

CFD-Vertiefung

Analyse eines Rennwagens

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

Inhaltsverzeichnis

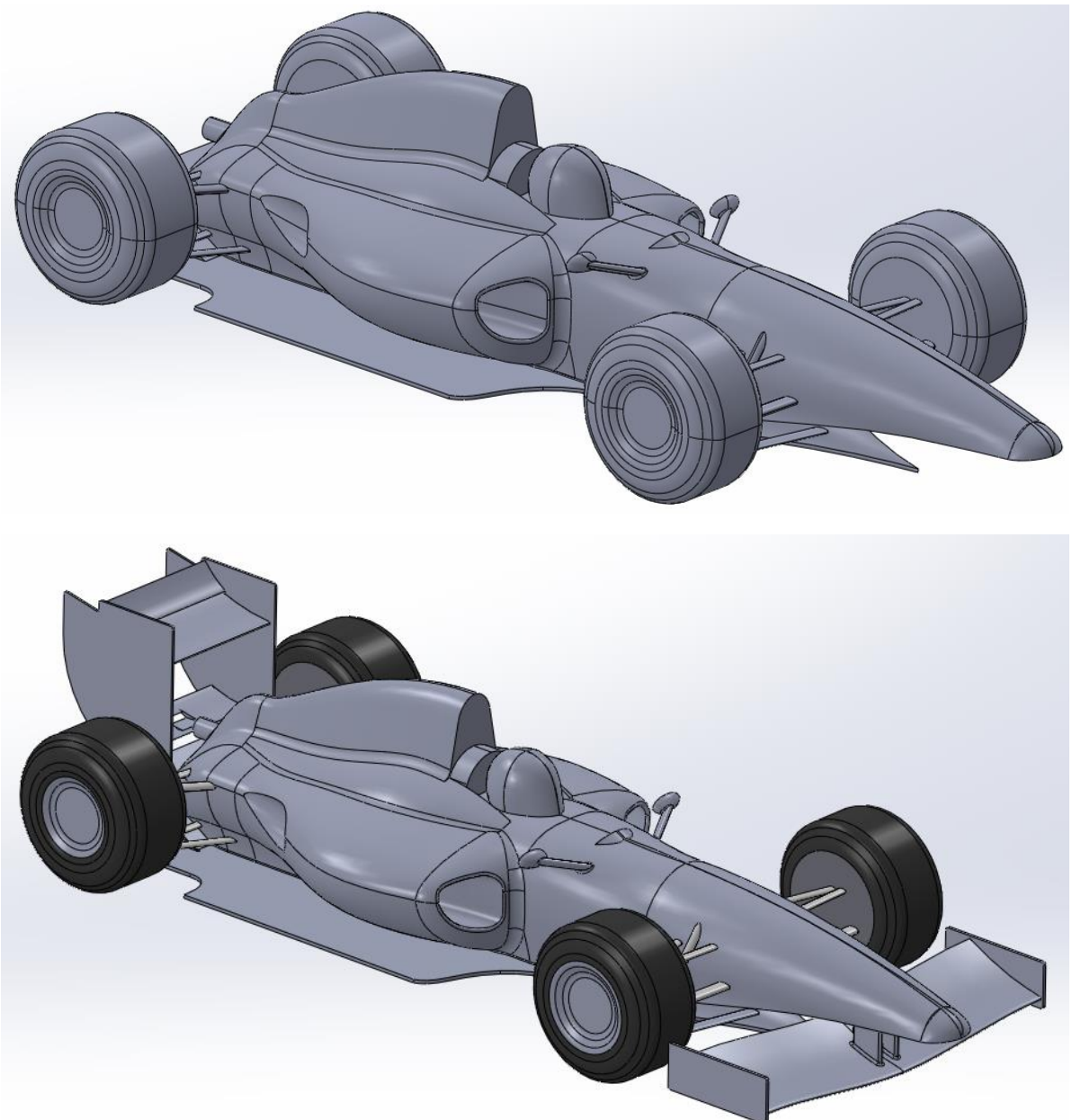
1. Problemstellung	3
2. Theoretische Grundlagen	4
2.1. Warum CFD?	4
2.2. Aerodynamik im Motorsport	4
2.3. Druckverteilung	5
2.4. Referenzwerte für Cd/Cl aus der Literatur	7
3. Methodik	8
4. Ergebnisse und Diskussion	20
4.1 Residuen	20
4.2 Strömungsgeschwindigkeit	21
4.3 Statische Druckverteilung	22
4.4 Gesamte Druckverteilung	26
4.5 Strömungswiderstand & -auftrieb	30
5. Lessons Learned	33
Abbildungsverzeichnis	34
Literaturverzeichnis	35

1. Problemstellung

Im Rahmen der Lehrveranstaltung „CFD-Vertiefung“ sollte ein beliebiges CFD-Problem vorgeschlagen werden. Nach einer kurzen Präsentation des Konzeptes und einer Einschätzung des Dozenten hinsichtlich der zeitgerechten Durchführbarkeit, konnte mit der Simulation gestartet werden. Es oblag den Studierenden, ob die Simulation in Ansys Fluent oder in SolidWorks Flow Simulation durchgeführt wird.

Aufgrund einer bislang unzureichenden Bearbeitung von klassischen Strömungsproblemen, wurde sich für die Simulationen eines Rennwagens entschieden. Um den Aufwand der Lehrveranstaltung zu entsprechen, soll neben der allgemeinen Strömungsberechnung des Fahrzeuges bei einer realistischen Geschwindigkeit auch der Effekt des Frontflügels und Heckspoilers diskutiert werden.

Das Modell (Ferrari F150th Italia), welches untersucht werden soll, sieht wie folgt aus:



2. Theoretische Grundlagen

2.1. Warum CFD?

Durch die CFD-Simulation lassen sich konstruktive Änderungen und deren Effekte rasch analysieren. Das heißt es muss kein reales Modell hergestellt und durch aufwändige bzw. teure Messungen in einem Windkanal überprüft werden. [1]

In der Strömungsmechanik bewirken minimale Anpassungen der Geometrie teils signifikante und eventuell unerwartete Strömungsbilder. Dies gilt insbesondere in der Aerodynamik, wo der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung meist nicht trivial ist. [1]

Bislang war die größte Schwachstelle von CFD-Simulationen einerseits das teils aufwendige Meshing und die immense Rechenleistung. Während früher auf die Parallelisierung von einer Vielzahl an CPU-Kernen gesetzt wurde, bieten heutige Applikationen beeindruckende GPU-Solver, die einen maßgeblichen Beitrag zur Minimierung der Rechendauer beitragen. So ist es beispielsweise möglich die Simulation eines LKW-Trailer-Gespann in 700 Iterationen mit 30 Millionen Knoten durchzuführen. [1]

2.2. Aerodynamik im Motorsport

Ein sich in Bewegung befindendes Formel-1-Fahrzeug wird grundlegend von vier physikalischen Größen beeinflusst:

1. **Schub (Thrust)**

Die vorwärts gerichtete Kraft, die vom Motor erzeugt wird, bringt das Fahrzeug in Bewegung und hält es auf Geschwindigkeit.

2. **Luftwiderstand (Drag)**

Die entgegengesetzte Kraft, die durch die Luftreibung entsteht und die Bewegung des Autos abbremst. Der Luftwiderstand hängt stark von der Fahrzeugform und der aerodynamischen Effizienz ab.

3. **Gewicht (Weight)**

Die senkrecht nach unten wirkende Kraft, die durch die Gravitation entsteht und das Fahrzeug auf die Straße drückt und die Bodenhaftung maßgeblich beeinflusst.

4. **Auftrieb (Lift)**

Je nach Fahrzeugdesign kann diese Kraft das Fahrzeug entweder nach oben (Auftrieb) oder nach unten (Downforce) drücken. In der Formel-1-Technik wird gezielt Downforce erzeugt, um die Reifenhaftung und die Kurvenstabilität zu verbessern.

Während Parameter wie Motorleistung und Fahrzeuggewicht ebenfalls von großer Relevanz sind, liegt der Fokus dieser Arbeit auf den aerodynamischen Kräften, insbesondere auf dem Luftwiderstandskoeffizienten C_d und dem Auftriebskoeffizienten C_l . Bevor mit der konkreten Berechnung in Ansys Fluent gestartet wird, sollen die zugrundeliegenden Formeln umrissen werden:

$$C_d = \frac{2 * F_d}{\rho * A * v^2} \quad (1)$$

$$C_l = \frac{2 * F_l}{\rho * A * v^2} \quad (2)$$

Dabei gelten auch folgende Zusammenhänge:

$$C_l = -C_w \quad (3)$$

$$C_d = -C_t \quad (4)$$

Diese Gesetze lassen sich anhand folgender Abbildung besser nachvollziehen:

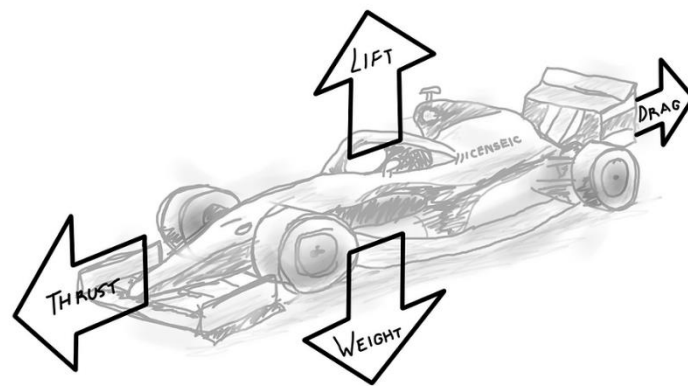


Abbildung 1: Aerodynamische Kräfte, welche auf ein Formel-1-Auto wirken [2]

2.3. Druckverteilung

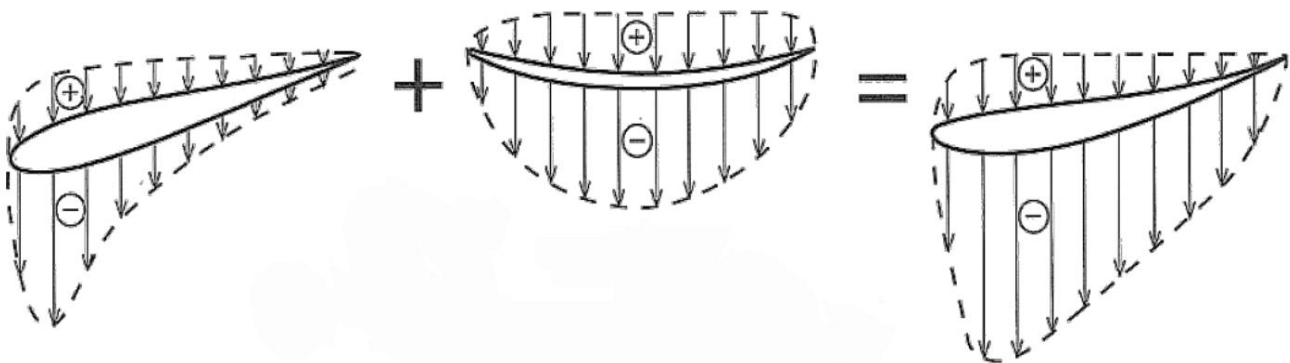


Abbildung 2: Druckverteilung eines symmetrischen Profils, eines gekrümmten Profils und einer Kombination beider [3]

Bevor die Simulation durchgeführt wird, soll die Geometrie der Spoiler hinterfragt werden. Abbildung 2 zeigt die Kombinationen von Druckverteilungen einer typischen Spoilerform und das daraus resultierende Gesamtdruckbild. Da die Geometrie des optimierten Modells jenem aus der Literatur ähnelt, sollten ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Der Einsatz eines Spoilers sollte demnach eine deutliche Erhöhung der Downforce (bzw. negative Liftforce) mit sich ziehen.

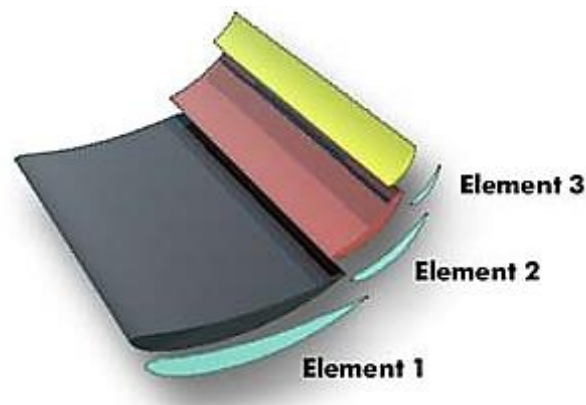


Abbildung 3: Mehrteiliger Flügel eines Rennautos [4]

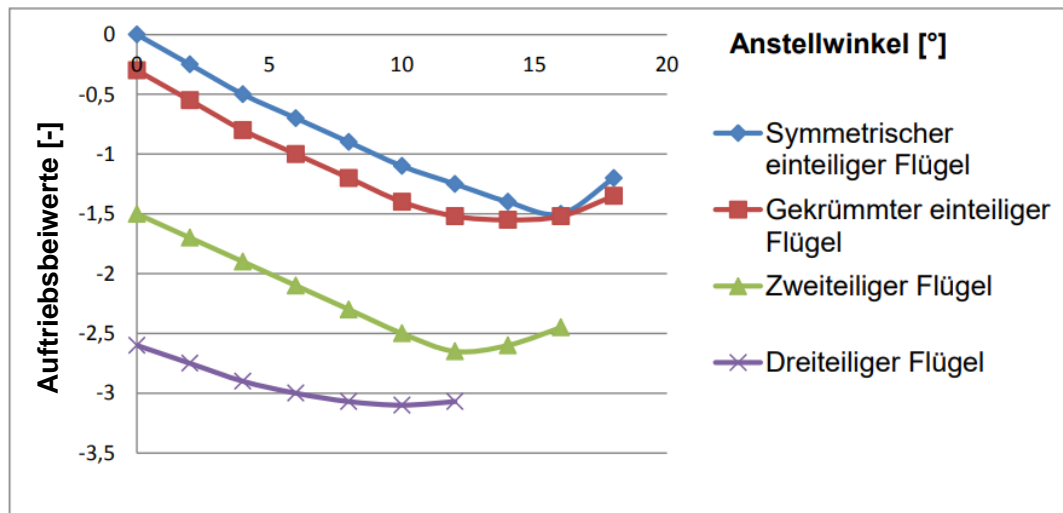


Abbildung 4: Auftriebskoeffizienten verschiedener Flügelkombinationen über den Anstellwinkel [5]

Hinweis: Der Auftriebsbeiwert entspricht dem Auftriebskoeffizienten C_l .

