

Kurzbericht

Numerische Simulation der thermischen Belastung eines Flammrohrs nach Einbau von Hochtemperaturwärmespeichern (HTS) im Kessel zur Erzeugung von Warmwasser

Auftraggeber:

Firma Moon-Power Wärmetechnik
Schlot 3
96394 Marktrodach

Gaswärme-Institut e.V., Essen

Dipl. Ing. Eren Tali

1 Einleitung und Zielsetzung

Kessel zur Erzeugung von Warmwasser oder Dampf bestehen aus einer Brennkammer, die als Flammrohr bezeichnet wird und einem nachgetakteten Wärmetauschersystem zur Erwärmung des umlaufenden Wassers. Beheizt werden die Kessel in der Regel mit Erdgas oder Heizöl. Es ist Stand der Technik, dass durch den Einbau eines zusätzlichen Wärmespeichers, genannt HTS, in das Flammrohr des Kessels eine Energieeinsparung in der Größenordnung von 10-15 % erreicht werden kann.

Die Speicher werden in Heizkesseln eingebaut, die mit Öl oder Gas befeuert werden und deren Brennerbetrieb (Gebläsebrenner) getaktet oder stufenlos gleitend abläuft. Beim getakteten oder modulierenden Betrieb wird während der sogenannten Heizzeit dieser zusätzliche Speicher bis auf etwa 1200 °C aufgeheizt und während der Kühlzeit bis auf etwa 500 °C wieder gekühlt, wobei die gespeicherte Wärme wieder an das Flammrohr abgegeben wird. Dadurch kann das Flammrohr zur Erwärmung von Wasser bzw. Dampf verwendet werden, ohne dass der Gasbrenner kontinuierlich betrieben werden muss.

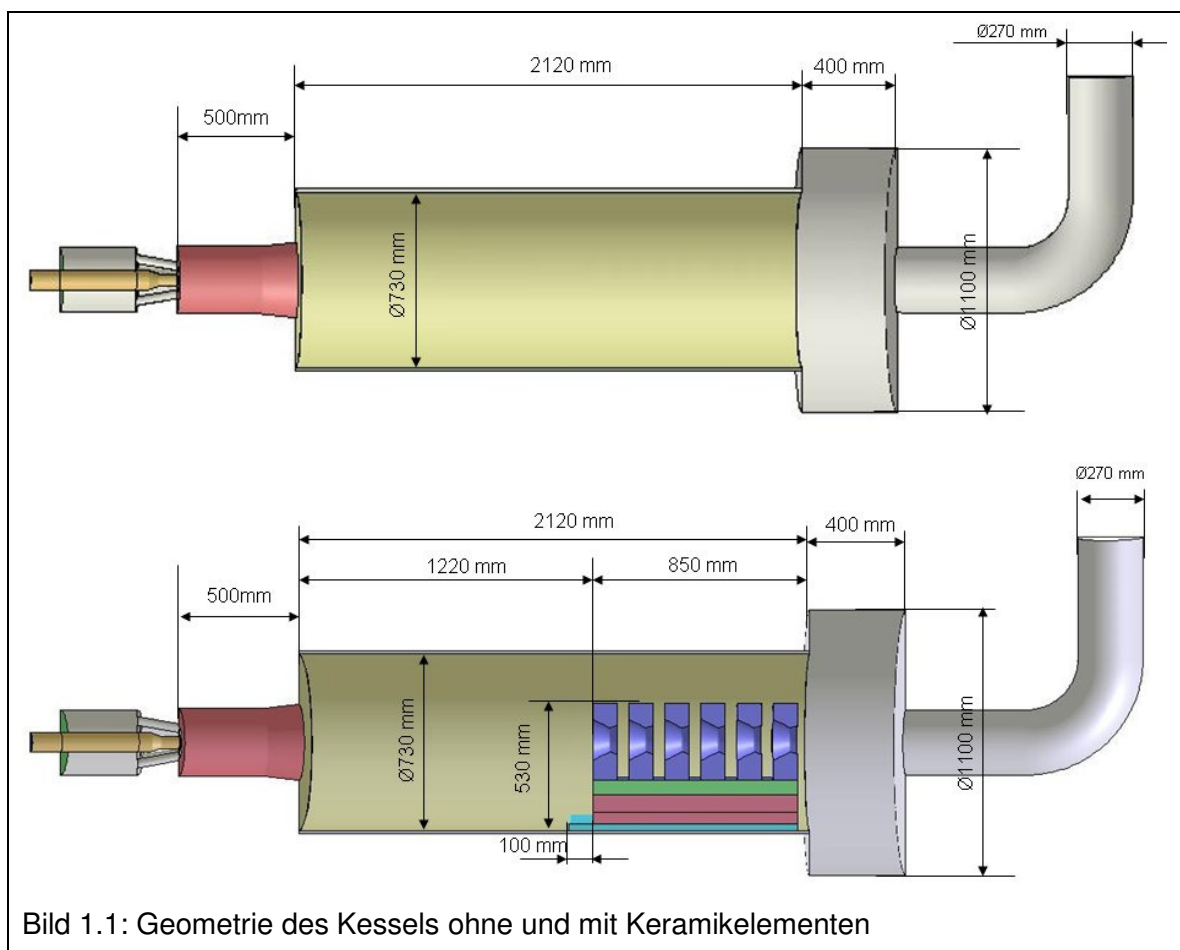
Zusätzlich wirken diese Wärmespeicher auch als Strömungshindernis, durch das eine verstärkte Rezirkulation von heißem Abgas in der Nähe der Flammrohrwand forciert wird, was dort eine verbesserte Wärmeübertragung zur Folge hat. Dieser Vorteil kommt auch bei getakteter oder modulierender Fahrweise zum Tragen.

