

Belegarbeit – Strömungssimulation WS 2025/26

Name: Anh Le Xuan

Matrikelnummer: 5141386

Studiengang: Maschinenbau Diplom, Vertiefung Energietechnik

Datum: 30.11.2025

Dozent: Dr.-Ing. Matthias Joppa

Bei Interesse zur Erstellung des Codes und der Diagramme, befindet der Quellcode auf meinen Github: [anh-lxn/beleg-sfi](https://github.com/anh-lxn/beleg-sfi)

Allgemein

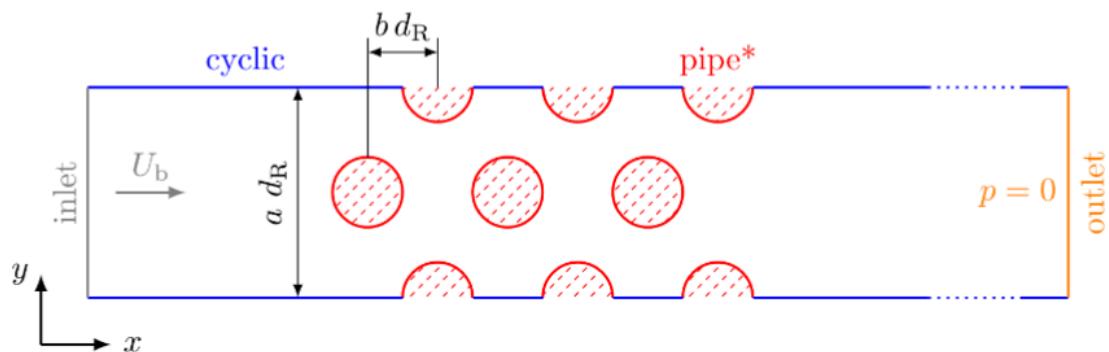


Abb. 1: Schematische Darstellung der Problemstellung mit Rohrabständen $a=3$, $b=1$.

- Parameter des Wärmeübertragers:
 - Rohrdurchmesser: $d_r = 15\text{mm}$
 - kinetische Viskosität Luft: $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
 - Dichte Luft: $\rho = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 - Anströmgeschwindigkeit: $U_b = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 - Rohrabstand x-Richtung: $s_x = b \cdot d_r = 15\text{mm}$
 - Rohrabstand y-Richtung: $s_y = a \cdot d_r = 45\text{mm}$

```
In [ ]: d_r = 15e-3 # Rohrdurchmesser in m
nu_L = 1.5e-5 # kinetische Viskosität Luft in m^2/s
rho_L = 1.2    # Dichte Luft in kg/m^3
U_b = 1.0      # Anströmgeschwindigkeit in m/s
```

```
s_x = 15e-3 # Rohrabstand x-Richtung in m
s_y = 45e-3 # Rohrabstand y-Richtung in m
```

Aufgabe 1: Vorüberlegungen

a) Schätzen Sie die Strömungsgeschwindigkeit U_e im engsten Querschnitt des Wärmeübertragers ab.

- Größter Querschnitt $A_{ein} = a \cdot d_r \cdot z$
- Engster Querschnitt $A_{eng} = (a \cdot d_r - 2d_r) \cdot z = (a - 2) \cdot d_r \cdot z$
- Kontigleichung:

$$A_{ein} \cdot U_b = A_{eng} \cdot U_e$$

$$\Rightarrow U_e = \frac{A_{ein}}{A_{eng}} \cdot U_b$$

```
In [2]: A_in = s_y # m²
A_eng = s_y - 2 * d_r # m²

U_e = U_b * A_in / A_eng
print(f"Strömungsgeschwindigkeit Ue im engsten Querschnitt: {U_e:.2f} m/s")
```

Strömungsgeschwindigkeit Ue im engsten Querschnitt: 3.00 m/s

b) Bestimmen Sie den Strömungscharakter (laminar/turbulent) mithilfe der Reynoldszahl

$Re = \frac{U_b \cdot d_r}{\nu}$. Bis zu einer Reynoldszahl von 100 ist die Strömung laminar. Ab einer Reynoldszahl von 10000 ist die Strömung voll turbulent.

```
In [3]: Re = U_e * d_r / nu_L
print("Reynoldszahl:", Re)

if Re < 100:
    print("Die Strömung ist laminar.")
elif Re > 10000:
    print("Die Strömung ist turbulent.")
else:
    print("Die Strömung ist im Übergangsbereich zwischen laminar und turbule")
```

Reynoldszahl: 3000.0

Die Strömung ist im Übergangsbereich zwischen laminar und turbulent.