Die Kombination mehrerer Flügel erlaubt, wie bereits zu erwarten, eine weitere Reduktion des Auftriebes bzw. einer Erhöhung des Abtriebes. Die Anstellwinkel der Spoiler sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht hinterfragt werden. Das Ergebnis soll stattdessen anhand der resultierenden Luftwiderstandskoeffizienten C_d und Auftriebskoeffizienten C_l validiert werden.

2.4. Referenzwerte für C_d/C_l aus der Literatur








Setup	Description	C_d	C_l	C_l/C_d
	No aerodynamic devices	0.63	0.29	0.46
	Underbody channels (diffusers)	0.65	-0.79	-1.21
	Underbody channels, wings	0.66	-1.28	-1.94
	Underbody channels, wings with side fins	0.68	-1.56	-2.29
	Underbody channels, wings with side fins and flaps	0.90	-2.34	-2.60
	Underbody channels, multi-element wings	0.98	-2.58	-2.63
	Resized underbody, revised multi-element wings	1.30	-3.70	-2.85

Abbildung 5: Drag & Lift Koeffizienten eines Fahrzeugs mit aerodynamischen Optimierungen [6]

Leider sind die zugrundeliegenden Parameter, welche für die Berechnung der C_d - und C_l -Werte verwendet werden unbekannt.

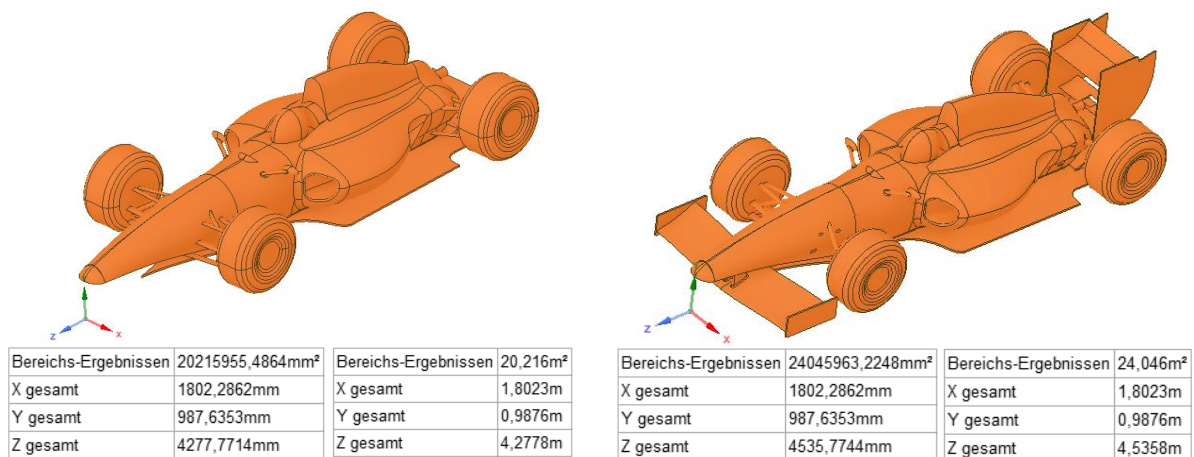
3. Methodik

Vorbereitung der CAD-Datei

1. Geometrie des Fahrzeugs in SolidWorks vereinfachen
2. Datei als *fahrzeug_mit_spoiler.step* exportieren
3. Front- und Rückspoiler entfernen und Datei als *fahrzeug_ohne_spoiler.step* exportieren

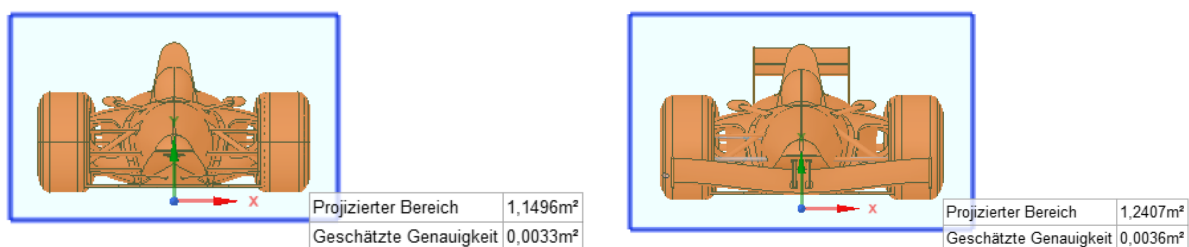
Geometrie in Ansys Fluent importieren und in SpaceClaim abmessen

4. In Ansys: Fluidodynamik (Fluent) per Drag-and-Drop in die Workbench ziehen
5. Rechtsklick auf Geometrie → Geometrie importieren... → Step-Datei auswählen
6. Rechtsklick auf Geometrie → Geometrie in SpaceClaim bearbeiten... →
7. Reiter „Messen“ → Messen → Strg+A → Werte ablesen
8. Zur Messung in Meter: Datei → SpaceClaim-Optionen → Einheiten → Länge: Meter



(Skalierung des Modells nicht notwendig, da Fahrzeugbreite typischerweise 1500-2000mm beträgt und demnach durchaus realistisch ist.)

9. Reiter „Konstruktion“ → Z-Achse anwählen → eine Ebene hinzufügen
10. Reiter „Messen“ → Masseeigenschaften → Bezugsebene → erstellte Ebene anwählen → Bauteil anwählen



(Achtung: Für die Evaluierung von c_d und c_l wird lediglich die Hälfte der projizierten Referenzfläche verwendet!)

11. Erstellte Ebene anwählen → Entfernen
12. Datei → SpaceClaim beenden

Halbmodell durch Umhüllung im DesignModeler erstellen

13. Rechtsklick auf Geometrie → Geometrie in DesignModeler bearbeiten...

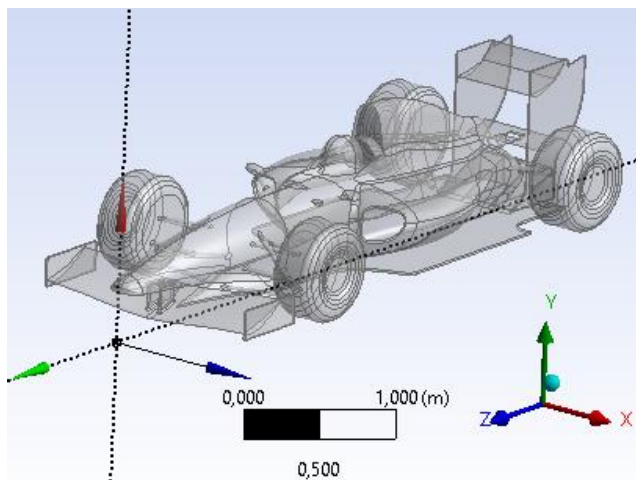
14. Rechtsklick auf Import1 → Erstellen (F5) → Fahrzeug sollte erstellt sein

15. Reiter „Extras“ → Hüllkörper → folgende Einstellungen übernehmen

- Upstream = 2 * Länge in z- Richtung = ~9m
- Downstream = 10 * Länge in z-Richtung = ~45m
- Outer side = 3 * Länge in x-Richtung = ~13m
- Top = 4 * Länge in y-Richtung = ~18m
- Bottom = 0,01m (um Singularitäten und Probleme mit dem zu vermeiden)
- Symmetry = default

Details von Hüllkörper1

Hüllkörper	Hüllkörper1
Topologie	Quader
Anzahl der Ebenen	0
Versatz	Nicht einheitlich
<input type="checkbox"/> FD1, (+X)-Wert für Versatz (>0)	1 m
<input type="checkbox"/> FD2, (+Y)-Wert für Versatz (>0)	18 m
<input type="checkbox"/> FD3, (+Z)-Wert für Versatz (>0)	9 m
<input type="checkbox"/> FD4, (-X)-Wert für Versatz (>0)	13 m
<input type="checkbox"/> FD5, (-Y)-Wert für Versatz (>0)	0,01 m
<input type="checkbox"/> FD6, (-Z)-Wert für Versatz (>0)	45 m
Zielkörper	Alle Körper
Hüllkörper exportieren	Ja



16. Rechtsklick auf Hüllkörper → Erstellen (F5) → Volumenkörper sollte erstellt sein

17. Reiter „Erstellen“ → Boolesche Operation:

- Operation: Subtraktion
- Ziel-Körper: Umhüllung anwählen
- Tool-Körper: Fahrzeug anwählen → Anwenden

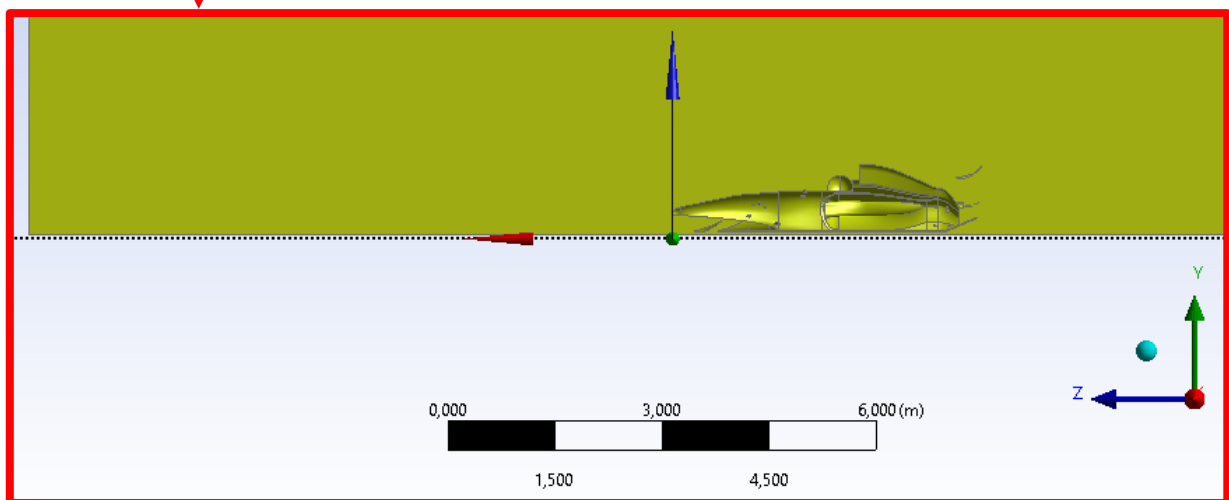
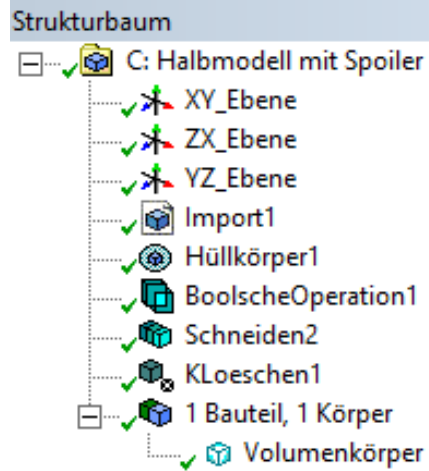
18. Rechtsklick auf BoolescheOperation1 → Erstellen (F5) → Umhüllung sollte nun Negativ-Form des Fahrzeugs besitzen

19. Reiter „Erstellen“ → Schneiden → Basisebene: YZ-Ebene → Anwenden

20. Reiter „Erstellen“ → Löschen → Körper löschen → Verschnitt anwählen → Anwenden

21. Rechtsklick auf KLoeschen1 → Erstellen (F5) → Ungewünschtes Bauteil sollte entfernt sein

Der Strukturbaum und das Modell sollten nun wie folgt aussehen:

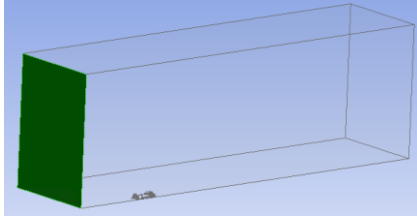


Komponenten im DesignModeler definieren

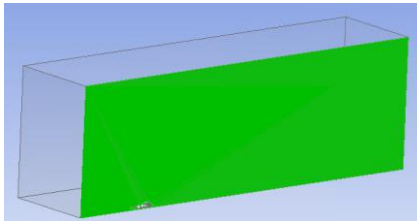
22. Rechtsklick auf Geometrie → Geometrie in DesignModeler bearbeiten...