Unbekannt war jedoch, in welcher Weise ein Flammrohr mit einem solchen Speicher thermisch belastet wird.

Im Auftrag der Firma Moon-Power Wärmetechnik sollen die Verteilungen der Wandtemperaturen und Wärmestromdichten auf der Innenwand des Flammrohres vor und nach Einbau der Hochtemperaturwärmespeicher im Kessel mit Hilfe stationärer numerischer Simulationen untersucht werden.

In den durchzuführenden Simulationen werden Strömungs-, Mischungs-, Reaktions- und Strahlungsprozesse berücksichtigt. Die Grenze des Berechnungsgebietes bilden die Innenwände des Kessels mit dem angeschlossenen Brenner. Im Rahmen dieser Simulationen wurden nach Rücksprache mit dem Auftraggeber die Wände des Kessels mit einer Wandstärke von 15 mm angenommen, der Einfluss des Wasserdampfs an der Außenwand des Flammrohrs wird durch die Wahl geeigneter Randbedingungen dargestellt. Als Brennstoff wird Methan eingesetzt.

Auf Grund der Symmetrie in einer Ebene wird die Hälfte des Kessels simuliert. In Bild 1.1 ist der Kessel ohne und mit Keramikelementen mit dem verwendeten Brenner dargestellt.

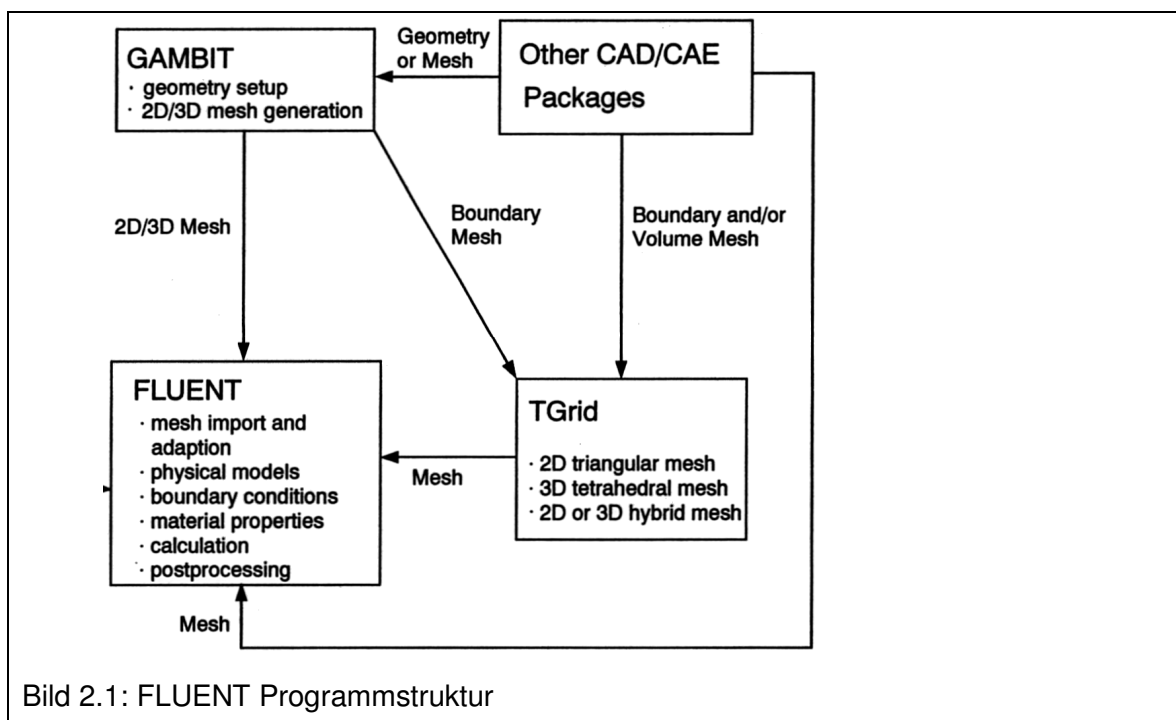


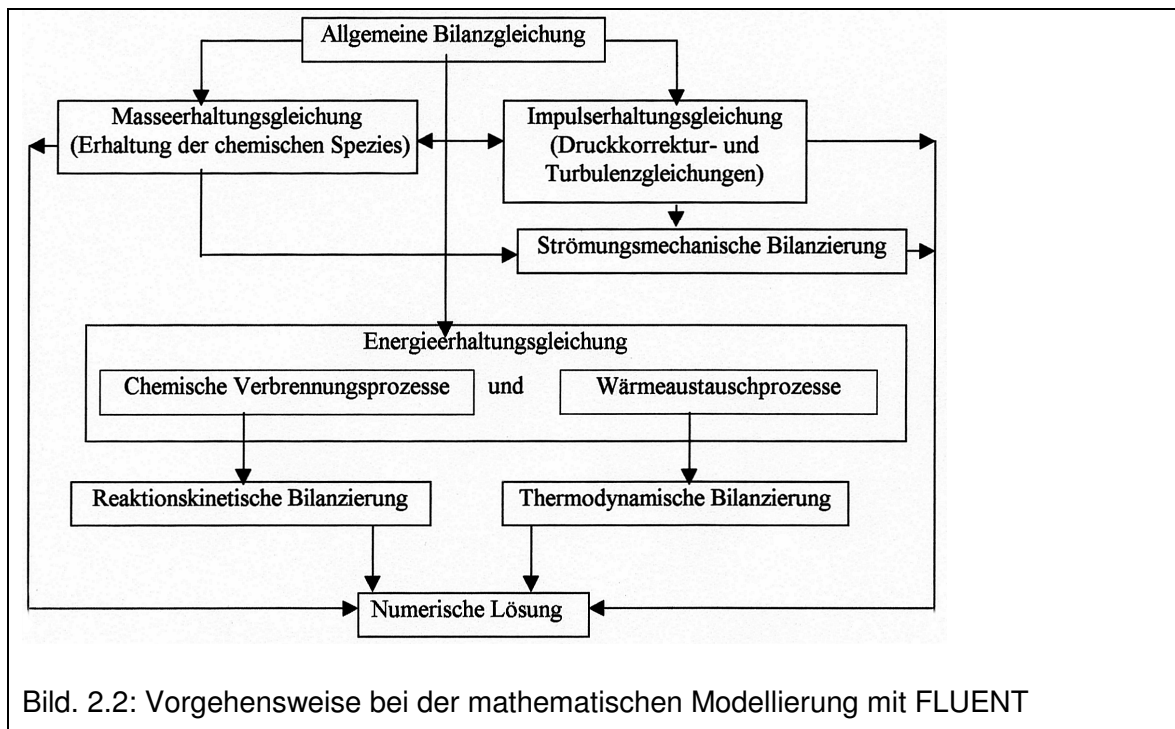
2. Numerische Simulation

Das CFD (Computational Fluid Dynamics) Programmsystem FLUENT arbeitet auf der Grundlage der Finite-Volumen-Methode. Es besteht aus mehreren Programmen, die unter anderem der Gittergenerierung, dem Pre- und Post-Processing und der Simulationdurchführung selbst dienen, sowie Datenbanken für Stoffwerte zur Bestimmung des Speziestransports mit und ohne Verbrennung.

In Bild 2.1 ist die Programmstruktur von FLUENT dargestellt. Zur Lösung der Wärmeübertragungs- und Strömungsprobleme können strukturierte und unstrukturierte Gitter sowohl für den zwei- als auch für den dreidimensionalen Fall generiert werden.

