Gaswärme-Institut e.V.
Essen

Bericht

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, so genannte HTS, in das Flammrohr des Kessels eine Energieeinsparung in der Größenordnung von 10-15 % erreicht werden kann [1].

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 [1].

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.

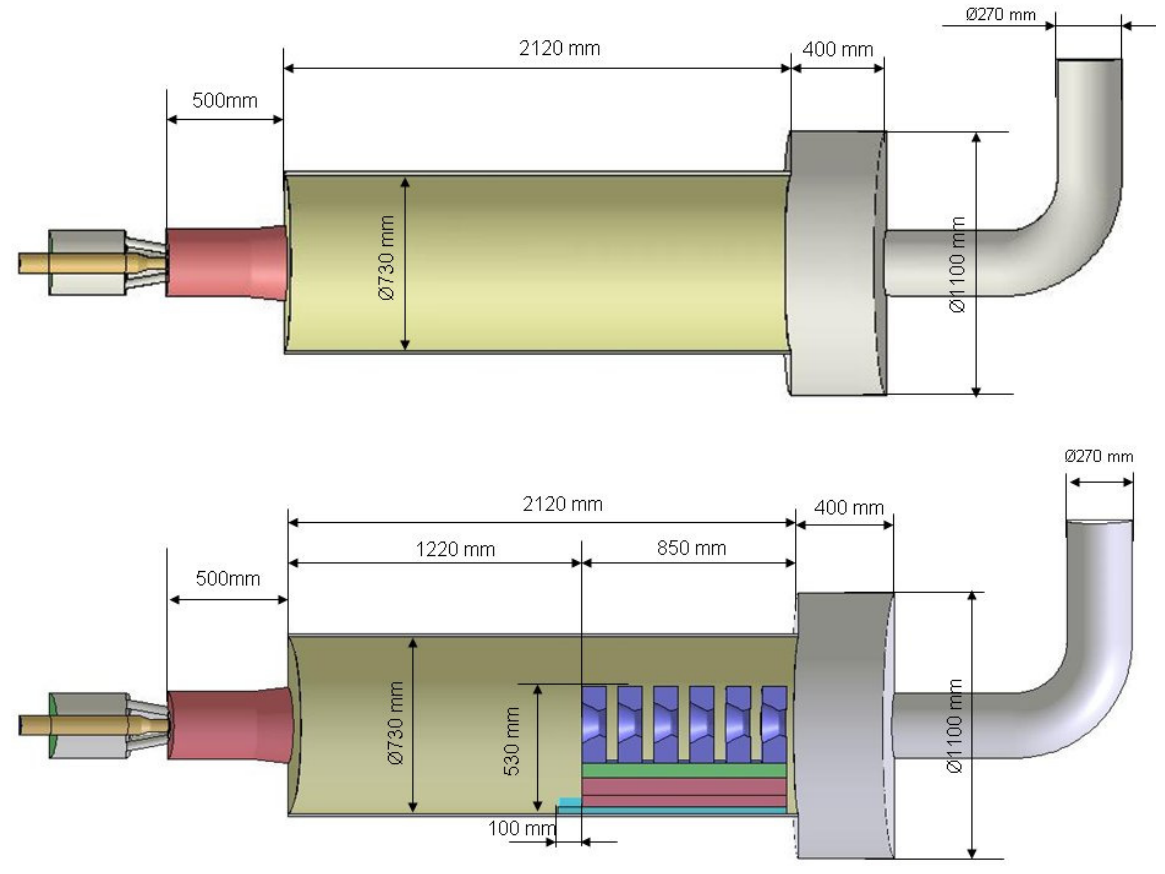


Bild 1.1: Geometrie des Kessels ohne und mit Keramikelementen

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 Simulationsdurchführung selbst dienen, sowie Datenbanken für Stoffwerte zur Bestimmung des Speziestransports mit und ohne Verbrennung [2].

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.

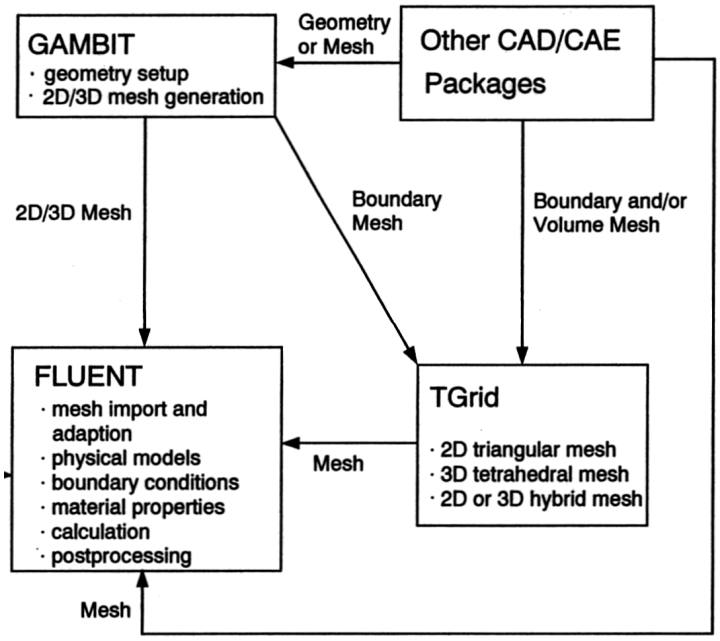


Bild 2.1: FLUENT Programmstruktur [2]

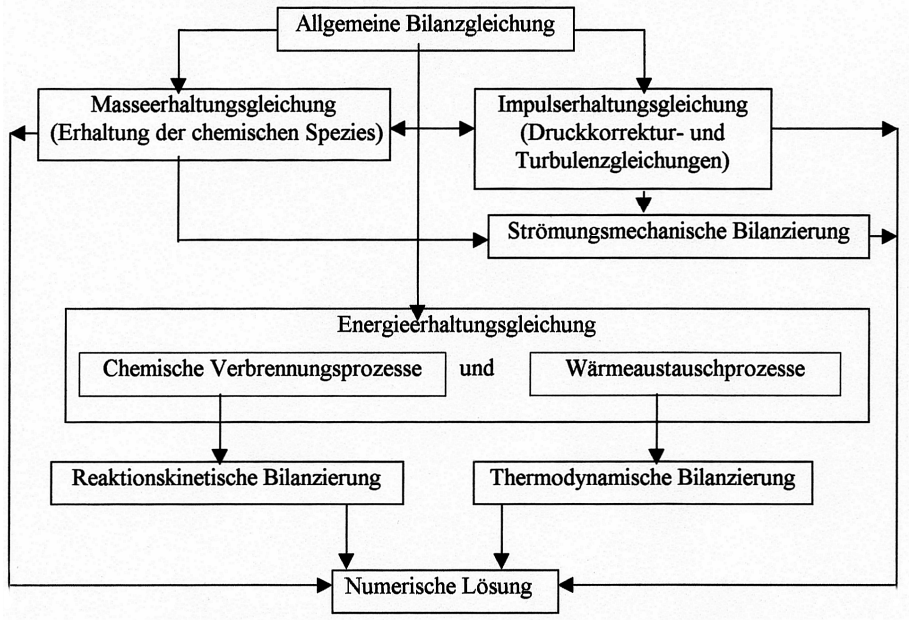


Bild. 2.2: Vorgehensweise bei der mathematischen Modellierung mit FLUENT [3]

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.

Die theoretischen und numerischen Grundlagen der Modellierung turbulenter reagierender Strömungen sollen hier nicht weiter besprochen werden, da sie in der Literatur eingehend beschrieben wurden [4, 5, 6,7].

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).