23. Reiter „Extras“ → Komponente

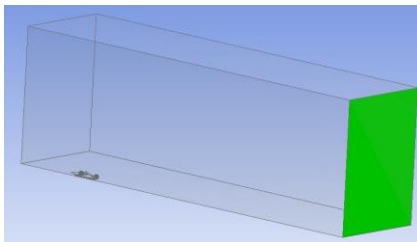
a. Komponente „Inlet“ benennen → Geometrie wählen → Anwenden



b. Komponente „Symmetry“ benennen → Geometrie wählen → Anwenden



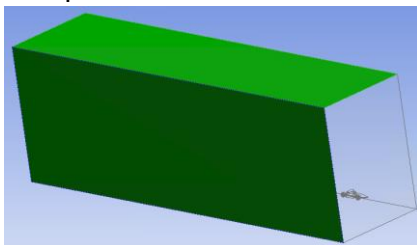
c. Komponente „Outlet“ benennen → Geometrie wählen → Anwenden



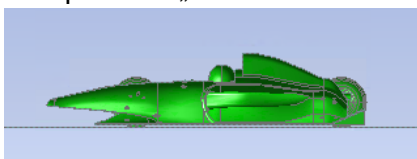
d. Komponente „Road“ benennen → Geometrie wählen → Anwenden



e. Komponente „Walls“ benennen → Geometrie wählen → Anwenden



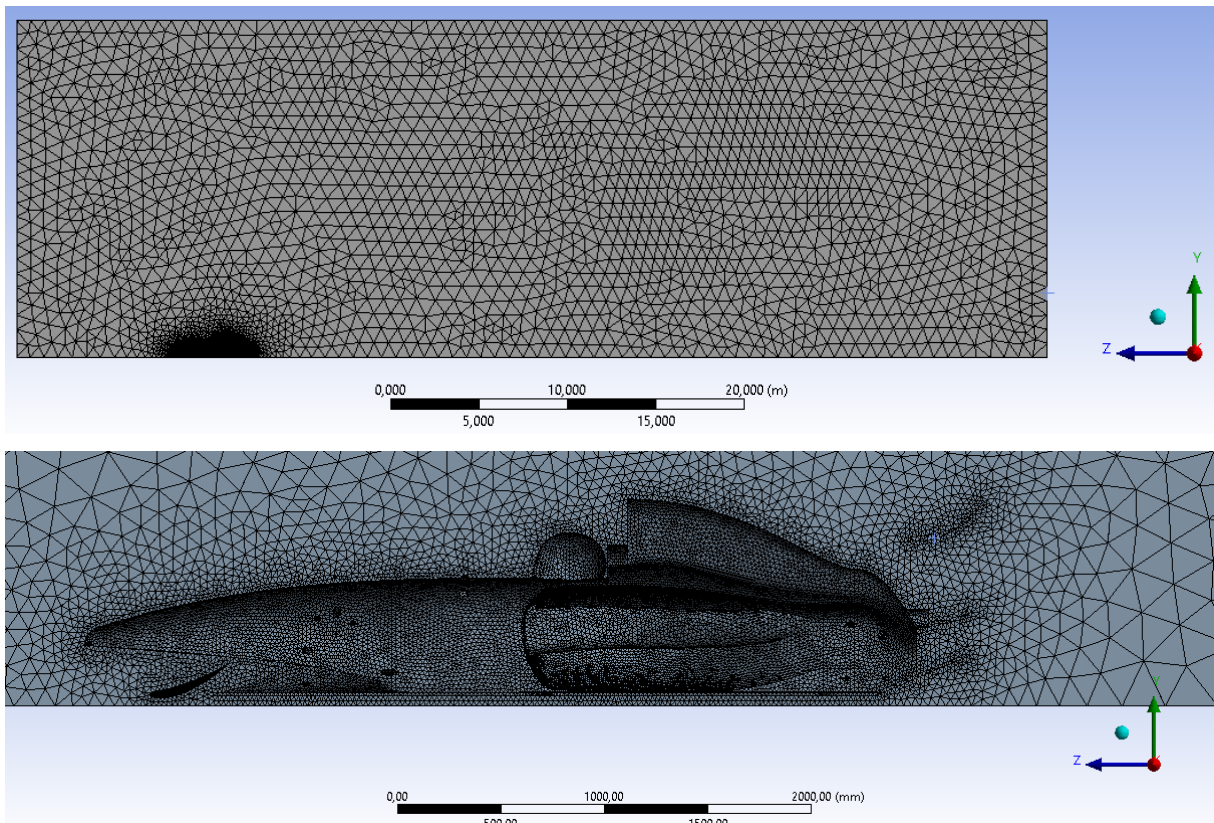
f. Komponente „Car“ benennen → Geometrie wählen → Anwenden



24. Reiter „Datei“ → DesignModeler schließen

Mesh definieren und erstellen

25. Rechtsklick auf Netz → System aktualisieren
26. Doppelklick auf Netz in der Workbench
27. Rechtsklick auf Netz → Einfügen → Elementgröße → Komponente: Car auswählen → Anwenden → Elementgröße: 800mm
28. Rechtsklick auf Netz → Einfügen → Elementgröße → Geometrie: Alle Flächen der Umhüllung (außer Car) auswählen → Anwenden → Elementgröße: 20mm
29. Rechtsklick auf Netz und „Netz erstellen“



Ohne Spoiler

Statistik	
<input type="checkbox"/> Knoten	160075
<input type="checkbox"/> Elemente	833017

Mit Spoiler

Statistik	
<input type="checkbox"/> Knoten	188962
<input type="checkbox"/> Elemente	986803

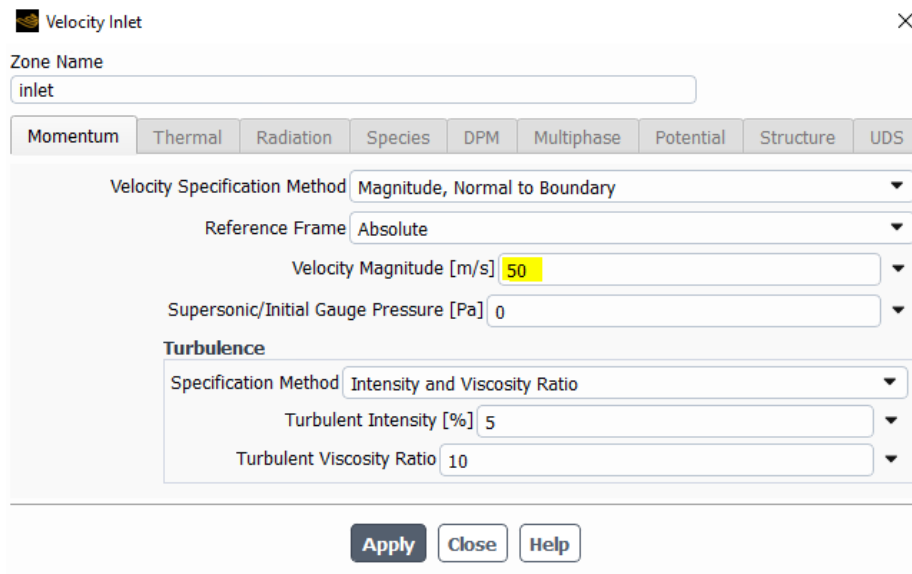
(Hinweis: Mit der Studentenlizenz können maximal 1_048_756 Zellen berechnet werden.)

30. Datei → Meshing schließen
31. Rechtsklick auf Netz und „System aktualisieren“

Setup einrichten

32. Rechtsklick auf Setup und „System aktualisieren“
33. Doppelklick auf Setup → Anzahl an Solver Processes: 4 (in meinem Fall) → Start
34. Models → Realizable k-epsilon Model with Scalable Walls Function → OK
35. Cell Zone Conditions → Fluid → Material Name: air → Apply → Close
36. Boundary Conditions (Apply & Close nach Eingabe der Werte):

a. Inlet:



Velocity Inlet [X]

Zone Name: inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude [m/s]: 50

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 0

Turbulence

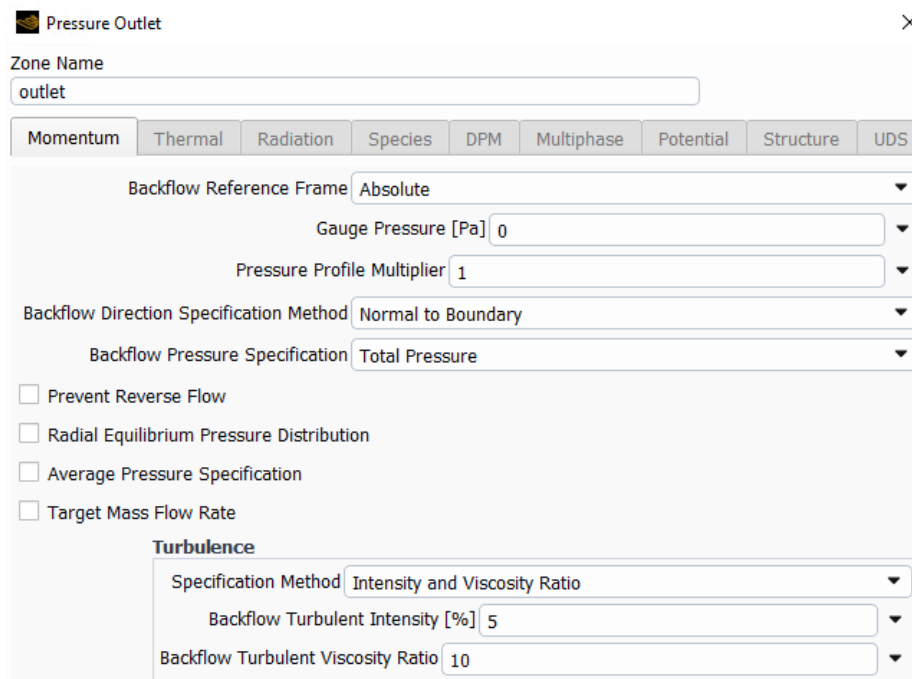
Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%]: 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

b. Outlet:



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

c. **Car:**

Wall

Zone Name
car

Adjacent Cell Zone
volumenk_rper

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ab

Wall Motion
☒ Stationary Wall
☐ Moving Wall

Motion
☒ Relative to Adjacent Cell Zone

Shear Condition
☒ No Slip
☐ Specified Shear
☐ Specularity Coefficient
☐ Marangoni Stress

Wall Roughness
Roughness Models
☒ Standard
☐ High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness
 Roughness Height [m] 0
 Roughness Constant 0.5

d. **Road** (Straße wird als Moving Wall definiert, um “echte” Fahrt zu simulieren.):

Wall

Zone Name
road

Adjacent Cell Zone
volumenk_rper

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ab

Wall Motion
☐ Stationary Wall
☒ Moving Wall

Motion
☒ Relative to Adjacent Cell Zone
☐ Absolute
☒ Translational
☐ Rotational
☐ Components

Speed [m/s] 50

Direction
 X 0
 Y 0
 Z -1

Shear Condition
☒ No Slip
☐ Specified Shear
☐ Specularity Coefficient
☐ Marangoni Stress

Wall Roughness
Roughness Models
☒ Standard
☐ High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness
 Roughness Height [m] 0
 Roughness Constant 0.5

e. **Walls:** (Slip Boundary Condition, d.h Schubspannungen an der Wand = 0, wodurch Tangentialgeschwindigkeitsgradient verschwindet.

Warum? Vereinfachung der Simulation → reduzierter Rechenaufwand!

Wall

Zone Name
walls

Adjacent Cell Zone
volumenk_rper

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ab

Wall Motion
☒ Stationary Wall
☐ Moving Wall

Motion
☒ Relative to Adjacent Cell Zone

Shear Condition
☐ No Slip
☒ Specified Shear
☐ Specularity Coefficient
☐ Marangoni Stress

Shear Stress
 X-Component [Pa] 0
 Y-Component [Pa] 0
 Z-Component [Pa] 0

Wall Roughness
Roughness Models
☒ Standard
☐ High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness
 Roughness Height [m] 0
 Roughness Constant 0.5

37. Methods → werden standardmäßig belassen, daher Klick auf Default:

Reference Values definieren

38. Doppelklick auf Reference Values:

- Area:
 - Fahrzeug ohne Spoiler: 0.57480m²
 - Fahrzeug mit Spoiler: 0.62035 m²
- Length (sollte irrelevant sein, wurde aber zur Sicherheit angegeben)
 - Fahrzeug ohne Spoiler 4.2778m
 - Fahrzeug ohne Spoiler 4.5358m

Report Definitions erstellen

39. Doppelklick auf Report Definitions → New... → Force Report:

a. Drag → Drag Coefficient

Drag Report Definition

Name:

Options

☐ Per Zone

Average Over (Iterations):

Force Vector

X: Y: Z:

Report Files [0/0]

Report Plots [0/0]

Create

☒ Report File

☒ Report Plot

Frequency:

☒ Print to Console

☐ Create Output Parameter

Report Output Type

☒ Drag Coefficient

☐ Drag Force

Zones:

- car
- road
- walls

→ OK

b. Lift → Lift Coefficient:

Lift Report Definition

Name:

Options

☐ Per Zone

Average Over (Iterations):

Force Vector

X: Y: Z:

Report Files [0/1]

Report Plots [0/1]

Create

☒ Report File

☒ Report Plot

Frequency:

☒ Print to Console

☐ Create Output Parameter

Report Output Type

☒ Lift Coefficient

☐ Lift Force

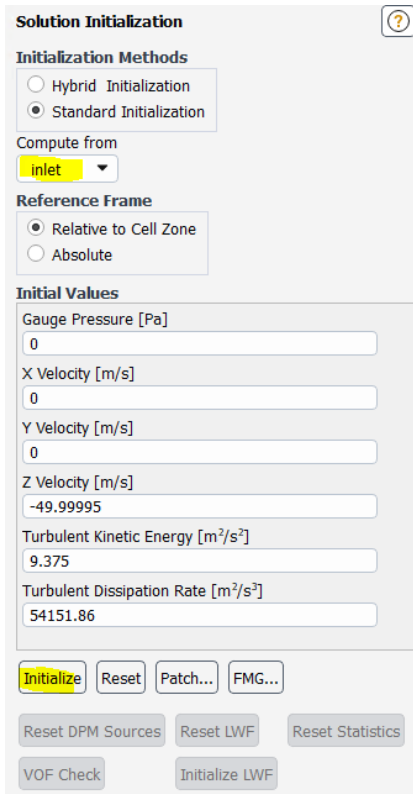
Zones:

- car
- road
- walls

→ OK

Solution initialisieren und berechnen

40. Doppelklick auf Initialization → Standard Initialization:



Solution Initialization

Initialization Methods

☐ Hybrid Initialization
☒ Standard Initialization

Compute from
inlet

Reference Frame

☒ Relative to Cell Zone
☐ Absolute

Initial Values

Gauge Pressure [Pa]
0

X Velocity [m/s]
0

Y Velocity [m/s]
0

Z Velocity [m/s]
-49.99995

Turbulent Kinetic Energy [m²/s²]
9.375

Turbulent Dissipation Rate [m²/s³]
54151.86

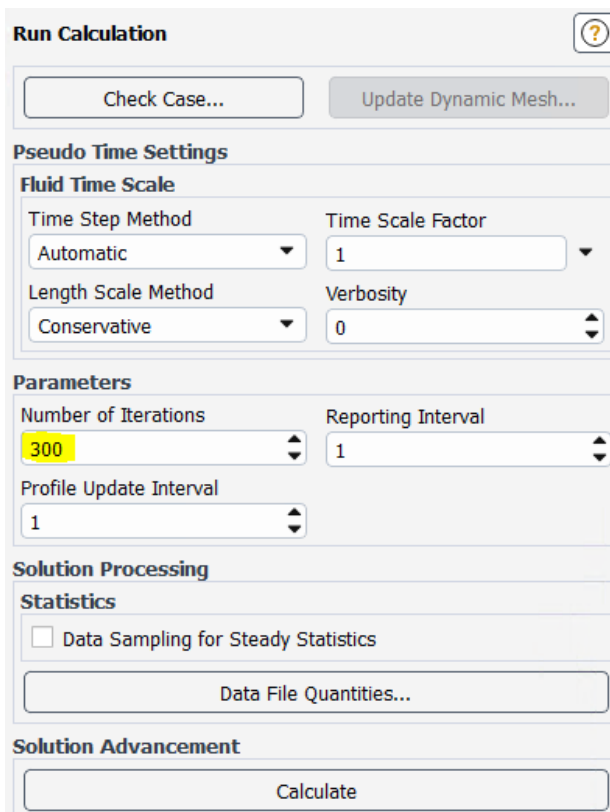
Initialize Reset Patch... FMG...

