HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN

H2YDRO
MOTION

Projektarbeit

Strömungssimulation und Windkanalmessung des H2M Fahrzeugs zur Ermittlung des c_w-Werts

Verfasser: Florian Neitzke
Oliver Laudenberg
Adrian Massler

Prüfer: Dipl. Ing. Armin Rohnen

vorgelegt am 11.09.2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis v

Tabellenverzeichnis vi

1. Einleitung 1

2. Aufgabenstellung 3

3. Numerische Strömungssimulation 5

3.1 Simulation eines Referenzkörpers 5

3.1.1 Definition von Geometrie und Randbedingungen 5

3.1.2 Netzerstellung 7

3.1.3 Turbulenzmodellierung 10

3.1.4 Ergebnisse und Ausblick 12

3.2 Untersuchung des Einflusses drehender Räder 18

3.2.1 Definition von Geometrie und Randbedingungen 18

3.2.2 Netzerstellung 20

3.2.3 Ergebnisse und Ausblick 21

3.3 Durchführung einer Netzstudie 24

3.3.1 Definition der Geometrie und Randbedingungen 24

3.3.2 Netzerstellung 27

3.3.3 Konvergenzverhalten der Netzstudie 30

3.3.4 Ergebnisse und Ausblick 32

3.4 Strömungssimulation des Fahrzeugs 34

3.4.1 Definition der Randbedingungen 34

3.4.2 Ergebnisse der Strömungssimulationen 36

3.4.3 Ausblick 39

4. Messung der Widerstandskraft im Windkanal 41

4.1 Vorbereitung der Messungen 41

4.1.1 Aufbereitung des Fahrzeugmodells 41

4.1.2 Konstruktion und Fertigung der Befestigungsvorrichtung 42

4.1.3 Installation des Fahrzeugmodells im Windkanal 43

4.2 Durchführung der Messungen 46

4.3 Auswertung 48

4.3.1 Ergebnisse der Messungen 48

4.3.2 Genauigkeit und Toleranz 48

4.3.3 Ausblick 49

5. Vergleich der Simulations- und Messergebnisse 51

6. Zusammenfassung und Ausblick 53

7. Literaturverzeichnis 55

8. Anhang 57

a. Konstruktion der Befestigungsvorrichtung (Halterung) 57

b. Anleitung zur Simulation einer umströmten Fahrzeugkarosserie mit dem Simulationsprogramm Ansys CFX 60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbringung der Randbedingungen des Referenzkörpers 6
Abbildung 2: Erstes Netz des Referenzkörpers 8
Abbildung 3: Zweites Netz des Referenzkörpers 9
Abbildung 4: Geschwindigkeitsplot von erstem (oben) und zweitem (unten) Netz 12
Abbildung 5: Geschwindigkeitsplots mit Vektoren (oben) und mit Stromlinien (unten) 13
Abbildung 6: Residuenverlauf mit k-ε Turbulenzmodell 14
Abbildung 7: c_w-Wert Verlauf der letzten 20 Iterationen mit k-ε Turbulenzmodell 15
Abbildung 8: Residuenverlauf mit k-ω Turbulenzmodell 16
Abbildung 9: c_w-Wert Verlauf der letzten 20 Iterationen mit k-ω Turbulenzmodell 17
Abbildung 10: Aufbringung der Randbedingungen des Rads 18
Abbildung 11: Netz für die Radsimulation 20
Abbildung 12: Geschwindigkeitsplots mit Vektoren (unten) und mit Stromlinien (oben) des stehenden Rads 21
Abbildung 13: Geschwindigkeitsplot mit Vektoren des drehenden Rads 22
Abbildung 14: Geschwindigkeitsplot mit Stromlinien des drehenden Rads 23
Abbildung 15: Darstellung der Geometrie 24
Abbildung 16: Quader mit herausgeschnittener Fahrzeuggeometrie (rot eingefärbt) 27
Abbildung 17: Strukturierte Flächenvernetzung des Quaders 27
Abbildung 18: Vernetzung der Fahrzeugoberfläche 28
Abbildung 19: Schnittansicht des Fahrzeugmodells umgeben von Prismenschichten 28
Abbildung 20: Darstellung der lokalen Elementgrößen-Einstellung 29
Abbildung 21: Residuenverlauf (2,576 Mill Knoten) 30
Abbildung 22: Residuenverläufe (8,841 Millionen Knoten) 31
Abbildung 23: c_w-Wert Verlauf 31
Abbildung 24: Verhältnis zwischen c_w-Wert und Knotenanzahl 33
Abbildung 25: Verlauf der Reynoldszahl bei zunehmender Geschwindigkeit 35
Abbildung 26: Verlauf des c_w-Werts bei zunehmender Geschwindigkeit 36
Abbildung 27: Druckverlauf bei 40 km/h 37
Abbildung 28: Geschwindkeitsvektoren bei 40 km/h 38
Abbildung 29: Geschwindigkeitsplot bei 40 km/h 38
Abbildung 30: Detailansicht A und Detailansicht B 39
Abbildung 31: Unbearbeitetes 3D-gedrucktes Fahrzeugmodell 41
Abbildung 32: Geschliffen und lackiertes Modell 42
Abbildung 33: Modellhalterung 42
Abbildung 34: Montage der Halterung am Modell 43
Abbildung 35: Installation des Fahrzeuges im Windkanal 43
Abbildung 36: Messeinrichtung 44
Abbildung 37: Messung mit Prandlsonde 44
Abbildung 38: Staudruckmessung 46
Abbildung 39: Messung des cw-Werts der Halterung und des Modells 46
Abbildung 40: Kraftwaage 47
Abbildung 41: Messung des cw-Werts der Halterung 47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl des Referenzkörpers (1) 5
Tabelle 2: Randbedingungen der Komponenten 6
Tabelle 3: Grundeinstellungen 7
Tabelle 4: Beispiel für Druck- und Schubkomponente (1) 9
Tabelle 5: Vergleich der Grenzschicht von verschiedenen Turbulenzmodellen 10
Tabelle 6: Änderung der Randbedingungen zur vorigen Simulation 19
Tabelle 7: Randbedingungen der Komponenten 25
Tabelle 8: Grundeinstellungen 26
Tabelle 9: Netzparameter (2575898 Knoten) 32
Tabelle 10: Netzparameter der Netzstudie 33
Tabelle 11: Zu verändernde Simulationsparameter 34
Tabelle 12: Variablen der Reynoldszahlgleichung 35
Tabelle 13: Simulationsergebnisse 36
Tabelle 14: Berechnung des Staudrucks 45
Tabelle 15: Einzustellende Drücke 45
Tabelle 16: Ergebnistabelle der cw-Wertmessungen 48
Tabelle 17: Vergleich der gemessenen und berechneten Werte 51

1. Einleitung

Strömungen lassen sich durch bestimmte physikalische Grundprinzipien beschreiben:

- Erhaltung von Masse
- Erhaltung von Energie
- Erhaltung von Impulsen

Diese Grundprinzipien können durch partielle Differentialgleichungen beschrieben werden und bilden die Grundlage für die Durchführung von Strömungssimulationen. Für die Interpretation solcher numerischen Ergebnisse ist das Verständnis dieser drei physikalischen Grundprinzipien vorausgesetzt.

Bestimmung sowie Aufbringung der Randbedingungen, Turbulenzmodellierung, Netzgenerierung und Interpretation der Ergebnisse sind nur ein Bruchteil der Probleme, mit welchen die Strömungssimulation zu kämpfen hat. Es handelt sich hierbei nicht um ein Kochrezept, welches bei jedem Strömungsgericht angewendet werden kann, sondern eher um individuelle Herangehensweisen, die für jeden Fall ein eigens konstruiertes Konzept verlangt. Ebenso bei der Berechnung des c_w -Werts eines Straßenfahrzeugs, welcher mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen im Rahmen dieser Projektarbeit ermittelt wird. Durch den Aufbau eines geeigneten Modells und die Aufbringung der geeigneten Randbedingungen ist es möglich, die Widerstandskraft, die ein Fahrzeug erzeugt, durch CFD (Computitional Fluid Dynamics) zu bestimmen.

Durch experimentelle Versuche können die Ergebnisse solcher Strömungssimulationen mit realen Werten validiert werden. Durch die Messung von Drücken und Geschwindigkeiten, sowie Umgebungsverhältnissen kann die Widerstandskraft auch in einem Windtunnel gemessen werden. Dies geschieht mittels mechanischer Apparaturen, welche beispielsweise aus einer Waage und einer Drahtseilkonstruktion bestehen, oder auch durch die Applikation von Dehnungsmesstreifen auf bestimmten Elementen. Mit den Messergebnissen kann anschließend die Bestimmung des c_w-Werts erfolgen.

2. Aufgabenstellung

Die nachfolgende Projektarbeit, sowie die Betreuung dieser, ist in Zusammenarbeit mit dem Hydro 2 Motion Team entstanden. Aufgabe dieses Vorhabens ist die Ermittlung des c_w -Werts eines Brennstoffzellenfahrzeugs des Hydro 2 Motion Teams. Die Ermittlung bzw. Berechnung des c_w-Werts kann durch diverse Verfahren erfolgen. In dieser Arbeit wird genauer auf die Vorgehensweise bei einer Strömungssimulation und bei der Messung der Widerstandskraft im Windkanal eingegangen. Es wird grundsätzlich immer die Widerstandskraft gemessen bzw. berechnet und mit Hilfe von Dichte, Geschwindigkeit und projizierter Fläche der c_w-Wert wie folgt berechnet.

$$c_W = \frac{2 * F_W}{\rho * v^2 * A}$$

Neben der Strömungssimulation wird auch die Windkanalmessung komplett selbstständig durchgeführt und ausgewertet. Hierfür wird ein 1:6 Modell mittels 3D-Druck erstellt und auf eine eigens konstruierte Halterung montiert, um die Fixierung des Modells im Windtunnel zu gewährleisten. Zusätzlich wird die Oberfläche des Modells, der des eigentlichen Fahrzeugs angepasst um mögliche Messfehler durch Reibung zu verhindern.

Die Strömungssimulation soll dem Hydro 2 Motion Team einen ersten Einblick in die Welt der CFD ermöglichen und zukünftige Projekte auf diesem Gebiet unterstützen. Hierfür wird zusätzlich zur eigentlichen Simulation eine Anleitung erstellt, welche die Vorgehensweise einer Umströmung eines Fahrzeugs veranschaulicht. Es wird sukzessive erklärt, wie in dieser Arbeit vorgegangen wird und wie das Team auch in Zukunft im Rahmen einer CFD-Simulation vorgehen sollte.

3. Numerische Strömungssimulation

Das nachfolgende Kapitel beinhaltet die numerische Strömungssimulation zur Untersuchung eines Referenzkörpers, die Simulation mit stehenden sowie drehenden Rädern und zum Abschluss die endgültige Simulation des kompletten Fahrzeugs.

3.1 Simulation eines Referenzkörpers

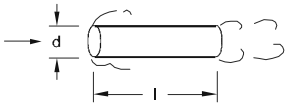
Die Untersuchung der Umströmung eines Körpers mittels einer CFD-Analyse bedarf gewisser Vorarbeit, sowie einer Validierung. Eine CFD-Simulation funktioniert so gut wie immer und es werden auch meistens Ergebnisse geliefert, welche dann allerdings vom Benutzer richtig interpretiert werden müssen. In diesem Fall handelt es sich um die Umströmung eines Fahrzeuges, von welchem keine validierten Ergebnisse über den Strömungswiderstandskoeffizienten (c_w-Wert) vorhanden sind. Somit ist eine erste grobe Validierung einer CFD-Simulation mit Hilfe eines Referenzkörpers notwendig. Um nicht zu stark von der Geometrie des eigentlichen Fahrzeuges abzuweichen, wird die die Validierung mit einem längs angeströmten Zylinder durchgeführt, von welchem der genaue c_w-Wert bekannt ist.

In diesem Kapitel werden insgesamt 4 Simulationen gerechnet um verschiedene Einflüsse wie Netzgenauigkeit und Turbulenzmodellierung zu untersuchen.

3.1.1 Definition von Geometrie und Randbedingungen

Das Verhältnis von Durchmesser und Länge des gewählten Zylinders wirkt sich natürlich auf die Widerstandskraft des Körpers und demnach auch auf den c_w-Wert aus. In der folgenden Tabelle (Tab. 1) sind typische c_w-Werte von längs angeströmten Zylindern in Abhängigkeit der Reynoldszahl aufgelistet.

Tabelle 1: Auswahl des Referenzkörpers (1)

Körper	l/d	Re	c_w
 Kreiszylinder parallel zur Achse angeströmt	0 (Scheibe) 0,5 1 2 4 8	$>10^4$ $>10^4$ $>10^4$ $>10^4$ $>10^4$ $>10^4$	1,17 1,15 0,90 0,85 0,87 0,99

Für die folgende Simulation wird ein Zylinder mit einem Verhältnis von Länge zu Durchmesser von zwei gewählt, und damit soll ein c_w-Wert von 0,85 angestrebt werden.

Um eine Umströmung mit Hilfe des Programms *ANSYS CFX* durchzuführen, bedarf es einem Durchströmungsraum, in welchem der zu untersuchende Körper als Negativ vorhanden ist. Abbildung 1 stellt den Zylinder im Durchströmungsraum dar.

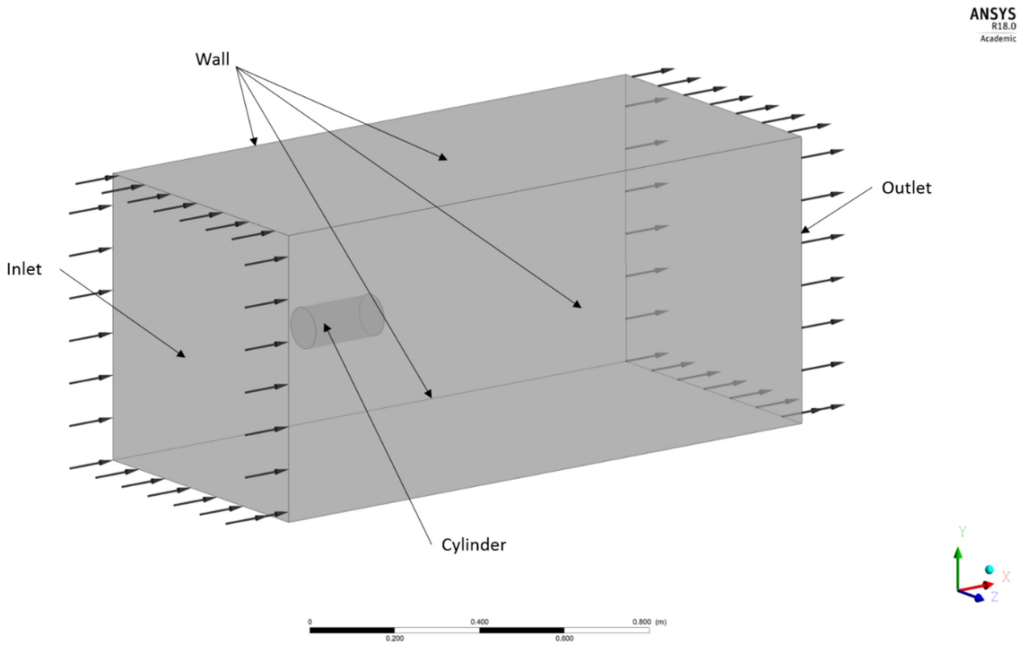


Abbildung 1: Aufbringung der Randbedingungen des Referenzkörpers

Um für diese Geometrie nun Randbedingungen zu definieren, müssen die Flächen des Modells zum Teil verknüpft und benannt werden. Dies dient lediglich zur Übersicht und zum Verständnis für die Aufbringung der Randbedingungen. Lediglich verknüpft werden die vier Flächen (Wall), welche parallel zur Längsachse des Zylinders liegen und die drei Flächen (Cylinder), welche den Zylinder beschreiben. Grund dafür ist die Gemeinsamkeit der Randbedingungen. Tabelle 2 zeigt die definierten Randbedingungen der Flächen. Diese Randbedingungen sind spezifisch für *ANSYS CFX* angegeben, können jedoch für andere Programme übernommen werden.

Tabelle 2: Randbedingungen der Komponenten

Fläche	Einstellung
Inlet	*Flow Regime* Option: Subsonic
	Mass and Momentum Option: Normal Speed Normal Speed: 5 m/s
	Turbulence Option: Medium
Outlet	*Flow Regime* Option: Subsonic
	Mass and Momentum Option: Static Pressure Relative Pressure: 1 bar
Wall	*Mass and Momentum* Option: Free Slip Wall

Cylinder	*Mass and Momentum* Option: No Slip Wall
	Wall Roughness Option: Smooth Wall

Abgesehen von den Randbedingungen, welche den jeweiligen Flächen zugeordnet werden müssen, sind noch Basis Einstellungen sowie die Fluid Modellierung zu definieren. Diese Einstellungen werden in Tab. 3 gezeigt.

Tabelle 3: Grundeinstellungen

Bezug	Einstellung
Basic Settings	*Fluid 1* Option: Material Library Material: Air Ideal Gas
	Morphology Option: Continuous Fluid
	Pressure Reference Pressure: 1 bar
Fluid Models	*Heat Transfer* Option: Isothermal Fluid Temperature: 25 °C
	Turbulence Option: k-Epsilon Wall Function: Scalable

Um die Geometrie und die Randbedingungen noch einmal kurz zusammen zu fassen: es wird ein Zylinder mit einem Längen-Durchmesser-Verhältnis von zwei mit idealer Luft bei 25 °C vom Inlet mit 5 m/s angeströmt. Es herrscht Reibung zwischen Fluid und Zylinder, aber nicht zwischen Fluid und Wall. Die Strömung trifft dann am Outlet auf einen statischen Druck von 1 bar und verlässt den Durchströmungsraum. Die Turbulenz wird vorerst mit dem Modell *k-Epsilon* modelliert und die Wärmeübertragung des Fluids ist isotherm.

3.1.2 Netzerstellung

Die Netzerstellung gehört zu den wichtigsten Kriterien einer einwandfreien und realistischen Strömungssimulation. Sie bildet den Grundstein für die Berechnungsmethodik zur Auflösung und Genauigkeit der Strömung. Durch präzise Vernetzung können Rechenfehler sowie Fehlerfortpflanzung minimiert werden.

Einige Fragen, welche vor Vernetzungsbeginn zu klären sind, lauten: Was wird mit dieser Simulation untersucht? Sind Verwirbelungen hinter dem Fahrzeug aufzulösen, sind Geschwindigkeits- und Druckplots zu erstellen oder ist der c_w-Wert des Fahrzeugs zu berechnen? Fragen wie diese sollte sich jeder Benutzer vor der Erzeugung des Netzes stellen, um die Rechendauer so kurz wie möglich und die Genauigkeit der Ergebnisse so genau wie nötig zu gestalten. In unserem Fall wird auf die genaue Auflösung von Wirbeln oder gar Wirbelstraßen nicht genauer untersucht, da hier die Netzerstellung zu zeitintensiv wäre.

Es muss lediglich ein konstanter Wert der Widerstandkraft bzw. des c_w-Wertes entnommen werden. Ziel der ausführlichen Netzerstellung dieses Referenzkörpers ist es, eine Aussage darüber treffen zu können, wie genau das Netz aufgebaut sein muss, um den korrekten c_w-Wert aus der Simulation berechnen zu können.

Durch erste Überlegungen über die Auflösung der Strömung, kann erkannt werden, dass das Netz an der Oberfläche des Zylinders feiner vernetzt werden muss als am Rand des Durchströmungsraums. Dies sind die ersten Eigenschaften, welche das Netz zu Anfang besitzen sollte.

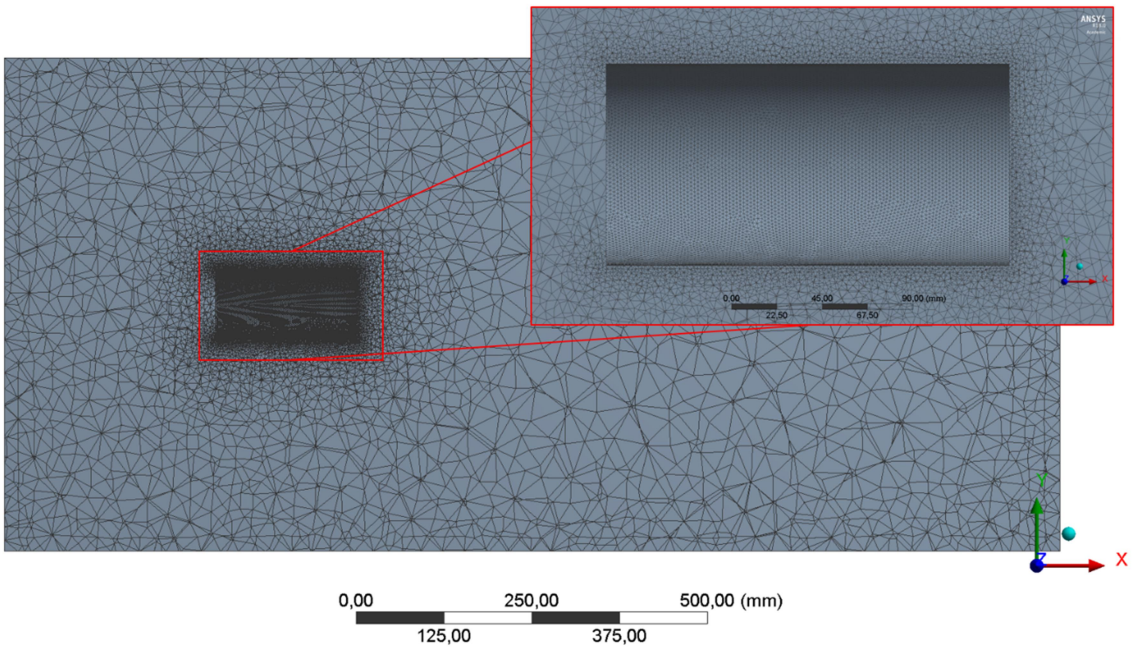


Abbildung 2: Erstes Netz des Referenzkörpers

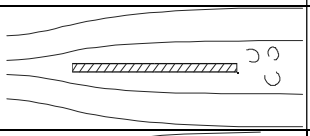
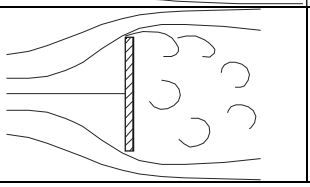
Abb. 2 zeigt das erstellte Netz für die erste Simulation. Dieses besitzt lediglich eine Netzverfeinerung im Bereich des Zylinders und ein grobes Netz im restlichen Durchströmungsraum. Um die Netzqualität beurteilen zu können wird hier die schlechteste Orthogonalität eines Elementes begutachtet und somit bestimmte Fehlerquellen offengelegt. Das schlechteste Element besitzt eine orthogonale Qualität von 0,23. Somit wird der Grenzwert von 0,01 nicht unterschritten, was für eine gute Netzqualität spricht.

Die Ergebnisse der Simulation mit dem ersten Netz sind im nachfolgenden Kapitel dargestellt und zeigen, dass sich ein c_w-Wert von 0,835 ergibt. Für ein derartig simples Netz ist das ein beachtlicher Wert. Allerdings weicht dieses Ergebnis um 0,015 und somit um ca. 1,7 % vom Sollwert ab. Um ein noch genaueres Ergebnis zu erzielen wird ein zweites, genaueres Netz erstellt.

Durch die Überlegung, wie der Strömungswiderstand eigentlich zu Stande kommt, ist dementsprechend auch das Netz stellenweise präziser zu verfeinern. Die zwei Hauptkomponenten eines Strömungswiderstandes sind die Druckkomponente und die Schubspannungskomponente. Die Druckkomponente hängt stark von der Art der Anströmung und von der Geometrie ab, wobei die Schubspannungskomponente lediglich

von den Schubspannungen abhängen, welche durch die Reibung an der Oberfläche induziert werden. Zur Veranschaulichung ist in Tab. 4 ein Beispiel gezeigt.

Tabelle 4: Beispiel für Druck- und Schubkomponente (1)

Körperform		Druckkomponente	Schubspannungskomponente
Längs angeströmte Platte		0 %	100 %
Quer angeströmte Platte		100 %	0 %

Ziel des zweiten Netzes ist es, die Schubspannungen mathematisch aufzulösen, welche sich in der Grenzschicht der Strömung befinden. Hierfür gibt es in den meisten CFD Programmen die Möglichkeit sogenannte Prismenschichten zu erstellen. Diese Elemente kann man sich als extrem dünne Schichten vorstellen, welche sich über die Mantelfläche des Zylinders legen. Mit Hilfe der Prismenschichten und einem geeigneten Turbulenzmodell ist es möglich, die Schubspannungen in der Grenzschicht aufzulösen. Der Einfluss des Turbulenzmodells wird im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert. Abb. 3 zeigt das zweite Netz mit der Verfeinerung durch Prismenschichten am Rand des Zylinders.

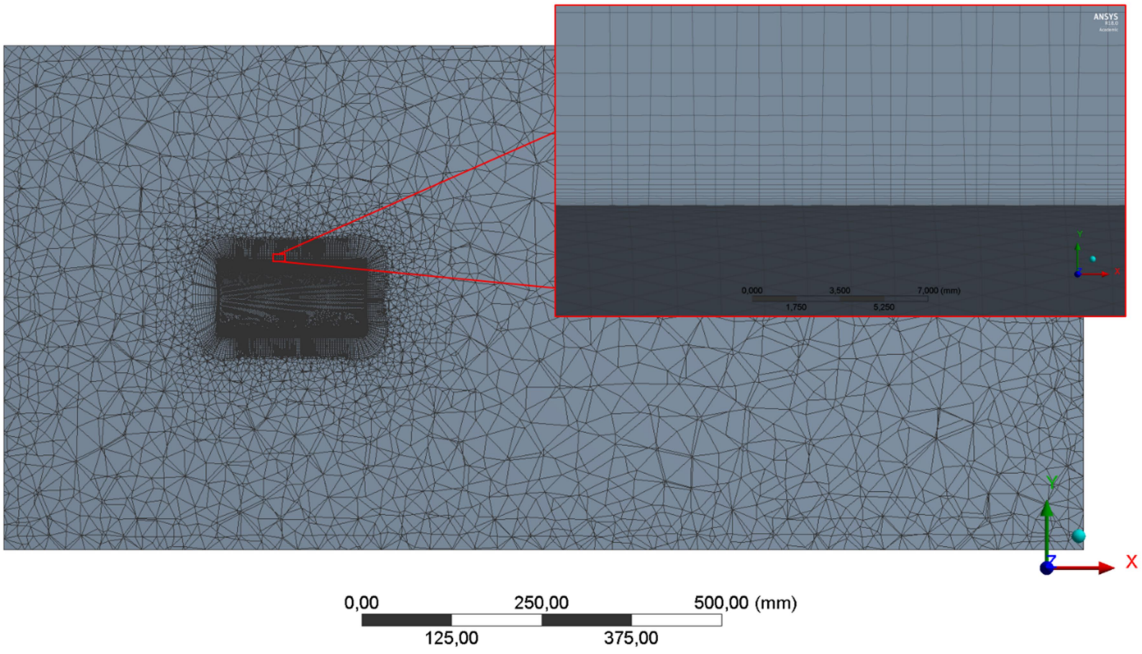


Abbildung 3: Zweites Netz des Referenzkörpers

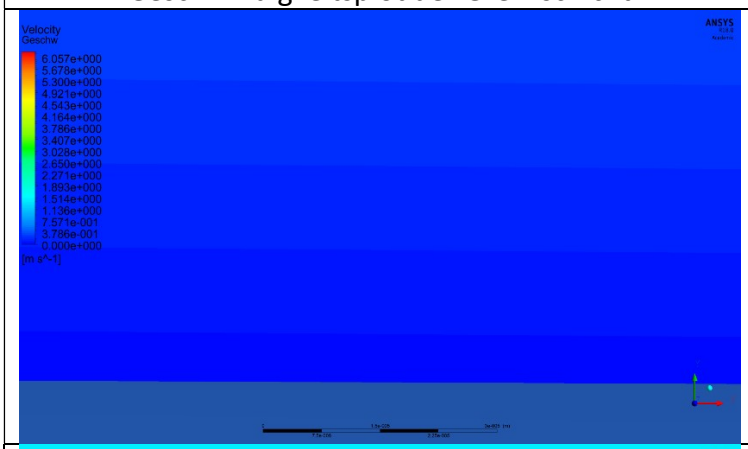
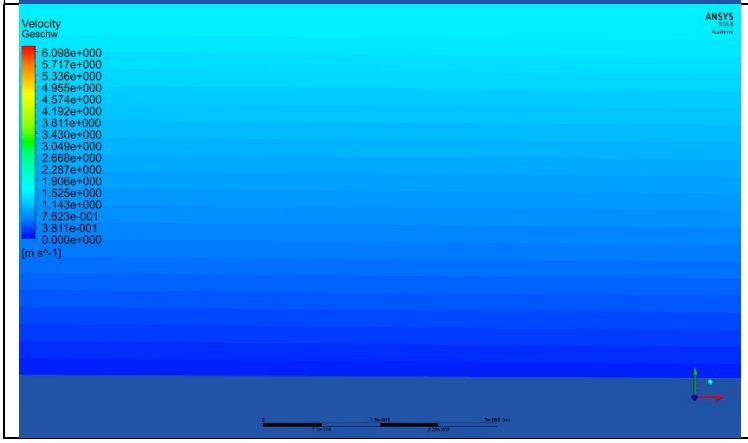
Durch Einsatz der Prismenschichten ist das Resultat der zweiten Rechnung ein c_w -Wert von 0,854. Die Abweichung vom Sollwert hat sich auf 0,47 % reduziert. Die orthogonale Qualität beim zweiten Netz beläuft sich auf 0,09 für das schlechteste Element und liegt somit im Rahmen.