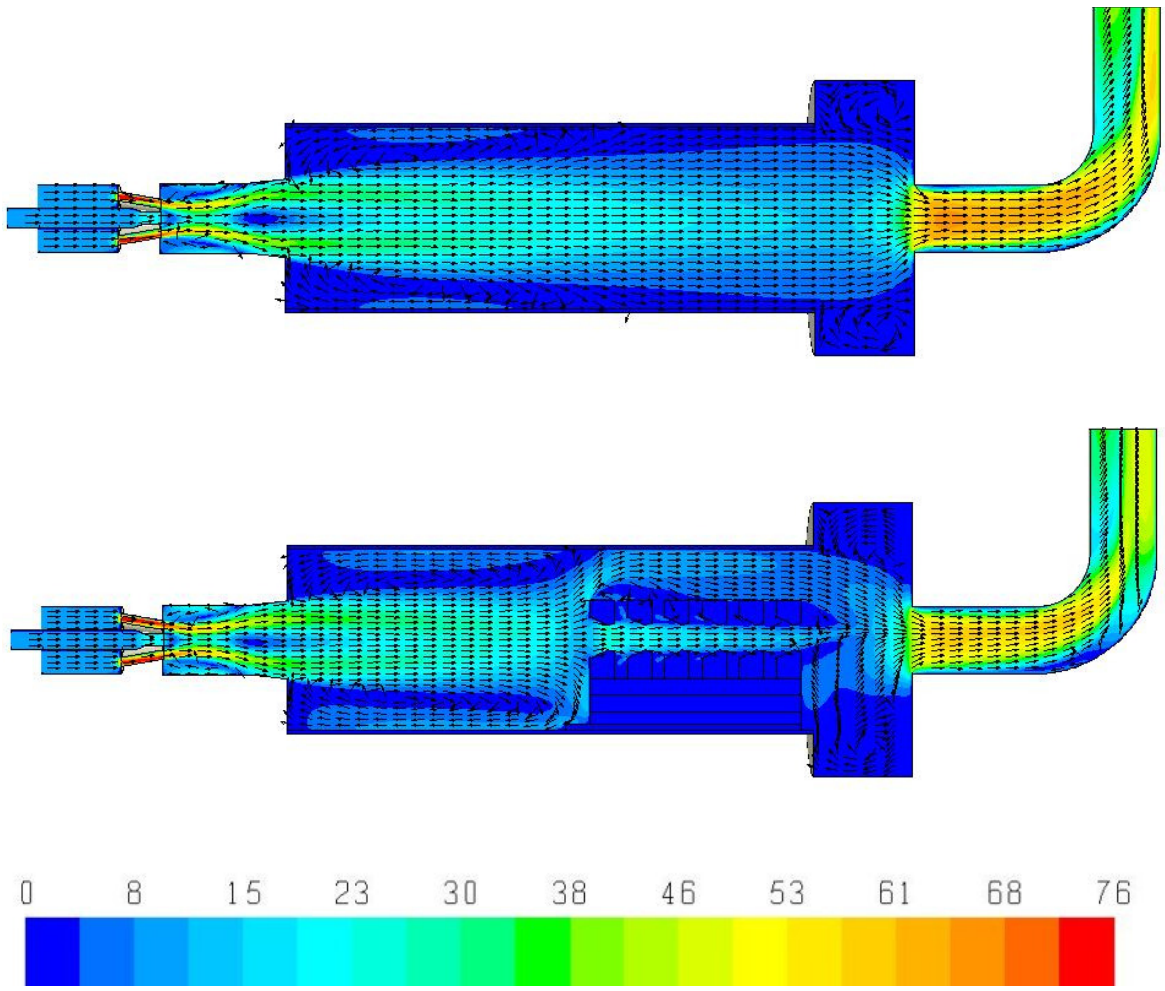


Bild 3.1: Resultierende Geschwindigkeiten [m/s] und der Vektorenverlauf in der vertikalen Mittelebene für den herkömmlichen Kessel (oben) und den Kessel mit Speicherelementen (unten)

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.

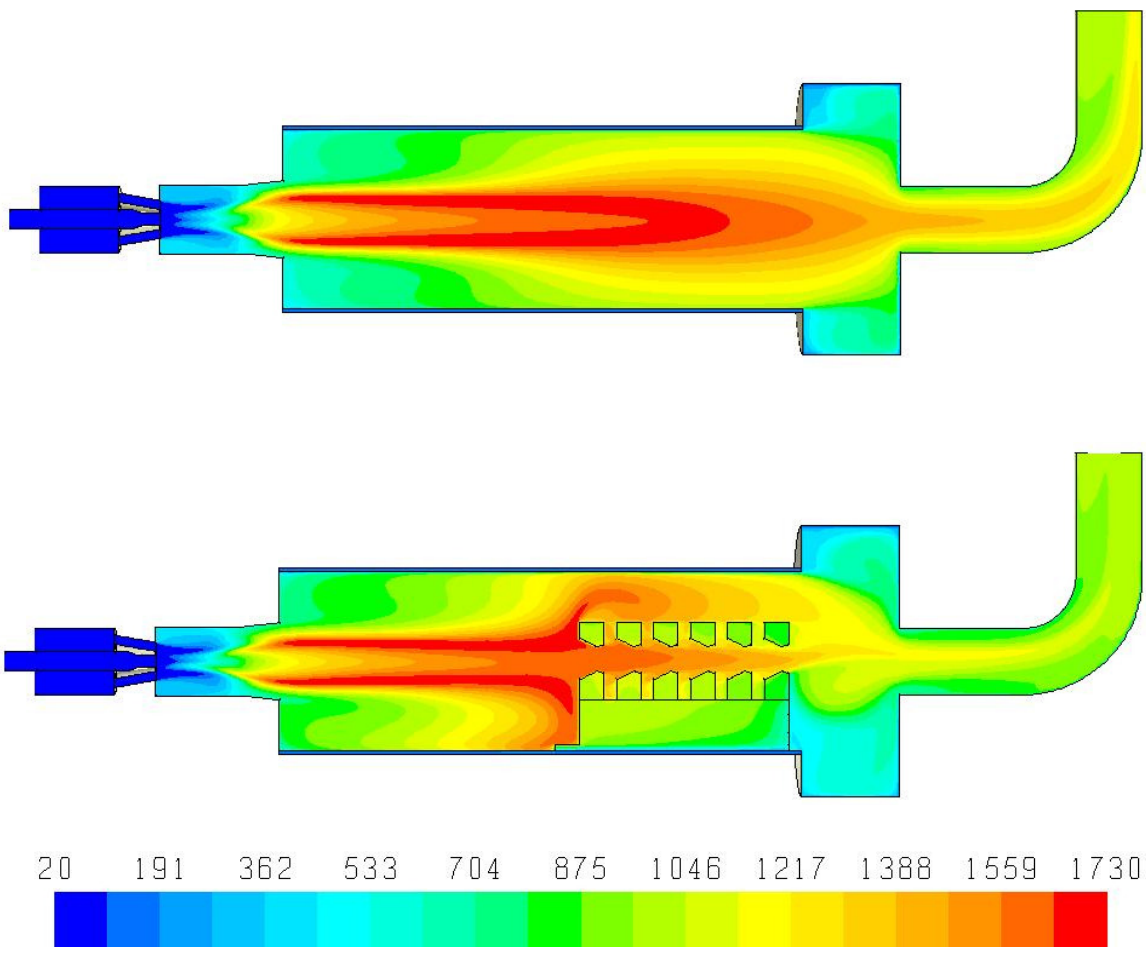


Bild 3.2: Temperaturverteilungen [°C] in der vertikalen Mittelebene des Kessels

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.