Reset DPM Sources Reset LWF Reset Statistics

VOF Check Initialize LWF

→ Initialize

41. Doppelklick auf Run Calculation:



Run Calculation

Check Case... Update Dynamic Mesh...

Pseudo Time Settings

Fluid Time Scale

Time Step Method: Automatic Time Scale Factor: 1

Length Scale Method: Conservative Verbosity: 0

Parameters

Number of Iterations: 300 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Solution Processing

Statistics

☐ Data Sampling for Steady Statistics

Data File Quantities...

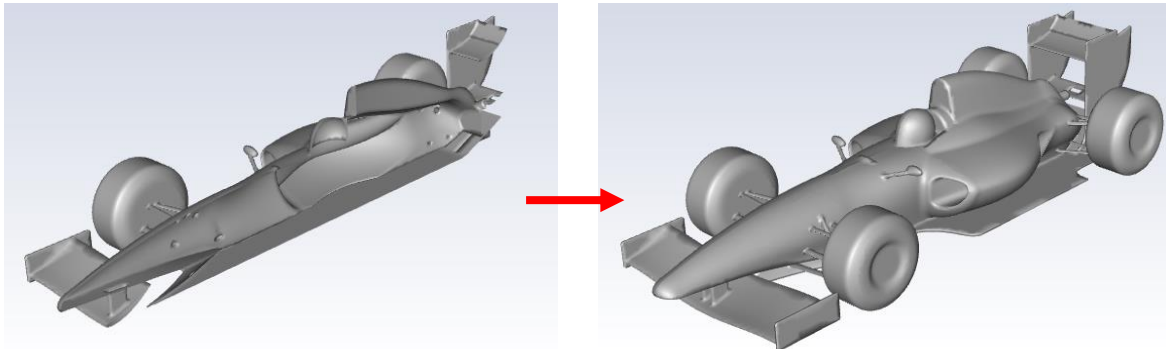
Solution Advancement

Calculate

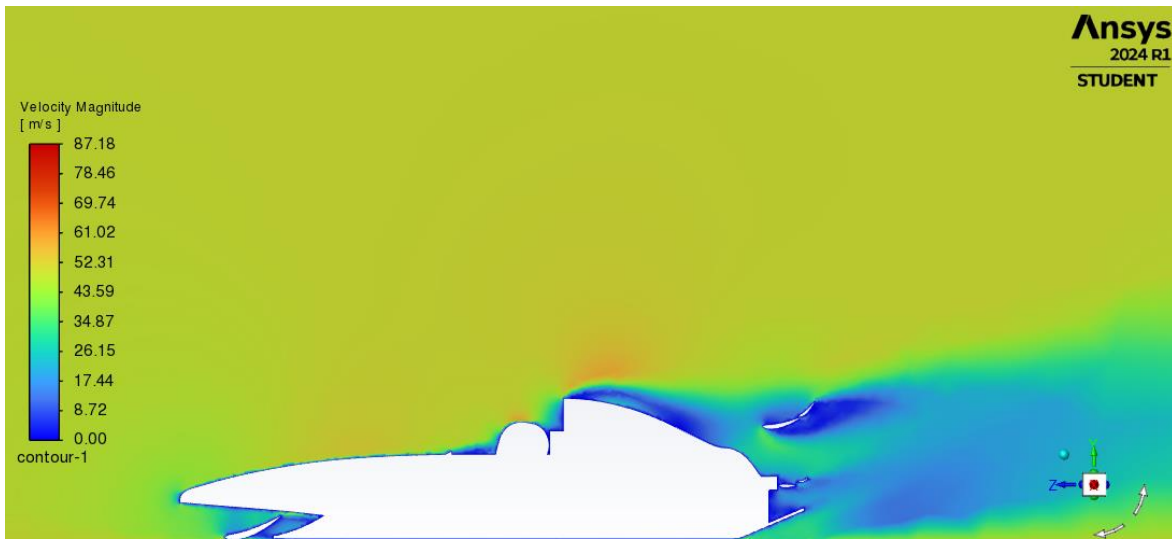
→ Calculate

Post-Processing:

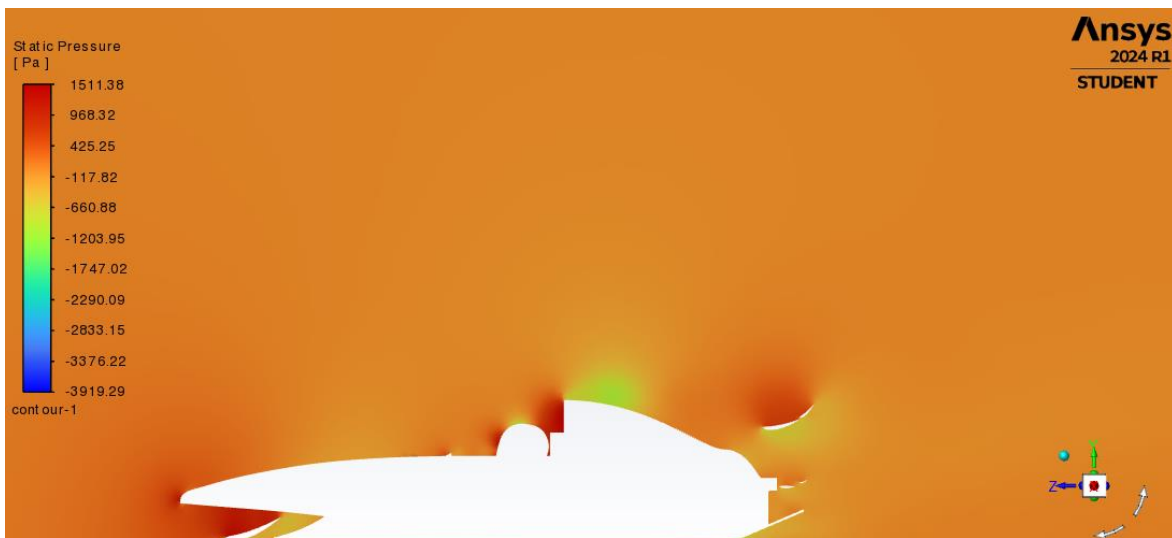
42. Im Tab "View" → Views → Mirror Planes: symmetry → Apply



43. Im Tab "Results" → Contours → Velocity Magnitude, Surface: symmetry → Apply
(Global Range abwählen)

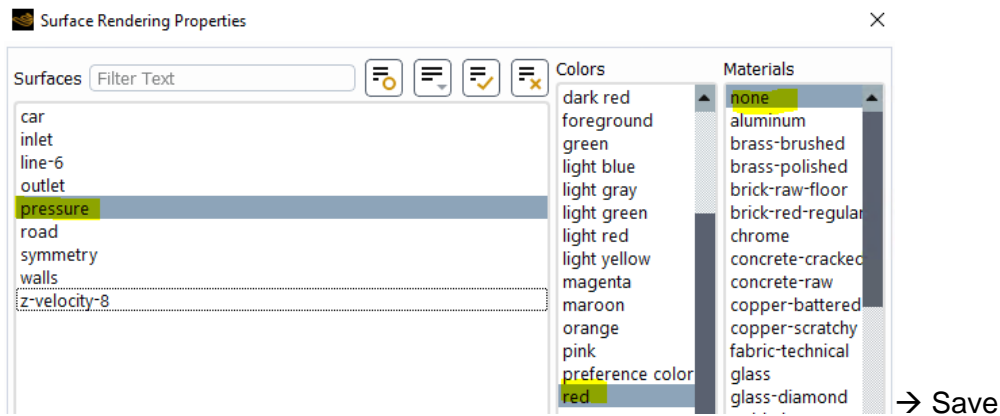
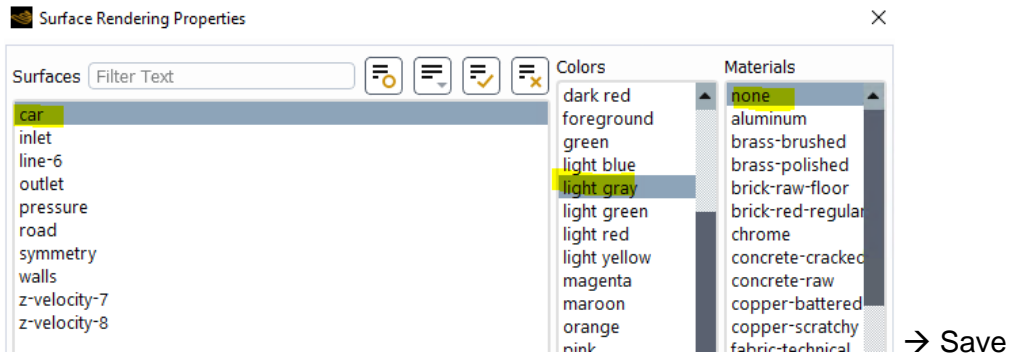


44. Im Tab "Results" → Contours → Static Pressure, Surface: symmetry → Apply
(Global Range abwählen)

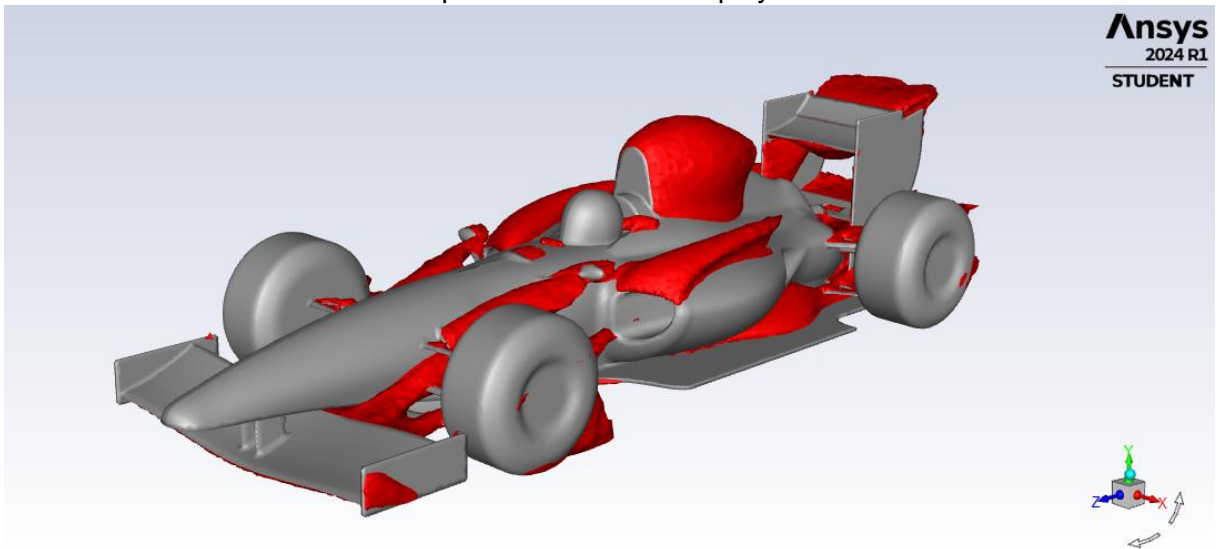


45. Im Tab "Results" → Iso-Surfaces → New → Total Pressure → Compute → Iso-Values: 100 → Create

46. Im Strukturbaum "Graphics" → Doppelter Linksklick auf "Mesh" → Coloring by Surface:



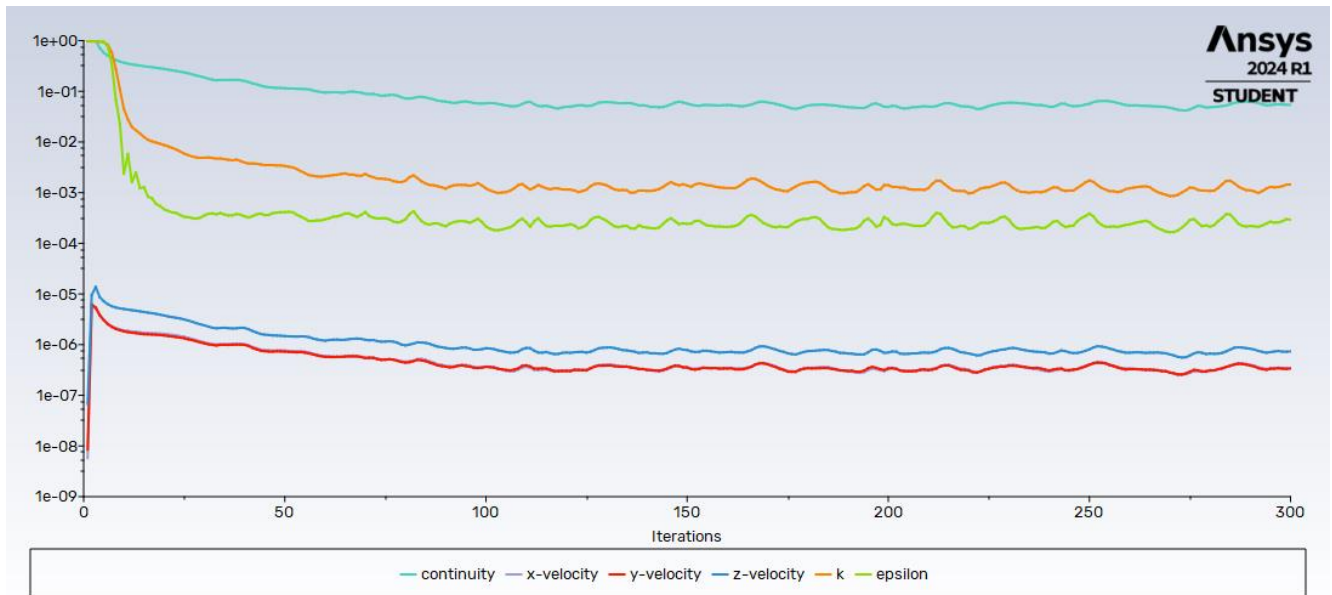
47. Auswählen von Surfaces car und pressure → Save/Display



