

# CFD-Basics

## Abschlussprojekt

**Philipp Gasser, BSc (Pers-Kz: 2310804002)**

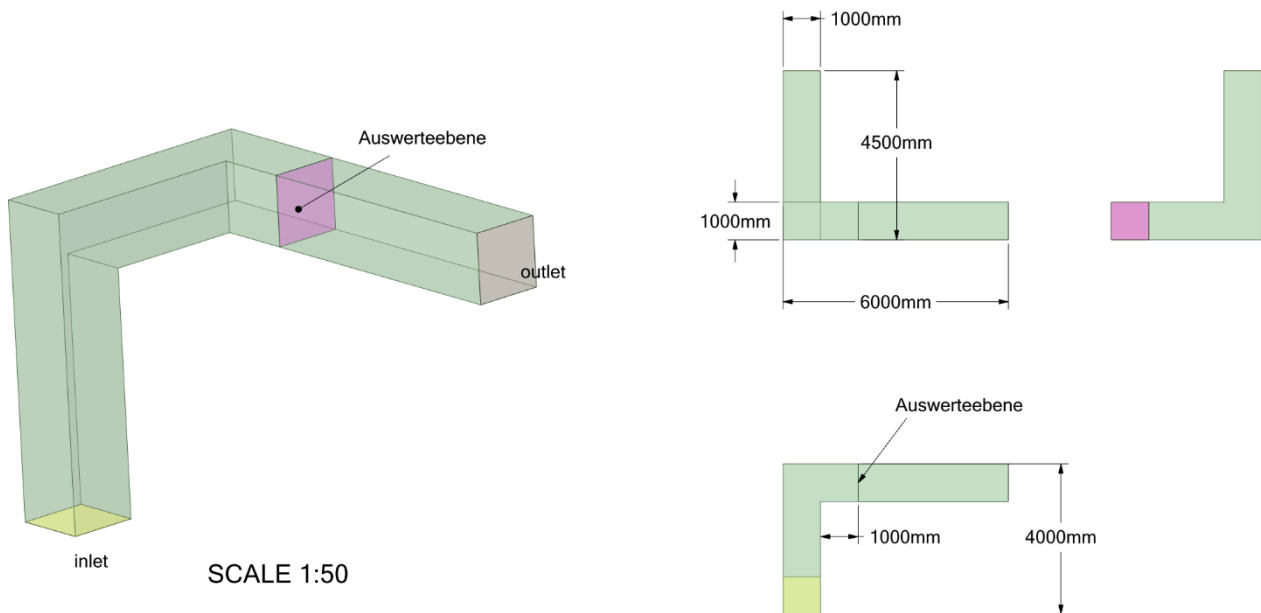
# Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung	3
Angabe	3
Randbedingungen	3
Hinweise	3
2. Simulation des IST-Modells	4
Projektschema erstellen	4
Geometrie zeichnen	4
Mesh erzeugen	5
CFD-Simulation mit Fluent	6
Variationskoeffizient der Geschwindigkeit an Auswerteebene	11
Ergebnisse	14
3. Optimierung des IST-Modells	17
3.1. Verrundungen	17
Geometrie anpassen	17
Mesh erzeugen	17
Ergebnisse	18
3.2. Verrundungen + Leitbleche	19
Geometrie anpassen	19
Mesh erzeugen	19
Ergebnisse	20
4. Fazit	21

# 1. Problemstellung

## Angabe

Im Rahmen der Lehrveranstaltung „CFD-Basics“ sollte ein rechteckiges Rohr mit zwei Krümmungen berechnet werden. Das zu simulierende Modell sieht wie folgt aus:



## Randbedingungen

- Volumenstrom: 5000 Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatur: 710°C
- Normdichte: 1.1 kg/Nm<sup>3</sup>
- Kanalquerschnitt: 1 m<sup>2</sup>
- Normbedingungen: 0°C und 1.01325 bar

## Hinweise

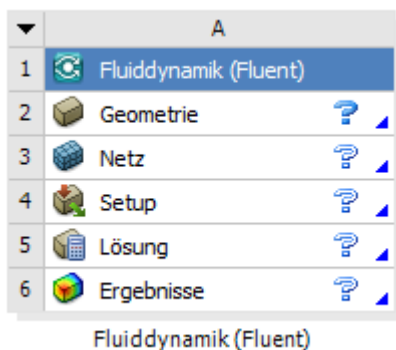
- Variationskoeffizient = (Standardabweichung / Mittelwert) \* 100
- Das Fluid kann als ideales Gas betrachtet werden.

## 2. Simulation des IST-Modells

SpaceClaim ist in diesem Anwendungsfall besser als SolidWorks, da eine Reaktion auf allfällige Änderungen wesentlich flexibler ist. Insbesondere für eine spätere Optimierung des IST-Modells ist eine einfache Bearbeitbarkeit essenziell. In der Praxis kann es ebenso passieren, dass sich Kundenanforderungen unerwartet ändern können. Eine Ausnahme ist, wenn das Modell äußerst komplex ist und die Modellierung in SpaceClaim wesentlich mehr Zeit in Anspruch nimmt, als diese in SolidWorks durchzuführen.

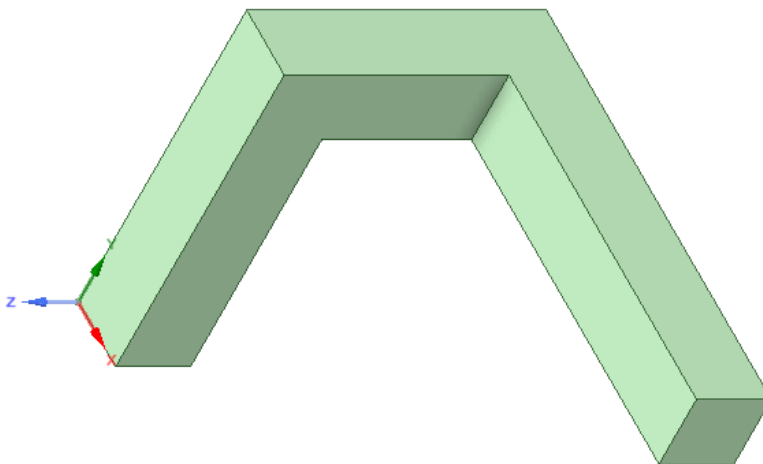
### Projektschema erstellen

1. Fluidodynamik (Fluent) aus Reiter „Analysesysteme“ per Drag-and-Drop in das Projektschema ziehen.



### Geometrie zeichnen

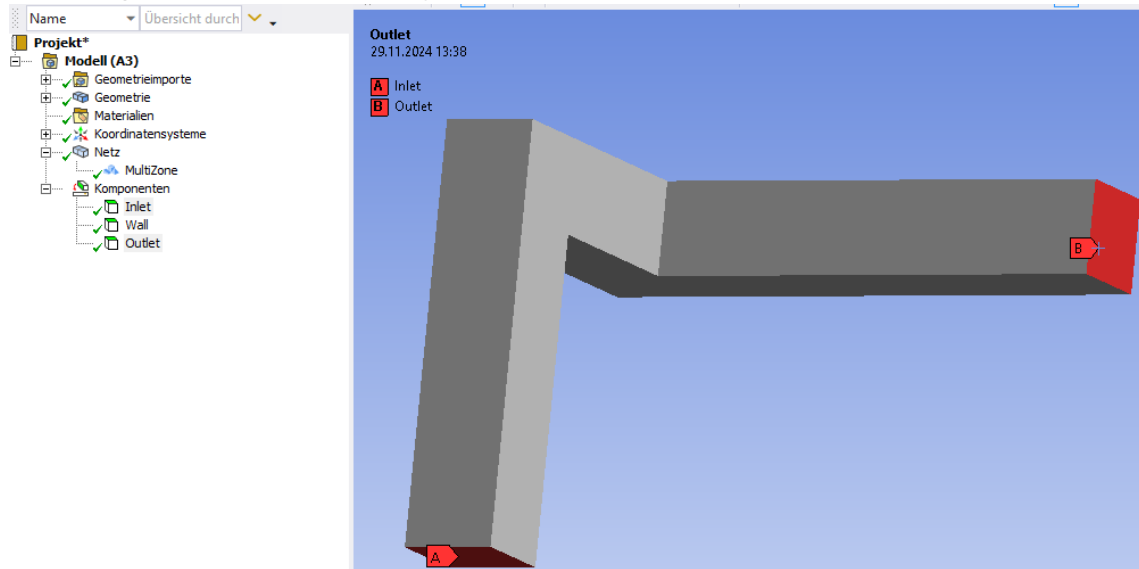
1. In der Workbench → Rechtsklick auf Geometrie → Linksklick auf „Neue SpaceClaim-Geometrie...“
2. In den Skizziermodus wechseln
3. Rechtecke erstellen und mit „Ziehen“ den Volumenkörper erstellen