Die Basis der mathematischen Modellierung der Wärme- und Strömungsverhältnisse in FLUENT sind die Erhaltungsgleichungen für die Massen-, Stoff-, Impuls- und Enthalpieströme. Dieses Gleichungssystem wird in den einzelnen Zellen des diskretisierten Berechnungsraumes iterativ mit Hilfe numerischer Methoden gelöst. In Bild 2.2 stellt schematisch die Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung in FLUENT dar.





Die Berechnungen wurden mit dem CFD-Programm FLUENT durchgeführt. Die Modellierung der Turbulenzgrößen erfolgte mit dem SST-Modell, die Strahlungsberechnung mit dem Discrete-Ordinates-Modell. Die Verbrennung wurde mit einem Eddy Dissipation Modell nach Magnussen und Hjertager abgebildet, wobei die chemischen Reaktionen durch einen 2-Schritt-Reaktionsmechanismus beschrieben wurden. Hierbei wird angenommen, dass die Umsatzrate des Brennstoffs allein durch die turbulente Mischung bestimmt wird, da die Reaktionsgeschwindigkeit im Vergleich zur Mischungsgeschwindigkeit viel größer ist.

2.1 Randbedingungen

Die in Bild 1.1 gezeigten Geometrien wurden für eine Leistung von 1400 kW mit Methan als Brennstoff simuliert–für eine Luftzahl von 1,2 bei einer Lufttemperatur von 20 °C und einer Brenngastemperatur von ebenfalls 20 °C. An der Außenseite des Kessels befindet sich Wasserdampf mit einer Temperatur von 130 °C. In den folgenden Tabellen sind die Kessel- und Keramikeigenschaften zusammengestellt.

Flammrohr		
Material	-	17Mn4
ρ	kg/m ³	7900
c_p	J/kgK	610
λ	W/mK	41
Rauigkeit	mm	0.1

Speicherelemente		
Material	-	Keramikspeicher HTS 300
ρ	kg/m ³	2900
c_p	J/kgK	900
λ	W/mK	1,03