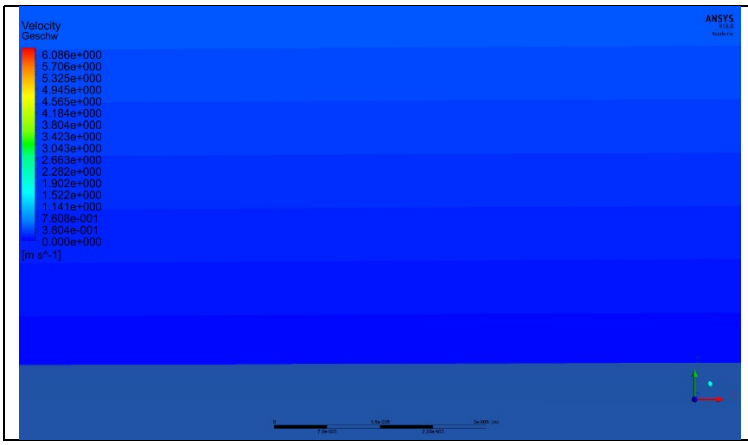
3.1.3 Turbulenzmodellierung

Für die Simulation des Zylinders ist die Turbulenzmodellierung auf die Wirbelviskositätsmodelle zu beschränken. Es handelt sich hierbei um drei Zweigleichungsmodelle: das k-ε Modell, das k-ω Modell und das SST Modell, wobei letzteres eine Kombination aus den ersten beiden Modellen darstellt. Diese drei Turbulenzmodelle werden für den Zylinder mit 5 m/s Anströmgeschwindigkeit und einer Reynoldszahl von ca. 60000 untersucht und erläutert. Die Turbulenzmodellierung ist natürlich abhängig von der Reynoldszahl, welche beschreibt, ob eine Strömung turbulent oder laminar ist. Ist die Anströmung nun so langsam, dass sich die Strömung laminar ausbildet, so wird gar kein Turbulenzmodell benötigt. Deshalb ist hier für die spätere Simulation des Fahrzeugs festzuhalten, dass die Turbulenzmodellierung hier nur explizit für diesen Fall gilt. Es wird hier lediglich ein Zylinder untersucht. Somit können nur gewisse Erkenntnisse für die Fahrzeugsimulation übernommen werden.

Wichtig aber für dieses Beispiel sowie auch für das Fahrzeug ist die Auflösung der Grenzschicht und somit die Erfassung der Schubspannungen. In Tab. 5 ist die Auflösung der Geschwindigkeit in der Grenzschicht zu sehen und gleichzeitig der berechnete cw-Wert für alle drei Turbulenzmodelle.

Tabelle 5: Vergleich der Grenzschicht von verschiedenen Turbulenzmodellen

Geschwindigkeitsplot der Grenzschicht	Turbulenzmodell	c_w-Wert
	k-ω Modell	0,825
	k-ε Modell	0,854

	SST Modell	0,823

Zu erkennen ist, wie präzise die Grenzschicht bei den verschiedenen Turbulenzmodellen aufgelöst wird. Es werden natürlich bei allen drei Modellen der gleiche Maßstab und die gleiche Position an der Oberseite des Zylinders gewählt. Das k-ω Modell schneidet hier mit der Auflösung am schlechtesten ab, gefolgt vom SST Modell. Die beste Auflösung und auch das beste Ergebnis liefert das k-ε Modell. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die anderen beiden Modelle die Grenzschicht berechnen und das k-ε Modell die Grenzschicht als Input in die Berechnung impliziert. Da dieser Input sehr exakt ist, können in diesem Fall auch die besten Ergebnisse erzielt werden.

Natürlich gibt es eine große Anzahl weiterer Turbulenzmodelle höherer und niedrigerer Ordnung, welche eventuell besser oder gar schlechter dafür geeignet sind, um in diesem Fall perfekte Ergebnisse zu bestimmen. Allerdings ist der Aufwand für das Referenzmodell zu groß sowie der Rahmen dieser Projektarbeit zu klein, um alle zu untersuchen.

3.1.4 Ergebnisse und Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden einige Konturplots gezeigt sowie auf die Konvergenz der Rechnungen eingegangen. Die Interpretation der Ergebnisse ist das, was eine gute Strömungssimulation ausmacht. „Bunte“ Bilder zu erzeugen und zu präsentieren ist einfach, aber auch eine Aussage über mögliche Fehler für eine Divergenz ist Teil einer Strömungssimulation. Qualität der Ergebnisse und Erkenntnisse, welche daraus entnommen werden, hängen vom Benutzer ab.

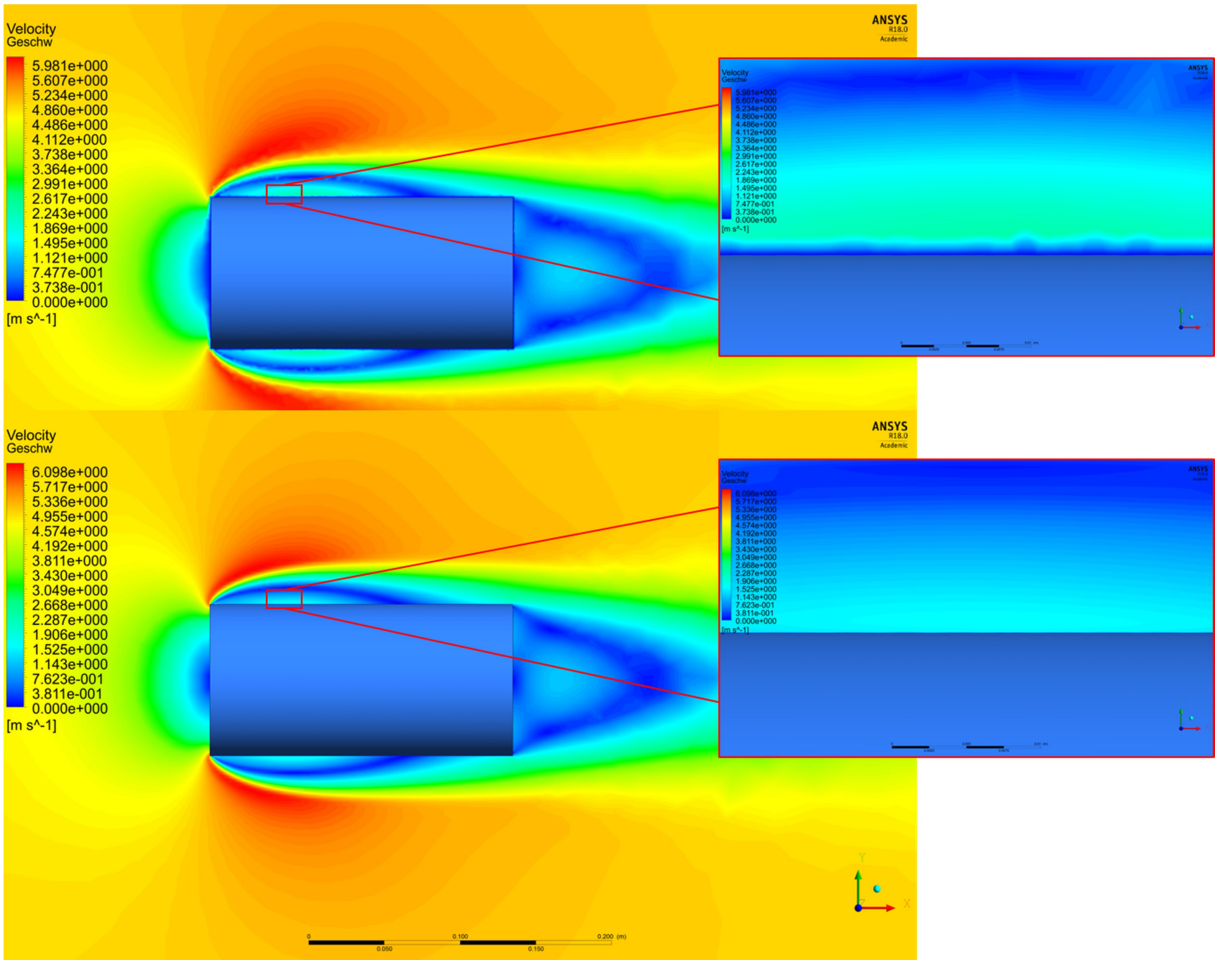


Abbildung 4: Geschwindigkeitsplot von erstem (oben) und zweitem (unten) Netz

Es ist gut zu erkennen, dass die Auflösung bzw. die Anzahl der Knoten im ersten Netz viel zu gering sind, als dass der Geschwindigkeitsverlauf in der Grenzschicht nicht kontinuierlich dargestellt werden könnte. Darüber hinaus gibt es keine Möglichkeit ohne Prismenschichten die Grenzschicht aufzulösen. Dies zeigen in Abb. 4 die rechten Detailansichten.

Um erzeugte Wirbel zu veranschaulichen, gibt es in den meisten CFD Programmen die Möglichkeit, die Geschwindigkeit als Vektorpfeil oder als Strömungslinie darzustellen.

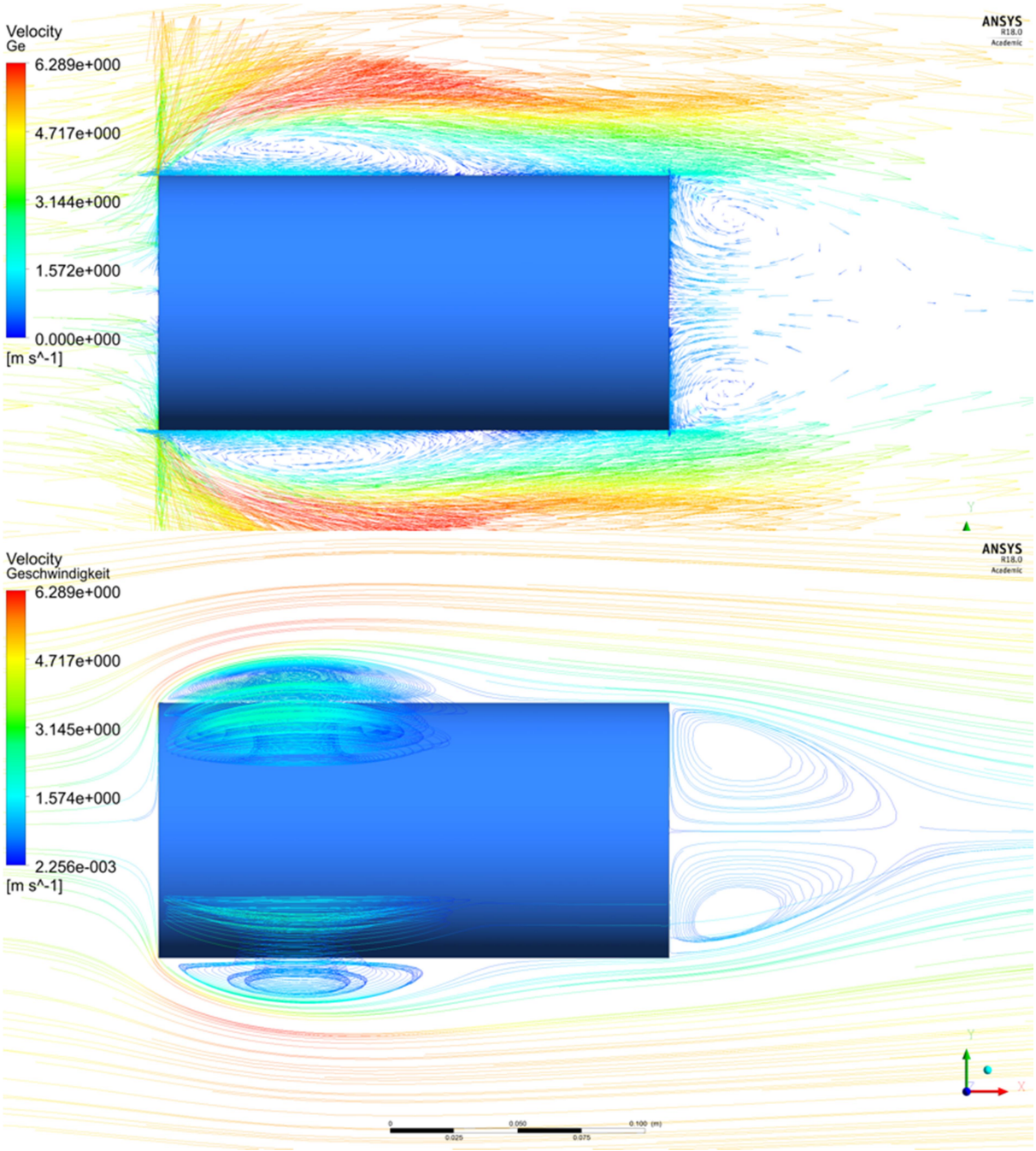


Abbildung 5: Geschwindigkeitsplots mit Vektoren (oben) und mit Stromlinien (unten)

Wie Abb. 5 zeigt, können durch Anzeige der Geschwindigkeit Wirbel, Wirbelstraßen und Ablösungen sichtbar gemacht und identifiziert werden. Außerdem können solche Plots zur Validierung der Rechnung beitragen, indem sie verwendet werden um bestimmte Strömungsphänomene zu identifizieren, welche schon im Vorfeld ersichtlich waren.

Um die Konvergenz einer Strömungssimulation zu garantieren, gibt es die Möglichkeit während der Rechnung verschiedene Monitorwerte anzusehen. Beispielsweise werden die Residuen über den Iterationsfortschritt angezeigt und damit der entstandene Fehler ersichtlich. Da es sich hier um eine iterative Lösung des Gleichungssystems handelt, führt dieses Vorgehen stets zu einer approximierten Lösung mit unbekanntem Fehler. Als grober Wert sollten die Residuen den Wert von 10^{-4} unterschreiten, um eine akzeptable Lösung zu

erreichen. Die Beurteilung der Residuen wird in den nachfolgenden Kapiteln am Beispiel des Fahrzeugs genauer beschrieben. Viel wichtiger ist es jedoch, den zu untersuchenden Wert als einen Monitorwert einzurichten und diesen während der Rechnung zu beobachten. In unserem Fall ist dies der c_w-Wert, welcher während der Simulation beobachtet wird. Konvergiert dieser auf einen Wert zu und haben die Residuen den Wert von 10^{-4} unterschritten, so ist die Rechnung erfolgreich und es sind repräsentative Ergebnisse zu erwarten. In den folgenden Abbildungen sind die Residuen und der c_w-Wert als Monitorwerte über den Iterationen gezeigt. Verglichen werden hier die Rechnungen mit dem zweiten Netz. Einmal mit dem k-ε Modell und einmal mit dem k-ω Modell, um auch zu zeigen, dass die Wahl der Turbulenzmodelle enorme Auswirkungen auf die Konvergenz der Rechnung haben kann.

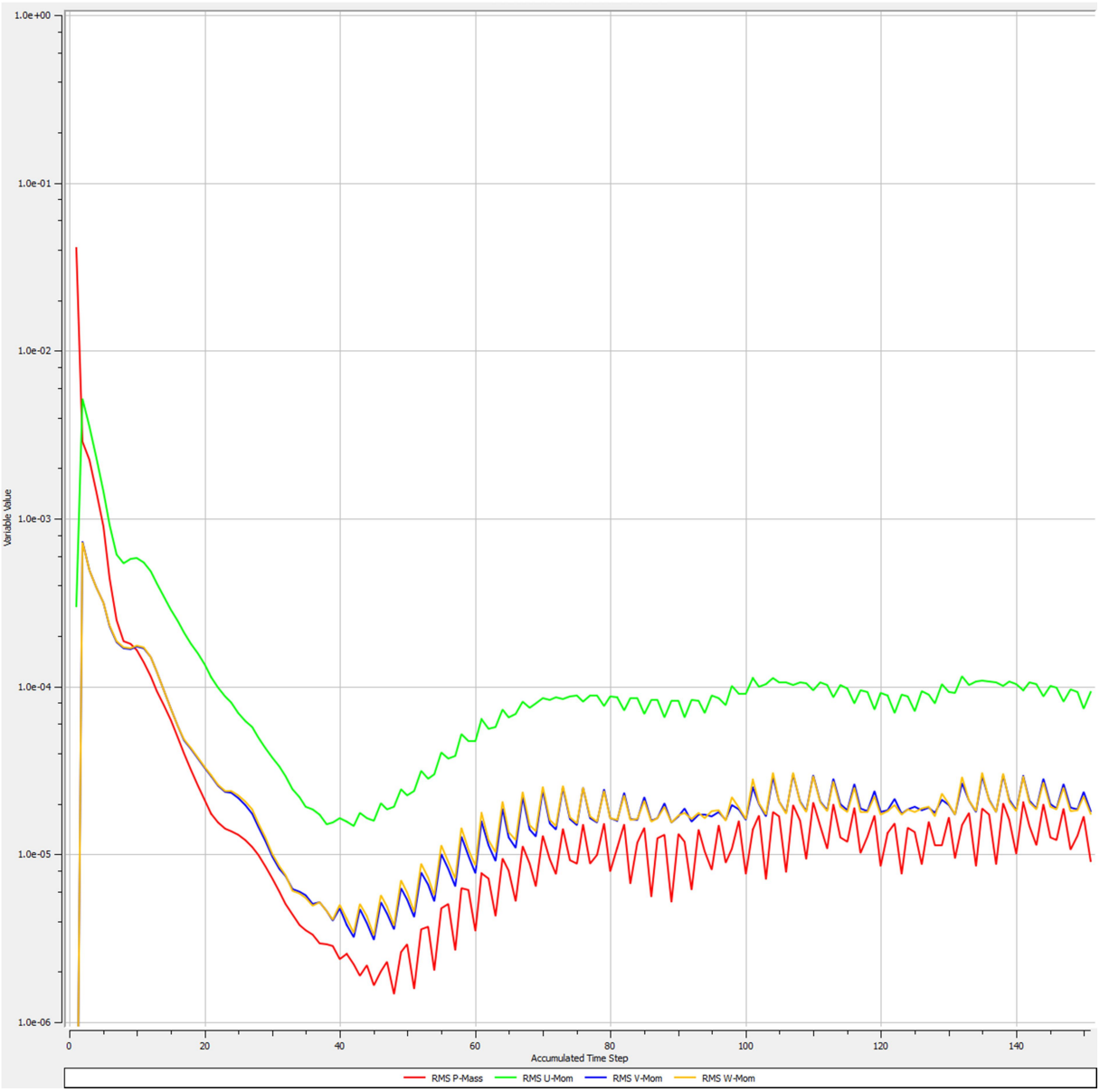


Abbildung 6: Residuenverlauf mit k-ε Turbulenzmodell

Bezogen auf die Residuen der Rechnung mit dem k-ε Turbulenzmodell ist deutlich zu erkennen, dass diese in den ersten 40 Iterationen perfekt nach unten verlaufen, bis teilweise unter 10^{-5}. Danach allerdings fangen die Residuen an sich aufzuschaukeln und das Ergebnis

zu beeinflussen. Ursachen können eine grundsätzliche Änderung des Verhaltens der Strömung, wie z. B. die Entwicklung eines starken Druck- oder Geschwindigkeitsgradienten oder die Entstehung von Wirbeln und Ablösungen sein. Dies kann unter Umständen gar nicht oder nur zum Teil durch Änderung des Turbulenzmodells verhindert werden. Hier muss eindeutig vom Anwender der gewünschte Wert betrachtet werden, um von einer Konvergenz der Ergebnisse sprechen zu können.

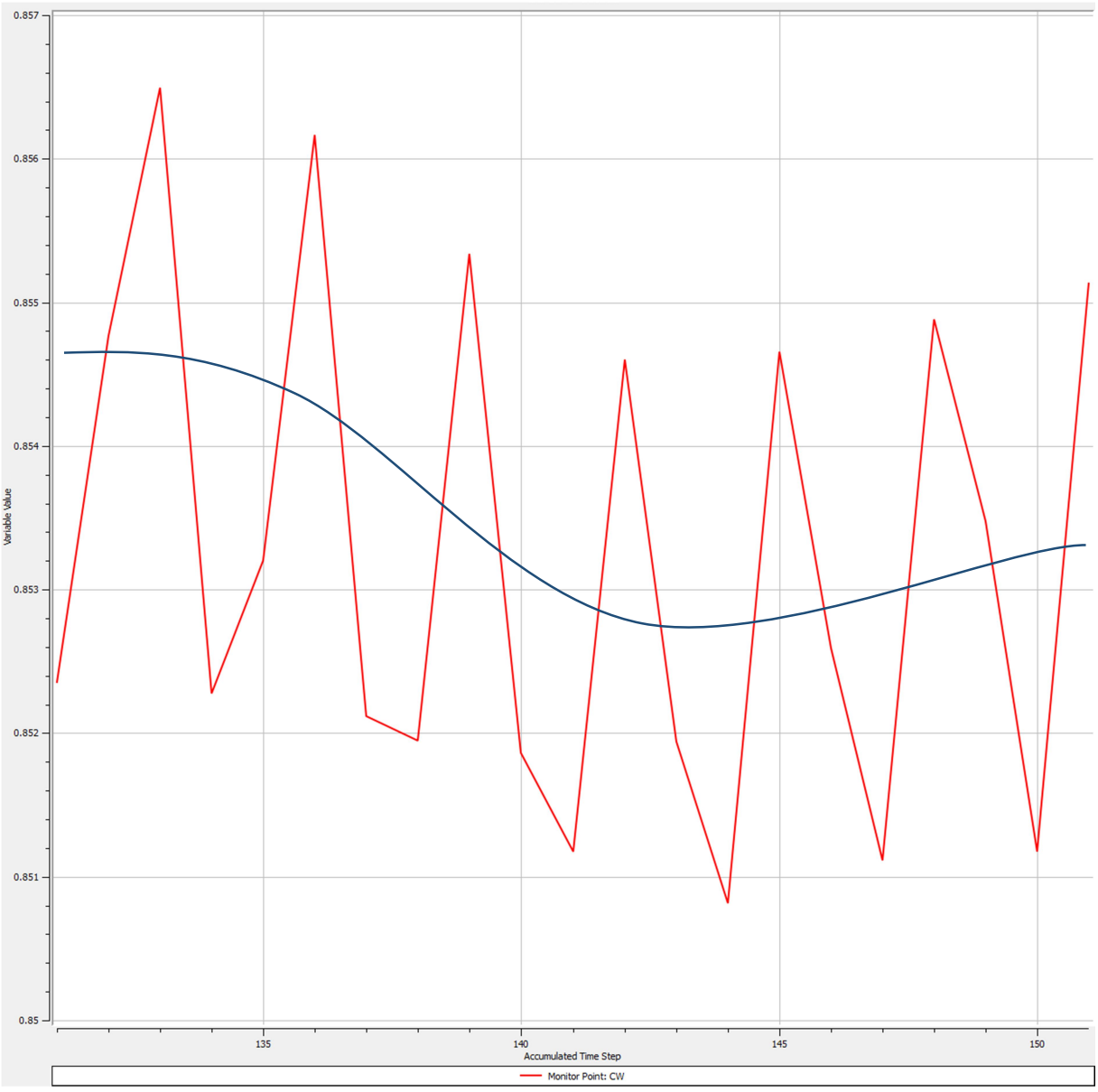


Abbildung 7: c_w-Wert Verlauf der letzten 20 Iterationen mit k-ε Turbulenzmodell

Nun wird der c_w-Wert in den letzten 20 Iterationen als Monitorwert betrachtet. Der c_w-Wert schwankt ebenfalls sehr deutlich und konvergiert nicht. Bei genauerer Betrachtung der vertikalen Achse ist jedoch eine sehr feine Auflösung zu erkennen. Aus diesem Grund kann hier der cw-Wert gemittelt und somit der Fehler so gut wie beseitigt werden. Allerdings muss gewährleistet sein, dass der c_w-Wert Verlauf weiterhin nahezu konstant voranschreitet. Trotz einer bestimmten Divergenz ist der cw-Wert hier am nächsten am Sollwert.

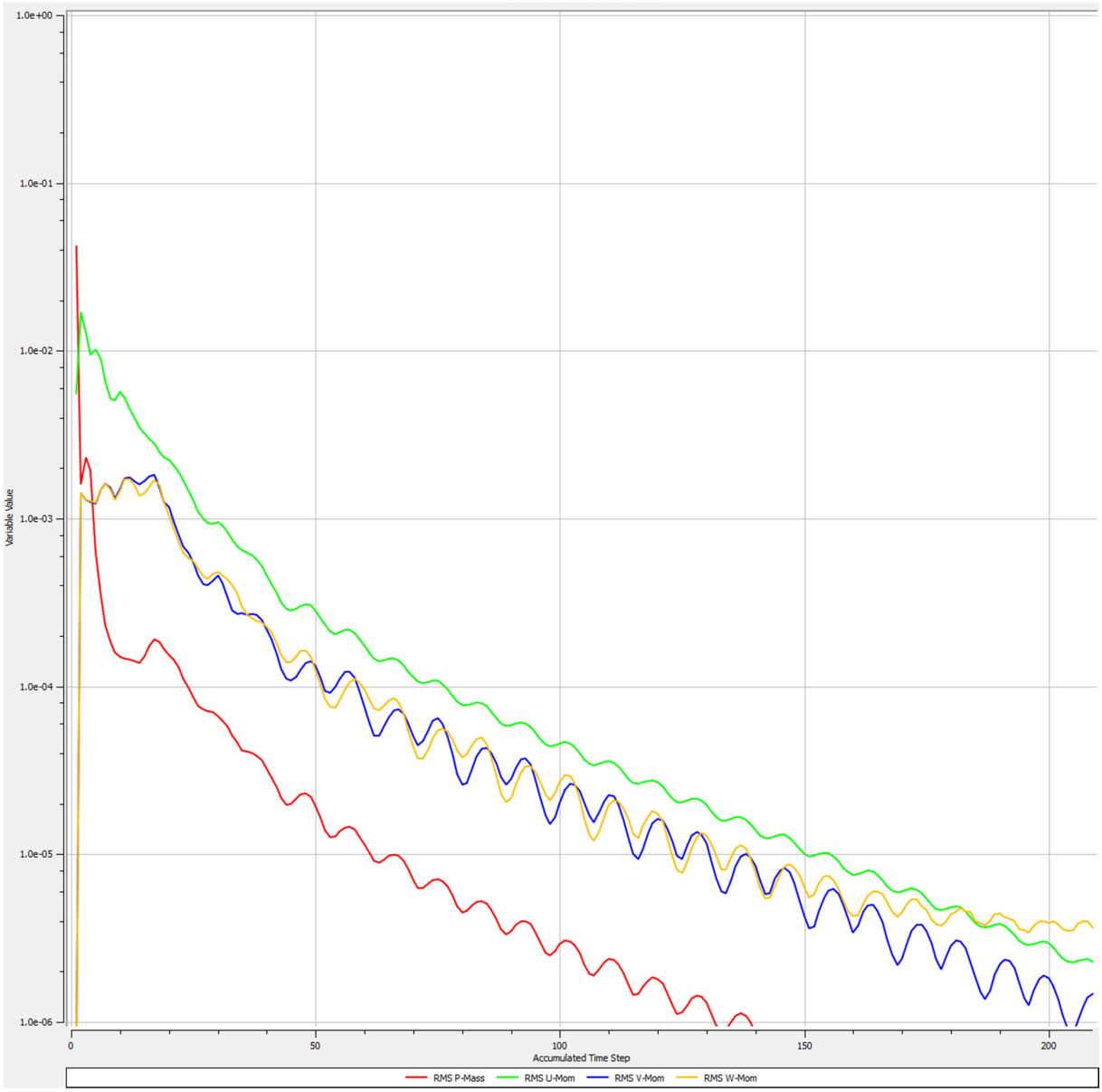


Abbildung 8: Residuenverlauf mit k-ω Turbulenzmodell

In Abb. 8 sind nun die Residuen zu sehen, welche durch eine Rechnung mit dem k-ω Modell entstanden sind. Deutliche Unterschiede zeigen sich erst ab Iteration 40. Während die Residuen beim k-ε Modell wieder steigen und eine Divergenz erzeugen, sinken die des k-ω Modells weiter ab. Die Schwankungen können die gleichen Ursachen haben, welche auch schon bei der Rechnung mit k-ε Modell festgestellt wurden. Allerdings verlaufen die Residuen dieses Turbulenzmodells deutlich vorteilhafter, was einen geringeren Rechenfehler zur Folge hat. Dennoch ist auch hier der c_w-Wert als Monitorwert zu beobachten.