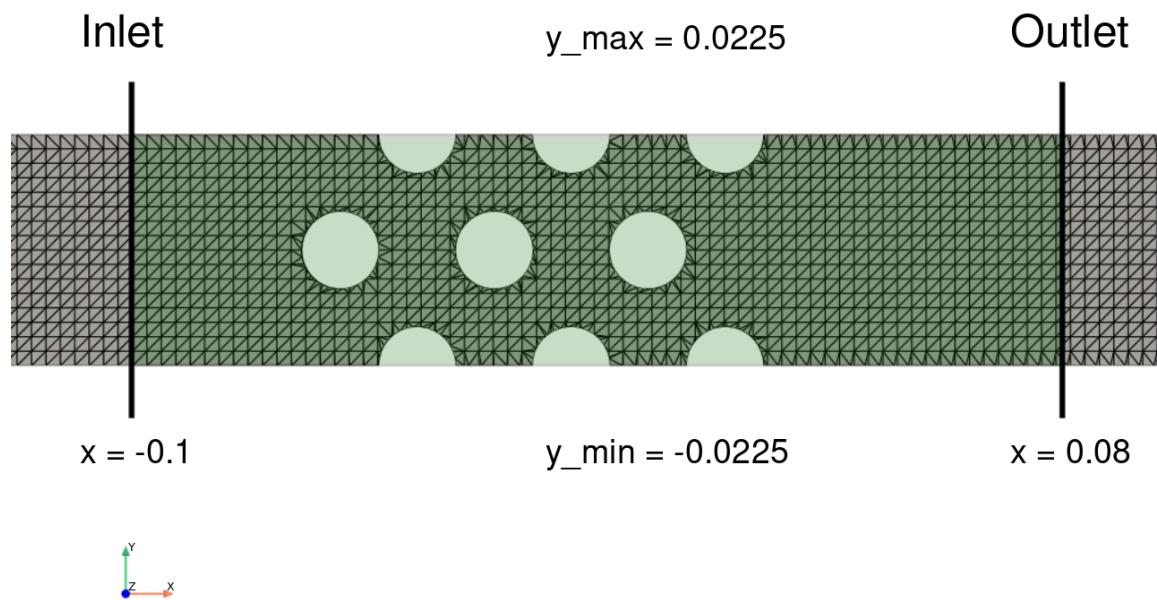
c) Wird für die Simulation ein Turbulenzmodell benötigt? Falls ja, benutzen Sie z.B. das kEpsilon-Modell.

- Ja, da die Strömung nicht laminar ist und zum Teil turbulent.

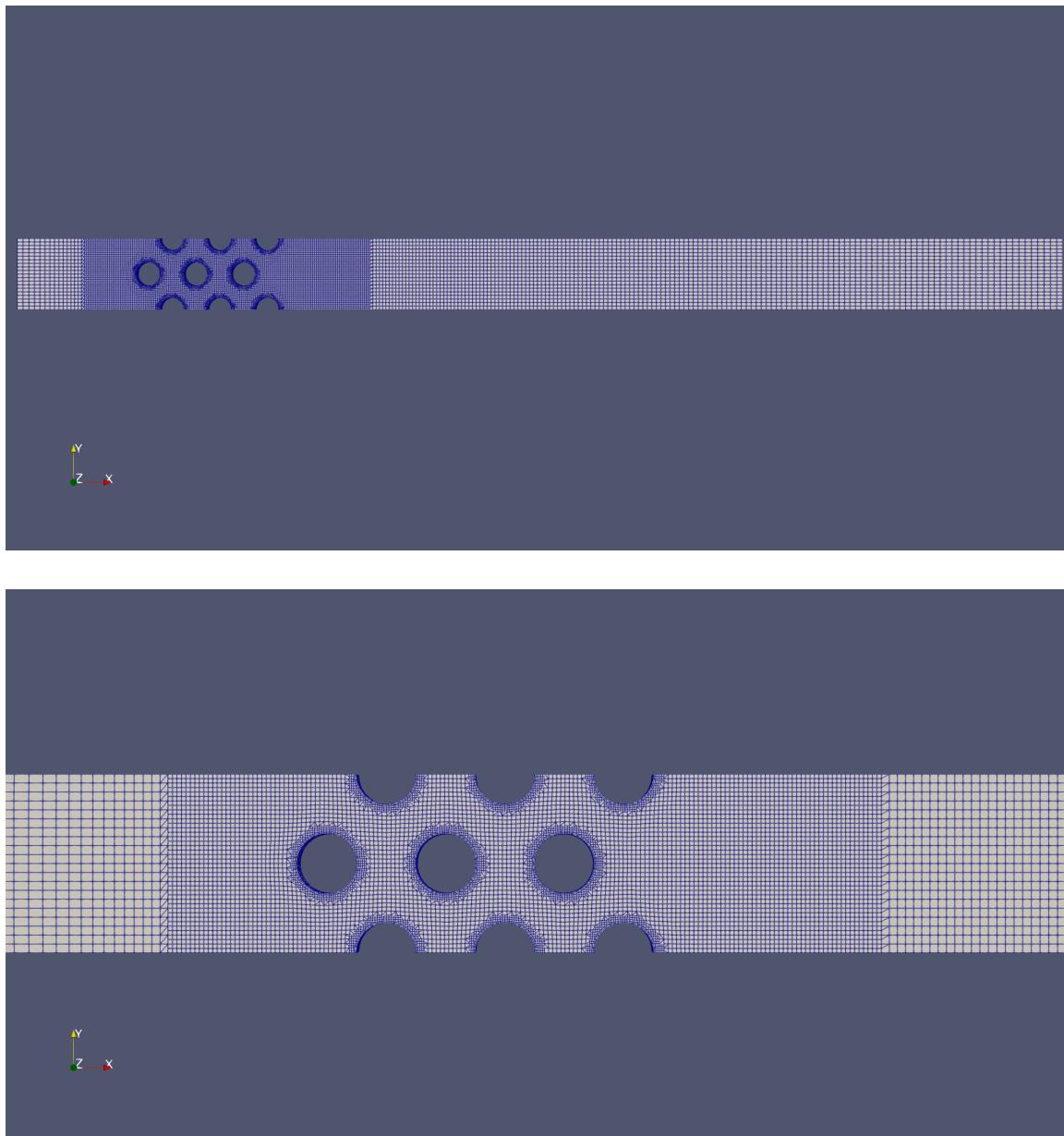
Aufgabe 2: Vernetzung im Unterordner "meshing"

