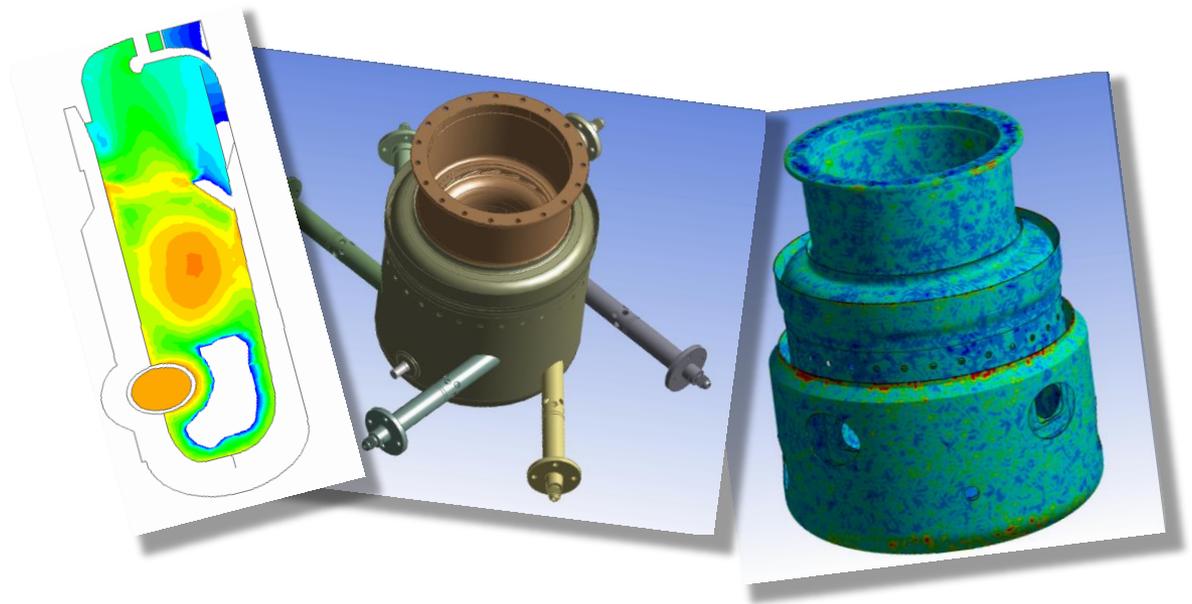

35. CADFEM ANSYS SIMULATION CONFERENCE

Effiziente und schadgasresistente Mikrogasturbinen aus innovativen
Keramikkomponenten - Strömungssimulation und Schwingungsanalyse



Dr. Wolfram Heineken
Andreas Lehwald

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg

Fraunhofer IFF Magdeburg

- Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung
- gegründet 1992
- 180 Mitarbeiter, davon 130 Wissenschaftler
- Geschäftsfelder
 - Biosysteme
 - Logistik
 - Robotersysteme
 - Messtechnik
 - Automatisierung
 - Prozesstechnik
 - Digitales Engineering



GLIEDERUNG

1. Projekt CeramTurbo
2. Mikrogasturbine Capstone C65
3. Strömungs- und Verbrennungssimulation mit ANSYS Fluent
4. Schwingungsanalyse mit ANSYS Mechanical
5. Ausblick

Projekt CeramTurbo

Mikrogasturbinen aus keramischen Komponenten

- Mikrogasturbinen (MGT) als Alternative zu Verbrennungsmotoren in Blockheizkraftwerken
- Vollast: Verbrennungsmotoren effizienter
- Teillast: MGT oft effizienter als Verbrennungsmotoren
 - ⇒ Vorteil bei flexiblem, bedarfsabhängigem Betrieb
- Wirkungsgrad von MGT steigt mit Temperatur
 - herkömmliche MGT aus Inconel (Ni-Legierung): ca. 870 °C am Turbineneintritt
 - MGT aus keramischen Werkstoffen: ca. 1200 °C am Turbineneintritt
 - ⇒ Steigerung des Wirkungsgrades um 30 %
 - ⇒ damit auch bei Vollast so effizient wie Verbrennungsmotor
- weitere Vorteile der MGT
 - andere Kraftstoffe, z.B. Biogas
 - Resistenz gegen Schadstoffe, z.B. Schwefelwasserstoff

Projekt CeramTurbo

Projektpartner



Walter E. C. Pritzkow Spezialkeramik
Filderstadt-Sielmingen, Baden-Württemberg



Euro-K GmbH
Berlin

Projekt CeramTurbo

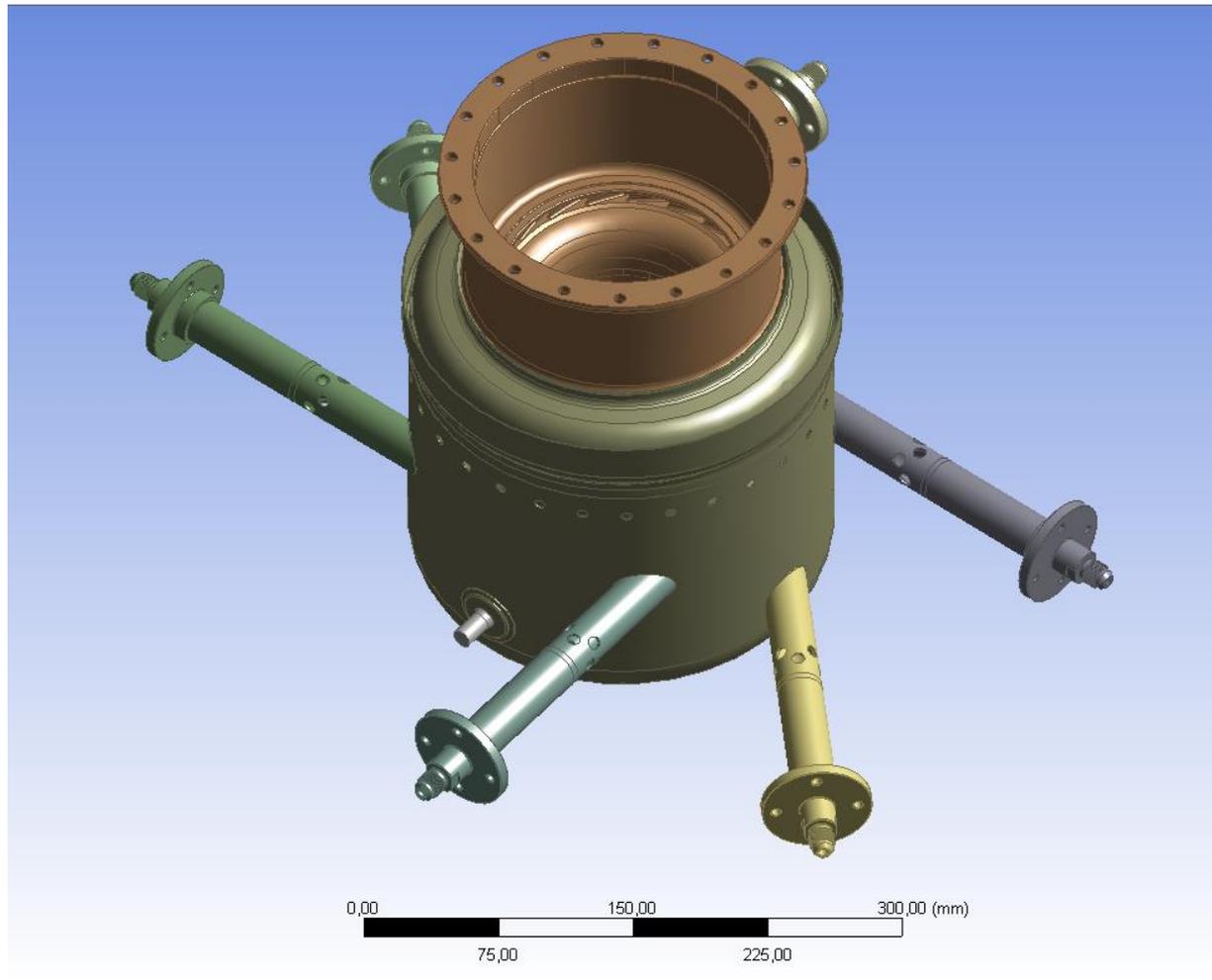
Simulation

- Strömung und Verbrennung
 - Bewertung der Temperaturverteilung
- Schwingungsanalyse
 - Bewertung der Materialbelastung
- geplant:
 - Strömungssimulation ⇒ thermische Spannungsanalyse ⇒ Schwingungsanalyse (Fluid-Struktur-Interaktion)