4. Datei → SpaceClaim beenden

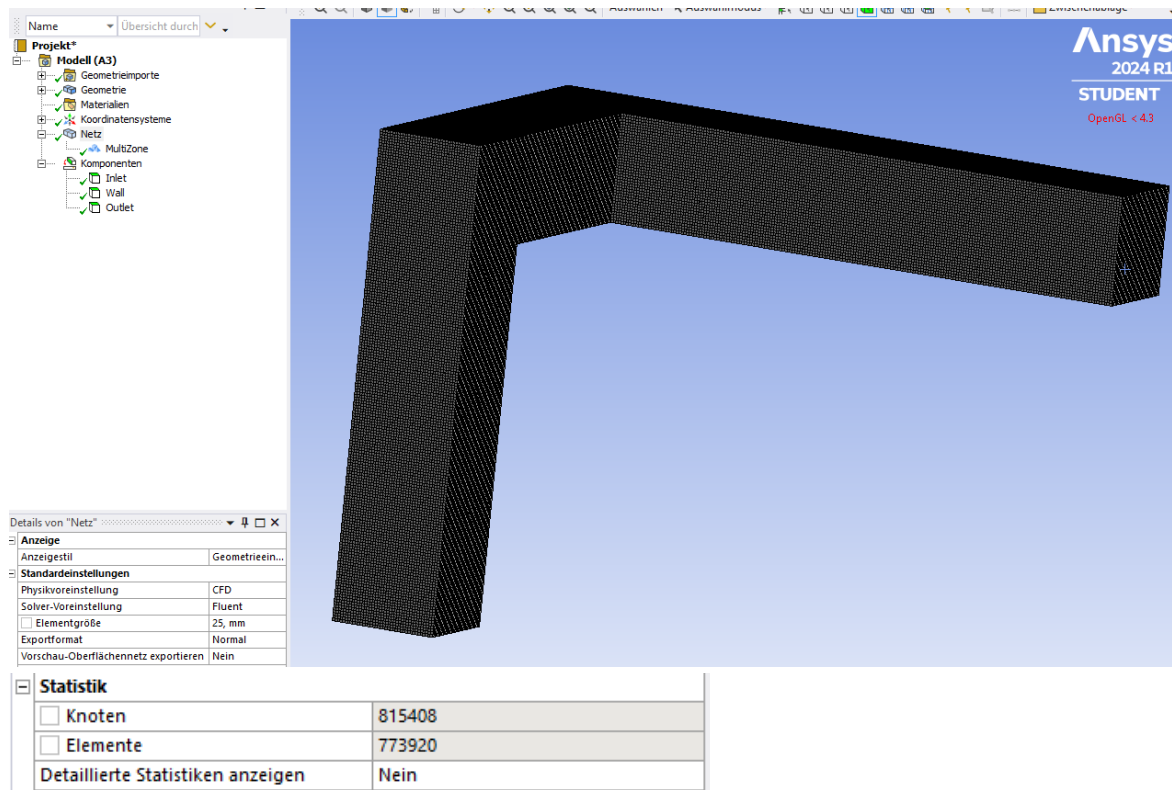
## Mesh erzeugen

1. In der Workbench → Doppelter Linksklick auf Netz
2. Rechtsklick auf Modell (A3) → Komponente → Inlet, Wall, Outlet definieren (Komponenten dementsprechend umbenennen)



(Die anderen 8 Flächen sind als Wall definiert.)

3. Rechtsklick auf Netz → Einfügen → Methode → MultiZone
4. Linksklick auf Netz → Elementgröße: 25mm
5. Rechtsklick auf Netz → Linksklick auf Netz erstellen

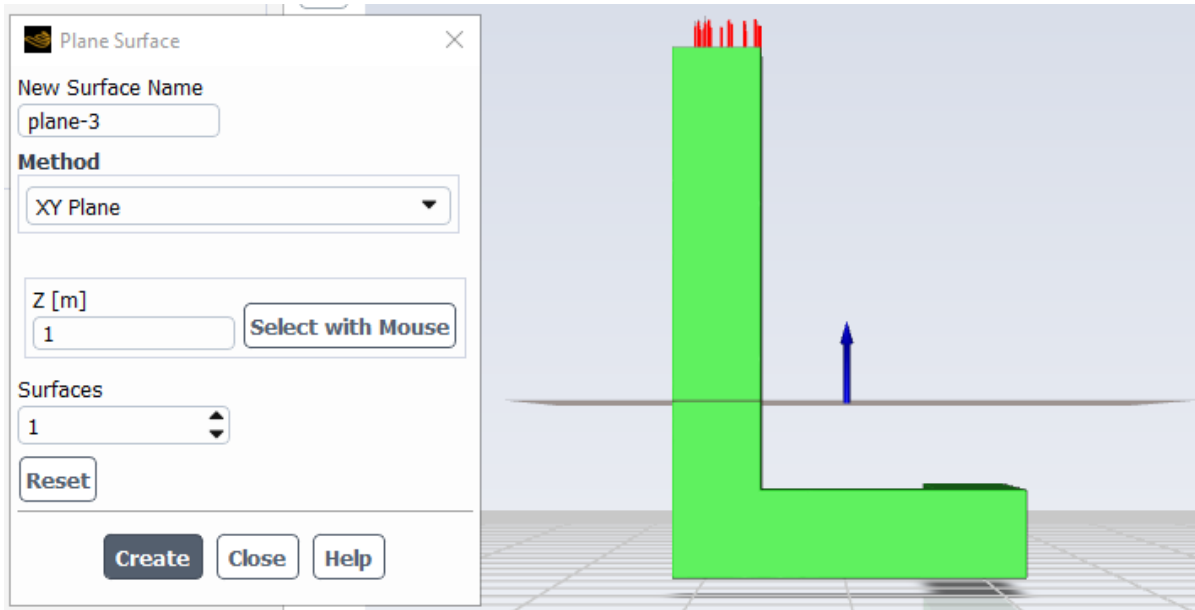


6. Datei → Meshing beenden

## CFD-Simulation mit Fluent

### General

1. Linksklick auf General → Display... → New Surface → Plane...
2. Folgende Einstellungen übernehmen und überprüfen, ob die Auswerteebene auch tatsächlich 1m nach der Kurve ist.



3. Linksklick auf Create

## Models

1. Doppelter Linksklick auf Models
2. Doppelter Linksklick auf Energy → Aktiviere Energy Equation → OK
3. Doppelter Linksklick auf Viscous Model → k-epsilon Realizable with Enhanced Wall Treatment → OK


**Viscous Model** [Close]

<b>Model</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Inviscid</li> <li><input type="radio"/> Laminar</li> <li><input type="radio"/> Spalart-Allmaras (1 eqn)</li> <li><input checked="" type="radio"/> k-epsilon (2 eqn)</li> <li><input type="radio"/> k-omega (2 eqn)</li> <li><input type="radio"/> Transition k-kl-omega (3 eqn)</li> <li><input type="radio"/> Transition SST (4 eqn)</li> <li><input type="radio"/> Reynolds Stress (7 eqn)</li> <li><input type="radio"/> Scale-Adaptive Simulation (SAS)</li> <li><input type="radio"/> Detached Eddy Simulation (DES)</li> <li><input type="radio"/> Large Eddy Simulation (LES)</li> </ul>	<b>Model Constants</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>C2-Epsilon: 1.9</li> <li>TKE Prandtl Number: 1</li> <li>TDR Prandtl Number: 1.2</li> <li>Energy Prandtl Number: 0.85</li> <li>Wall Prandtl Number: 0.85</li> </ul>
<b>k-epsilon Model</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Standard</li> <li><input type="radio"/> RNG</li> <li><input checked="" type="radio"/> Realizable</li> </ul>	
<b>Near-Wall Treatment</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Standard Wall Functions</li> <li><input type="radio"/> Scalable Wall Functions</li> <li><input type="radio"/> Non-Equilibrium Wall Functions</li> <li><input checked="" type="radio"/> Enhanced Wall Treatment</li> <li><input type="radio"/> Menter-Lechner</li> <li><input type="radio"/> User-Defined Wall Functions</li> </ul>	<b>User-Defined Functions</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Turbulent Viscosity: none</li> </ul>
<b>Enhanced Wall Treatment Options</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Pressure Gradient Effects</li> <li><input type="checkbox"/> Thermal Effects</li> </ul>	<b>Prandtl Numbers</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>TKE Prandtl Number: none</li> <li>TDR Prandtl Number: none</li> <li>Energy Prandtl Number: none</li> <li>Wall Prandtl Number: none</li> </ul>
<b>Options</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Viscous Heating</li> <li><input type="checkbox"/> Curvature Correction</li> <li><input type="checkbox"/> Production Limiter</li> </ul>	

OK Cancel Help

## Materials

1. Doppelter Linksklick auf Materials
2. Linksklick auf air → Einstellungen übernehmen → Change/Create

 Create/Edit Materials

Name	Material Type
incompressible-ideal-gas	fluid
Chemical Formula	Fluent Fluid Materials
	incompressible-ideal-gas
	Mixture
	none

Properties	
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	incompressible-ideal-gas
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]	constant
	1006.43
Thermal Conductivity [W/(m K)]	constant
	0.0242
Viscosity [kg/(m s)]	sutherland
Molecular Weight [kg/kmol]	constant
	24.66

Change/Create
Delete
Close
Help

Die molare Masse ergibt sich folgendermaßen:

$$M = \rho_{Norm} * \frac{R * T_{Norm}}{p_{Norm}} = 1,1 \frac{kg}{m^3} * \frac{8.314 \frac{J}{mol K} * 273.15K}{101325 Pa} = 0,02466 \frac{kg}{mol} = 24,66 \frac{kg}{kmol}$$