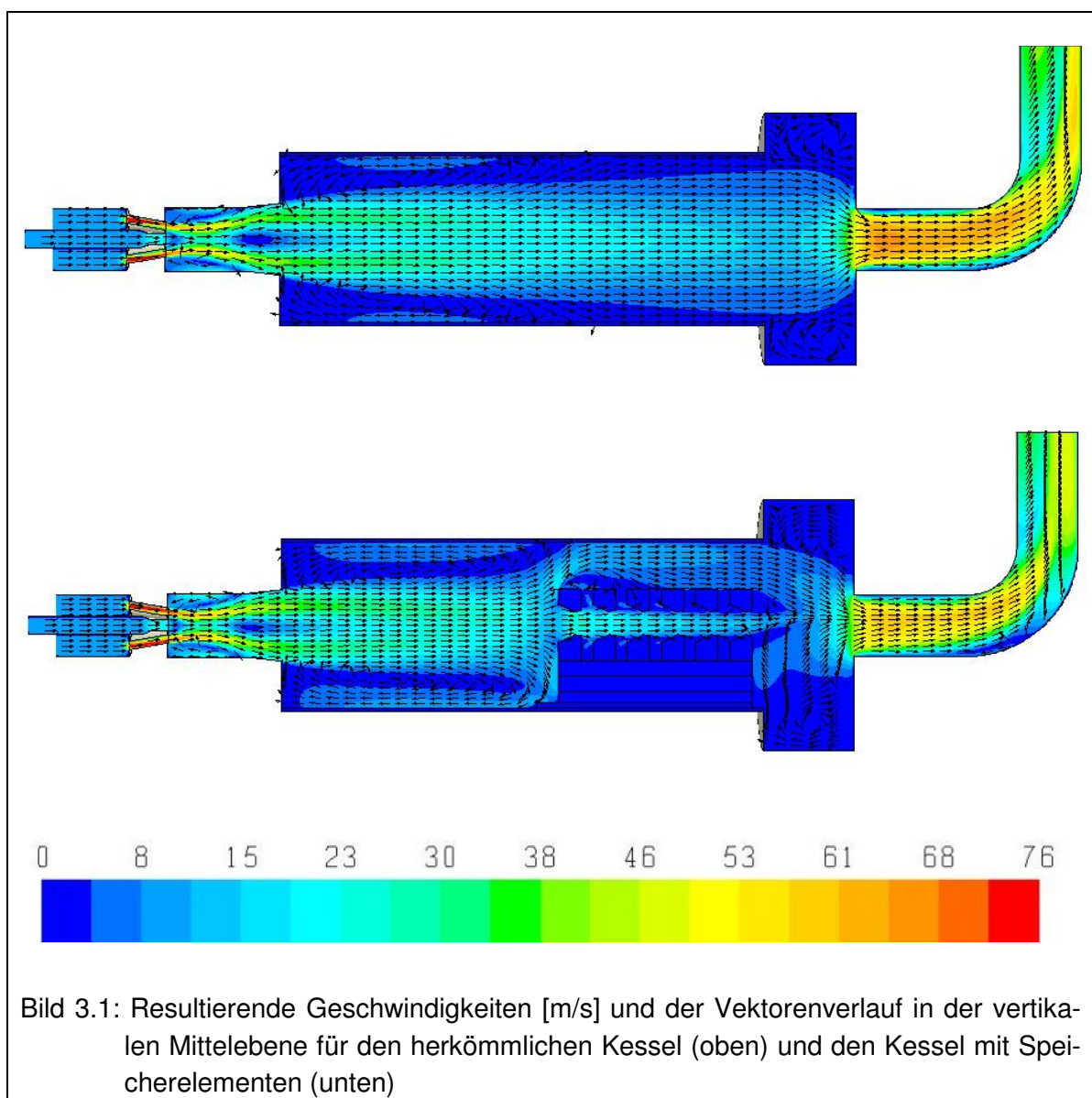
Träger		
Material	-	Keramik
ρ	kg/m ³	2900
c_p	J/kgK	900
λ	W/mK	1,03