a) Analysieren Sie die gegebene .stl-Geometrie in „constant/triSurface/“. Ermitteln Sie die Abmessungen des Gebiets (x_{min} , y_{min} , z_{min}) (x_{max} , y_{max} , z_{max}). Erstellen Sie eine Skizze des Gebiets und geben Sie darin die Namen der Teilflächen aus der .stl-Datei an.

- surfaceCheck *.stl
- $(x_{min}, y_{min}, z_{min}) = (-0.1425, -0.0225, -0.002)$
- $(x_{max}, y_{max}, z_{max}) = (0.5175, 0.0225, 0.002)$

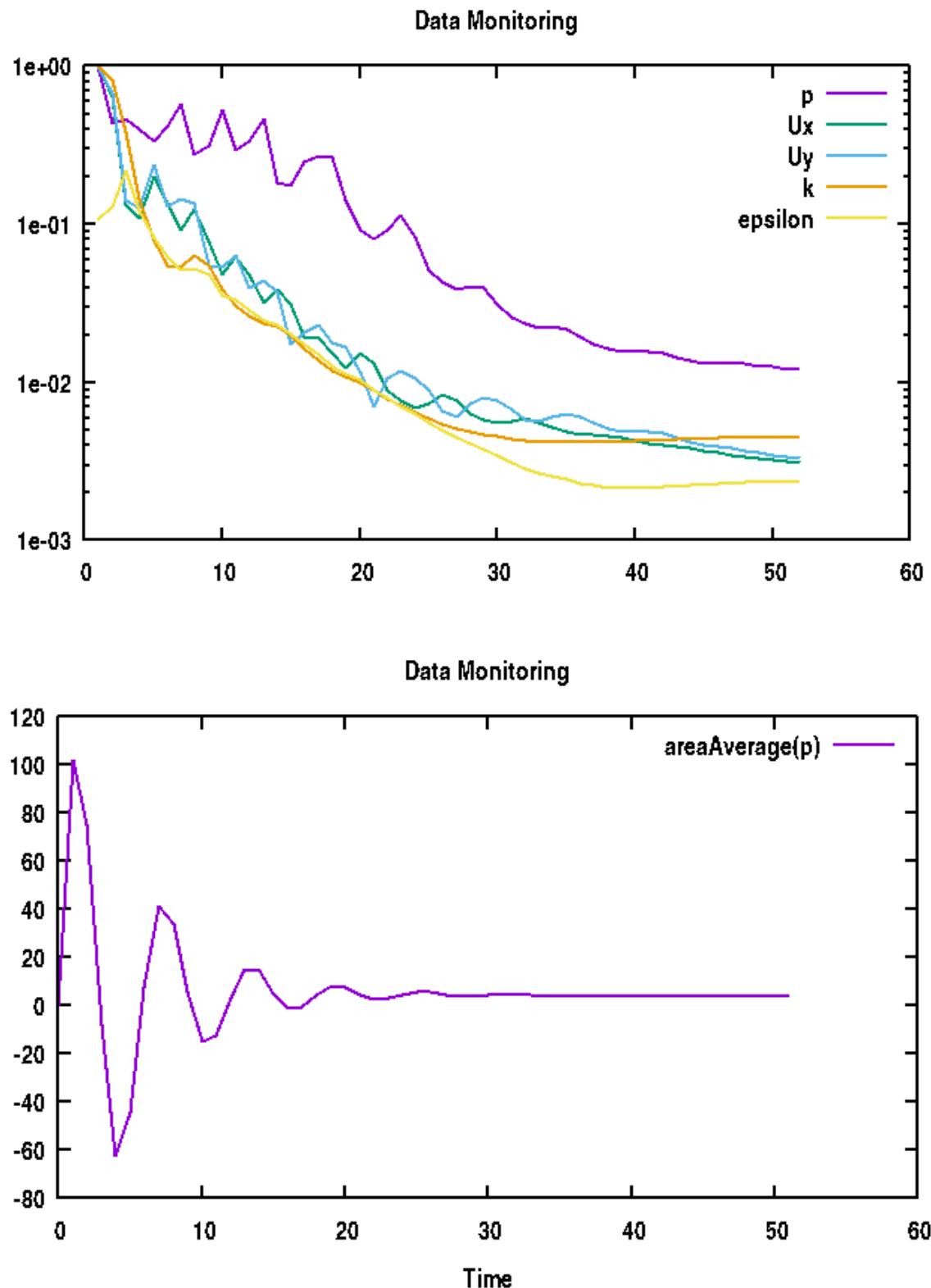


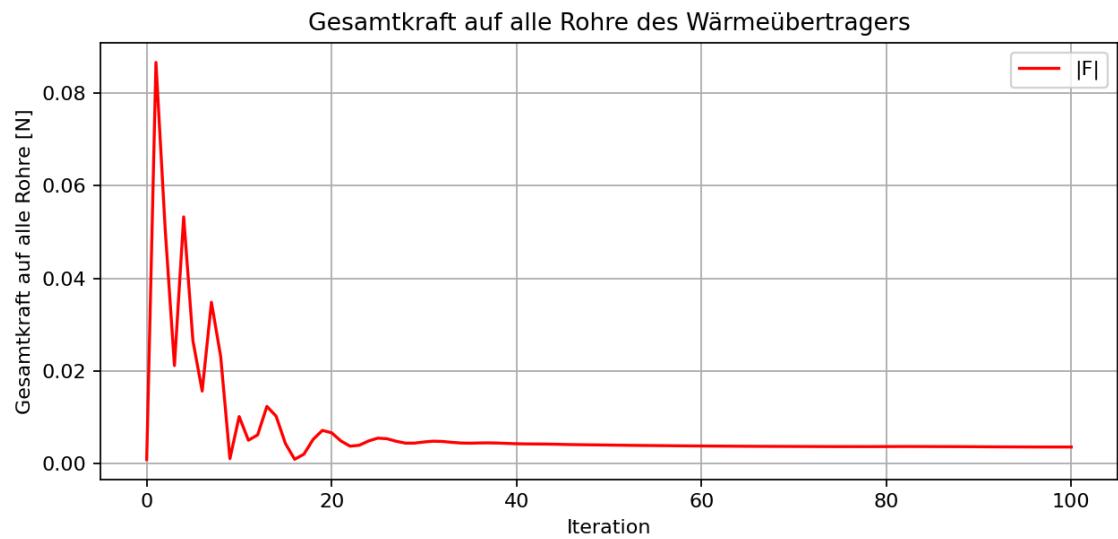
b & c & d & e) Ergebnis des Meshings in Paraview.



Aufgabe 3 Isotherme Berechnung im Hauptordner

d) Stellen Sie die Konvergenz der Lösung sicher. Stellen Sie dafür den Verlauf über den Iterationen von Residuen, mittlerem Druck am Einlass und der Gesamtkraft auf die Rohrwände grafisch dar.