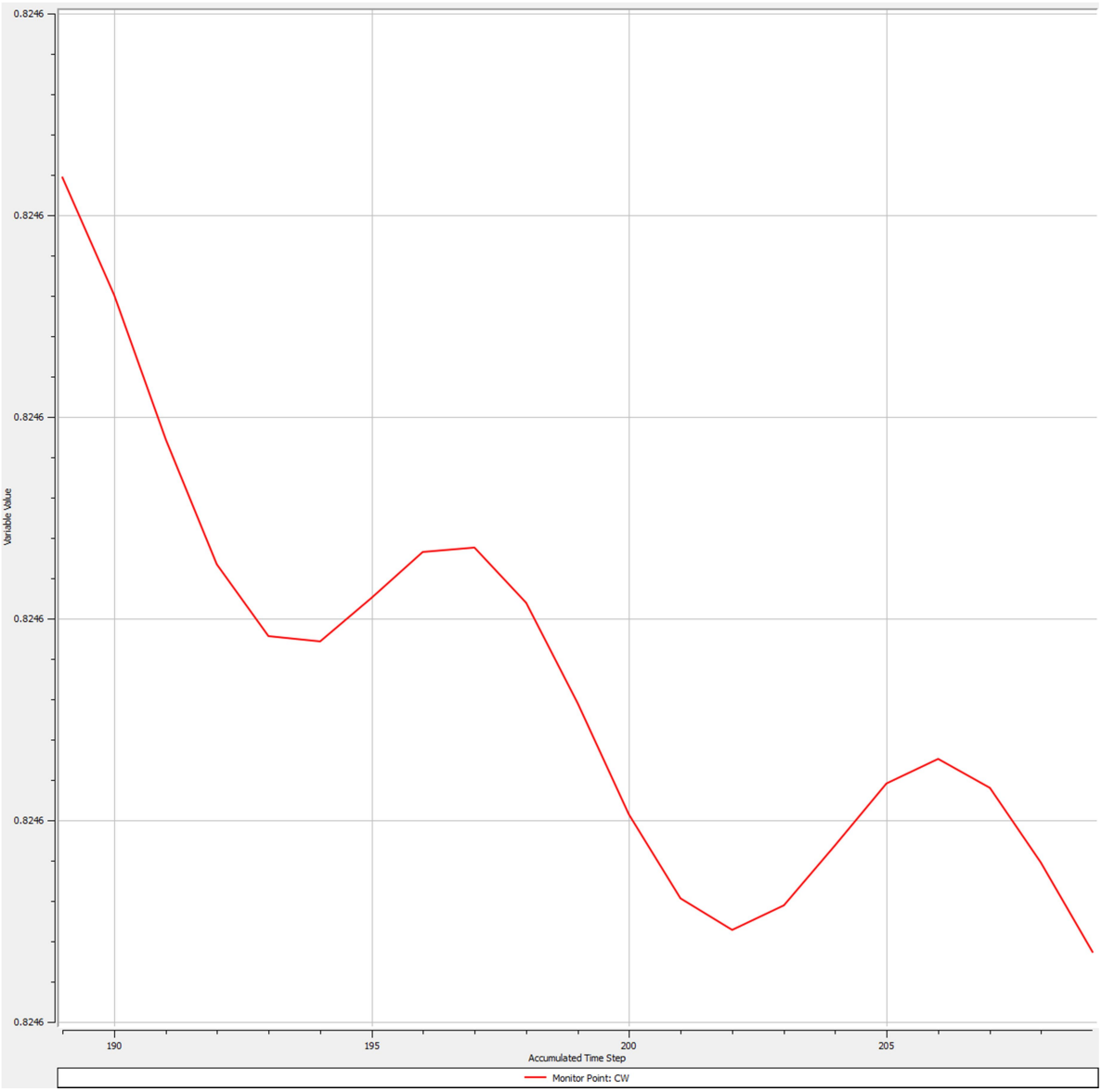


Abbildung 9: c_w-Wert Verlauf der letzten 20 Iterationen mit k-ω Turbulenzmodell

Bei Beobachtung der vertikalen Skala wird deutlich, dass dieser c_w-Wert deutlich konvergiert (Abb. 9). Allerdings weicht der c_w-Wert vom Sollwert ab und das k-ω Modell wird als nicht tauglich für dieses Problem deklariert. Leider ist das hybride SST Modell ebenfalls ungeeignet für diese Art von Strömungssimulation. Es zeigt zwar ein ähnlich gutes Konvergenzverhalten wie das k-ω Modell, allerdings auch einen c_w-Wert, welcher stark vom Sollwert abweicht.

Zusammenfassend für die weitere Berechnung des Fahrzeugs ist festzuhalten:

- Bei der Netzgenerierung ist darauf zu achten, dass um das komplette Fahrzeug Prismenschichten erzeugt werden, da durch die nicht ausreichende Auflösung der Grenzschicht das Ergebnis deutlich verfälscht wird.
- Für die Turbulenzmodellierung bietet sich hier das k-ε Modell an. Simulationen mit diesem Turbulenzmodell ergeben die besten Ergebnisse. Allerdings ist hier auf die Konvergenz der Rechnung zu achten, vor allem wenn verschiedene Geschwindigkeiten simuliert werden.

3.2 Untersuchung des Einflusses drehender Räder

Da das zu untersuchende Fahrzeug an der Vorderachse zwei Räder besitzt, welche sich nicht in der Karosserie befinden, sondern frei drehen, muss der Einfluss der Drehbewegung auf den c_w-Wert untersucht werden. Um diese Untersuchung zu vereinfachen und Rechenzeit sowie Bearbeitungszeit zu sparen, wird in diesem Kapitel nur ein einzelnes Rad ohne Fahrzeug untersucht. Es wird nur mit einer Geschwindigkeit gerechnet, da die Untersuchung lediglich zeigen soll, ob die Simulation des Komplettfahrzeugs mit oder ohne drehenden Rädern stattfinden muss.

3.2.1 Definition von Geometrie und Randbedingungen

Die Geometrie des Rades wurde freundlicherweise vom Hydro 2 Motion Team zur Verfügung gestellt und wird auch so in der Simulation verwendet. Es handelt sich hierbei um ein Speichenrad, welches auf einem Kautschukmantel läuft und mit Folie abgeklebte Seiten vorweist. Zusätzlich wird in dieser Simulation der Boden bewegt, das heißt, dieser bewegt sich mit Anströmgeschwindigkeit in Strömungsrichtung. Abb. 10 zeigt die Geometrie und den Durchströmungsraum.

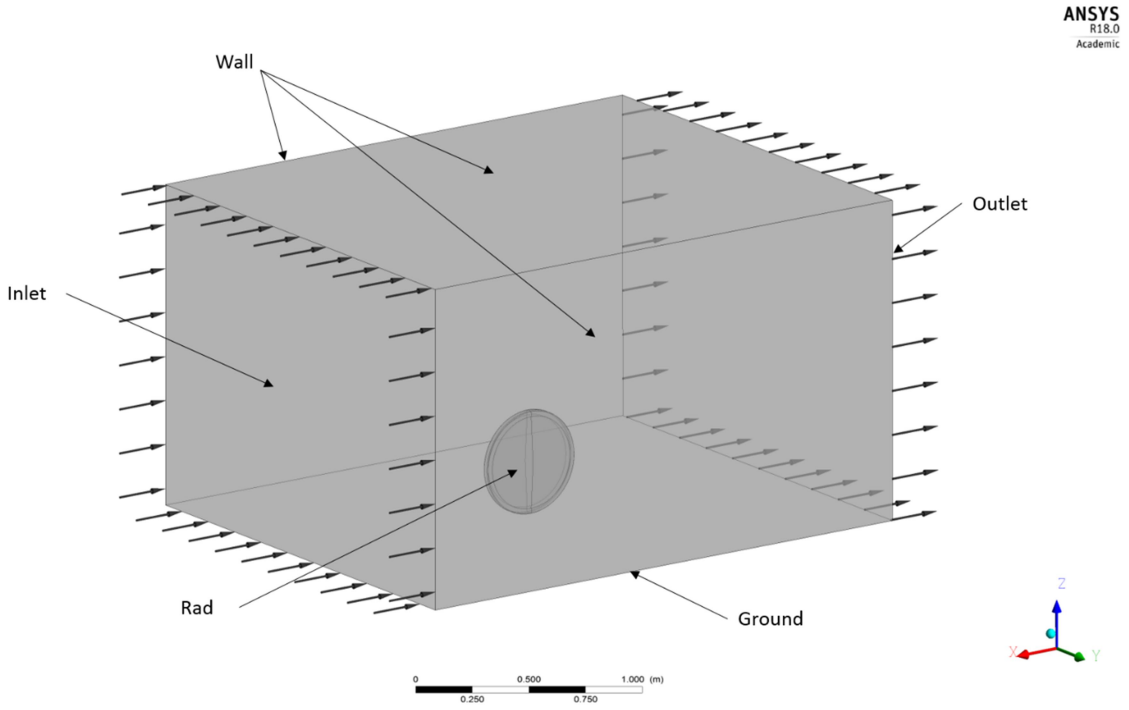


Abbildung 10: Aufbringung der Randbedingungen des Rads

Die Randbedingungen der Simulationen mit drehendem und stehendem Rad sind identisch mit den Randbedingungen aus Tabelle 1. Der einzige Unterschied findet sich in der Simulation mit drehendem Rad. Hier rotiert die Komponente „Rad“ um die y-Achse. Die Winkelgeschwindigkeit des Rades wird der Anströmgeschwindigkeit von 10 m/s angepasst.

Um ein drehendes Rad zu simulieren, ist es nicht möglich dieses auf dem Boden „abzustellen“, das heißt es befindet sich 0,01 mm über dem Boden und schwebt somit. Dies wird allerdings nur einen vernachlässigbar kleinen Fehler ergeben. Tab. 6 zeigt die zu ergänzenden Randbedingungen für die Simulation mit drehendem Rad und bewegtem Boden.

Tabelle 6: Änderung der Randbedingungen zur vorigen Simulation

Fläche	Einstellung
Rad	*Mass and Momentum* Option: No Slip Wall
	Wall Velocity Option: Rotating Wall Angular Velocity: - 6,773 rev/s
	Axis Definition Option: Two Points Rotating Axis from: 0,4195 | 10 | 0,13 Rotating Axis to: 0,4195 | -10 | 0,13
	Wall Roughness Option: Smooth Wall
Ground	*Mass and Momentum* Option: No Slip Wall
	Wall Velocity Option: Cartesian Components Wall U: -10 m/s Wall V: 0 m/s Wall W: 0 m/s
	Wall Roughness Option: Smooth Wall

Für die Gegenüberstellung wird bei der Simulation für das stehende Rad die Winkelgeschwindigkeit des Rades auf null gesetzt. Somit kann ein Vergleich des c_w-Werts von stehendem zu drehendem Rad durchgeführt werden.

3.2.2 Netzerstellung

Um ein geeignetes Netz für die folgenden zwei Simulationen zu generieren, halten wir uns an die Regeln, die zuvor in 3.1.2 festgelegt wurden. Zu diesen gehören Prismenschichten, welche das Rad ummanteln und für Auflösung der Schubspannungen in der Grenzschicht verantwortlich sind. Außerdem ist ein grobes Netz im restlichen Durchströmungsraum ausreichend für die Berechnung des c_w-Werts. In Abb. 11 sind zwei Schnitte des Netzes dargestellt.

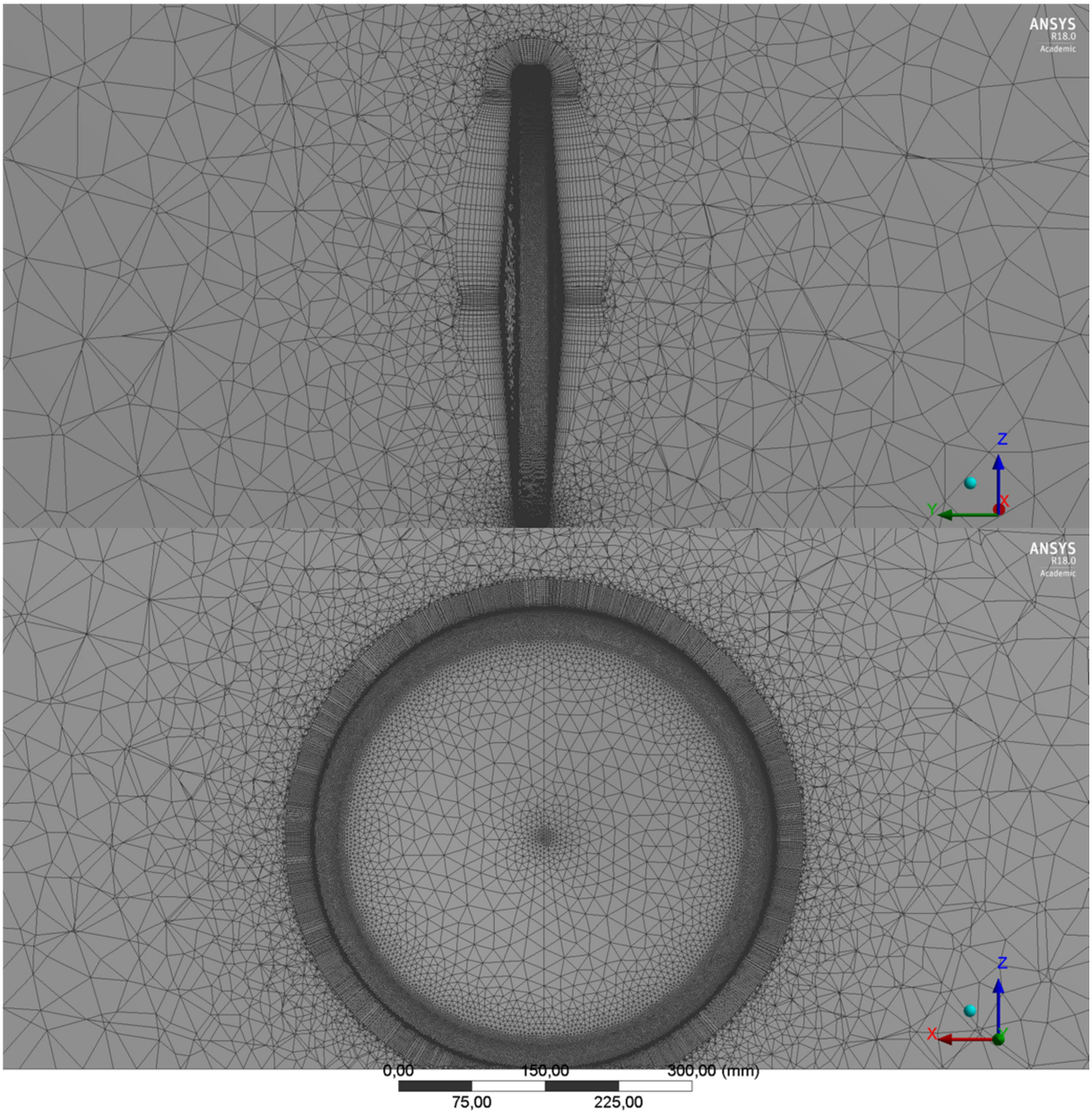


Abbildung 11: Netz für die Radsimulation

Das erstellte Netz für die Simulation des stehenden und drehenden Rades weist eine orthogonale Qualität des schlechtesten Elementes von 0,003 und unterschreitet damit den Grenzwert für qualitative Netze. Allerdings ist zu erwähnen, dass der Abstand von Rad zu Boden so gering ist, dass aufgrund dessen im Vernetzungsalgorhytmus Probleme auftreten, dort alle Prismenschichten abzudecken. Dies sollte jedoch nicht bedeuten, dass dieses Netz

für eine Berechnung untauglich ist. Erst anhand der Feststellung einer Divergenz kann überprüft werden, ob das Netz die Fehlerquelle sein kann.

3.2.3 Ergebnisse und Ausblick

Für den Vergleich des stehenden und drehenden Rads wird hier nicht nur der c_w-Wert in Betracht gezogen, sondern auch die Strömungsverhältnisse auf der Lauffläche des Rads. Diese werden zur Begründung möglicher Differenzen des c_w-Wertes hinzugezogen. Der berechnete c_w-Wert des stehenden Rades beträgt 0,282 und der des drehenden Rades beträgt 0,303. Somit ist ein deutlicher Unterschied von 0,021 zu erkennen, welcher in Abb. 12 und Abb. 13 verdeutlicht und erklärt wird.

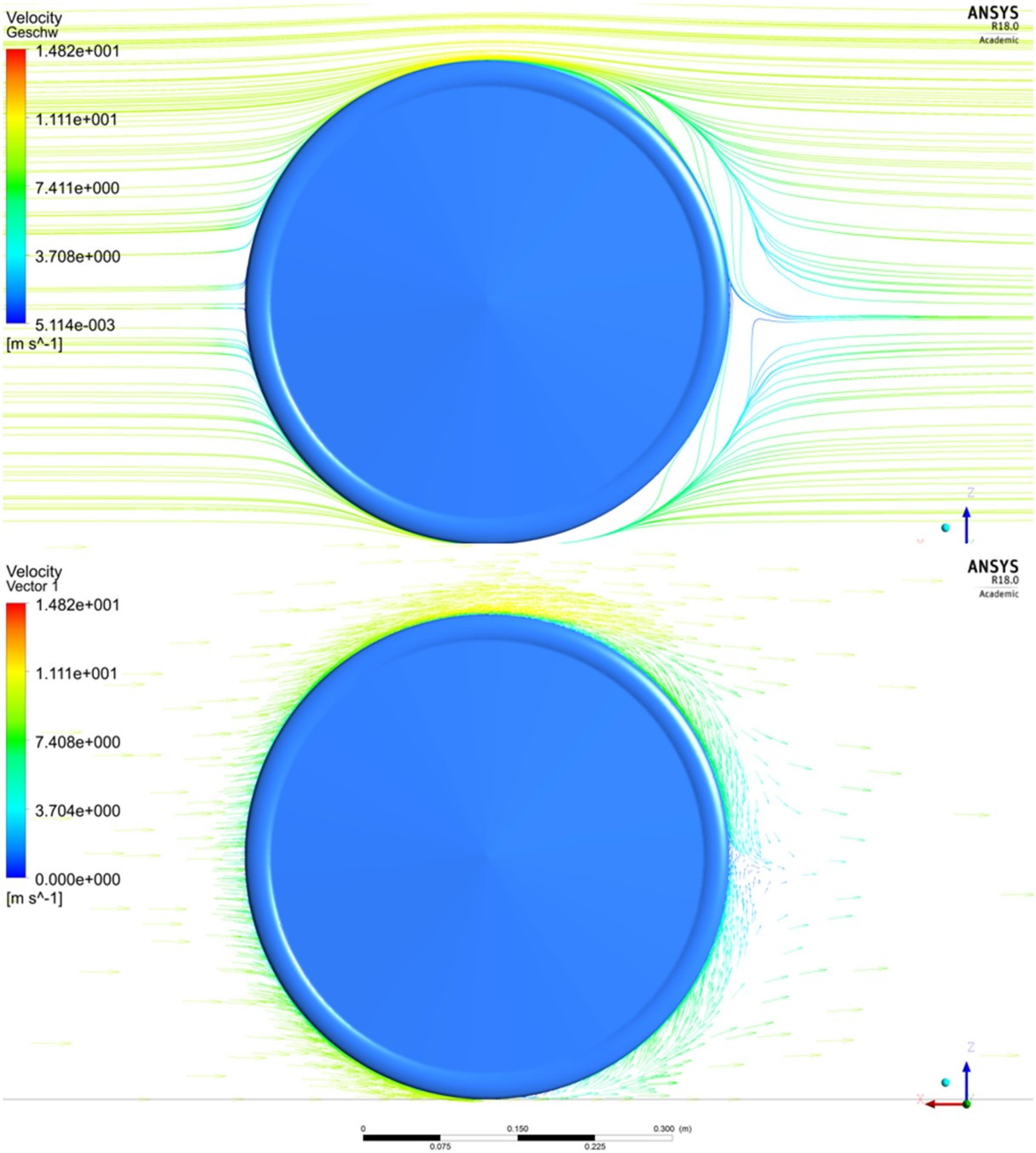


Abbildung 12: Geschwindigkeitsplots mit Vektoren (unten) und mit Stromlinien (oben) des stehenden Rads

In der vorherigen Abbildung ist die Geschwindigkeit einmal mit Strömungslinien (oben) und zum anderen mit Vektorpfeilen (unten) dargestellt. Hierbei handelt es sich um das stehende Rad, welches gut in der Abb. 12 zu erkennen ist. Das Fluid verteilt sich gleichmäßig an der Vorderseite des Rads, was man gut in der unteren Vektorgrafik erkennen kann. Die Strömungslinien, welche oberhalb der Radmitte auftreffen, strömen nach oben und alle, welche unterhalb der Radmitte auftreffen, strömen nach unten. Dasselbe Verhalten kann man hinter dem Rad erkennen: das Fluid strömt von oben und unten gleichmäßig an der Lauffläche entlang und trifft in der Radmitte aufeinander. In Abb. 13 werden nun die Strömungsverhältnisse des drehenden Rads dargestellt.

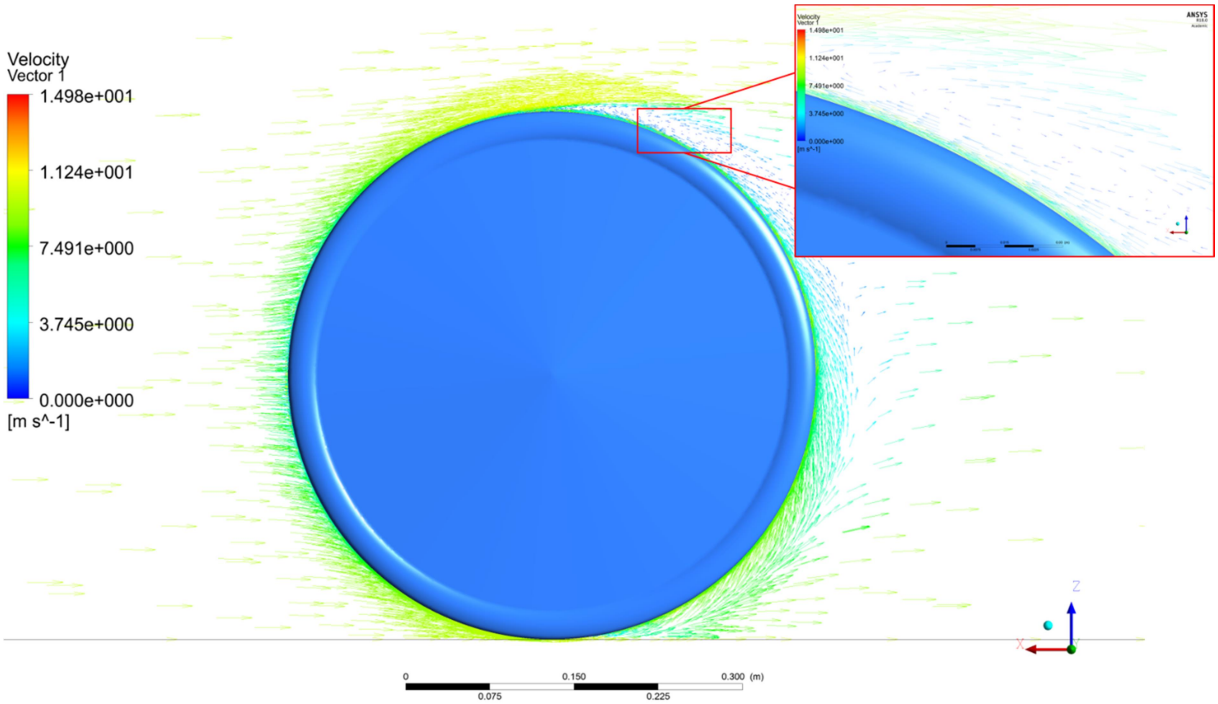


Abbildung 13: Geschwindigkeitsplot mit Vektoren des drehenden Rads

Vergleicht man nun die obige Abbildung mit Abbildung 12, so ist ein deutlicher Unterschied in der Strömungsrichtung zu erkennen. Sobald das Fluid auf die Lauffläche trifft, wird dieses sofort durch die Reibung in Laufrichtung des Rades mitgezogen. Gleichzeitig zieht die Reibung das Fluid auf der Rückseite des Rads mit nach oben und bildet mit der Strömung über dem Rad einen Wirbel. Dieser Wirbel ist in Abb. 14 deutlicher dargestellt.

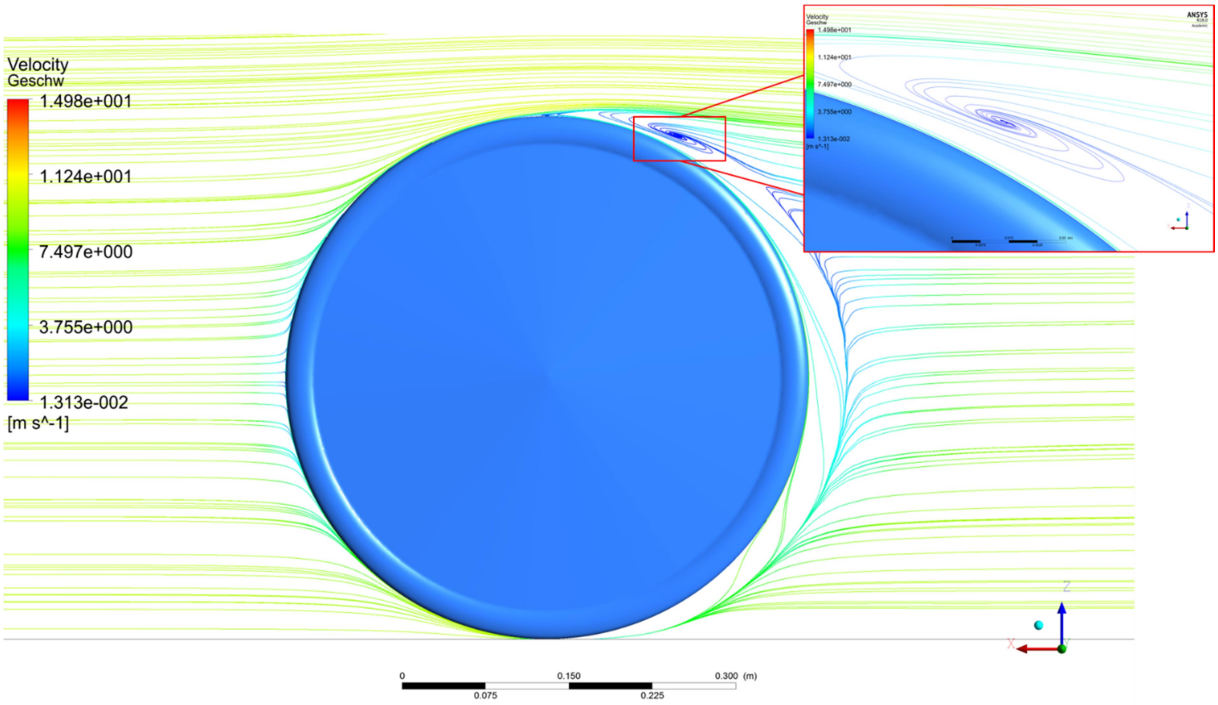


Abbildung 14: Geschwindigkeitsplot mit Stromlinien des drehenden Rads

Durch die Darstellung der Geschwindigkeit mit Stromlinien können Wirbel oder Ablösungen sehr gut identifiziert und untersucht werden. In diesem Fall bildet sich oben hinter dem Rad ein starker Wirbel durch die Rückströmung des Fluids auf der Lauffläche. Bei genauerer Betrachtung wird die Strömung aufgrund des Wirbels leicht nach oben gedrückt, welche normalerweise ungehindert über dem Rad vorbei strömen kann (siehe Abbildung 12). Dies ist der Grund für eine höhere Widerstandskraft und somit auch einen höheren c_w-Wert beim drehenden Rad.

Die Untersuchung des Einflusses der drehenden Räder zeigt, dass sich bei drehenden Rädern der c_w-Wert erhöht. Durch Verwirbelungen an der Rückseite der Räder wird der Strömungswiderstand des kompletten Fahrzeugs höher und somit wird ein falscher c_w-Wert ermittelt. Die nachfolgende Simulation des kompletten Fahrzeugs muss durch obige Randbedingungen ergänzt werden um ein reales Ergebnis zu erzielen.

3.3 Durchführung einer Netzstudie

Vor der eigentlichen Fahrzeug-Simulation ist es von Vorteil, eine sogenannte Netzstudie durchzuführen. Diese soll zeigen, wie fein das Netz sein muss, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten und gleichzeitig wie grob die Vernetzung sein darf, um so eine Einsparung wichtiger Rechenzeit zu ermöglichen.

3.3.1 Definition der Geometrie und Randbedingungen

Unter einer Netzstudie versteht man die Abwicklung mehrerer Simulationen mit unterschiedlichen Vernetzungsparametern. Dazu wird vorab allerdings noch die Definition der gesamten Geometrie, sowie der Randbedingungen benötigt.

Bezogen auf die Geometrie, müssen alle Flächen der CAD-Datei benannt werden, um ihnen anschließend entsprechende Randbedingungen zuzuordnen.