Riegel		
Material	-	Keramik
ρ	kg/m ³	2700
c_p	J/kgK	900
λ	W/mK	1,03

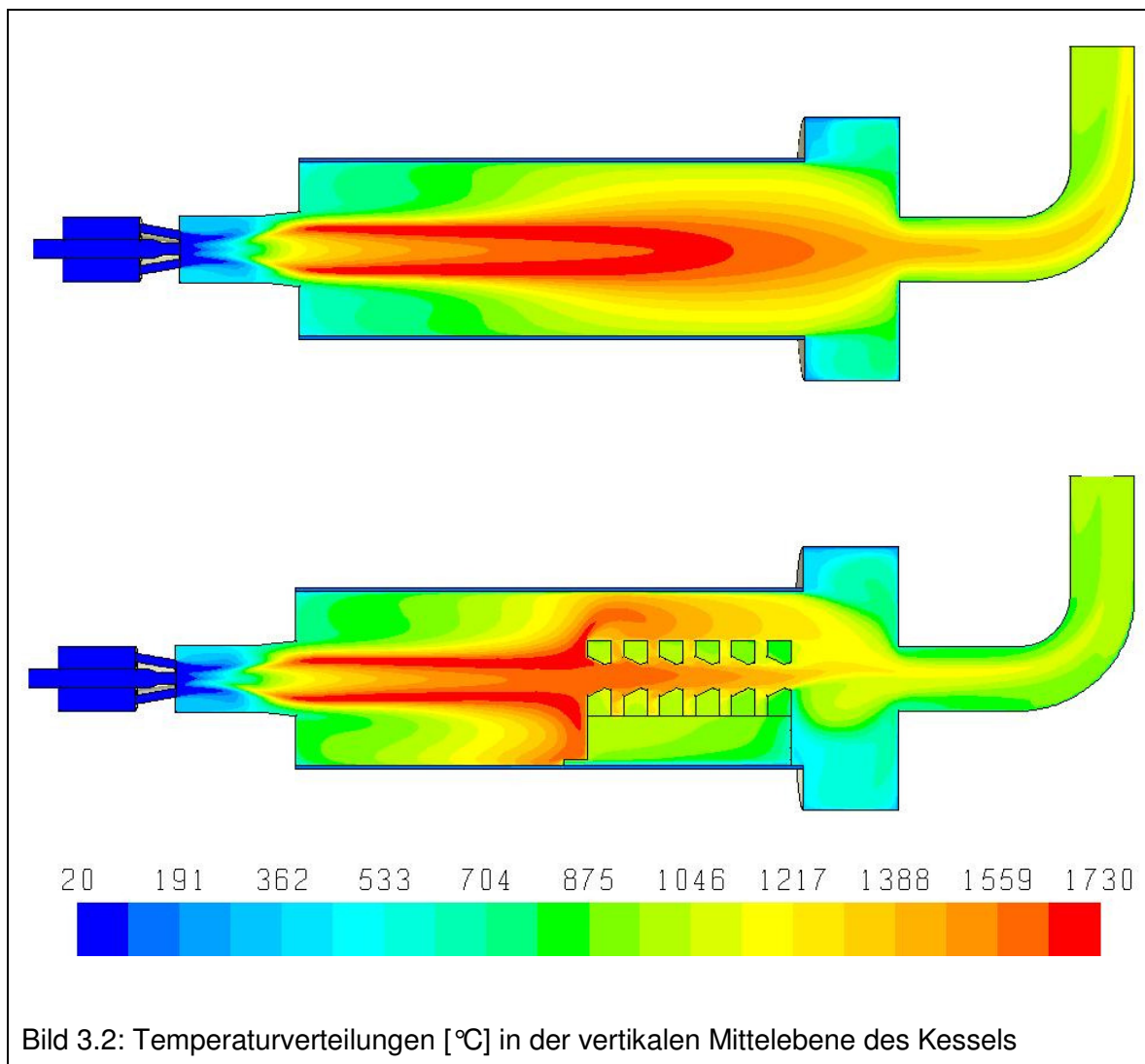
Keramikfasermatte		
Material	-	Keramikfaser
ρ	kg/m ³	960
c_p	J/kgK	1130
λ	W/mK	0,08

3. Ergebnisse der numerischen Simulation

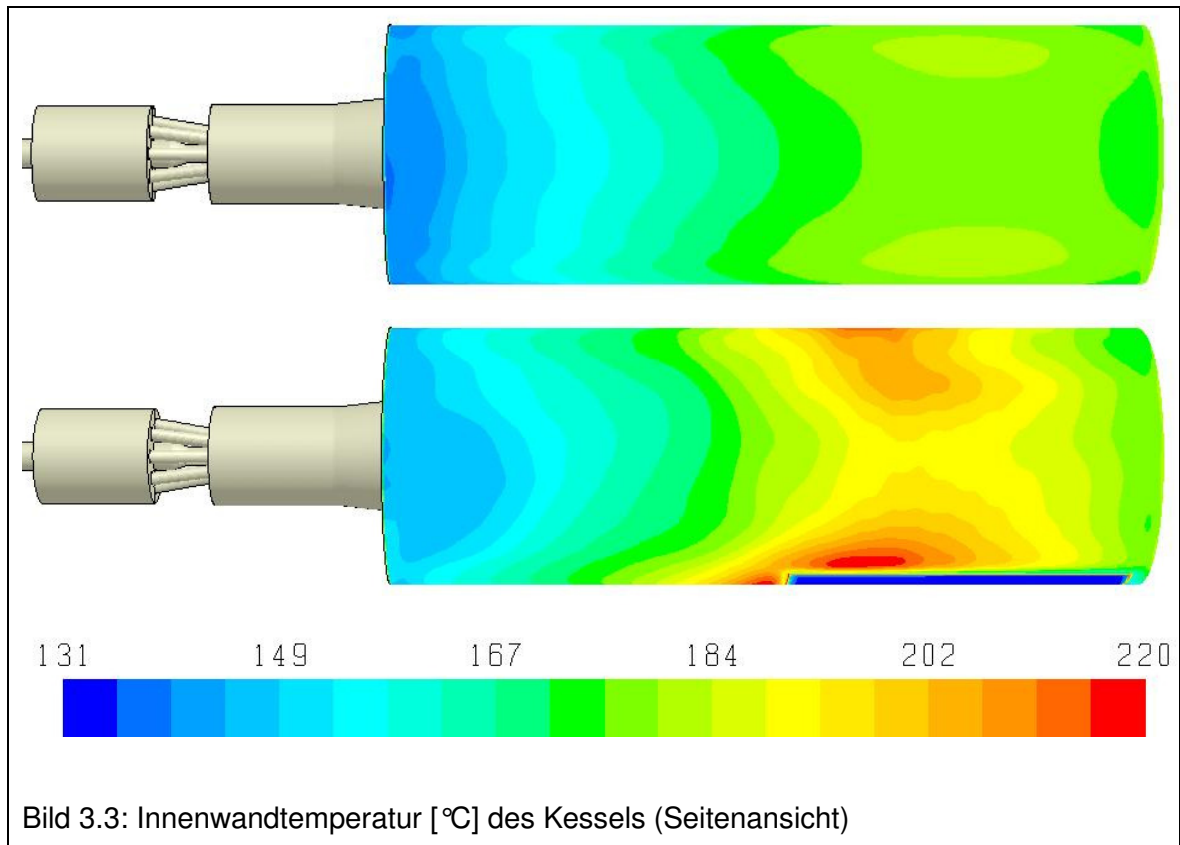
In Bild 3.1 ist die berechnete Verteilung der resultierenden Geschwindigkeiten mit den Vektoren in der vertikalen Mittelebene des Kessels für beide Varianten zu sehen, wobei sich die resultierende Geschwindigkeit aus den einzelnen Geschwindigkeitskomponenten zusammensetzt. Die Ausbildung des Rückströmsgebietes in beiden Varianten wird durch den Vektorenverlauf deutlich. Durch den Widerstand der Speicherelemente in Strömungsrichtung (unten) wird das Rückströmungsgebiet deutlich größer als beim herkömmlichen Kessel (oben).