Mikrogasturbine Capstone C65

Brennkammer, Leiteinrichtung, Injektoren



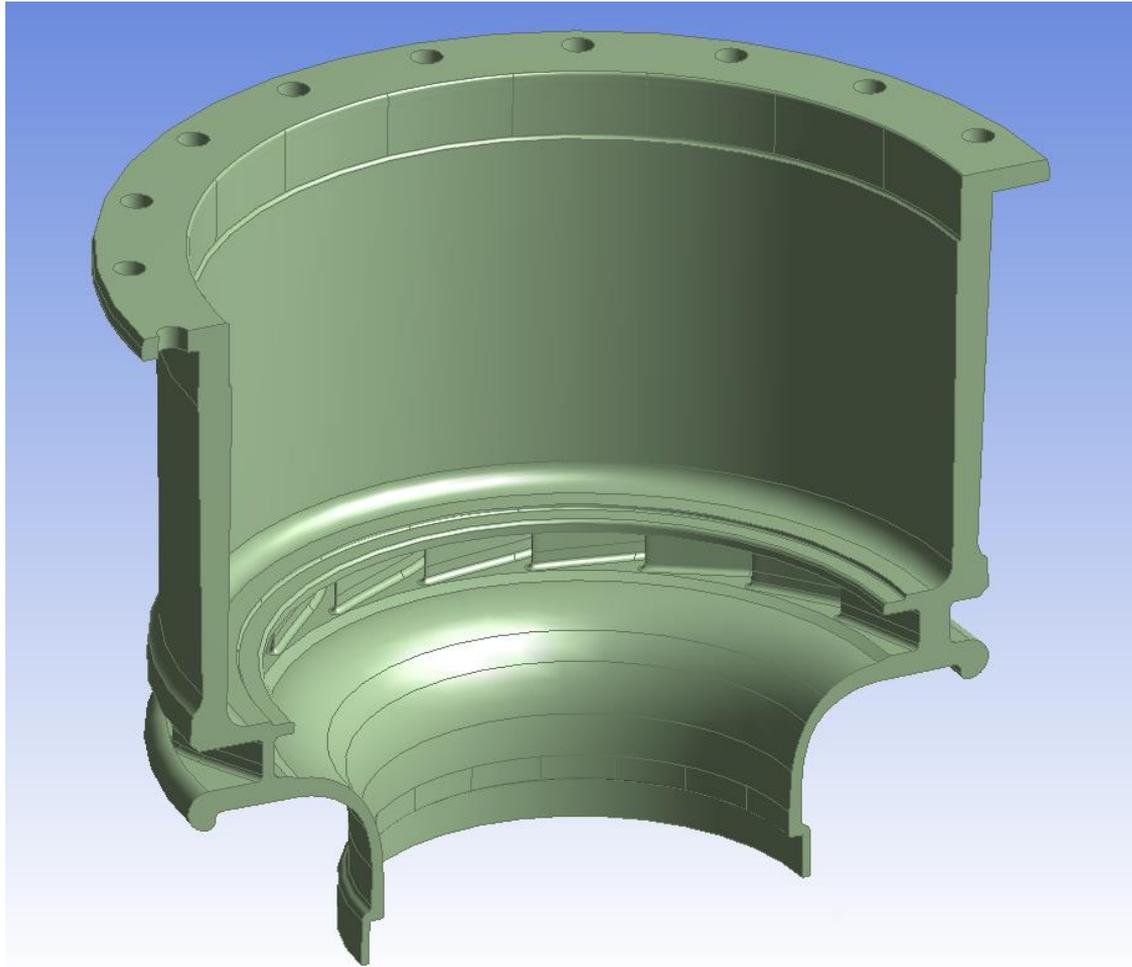
Mikrogasturbine Capstone C65

Brennkammer



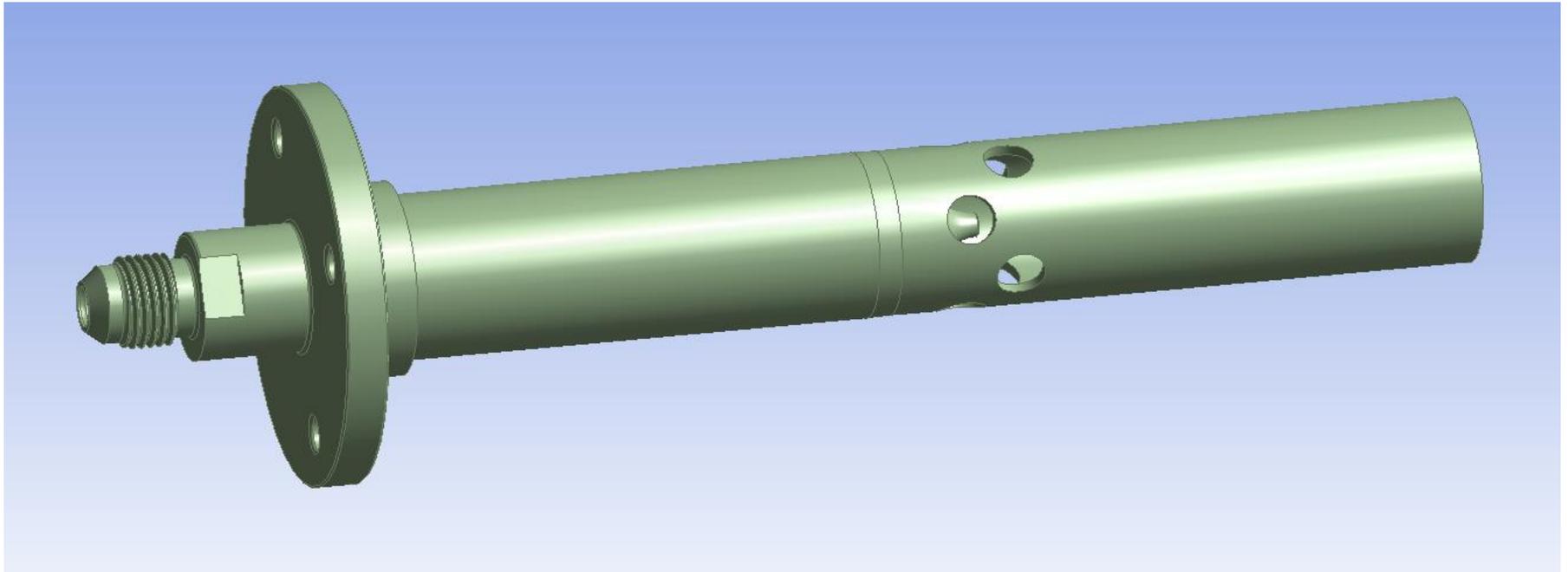
Mikrogasturbine Capstone C65

Leiteinrichtung



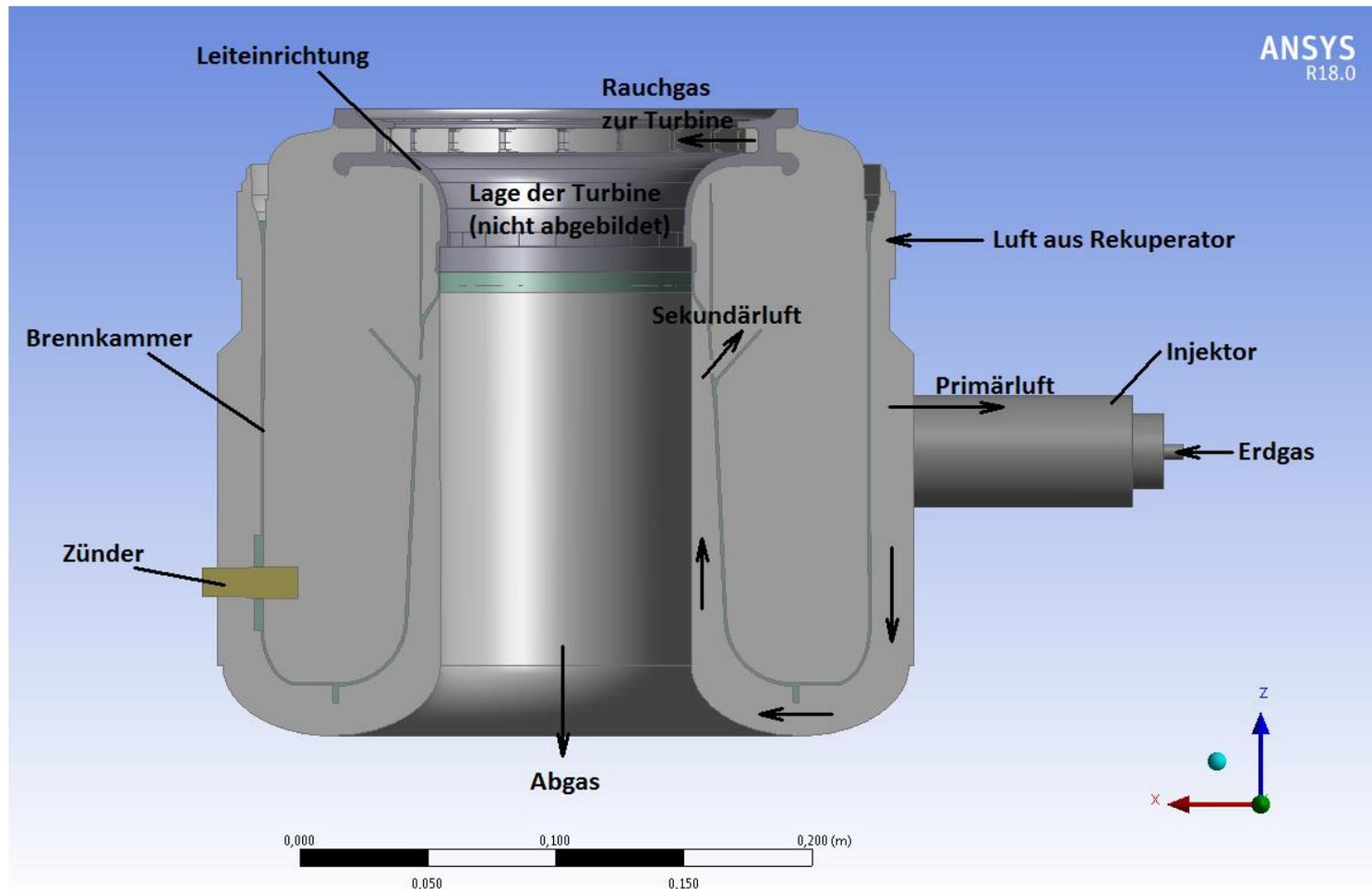
Mikrogasturbine Capstone C65

Injektor



Mikrogasturbine Capstone C65

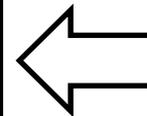
Brennkammer im Schnitt



Strömungssimulation

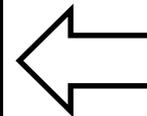
Vorgegebene Parameter

Leistung	224 kW
Massenstrom Abgas	0,49 kg/s
Temperatur Erdgas vor Injektor	30 °C
Temperatur Luft nach Rekuperator	560 °C



Datenblatt Capstone

Zusammensetzung Erdgas [Vol.-%]	
Methan	94,534
Stickstoff	1,060
Kohlendioxid	0,745
Äthan	3,226
Propan	0,320
Butan	0,115



Angabe Gasanbieter

Druck Luft nach Rekuperator	4,68 bar (a)
Druck vor Leitrad	4,58 bar (a)



geschätzt aus
Druckverhältnis Verdichter,
Druckverlust Rekuperator

Strömungssimulation

Abgeleitete Parameter

Erdgas

unterer Heizwert	36,324 MJ/Nm ³
Massenstrom	0,00467 kg/s

Luft

Massenstrom	0,48533 kg/s
-------------	--------------

Verbrennungsluftverhältnis λ 6,293

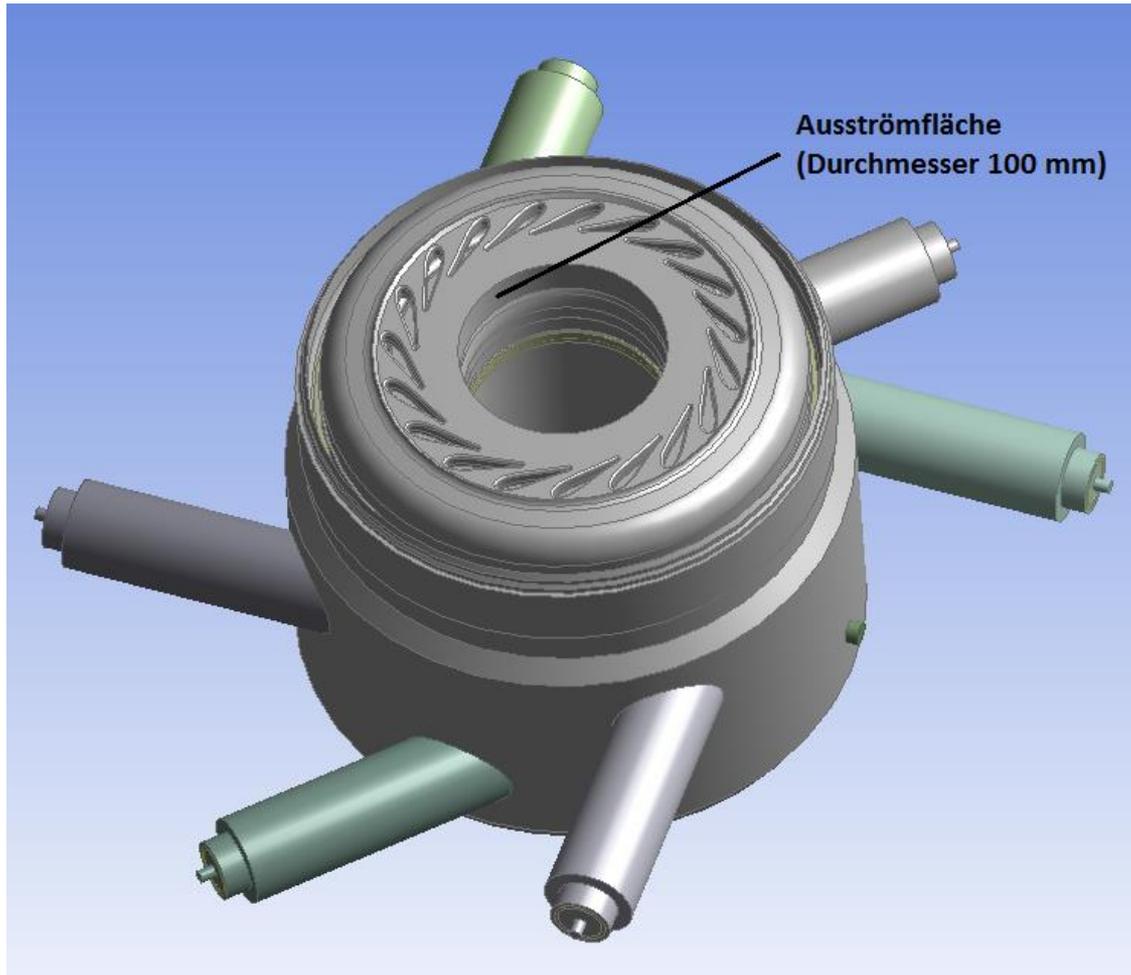
Volumenanteile im Abgas (vollständige Verbrennung)