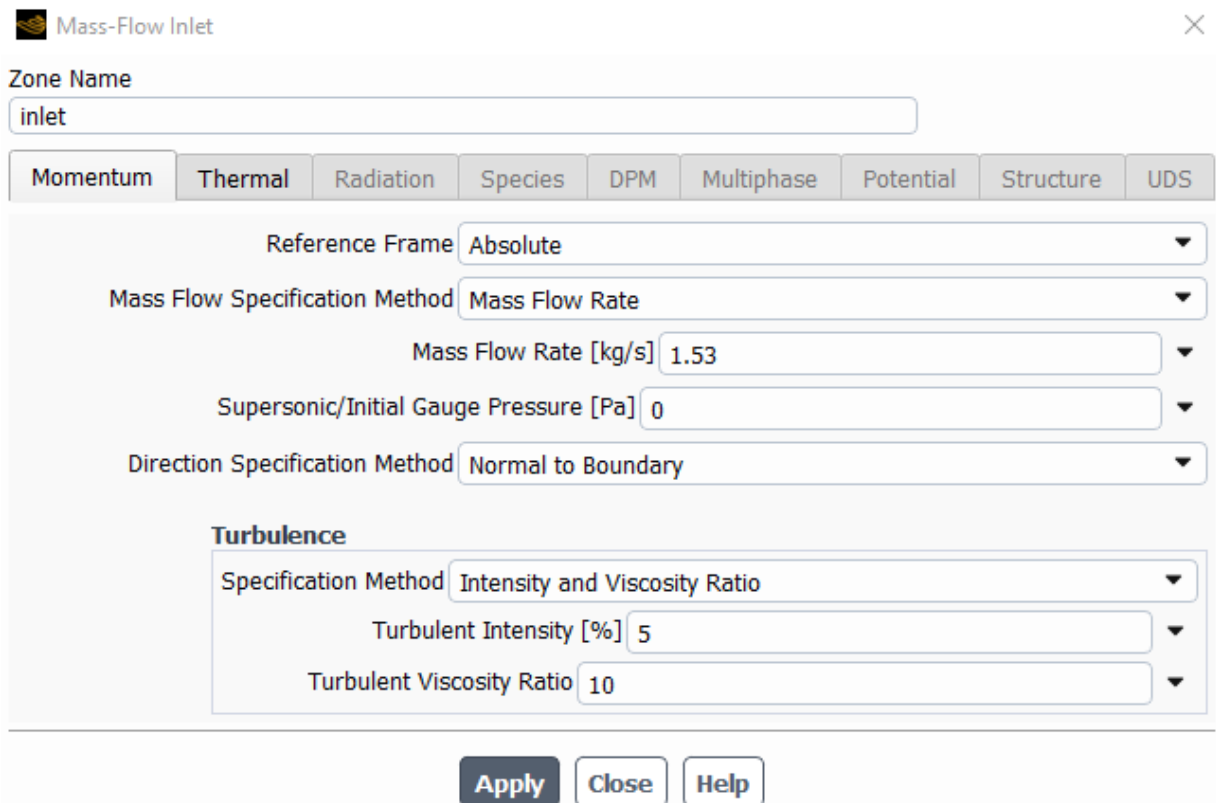
3. Linksklick auf Change/Create → Linksklick auf Close



## Boundary Conditions

### Inlet

1. Doppelter Linksklick auf Boundary Conditions
2. Linksklick auf Inlet → Type: mass-flow-inlet
3. Im geöffneten Fenster im Tab Momentum → Mass Flow Rate 1,53 g/s



Mass-Flow Inlet

Zone Name  
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Reference Frame Absolute

Mass Flow Specification Method Mass Flow Rate

Mass Flow Rate [kg/s] 1.53

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa] 0

Direction Specification Method Normal to Boundary

**Turbulence**

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%] 5

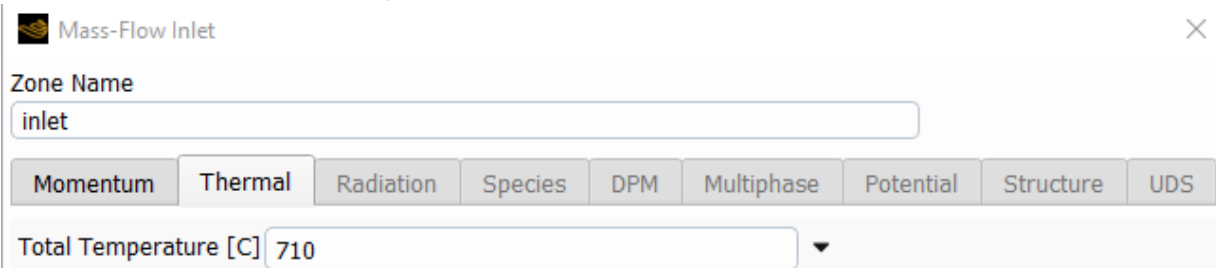
Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply Close Help

Die molare Masse ergibt sich folgendermaßen:

$$\dot{m} = V_{Norm} * \rho_{Norm} = 5000 \frac{m^3}{h} * 1,1 \frac{kg}{m^3} = 5500 \frac{kg}{h} = 1,53 \frac{kg}{s}$$

4. Linksklick auf General → Units → temperature → new → Close
5. Im Tab Thermal → Total Temperature: 710 °C



Mass-Flow Inlet

Zone Name  
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Total Temperature [C] 710

Apply Close Help

6. Apply → Close

## Outlet

1. Doppelter Linksklick auf Boundary Conditions
2. Linksklick auf Outlet → Type: pressure-outlet und Default-Einstellungen belassen

**Pressure Outlet** [X]

Zone Name  
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure [Pa] 0

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

☐ Prevent Reverse Flow  
☐ Radial Equilibrium Pressure Distribution  
☐ Average Pressure Specification  
☐ Target Mass Flow Rate

**Turbulence**

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%] 5

Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply Close Help

3. Apply → Close

## Variationskoeffizient der Geschwindigkeit an Auswertebene

### Standard deviation

1. Unter Solution → Doppelter Linksklick auf Report Definitions → Rechtsklick auf New → Surface Report → Standard Deviation
2. Field Variable: Velocity Magnitude | Plane: Auswertebene

**Surface Report Definition**

Name:

Report Type:

**Options**

☐ Per Surface

Average Over:

**Report Files [1/1]**

**Report Plots [1/1]**

**Create**

☒ Report File

☒ Report Plot

Frequency:

☐ Print to Console

☐ Create Output Parameter

**Custom Vectors**

Vectors of:

Field Variable:

**Surfaces**

inlet  
outlet  
**plane-3**  
wall

3. OK

## Area Weighted Average

1. Unter Solution → Doppelter Linksklick auf Report Definitions → Rechtsklick auf New → Surface Report → Area-Weighted Average
2. Field Variable: Velocity Magnitude | Plane: Auswertebene

**Surface Report Definition** ×

**Name**

**Report Type**  
 Area-Weighted Average ▼

**Options**

☐ Per Surface

Average Over

**Report Files** [1/2] ☰ ☑ ☒

area\_weighted\_average-rfile  
 standard\_dev-rfile

**Report Plots** [1/2] ☰ ☑ ☒

standard\_dev-rplot  
 area\_weighted\_average-rplot

**Create**

☒ Report File

☒ Report Plot

Frequency

☐ Print to Console

☐ Create Output Parameter

**Custom Vectors**

Vectors of

**Field Variable**  
 Velocity... ▼  
 Velocity Magnitude ▼

**Surfaces**  ☰ ☑ ☒

inlet  
 outlet  
 plane-3  
 wall

3. OK

## Variationskoeffizient

1. Unter Solution → Doppelter Linksklick auf Report Definitions → Rechtsklick auf New → Expression
2. Expression mithilfe von Button „Report Definitons“ einfügen

$$\text{Variationskoeffizient} = \frac{\text{Standardabweichung der Geschwindigkeit}}{\text{Mittelwert der Geschwindigkeit}} * 100$$

Expression Report Definition

Name: variationskoeffizient

Expression: `{standard_dev}/{area_weighted_average}*100`

Functions  
Variables  
Constants  
Report Definitions  
Locations

Current Value: Refresh value

Average Over: 1

Report Files [2/3]: variationskoeffizient-rfile, area\_weighted\_average-rfile, standard\_dev-rfile

Report Plots [1/3]: standard\_dev-rplot, area\_weighted\_average-rplot, variationskoeffizient-rplot

Create:  
☒ Report File  
☒ Report Plot  
 Frequency: 1  
☐ Print to Console

☐ Create Output Parameter

OK Compute Cancel Help

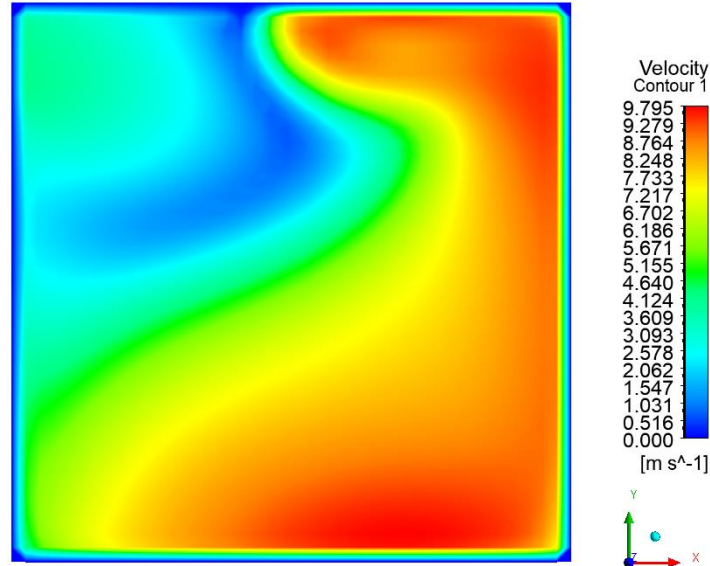
3. OK

## Berechnung

1. Unter Solution → Initialization → Method: Hybrid Initialization → Initialize
2. Unter Solution → Run Calculation → Number of Iterations: 200 → Calculate