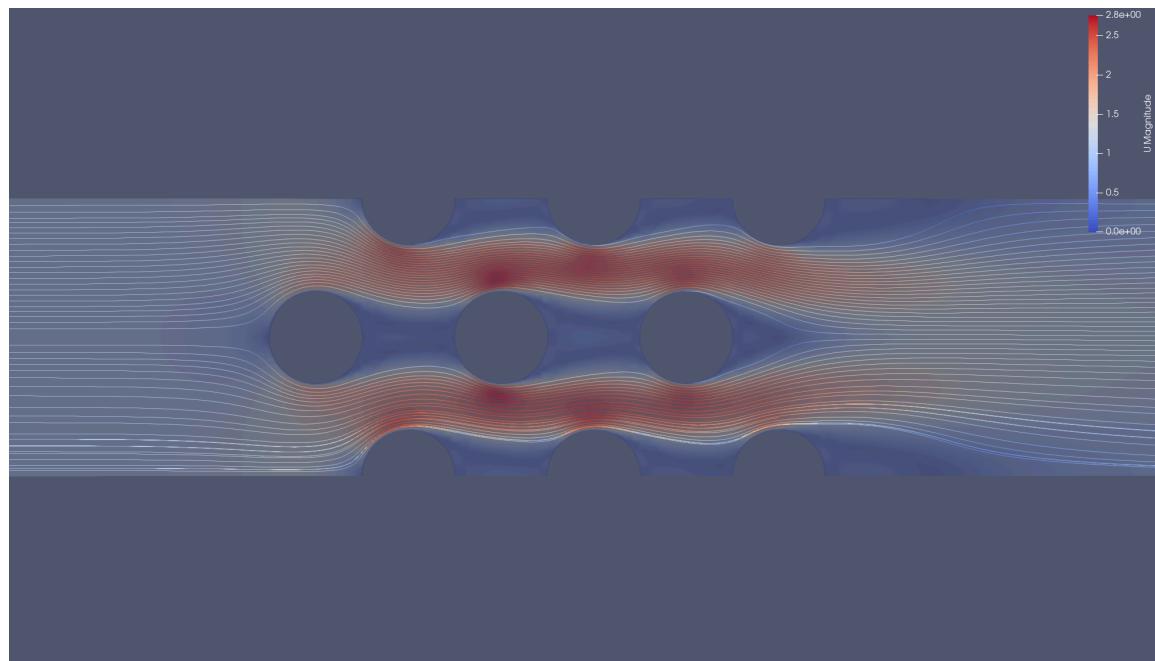




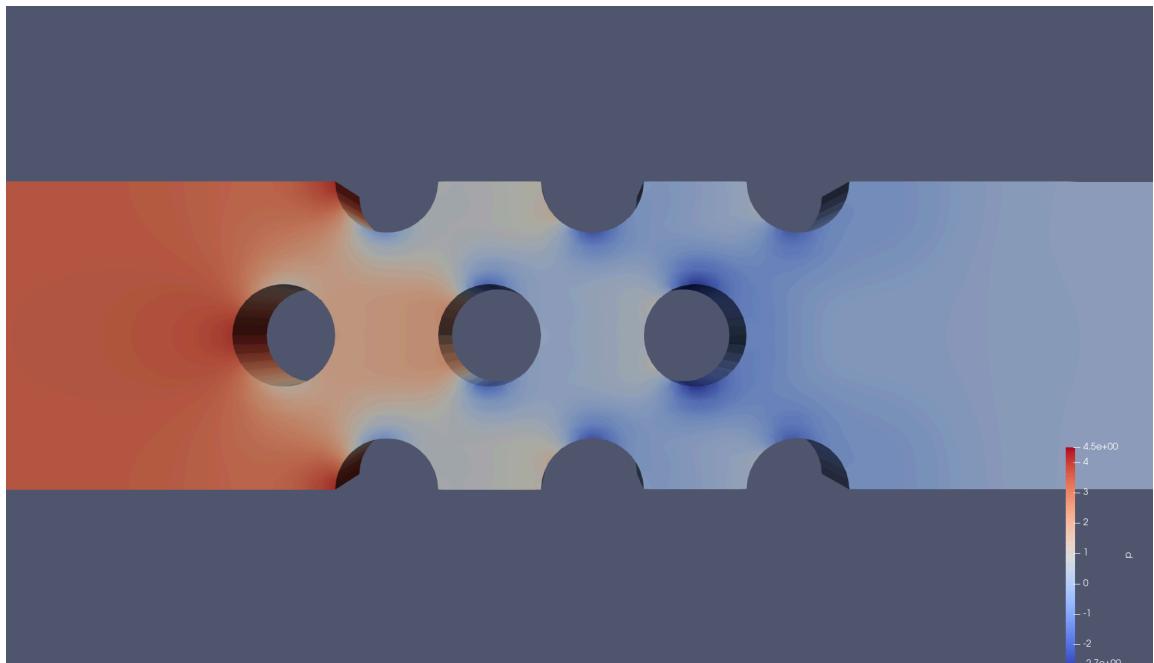
Aufgabe 4

- a) Stellen Sie die Verteilung des Geschwindigkeitsbetrags, des Drucks, der turbulenten kinetischen Energie sowie der Wirbelviskosität in der x-y Ebene grafisch dar. Fügen Sie in der Abbildung des Geschwindigkeitsbetriebs Stromlinien hinzu. Beschränken Sie die Darstellungen auf den Bereich um die Rohrbündel.