Kohlendioxid	1,659 Vol.-%
Wasser	3,226 Vol.-%
Sauerstoff	17,256 Vol.-%
Stickstoff	77,858 Vol.-%

Temperatur vor Leitrad (adiabat) 933,18 °C

Strömungssimulation

Simulationsgebiet

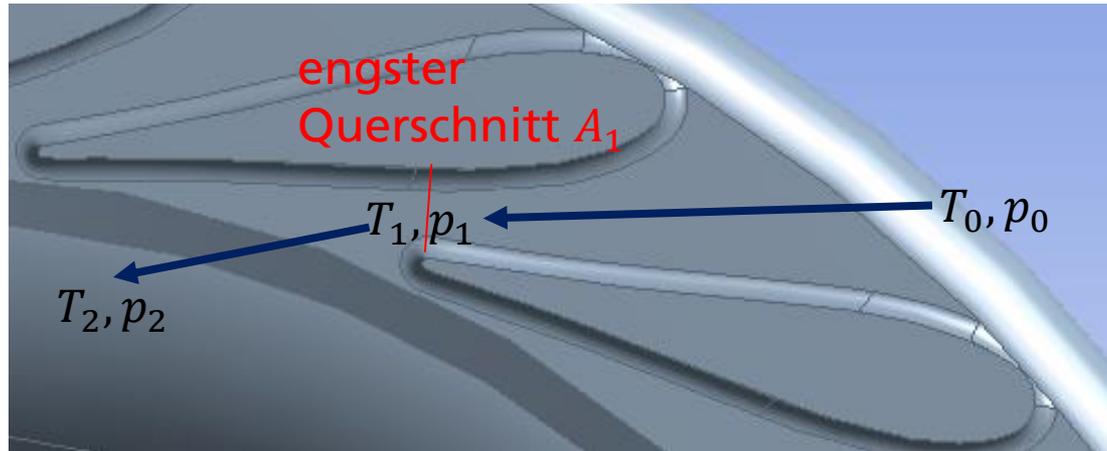


- vereinfachte Simulation ohne Turbinenlaufrad
- künstliche Erweiterung des Simulationsgebiets bis in den Bereich des Laufrads (Vermeidung von Randeinflüssen)

welche Randbedingung auf der Ausströmfläche ?

Strömungssimulation

Stopfgrenze im Leitrad



- gegeben: T_0, p_0, A_1
- engster Querschnitt: höchstens Schallgeschwindigkeit $v_1 \leq c_1$
- maximaler Massenstrom, wenn $v_1 = c_1$
- maximal möglicher Massenstrom aus T_0, p_0, A_1 berechenbar, unabhängig von p_2

Strömungssimulation

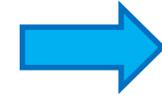
Berechnung der Stopfgrenze

Stopfgrenze

$$v_1 = c_1 = \sqrt{\kappa_1 RT_1 / M}$$

Energieerhaltung

$$h_0 = h_1 + v_1^2 / 2$$



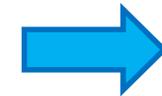
T_1, v_1

ideales Gas

$$\rho_0 RT_0 = Mp_0, \quad \rho_1 RT_1 = Mp_1$$

Isentropie

$$\frac{p_0}{\rho_0^{\kappa_0}} = \frac{p_1}{\rho_1^{\kappa_1}}$$



p_1, ρ_1

Kontinuität

$$\dot{m} = \rho_1 v_1 A_1$$



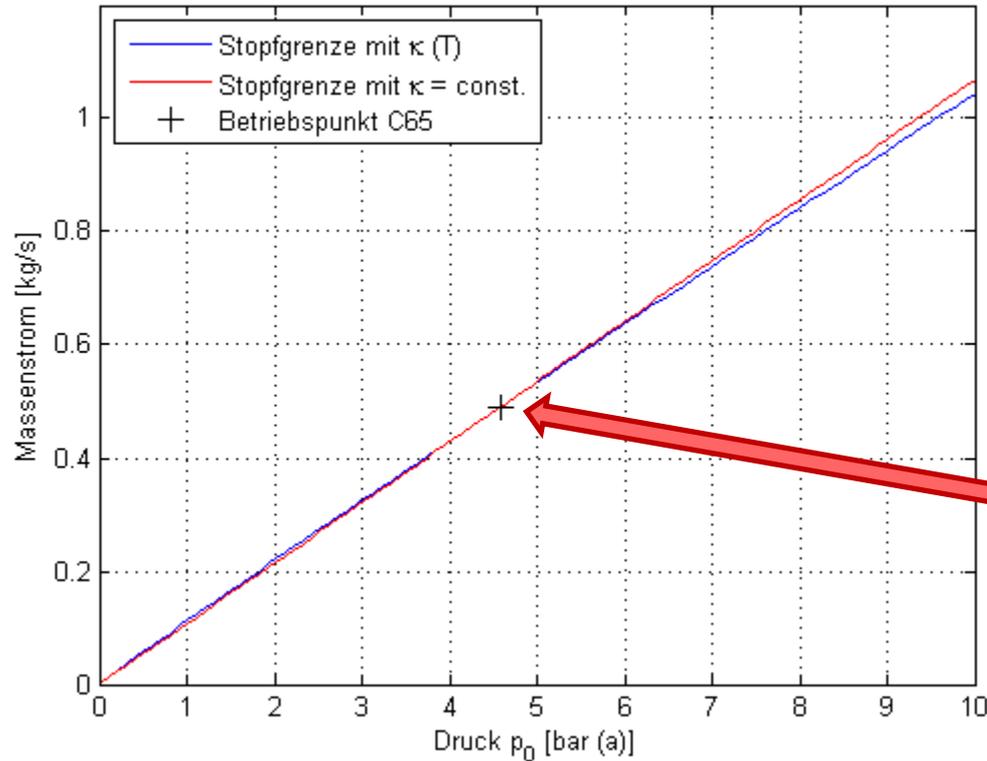
\dot{m}

geschlossene Formel bei $c_p, c_v, \kappa = \text{const.}$:

$$\dot{m} = A_1 p_0 \sqrt{\frac{\kappa M}{RT_0} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}$$

Strömungssimulation

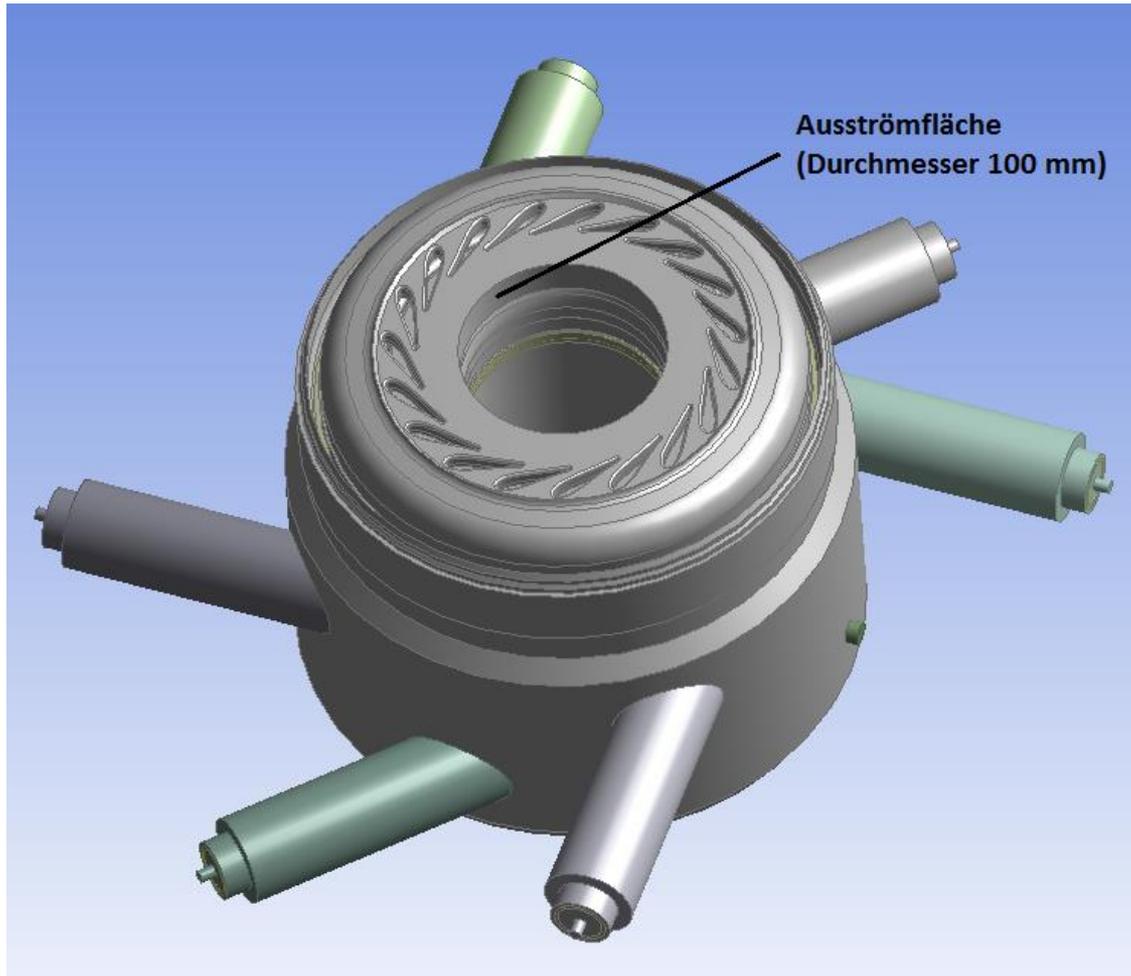
Stopfgrenze im Leitrad



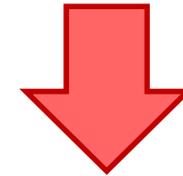
Betrieb der Turbine erfolgt an der Stopfgrenze

Strömungssimulation

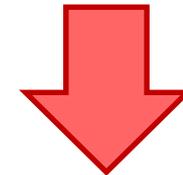
Randbedingung auf der Ausströmfläche



Druck auf Ausströmfläche
hinreichend klein



Stopfgrenze erreicht



realistische
Strömungsberechnung bis
zum Leitrad

Strömungssimulation

Zwei Varianten

■ Variante 1

- vereinfachte Erdgas-Zusammensetzung: Methan + Stickstoff
- Kinetik: eine Gleichung für Methan-Oxidation
- Vorteil: geringere Rechenzeit, bessere Konvergenz

■ Variante 2

- Erdgas-Zusammensetzung: 6 Gaskomponenten nach Angabe des Gasanbieters
- Kinetik: Jones-Lindstedt-Mechanismus (10 Reaktionsgleichungen)
- Vorteil: höhere Genauigkeit durch detailliertere Modellierung

Ist Variante 1 zur Berechnung der Temperatur-Verteilung ausreichend?