## Ergebnisse

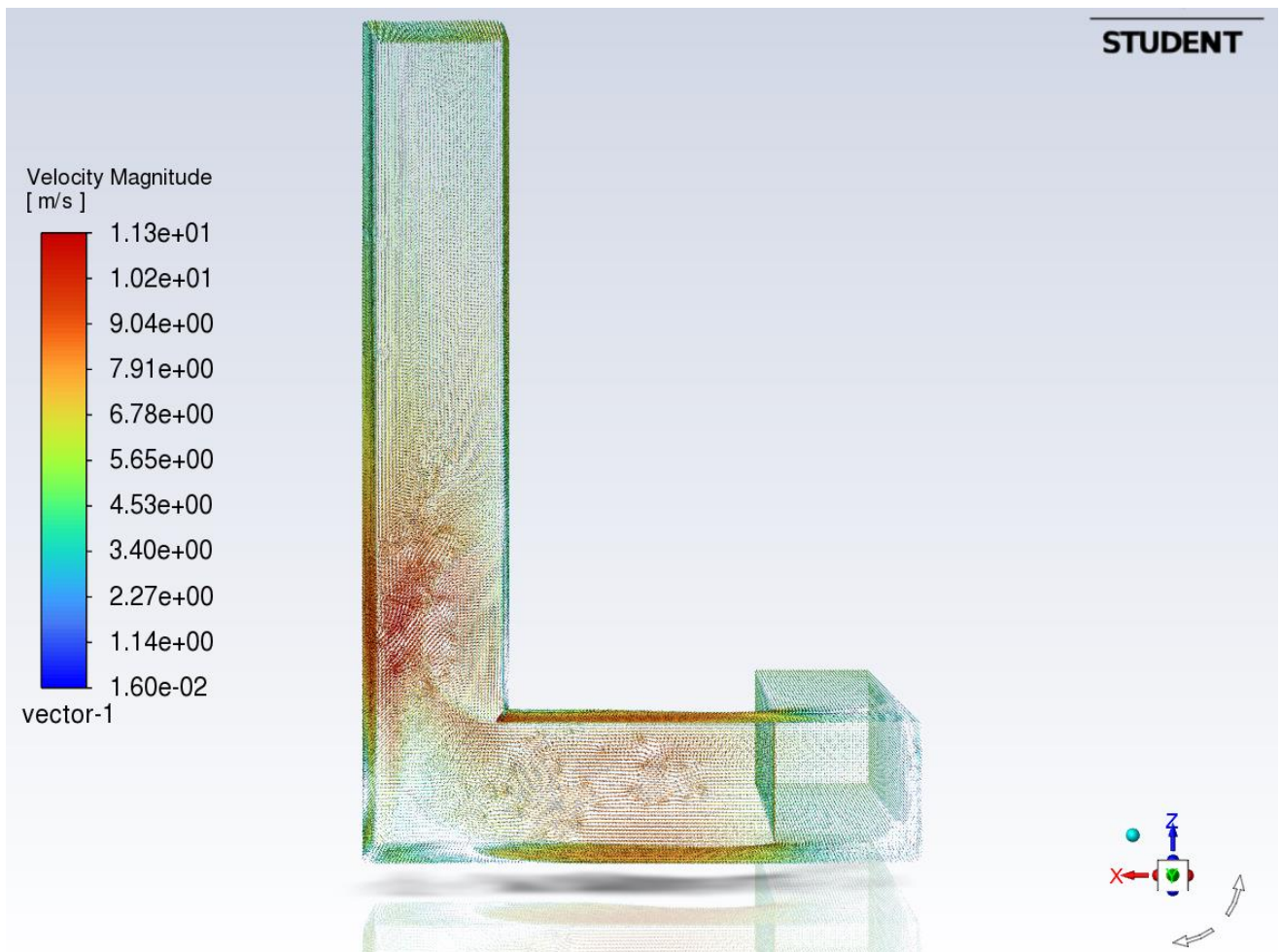
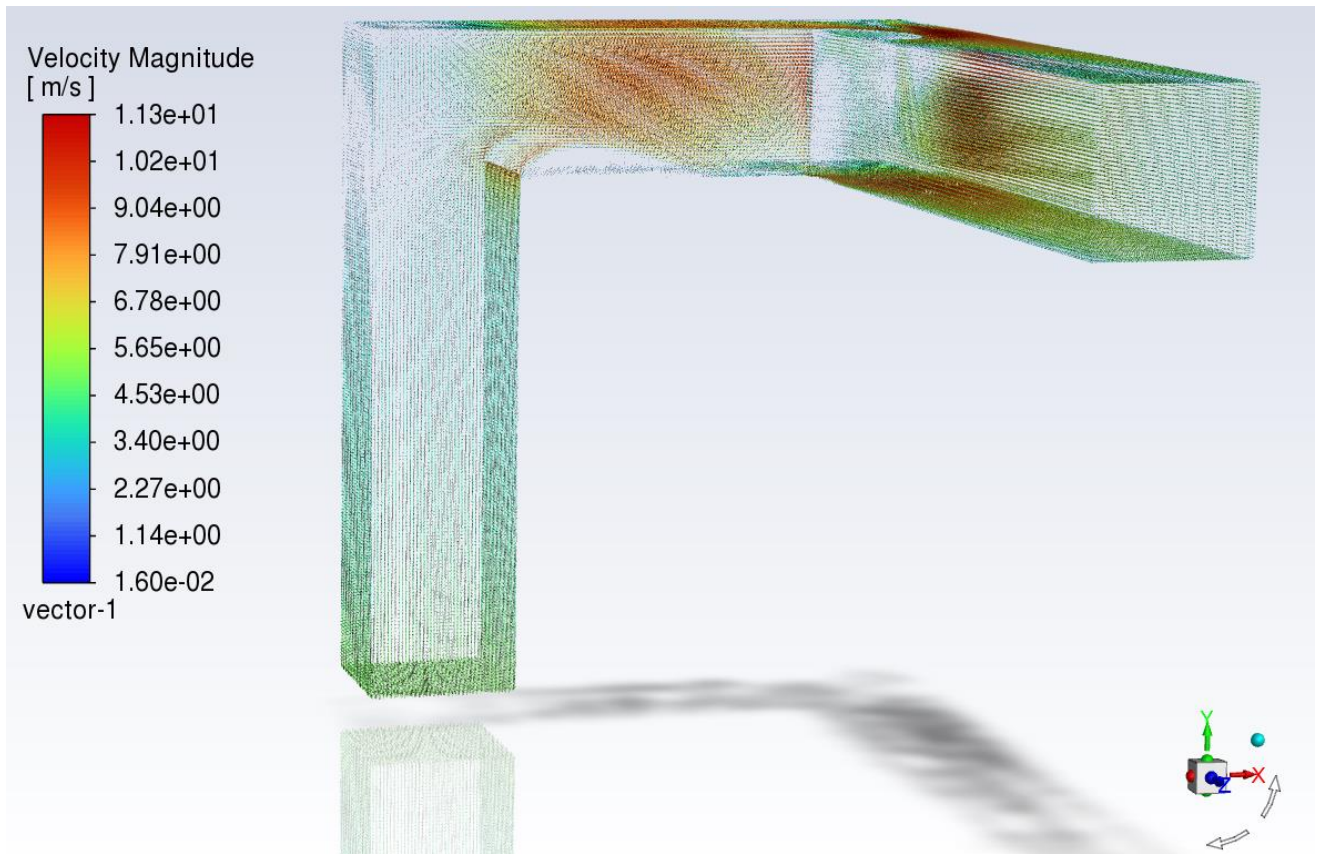
Im Contour-Plot wird folgendes klar ersichtlich:



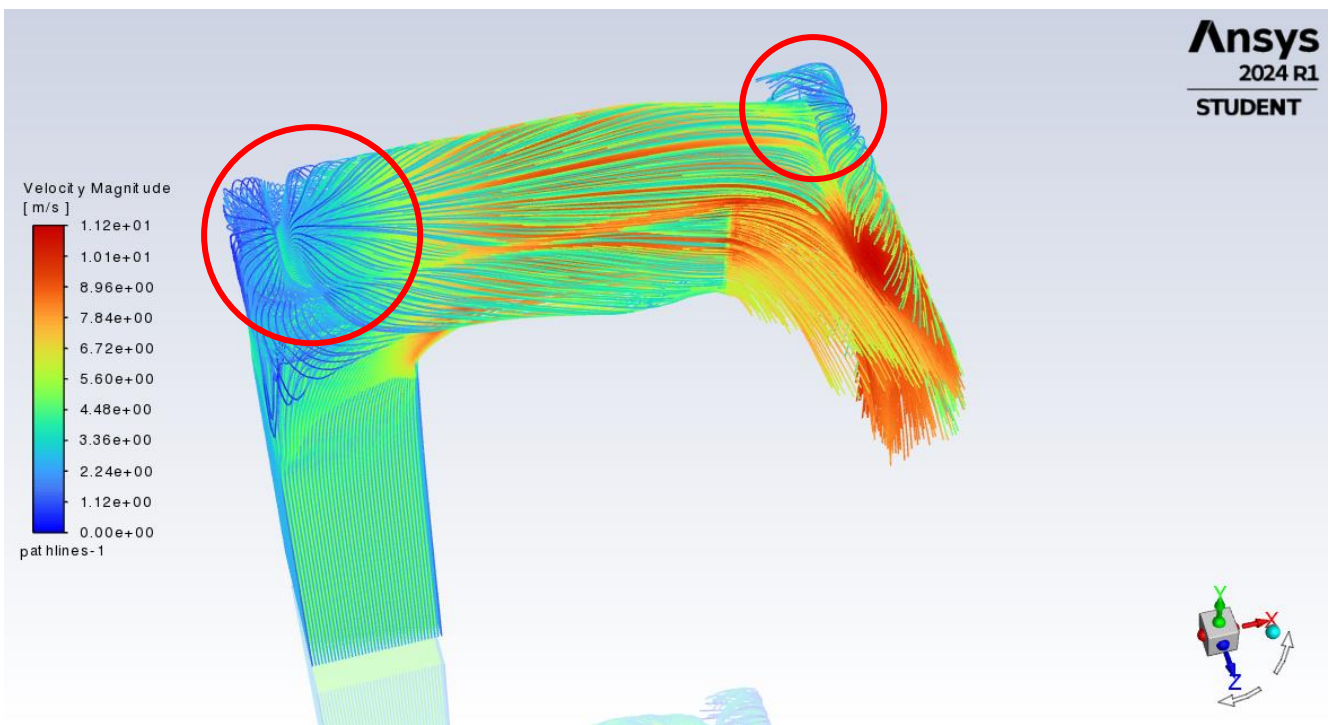
- Am unteren rechten Rand befindet sich mit ~9.8 m/s die maximale Durchflussgeschwindigkeit.
- Am oberen linken Rand befindet sich mit ~0.5 m/s die minimale Durchflussgeschwindigkeit.
- In der Mitte, also zwischen den beiden Bereichen, erreicht die Durchflussgeschwindigkeit einen Wert von ~5 m/s.

Es zeigt sich, dass die Strömung auf der Auswertebene ungleich ist und eine Optimierungsmaßnahme getroffen werden sollte.

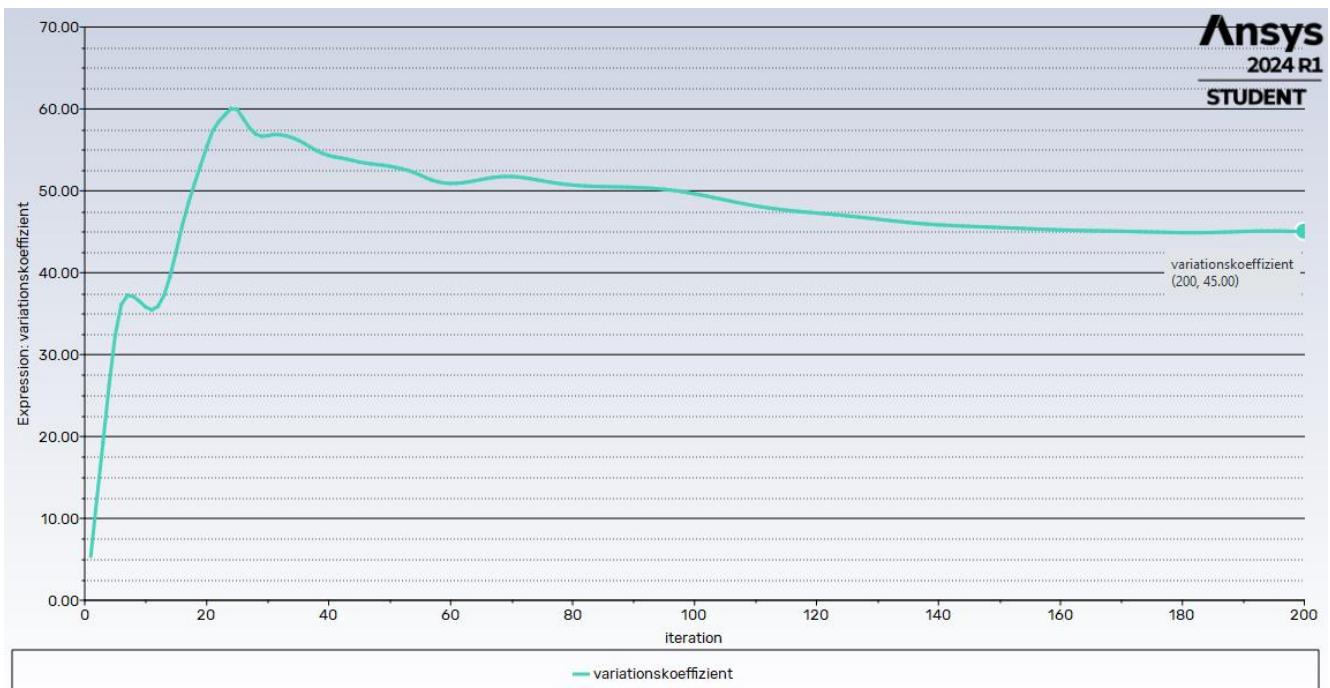
Bevor jedoch mit der Optimierung gestartet wird, sollte der Grund für obiges Verhalten diskutiert werden. Mithilfe eines Vektor-Plots lässt sich schnell erkennen, dass sich die Strömung nach jeder Kante maßgeblich ändert. Dies wird ebenfalls vom Pathline-Plot bestätigt, welcher hervorhebt, dass in den Ecken niedrige Durchflussgeschwindigkeiten vorherrschen.







Der Variationskoeffizient konvergiert bereits ab 150 Iterationen und liegt nach 200 Iterationen bei 45.00 %. Zur Erinnerung: Je höher der Variationskoeffizient desto ungleichmäßiger die Strömung.



Es empfiehlt sich daher, entweder die Geometrie zu Ändern und die Ecken abzurunden oder/und Leitbleche in den Eckbereichen einzuführen.

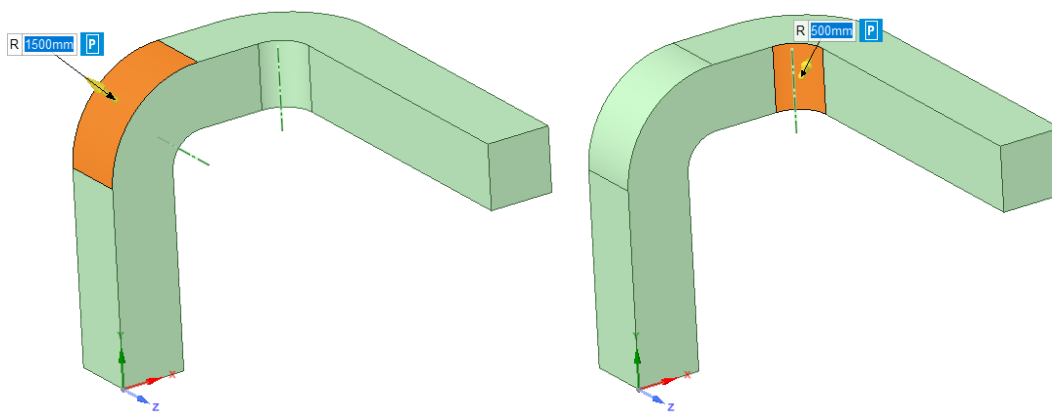


# 3. Optimierung des IST-Modells

## 3.1. Verrundungen

### Geometrie anpassen

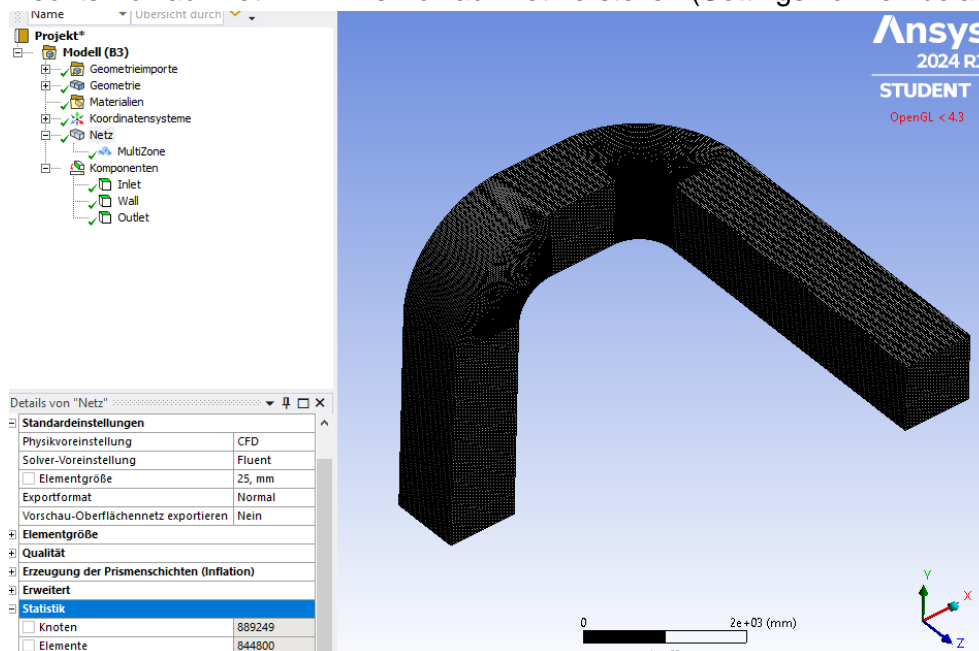
1. In der Workbench → Rechtsklick auf Fluidodynamik-Block → Duplizieren
2. Rechtsklick auf Geometrie → Linksklick auf „Geometrie in SpaceClaim bearbeiten...“
3. „Ziehen“-Befehl aktivieren und Kanten anklicken, um Rundungen zu erstellen (Äußere Rundungen: R1500mm, Innere Rundungen: R500mm)



