Rückwirkungen auf die Strömung zu erwarten sind. Das auffälligste Merkmal der Berechnungen sind die teilweise sehr hohen lokalen Spannungsspitzen. Die erreichten lokalen Spannungen liegen mit ca. 150-200 MPa deutlich über den Werten der zulässigen Zeitstandfestigkeit. Diese Spannungen werden in der Realität nicht in dieser Weise auftreten, da sie durch plastische Formänderung abgebaut werden, sie identifizieren jedoch die am stärksten beanspruchten Bereiche am Strahlrohr. Im Anschluss an die plastische Verformung der am stärksten beanspruchten Zonen werden weitere Bereiche über die Zeitstandfestigkeit hinaus beansprucht werden. Für weiterführende Untersuchungen ist daher die Berücksichtigung plastischer Verformungen unbedingt erforderlich.

In dem komplexen, inhomogenen Temperaturfeld der Strahlrohroberfläche sind insbesondere die höheren Temperaturen im Bereich zwischen den Schenkeln sowie die unterschiedlichen mittleren Temperaturen von erstem und zweitem Schenkel für die auftretenden Spannungen verantwortlich. Der Temperaturanstieg im Schenkelzwischenraum kann durch eine hochkonvektive Strömung verringert werden, da gerade dort hohe Strömungsgeschwindigkeiten zu erwarten sind. Der Temperaturunterschied vom ersten zum zweiten Schenkel resultiert aus der abnehmenden Gastemperatur und ist daher für das einzelne Strahlrohr schwierig zu nivellieren. Bei Verwendung mehrerer Strahlrohre kann jedoch durch ge-

schickte Anordnung versucht werden, die Homogenität der Temperaturverteilung zu verbessern.

Auch die Durchführung des Strahlheizrohres durch die Ofenwand auf der Seite des Brenners birgt ein hohes Schadenspotential: Durch den Einsatz von Wärmedämmstoffen an der Ofenwand wird die Abführung der Wärme stark behindert, so dass es in diesem Bereich zu einem Hitzestau im Strahlheizrohr kommt. Am Übergang zum Ofenraum fällt die Temperatur in der Strahlrohrwand innerhalb weniger Zentimeter sprunghaft ab, was zu hohen Spannungen führt. In weiterführenden Untersuchungen sollte daher überprüft werden, inwieweit der steile Temperaturgradient in diesem Bereich durch konstruktive Maßnahmen gedämpft werden kann.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die gekoppelte Betrachtung von strömungs- und wärmetechnischen Verhältnissen mit der Spannungsverteilung eine deutlich exaktere Prognose der auftretenden Spannungen gegenüber den klassischen Berechnungen auf Basis homogener Temperaturverteilung oder Wärmestromdichte ermöglicht.

### **Danksagung**

Dieser Bericht ist Teil der wissenschaftlichen Ergebnisse eines Forschungsvorhabens, das von der Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V. (FOGI), Frankfurt, über das Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt, gestellt und am Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB), RWTH Aachen, bearbeitet wurde. Dieses Forschungsvorhaben (FV-Nr. 15698 N) ist aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert worden.

Ein Arbeitskreis der FOGI unter der Leitung von Herrn Dr. Wübben, Linn High Therm GmbH, Eschenfelden, hat das Vorhaben begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt unser Dank für die gute Zusammenarbeit.

### **Literatur:**

- [1] **Hornig, K.; Bölling, R.; Odenthal, H.-J.; Pfeifer, H.; Berns, K.; Schmitz, K.:** Numerische und experimentelle Strömungssimulation eines Schwebebandofens für NE-Metallbänder, Gaswärme Int. 52 (2003) Nr. 5, S. 256-262
- [2] **Wünning, J. G.; Milani, A.:** Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen, Vulkan Verlag, Essen, 2007