Strömungssimulation

Variante 1

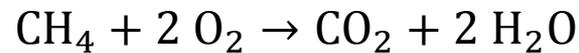
- Erdgaszusammensetzung vereinfacht
 - nur Methan und Stickstoff
 - gleicher Heizwert

	Angabe Gasanbieter	Vereinfachung
Zusammensetzung [Vol.-%]		
Methan	94,534	97,63
Stickstoff	1,060	2,37
Kohlendioxid	0,745	—
Äthan	3,226	—
Propan	0,320	—
Butan	0,115	—
unterer Heizwert [MJ/Nm ³]	36,324	36,324

Strömungssimulation

Variante 1

- einfache Kinetik für Methan-Oxidation aus Fluent-Datenbank

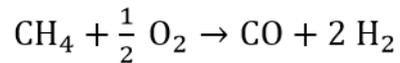


$$r_{\text{kin}} = 2,119 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(\frac{2,027 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \left(\frac{[\text{CH}_4]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{[\text{O}_2]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{1,3} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

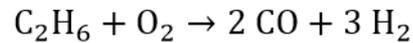
Strömungssimulation

Variante 2

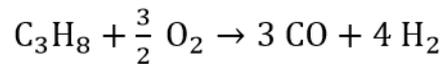
■ Jones-Lindstedt-Mechanismus



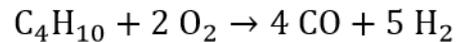
(R1)



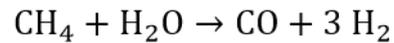
(R2)



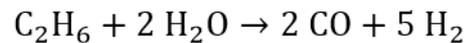
(R3)



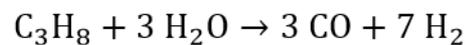
(R4)



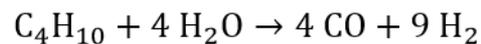
(R5)



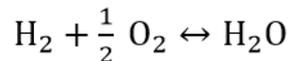
(R6)



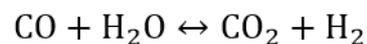
(R7)



(R8)



(R9)



(R10)

C_xH_y-Oxidation

C_xH_y-Reformierung

Wasserstoff-Oxidation

Wasser-Gas-Shift

Strömungssimulation

Variante 2

■ Jones-Lindstedt-Mechanismus: Reaktionsraten

$$r_{1,\text{kin}} = 4,4 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{1,2558 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \left(\frac{[\text{CH}_4]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{[\text{O}_2]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{5/4} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

$$r_{2,\text{kin}} = 4,2 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{1,2558 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \left(\frac{[\text{C}_2\text{H}_6]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{[\text{O}_2]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{5/4} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

$$r_{3,\text{kin}} = 4,0 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{1,2558 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \left(\frac{[\text{C}_3\text{H}_8]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{[\text{O}_2]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{5/4} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

$$r_{4,\text{kin}} = 3,8 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{1,2558 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \left(\frac{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{[\text{O}_2]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{5/4} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

Strömungssimulation

Variante 2

■ Jones-Lindstedt-Mechanismus: Reaktionsraten

$$r_{5,\text{kin}} = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(-\frac{1,2558 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \frac{[\text{CH}_4]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{[\text{H}_2\text{O}]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

$$r_{6,\text{kin}} = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(-\frac{1,2558 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \frac{[\text{C}_2\text{H}_6]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{[\text{H}_2\text{O}]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

$$r_{7,\text{kin}} = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(-\frac{1,2558 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \frac{[\text{C}_3\text{H}_8]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{[\text{H}_2\text{O}]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

$$r_{8,\text{kin}} = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(-\frac{1,2558 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \frac{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{[\text{H}_2\text{O}]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

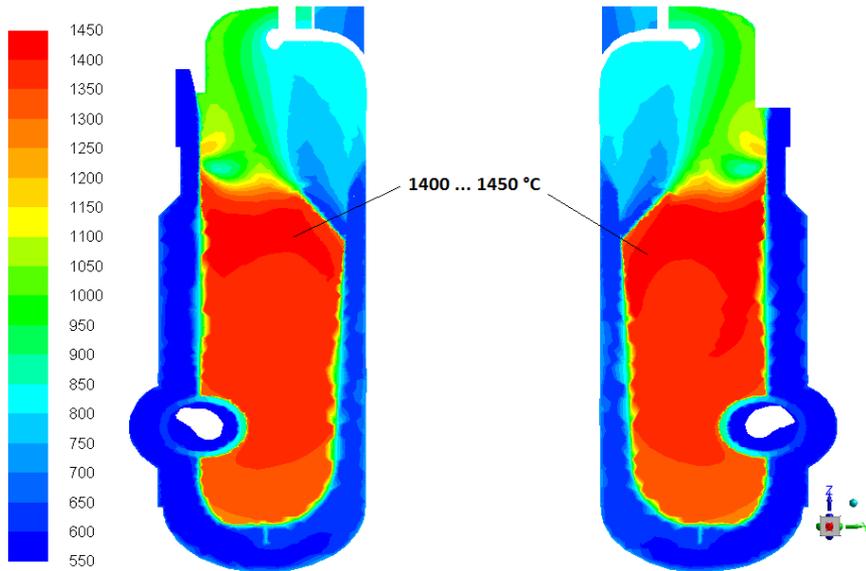
$$r_{9,\text{kin, hin}} = 6,8 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{T}{\text{K}}\right)^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{1,6744 \cdot 10^8 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \left(\frac{[\text{H}_2]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{[\text{O}_2]}{\text{kmol/m}^3}\right)^{3/2} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

$$r_{10,\text{kin, hin}} = 2,75 \cdot 10^9 \cdot \exp\left(-\frac{8,372 \cdot 10^7 \text{ J/kmol}}{RT}\right) \cdot \frac{[\text{CO}]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{[\text{H}_2\text{O}]}{\text{kmol/m}^3} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

Strömungssimulation

Temperatur [°C], senkrechter Schnitt

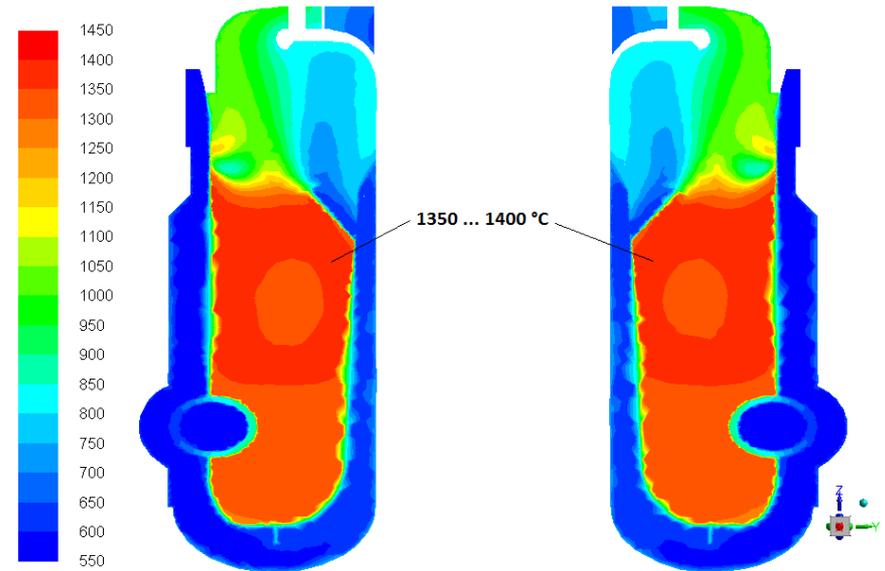
Variante 1 (CH₄-Oxidation, 1 Gleichung)



Contours of Static Temperature (c)

Sep 21, 2017
ANSYS Fluent Release 18.0 (3d, pbns, spe, sstk)

Variante 2 (Jones-Lindstedt, 10 Gleichungen)



Contours of Static Temperature (c)

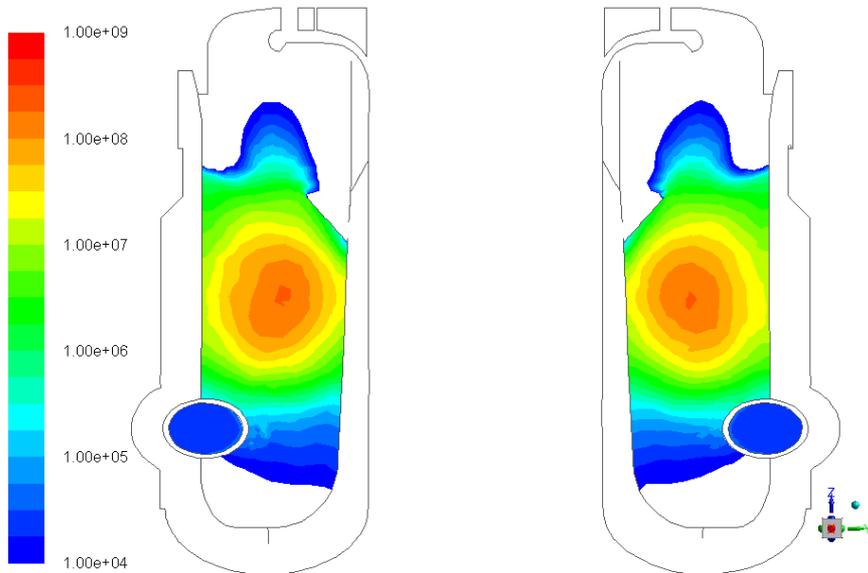
Sep 21, 2017
ANSYS Fluent Release 18.0 (3d, pbns, spe, sstk)

Strömungssimulation

Reaktionsenthalpie [W/m³], senkrechter Schnitt

Variante 1

(CH₄-Oxidation, 1 Gleichung)

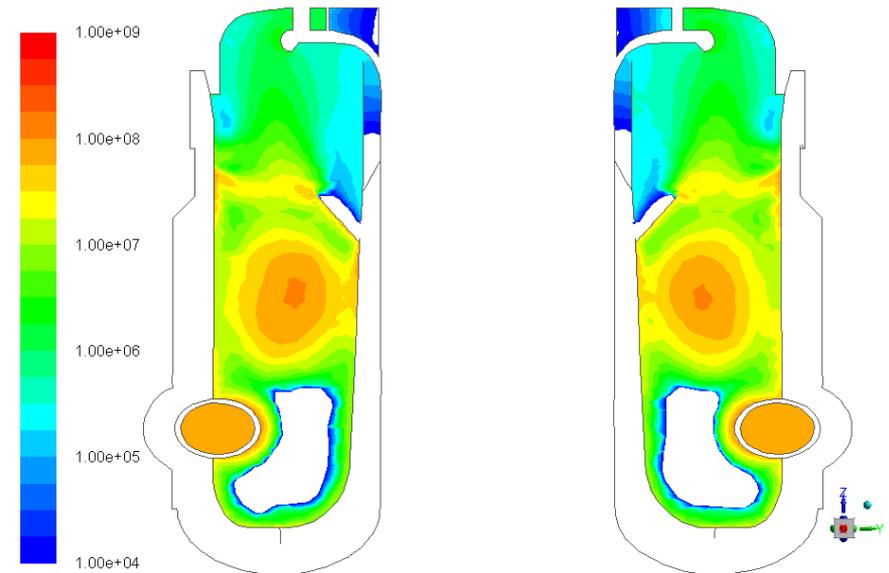


Contours of reaction-enthalpy (W/m³)

Sep 21, 2017
ANSYS Fluent Release 18.0 (3d, pbns, spe, sstk)

Variante 2

(Jones-Lindstedt, 10 Gleichungen)