4. Datei → SpaceClaim beenden

### Mesh erzeugen

1. In der Workbench → Doppelter Linksklick auf Netz
2. WICHTIG: Abgerundete Kanten als Wall definieren. (Somit ergeben sich 12 Wall-Flächen)
3. Rechtsklick auf Netz → Linksklick auf Netz erstellen (Settings können belassen werden)

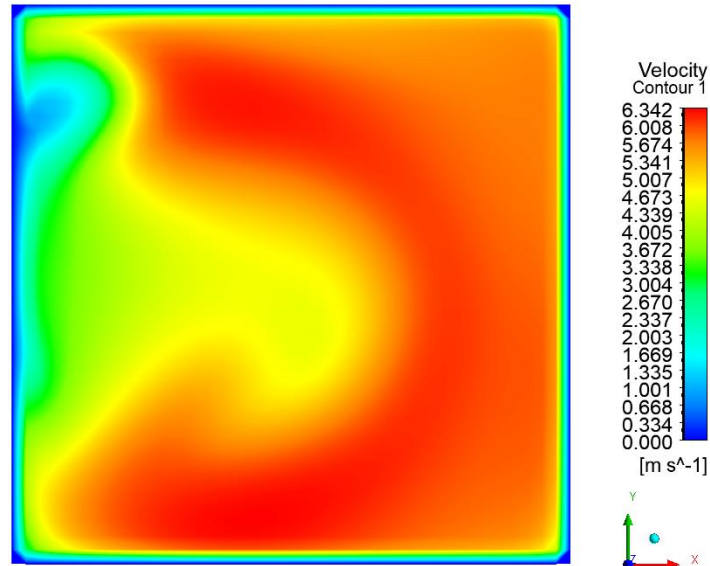


4. Datei → Meshing beenden

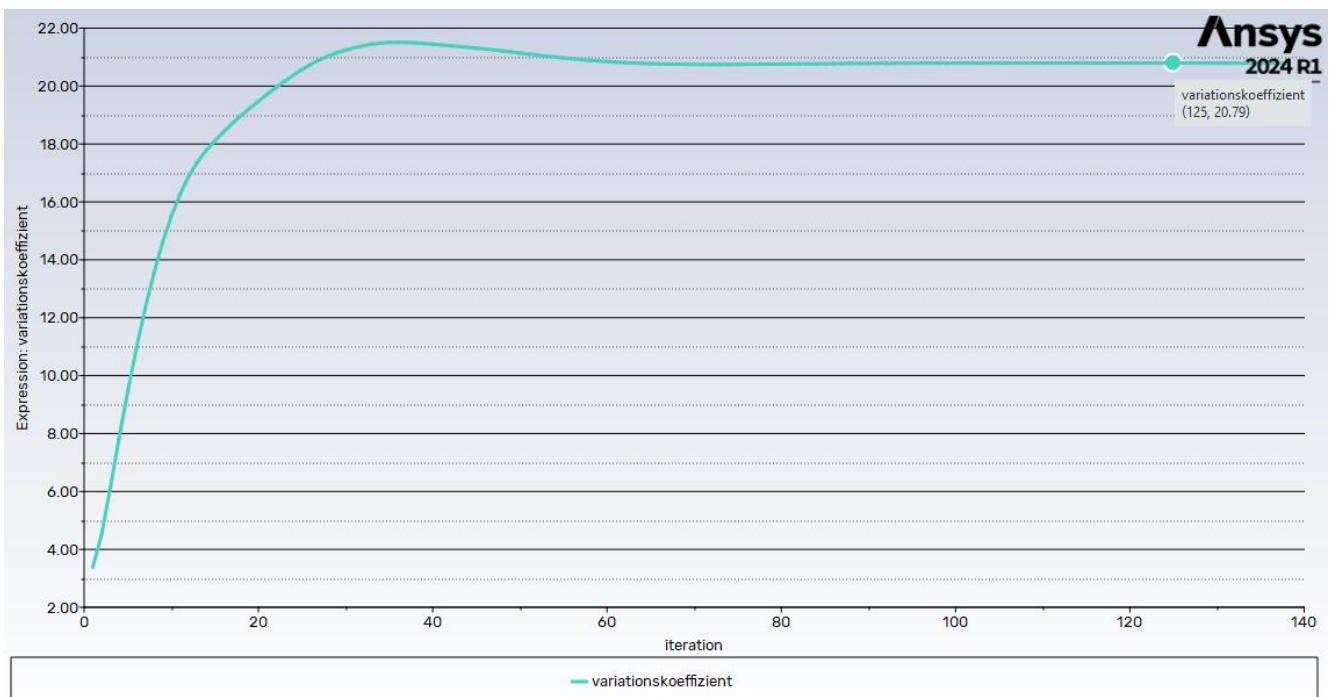
## Ergebnisse

Da der Ablauf bei den Einstellungen im Setup ident zu dem aus dem IST-Modell sind, wird darauf verzichtet diese erneut zu beschreiben.

Im Contour-Plot wird folgendes klar ersichtlich:



- Die Durchflussgeschwindigkeit erreicht mit ~6.3 m/s an mehreren Stellen ihr Maximum.
- Am linken Rand befindet sich mit 0.6 m/s die minimale Durchflussgeschwindigkeit.
- Die Strömungsgeschwindigkeit ist wesentlich besser aufgeteilt

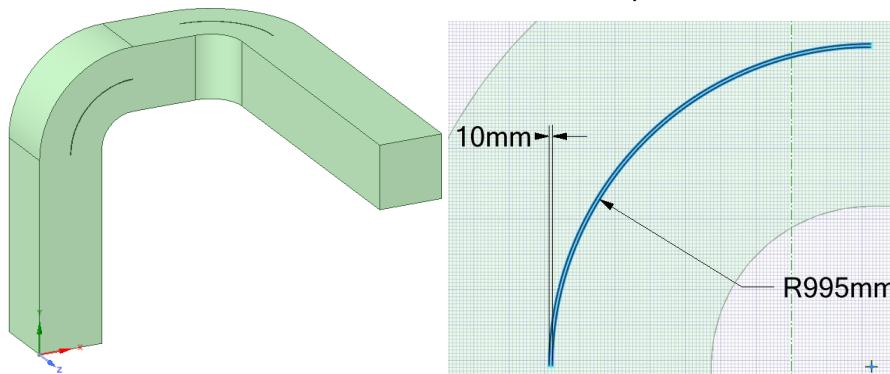


Der Variationskoeffizient konvergiert bereits ab 65 Iterationen und liegt nach 138 Iterationen (Ansys Fluent hört auf bei 138 Iterationen zu rechnen) bei 20.79 %. Die Reduktion zeigt, wie bereits der Contour-Plot, dass es eine erfolgreiche Optimierung gab. Es zeigt sich, dass die Strömung auf der Auswertebene durch die geometrische Änderung der Ecken verbessert werden konnte.

## 3.2. Verrundungen + Leitbleche

### Geometrie anpassen

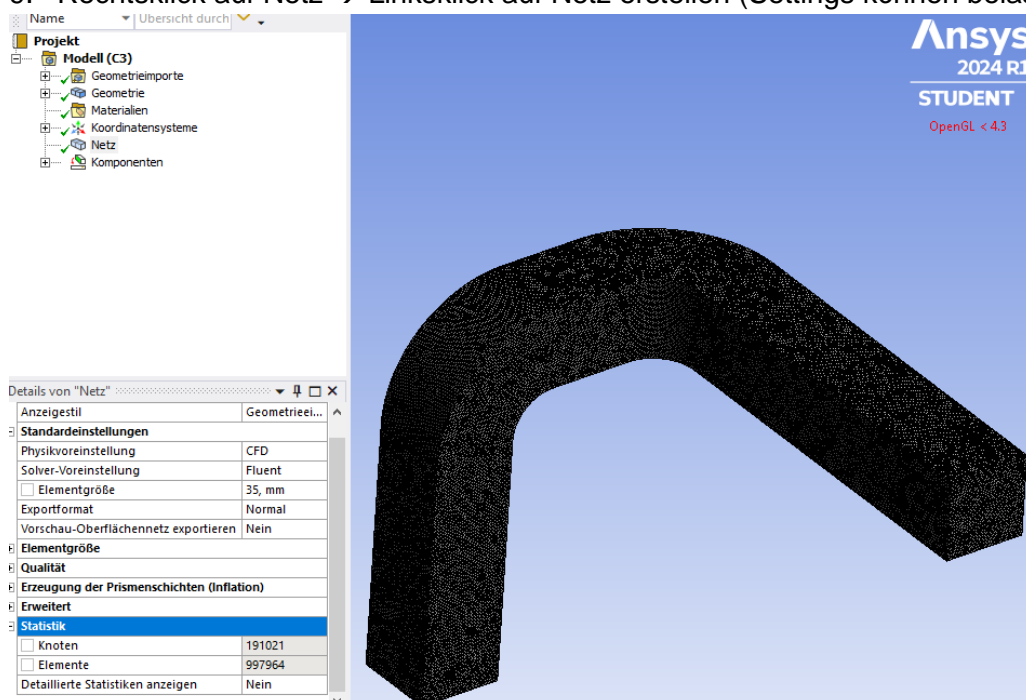
1. In der Workbench → Rechtsklick auf Fluidodynamik-Block → Duplizieren
2. Rechtsklick auf Geometrie → Linksklick auf „Geometrie in SpaceClaim bearbeiten...“
3. Kurven anwählen, mit Strg+C bzw. Strg+V duplizieren und Bemaßung ändern
4. Für jedes einzelne Leitblech müssen zwei Kurven erstellt werden, welche mit zwei Linien (auf beiden Seiten) geschlossen wird. (Als Leitblechdicke wurde 10mm gewählt.)
5. Oberfläche mit dem Befehl „Ziehen“ aus dem Volumenkörper ausschneiden