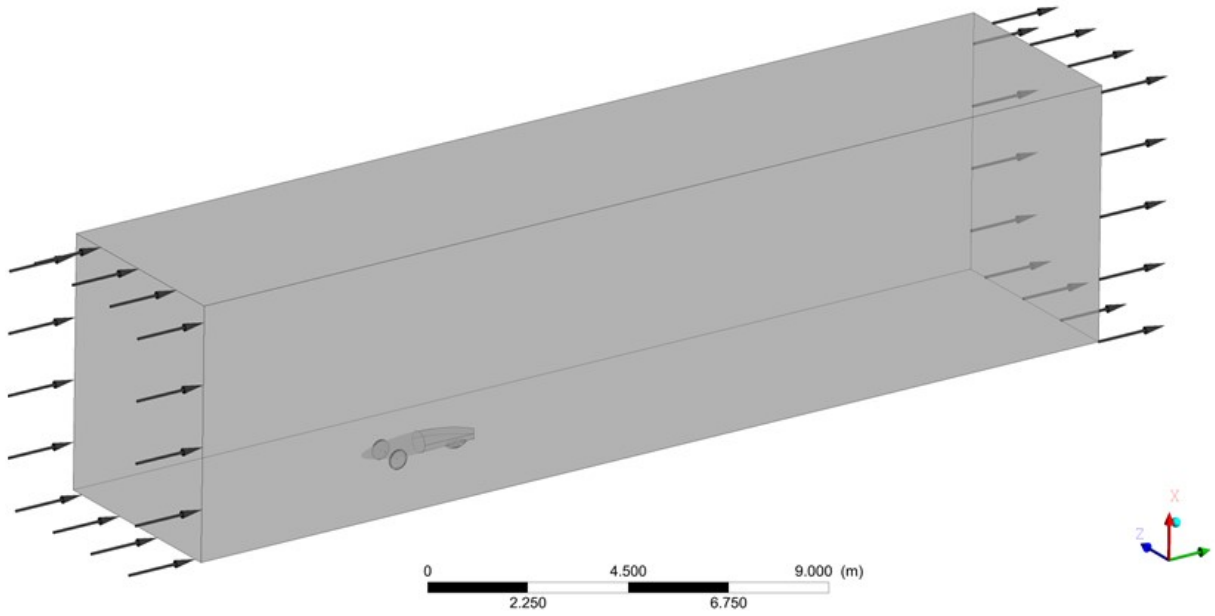


Abbildung 15: Darstellung der Geometrie

Insgesamt ist der Quader in vier Komponenten aufzuteilen. Die linke Fläche in Abb. 15 ist der „Inlet“. Dieser stellt die gesamte Anströmfläche der Geometrie dar. Er ist durch auf den Quader zeigende Pfeile gekennzeichnet. Demnach ist die rechte Fläche der „Outlet“ durch Pfeile gekennzeichnet, welche vom Quader wegführen. Die Flächen links, rechts und über dem Fahrzeug sind als sogenannte „Wall“ definiert. Wie der Name erahnen lässt, handelt es sich hier um eine Begrenzung des Strömungsgebietes. Der Boden ist hier separat als „Ground“ zu definieren, da dieser im Gegensatz zur „Wall“ eine Geschwindigkeit besitzt, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten.

Das Fahrzeug an sich ist in zwei Komponenten aufgeteilt. Da sich die Vorderräder während der Simulation drehen sollen, sind diese zum restlichen Fahrzeug separat zu definieren. Somit besteht die Möglichkeit, im Anschluss die richtigen Randbedingungen den entsprechenden Komponenten zuzuordnen, und so möglichst realitätsgetreue Umstände zu schaffen.
Die jeweiligen Randbedingungen sind in der folgenden Tabelle 7 aufgelistet. Dabei ist zu erkennen, dass beim Inlet die Luft mit 25 km/h einströmt und sich der Ground mit gleicher Geschwindigkeit in dieselbe Richtung bewegt. Darüber hinaus drehen sich die Räder mit exakt der Winkelgeschwindigkeit, welche bei einer Fahrt mit 25 km/h auftritt. Da die Wall als „Free Slip Wall“ definiert ist, tritt an ihr keine Reibung auf. Sie dient lediglich zur Begrenzung des Raumes, hat aber keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

Tabelle 7: Randbedingungen der Komponenten

Fläche	Einstellung/ Randbedingung
Inlet	*Flow Regime* Option: Subsonic
	Mass and Momentum Option: Normal Speed Normal Speed: 25 km/h
	Turbulence Option: Medium
Outlet	*Flow Regime* Option: Subsonic
	Mass and Momentum Option: Static Pressure Relative Pressure: 1 bar
Wall	*Mass and Momentum* Option: Free Slip Wall
Ground	*Mass and Momentum* Option: No Slip Wall
	Wall Velocity Wall U: 0 km/h Wall V: 25 km/h Wall W: 0 km/h
	Wall Roughness Option: Smooth Wall
Car	*Mass and Momentum* Option: No Slip Wall
	Wall Roughness Option: Smooth Wall
Räder	*Mass and Momentum* Option: No Slip Wall
	Wall Velocity Option: Rotating Wall Angular Velocity: 29,55083 rad/s
	Axis Definition Option: Two Points

	Rotation Axis From	-2,865	-5,331	10^3
	Rotation Axis To	-2,865	-5,331	-10^3
	Wall Roughness Option: Smooth Wall			

Die festgelegten Randbedingungen spiegeln die reale Situation eines fahrenden Autos sehr präzise wieder. Der einzige Unterschied liegt darin, dass nicht das Auto sich durch den Raum bewegt, sondern der Raum um das Auto.

Jedes Simulationsprogramm deckt ein breit gefächertes Anwendungsspektrum ab. Aus diesem Grund ist es notwendig, für diesen speziellen Fall der Umströmung die passenden Strömungsparameter auszuwählen. Diese sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Grundeinstellungen

Bezug	Einstellungen
Basic Settings	*Fluid 1* Option: Material Libary Material: Air at 25°C
	Morphology Option: Continuous Fluid
	Pressure Reference Pressure: 1 bar
Fluid Models	*Heat Transfer* Option: Isothermal Fluid Temperature 25°C
	Turbulence Option: k-Epsilon Wall Function: Scalable

Als Anströmmedium ist Luft bei 25°C bei einem Atmosphärendruck von 1 bar zu wählen. *ANSYS* bietet eine große Auswahl an Turbulenzmodellen an, welche für die unterschiedlichsten Anwendungen geeignet sind.

Die am häufigsten verwendeten Turbulenzmodelle sind das k-ω-, das k-ε-, und das SST-Modell. Um festzustellen, welches Turbulenzmodell für eine Umströmung von Körpern am geeignetsten ist, ist im Rahmen dieser Projektarbeit zunächst ein Vergleich der drei genannten Modelle mit einem Referenzkörper durchzuführen, dessen c_w-Wert aus der Literatur bereits bekannt ist.

Dies ist in den vorherigen Kapiteln (Simulation eines Referenzkörpers) beschrieben. Als Resultat dieser Referenzmessung geht das k-ε-Modell hervor, da das Ergebnis der Simulation mit diesem Turbulenzmodell nahezu dem c_w-Wert aus der Literatur entspricht.

Im nächsten Schritt folgen die Simulationen. Dabei ist lediglich die Elementgröße des Rechennetzes zu verändern. Zu beginnen ist mit einem relativ groben Netz. Dieses ist anschließend kontinuierlich zu verfeinern, bis zu dem Punkt, an dem sich der c_w-Wert nicht mehr verändert. Die eingestellten Randbedingungen bleiben dabei unverändert.

3.3.2 Netzerstellung

Die Umströmung von Objekten kann durch verschiedene Ansätze simuliert werden. Im Rahmen dieser Projektarbeit ist in einem CAD-Programm ein Quader zu konstruieren, aus dem das Fahrzeugmodell herausgeschnitten wird (Abb. 16).

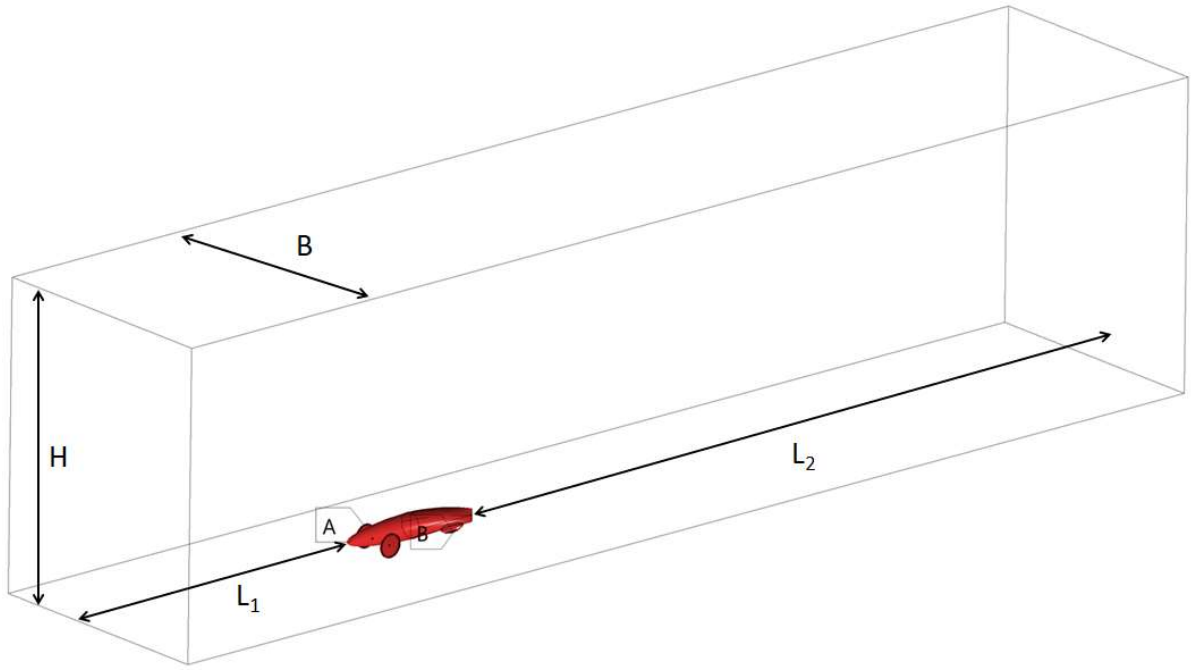


Abbildung 16: Quader mit herausgeschnittener Fahrzeuggeometrie (rot eingefärbt)

Die Abmessungen des Quaders sind wie folgt definiert:

- H = (5 bis 10)*Fahrzeughöhe
- B = (2 bis 3)*Fahrzeugbreite
- L_1 = (1 bis 2)*Fahrzeuglänge
- L_2 = (3 bis 5)*Fahrzeuglänge.

Um bei einer Simulation repräsentative Werte zu erhalten, sind an das Rechennetz hohe Anforderungen zu stellen.

Aus diesem Grund ist unter anderem die Außenhaut des Quaders mit einer strukturierten Flächenvernetzung zu versehen, wie Abb. 17 zeigt. Diese Maßnahme führt zu einer Steigerung der Netzqualität und damit zu einer Reduktion von Abbruch- und Diskretisierungsfehlern.

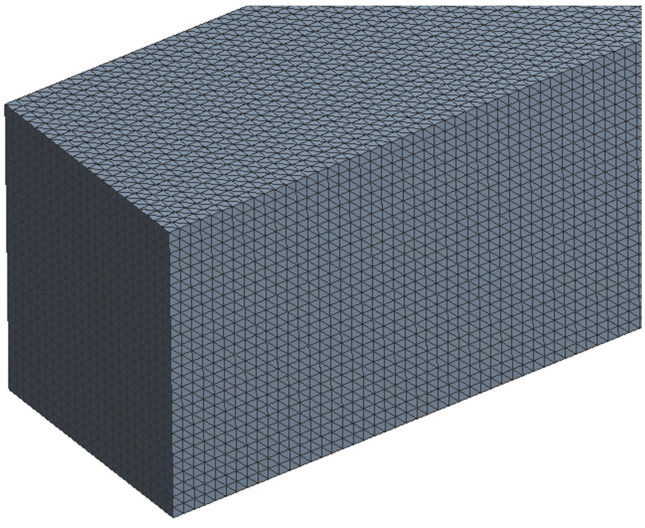


Abbildung 17: Strukturierte Flächenvernetzung des Quaders

Da es sich bei diesem Projekt um eine c_w-Wert Messung handelt, sind die Elemente rund um das umströmte Objekt ausschlaggebend für die Güte der Simulation. Daher sind diese besonders fein zu wählen.
Wie Abb. 18 verdeutlicht, ist die Elementgröße um das Fahrzeug deutlich geringer als die der im Hintergrund eingeblendeten strukturierten Flächenvernetzung des Quaders. Besonders fein ist das Netz an der Mantelfläche der Vorderreifen, sowie am Hinterreifen.

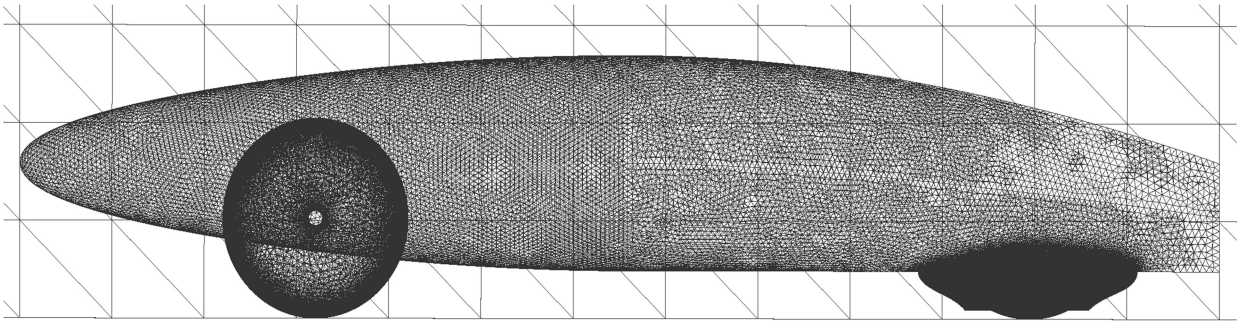


Abbildung 18: Vernetzung der Fahrzeugoberfläche

Der Grund für diese enge Vernetzung an gewissen Stellen liegt in der Erstellung der sogenannten Prismenschichten (Inflation layer), welche sich über die gesamte Fahrzeugoberfläche erstrecken und für die Simulation unabdingbar sind.

Bei der Umströmung eines Körpers bildet sich an seiner Oberfläche ein Geschwindigkeitsprofil aus. Direkt auf der Oberfläche des Objekts ist die Geschwindigkeit bekanntlich gleich null. Mit zunehmendem Abstand bildet sich je nach Anströmgeschwindigkeit ein entsprechendes Geschwindigkeitsprofil aus, welches durch das Simulationsprogramm bei ausreichend feiner Vernetzung korrekt abgebildet oder bei zu grober Vernetzung durch im Programm hinterlegte Formeln berechnet wird. Für die komplette Abbildung des Geschwindigkeitsprofils an der Fahrzeugoberfläche sind dort sogenannte Prismenschichten (Inflation layer) einzufügen. Dabei wird die Vernetzung zum Festkörperrand hin verdichtet. Dies wird in Abb. 19 verdeutlicht, in der eine Schnittansicht des Modells zu sehen ist.

Eingabeparameter in *ANSYS* sind zum einen der Abstand des ersten Gitterpunktes von der Oberfläche, zum anderen die Anzahl an Prismenschichten.

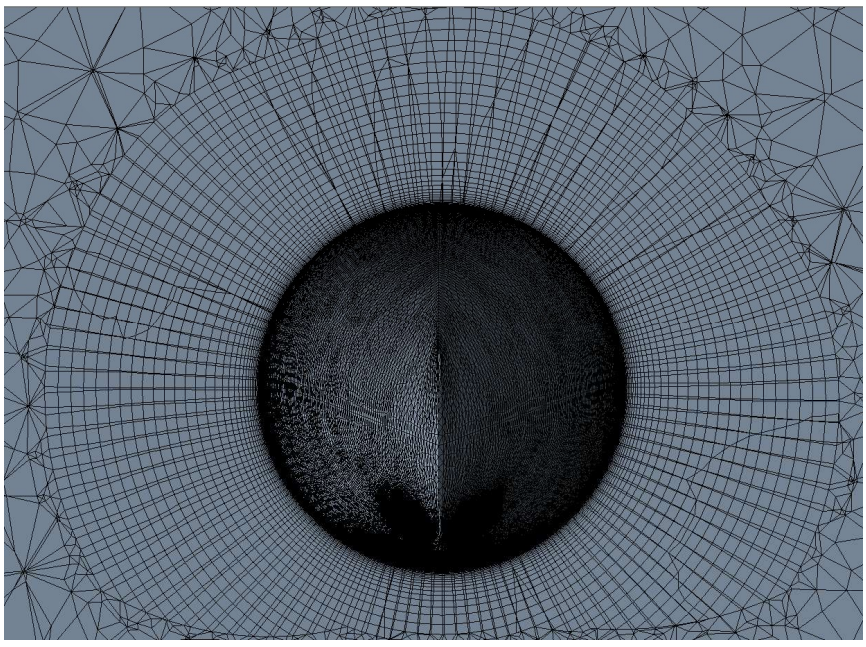


Abbildung 19: Schnittansicht des Fahrzeugmodells umgeben von Prismenschichten

Bei genauerer Betrachtung von Abb. 19 fällt auf, dass durch die Anwendung von Prismenschichten rund um das Fahrzeug automatisch ein strukturiertes Netz erstellt wird. Dies führt zu einer Zunahme der Netzqualität, da die Qualität eines strukturierten Netzes generell höher ist als die eines unstrukturierten Netzes.

Die Güte der Verdichtung des Rechennetzes in Oberflächennähe ist durch den sogenannten y^+-Wert definiert. Das y^+ ist ein Maß für den Oberflächenabstand, also für den Abstand des ersten Gitterpunktes von der Oberfläche des Fahrzeugs. Für dieses Umströmungsbeispiel soll der y^+-Wert nicht größer als 120 sein.

Nun ist das Netz an der Oberfläche und in näherer Umgebung des Fahrzeugs zwar sehr fein aufgelöst, im restlichen Raum, welcher das Fahrzeug umgibt, ist die Vernetzung allerdings noch sehr grob. Generell stellt dies kein Problem dar, allerdings hat die Verwirbelung der Luft, welche das Fahrzeug hinter sich verursacht ebenfalls einen Einfluss auf den c_w-Wert. Darüber hinaus können durch die Darstellung der Verwirbelungen Optimierungsmaßnahmen entwickelt werden, um diesen entgegenzuwirken.

Um die hinter dem Fahrzeug auftretenden Wirbel aufzuzeigen, muss in diesem Bereich das Netz ebenfalls verfeinert werden. Dies gelingt durch die lokale Elementverfeinerung. Wie in Abb. 20 zu sehen ist, werden dafür drei Kugeln hinter dem Fahrzeug entsprechend platziert. Innerhalb der Kugeln ist die Elementgröße so einzustellen, dass daraus eine ausreichend genaue Darstellung der Wirbel resultiert.

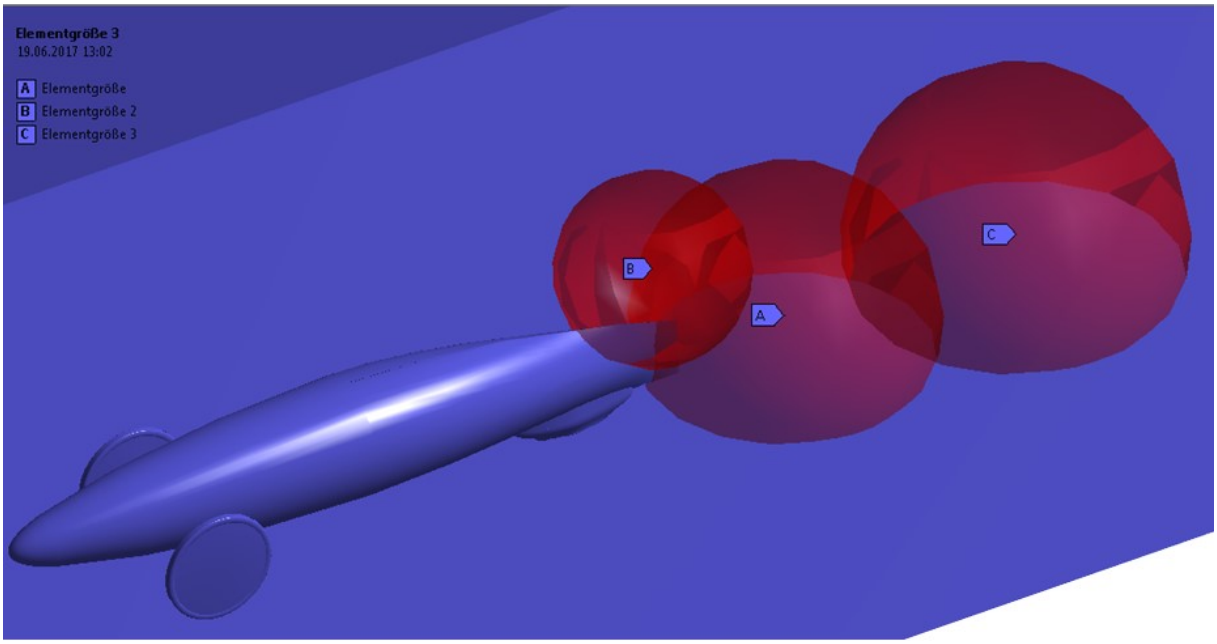


Abbildung 20: Darstellung der lokalen Elementgrößen-Einstellung

3.3.3 Konvergenzverhalten der Netzstudie

In diesem Kapitel werden die Konvergenzverläufe der verschiedenen Simulationen der Netzstudie miteinander verglichen. Für eine aussagekräftige Simulation ist es erforderlich, dass die Residuen unter den Wert 10^{-4} (=0,001% Fehler) absinken. Ist dies der Fall, spricht man von einer konvergenten Lösung, was bedeutet, dass die Differentialgleichungen erfüllt sind. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der stabile Verlauf der Residuen. Schwingt dieser sehr stark, so ist die numerische Lösung kritisch zu betrachten.

Bei genauerer Betrachtung von Abb. 21 fällt neben den leicht schwingenden Residuenverläufen auf, dass sich diese zwar mit der Zeit einpendeln, aber einer der vier Verläufe den Wert 10^{-4} immer wieder überschreitet.

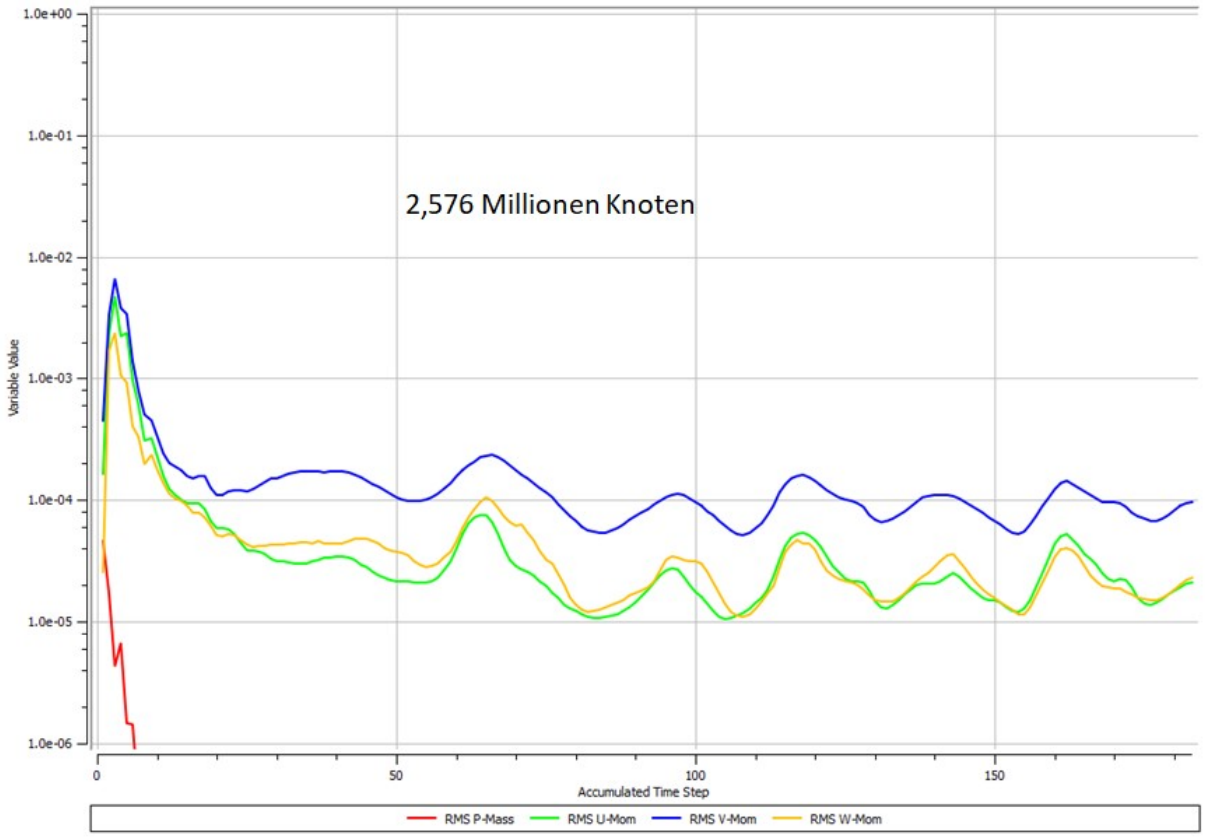


Abbildung 21: Residuenverlauf (2,576 Mill Knoten)

Die verschiedenen Konvergenzverläufe stehen für folgende Differentialgleichungen:

- Roter Verlauf: Massenerhaltungsgleichung
- Grüner Verlauf: Impulserhaltungsgleichung in x-Richtung
- Blauer Verlauf: Impulserhaltungsgleichung in y-Richtung
- Gelber Verlauf: Impulserhaltungsgleichung in z-Richtung

Daraus folgt, dass die Berechnung der Impulserhaltungsgleichung in y-Richtung (Anström-richtung) mit einem größeren Fehler behaftet ist. Abhilfe leistet hier eine Netzverfeinerung.

Die Konvergenzverläufe in Abb. 22 entsprechen der Simulation mit einem sehr feinen Rechennetz. Im Vergleich zum groben Netz nehmen die Verläufe insgesamt bis zum Ende der Simulation hin ab.

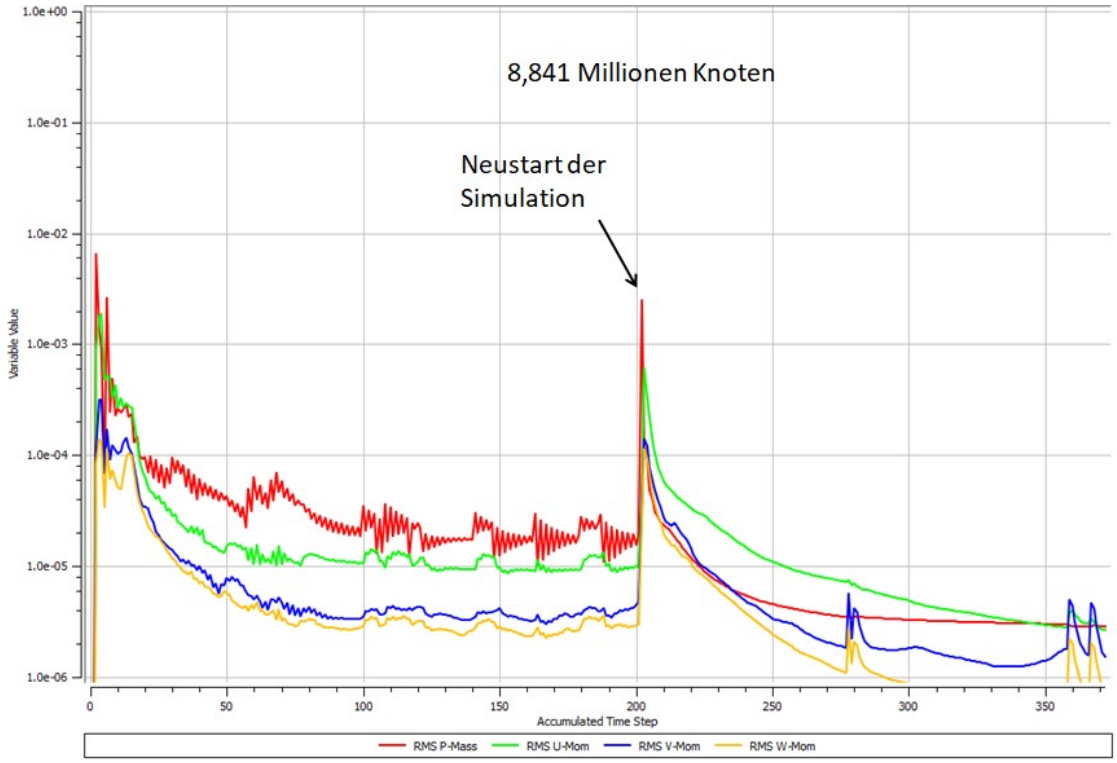


Abbildung 22: Residuenverläufe (8,841 Millionen Knoten)

Da der Fehler am Ende kleiner als 0,0001% ist und weiter abnimmt, kann an diesem Punkt die Simulation gestoppt werden, da sich die Ergebnisse nicht mehr ändern werden. Ursache für den geringen Fehler ist die Verfeinerung des Netzes.