4. Ergebnisse und Diskussion

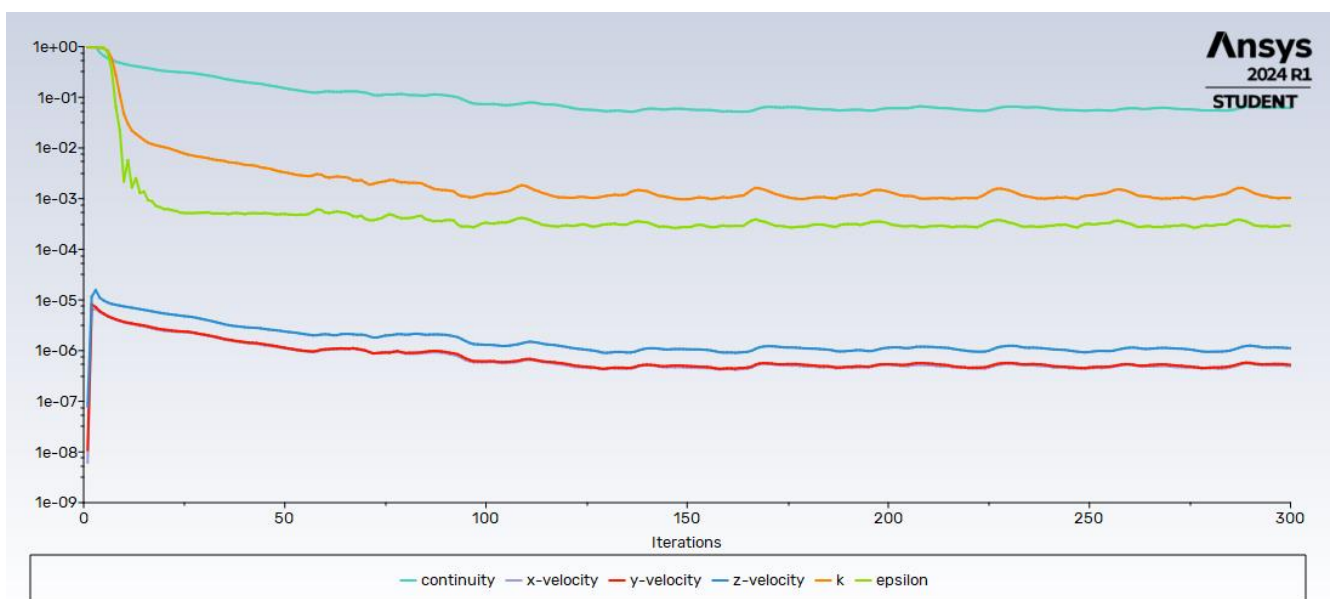
4.1 Residuen

Ohne Spoiler



Die Lösung konvergiert nach ca. 100 Iterationen.

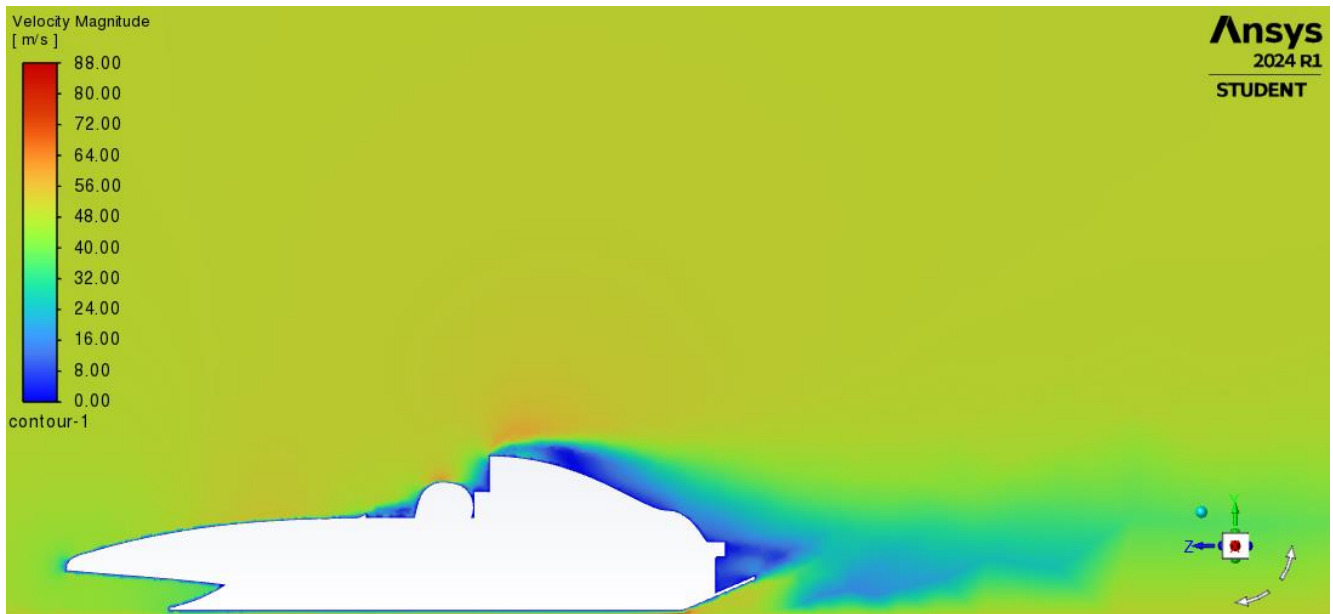
Mit Spoiler



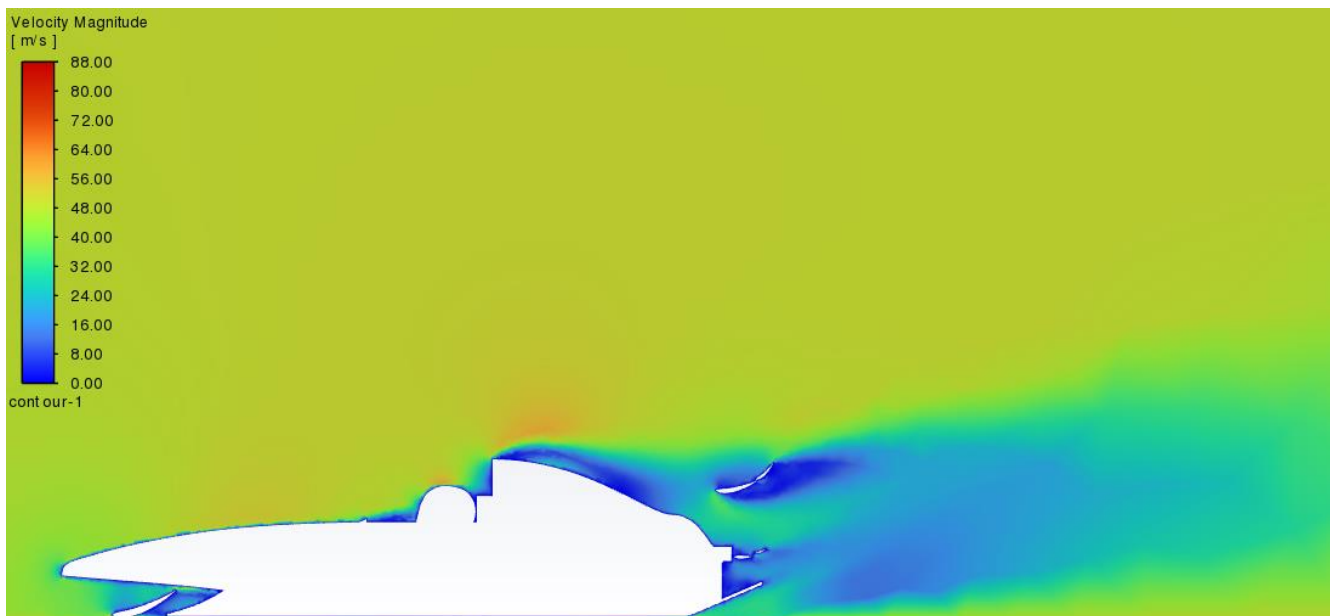
Die Lösung konvergiert nach ca. 100 Iterationen.

4.2 Strömungsgeschwindigkeit

Ohne Spoiler

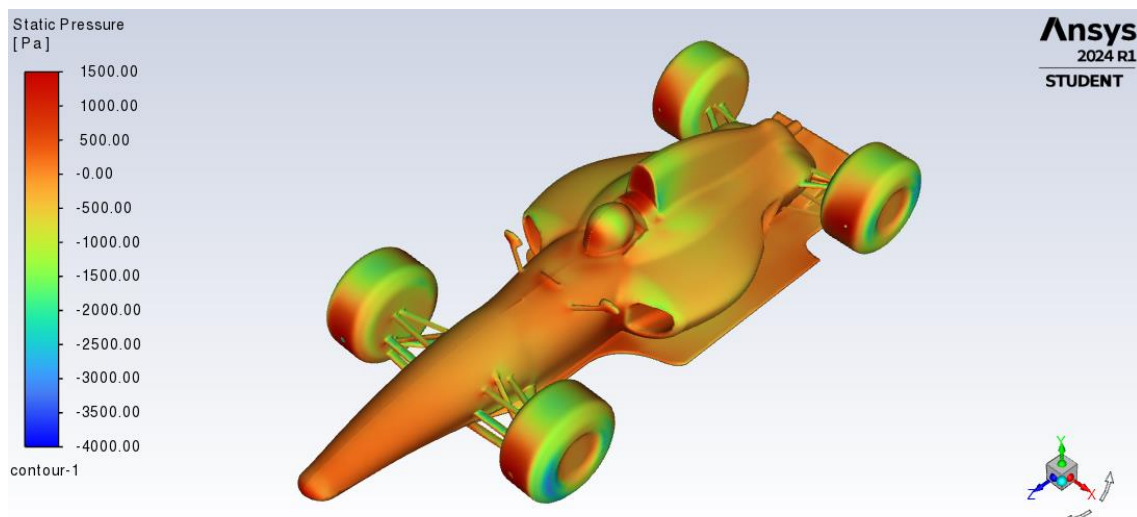
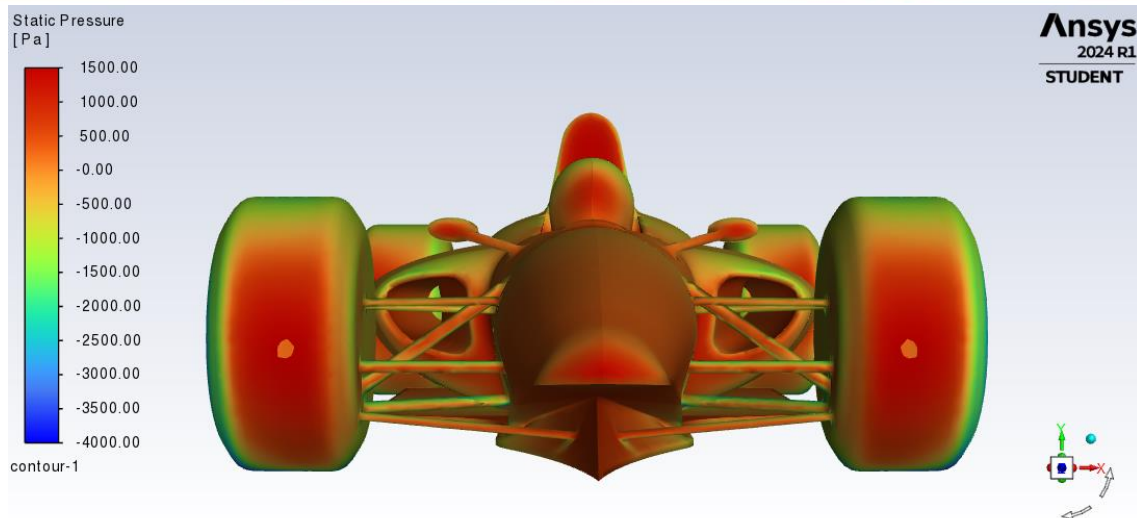
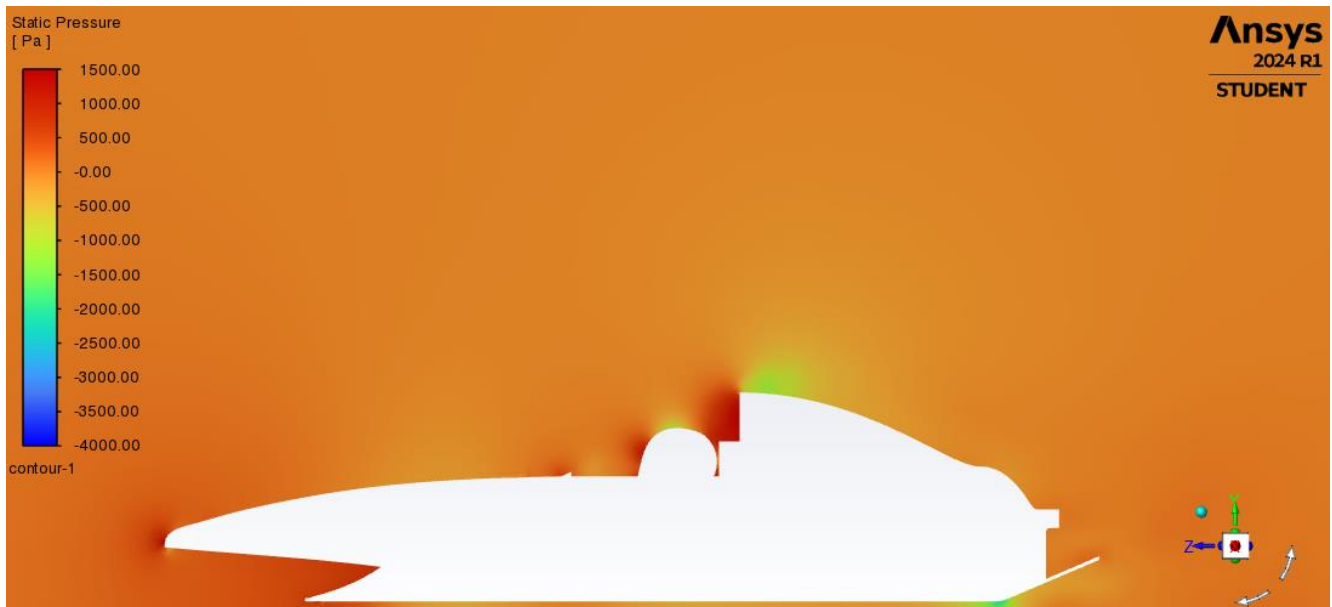