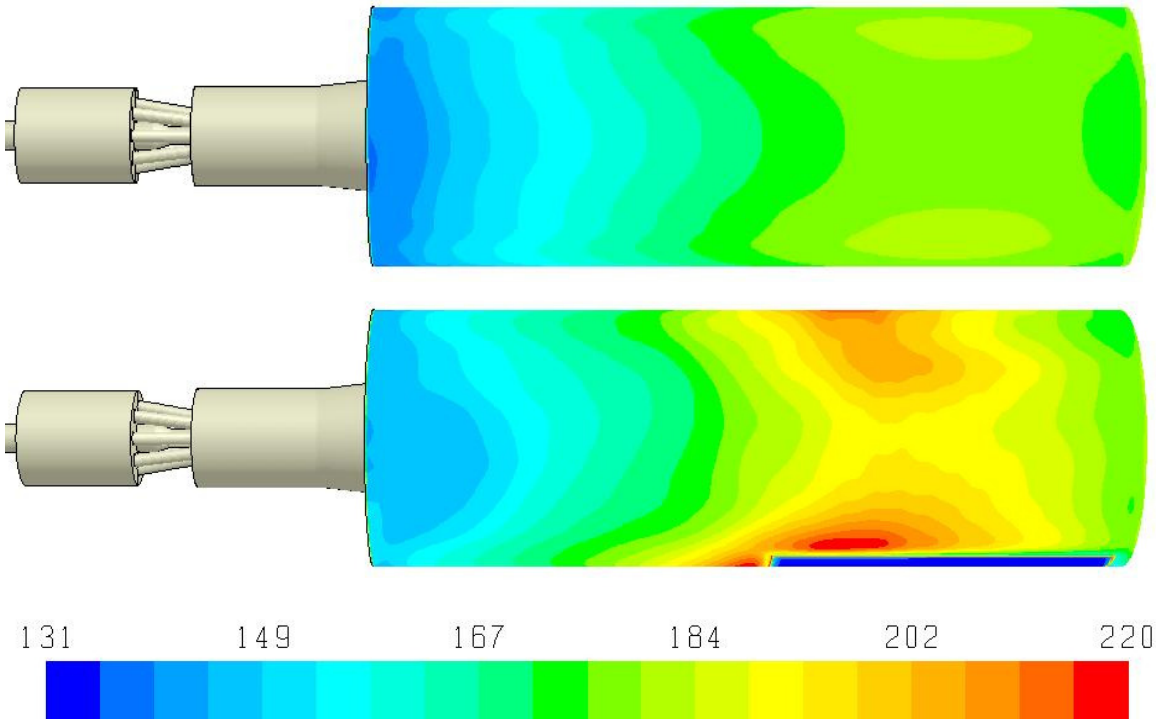


Bild 3.3: Innenwandtemperatur [°C] des Kessels (Seitenansicht)

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.

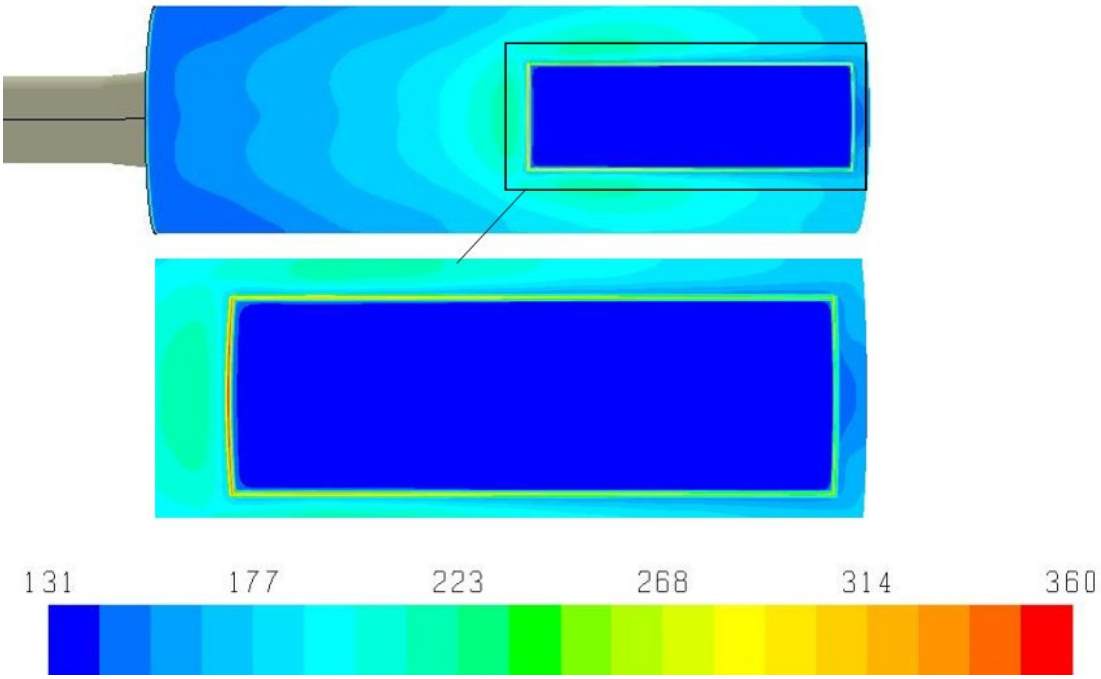


Bild 3.4: Innenwandtemperatur [°C] des Kessels mit den Speicherelementen (Ansicht von Unten)

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 W/mm^2 (EN 12953-3) sein. Nach der Simulationen wurde eine maximale Wärmestromdichte von 0,194 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 W/mm^2 vor, wie Bild 3.5 erkennbar ist.

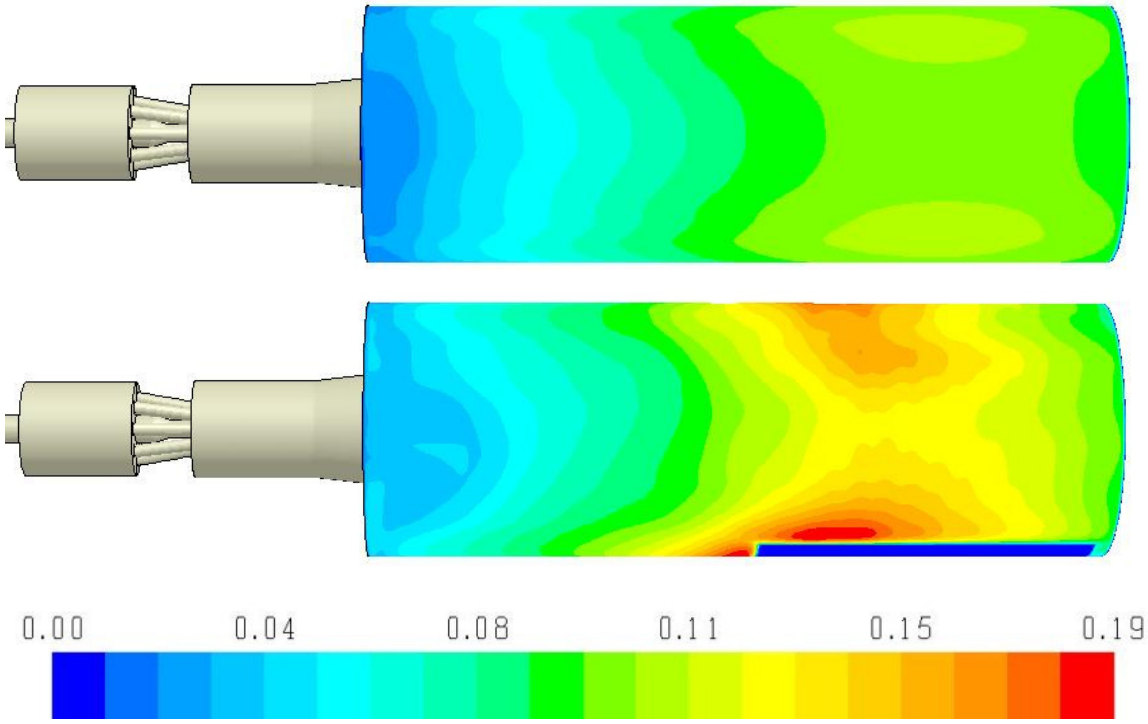


Bild 3.5: Gesamtwärmestromdichtenverteilung [W/mm^2] auf der Innenwand des Kessels (Seitenansicht)