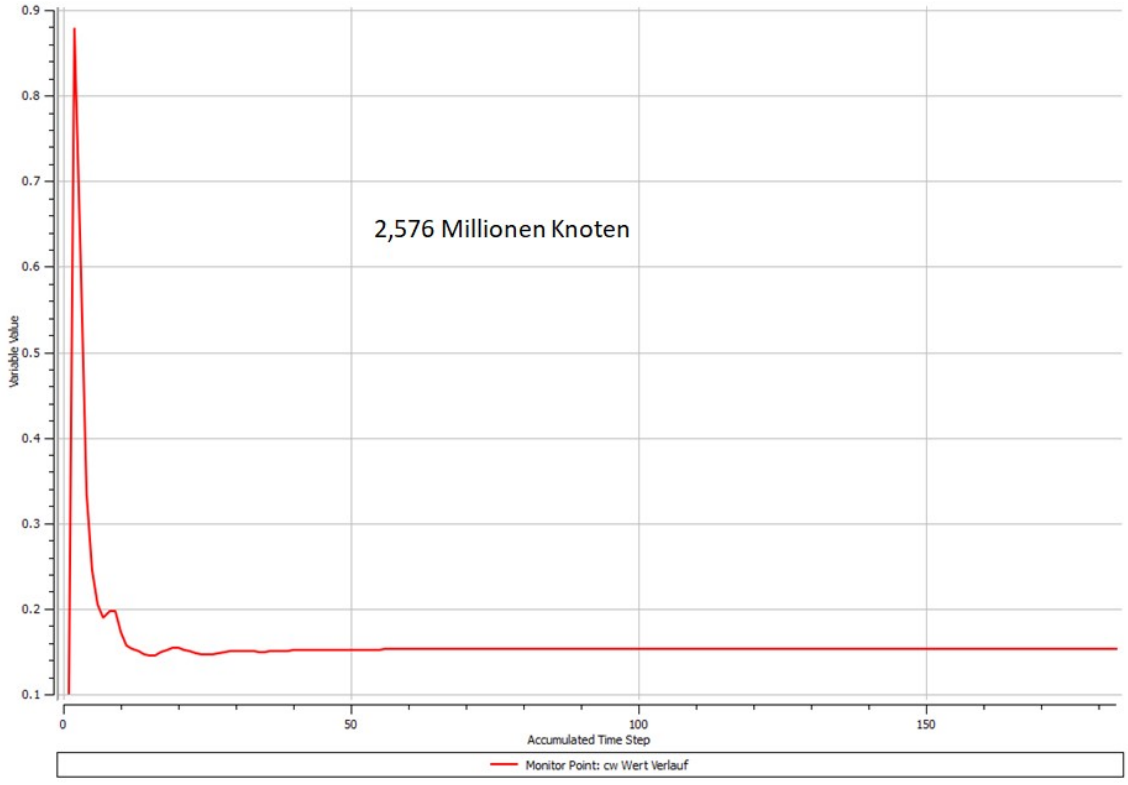


Abbildung 23: c_w-Wert Verlauf

Durch den im Setup erstellten Monitorpoint „c_w-Wert Verlauf“ ist es möglich, während des Lösungsvorgangs zu verfolgen, ob das Ergebnis der Simulation konvergiert. In Abb. 23 ist der Verlauf des c_w-Wertes für die Simulation mit dem gröbsten Netz dargestellt. Wie zu sehen ist, pendelt sich dieser trotz des Rechenfehlers (siehe Abb. 21) sehr schnell ein. Das spricht für eine gute Netzqualität. Auch durch die Verfeinerung des Netzes verändert sich der Verlauf kaum.
Was sich jedoch mit steigender Elementzahl des Netzes verändert ist der Betrag des c_w-Wertes. Mit zunehmender Netzverfeinerung strebt der c_w-Wert gegen einen konstanten Betrag. Genau darin liegt der Vorteil einer Netzstudie.
Das Netz ist solange zu verfeinern, bis sich die Ergebnisgröße bei konstant gehaltenen Randbedingungen nicht mehr verändert. Einerseits besteht dadurch die Gewissheit, dass Netz fein genug ausgelegt zu haben um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Andererseits ist das Netz aber nicht unnötig fein gestaltet, was zur Einsparung wichtiger Rechenzeit beiträgt. Auf diesen wichtigen Punkt wird im folgenden Kapitel eingegangen.

3.3.4 Ergebnisse und Ausblick

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Netzstudie miteinander zu vergleichen. Wie bereits beschrieben, ist die erste Simulation mit einem groben Netz durchzuführen. Die eingestellten Netzparameter sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Netzparameter (2575898 Knoten)

Netz 1:	
Anzahl an Knoten	2575898
Elementgröße allgemein [mm]	260
Elementgröße Fläche 1 [mm]	19,2
Elementgröße Fläche 2 [mm]	3,2
Elementgröße Fläche 3 [mm]	1,6
Elementgröße Fläche 4 [mm]	3,2
Inflationlayer (Prismenschichten) [mm]	0,08
Anzahl an Prismenschichten	50
Elementgröße in den Kugeln [mm]	24
c_w-Wert	**0,153751**

Die allgemeine Elementgröße beschreibt die maximale Kantenlänge sämtlicher Elemente innerhalb des Quaders, welche nicht durch weitere Parameter verändert werden. Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, ist die Elementgröße auf der Fahrzeugoberfläche zu verfeinern (Abb. 18). Dabei gilt:

- Elementgröße Fläche 1: Rumpf des Fahrzeugs
- Elementgröße Fläche 2: Verkleidung des Hinterrades
- Elementgröße Fläche 3: Mantelfläche des Hinterrades
- Elementgröße Fläche 4: Vorderachse und Mantelflächen der Vorderräder.

Aus diesen Vernetzungsparametern resultiert der in Tab. 9 beschriebene c_w-Wert.

Für eine aussagekräftige Netzverfeinerung sind nun die Elementgrößen und der Abstand der ersten Prismenschicht kontinuierlich zu reduzieren. Die allgemeine Elementgröße wird bis auf die Simulation mit dem feinsten Netz konstant gehalten, da sie keinen Einfluss auf die Ergebnisse ausübt.
Allerdings muss vom Programm zwischen den verschieden großen Elementen ein Übergang geschaffen werden. Um dies zu gewährleisten, dürfen die Elementgrößen nicht zu stark voneinander abweichen. Aus diesem Grund ist bei Netz 6 eine Reduktion der allgemeinen Elementgröße erforderlich, wie Tabelle 10 verdeutlicht.

Tabelle 10: Netzparameter der Netzstudie

	Netz 2: (20% feiner)	Netz 3: (40% feiner)	Netz 4: (50% feiner)	Netz 5: (60% feiner)	Netz 6: (70% feiner)
Anzahl an Knoten	3506088	4971052	6031550	7521558	8841105
Elementgröße allgemein [mm]	260	260	260	260	234
Elementgröße Fläche 1 [mm]	16,8	14,4	13,2	12	10,8
Elementgröße Fläche 2 [mm]	2,8	2,4	2,2	2,0	1,8
Elementgröße Fläche 3 [mm]	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9
Elementgröße Fläche 4 [mm]	2,8	2,4	2,2	2,0	1,8
Inflation layer (Prismen-schichten) [mm]	0,07	0,06	0,055	0,05	0,045
Anzahl an Prismenschichten	50	50	50	50	50
Elementgröße in den Kugeln [mm]	21	18	16,5	15	13,5
c_w-Wert	**0,151755**	**0,149462**	**0,148213**	**0,148200**	**0,148202**

Bei genauerer Betrachtung der c_w-Werte fällt auf, dass ab Netz 4 der Wert nahezu konstant verläuft. Somit ist für die folgenden Simulationen (Ermittlung des c_w-Wertes bei verschiedenen Geschwindigkeiten) Netz 4 zu verwenden. Um den Verlauf zu veranschaulichen, ist in Abb. 24 der c_w-Wert über die Knotenanzahl aufgetragen.

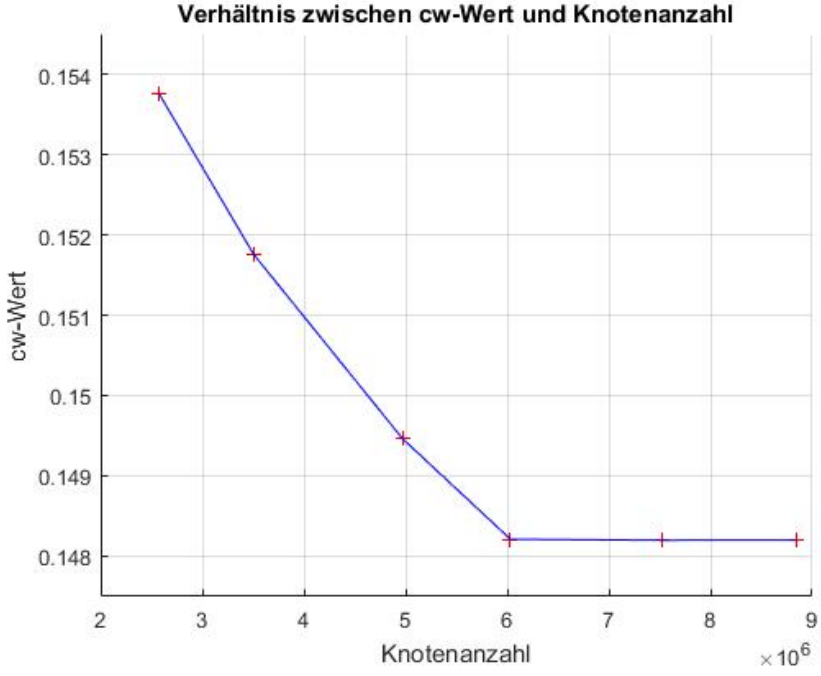


Abbildung 24: Verhältnis zwischen c_w-Wert und Knotenanzahl

3.4 Strömungssimulation des Fahrzeugs

3.4.1 Definition der Randbedingungen

Mit den festgelegten Vernetzungsparametern sind nun die eigentlichen Strömungssimulationen durchzuführen. Dabei ist das Geschwindigkeitsspektrum von 5 km/h bis 45 km/h abzudecken. Alle Parameter, welche zwischen den Simulationen zu verändern sind, sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Zu verändernde Simulationsparameter

Anström-geschwindigkeit [km/h]	Winkelgeschwindigkeit der Räder [rad/s]	Gewähltes Turbulenzmodell (TM)
5,0	5,91017	Ohne TM
10,0	11,82033	Ohne TM
15,0	17,73050	Ohne TM
20,0	23,64066	k-Epsilon-TM
23,0	27,18676	k-Epsilon-TM
25,0	29,55083	k-Epsilon-TM
30,0	35,46099	k-Epsilon-TM
35,0	41,37116	k-Epsilon-TM
40,0	47,28132	k-Epsilon-TM
45,0	53,19149	k-Epsilon-TM

Die Simulation bei 23 km/h ist durch den Windkanal zu begründen, dessen maximale Strömungsgeschwindigkeit 140 km/h beträgt. Für die Messungen steht ein 1:6 Modell zur Verfügung. Die Geschwindigkeit von 138 km/h beim 1:6 Modell entspricht demnach einer Geschwindigkeit von 23 km/h bei einem 1:1 Modell, wie es in den Simulationen zu verwenden ist.
Bis einschließlich 15 km/h ist es von Vorteil, ohne Turbulenzmodell zu simulieren, da die geringe Anströmgeschwindigkeit im laminaren Bereich liegt und somit keine Turbulenzen erzeugt werden. Die Anwendung eines Turbulenzmodells in diesem Geschwindigkeitsbereich würde stark schwankende Residuenverläufe und damit eine starke Verfälschung der Ergebnisse nach sich ziehen.

Den Beweis dafür liefert die kritische Reynoldszahl. Sie stellt den Übergang von laminarer in turbulente Strömung dar und liegt bei der Umströmung von Fahrzeugen bei etwa $Re_{krit} = 10^6$. Allgemein ist die Reynoldszahl durch folgende Formel definiert,

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\eta}$$

wobei die in der Formel verwendeten Variablen wie in Tabelle 12 festzulegen sind.

Tabelle 12: Variablen der Reynoldszahlgleichung

Formelzeichen	Definition	Für diesen speziellen Fall
$\boldsymbol{\rho}$	Dichte	ρ = 1,18 kg/m^3
$\boldsymbol{v}$	Strömungsgeschwindigkeit	-
$\boldsymbol{d}$	Charakteristische Länge	d = 3,05 m (Länge des Modells)
$\boldsymbol{\eta}$	Dynamische Viskosität	η = 1,71*10 $^{-5}$ Pas

Wie zu erkennen ist, sind Dichte, charakteristische Länge, sowie die dynamische Viskosität Konstanten. Die einzige veränderliche Variable ist die Strömungsgeschwindigkeit. Aus diesem Grund ändert sich die Reynoldszahl proportional zur Strömungsgeschwindigkeit.

Dieser Zusammenhang ist in Abb. 25 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Reynoldszahl bis 15 km/h noch unterhalb dem kritischen Wert von 10^6 liegt. Dies begründet die Simulation ohne Turbulenzmodell.

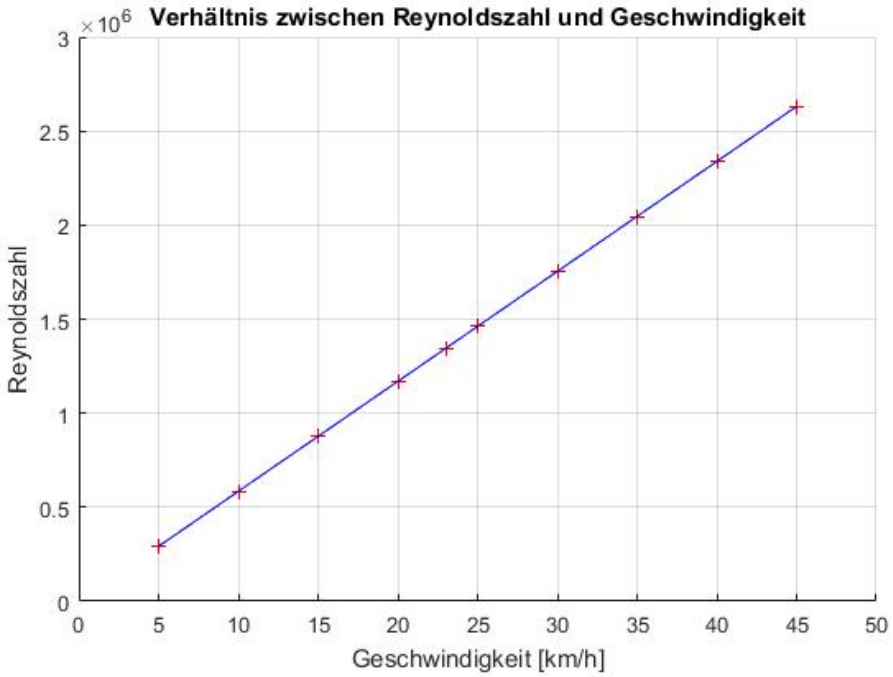


Abbildung 25: Verlauf der Reynoldszahl bei zunehmender Geschwindigkeit

Bei 20 km/h ist die Reynoldszahl jedoch deutlich größer als der kritische Wert. Daher ist hier die Anwendung eines Turbulenzmodells unabdingbar.

3.4.2 Ergebnisse der Strömungssimulationen

In diesem Kapitel sind die durch die Strömungssimulationen gewonnenen Ergebnisse zu diskutieren. Dabei ist zunächst auf die c_w-Werte des Modells bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten einzugehen. Diese sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Simulationsergebnisse

Geschwindigkeit [km/h]	c_w -Wert [-]	c_w * A [m^2]
5	0,209354	0,055060
10	0,181336	0,047691
15	0,171207	0,045027
20	0,152467	0,040099
23	0,149951	0,039437
25	0,148213	0,038980
30	0,146195	0,038449
35	0,144514	0,038007
40	0,143400	0,037714
45	0,142300	0,037425

Zu erkennen ist die Abnahme des c_w-Werts bei zunehmender Geschwindigkeit. Die rechte Spalte stellt die Multiplikation des c_w-Werts mit der projizierten Fläche des Modells (A = 0,263m^2) dar.

Um die Ergebnisse zu veranschaulichen ist in Abb. 26 der c_w-Wert Verlauf in Abhängigkeit der Geschwindigkeit aufgetragen. Steht das Modell (Anströmgeschwindigkeit = 0 km/h) strebt der c_w-Wert gegen Unendlich. Dadurch ist bei abnehmender Geschwindigkeit eine zunehmende Steigung des Verlaufs zu begründen. Dieser Verlauf untermauert die korrekte Ausführung der Simulationen.

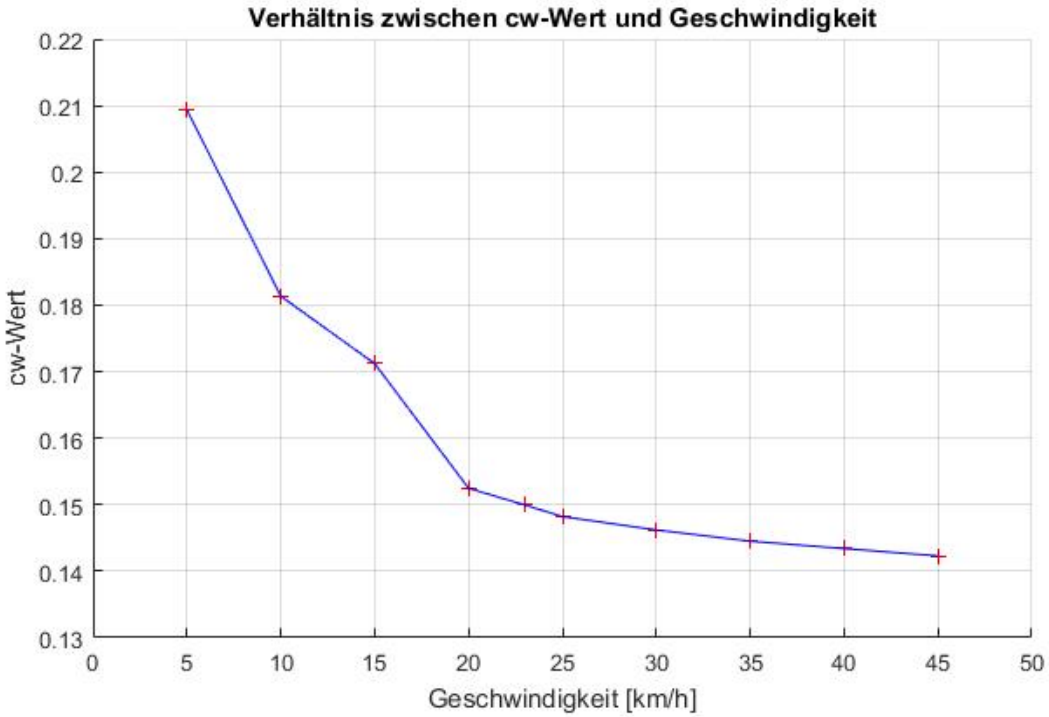


Abbildung 26: Verlauf des c_w-Werts bei zunehmender Geschwindigkeit

Des Weiteren ist eine größere Abweichung des Verlaufs bei 15 km/h zu verzeichnen. Grund dafür ist, dass in diesem Geschwindigkeitsbereich der Übergang von laminarer- in turbulente Strömung erfolgt. Analysen im Übergangsbereich sind für das Programm schwer zu simulieren, da sich die Strömungsbedingungen stetig ändern. Somit schwanken die Ergebnisse und sind deshalb als kritisch zu betrachten.

Alle weiteren Ergebnisse entsprechen jedoch den Erwartungen, weichen kaum ab und bilden, wie Abb. 26 zeigt, einen einheitlichen Verlauf des c_w-Werts.

Grundsätzlich sind zur Validierung einer Strömungssimulation weitere Strömungsgrößen wie z.B. der Druck- oder Geschwindigkeitsverlauf zu bewerten. Sind diese unrealistisch, ist dies ebenfalls ein Zeichen für eine fehlerhaft durchgeführte Simulation. In Abb. 27 ist beispielsweise der Druckverlauf dargestellt.

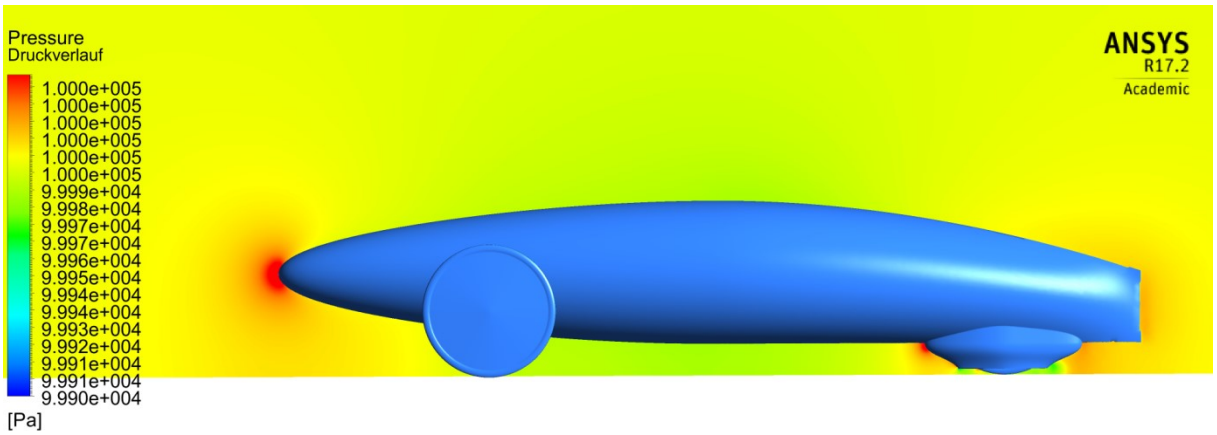


Abbildung 27: Druckverlauf bei 40 km/h

Um diese veranschaulichen zu können, ist eine zusätzliche Ebene (Symmetrieebene) durch die Längsachse des Fahrzeugrumpfes einzufügen. Deutlich zu erkennen ist die Ausbildung des Staudruckes an den Staupunkten des Modells. In diesem Fall bildet sich dieser am vordersten Punkt des Modells, sowie an der Verkleidung des Hinterrades (rot gekennzeichnete Bereiche). Bei Betrachtung im dreidimensionalen Raum sind weitere Druckerhöhungen (Staudruck) an der Vorderachse, sowie an den Vorderrädern zu verzeichnen.

Da die Ergebnisse der Simulation eines sich drehenden Rades jedoch schon in den vorherigen Kapiteln ausführlich diskutiert wurden, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen. Der aufgezeigte Druckverlauf gibt reale und damit repräsentative Werte wieder, was für eine korrekt durchgeführte Simulation spricht.

In Abb. 28 ist die Geschwindigkeitsverteilung in Form von Vektoren dargestellt. Bei genauerer Betrachtung ist festzustellen, dass der Rumpf des Modells sehr aerodynamisch ausgelegt ist und nahezu keine Wirbelströmungen am Fahrzeug verursacht.

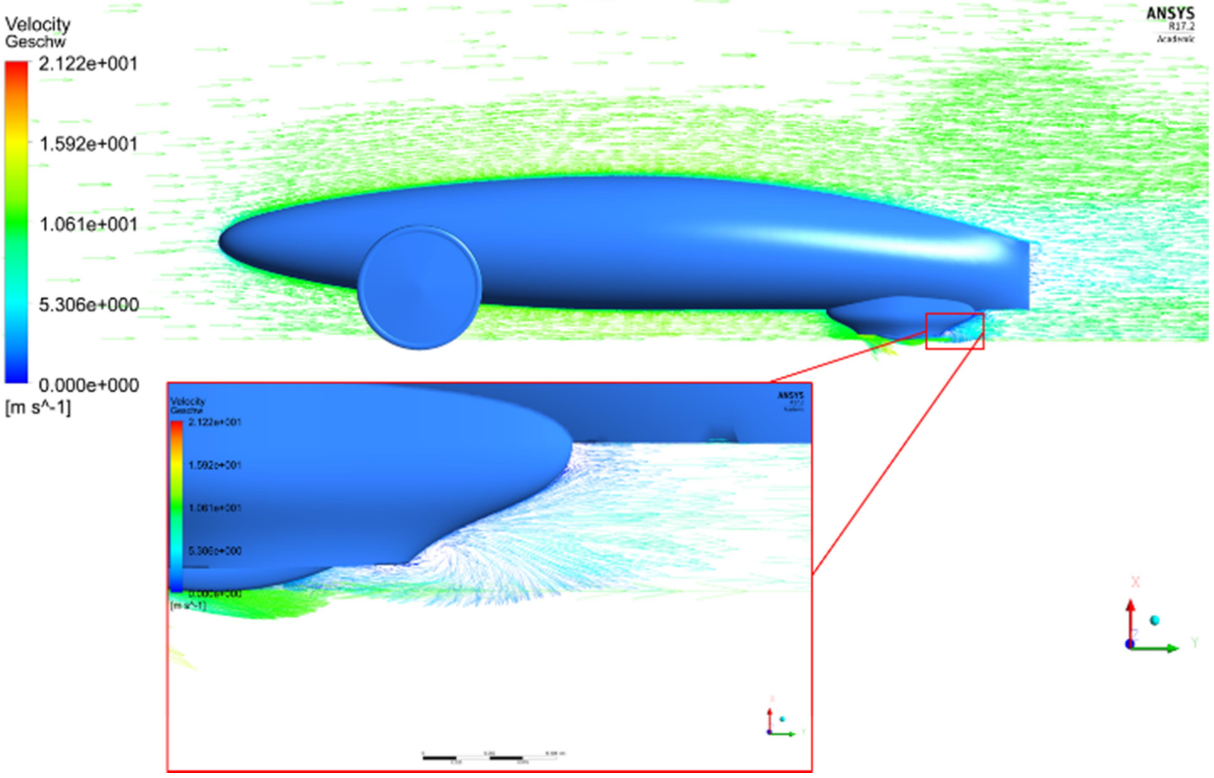


Abbildung 28: Geschwindkeitsvektoren bei 40 km/h

Dagegen treten am Hinterrad ähnlich wie an den Vorderrädern des Modells starke Verwirbelungen auf. Dies liegt unter anderem am starken Geschwindigkeitsgradienten, welcher in diesem Bereich vorliegt.

Nun ist der Geschwindigkeitsverlauf zu bewerten. Abb. 29 zeigt auf, dass hinter dem Modell die Geschwindigkeit deutlich reduziert ist (hellblauer Streifen), was leichte Verwirbelungen und Ablösungen der Luft zur Folge hat. Des Weiteren ist eine Reduktion der Geschwindigkeit vor dem Modell, sowie hinter der Hinterradverkleidung zu verzeichnen.

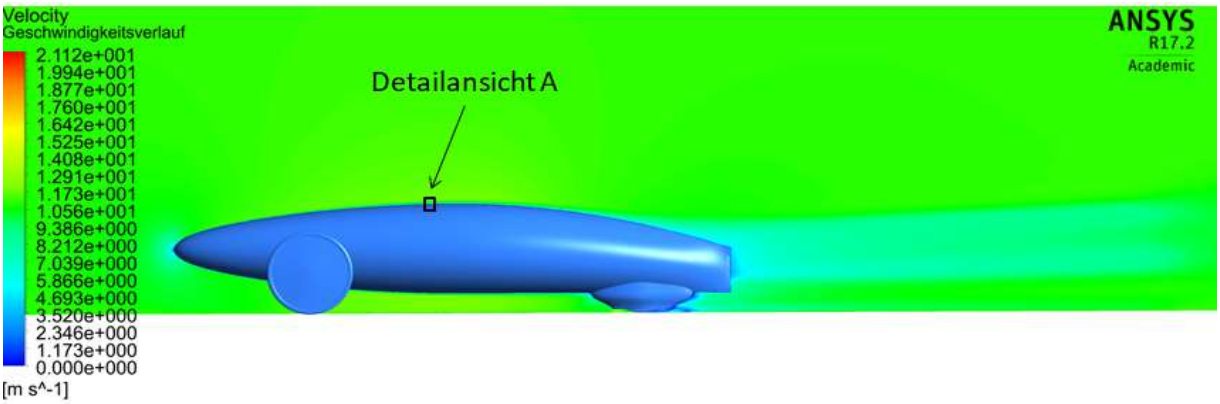


Abbildung 29: Geschwindigkeitsplot bei 40 km/h

Umströmte Objekte stellen immer eine Art Luftwiderstand dar. Dies führt dazu, dass die vorbeiströmende Luft in der nahen Umgebung des Objektes abgebremst wird.

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, muss für die korrekte Berechnung der Simulationsergebnisse vom Programm das Geschwindigkeitsprofil an der Modelloberfläche abgebildet werden. Dies gelingt mit den zuvor erwähnten Inflationlayer. Um einen Einblick in die Größenordnung der Inflationlayer bzw. des Geschwindigkeitsprofils zu bekommen ist in Abb. 30 links die Detailansicht A aus Abb. 29 dargestellt.