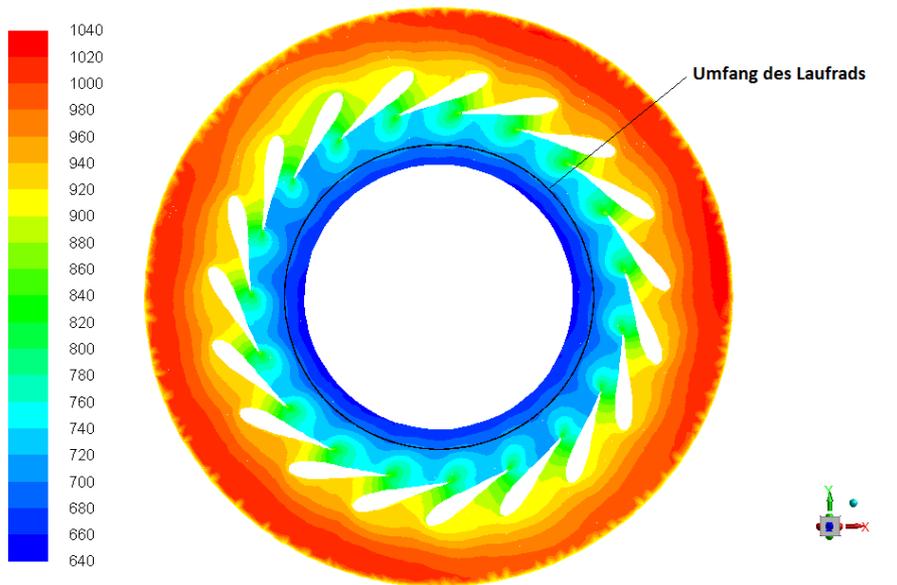
Contours of reaction-enthalpy

Sep 21, 2017
ANSYS Fluent Release 18.0 (3d, pbns, spe, sstk)

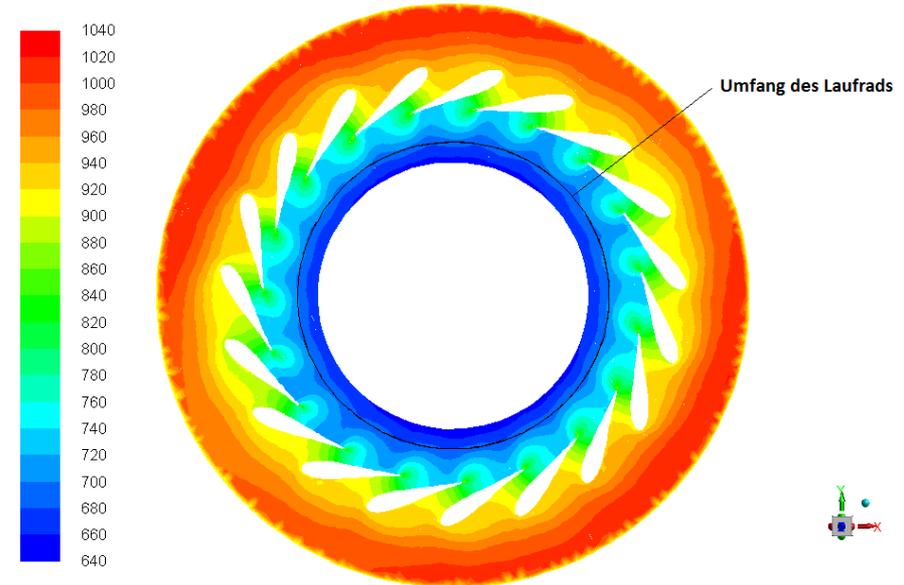
Strömungssimulation

Temperatur [°C], Schnitt durch Leitrad

Variante 1 (CH₄-Oxidation, 1 Gleichung)



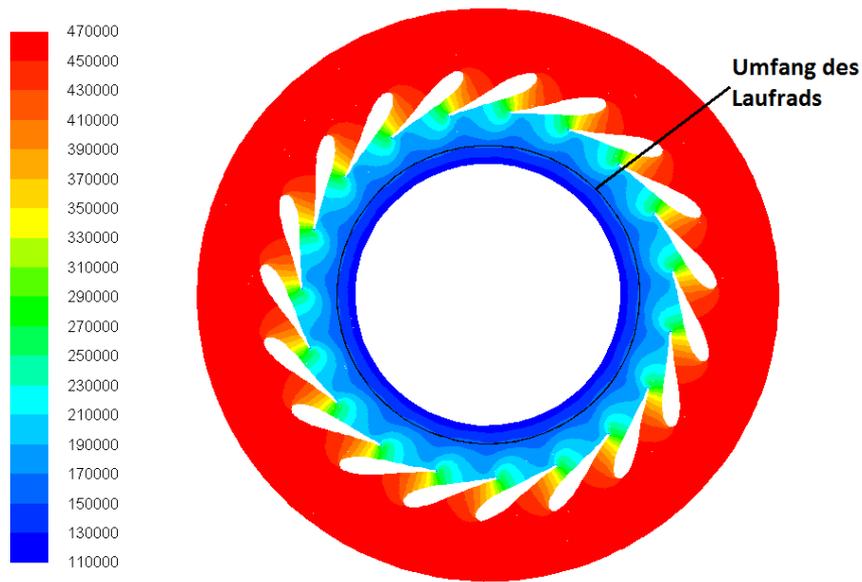
Variante 2 (Jones-Lindstedt, 10 Gleichungen)



Strömungssimulation

Druck [Pa], Schnitt durch Leitrad

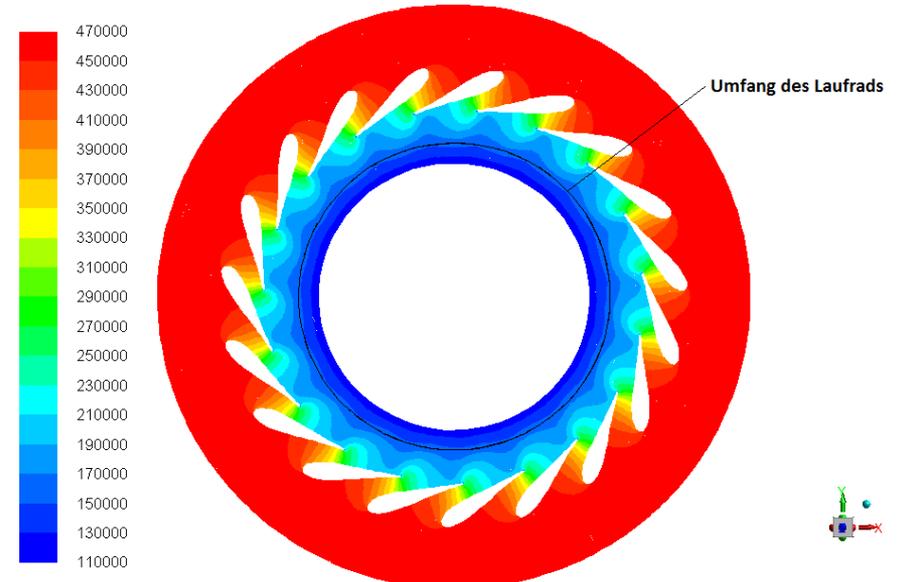
Variante 1 (CH₄-Oxidation, 1 Gleichung)



Contours of Absolute Pressure (pascal)

Aug 09, 2017
ANSYS Fluent Release 18.0 (3d, pbns, spe, sstk)

Variante 2 (Jones-Lindstedt, 10 Gleichungen)



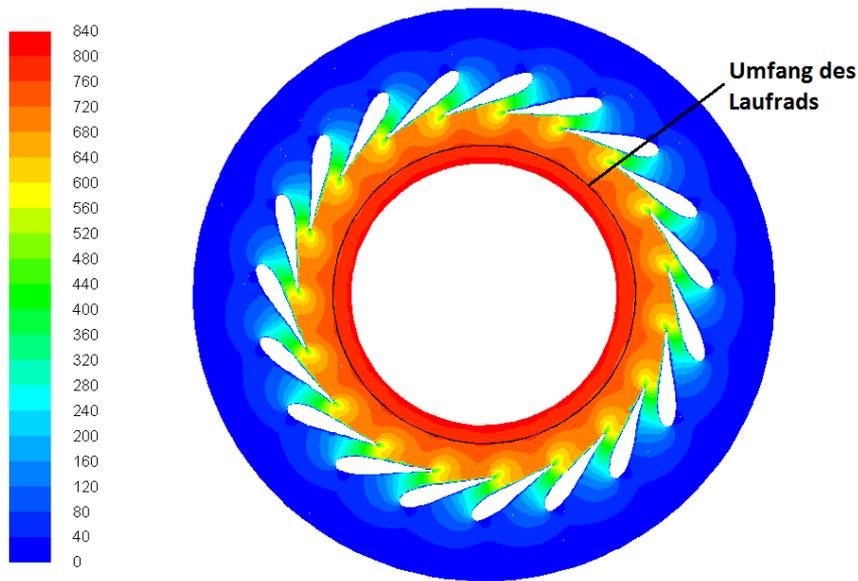
Contours of Absolute Pressure (pascal)

Sep 21, 2017
ANSYS Fluent Release 18.0 (3d, pbns, spe, sstk)

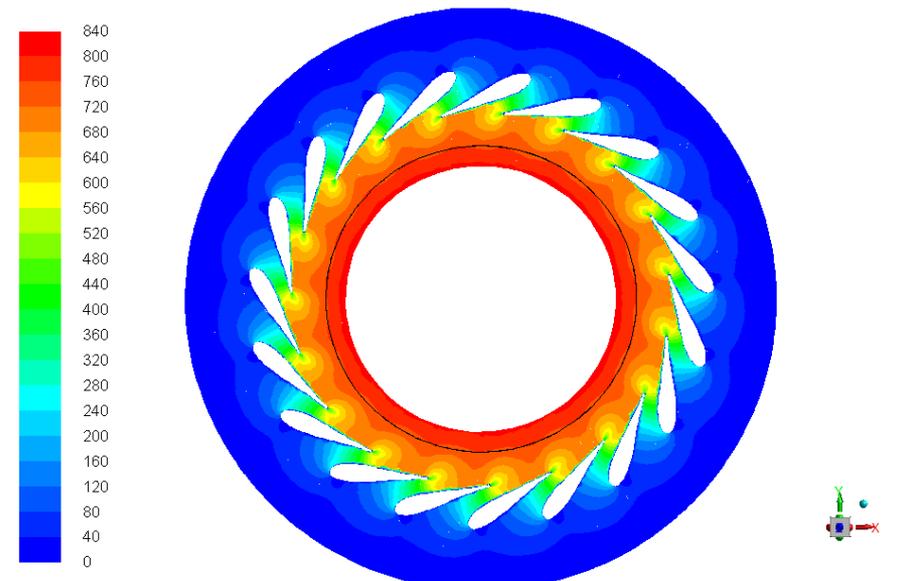
Strömungssimulation

Geschwindigkeit [m/s], Schnitt durch Leitrad

Variante 1 (CH₄-Oxidation, 1 Gleichung)



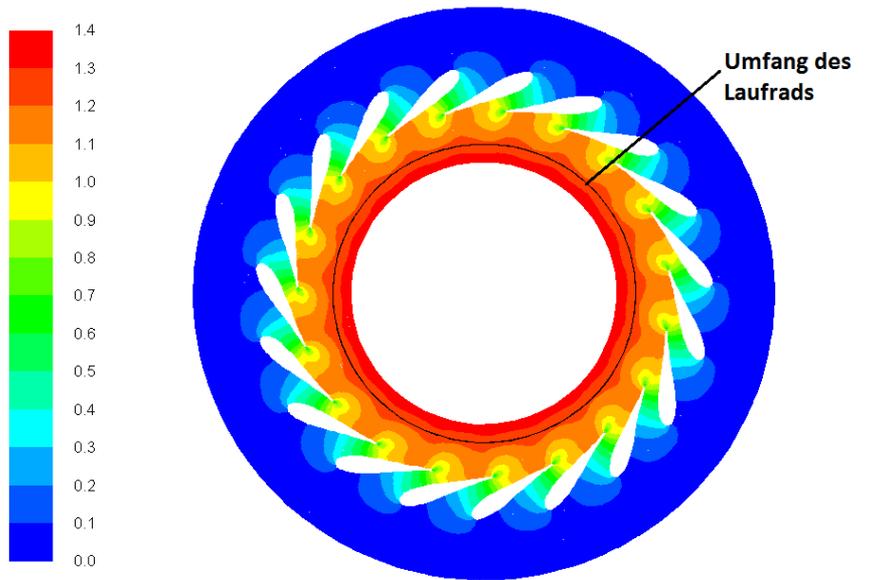
Variante 2 (Jones-Lindstedt, 10 Gleichungen)