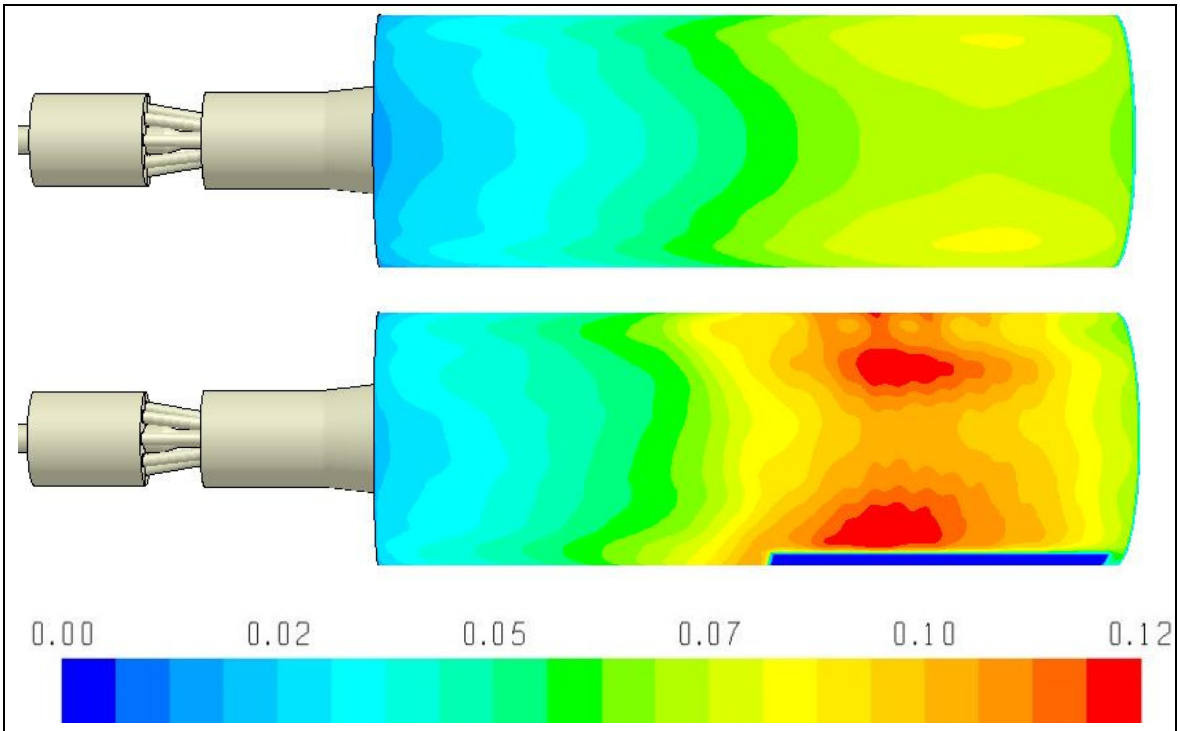


Bild 3.6: Strahlungswärmestromdichtenverteilung [W/mm^2] auf der Innenwand des Kessels (Seitenansicht)

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 W/mm^2 (EN 12953-3) nicht überschreitet. Die Berechnung zeigt für die untersuchte Geometrie eine maximale Wärmestromdichte von 0,194 W/mm^2 für den ungünstigsten Fall (Einstellkörper auf max. Temperatur und Brenner im Betrieb) im Bereich der Faserisolation vor dem ersten Körper. Falls jedoch die Mantelfläche des Flammrohrs vergrößert wird, werden die lokalen Wärmestromdichten bei ansonsten gleichen Betriebsparametern aufgrund der größeren Bezugsfläche reduziert.

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 wiederspiegelt. Dieser Vorteil kommt unabhängig von der Brennerfahrweise zum Tragen. Durch die Speicherelemente wurde in den Simulationen ca. 18 % mehr Wärme auf die Wasserseite übertragen.

Literatur

[1] **Jeschar, R.:** Gutachten zur thermischen Belastung vom Flammrohren nach Einbau von Hochtemperaturspeichern (HTS) im Kessel zur Erzeugung von Warmwasser, Dampf sowie Thermalöl, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik, Technische Universität Clausthal, 2009.

[2] FLUENT 6.3: User‘s Guide, 2009.

[3] **Al-Halbouni, A.:** Entwicklung NO_x-emissionsminimierter Heizkesselfeuerungen; Shaker Verlag Aachen 2001; ISBN 3-8265-8535-6

[4] **Patankar, S.V.:** Numerical Heat Transfer and Fluid Flow; Hemisphere Publishing Corp., Washington, 1980.

[5] **Noll, B:** Numerische Strömungsmechanik, Grundlagen; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993.

[6] **Launder, B.E.; Spalding, D.B.:** The Numerical Computation of Turbulent Flows; Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, pp. 269-289.

[7] FLUENT 6.3 Theory Guide, 2009.

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) 36 18-0
D-45356 ESSEN

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

Betreff: AW: Festigkeitsberechnung

Mehr Sicherheit.
Mehr Wert.

Sehr geehrten Herrn

wie besprochen, kommen hier die Ergebnisse der Nachrechnung.

1. Randbedingungen:

   Loos-Kessel UL-S 6000
   p = 10 bar (= Absicherungsdruck des Kessels)
   T = 184 °C (=Sattdampftemperatur bei 10 bar)
   Feuerungswärmeleistung: 2200 kW

2. Flammenrohrgeometrie:

   se = 14mm, c1+c2 = 1mm => s0 = 13mm

   da = 1100mm, l = 4300mm

Fox-Rohr		Fox-Rohr
di = 950mm	oder	di = 1000mm
w = 75mm	oder	w = 50mm
t = 200mm	oder	t = 151mm
gem. Tafel 3 TRD 306	oder	gem. Tafel 2 TRD 306

   Unrundheit: 1,2%

3. Werkstoff

   P 295 GH nach DIN EN 10028-2 mit
   Berechnungstemperatur Tb = T + 30 + 3*se = 256°C => K = 206 N/mm²
   Sicherheitsfaktor gem. TRD 306, 9.2: 2,5 => zulässige Spannung ist 82 N/mm²

4. Gesamtgewicht Keramik: 6400N
   Länge: 2020mm

5. Ergebnis

   Berücksichtigt man den Einfluss der Keramik (zusätzliche Durchbiegend, Ovalisierung, Auflagefläche, Beanspruchung der Flammenrohrwellen),so ergeben sich folgende Berechnungsdrücke nach TDD 306 (4):

Fox-Rohr nach Tafel 3 (siehe oben): 16,7 bar
Fox-Rohr nach Tafel 2 (siehe oben): 12,5 bar

Ein tiefst gewelltes Rohr wurde nicht berücksichtigt, da in diesem Falle die Ergebnisse noch etwas günstiger würden.

Unter der Voraussetzung der untenstehenden Randbedingungen sehe ich keine Bedenken gegen den Einsatz der oben beschriebenen Keramikmodule.

Für den Kesselbetrieb ist zu berücksichtigen, dass es nach Abschalten der Feuerung nicht zu unzulässiger Ausdampfung, oder im Falle eines Heißwassererzeugers, nicht zum unzulässigen Überschwingen der Vorlauftemperatur durch die eingebrachten Module kommen kann.

Voraussetzung für den Betrieb mit Keramik Einbau ist weiter, dass die max. zulässige Wärmestromdichte bei Gasfeuerung von 0,24 W/mm² bei einem angenommenen Belag von max. 0,25 mm nicht überschritten wird.
Auch ist zu berücksichtigen, dass es nicht zu unzulässigen Temperaturspannungen im Übergangsbereich der durch Strahlung beheizten Flächen zu den durch Wärmeleitung beheizten Flächen kommt. Dies kann z.B. durch theoretische Betrachtungen gezeigt werden. Da eine theoretische Betrachtung aufgrund der vielen Einflussfaktoren aufwändig und nicht so ohne weiteres möglich ist, ist in jedem Fall eine zusätzliche Oberflächenrissprüfung an den relevanten Stellen im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen empfehlenswert, die nach spätestens 12 Monaten nach Inbetriebnahme stattfinden sollte.
Unsere Empfehlung ist, generell die Einhaltung dieser Randbedingungen im Rahmen von Versuchsmodellen nachzuweisen.