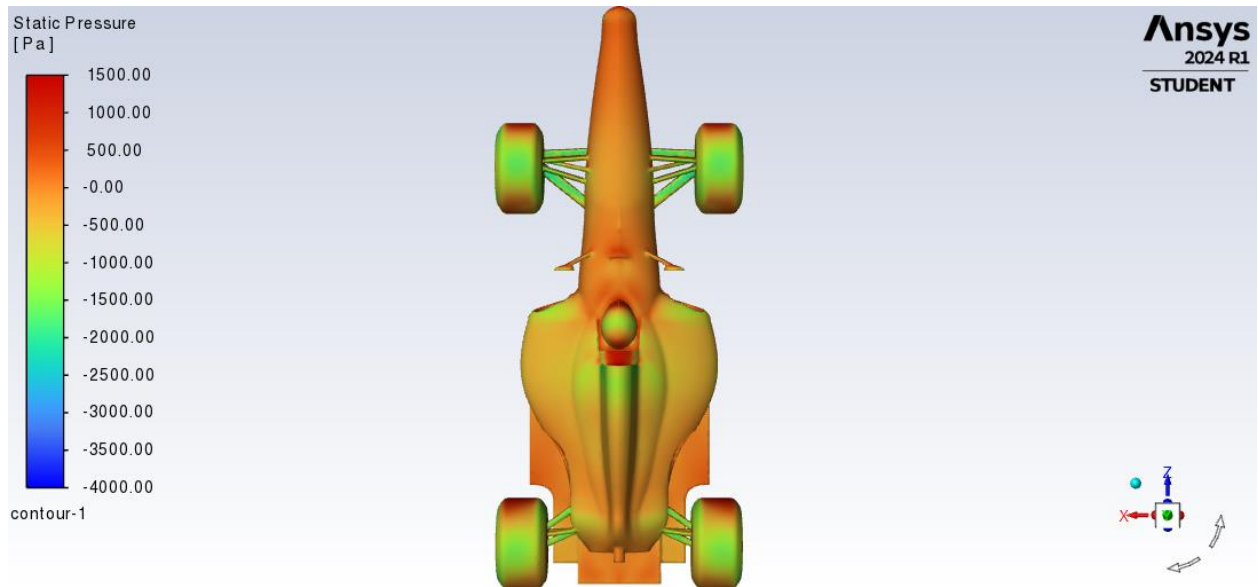
Mit Spoiler



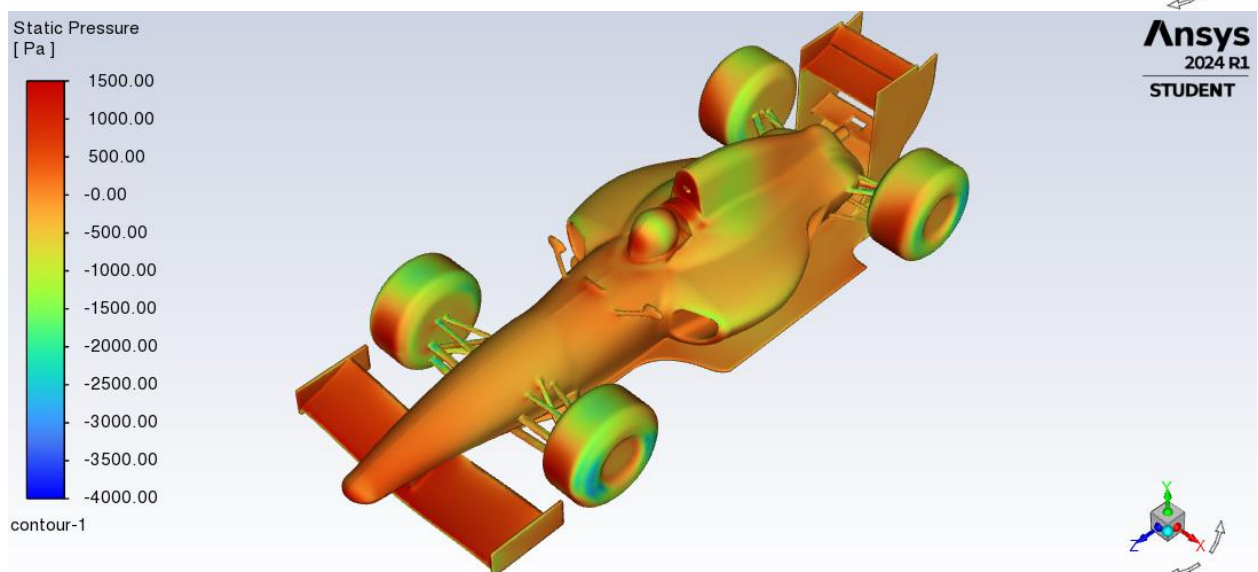
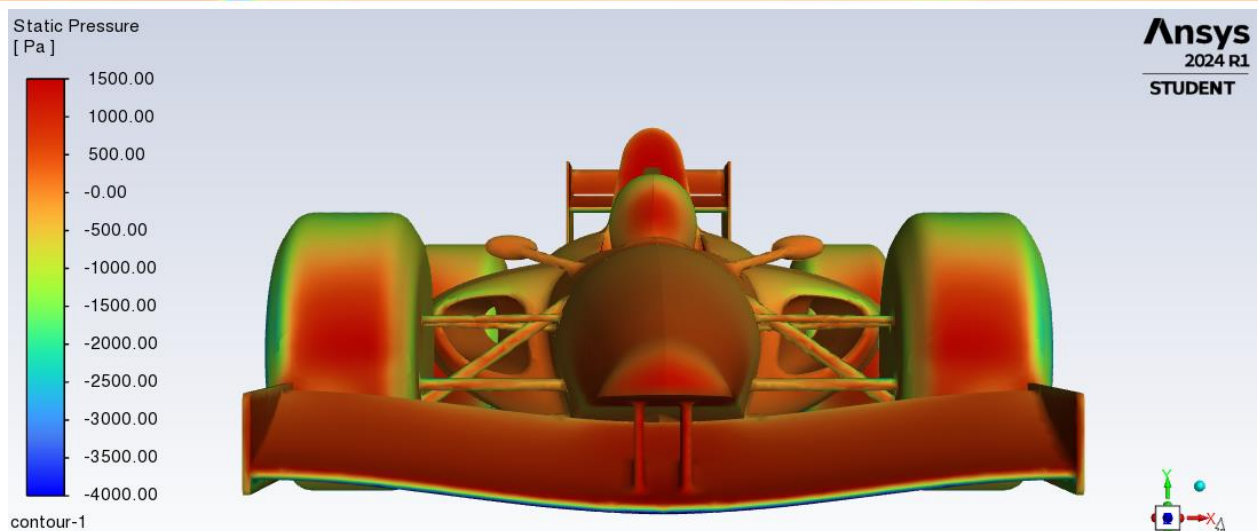
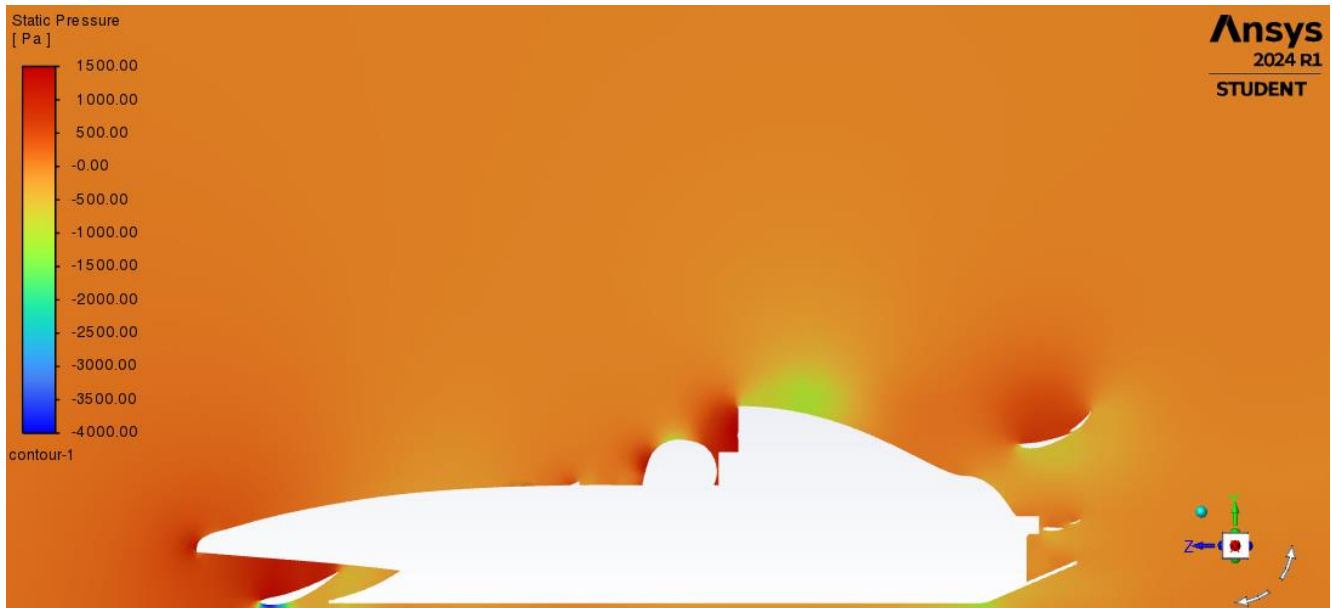
4.3 Statische Druckverteilung

Ohne Spoiler

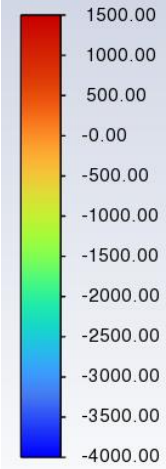




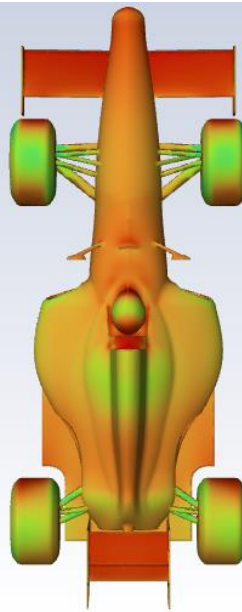
Mit Spoiler



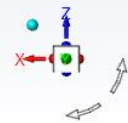
Static Pressure
 [Pa]



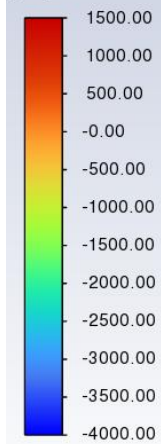
contour-1



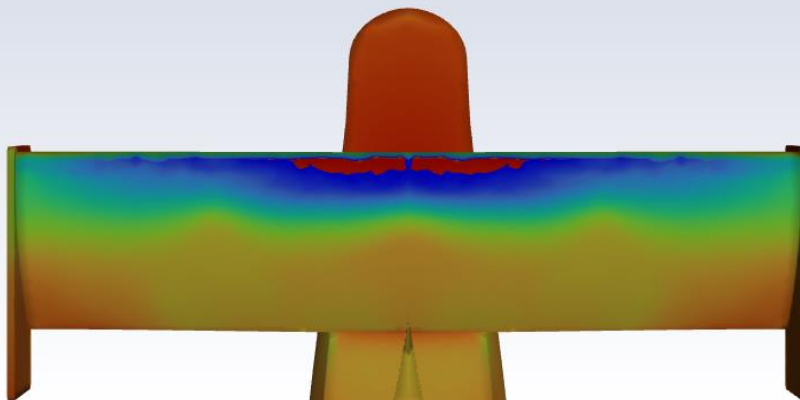
Ansys
 2024 R1
 STUDENT



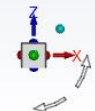
Static Pressure
 [Pa]