Strömungssimulation

Mach-Zahl, Schnitt durch Leitrad

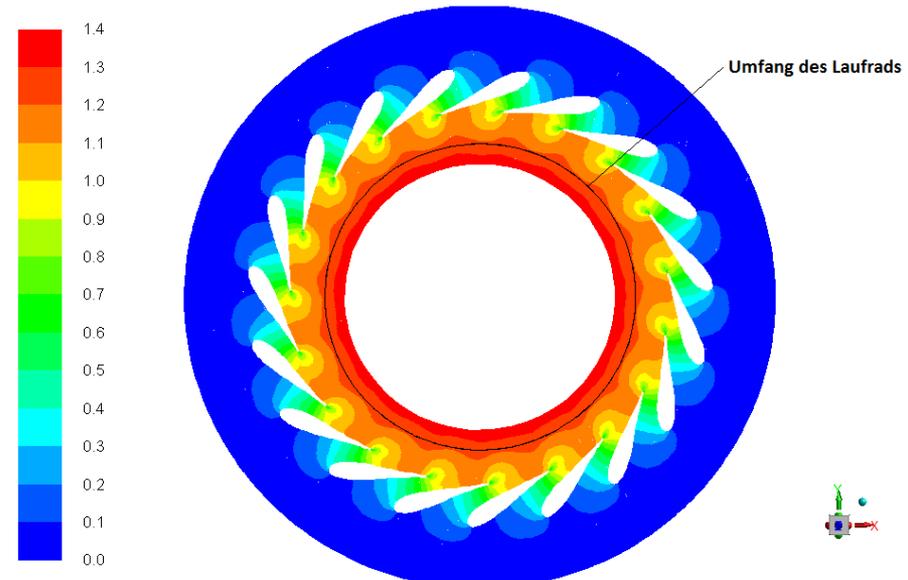
Variante 1 (CH₄-Oxidation, 1 Gleichung)



Contours of Mach Number

Aug 09, 2017
ANSYS Fluent Release 18.0 (3d, pbns, spe, sstk)

Variante 2 (Jones-Lindstedt, 10 Gleichungen)



Contours of Mach Number

Sep 20, 2017
ANSYS Fluent Release 18.0 (3d, pbns, spe, sstk)

Strömungssimulation

Ergebnisse numerisch

	Variante 1	Variante 2	Berechnung
mittlerer Druck der Luft nach Rekuperator	4,688 bar (a)	4,685 bar (a)	–
mittlerer Druck vor dem Leitrad	4,564 bar (a)	4,560 bar (a)	4,583 bar (a) (Stopfgrenze)
maximale Temperatur in der Brennkammer	1462 °C	1392 °C	–
mittlere Temperatur vor dem Leitrad	929,5 °C	926,5 °C	933,2 °C

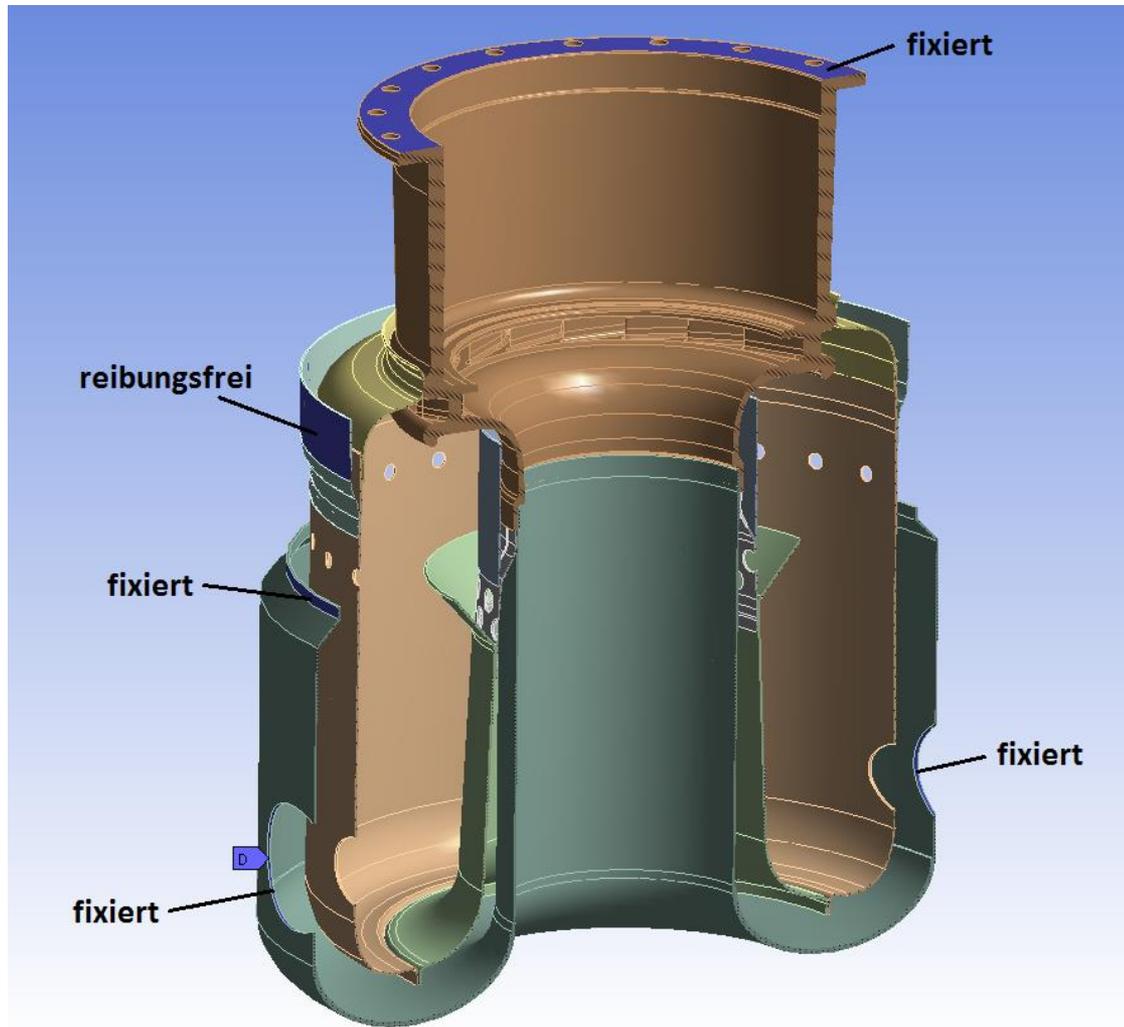
- maximale Temperatur in der Brennkammer differiert um 70 K

⇒ detailliertere Variante 2 verwenden!