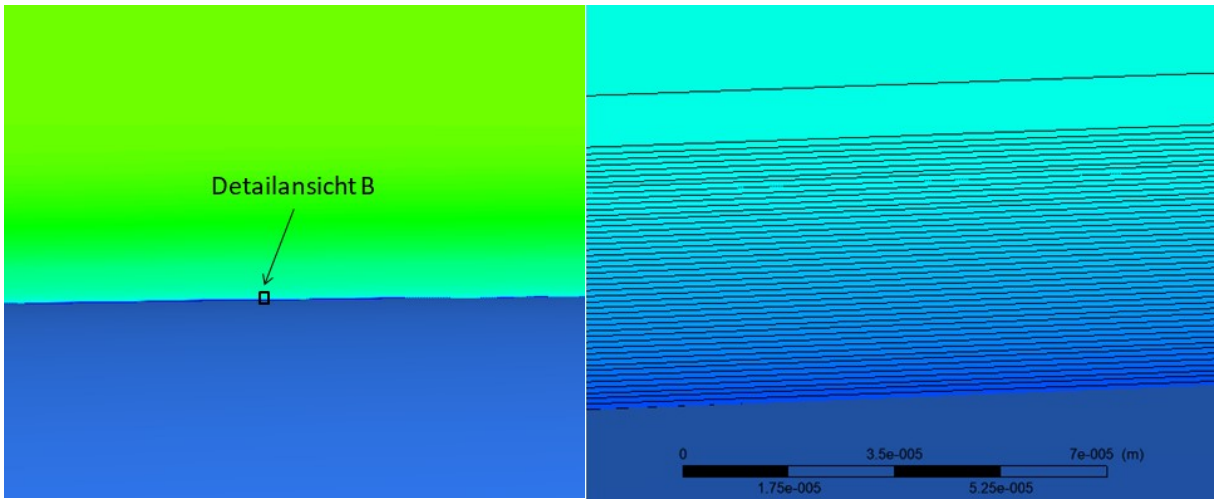


Abbildung 30: Detailansicht A und Detailansicht B

Diese Ansicht reicht jedoch nicht aus, um die Inflationlayer sichtbar zu machen. Es ist eine zweite Detailansicht notwendig. Diese ist in Abb. 30 rechts dargestellt. Dabei sind gut die einzelnen Schichten der Inflationlayer zu erkennen, sowie das sich dahinter ausbildende Geschwindigkeitsprofil. Aufgrund der geringen Schichtdicken ist gewährleistet, dass das Profil exakt abgebildet wird und die Simulationsergebnisse korrekt sind.

3.4.3 Ausblick

Je nach Aufgabenstellung besteht die Möglichkeit, eine Vielzahl von Ergebnissen zu erhalten. Beispielsweise kann neben der Geschwindigkeit und dem Druck auch die dynamische Viskosität, die Temperaturverteilung, die turbulente kinetische Energie, der Massenstrom, die Dichte, das spezifische Volumen, die Krafteinwirkung, etc. dargestellt werden. Diesbezüglich sind dem breitgefächerten Anwendungsspektrum kaum Grenzen gesetzt.

Wie in Abb. 28 und Abb. 29 gezeigt, entstehen hinter der Hinterradverkleidung starke Ablösungen und am Heck des Modells leichte Verwirbelungen. Durch z.B. anknüpfende Projektarbeiten besteht die Möglichkeit, durch Geometrieoptimierung eine Reduktion der Ablösungen zu erreichen.

Ein erster Ansatz bezüglich des Hecks könnte darin bestehen, die scharfe Kante mit einer leichten Rundung zu versehen. Dies könnte zur Abnahme von Verwirbelungen, und damit zur Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften des Modells führen. Mithilfe der Simulationsergebnisse wäre es möglich, die vorgenommenen Geometrieänderungen zu verifizieren und so sukzessive eine optimale Karosseriegeometrie zu erhalten.

4. Messung der Widerstandskraft im Windkanal

Ein Windkanal dient unter anderem dazu, die aerodynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen zu ermitteln. Im Fall des H2M- Fahrzeuges soll mit Hilfe einer Messvorrichtung im Windkanal die Widerstandskraft des Fahrzeuges ermittelt werden, aus der anschließend der c_w-Wert berechnet wird.

4.1 Vorbereitung der Messungen

Um die Messungen durchführen zu können, muss das Fahrzeugmodell noch bearbeitet, eine Halterung konstruiert und gefertigt, sowie der Windkanal vorbereitet werden.

4.1.1 Aufbereitung des Fahrzeugmodells

Das Modell wird im 3D-Druckverfahren im Maßstab 1:6 gefertigt. Das Fahrzeug besteht aus zwei Hauptelementen, der Vorderradachse und zwei Vorderrädern. Auf Grund der rauen Oberfläche müssen die Bauteile als Vorbereitung für die Windkanalversuche abgeschliffen werden, da die raue Oberfläche den c_w-Wert stark beeinflusst und somit Reibung und Turbulenzen der Luft verursacht. In Abb. 31 ist das unbehandelte Modell dargestellt.

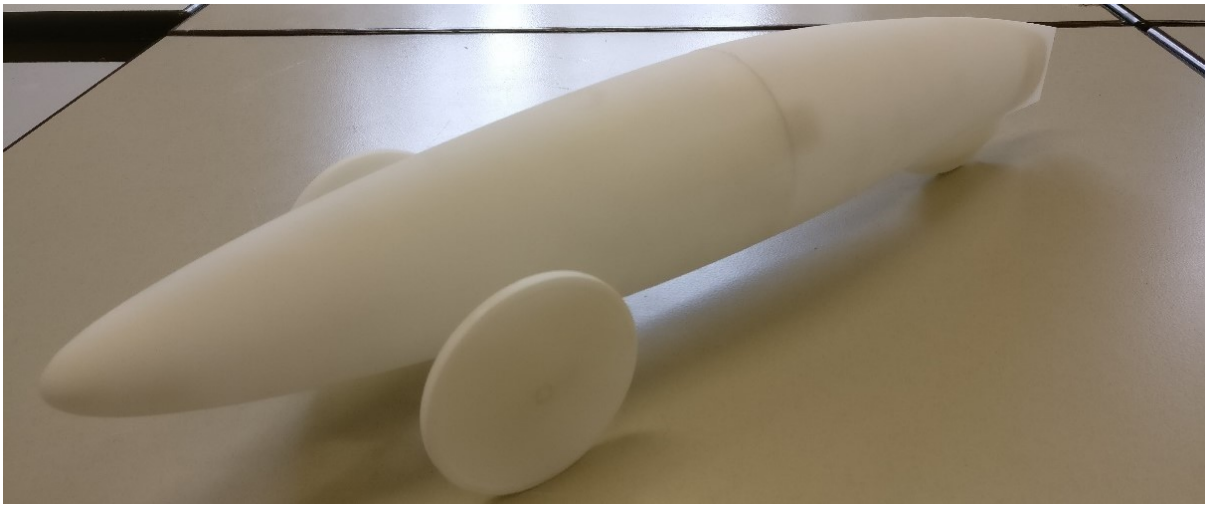


Abbildung 31: Unbearbeitetes 3D-gedrucktes Fahrzeugmodell

Dazu wird das Modell abgeschliffen, grundiert und zweimal lackiert Da die Oberfläche anschließend immer noch relativ rau ist, wird nochmals nass geschliffen. Das Modell hat nun eine glatte Oberfläche erhalten. Auf wiederholtes Lackieren wird verzichtet, da es das Ergebnis wiederum verschlechtern könnte. Anschließend wird die Achse, Räder und der vordere Teil des Fahrzeuges zusammengesteckt und verklebt (Abb. 32) Die beiden Hauptteile werden nur zusammengesteckt, was eine effiziente Montage sowie Demontage der Halterung ermöglicht.

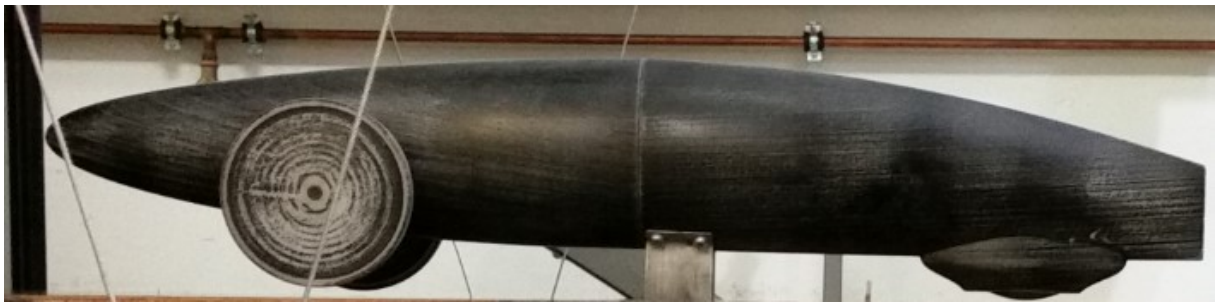


Abbildung 32: Geschliffen und lackiertes Modell

Die Halterung für den Windkanal wird am hinteren Hauptteil montiert. Somit wird im Windkanal durch die anströmende Luft das vordere Fahrzeugteil fest auf das hintere gedrückt. Resultierend müssen die beiden Teile nicht verklebt werden.

4.1.2 Konstruktion und Fertigung der Befestigungsvorrichtung

Da sich die Halterung des Modells mit im Strömungsraum des Windkanals befindet und somit auch Einfluss auf die Messung hat, muss die Querschnittsfläche, welche senkrecht zur Anströmrichtung steht, möglichst klein gewählt werden.

Als Halterung für das Fahrzeug wird ein Blechelement gefertigt, anschließend zu einem U-Profil gebogen und auf ein Stahlrohr geschweißt (Abb. 33, Anhang 8.1).

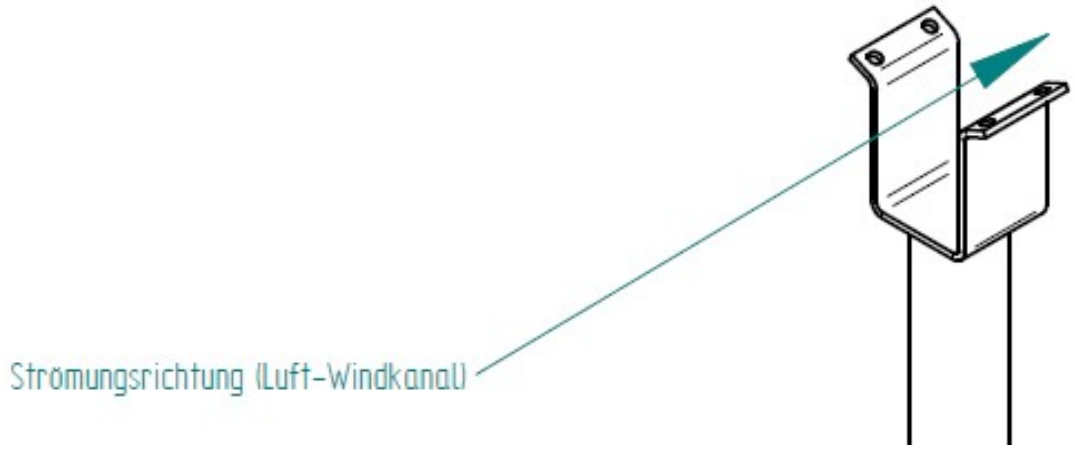


Abbildung 33: Modellhalterung

Anschließend wird es mittels vier Schrauben an das hintere Fahrzeugteil, wie in Abb. 34 gezeigt, befestigt.

Die Halterung wird entsprechend am Fahrzeug montiert, sodass im montierten Zustand das Modell exakt horizontal ausgerichtet ist, d.h. die Vorder- und Hinterräder denselben Abstand zum Boden aufweisen.

Abbildung 34: Montage der Halterung am Modell

4.1.3 Installation des Fahrzeugmodells im Windkanal

Im Windkanal wird eine Bodenplatte montiert, sodass die Versuche möglichst realitätsnah durchgeführt werden können. Das Fahrzeug wird mit der Halterung im Windkanal an der Messeinrichtung befestigt. Dabei muss der Abstand zwischen den Reifen und der Bodenplatte möglichst gering sein, damit annähernd Kontakt entsteht, allerdings genügend Abstand, sodass sich das Fahrzeug ohne Reibung bewegen kann. Bei Berührung des Fahrzeugs mit der Platte entsteht ein zusätzlicher Widerstand, was zur Verfälschung der Ergebnisse führt. Während der Messung wird das Fahrzeug durch den auftretenden Luftwiderstand nach hinten gedrückt.

Die Fahrzeughalterung ist an einem Gestell (blau lackiert in Abbildung 35) befestigt, welches an Drahtseilen aufgehängt ist. Durch die Verschiebung des Fahrzeugs, wird eine Kraft über die Seile an eine Messeinrichtung rein mechanisch übertragen.

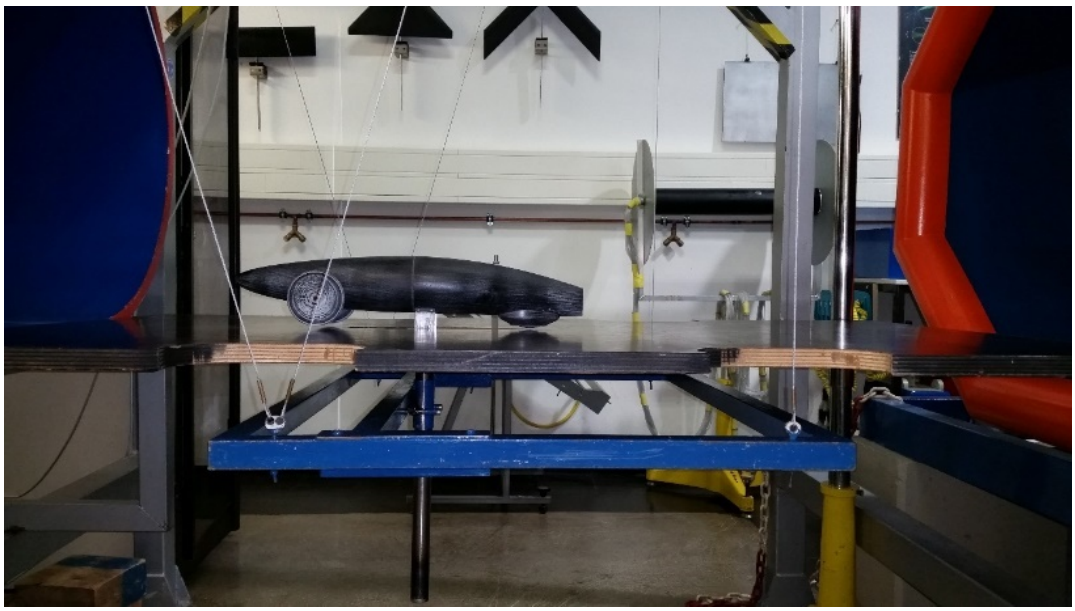


Abbildung 35: Installation des Fahrzeuges im Windkanal

Die Kraft wird über die Drahtseile auf eine Waage (Abb. 36) übertragen. Vor dem Beginn der Messung muss die Kraftmesseinrichtung geeicht werden. Die auf der Waage installierten Gewichte sind bis zur horizontalen Ausrichtung der Waage zu verschieben. Ist die Gleichgewichtslage erreicht, erfolgt das Ablesen der Widerstandskraft.

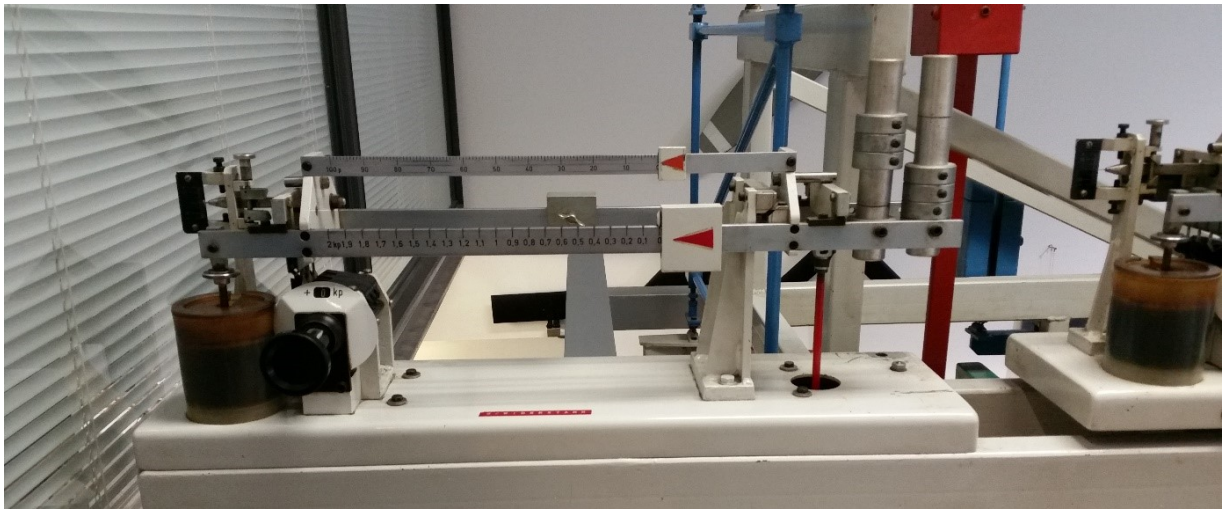


Abbildung 36: Messeinrichtung

Die Geschwindigkeit im Windkanal wird über den Staudruck eingestellt, welcher mit einer Prandtlsonde, wie in Abb. 37 dargestellt, gemessen wird.

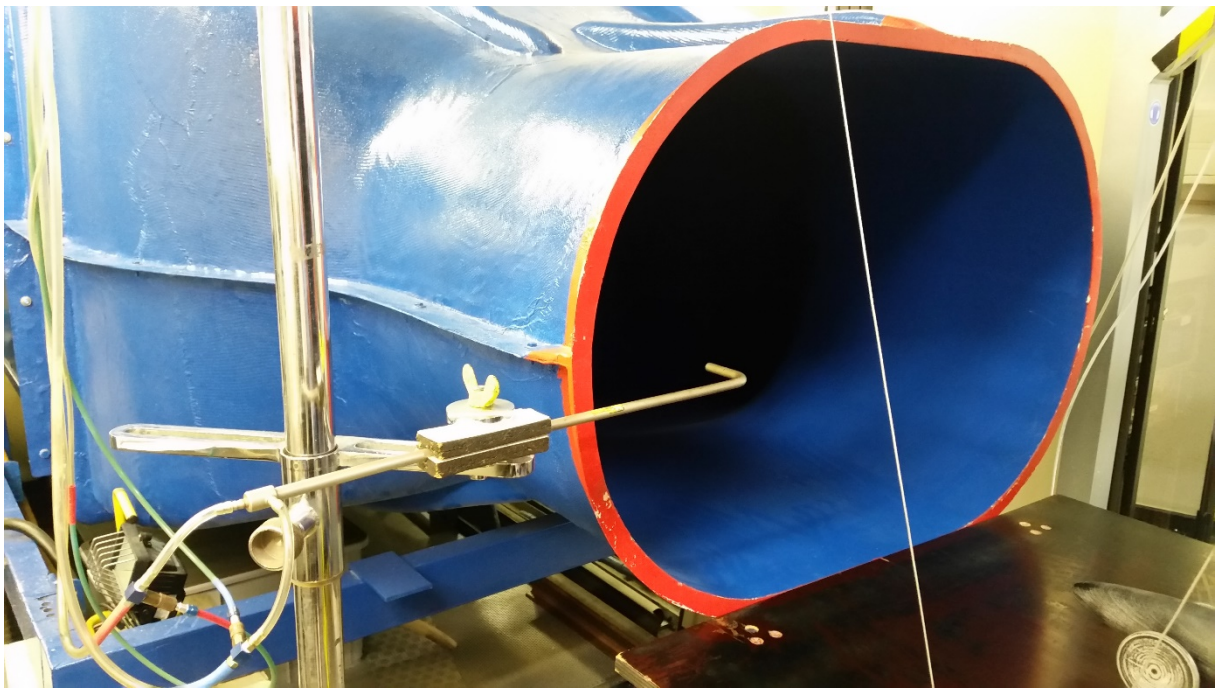


Abbildung 37: Messung mit Prandlsonde

Dafür muss der Staudruck für die benötigten Geschwindigkeiten bei den aktuellen Raumbedingungen berechnet werden. Der Rechenvorgang zu den aktuellen Bedingungen ist nachfolgend in Tab. 14 erklärt.

Tabelle 14: Berechnung des Staudrucks

Gemessene Größen	
Luftdruck	$p = 717{,}6\ mmHg$
Temperatur	$t = 22\ °C$
Luftfeuchtigkeit	$f = 71\%$
Dampftabelle	$p_d = 2642\ Pa$
Berechnete Größen	
Luftdruck	$p_0 = \left(p - \frac{t}{8}\right) * \frac{4}{3} = 95313{,}333\ Pa$
Luftdichte trocken	$\rho_{troken} = \frac{p_0}{R * T} = 1{,}125198\ \frac{kg}{m^3}$
Luftdichte feucht	$\rho_{feucht} = \rho_{troken} * \left(1 - 0{,}377 * f * \frac{p_d}{p_0}\right) = 1{,}11685 \frac{kg}{m^3}$
Staudruck	$p_{dyn} = \frac{p_{feucht}}{2} * v^2$
Widerstandsbeiwert	$c_W = \frac{F_W}{A_{proj} * \rho_{feucht} * \frac{v^2}{2}}$

Aufgrund des Maßstabes 1:6 müssen die Versuche im Windkanal mit der sechsfachen Geschwindigkeit durchgeführt werden. Da der Windkanal nur maximal 140km/h erreicht, kann maximal eine Geschwindigkeit von 23km/h für das 1:1 Modell simuliert werden.

Somit ergeben sich in Abhängigkeit der Geschwindigkeit folgende einzustellende Staudrücke (Tab. 15):

Tabelle 15: Einzustellende Drücke

$v\ [\frac{km}{h}]$	$v\ [\frac{km}{h}]$	$v\ [\frac{m}{s}]$	$p_{dyn}\ [Pa]$
Reale Geschwindigkeit	Simulierte Geschwindigkeit	Simulierte Geschwindigkeit	Staudruck
5	30	8,3333	38,7792
10	60	16,6666	155,1168
15	90	25,0	349,0156
20	120	33,3333	620,4710
23	138	38,3333	820,5731

4.2 Durchführung der Messungen

Um die Messungen zu beginnen, wird der Windkanal eingeschaltet und die Drehzahl erhöht, bis der benötigte Staudruck angezeigt wird. Dieser wird über die Prandtlsonde gemessen und am Messgerät mittels einer Flüssigkeitsskala angezeigt (Abb. 38).

Abbildung 38: Staudruckmessung

Während der Messung verschiebt sich das Auto minimal in Strömungsrichtung (Abb. 39). Dabei wird die auftretende Widerstandskraft des Fahrzeugs gemessen.

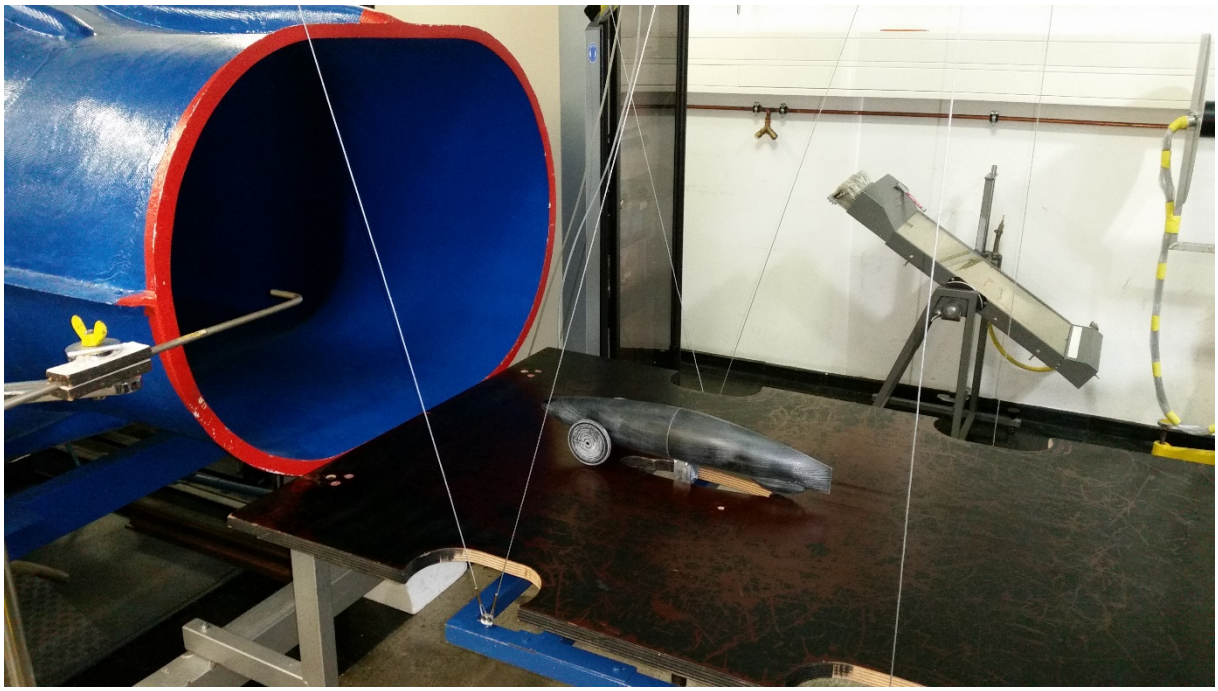


Abbildung 39: Messung des cw-Werts der Halterung und des Modells

Sobald sich der richtige Staudruck eingestellt hat, kann an der Kraftwaage die Widerstandskraft in Kilopond abgelesen werden. Dazu müssen Gewichte auf der Waage, wie in Abb. 40 dargestellt, verschoben werden, bis Waage horizontal ausgerichtet ist. Aus dieser Kraft kann anschließend der Widerstandsbeiwert berechnet werden.

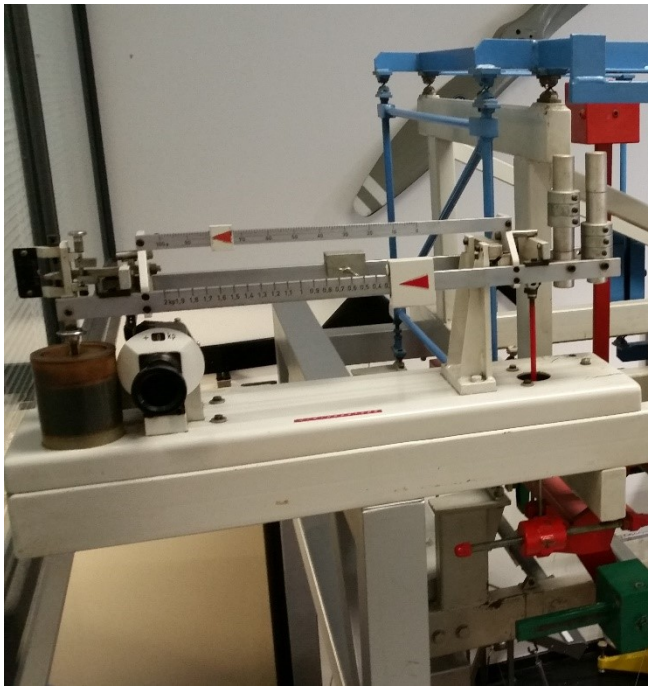


Abbildung 40: Kraftwaage

Anschließend wird die Drehzahl des Windkanals für den nächsten Messpunkt weiter erhöht. Der Vorgang wird für alle Messpunkte wiederholt. Danach wird das Modell von der Halterung abgeschraubt (Abb. 41). Anschließend wird ausschließlich die Widerstandskraft der Halterung bei entsprechenden Geschwindigkeiten gemessen, sodass danach der reine Luftwiderstand des Modells ohne Halterung berechnet werden kann.

Abbildung 41: Messung des cw-Werts der Halterung

4.3 Auswertung

4.3.1 Ergebnisse der Messungen

Um die Widerstandskraft des Fahrzeuges zu erhalten, wird die Widerstandskraft der Halterung von der Widerstandskraft des Fahrzeugs mit Halterung abgezogen. Das Resultat ist die Widerstandskraft des Fahrzeuges in Kilopond. Aus dieser Kraft wird anschließend der c_w-Wert berechnet (Tab. 16).

Tabelle 16: Ergebnistabelle der cw-Wertmessungen

$v\,[\frac{km}{h}]$	$F_W\,[kp]$		$F_W\,[N]$	c_W	$c_W * A$
Reale Geschwindigkeit	Fahrzeug + Befestigung	Befestigung	Fahrzeug		
5	0,024	0,017	0,0687	0,2423	0,0637
10	0,098	0,072	0,2551	0,2251	0,0592
15	0,224	0,163	0,5984	0,2347	0,0617
20	0,399	0,297	1,0006	0,2207	0,0581
23	0,526	0,382	1,4126	0,2356	0,0619

4.3.2 Genauigkeit und Toleranz

Bei dem Luftdruck, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit handelt es sich um abgelesene Werte von analogen Messeinrichtungen, die regulär geeicht sind. Die Werte sind dementsprechend äußerst genau. Der Staudruck kann somit präzise berechnet werden. Auch der gemessene Staudruck im Windkanal wird analog abgelesen.

Der Windkanal ist in einer offenen Bauweise aufgebaut. Das bedeutet, dass das Modell frei umströmt werden kann. Die umströmende Luft kann sich seitlich und nach oben frei ausbreiten. Somit entstehen keine Reibungsverluste durch diverse Strömungsbegrenzungen. Allerdings befinden die Drahtseile, an der die blaue Messeinrichtung aufgehängt ist, leicht im Strömungsraum.

Die Räder des Modells rotieren während der Messungen nicht, der Boden bewegt sich nicht unter dem Auto und es existiert ein kleiner Luftspalt zwischen den Rädern und dem Boden. Alle genannten Punkte entsprechen nicht der Realität. Diese Unterschiede tragen zur Abweichung des Widerstandswertes bei.

Die genutzte Fahrzeughalterung wird den Luftwiderstand ebenfalls beeinflussen, auch wenn der reine Widerstandswert der Halterung abgezogen ist. Aber auf Grund der sehr geringen projizierten Querschnittsfläche, welche angeströmt wird, sollte der Einfluss sehr gering sein.

4.3.3 Ausblick

Insgesamt wäre es besser den Versuch mit größeren Modellen durchzuführen, da das Modell im Maßstab 1:6 nur ca. 45cm groß ist. Im Testbereich des Windkanals können Modelle bis ca. 1m getestet werden, von daher ist es wäre sinnvoll den Strömungsbereich voll auszunutzen, da realitätsnahe Größen bessere Ergebnisse liefern.