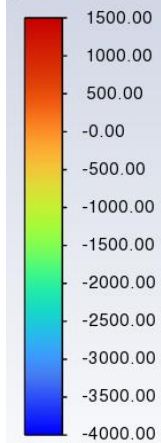
contour-1



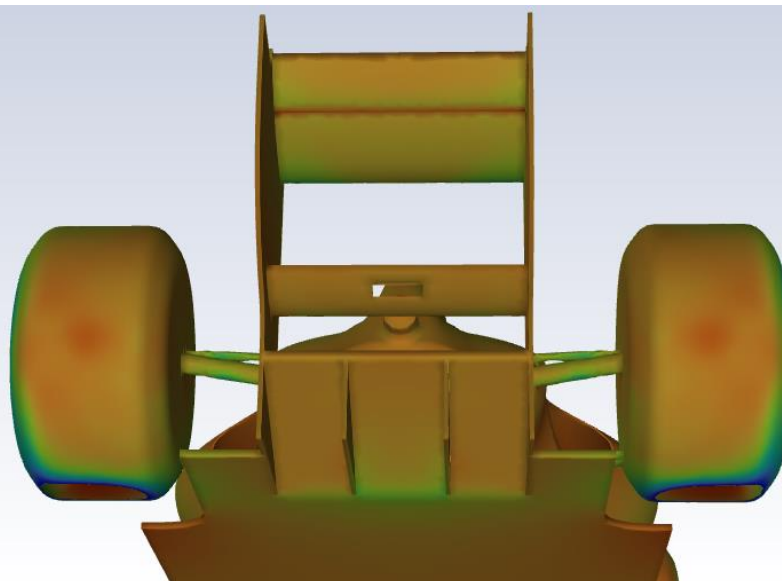
Ansys
 2024 R1
 STUDENT



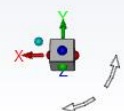
Static Pressure
 [Pa]



contour-1



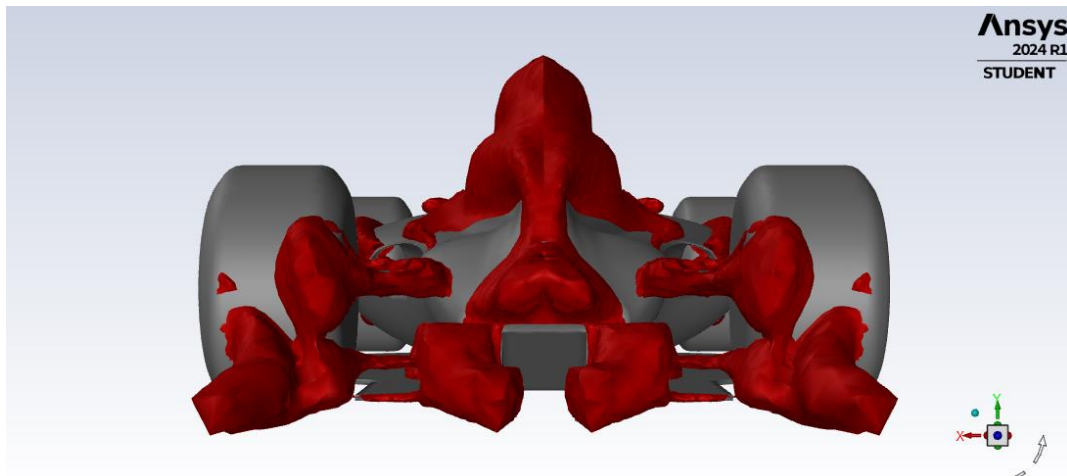
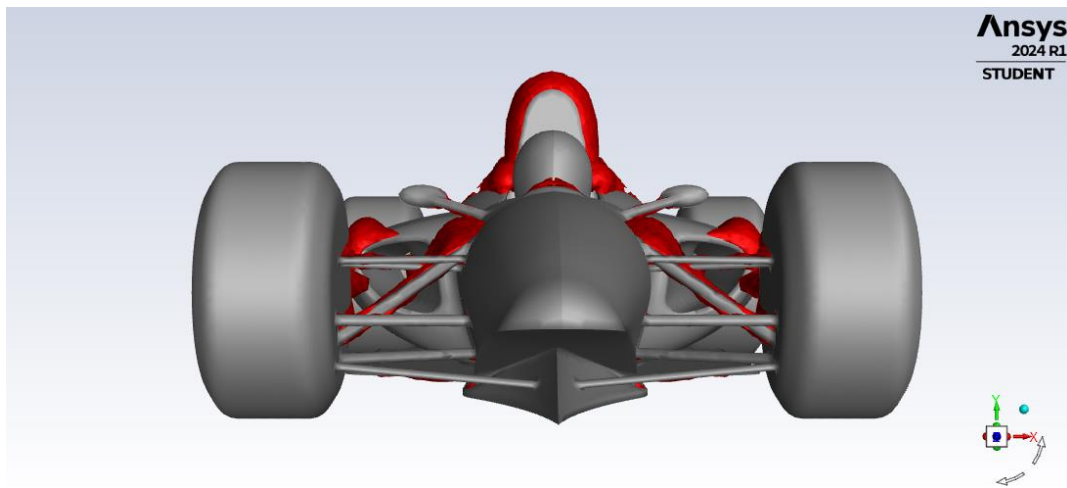
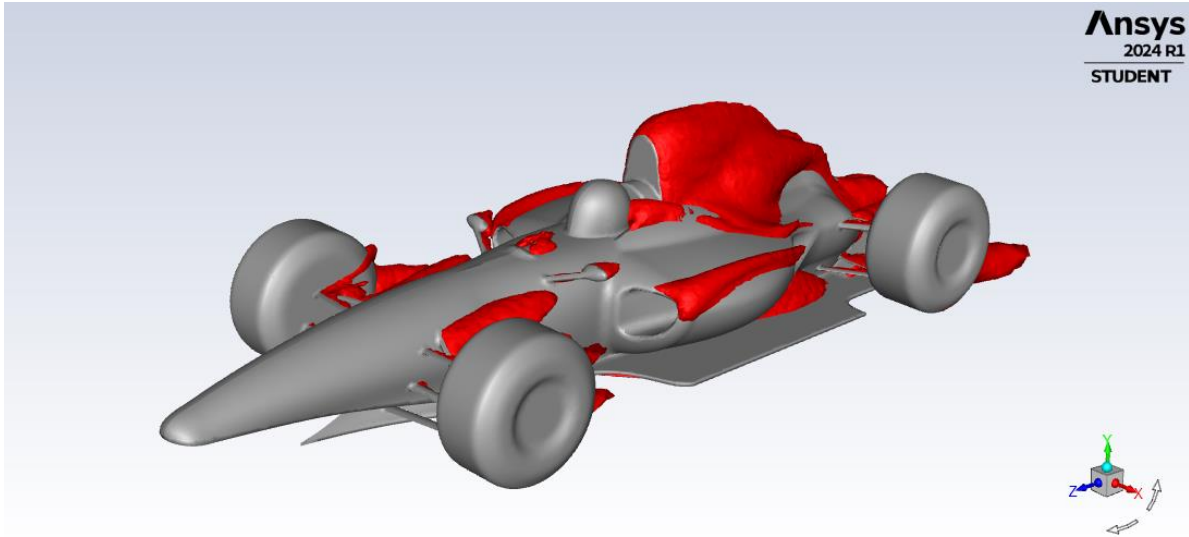
Ansys
 2024 R1
 STUDENT

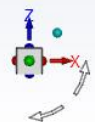
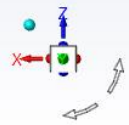
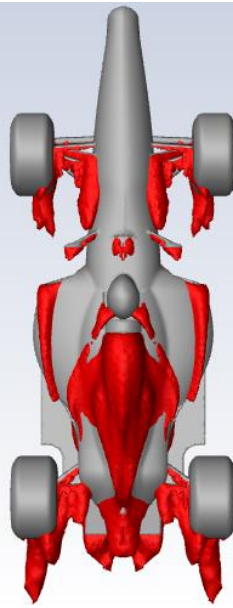


4.4 Gesamte Druckverteilung

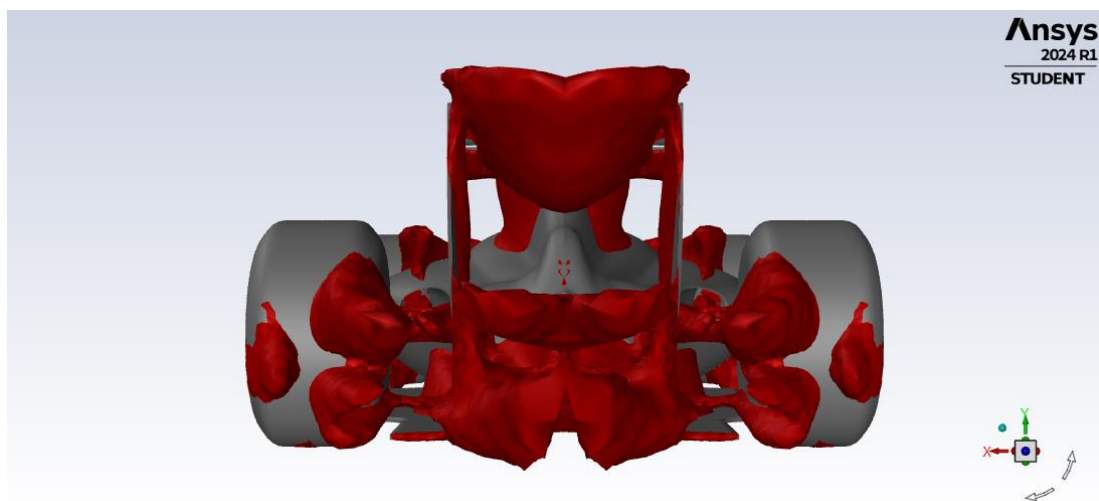
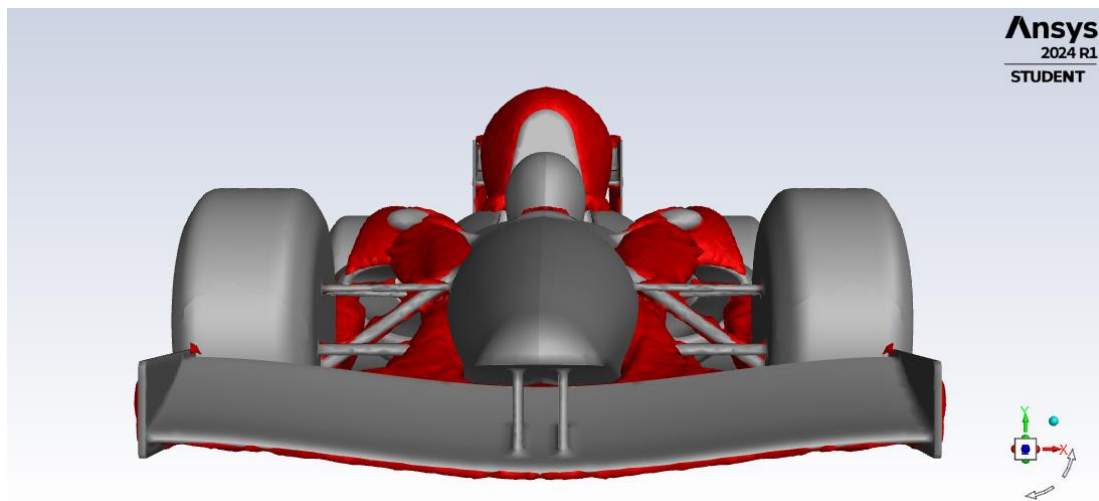
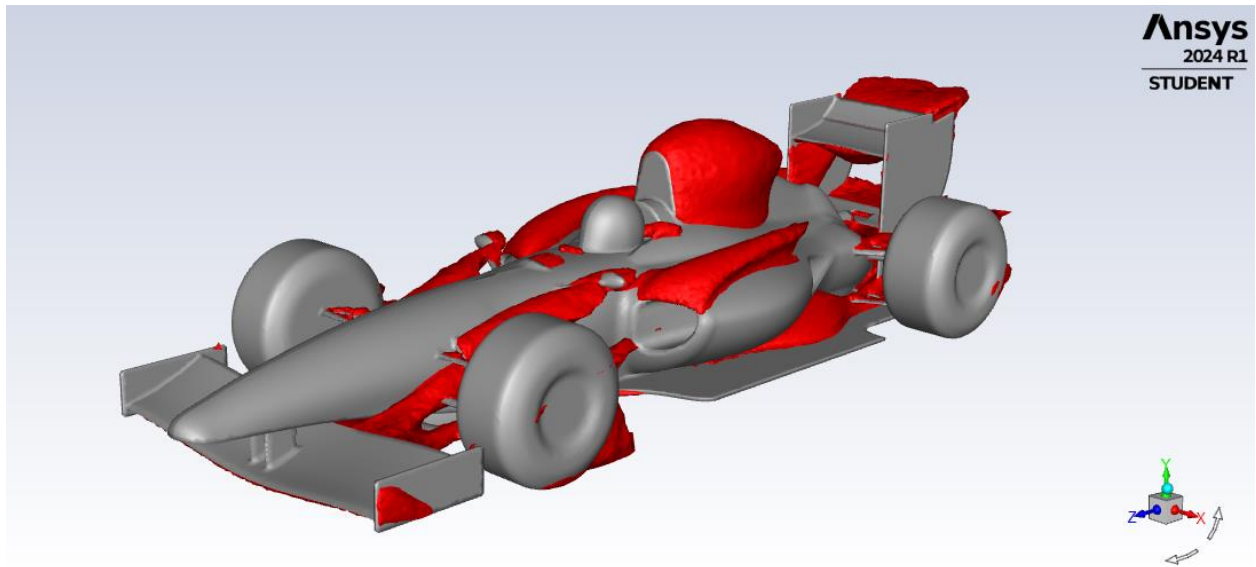
Die roten Bereiche repräsentieren ISO-Flächen, die ein Druckniveau von 100 Pascal darstellen. Diese ISO-Flächen werden verwendet, um Zonen zu identifizieren, in denen es zu Verlusten oder niedriger Energie kommt, was zur Erzeugung von Luftwiderstandskräften beiträgt.