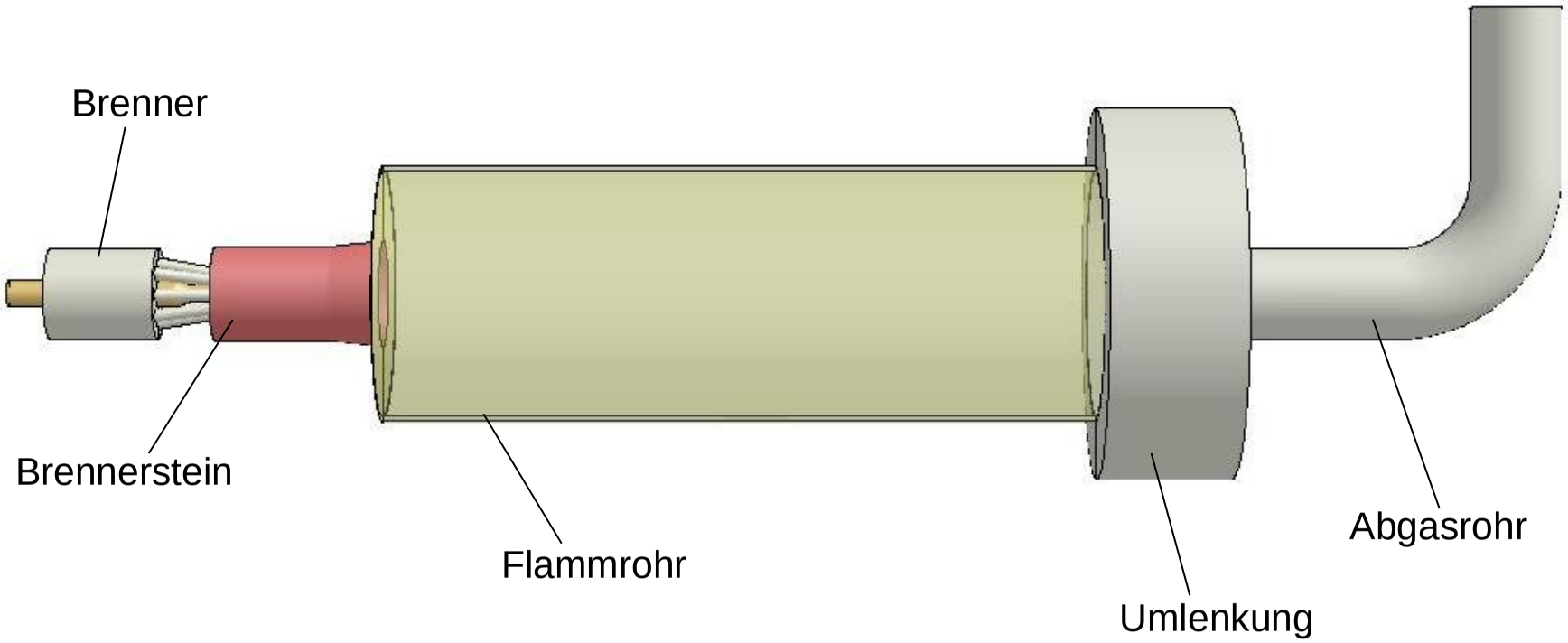
Mit freundlichen Grüßen / Kind Retards
Andreas Lauf

TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Region Baden-Württemberg
Abteilung Dampf- und Drucktechnik
Dudenstraße 28
68167 Mannheim
Germany

Phone: +49 621 395-259
Fax: +49 621 395-594
mailto:andreas.lauf@tuev-sued.de
http://www.tuev-sued.de/is