Mit größeren Modellen steigt ebenfalls die Widerstandskraft des Fahrzeugs an. Somit wirken sich Ungenauigkeit nicht mehr so stark auf das Ergebnis aus.

5. Vergleich der Simulations- und Messergebnisse

In diesem Kapitel sind nun die Simulations- mit den Messergebnissen zu vergleichen und zu diskutieren. Um die Abweichungen zu verdeutlichen, sind diese in Tabelle 17 aufgelistet.

Tabelle 17: Vergleich der gemessenen und berechneten Werte

$v\ [\frac{km}{h}]$	c_W–Wert der Simulationen	c_W–Wert der Messungen	Abweichung in %
5	0,2094	0,2423	15,71
10	0,1813	0,2251	24,16
15	0,1712	0,2347	27,06
20	0,1525	0,2207	30,90
23	0,1500	0,2356	36,33

Eine Erklärung der Abweichung liefern beispielsweise die unterschiedlichen Randbedingungen, unter denen die Messungen bzw. die Simulationen durchgeführt werden. Im Gegensatz zu den Messungen, bei dem das Modell über einer fest montierten Bodenplatte befestigt wird, ist bei den Simulationen ein bewegter Boden zu programmieren. Die fixe Bodenplatte erzeugt zusätzliche Verwirbelungen unter dem Fahrzeug, was einen Anstieg des c_w-Wertes zur Folge hat.

Darüber hinaus drehen sich die Räder des Simulationsmodells mit entsprechender Geschwindigkeit, während die Räder bei den Messungen stillstehen, da sie fest am Fahrzeugmodell fixiert sind.

Ein weiterer entscheidender Aspekt ist die Modellgröße des Fahrzeugs. Für die Windkanalmessungen wurde ein 1:6 Modell verwendet. Da der Windkanal jedoch für wesentlich größere Objekte ausgelegt ist, belegt die Anströmfläche des Fahrzeugmodells nur einen geringen Teil des gesamten Strömungsraums. Daher ist die gemessene Widerstandskraft des Fahrzeugs im Vergleich zu den restlichen Reibungsverlusten relativ gering und damit ebenfalls die Aussagekraft der Ergebnisse.

Das Modell wird im Windkanal durch eine Befestigungsvorrichtung fixiert. Dessen angeströmte Fläche stellt ebenfalls einen Luftwiderstand dar, welcher zur Steigerung des c_w-Wertes beiträgt. Selbstverständlich wird durch zusätzliche Messungen der Luftwiderstand der Befestigungsvorrichtung gemessen und anschließend vom Ergebnis abgezogen. Allerdings ist das Verhalten der Strömung bei der Messung von Fahrzeug mit Vorrichtung unterschiedlich wie bei der Messung der Befestigungsvorrichtung ohne Fahrzeug. Insgesamt ist festzustellen, dass der c_w-Wert aufgrund der Vorrichtung erhöht wird, auch wenn ein Teil davon durch zusätzliche Messungen kompensiert werden kann.

Die Auswertung der Ergebnisse im Windkanal erfolgt über eine Aufhängung, die mit einer Waage verbunden ist. Ein Teil dieser Aufhängung befindet sich leicht im Strömungsraum des Windkanals. Im Vergleich zur Simulation, bei der der Strömungsraum um das Fahrzeug herum komplett leer ist, werden die Ergebnisse der Messung dadurch beeinflusst.

Die teilweise Anströmung der Aufhängung hat somit ebenfalls eine Erhöhung des c_w-Werts zur Folge.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich sind vor der Durchführung der eigentlichen Strömungssimulation gewisse Vorarbeiten zu leisten. Da für das H2M-Fahrzeugmodell keinerlei Simulationsergebnisse vorhanden waren, war die Simulation eines Referenzkörpers unabdingbar. Durch die Validierung der Ergebnisse dieser Referenzsimulation, konnte ermittelt werden, welche Randbedingungen für diesen speziellen Fall der Umströmung eingestellt werden müssen, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten.
Die Durchführung dieser Referenzsimulation zeigte auf, dass obwohl die Ergebnisse des k-ω-Turbulenzmodells besser konvergierten, aufgrund der realitätsnäheren Ergebnisse das k-ε-Modell besser für die eigentliche Simulation geeignet ist.
Des Weiteren sollte der Einfluss der drehenden Räder vorab ermittelt werden. Dieser wurde mit einer zusätzlichen Simulation untersucht. Das Ergebnis: Die Rotation der Räder hat einen starken Einfluss auf das Ergebnis. Aus diesem Grund muss die Rotation der Räder in die eigentliche Simulation implementiert werden.
Gleiches gilt für den bewegten Boden. Da mit Hilfe der Simulation versucht wird, reale Situationen möglichst genau nachzubilden, ist es notwendig, die entsprechenden Randbedingungen wie eben beschrieben so zu wählen, dass nahezu reale Bedingungen vorliegen.
Ein weiteres Werkzeug, welches für einen erfolgreichen Abschluss einer Simulation genutzt werden sollte, ist die sogenannte Netzstudie. Die Qualität der Ergebnisse ist direkt abhängig von der Qualität des erstellten Netzes. Aus diesem Grund ist es wichtig, der Netzgenerierung große Aufmerksamkeit zu schenken.
In dieser Projektarbeit sollte mit Hilfe der Simulationen der c_w-Wert des H2M-Fahrzeugmodells ermittelt werden. In der vorab durchgeführten Netzstudie wurde das Netz bei konstanten Randbedingungen solange verfeinert, bis sich die Ergebnisse nicht mehr änderten. Somit konnte sichergestellt werden, dass das Netz fein genug für die Ausgabe von repräsentativen Ergebnissen war, jedoch nicht zu fein, als dass die Simulation unnötig Rechenzeit gekostet hätte.
Aufgrund dieser gründlichen Vorarbeit war es möglich, die Auswahl der eingestellten Randbedingungen, sowie die Wahl des Rechennetzes für die eigentliche Simulation nachhaltig zu begründen.
Um die Simulationsergebnisse mit gemessenen Werten validieren zu können, wurden zusätzlich Messungen im Windkanal durchgeführt. Dabei wurde das Fahrzeug mittels einer Befestigungsvorrichtung im Windkanal fixiert und anschließend die Widerstandskraft des Modells bei verschiedenen Geschwindigkeiten gemessen. Diese Kraft wurde daraufhin mit Hilfe eines geeigneten Rechenweges in den c_w-Wert umgerechnet und mit den Ergebnissen der Simulationen verglichen.
Weitere, an diese Projektarbeit anknüpfende Arbeiten könnten beispielsweise zur Ermittlung des c_w-Werts für Kurvenfahrten dienen. Dazu ist im Anhang 8.2 eine detaillierte Anleitung zur Erstellung einer Strömungssimulation eingefügt.

Mit Hilfe dieser Anleitung, sollte es dem H2M Team möglich sein, eine aussagekräftige Simulation mit dem Programm *ANSYS CFX* durchzuführen.
Weitere Projektarbeiten könnten im Bereich der Karosserieoptimierung liegen. Auch für dieses Anwendungsgebiet kann die eingefügte Anleitung genutzt werden.

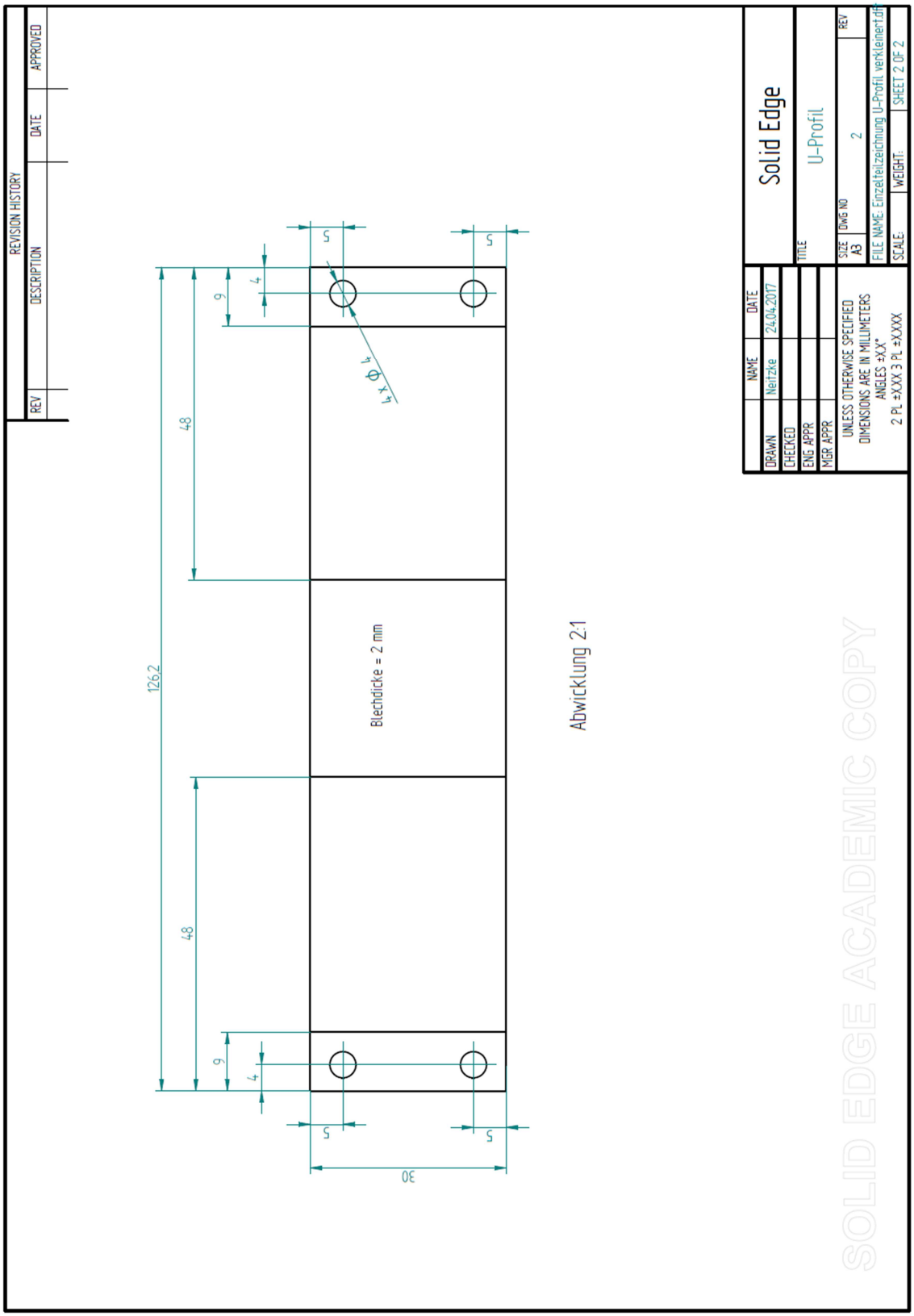
Der Strömungssimulation sind nahezu keine Grenzen gesetzt. Die richtige Interpretation der Ergebnisse stellt jedoch öfter eine Herausforderung dar. Da allerdings die Komplexität der Anwendungsbereiche weiter ansteigt, wird auch in Zukunft immer öfter auf Simulationen zurückgegriffen werden.

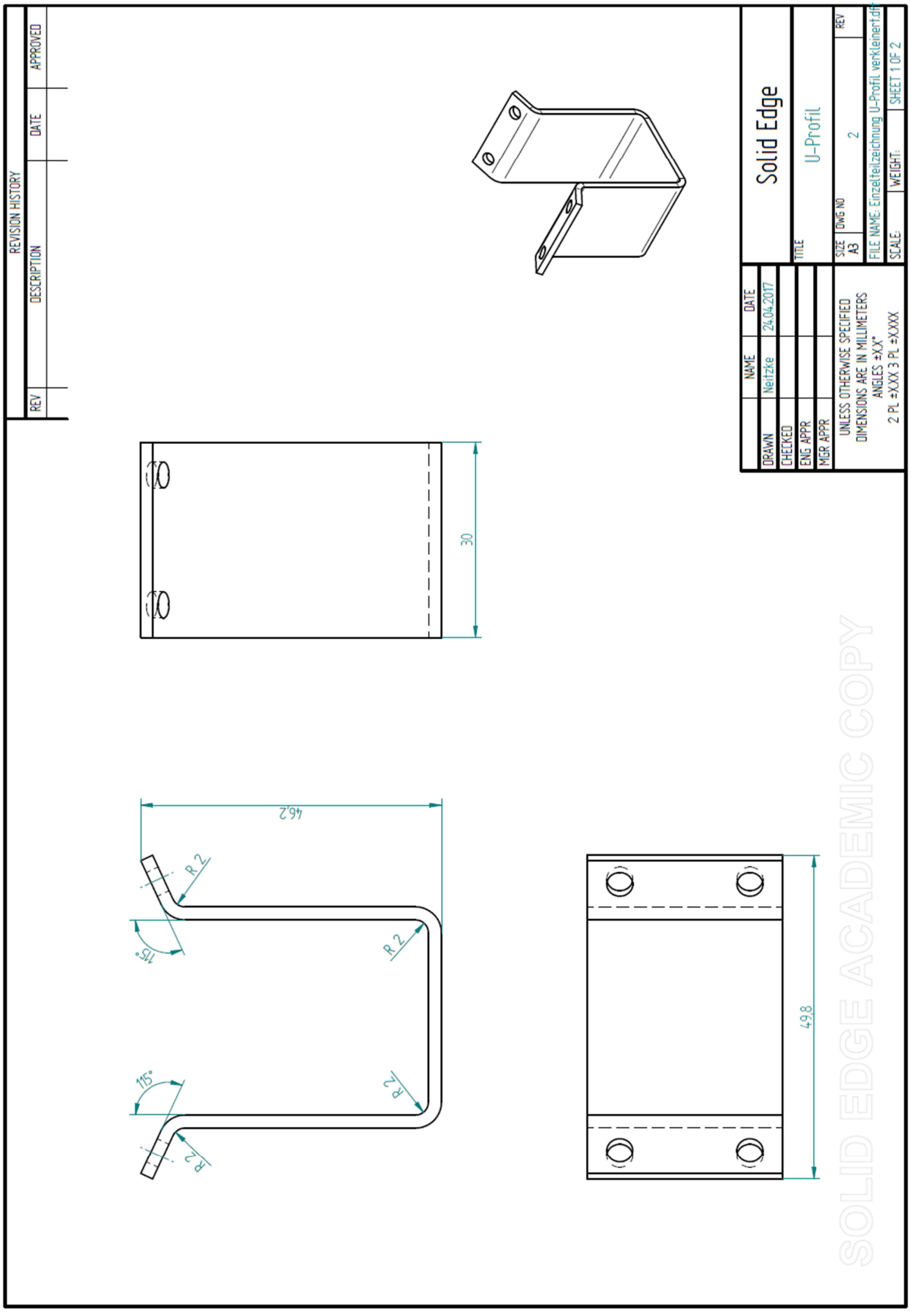
7. Literaturverzeichnis

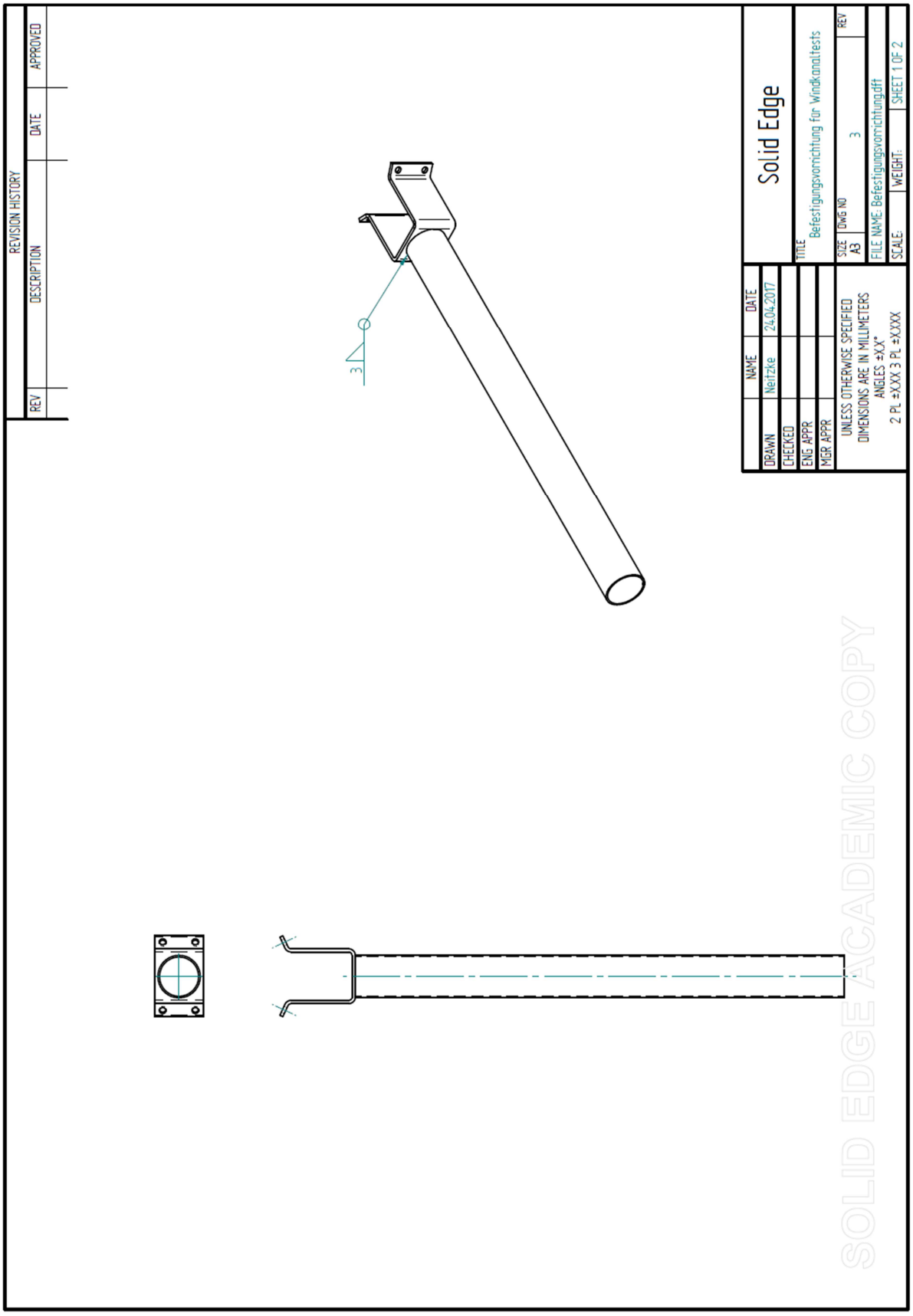
(1) Universität Karlsruhe. (20. 07 2017). *Uni Karlsruhe*. Von http://hydro.ifh.uni-karlsruhe.de/download/Kap09ps.pdf abgerufen

8. Anhang

a. Konstruktion der Befestigungsvorrichtung (Halterung)




REVISION HISTORY
REV
DESCRIPTION
DATE
APPROVED
Solid Edge
U-Profil
TITLE
SIZE A3
DWG NO 2
REV
FILE NAME: Einzelteilzeichnung U-Profil verkleinert.dft
SCALE:
WEIGHT:
SHEET 1 OF 2
NAME
DATE
DRAWN Neitzke 24.04.2017
CHECKED
ENG APPR
MGR APPR
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
ANGLES ±X.X°
2 PL ±XXX 3 PL ±XXXX
30
46,2
R 2
75°
115°
498
SOLID EDGE ACADEMIC COPY


REVISION HISTORY
REV
DESCRIPTION
DATE
APPROVED
Solid Edge
NAME
DATE
DRAWN
Neitzke
24.04.2017
CHECKED
ENG APPR
MGR APPR
TITLE
Befestigungsvorrichtung für Windkanaltests
SIZE
A3
DWG NO
3
REV
FILE NAME: Befestigungsvorrichtung.dft
SCALE:
WEIGHT:
SHEET 1 OF 2
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
ANGLES ±X.X°
2 PL ±XXX 3 PL ±XXXX
3
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

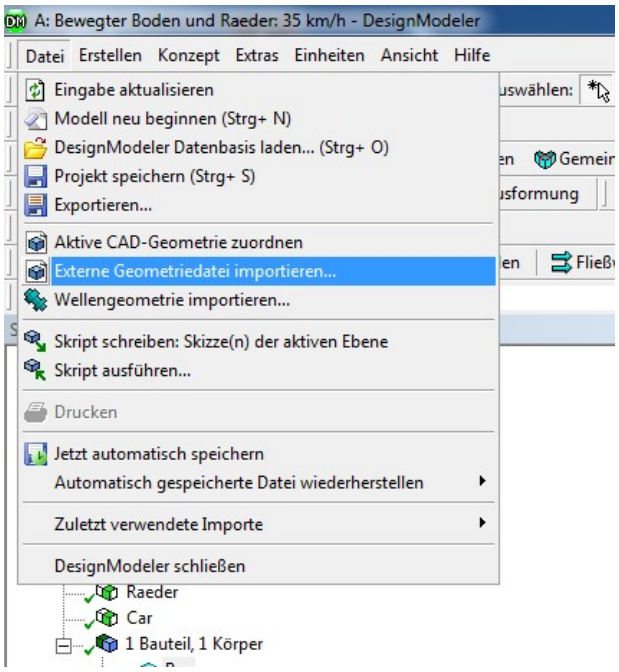
b. Anleitung zur Simulation einer umströmten Fahrzeugkarosserie mit dem Simulationsprogramm Ansys CFX

1. Geometrie:

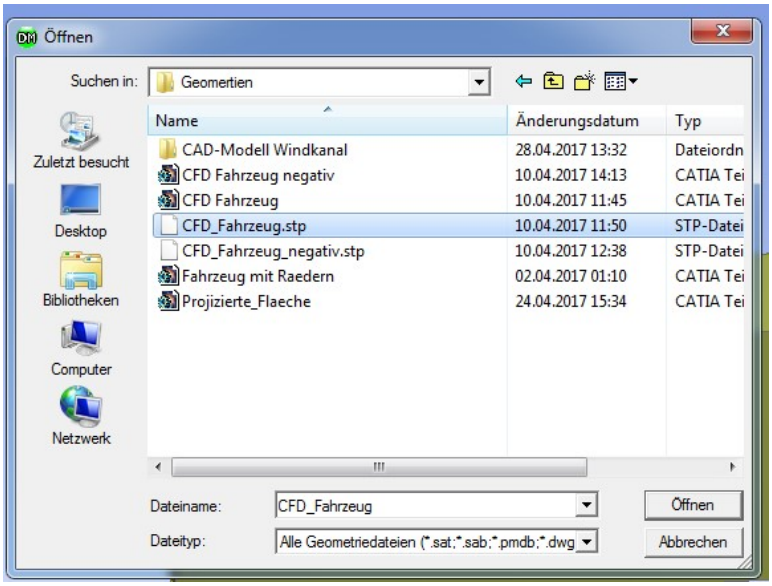
Das 3D- Modell des Fahrzeuges wird in Catia erzeugt und mit einer Box (Quader) umgeben. Anschließend wird von der Box das Fahrzeug abgezogen, sodass ein Negativ entsteht. Das Modell wird im stp- Format abgespeichert.

1.1 Import des CAD-Modells

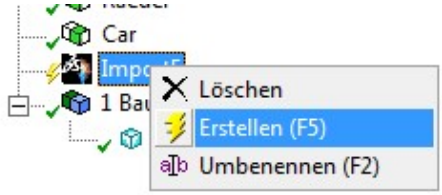
a) Datei → Externe Geometriedatei importieren



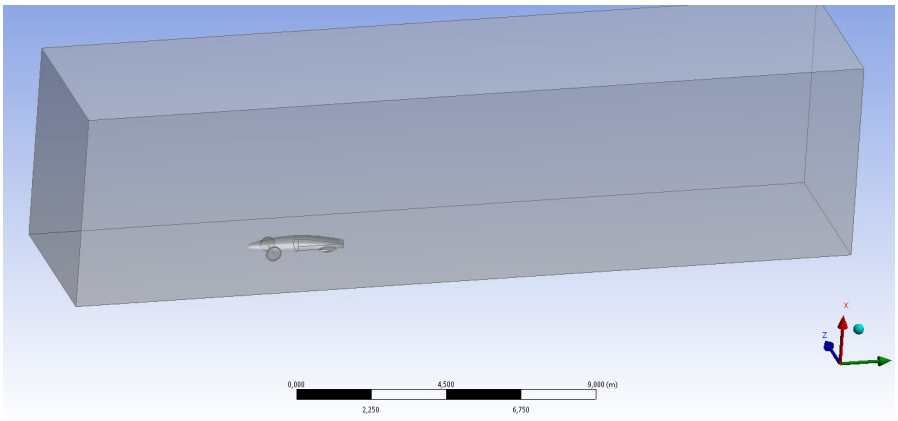
b) Datei auswählen → öffnen



c) Rechtsklick auf Import →Erstellen



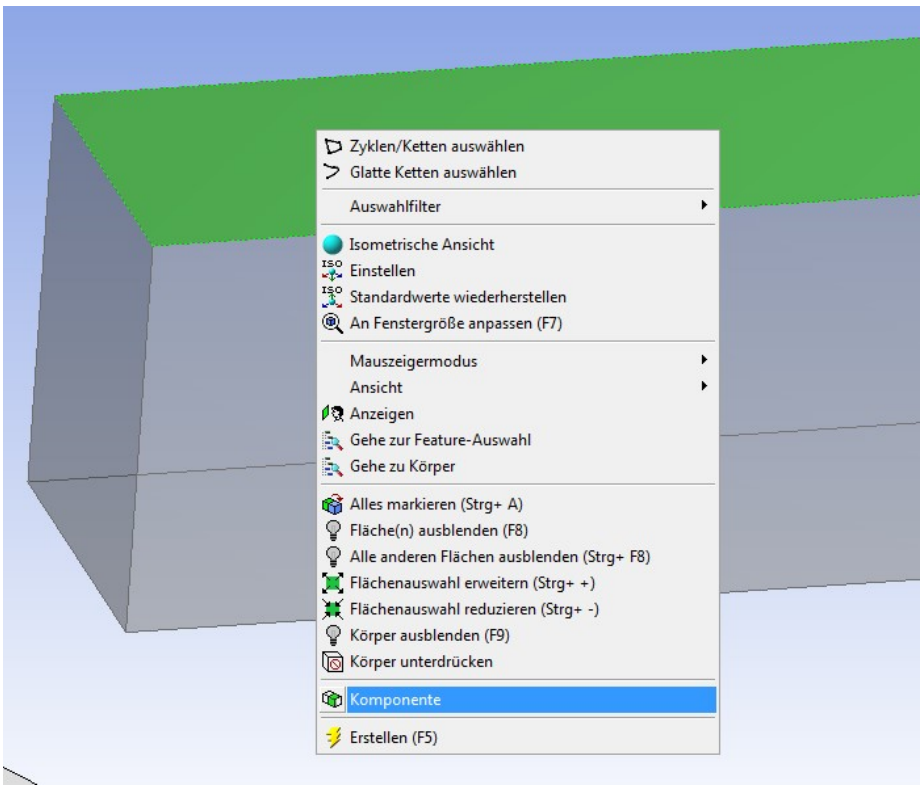
Das Negativ- Modell wird erstellt



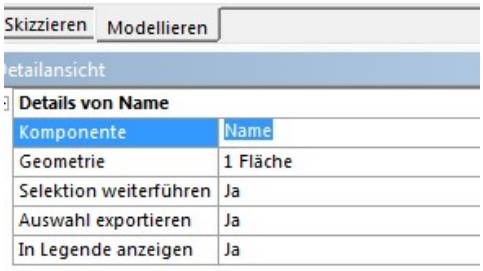
1.2 Benennung der Flächen

Um später auf Flächen des Modells zugreifen zu können, werden diese mit Namen versehen.

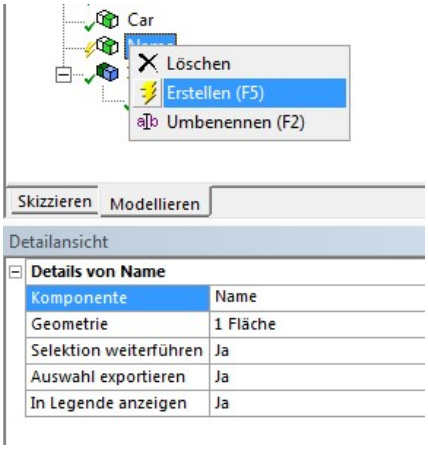
a) Fläche markieren → Rechtklick → Komponente



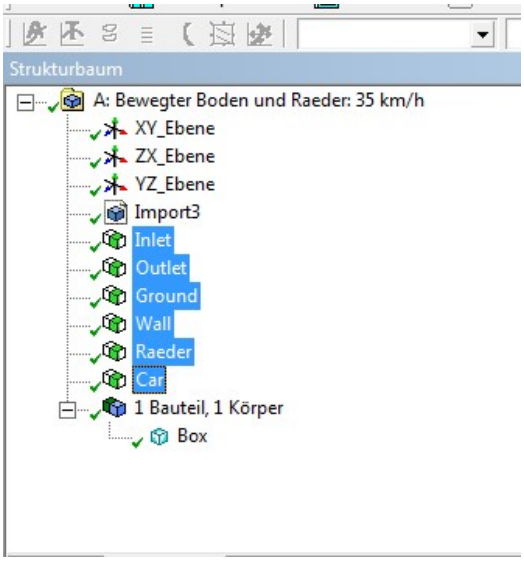
b) Der Fläche einen Namen geben



c) Anschließend Rechtsklick auf erzeugte Komponente und Erstellen drücken



d) Dieser Vorgang wird für alle Flächen wiederholt.