- sonst gute Übereinstimmung

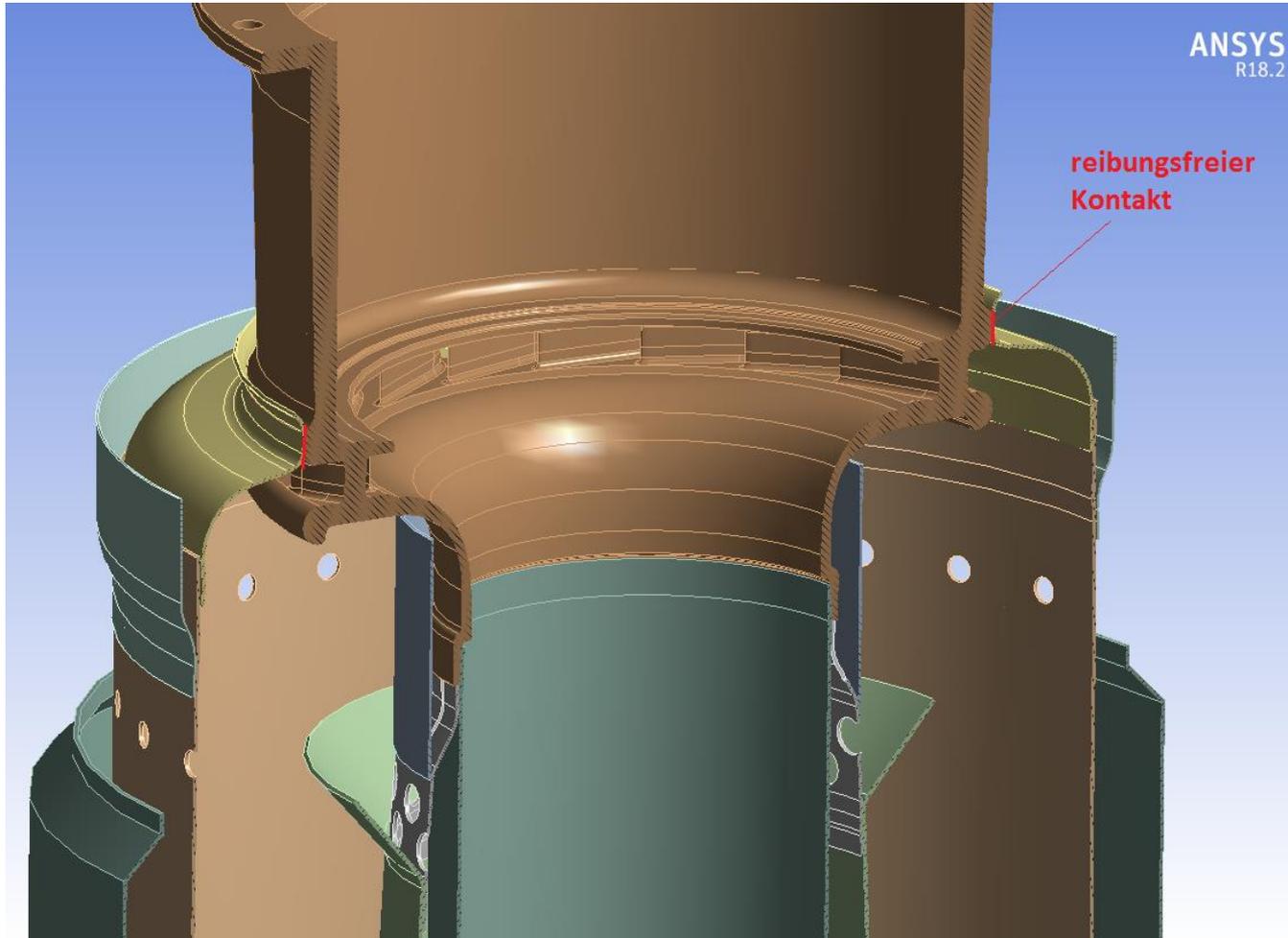
Schwingungsanalyse

Lagerung



Schwingungsanalyse

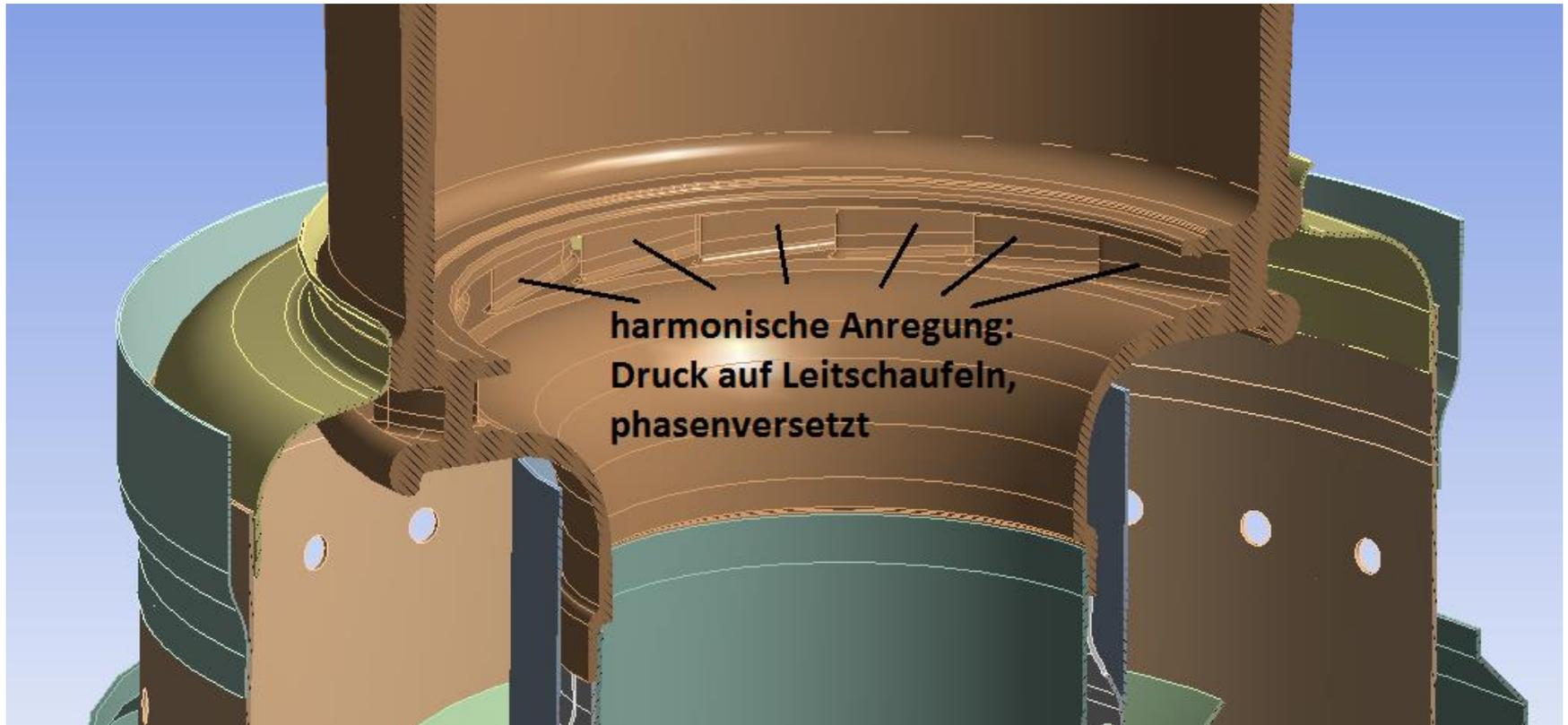
Kontakte



andere Kontakte:
Verbund

Schwingungsanalyse

Harmonische Anregung der Leitschaufeln



Schwingungsanalyse

Harmonische Anregung der Leitschaufeln

- Drehung des Rotors \Rightarrow Druck auf Leitschaufeln periodisch
- Rotor-Frequenz $f_{\text{rot}} = 1600 \frac{\text{Umdr.}}{\text{s}} = 1600 \text{ Hz}$
- Anzahl der Rotorblätter $n_{\text{rot}} = 15$
- Anzahl der Leitschaufeln $n_{\text{stat}} = 19$
- Druck auf i -te Leitschaufel (in Rotationsrichtung numeriert)

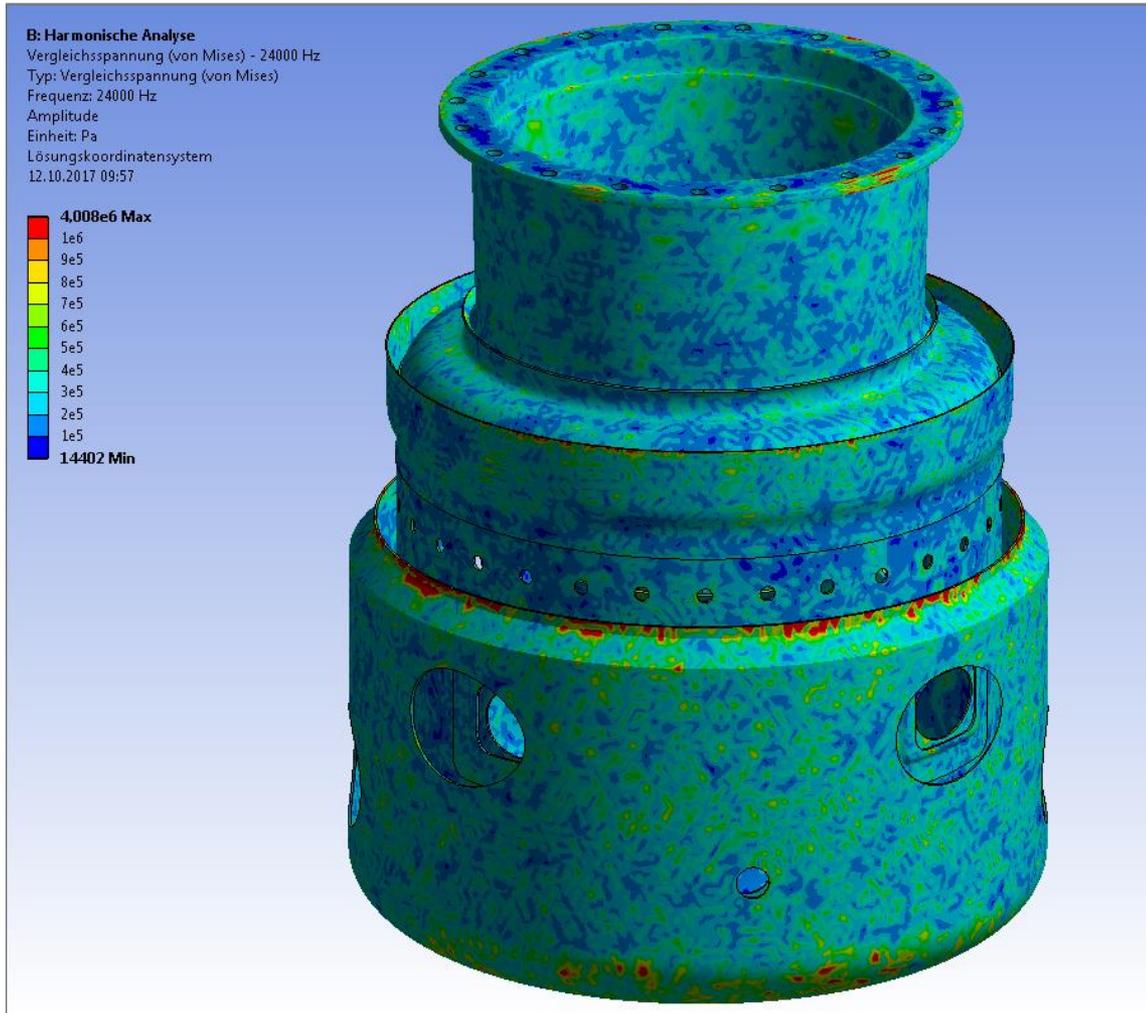
$$p_i(t) = \hat{p} \cos(\omega t - \varphi_i)$$

mit $\omega = 2 \pi n_{\text{rot}} f_{\text{rot}}$ und $\varphi_i = 2 \pi (i - 1) n_{\text{rot}} / n_{\text{stat}}$

- Frequenz der Anregung $f_{\text{anr}} = n_{\text{rot}} f_{\text{rot}} = 24 \text{ kHz}$
- für Schwingungsanalyse $\hat{p} = 0,1 \text{ bar}$ gewählt

Schwingungsanalyse

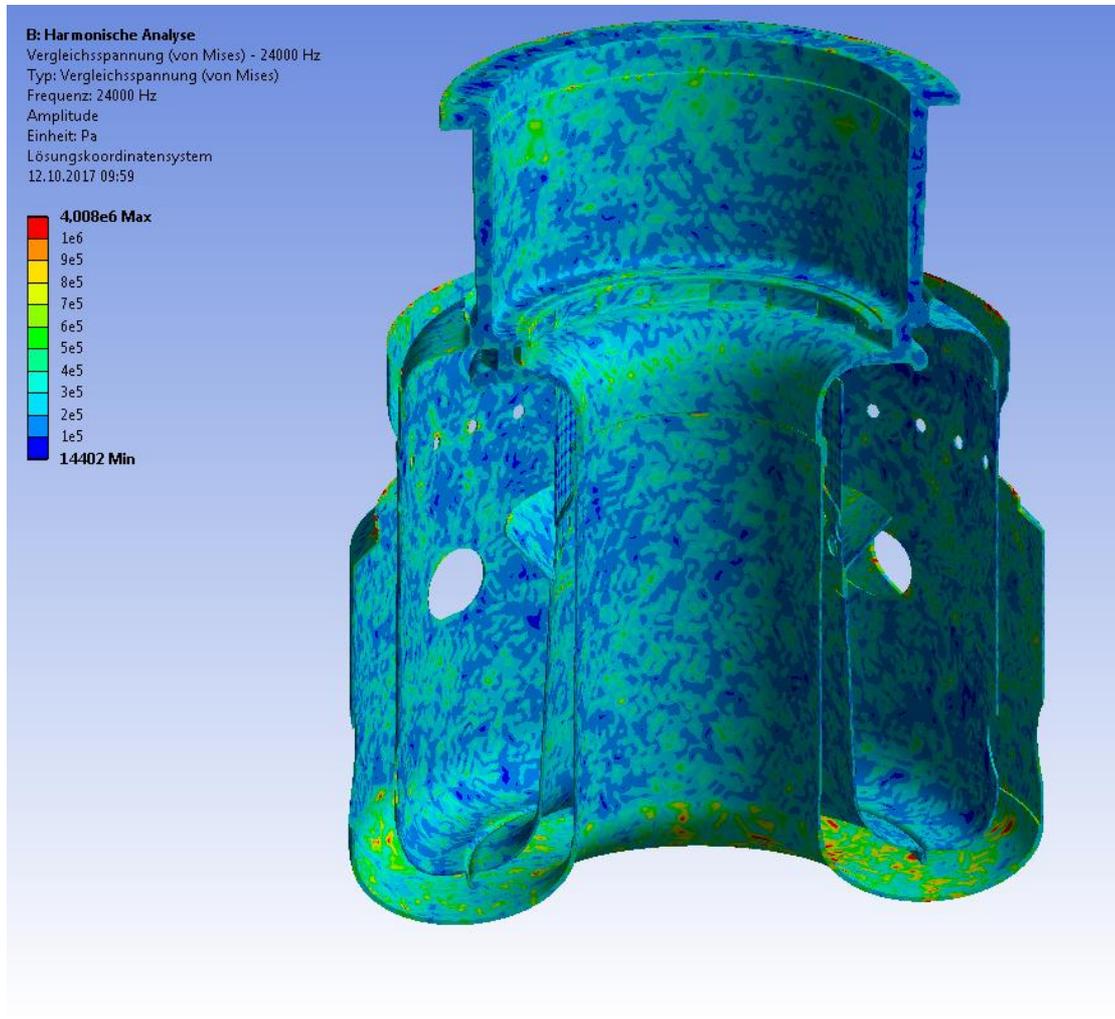
Mises-Vergleichsspannung



- Frequenz 24 kHz
- Streckgrenze 600 MPa
(Inconel 718 bei 800 °C)