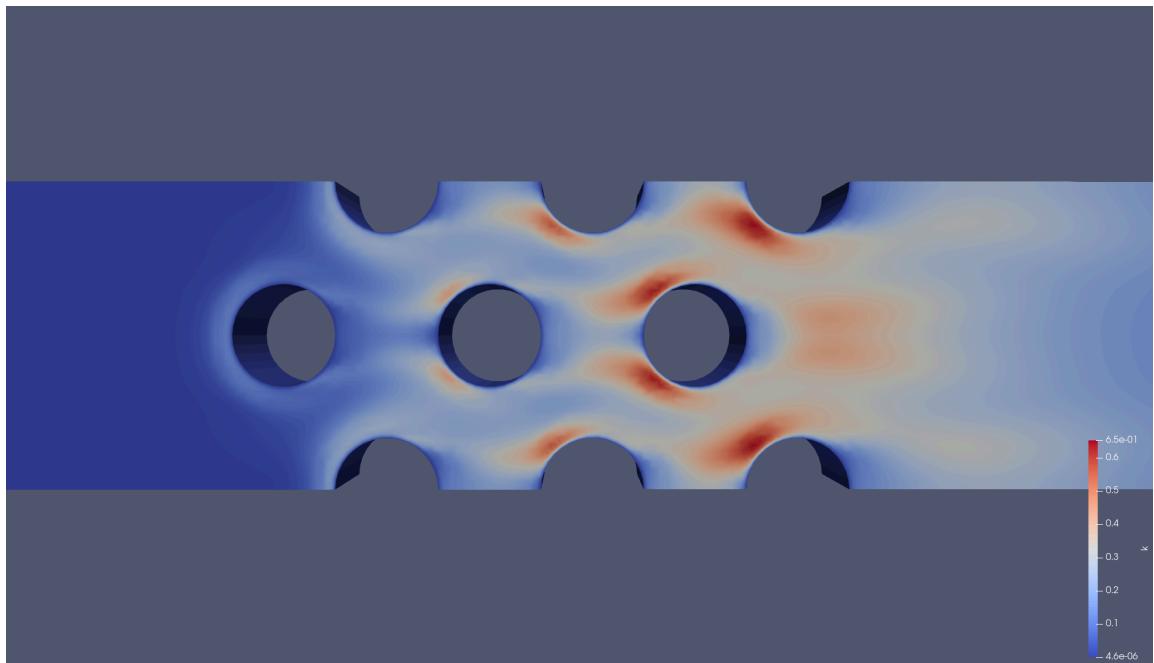
Geschwindigkeitsverteilung



Druckverteilung

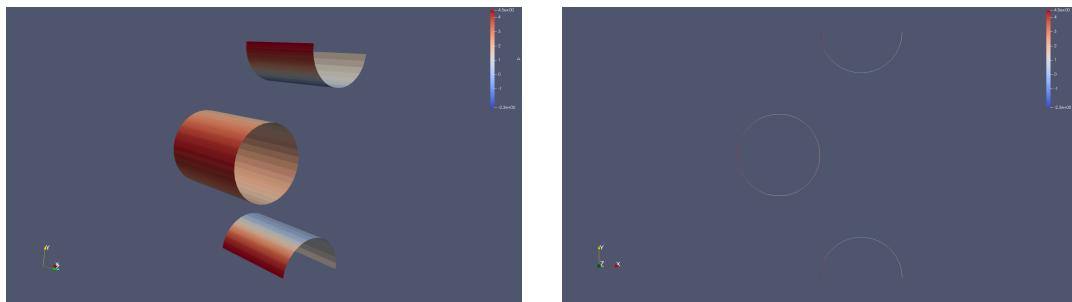


Turbulente kinetische Energie



b) Stellen Sie den Verlauf von Druck und Wandschubspannung auf der Oberfläche der ersten beiden Rohre (pipe-0, pipe-1) als Kurve entlang der Oberfläche dar. Worin unterscheiden sich die Verläufe jeweils und warum? Hinweis: Nutzen Sie dafür z.B. die ParaView-Filter „Extract Block“, „Slice“ und „PlotData“

Druck an Rohroberfläche von pipe-0 und pipe-1



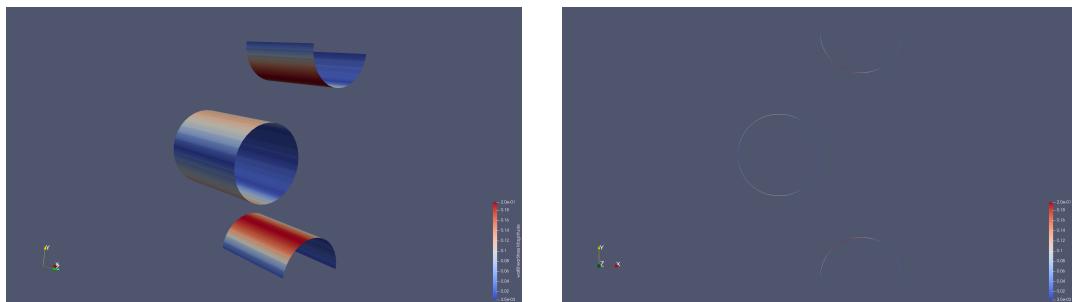
- **pipe-0:**

- hohe Drücke (Staudruck) von Seite des Einlasses aufgrund von Einlassgeschwindigkeit rapide auf 0 gedrosselt
- niedrige Drücke auf der Rückseite

- **pipe-1:**

- deutlich geringere Drücke
- im Nachlauf des ersten Rohres

Wandschubspannung an Rohroberfläche von pipe-0 und pipe-1



- **pipe-0:**

- $\tau_w \approx 0$ am Staupunkt
- zunehmende Wandschubspannung entlang der Rohroberfläche aufgrund von steigender Geschwindigkeit $\tau_w = \eta \frac{\partial u_t}{\partial n} \Big|_{\text{Wand}}$