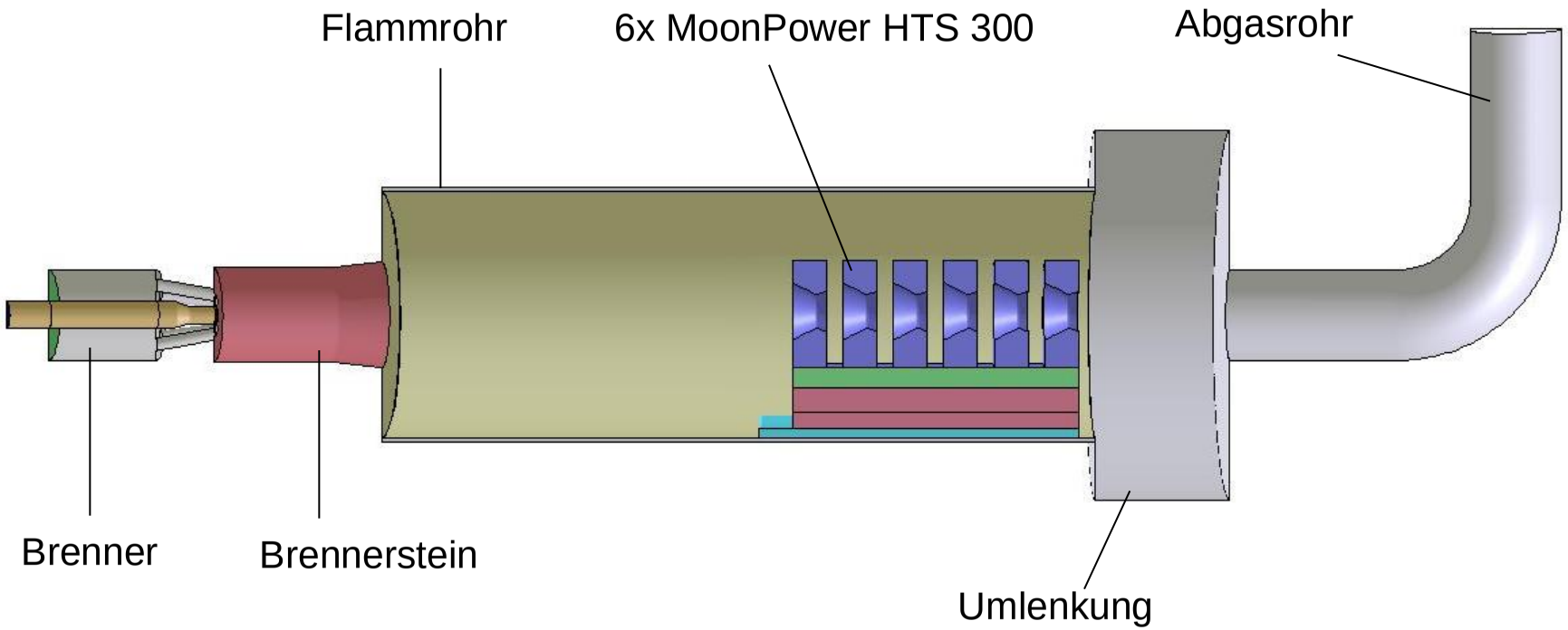
Geometrie

Kessel ohne Speicherelemente



Geometrie

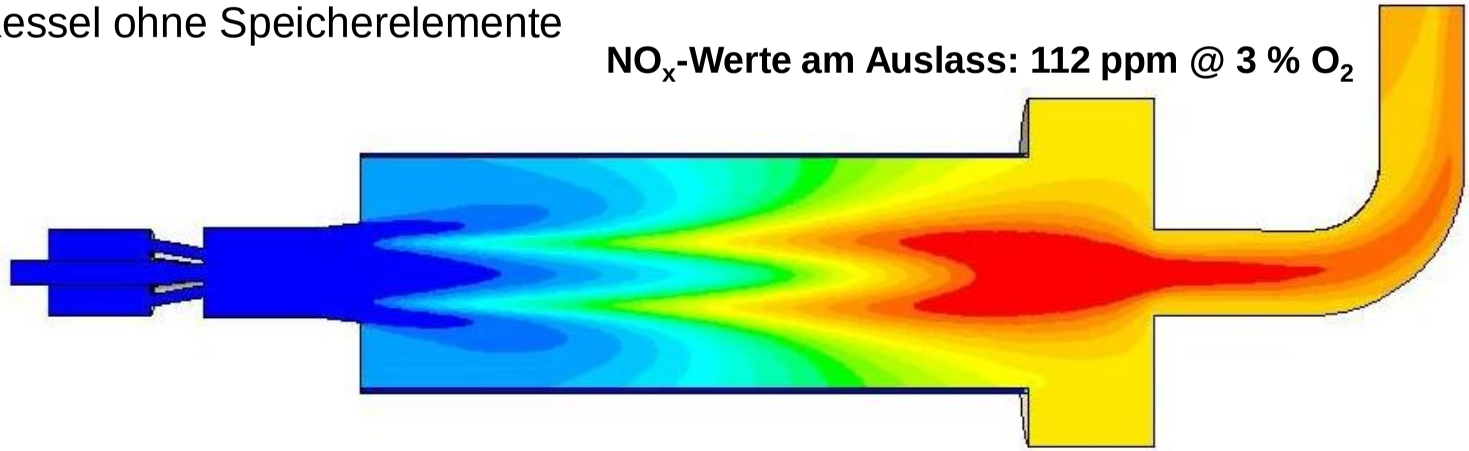
Kessel mit Speicherelementen



NO_x-Verteilung in der vertikalen Mittelebene des Kessels

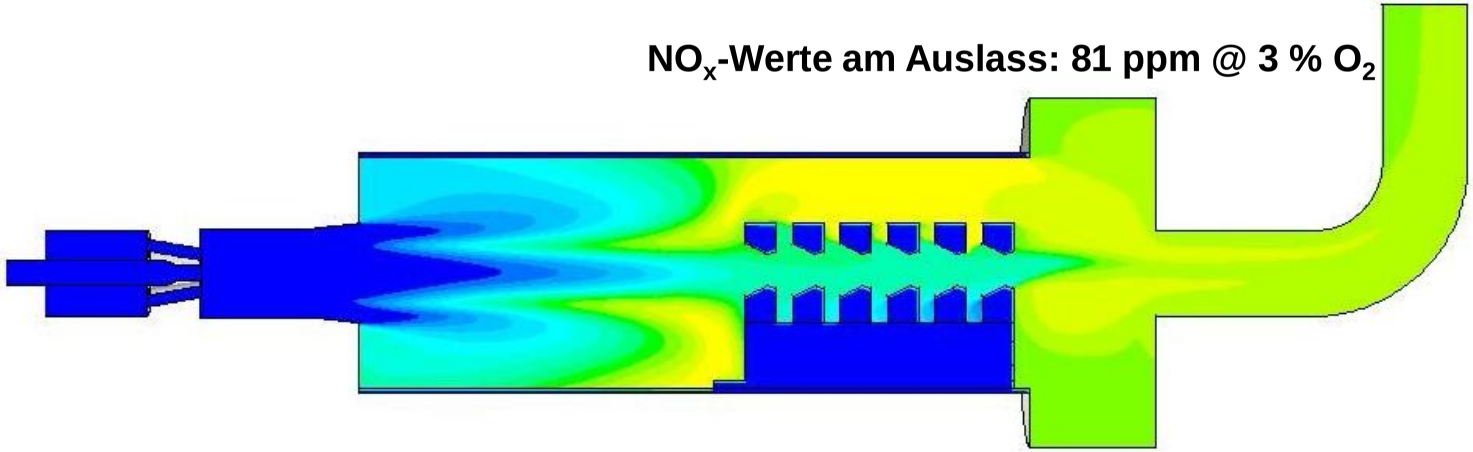
Kessel ohne Speicherelemente

NO_x-Werte am Auslass: 112 ppm @ 3 % O_2



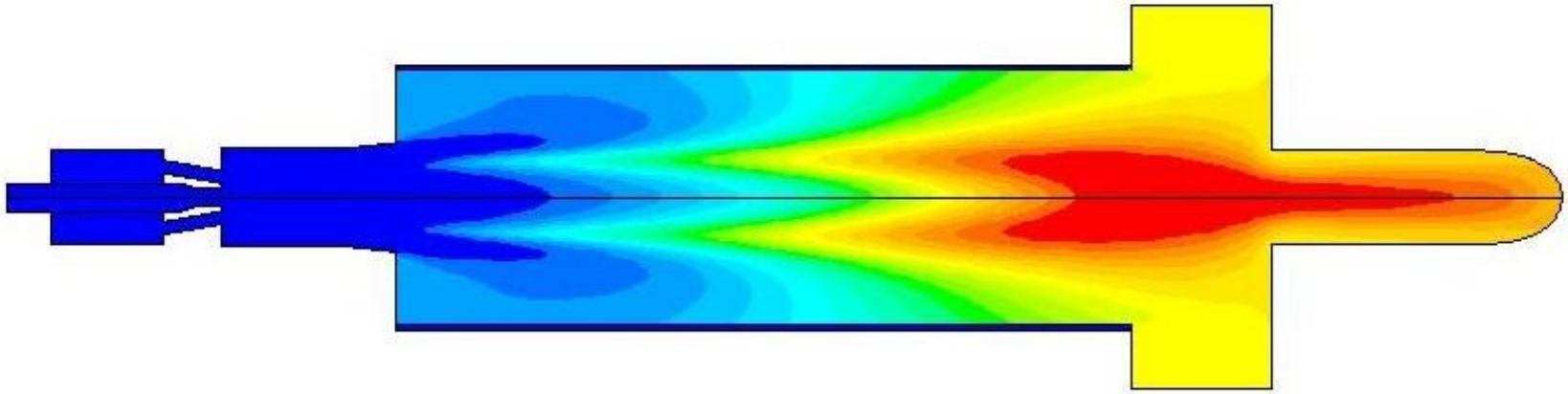
Kessel mit Speicherelementen

NO_x-Werte am Auslass: 81 ppm @ 3 % O_2

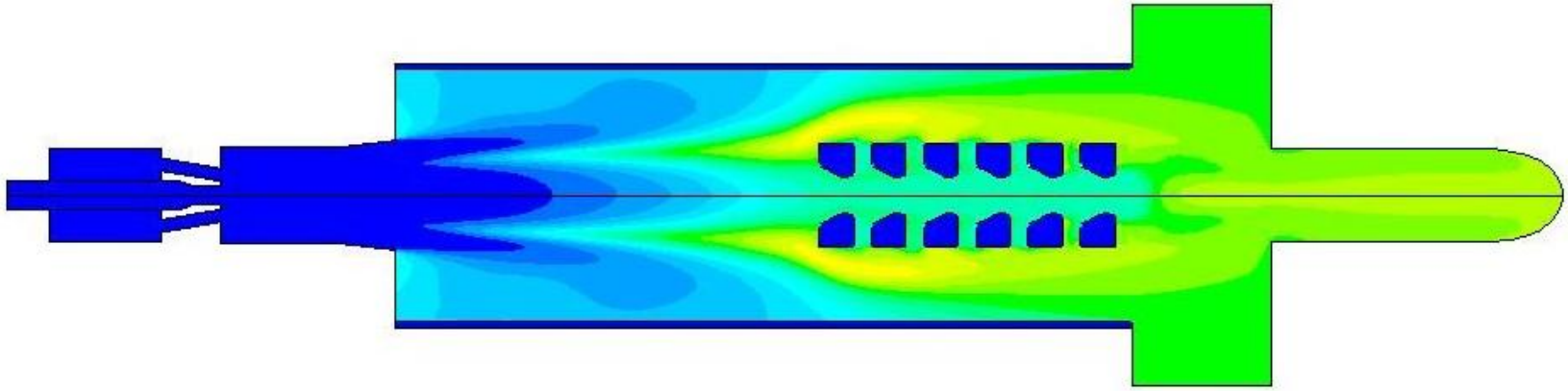


NO_x-Verteilung in der horizontalen Mittelebene des Kessels

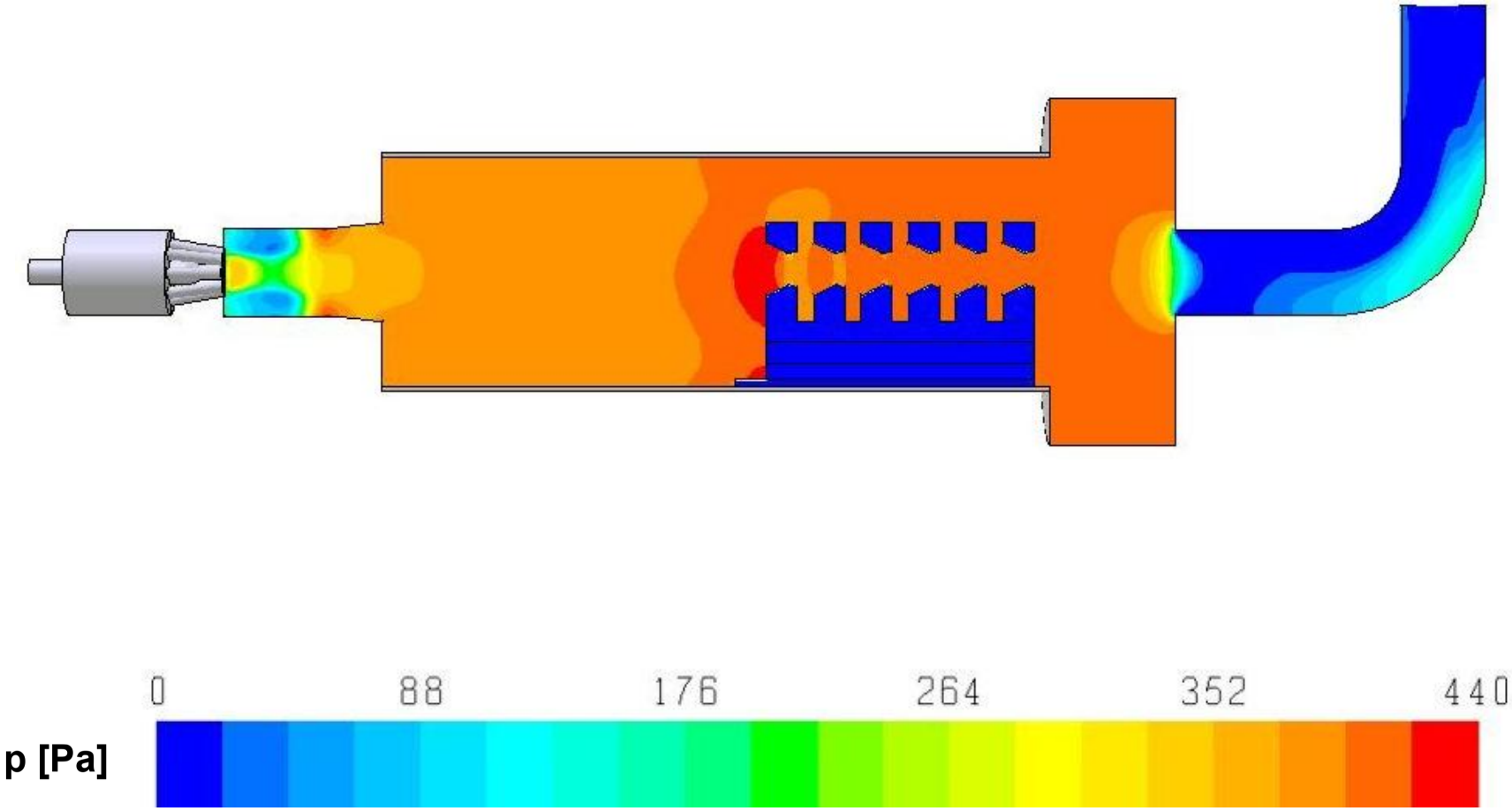
Kessel ohne Speicherelemente



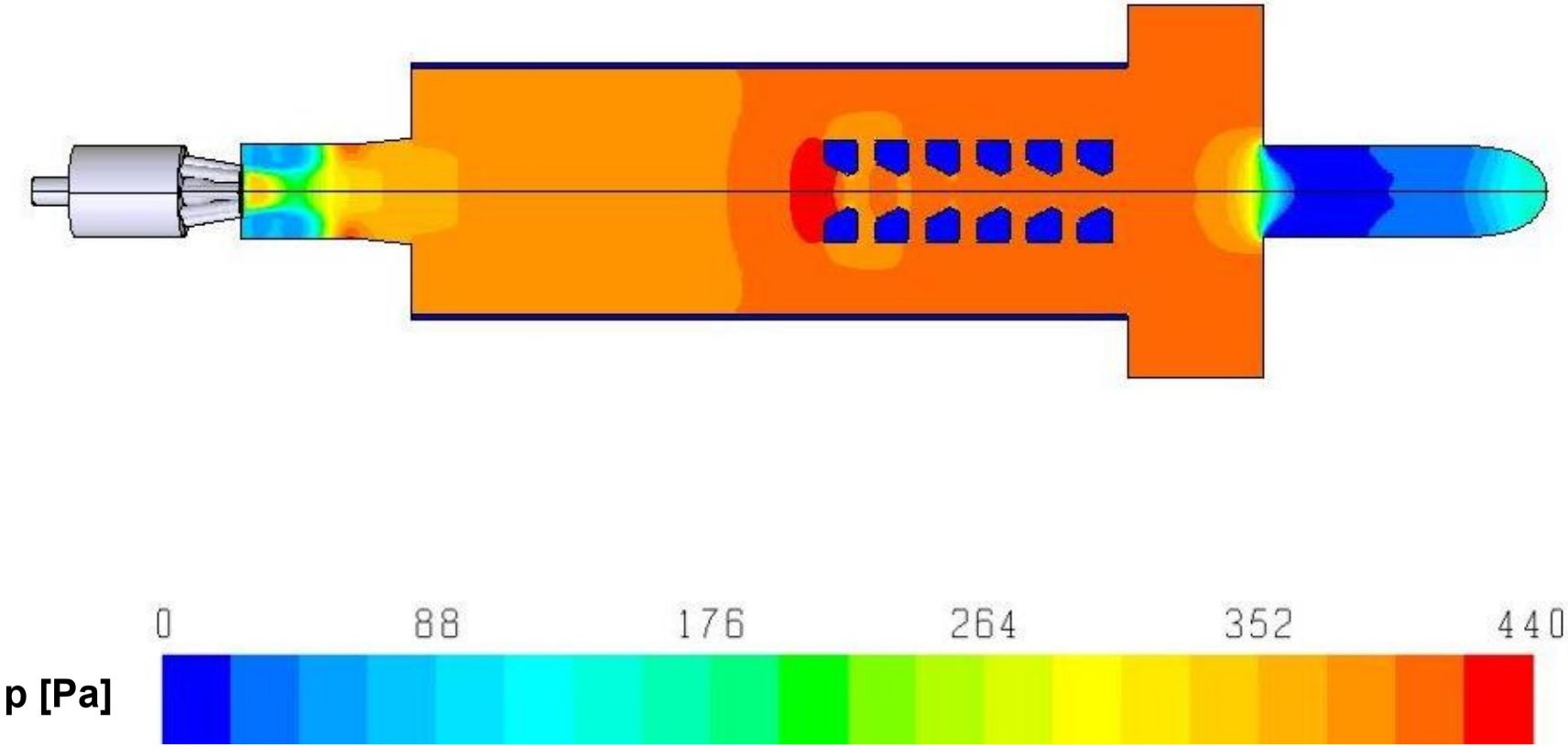
Kessel mit Speicherelementen



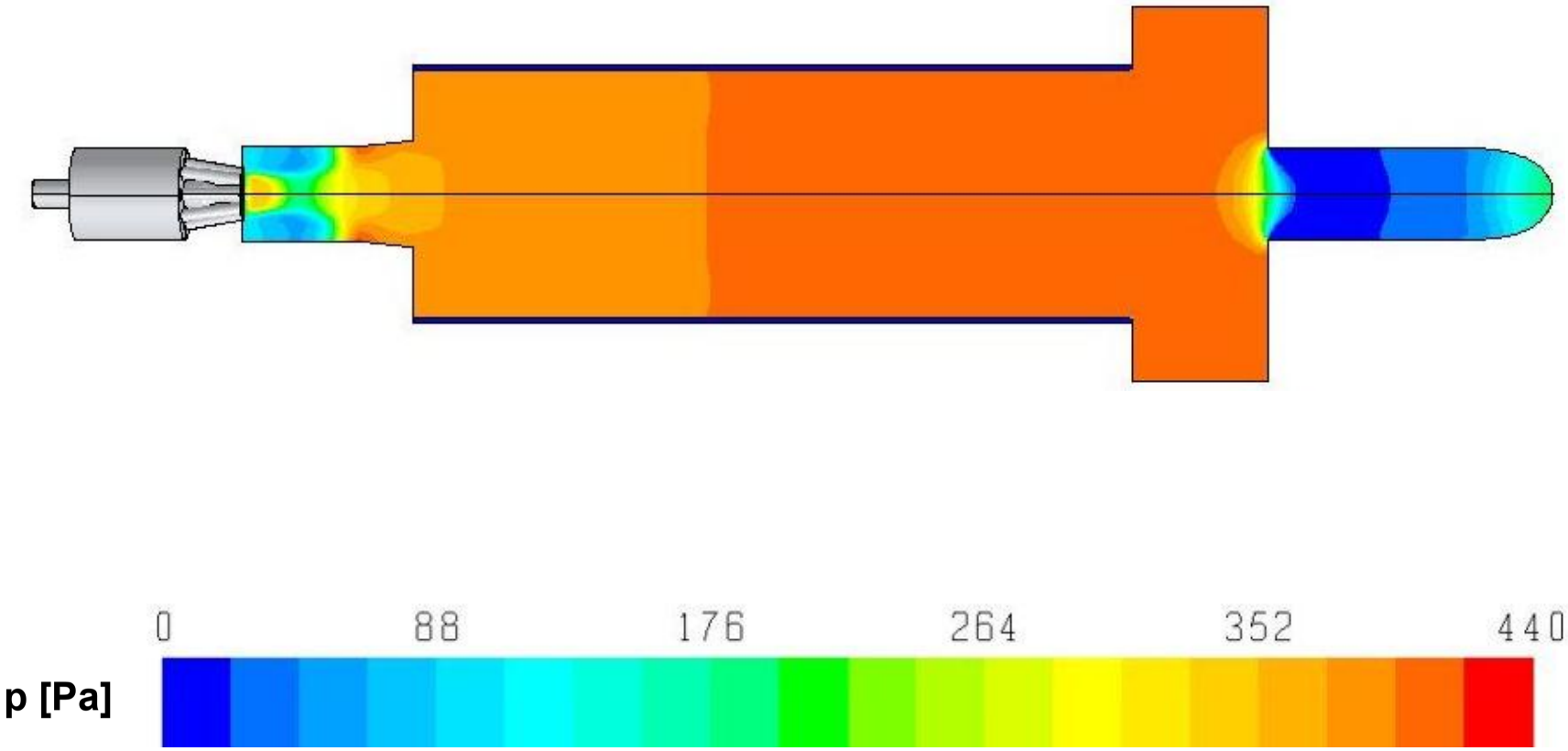
Statische Druckverteilung in der vertikalen Mittelebene des Kessels



Statische Druckverteilung in der horizontalen Mittelebene des Kessels



Statische Druckverteilung in der horizontalen Mittelebene des Kessels



Mitglieder der GWI

Firma	Straße	Ort
AVU Aktiengesellschaft für Versorgungs Unternehmen	An der Drehbank 18	58285 Gevelsberg
Bayerngas GmbH	Poccistraße 9	80336 München
Bosch Thermotechnik GmbH	Junkersstr. 20 - 24	73249 Wernau
Dechema e.V.	Theodor-Heuss-Allee 25	60486 Frankfurt
Deutsche Glastechnische Gesellschaft e.V. (DGG)	Siemensstraße 45	63071 Offenbach
Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. c/o Deutsche Montan Technologie GmbH	Am Technologiepark 1	45307 Essen
Dortmunder Energie- und Wasserversorgung GmbH	Ostwall 51	44135 Dortmund
DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.	Josef-Wirmer-Straße 1-3	53123 Bonn
eins energie in sachsen GmbH & Co. KG	Augustusburger Straße 1	09111 Chemnitz
ELE Emscher Lippe Energie GmbH	Karl-Schneider-Str. 2	45966 Gladbeck
Elster GmbH	Strotheweg 1	49504 Lotte
Energie Südbayern GmbH	Ungsteiner Str. 31	81539 München
E.ON Hanse AG	Schleswag-HeinGas-Platz 1	25450 Quickborn
E.ON Mitte AG	Monteverdistr. 2	34131 Kassel
E.ON Ruhrgas AG	Huttropstr. 60	45138 Essen
Erdgas Südwest GmbH	Siemensstr. 9	76275 Ettlingen
Erdgas-Verkaufs-Gesellschaft mbH Münster	Anton-Bruchausen-Str. 4	48519 Münster
Erdgasversorgungsgesellschaft Thüringen-Sachsen mbH	Juri-Gagarin-Ring 162	99084 Erfurt
FairEnergie GmbH	Hauffstr. 89	72762 Reutlingen
FIGAWA Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e. V.	Marienburger Str. 15	50968 Köln
GASAG Berliner Gaswerke AG	Reichpietschufer 60	10785 Berlin
Gas-Union GmbH	Kurmainzer Str. 2	65929 Frankfurt/Main
Gasanstalt Kaiserslautern AG	Bismarckstr. 14	67655 Kaiserslautern
Gasversorgung Westerwald GmbH	Am Alten Bahnhof 2	56203 Höhr-Grenzhausen
Gasversorgung Westfalica GmbH	Steinstraße 11	32547 Bad Oeynhausen
Niederrheinische Gas- und Wasserwerke GmbH	Duisburger Str. 161 - 167	47166 Duisburg
Industrieverband Haus-, Heiz- u. Küchentechnik HKI e. V.	Stresemannallee 19	60596 Frankfurt/Main

Innung für Sanitär- und Heizungstechnik Essen	Katzenbruchstr. 71	45141 Essen
Mainova Aktiengesellschaft	Solmsstr. 38	60486 Frankfurt
MarkE AG	Körnerstraße 40	58095 Hagen