Schwingungsanalyse

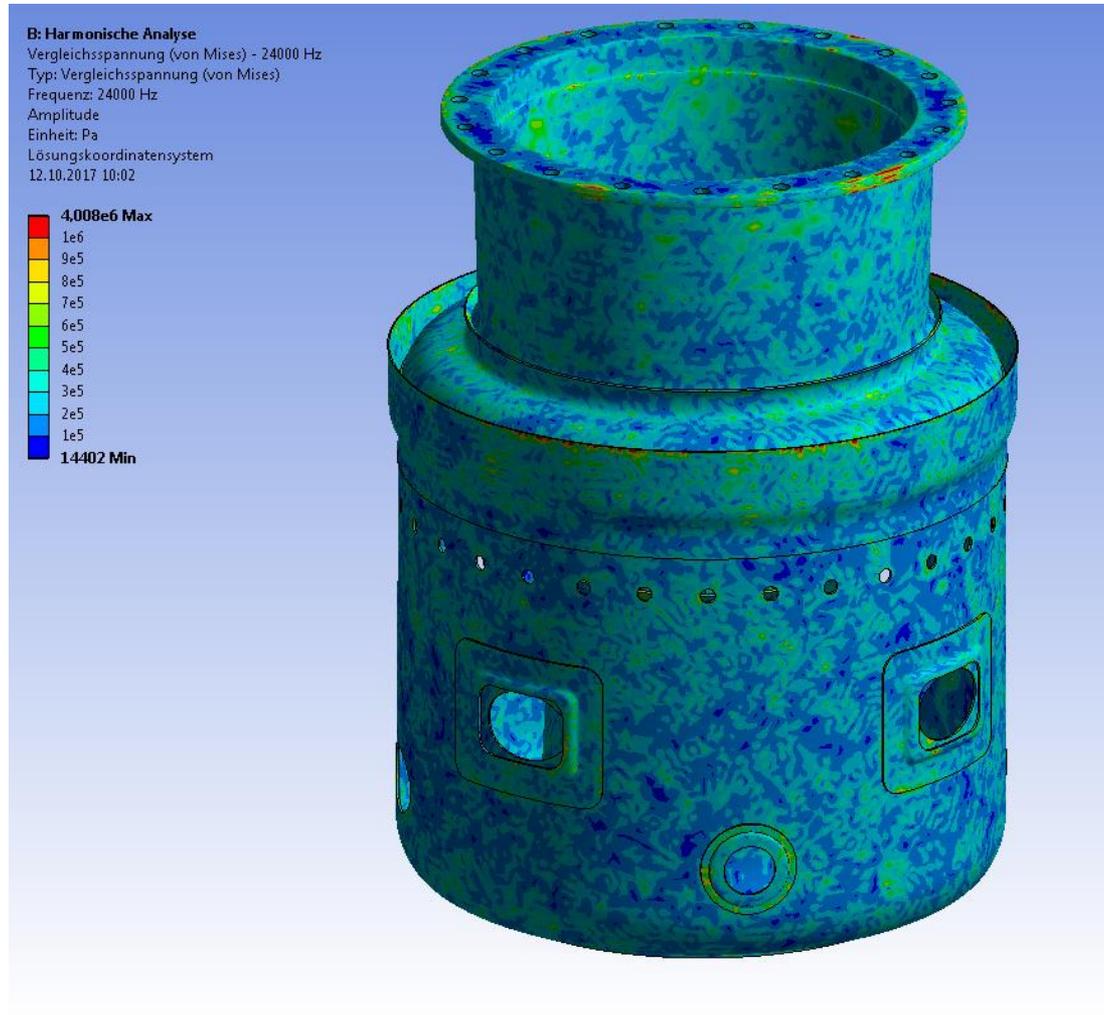
Mises-Vergleichsspannung



- Frequenz 24 kHz
- Streckgrenze 600 MPa
(Inconel 718 bei 800 °C)

Schwingungsanalyse

Mises-Vergleichsspannung



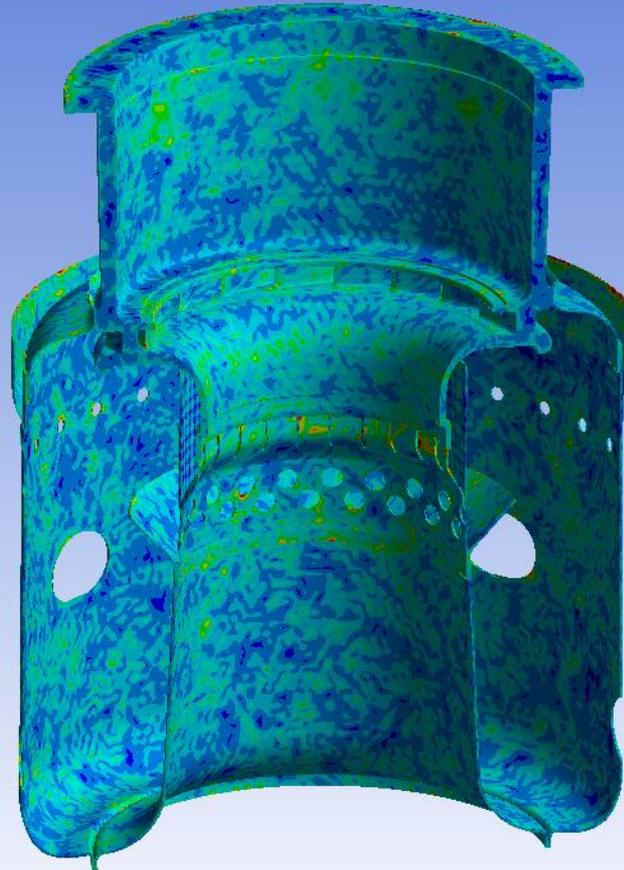
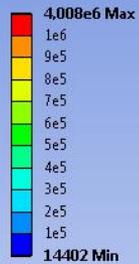
- Frequenz 24 kHz
- Streckgrenze 600 MPa
(Inconel 718 bei 800 °C)

Schwingungsanalyse

Mises-Vergleichsspannung

B: Harmonische Analyse

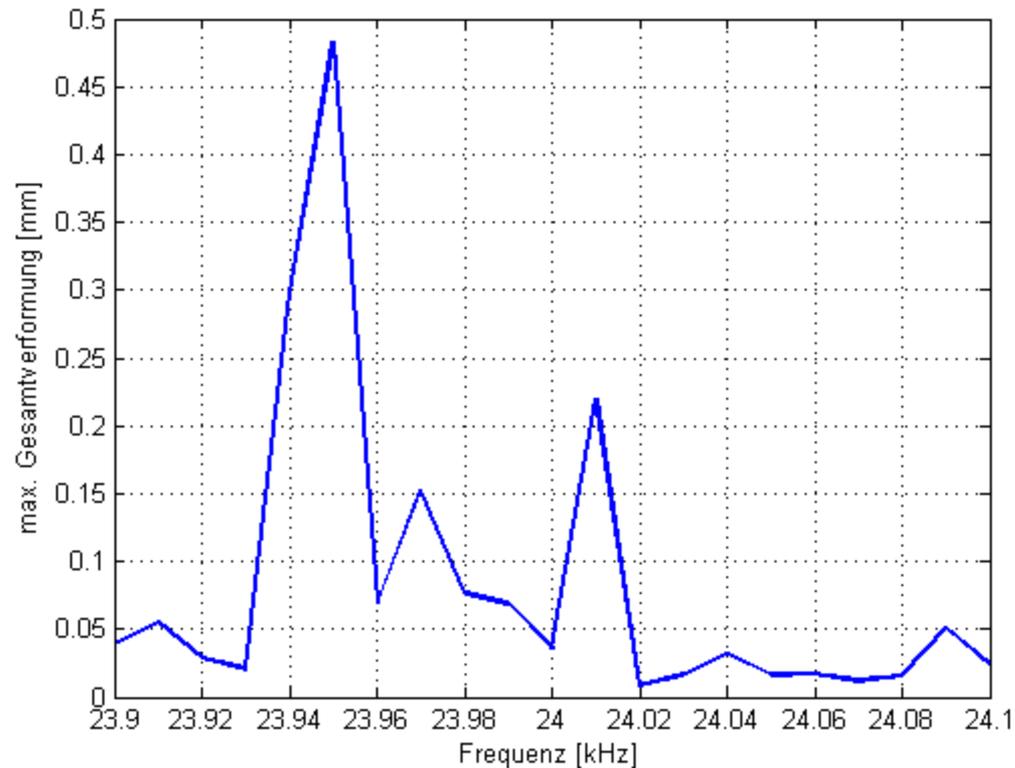
Vergleichsspannung (von Mises) - 24000 Hz
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Frequenz: 24000 Hz
Amplitude
Einheit: Pa
Lösungskoordinatensystem
12.10.2017 10:02



- Frequenz 24 kHz
- Streckgrenze 600 MPa
(Inconel 718 bei 800 °C)

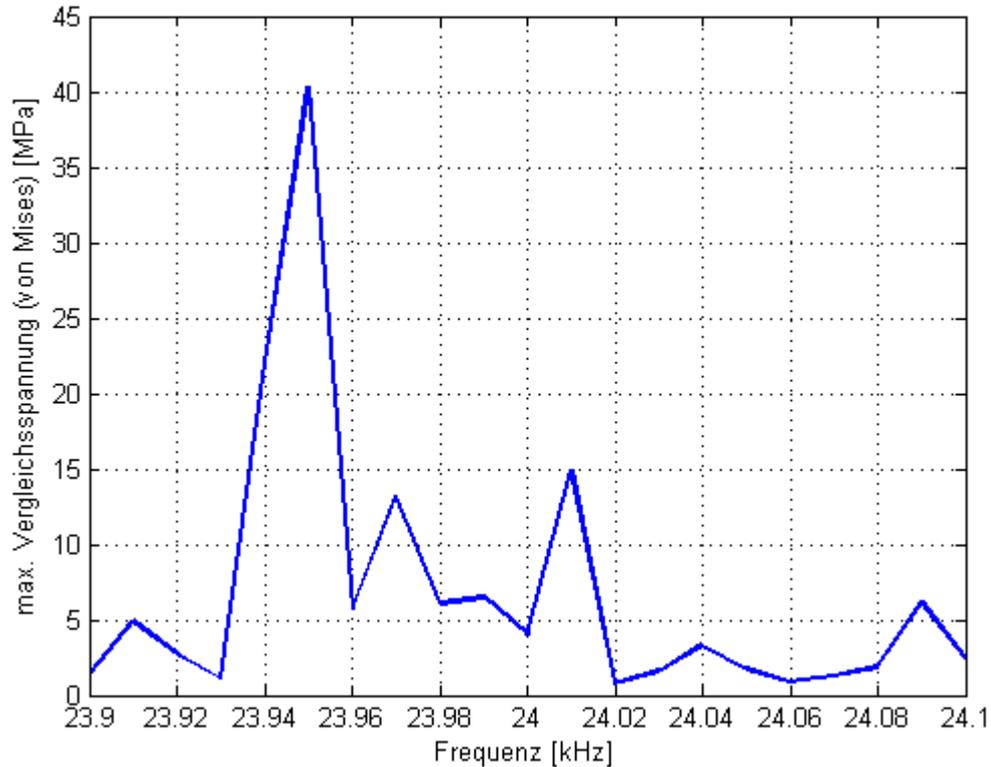
Schwingungsanalyse

Frequenzgang Gesamtverformung



Schwingungsanalyse

Frequenzgang Mises-Vergleichsspannung



■ Streckgrenze 600 MPa
(Inconel 718 bei 800 °C)

Ausblick

Geplante Simulationen

- Schwingungsanalyse: weitere Anregungen
 - z.B. durch Verbrennungsflamme angeregte Schwingungen
- Strömungssimulation \Rightarrow thermische Spannungsanalyse \Rightarrow Schwingungsanalyse (Fluid-Struktur-Interaktion)
- Simulation mit keramischen Komponenten
- Erhöhung der Verbrennungstemperatur durch geringere Luftzufuhr

Dank für die Förderung



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr. Wolfram Heineken
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF
Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Tel.: 0391 4090344
Email: wolfram.heineken@iff.fraunhofer.de