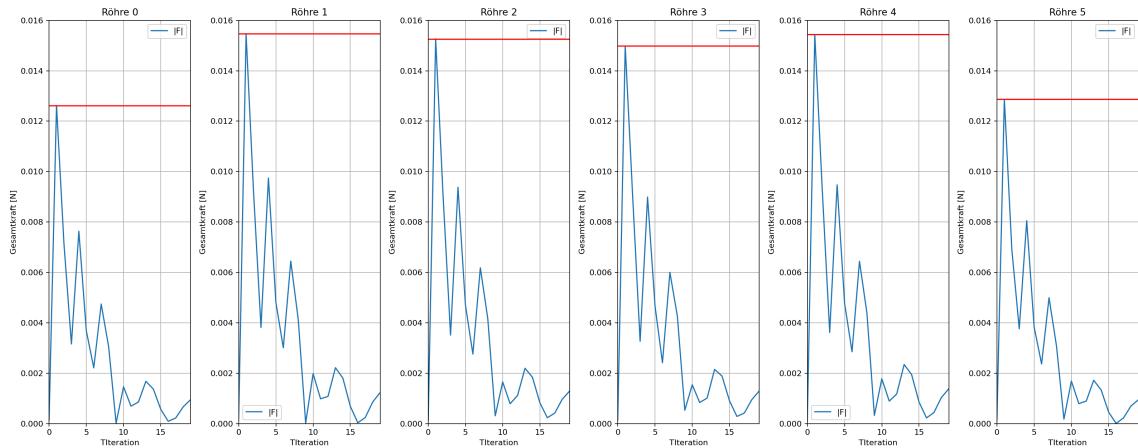
- **pipe-1:**

- größeres τ_w im Nachlauf des ersten Rohres, aufgrund der turbulenten Nachlaufströmung → Wirbel entstehen → erhöhte Geschwindigkeitsgradienten
- Engerer Querschnitt. Dadurch wird nach Kontinuitätsgleichung die Geschwindigkeit erhöht → höhere Geschwindigkeitsgradienten nahe der Wand → höherer Wandschubspannung

c) Auf welches Rohr wirkt die größte Kraft? Passen Sie das functionObject „forcesPipe“ an, um die Kraft auf die einzelnen Rohre zu berechnen.

- Maximale Kräfte auf die Rohre:

- Röhre 0: 0.012618 N
- Röhre 1: 0.015469 N
- Röhre 2: 0.015264 N
- Röhre 3: 0.014984 N
- Röhre 4: 0.015442 N
- Röhre 5: 0.012871 N
- Maximale Kraft wird auf Röhre 1 mit **0.015469 N** ausgeübt.



Aufgabe 5

Anströmgeschwindigkeit [m/s]	Druckverlust zwischen Ein- / Auslass [Pa]	Maximale Geschwindigkeit der Strömung [m/s]	Mittlere Geschwindigkeit der Strömung [m/s]	Gesamtkraft auf Röhre x-Richtung [N]	Gesamtkraft auf Röhre z-Richtung [N]	Maximaler Druck an Rohrwänden [Pa]	Minimaler Druck an Rohrwänden [Pa]	Maximales y ⁺	Minimales y ⁺	Anzahl Wandschichten
1	3,336692	3,048	1,0368	0,004613	0	pipe-1 4,0498	pipe-4 -2,8146	4,2765	2,2715	2
2	11,88356	5,9826	2,0736	0,016896	0	pipe-1 15,0593	pipe-4 -11,8914	5,0778	2,7392	4
3	26,08729	8,9473	3,1104	0,036717	0	pipe-1 33,1252	pipe-4 -26,6789	5,08	2,7405	6

Aufgabe 6

c) Wie groß ist der Einfluss temperaturabhängiger Stoffdaten?. Betrachten Sie dafür die relativen Unterschiede bei Stoffeigenschaften, Druckverlust und der Kraft auf die Röhre zwischen isothermem Fall und dem Fall mit beheizten Rohren.

- isothermer Fall vs. beheizte Röhre:
 - Dichte Luft:
 - isotherm (const.): 1.2 kg/m³
 - beheizt (mittlerer Wert): 1.127 kg/m³
 - Differenz: 6.1 %
 - Druckverlust:
 - isotherm: 3,336 Pa
 - beheizt: 6.8 Pa
 - Differenz: 103,8 % **doppelter Druckverlust!**
 - Maximale Kraft auf Rohr 1:

- isotherm: 0.004613 N
- beheizt: 0.005625 N
- Differenz: 21.9 %

d) Werten Sie mithilfe von functionObjects die Wärmestromdichte und den integralen Wärmestrom auf den Rohrwänden sowie die mittlere Temperatur am Auslass aus.