Muelink & Grol B. V.	Postbus 509	NL-9700 AM Groningen
N-ERGIE Aktiengesellschaft	Am Plärrer 43	90429 Nürnberg
NVV Niederrheinische Versorgung und Verkehr AG	Odenkirchener Str. 201	41236 Mönchengladbach
Pfalzgas GmbH	Wormser Str. 123	67227 Frankenthal
RMG Regel + Meßtechnik GmbH	Osterholzstr. 45	34123 Kassel
Regionalgas Euskirchen GmbH & Co. KG	Münsterstr. 9	53881 Euskirchen
RheinEnergie AG	Parkgürtel 24	50823 Köln
rhenag Rheinische Energie AG	Bayenthalgürtel 9	50968 Köln
RWE Deutschland AG	Kruppstr. 5	45128 Essen
Schwank GmbH	Bremerhavener Str. 43	50735 Köln
Siegener Versorgungsbetriebe GmbH	Morleystr. 29-37	57072 Siegen
Stadtwerke Aachen AG - STAWAG	Lombardenstr. 12-22	52070 Aachen
Stadtwerke Bochum GmbH	Ostring 28	44787 Bochum
Stadtwerke Düsseldorf AG	Höherweg 100	40233 Düsseldorf
Stadtwerke Essen AG	Rüttenscheider Str. 27-37	45128 Essen
Stadtwerke Herne AG	Grenzweg 18	44623 Herne
SWK Energie GmbH	St. Töniser Str. 124	47804 Krefeld
Stadtwerke Mainz AG	Rheinallee 41	55118 Mainz
Stadtwerke Neuss Energie und Wasser GmbH	Moselstr. 25-27	41464 Neuss
Stadtwerke Velbert GmbH	Kettwiger Str. 2	42549 Velbert
swb Netze GmbH & Co. KG	Theodor-Heuss-Allee 20	28215 Bremen
Thüga Aktiengesellschaft	Nymphenburger Str. 39	80335 München
Vaillant GmbH	Berghauser Str. 40	42859 Remscheid
Viessmann Werke GmbH & Co	Postfach 10	35107 Allendorf
VNG-Verbundnetz Gas AG	Braunstr. 7	04340 Leipzig
Wolf GmbH	Industriestr. 1	84048 Mainburg
WS Wärmeprozesstechnik GmbH	Dornierstraße14	71272 Renningen