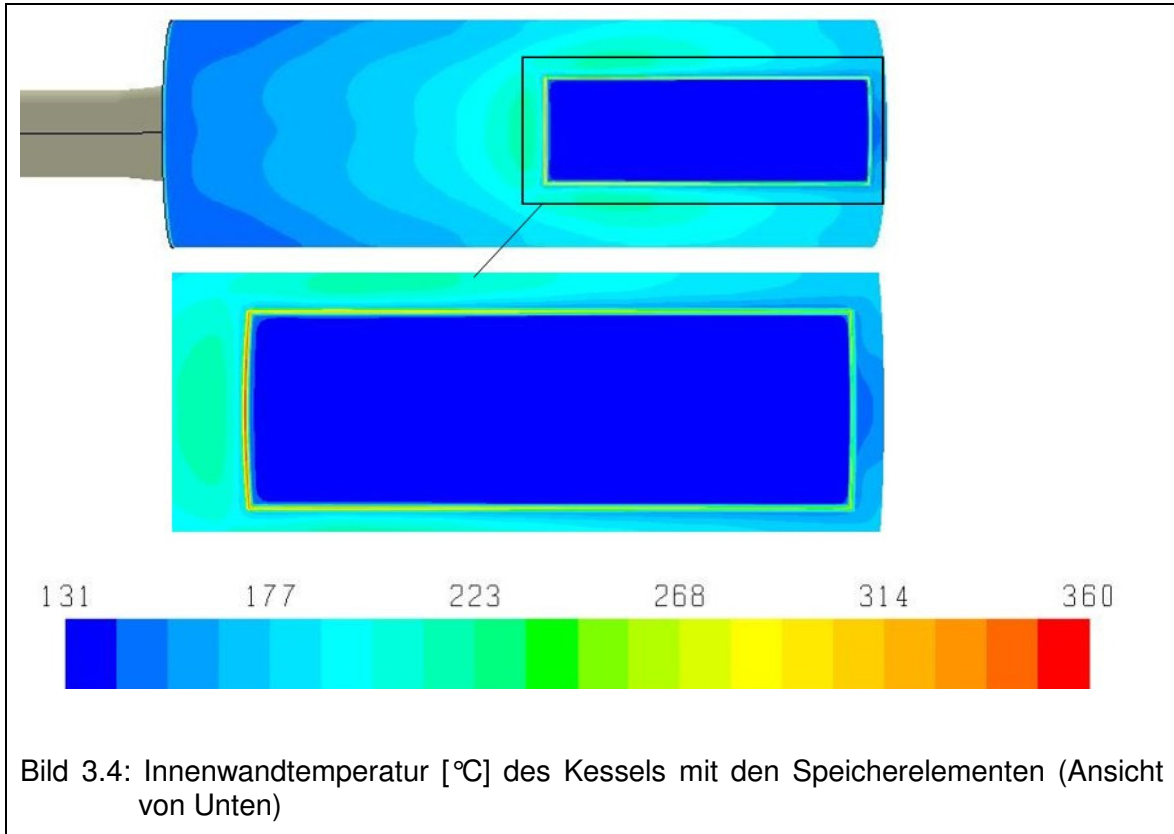
In Bild 3.2 sind die Temperaturverteilungen beider Konfigurationen in der vertikalen Mittelebene dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich durch die Rückströmung eine höhere Temperatur in der Nähe der Kesselwand bei dem Kessel mit Speicherelementen einstellt. Diese höheren Temperaturen führen dort zu einer intensiveren Wärmeübertragung. Entsprechend liegt am Abgasaustritt des herkömmlichen Kessels eine 62 K höhere Temperatur vor als beim Kessel mit Speicherelementen.