6. Datei → SpaceClaim beenden

### Mesh erzeugen

5. In der Workbench → Doppelter Linksklick auf Netz
6. WICHTIG: Leitbleche als Wall definieren. (Somit ergeben sich 20 Wall-Flächen)
7. Multi-Zone entfernen (ansonsten Fehlermeldungen)
8. Elementgröße: 35mm (mehr Elemente können mit Studentenlizenz nicht gerechnet werden)
9. Rechtsklick auf Netz → Linksklick auf Netz erstellen (Settings können belassen werden)

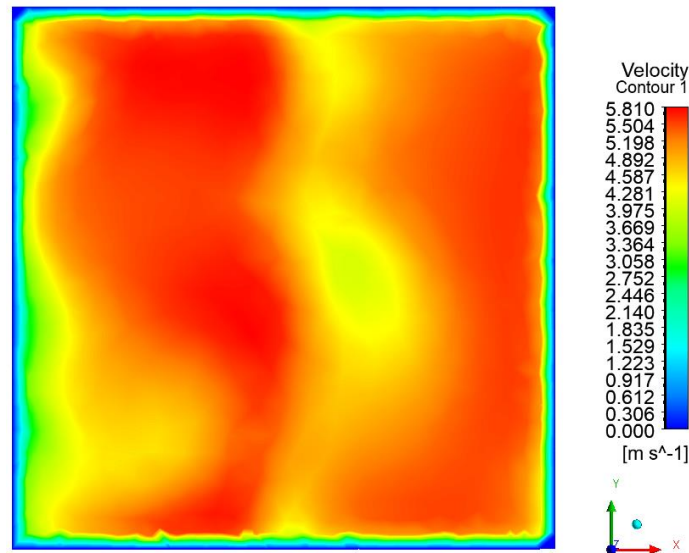


10. Datei → Meshing beenden

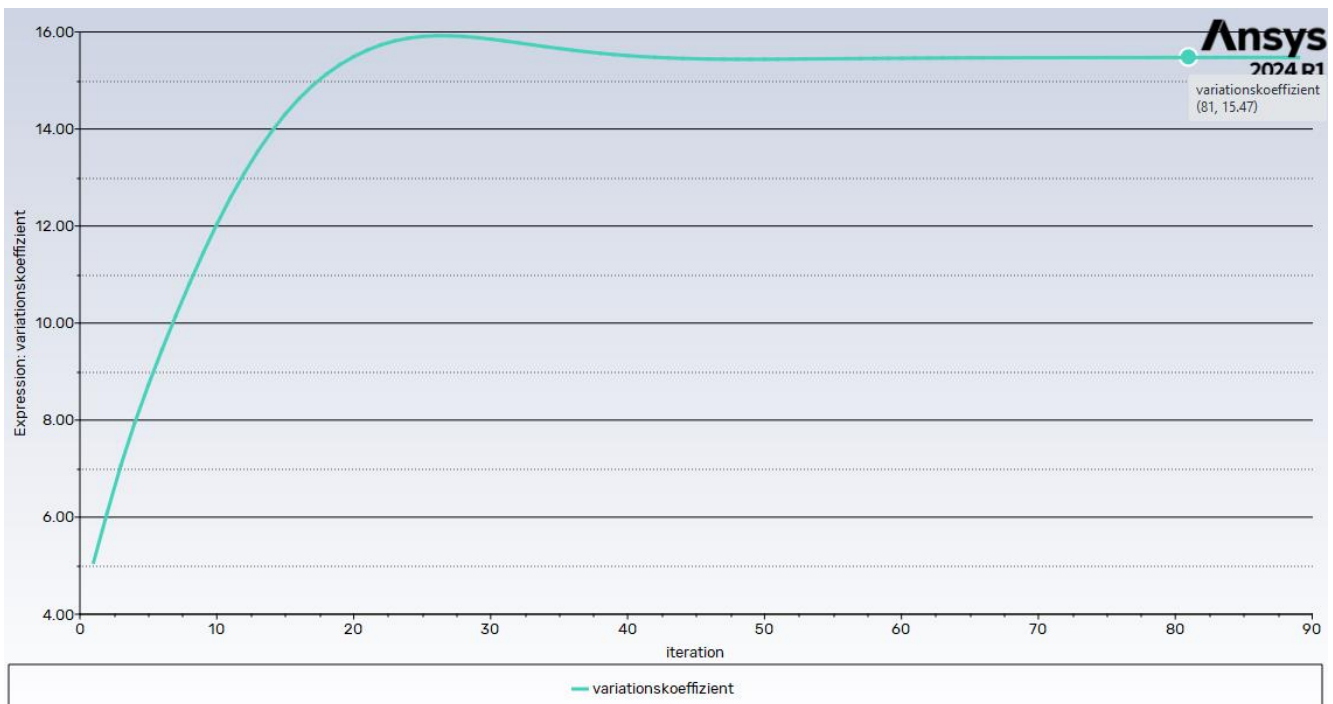
## Ergebnisse

Da der Ablauf bei den Einstellungen im Setup ident zu dem aus dem IST-Modell sind, wird darauf verzichtet diese erneut zu beschreiben.

Im Contour-Plot wird folgendes klar ersichtlich:



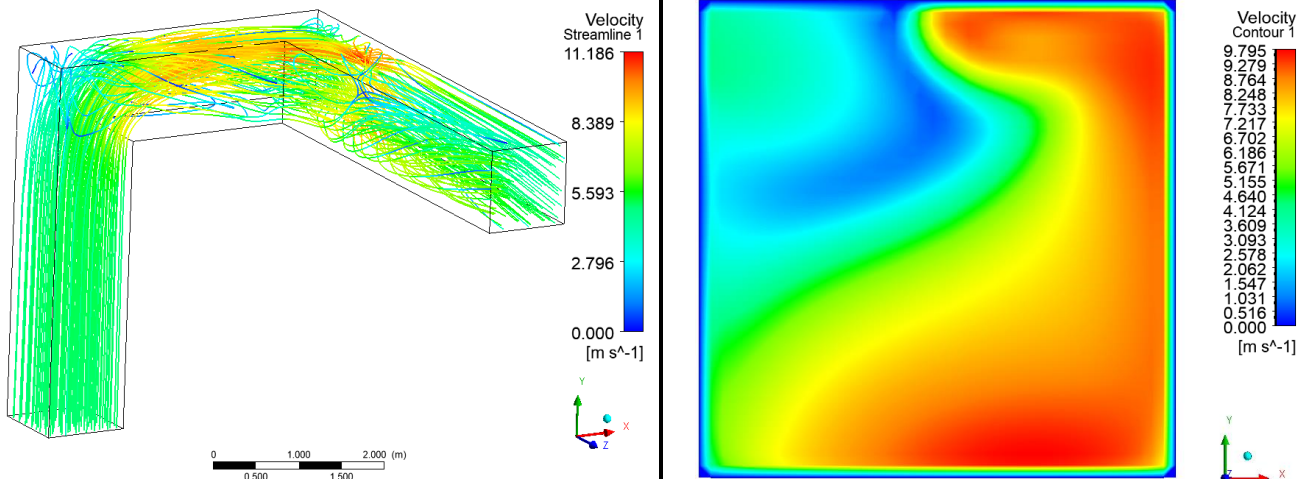
- Die Durchflussgeschwindigkeit erreicht mit ~5.8 m/s an mehreren Stellen ihr Maximum.
- Die Durchflussgeschwindigkeit erreicht mit ~1.9 m/s ihr Minimum.
- Die Strömungsgeschwindigkeit ist wesentlich besser aufgeteilt.