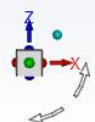
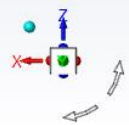
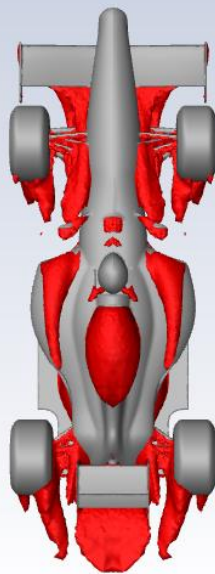
Ohne Spoiler



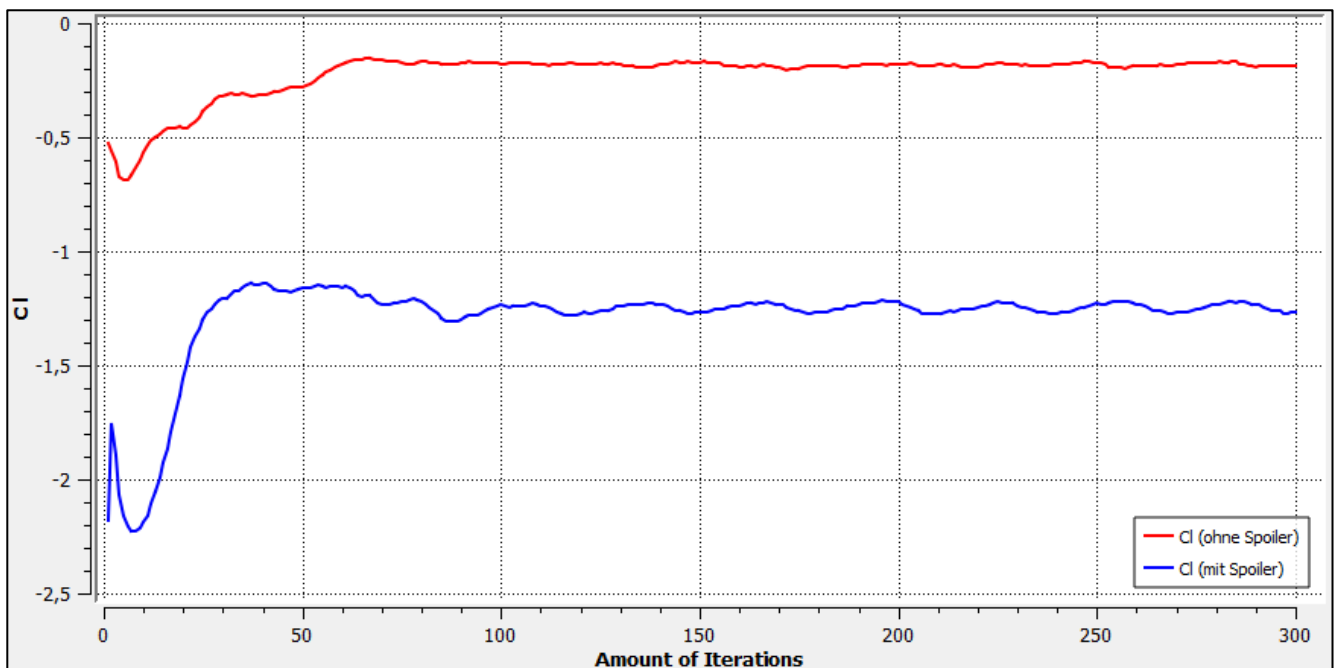
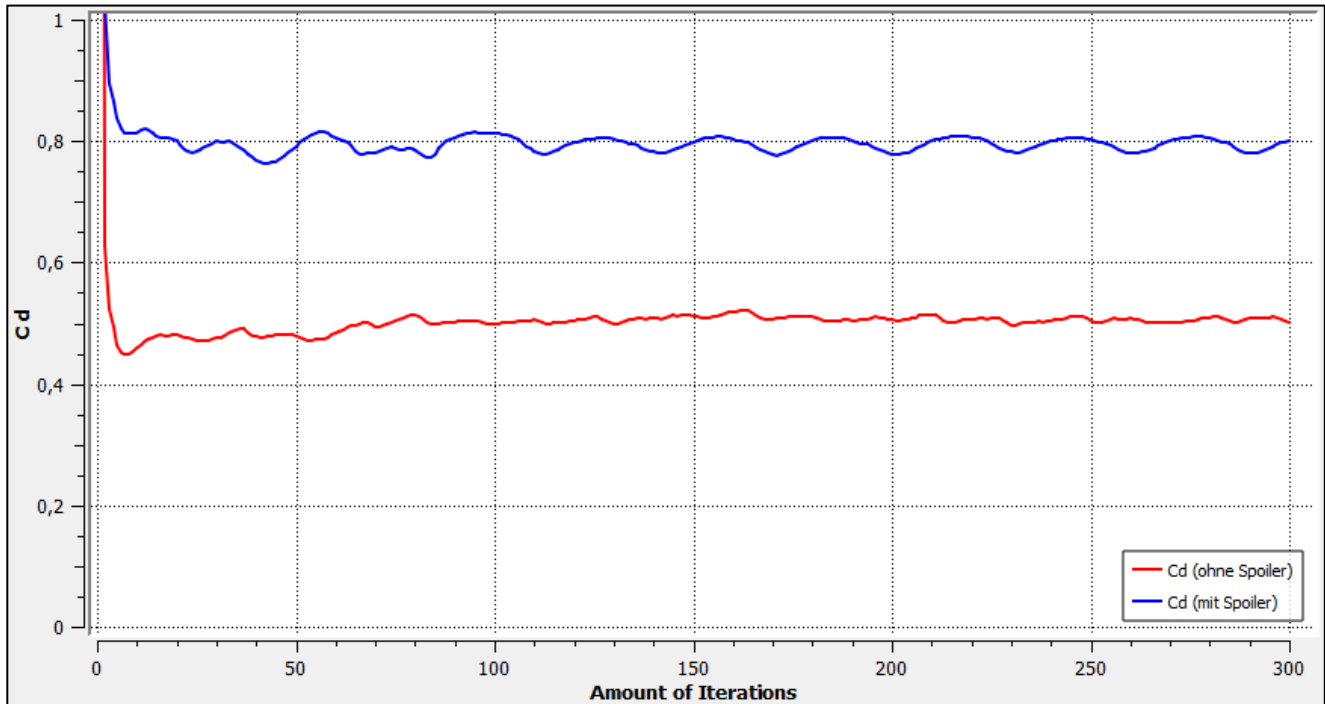


Mit Spoiler





4.5 Strömungswiderstand & -auftrieb



Die Ergebnisse der C_l - und C_d -Werte können im Verzeichnis `.IWS2024_CFD_Abschlussprojekt_Gasser_files\dp0\FFF-5\Fluent` in den Dateien `cl-rfile.out` und `cd-rfile.out` abgerufen werden.

Damit die C_l - und C_d -Werte sinnvoll verglichen werden können, wird der Durchschnitt der letzten 100 Iterationen gebildet. Dies erfolgt mithilfe des folgenden Python-Skripts:

```
import os

def get_txt_files(directory: str = ""):
    return [file for file in os.listdir(directory) if file.endswith(".txt")]

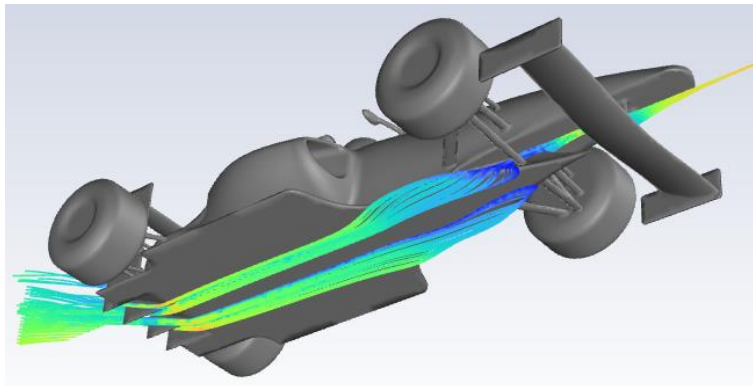
def read_data(file_path: str) -> list[float]:
    with open(file_path, "r") as f_in:
        return [float(line.strip().split(",")[1]) for line in f_in.readlines()[1:]]

def calculate_average_value(values: list[float], last_n: int) -> float:
    last_values = values[-last_n:]
    return round(sum(last_values) / len(last_values), 4)

def main():
    directory = "."
    files = get_txt_files(directory)
    for file in files:
        file_path = os.path.join(directory, file)
        file_name = os.path.splitext(file)[0]
        values = read_data(file_path)
        average_last_100 = calculate_average_value(values, last_n=100)
        print(f"Average of the last 100 values in {file_name}: {average_last_100}")

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Hinweis: Beide Modelle besitzen sowohl eine Bodenplatte als auch einen Heckdiffuser.



Damit ergeben sich folgende Ergebnisse:

	# of iterations	Velocity [m/s]	Cl	Cd	Cl/Cd
Ohne Spoiler	300	50	-0.1823	0.5055	-0.3606
Mit Spoiler	300	50	-1.2482	0.7949	-1.5703

Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Referenzwerten aus der Literatur deutet darauf hin, dass die Simulationsergebnisse realistisch sind. Die Größenordnungen der Werte für den Auftriebskoeffizienten C_l und den Widerstandskoeffizienten C_d stimmen mit typischen Messungen für ähnliche aerodynamische Konfigurationen überein.

Das Verhältnis von C_l zu C_d zeigt, dass der Einsatz des Spoilers zwar eine geringe Erhöhung des Widerstandskoeffizienten C_d bewirkt, dafür aber eine signifikante Verringerung des Auftriebskoeffizienten C_l . Dieser Fakt deutet darauf hin, dass der Spoiler seinen gewünschten Zweck erfüllt.

Abschließend sei hier angemerkt, dass es weitere aerodynamische Optimierungen, wie beispielsweise die Änderung der Geometrie der Spoiler, des Diffusers und des Unterbodens gibt. Da diese Maßnahmen aber den Rahmen dieses Projektes sprengen und eine von dieser Arbeit losgelöste detaillierte Simulation des Strömungsverhaltens der einzelnen Bauteile benötigen würde, wird dies lediglich als weitere Vorgehensweise in einem anderen Projekt empfohlen.

5. Lessons Learned

Problematische Geometrien beim Meshing anzeigen

Beim Meshen von komplexeren Körpern ist es hilfreich im Meshing per Rechtsklick auf die Fehlermeldung zu klicken und „Betroffene Geometrien anzeigen“ auszuwählen. Dadurch kann erkannt werden, welche problematischen Flächen angepasst werden müssen. Eine kleinere Elementgröße für diese spezifische Fläche sollte das Problem beheben.

Korrekte Reference Values angeben

Bei der Berechnung der Cd- und Cl-Werte spielt nicht nur die Geschwindigkeit, sondern viel mehr die projizierte Fläche eine fundamentale Rolle. Hier empfiehlt es sich im SpaceClaim-Modeller eine Ebene hinzuzufügen, um dann mit dem Befehl „Messen“ die projizierte Fläche zu bestimmen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aerodynamische Kräfte, welche auf ein Formel-1-Auto wirken [2]	5
Abbildung 2: Druckverteilung eines symmetrischen Profils, eines gekrümmten Profils und einer Kombination beider [3]	5
Abbildung 3: Mehrteiliger Flügel eines Rennautos [4]	6
Abbildung 4: Auftriebskoeffizienten verschiedener Flügelkombinationen über den Anstellwinkel [5]	6
Abbildung 5: Drag & Lift Koeffizienten eines Fahrzeugs mit aerodynamischen Optimierungen [6]	7

Literaturverzeichnis

- [1] CADFEM: "GPU-Technologie in Ansys Fluent: Beschleunigung der Simulation statt Windkanal", 2024. [Online]
<https://www.cadfem.net/at/de/branchen-themen/referenzen/referenz/gpu-technologie-in-ansys-fluent-beschleunigung-der-simulation-statt-windkanal.html>
(Abgerufen am 01.12.2024)
- [2] Sciece Holic: „The Role of Aerodynamics in F1 Cars“, 2022.
<https://www.scienceholic.org/post/the-role-of-aerodynamics-in-f1-cars>
(Abgerufen an 27.11.2024)
- [3] J. Katz: "Race Car Aerodynamics", Bentley Publishers, 2006.
- [4] M. Hepperle: "Multi-Element Airfoil Sections", 2006. [Online]
https://www.mh-aerotools.de/airfoils/jf_multi.htm
(Abgerufen am 27.11.2024)
- [5] Simon McBeath: "Competition Car Downforce", Haynes Publishing, 1998.
- [6] Ioannis Oxyzoglou: "Design & Development of an Aerodynamic Package for an FSAE Race Car", University of Thessaly, 2017.
https://www.researchgate.net/figure/Drag-and-Lift-coefficients-of-a-FSAE-car-with-different-aerodynamic-packages_fig13_320556659
(Abgerufen am 27.11.2024)