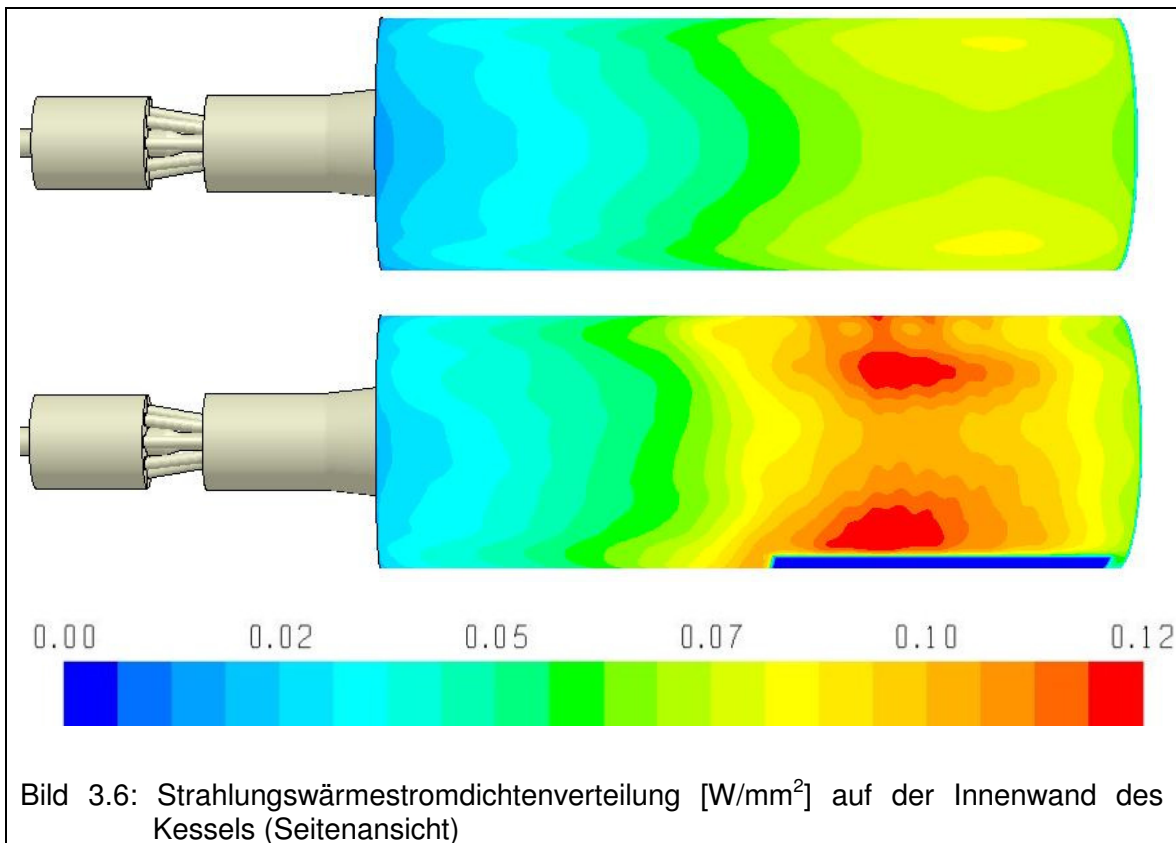
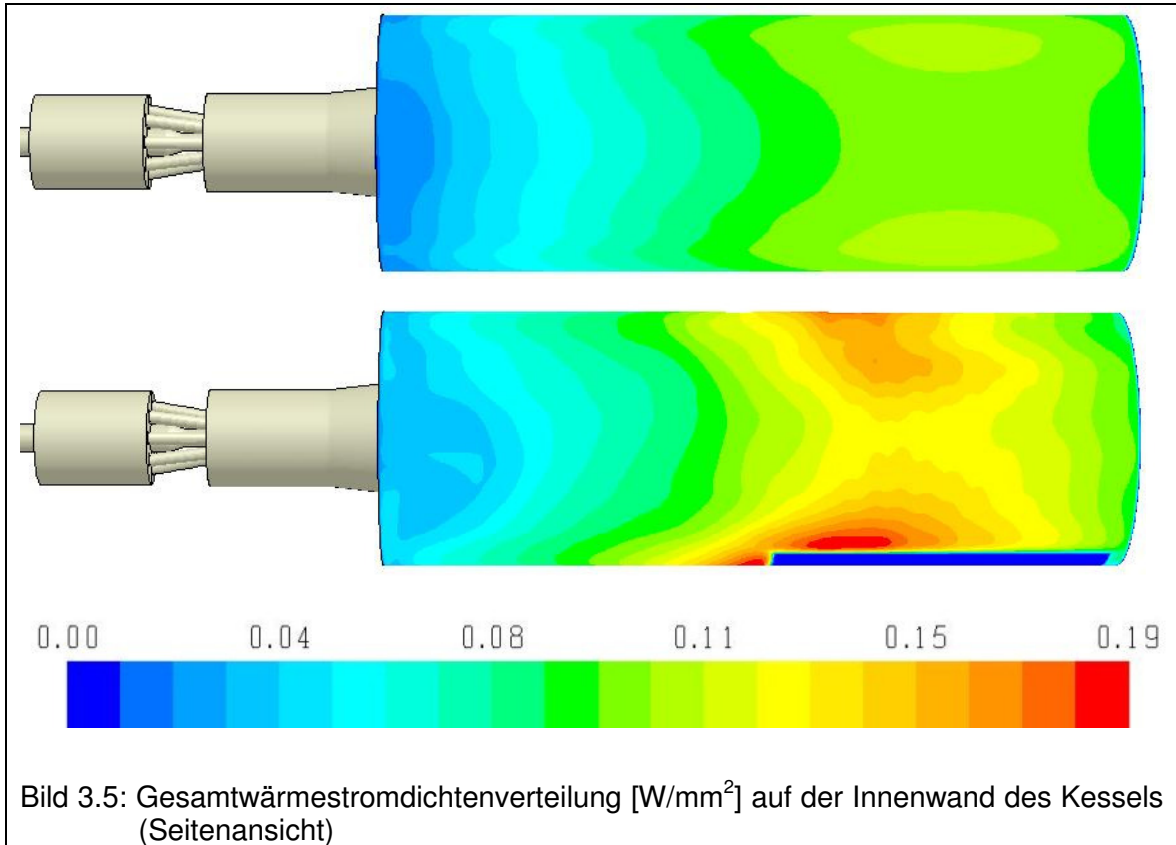
Die Temperaturverteilung auf der Innenwand der Kessel ist in Bild 3.3 dargestellt. Hier zeigt sich für den Kessel mit Speicherelementen eine höhere Wandtemperatur als Kessel ohne Speicherelemente. Auffällig ist, dass bei dem Kessel mit Speicherelementen die höchsten Wandtemperaturen in der Nähe der Fixierung der Keramikfasermatte zu finden sind.