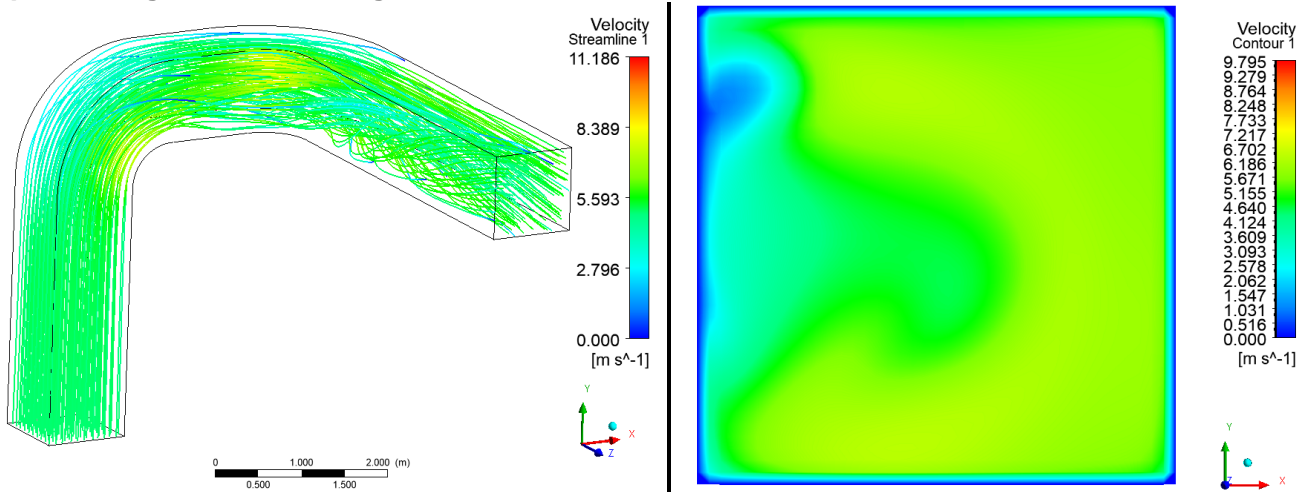
Der Variationskoeffizient konvergiert bereits ab 45 Iterationen und liegt nach 89 Iterationen (Ansys Fluent hört auf bei 89 Iterationen zu rechnen) bei 15.47 %. Die Reduktion zeigt, wie bereits der Contour-Plot, dass es eine erfolgreiche Optimierung gab. Es zeigt sich, dass die Strömung auf der Auswertebene durch eine Erweiterung der Verrundungen mit Leitblechen verbessert werden konnte.

## 4. Fazit

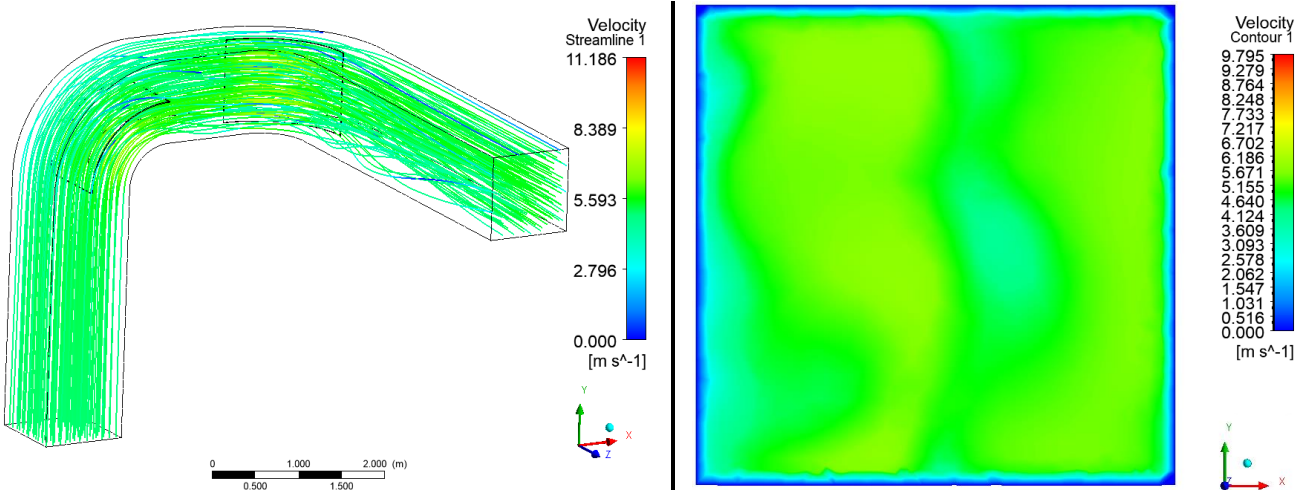
### Ausgangssituation:



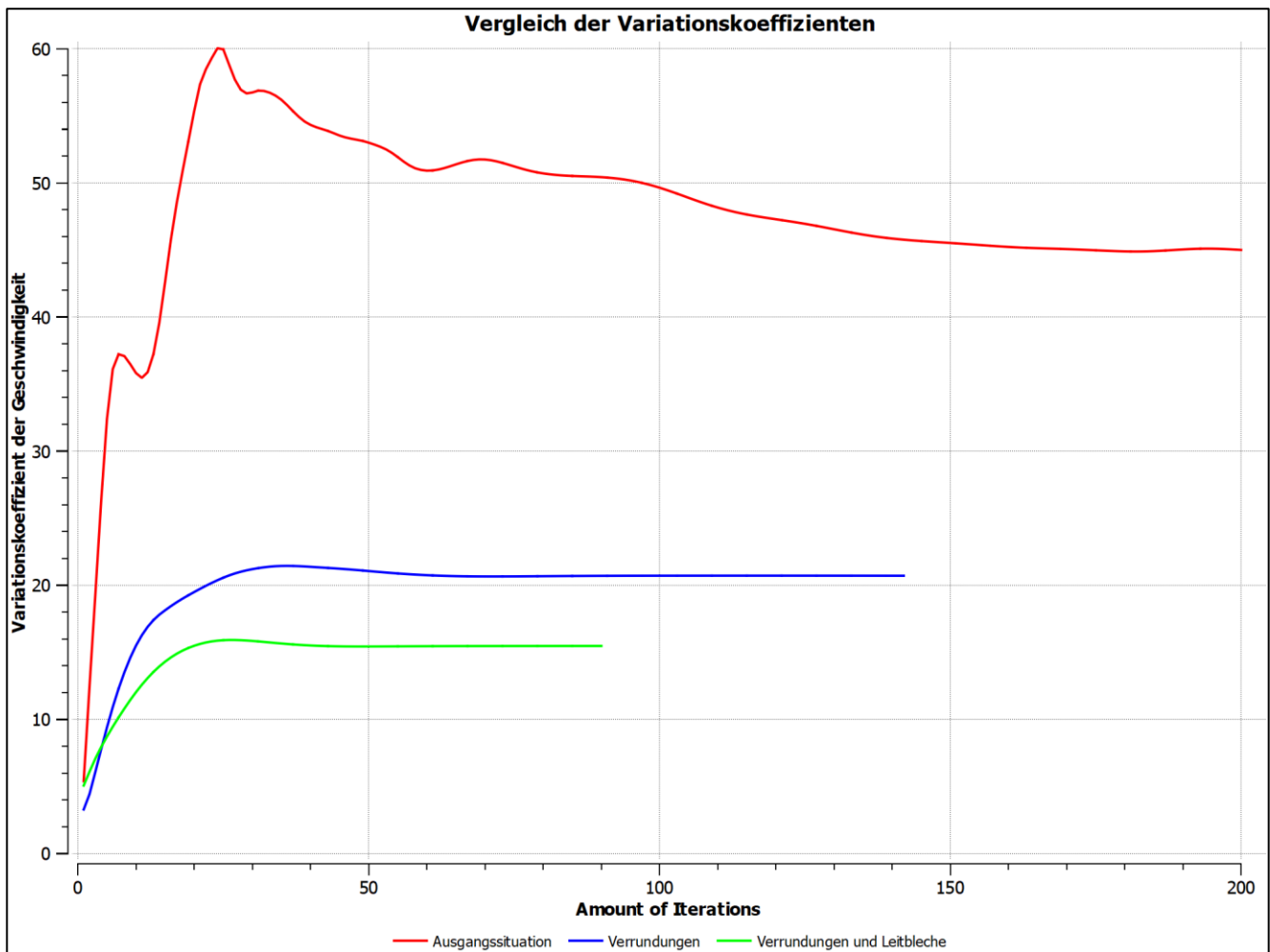
### Optimierung mit Verrundungen:



### Optimierung mit Verrundungen und Leitblechen:







	Ist-Zustand	Optimierung mit Verrundungen	Optimierung mit Verrundungen und Leitblechen
Variationskoeffizient	45.00%	20.79%.	15.47%
Iterationen bis Konvergenz	145	65	45
Lokale max. Geschwindigkeit (an Auswertebene)	9.80 m/s	6.34 m/s	5.81 m/s
Globale Max. Geschwindigkeit (im gesamten Modell)	11.20 m/s	8.39 m/s	7.36 m/s

Zusammengefasst lassen sich folgende Fakten festhalten:

- Variationskoeffizient wurde reduziert.
- Variationskoeffizient konvergiert früher.
- Contour-Plot an Auswertebene zeigt gleichmäßigere Geschwindigkeitsverteilung.
- Lokale und globale maximale Geschwindigkeit wurde reduziert.

Alles in Allem ist die Optimierung durch eine Verrundung der betroffenen Kanten (Innenseite: R500 mm | Außenseite: R1500 mm) und dem Einsatz von Leitblechen in Mitte der Verrundungen (Wandstärke: 10 mm) gelungen. Je nach Belieben, könnten zusätzlich noch weitere Leitbleche angebracht werden, um die Strömung noch gleichmäßiger zu gestalten.