Wärmestromdichte und integraler Wärmestrom

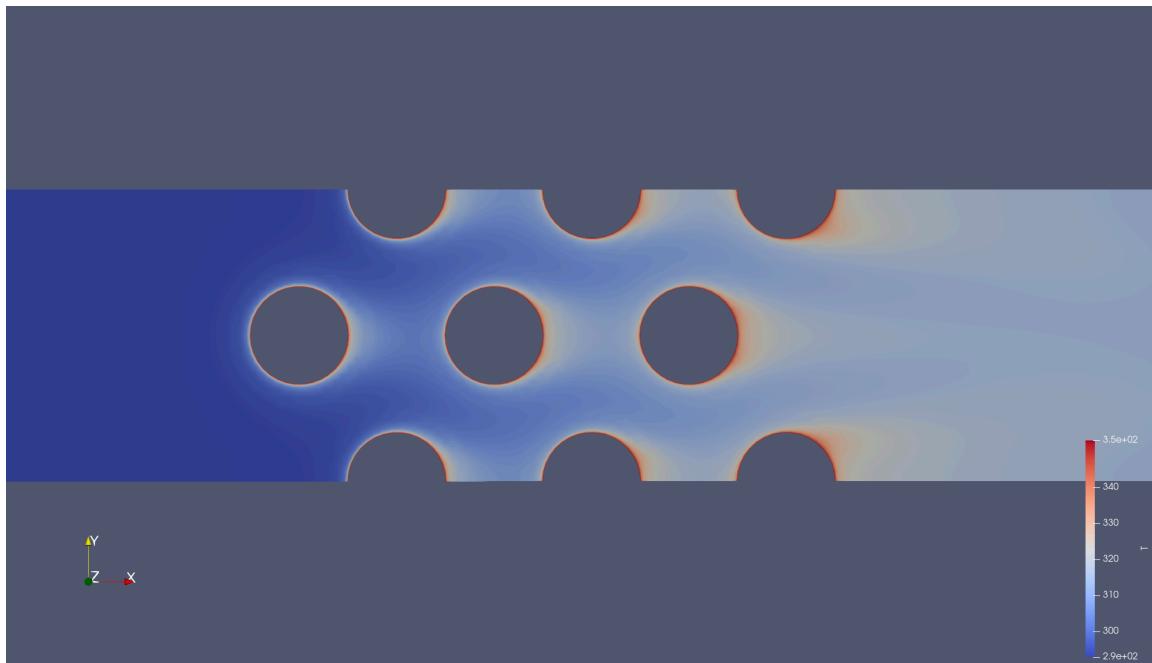
Pipe	Q [W]	q [W/m ²]
pipe-0	4.957834	5269.100
pipe-1	5.067122	5384.727
pipe-2	4.296731	4566.551
pipe-3	3.793952	4032.151
pipe-4	3.370538	3581.797
pipe-5	2.798106	2973.820

Temperaturen

Ort	T [K]	T [°C]
T _{Inlet}	293.15	20.00
T _{Outlet}	306.29	33.14
T _{pipe}	353.15	80.00

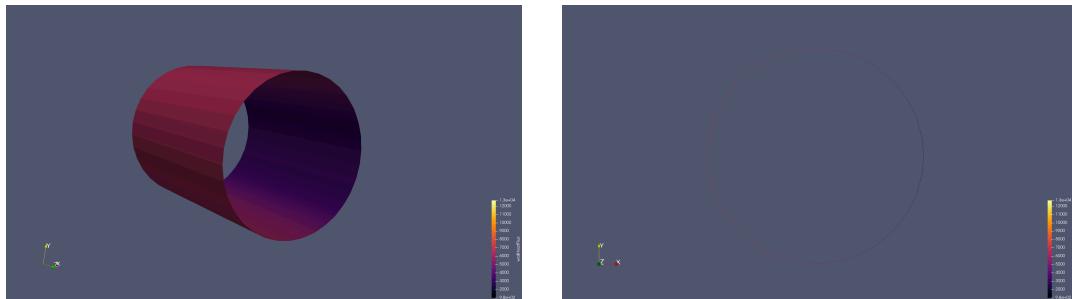
e) Stellen Sie die Temperaturverteilung in der x-y Ebene dar. Stellen Sie die Kurve der Wärmestromdichte entlang einer Rohrwand dar. Wo ist der Wärmeübergang am besten, wo am schlechtesten?

Temperaturverteilung in der x-y Ebene nach 200 Sekunden



Wärmestromdichte entlang der Rohrwand von pipe-0

Wärmeübergang ist am besten an der Vorderseite des Rohres (Staupunkt) und am schlechtesten im Nachlauf des Rohres.



f) Geben Sie folgende Werte an:

- Größen aus 5 b)
- Temperaturanstieg zwischen Ein- und Auslass
- Gesamter Wärmestrom über alle Rohrwände im Rechengebiet
- Maximale, mittlere und minimale Wärmestromdichte an den Rohrwänden

Werte bei $t = 200\text{s}$

Anströmgeschwindigkeit [m/s]	Druckverlust zwischen Ein- / Auslass [Pa]	Maximale Geschwindigkeit der Strömung [m/s]	Mittlere Geschwindigkeit der Strömung [m/s]	Gesamtkraft auf Rohre x -Richtung [N]	Gesamtkraft auf Rohre z -Richtung [N]	Maximaler Druck an Rohrwänden [MPa]	Minimaler Druck an Rohrwänden [MPa]
1	6,8	2,8984	1,0906	0,005624	0	pipe-1 100008,9	pipe-4 99996,98
Maximales y^+	Minimales y^+	Anzahl Wandschichten	Temperaturanstieg zwischen Ein- und Auslass [°C]	Gesamter Wärmestrom über alle Rohrwände [W]	mittlere Wärmestromdichte an Rohrwänden [W/m^2]	maximale Wärmestromdichte an Rohrwänden [W/m^2]	minimale Druck an Rohrwänden [W/m^2]
3,6937	2,0519	2	13,2851	24,2843	4301,3577	pipe-1 8059,037	pipe-5 1282,394