Dies wird durch Bild 3.4 verdeutlicht, das eine Ansicht von unten auf die Fixierung der Speicherelemente mit einer anderen Farbskala zeigt. Die Innenwandtemperatur des Flammrohrs im Bereich der Auflage der Speicherelemente zeigt eine maximale Temperatur von ca. 360 °C, weil das Fasermaterial die Wärme auf Grund seiner thermischen Eigenschaften den Wärmetransport reduziert. Laut Auftraggeber darf die Temperatur an dieser Stelle 450 °C nicht überschreiten.



Für eine detaillierte Analyse sind die übertragenen Wärmestromdichten auf der Innenwand des Kessels ausgewertet worden, wie in Bild 3.5 dargestellt ist. Der Betrieb mit Keramikeinsätzen im Flammrohr führt zu einer Veränderung der Wärmeübertragungsprozesse. Deutlich sind höhere Wärmestromdichten im Bereich der Speicherelemente zu sehen. Die Ursache hierfür wird anhand von Bild 3.6 verdeutlicht. Hier ist lediglich die Strahlungswärmestromdichtenverteilung auf der Innenwand dargestellt. Aus Gründen der Anschaulichkeit wurde die Skala angepasst. Es wird deutlich, dass in der Nähe der Keramikelemente ein wesentlich intensiverer Strahlungswärmetransport stattfindet. Die der Auslegung des Flammrohres zugrunde gelegte Wärmestromdichte darf für die Gasfeuerung an keiner Stelle höher als $0,24 \text{ W/mm}^2$ (EN 12953-3) sein. Nach der Simulationen wurde eine maximale Wärmestromdichte von $0,194 \text{ W/mm}^2$ festgestellt, die sich somit selbst im ungünstigsten Fall (Brenner aktiviert und Keramikelement auf maximaler Temperatur) unter dem vorgegebenen Grenzwert befindet. Bei dem herkömmlichen Flammrohr liegt ein maximaler Wert von $0,112 \text{ W/mm}^2$ vor, wie Bild 3.5 erkennbar ist.



4. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Simulation mit dem CFD-Programm FLUENT zeigen unter Verwendung der genannten Modelle mit den vorgegebenen Randbedingungen, dass die Wärmestromdichte im Flammrohr den kritischen Wert von $0,24 \text{ W/mm}^2$ (EN 12953-3) nicht überschreitet. Die Berechnung zeigt eine maximale Wärmestromdichte von $0,194 \text{ W/mm}^2$ für den ungünstigsten Fall (Einstellkörper auf max. Temperatur und Brenner im Betrieb) im Bereich der Faserisolation vor dem ersten Körper.

Neben dieser Betrachtung der Wärmestromdichten an den Bauteiloberflächen zeigen die Simulationen des Weiteren, dass sich bei Verwendung der Hochtemperaturspeicherelemente durch die veränderte Strömungsführung höhere Wärmeströme an der Flammrohrwand ergeben. Die Wärmespeicher wirken dabei als Strömungshindernis, aufgrund dessen heiße Abgase in eine Rezirkulationszone gezwungen werden, was zu höheren Temperaturen in Nähe der Wand und somit zu einer verbesserten Wärmeübertragung führt. Verglichen mit dem Fall ohne Wärmespeicher weist der Wärmetauscher mit HTS also einen besseren Wirkungsgrad auf, der sich in einen reduzierten Brennstoffverbrauch widerspiegelt. Dieser Vorteil kommt unabhängig von der Brennerfahrweise zum Tragen. Durch die Speicherelemente wurde in den Simulationen ca. 18 % mehr Wärme auf die Wasserseite übertragen.

GASWÄRME-INSTITUT e. V. Essen

Essen, 20. Juni 2011



Dipl.-Ing. Frank Burmeister
Leiter Brennstoff- und Gerätetechnik

Gaswärme-Institut
e.V.
Hafenstr. 101, Ruf (02 01) 38 18-0
D-45356 ESSEN



Dipl.-Ing. Eren Tali
Projektleiter CFD, Brennstoff- und Gerätetechnik