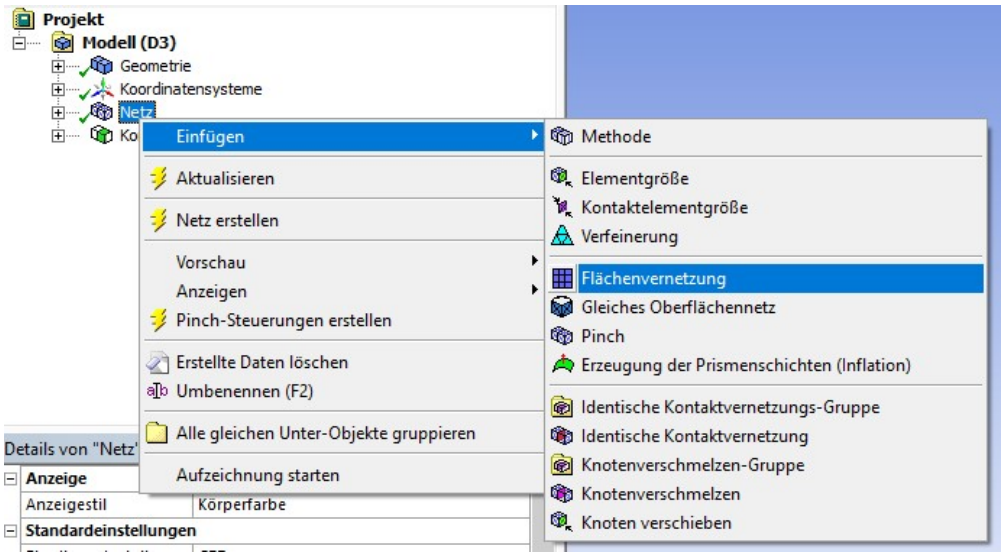


Danach wird gespeichert und der DesignModeler geschlossen.

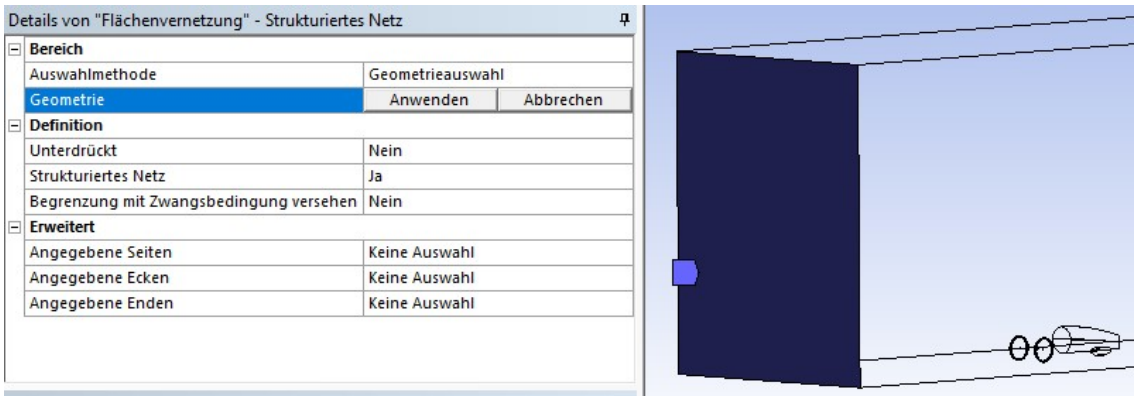
2. Netz:

2.1 Flächenvernetzung:

a) Rechtsklick auf Netz → Einfügen → Flächenvernetzung



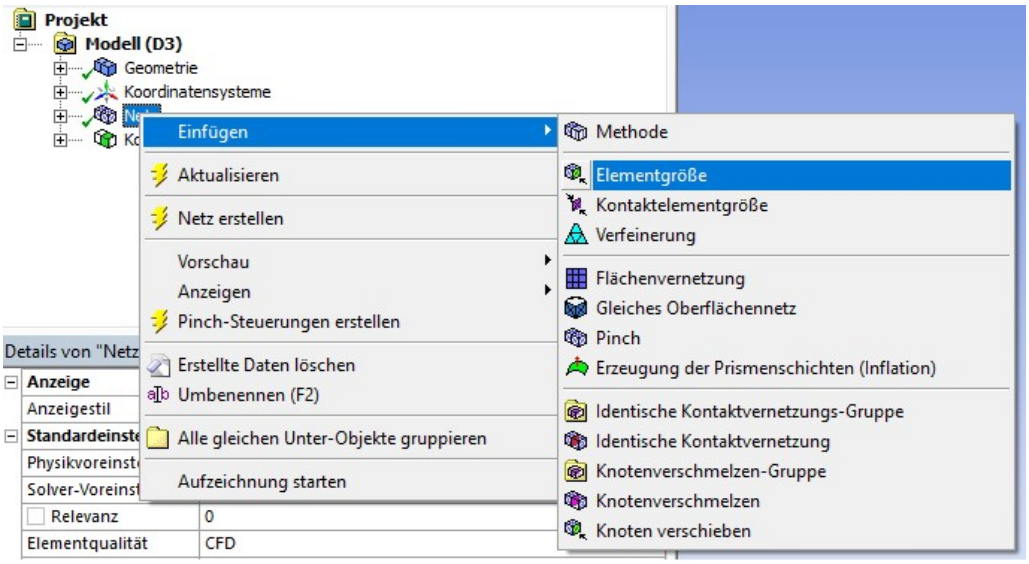
b) Auswahlmethode: Geometrieauswahl
Geometrie: Inlet (Fläche) anklicken und auf Anwenden klicken



c) Analog für die anderen Flächen (Outlet, Wall) vorgehen.

2.2 Elementgröße auf Fläche:

a) Rechtsklick auf Netz → Einfügen → Elementgröße



b) Auswahlmethode: Komponente
Komponente: Car
Elementgröße: 13,2 mm

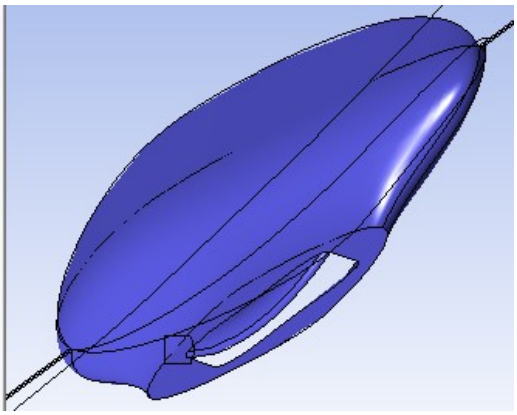
Details von "Elementgröße auf Fläche" - Elementgröße

Bereich	
Auswahlmethode	Komponente
Komponente	Car
Definition	
Unterdrückt	Nein
Typ	Elementgröße
Elementgröße	13,2 mm
Erweitert	
Defeaturing-Größe	Standardeinstellung (6,3832 mm)
Größenfunktion	Gleichmäßig
Verhalten	Flexibel
Wachstumsrate	Standardeinstellung (1,20)

c) Gleiches Vorgehen wie bei a): Neue Elementgröße auswählen
Auswahlmethode: Geometrieauswahl
Geometrie: 11 Flächen am Hinterrad auswählen (Siehe Bild)
Elementgröße: 2,2 mm

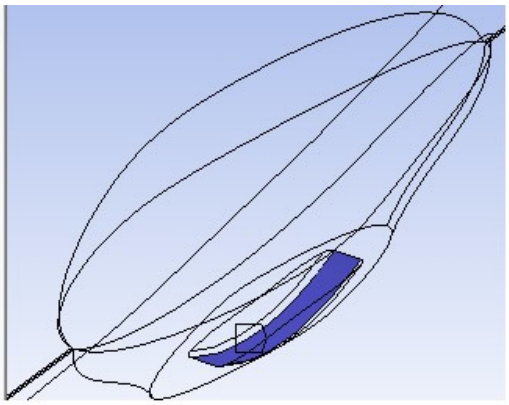
Details von "Elementgröße auf Fläche 2" - Elementgröße

Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	11 Flächen
Definition	
Unterdrückt	Nein
Typ	Elementgröße
Elementgröße	2,2 mm
Erweitert	
Defeaturing-Größe	Standardeinstellung (1,1 mm)
Größenfunktion	Gleichmäßig
Verhalten	Flexibel
Wachstumsrate	Standardeinstellung (1,20)



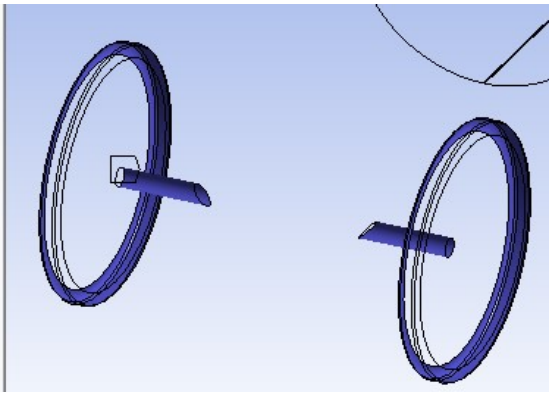
d) Gleiches Vorgehen wie bei a): Neue Elementgröße auswählen
Auswahlmethode: Geometrieauswahl
Geometrie: 1 Fläche am Hinterrad auswählen (Siehe Bild: Lauffläche des Rades)
Elementgröße: 1,1 mm

Details von "Elementgröße auf Fläche 3" - Elementgröße	
Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	1 Fläche
Definition	
Unterdrückt	Nein
Typ	Elementgröße
Elementgröße	1,1 mm
Erweitert	
Defeaturing-Größe	Standardeinstellung (0,55 mm)
Größenfunktion	Gleichmäßig
Verhalten	Flexibel
Wachstumsrate	Standardeinstellung (1,20)



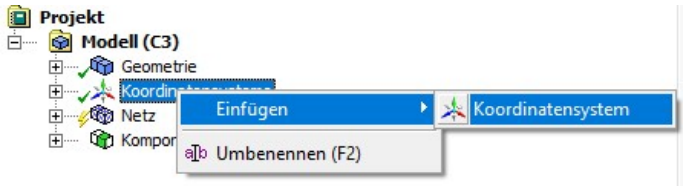
e) Gleiches Vorgehen wie bei a): Neue Elementgröße auswählen
Auswahlmethode: Geometrieauswahl
Geometrie: 12 Flächen auswählen (Vorderachse, Mantelflächen der Räder)
Elementgröße: 2,2 mm

Details von "Elementgröße auf Fläche 4" - Elementgröße	
Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	12 Flächen
Definition	
Unterdrückt	Nein
Typ	Elementgröße
Elementgröße	2,2 mm
Erweitert	
Defeaturing-Größe	Standardeinstellung (1,1 mm)
Größenfunktion	Gleichmäßig
Verhalten	Flexibel
Wachstumsrate	Standardeinstellung (1,20)



2.3 Elementgröße

a) Koordinatensysteme → Einfügen → Koordinatensystem



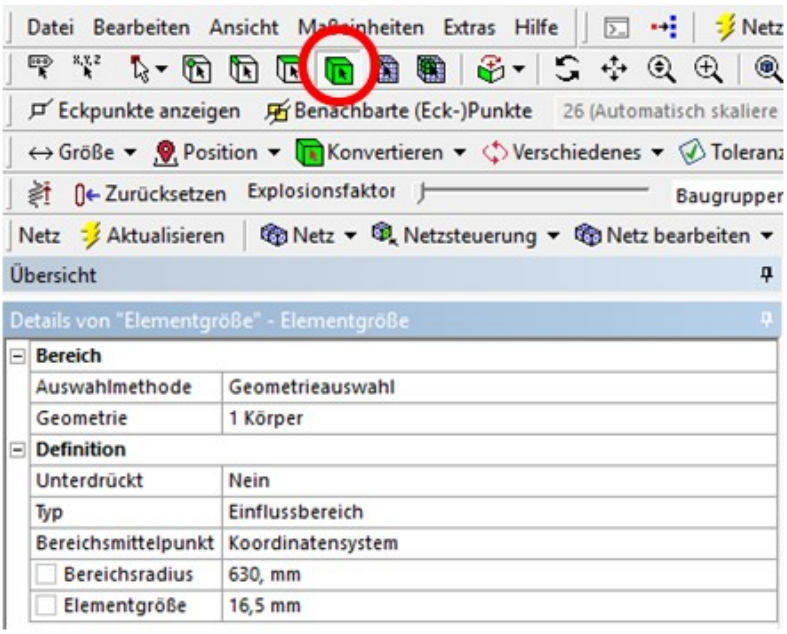
b) Insgesamt drei Koordinatensysteme mit folgenden Koordinaten einfügen:

Details von "Koordinatensystem"	
Definition	
Typ	Kartesisch
Nummerierung	Programmgesteuert
Unterdrückt	Nein
Ursprung	
Definiert durch	Globale Koordinaten
X-Ursprung	-2900, mm
Y-Ursprung	-2550, mm
Z-Ursprung	0, mm
Position	Zum Ändern klicken
Hauptachse	
Orientierung bezogen auf die Hauptachsen	
Richtungsvektoren	
Transformationen	

Details von "Koordinatensystem 2"	
Definition	
Typ	Kartesisch
Nummerierung	Programmgesteuert
Unterdrückt	Nein
Ursprung	
Definiert durch	Globale Koordinaten
X-Ursprung	-2450, mm
Y-Ursprung	-3140, mm
Z-Ursprung	0, mm
Position	Zum Ändern klicken
Hauptachse	
Orientierung bezogen auf die Hauptachsen	
Richtungsvektoren	
Transformationen	

Details von "Koordinatensystem 3"	
Definition	
Typ	Kartesisch
Nummerierung	Programmgesteuert
Unterdrückt	Nein
Ursprung	
Definiert durch	Globale Koordinaten
X-Ursprung	-2900, mm
Y-Ursprung	-1500, mm
Z-Ursprung	0, mm
Position	Zum Ändern klicken
Hauptachse	
Orientierung bezogen auf die Hauptachsen	
Richtungsvektoren	
Transformationen	

c) Vorgehen wie bei 2.2 a)
Auswahlmethode: Geometrieauswahl
Geometrie: 1 Körper (Dazu oben auf den in rot eingekreisten Würfel klicken und anschließend den Körper (Quader) anklicken. Anschließend bestätigen in dem auf „Anwenden“ geklickt wird.
Typ: Einflussbereich
Bereichsmittelpunkt: Koordinatensystem (erstes Koordinatensystem, welches in b) erstellt wurde)
Bereichsradius: 630 mm
Elementgröße: 16,5 mm



d) Analoges Vorgehen für Elementgröße 2 und 3 wie in c)
Unterschiede:
Elementgröße 2: (linkes Bild)
Bereichsmittelpunkt: Koordinatensystem 2
Bereichsradius: 400 mm
Elementgröße: 16,5 mm

Elementgröße 3: (rechtes Bild)
Bereichsmittelpunkt: Koordinatensystem 3
Bereichsradius: 700 mm
Elementgröße: 16,5 mm

Details von "Elementgröße 2" - Elementgröße

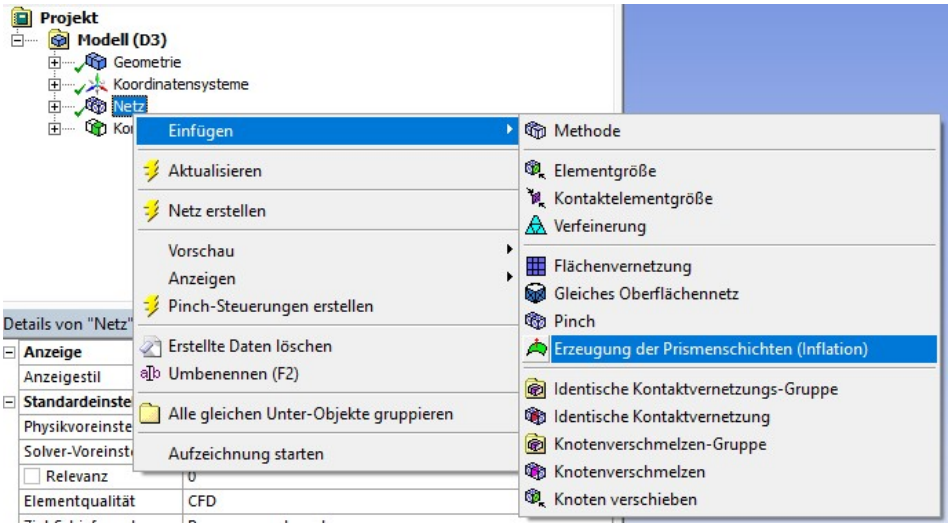
Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	1 Körper
Definition	
Unterdrückt	Nein
Typ	Einflussbereich
Bereichsmittelpunkt	Koordinatensystem 2
Bereichsradius	400, mm
Elementgröße	16,5 mm

Details von "Elementgröße 3" - Elementgröße

Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	1 Körper
Definition	
Unterdrückt	Nein
Typ	Einflussbereich
Bereichsmittelpunkt	Koordinatensystem 3
Bereichsradius	700, mm
Elementgröße	16,5 mm

2.4 Inflation layer:

a) Netz → Einfügen → Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)



b) Auswahlmethode: Geometrieauswahl
Geometrie: 1 Körper (Auswahl wie bei 2.3 c))
Randbezug Methode: Komponenten
Begrenzung: Car
Option zur Erzeugung der Prismenschichten: Dicke der ersten Schicht
Höhe der ersten Schicht: 5,5e-2 mm
Max. Anzahl der Schichten: 50
Wachstumsrate: 1,2

Details von "Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)" - Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)

Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	1 Körper
Definition	
Unterdrückt	Nein
Randbezug Methode	Komponenten
Begrenzung	Car
Option zur Erzeugung der Prismenschichten	Dicke der ersten Schicht
Höhe der ersten Schicht	5,5e-002 mm
Max. Anzahl der Schichten	50
Wachstumsrate	1,2
Algorithmus für die Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	Pre

c) Neue Inflation layer einfügen
Analog zu b)
Begrenzung: Raeder

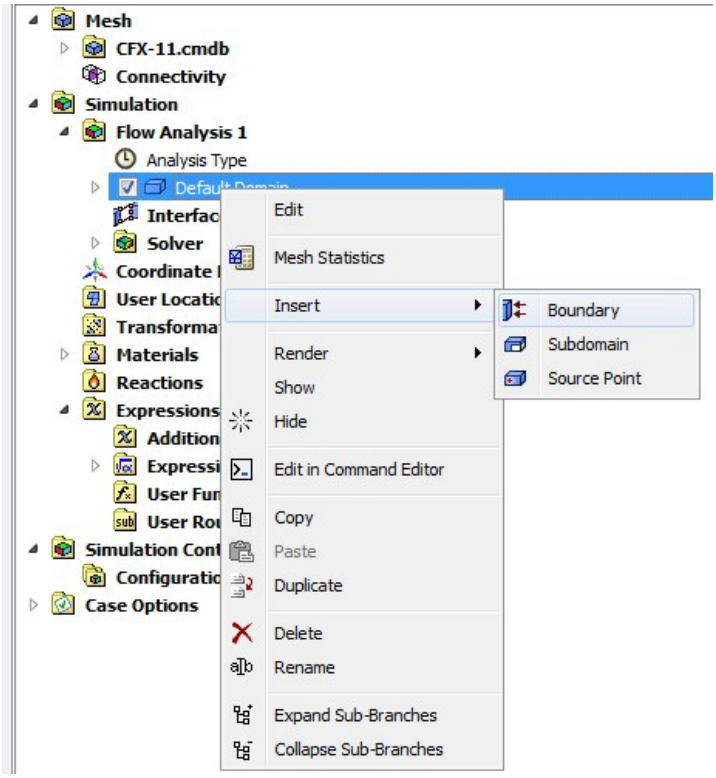
Details von "Erzeugung der Prismenschichten (Inflation) 2" - Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)

Bereich	
Auswahlmethode	Geometrieauswahl
Geometrie	1 Körper
Definition	
Unterdrückt	Nein
Randbezug Methode	Komponenten
Begrenzung	Raeder
Option zur Erzeugung der Prismenschichten	Dicke der ersten Schicht
Höhe der ersten Schicht	5,5e-002 mm
Max. Anzahl der Schichten	50
Wachstumsrate	1,2
Algorithmus für die Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	Pre

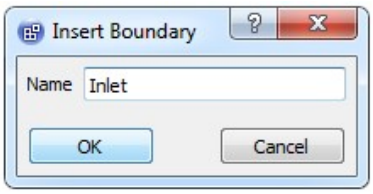
3. Setup:

3.1 Default Domain

a) Rechtsklick auf „Default Domain“ → Insert → Boundary



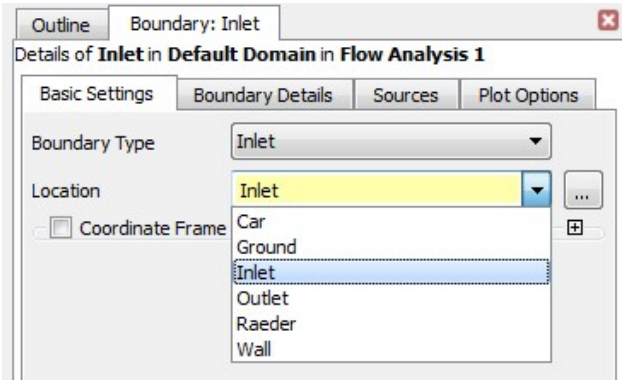
b) Boundary benennen: z.B. Inlet, Outlet, Wall, Ground, Car oder Raeder



c) Basic Settings:

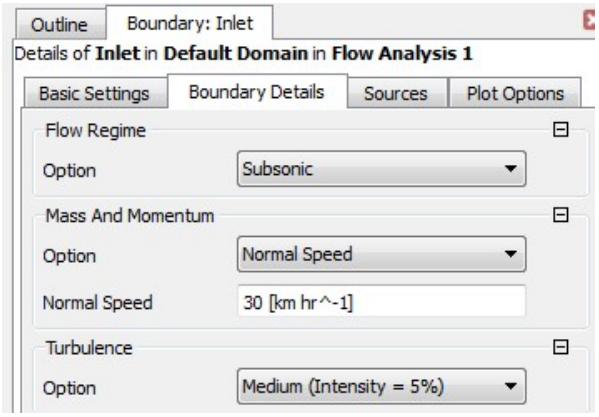
Boundary Type: Inlet, Outlet, Wall, Symmetry (Bei Symmetrieschnitt des Modells)

Location: Inlet (analog für alle anderen Komponenten wiederholen)

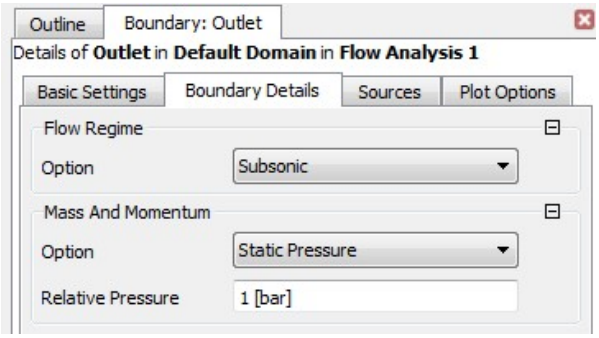


d) Boundary Details:

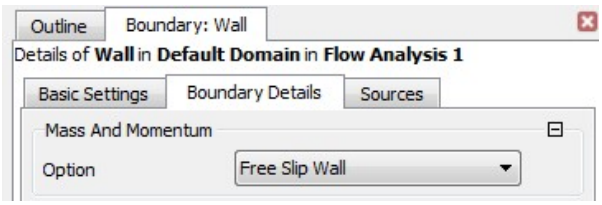
Inlet:



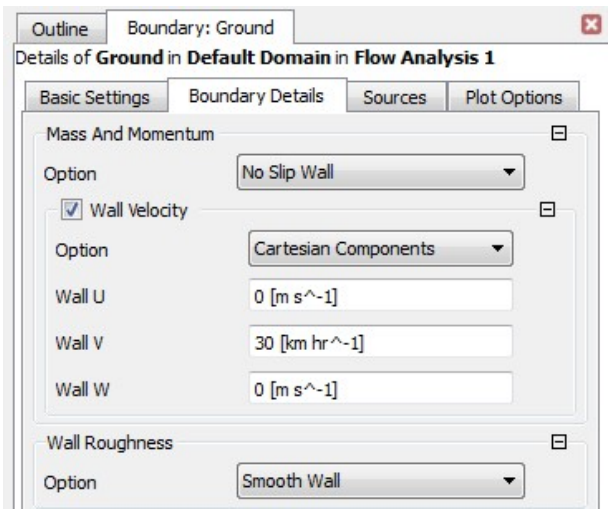
Outlet:



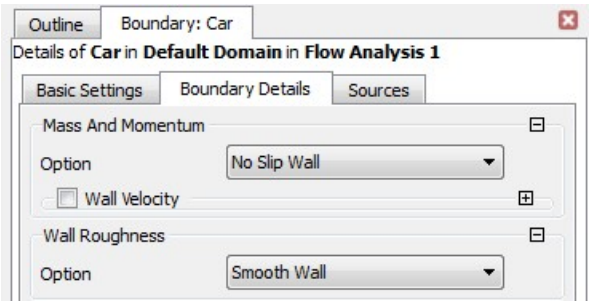
Wall:



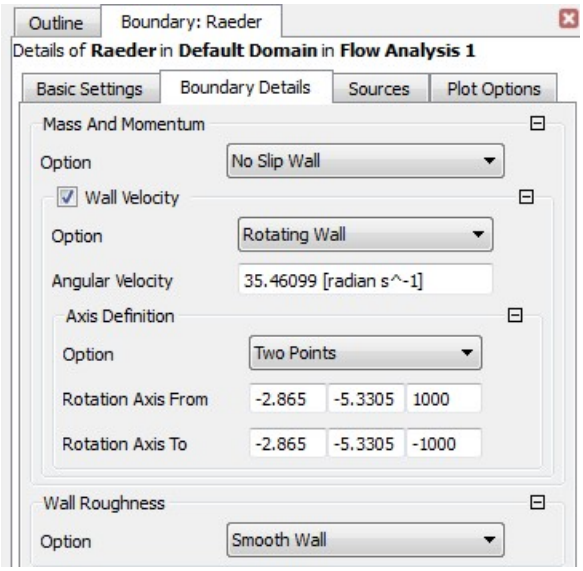
Ground:



Car: (Boundary Settings: Boundary Type: Wall)



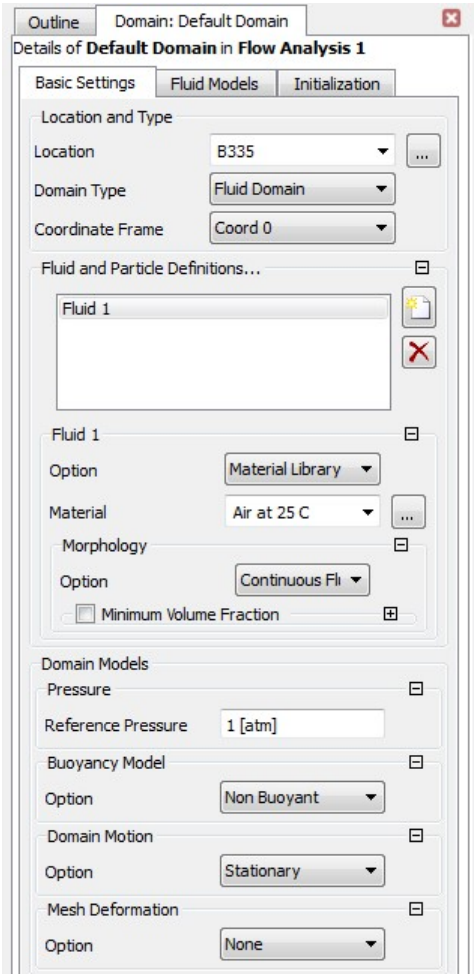
Raeder: (Boundary Settings: Boundary Type: Wall)

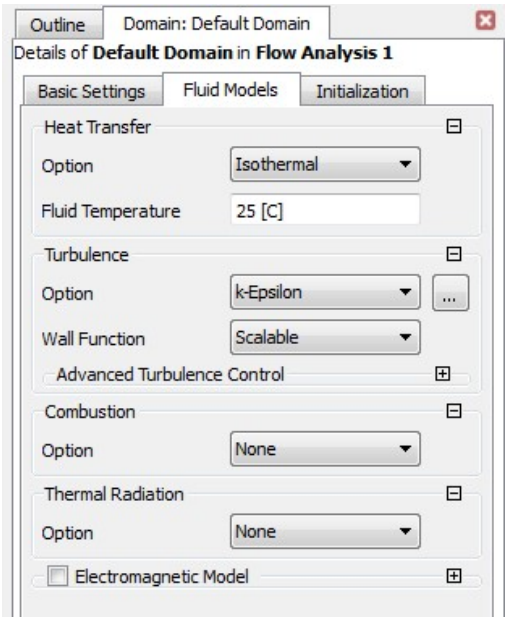


3.2 Default Domain

a) Doppelklick auf Default Domain

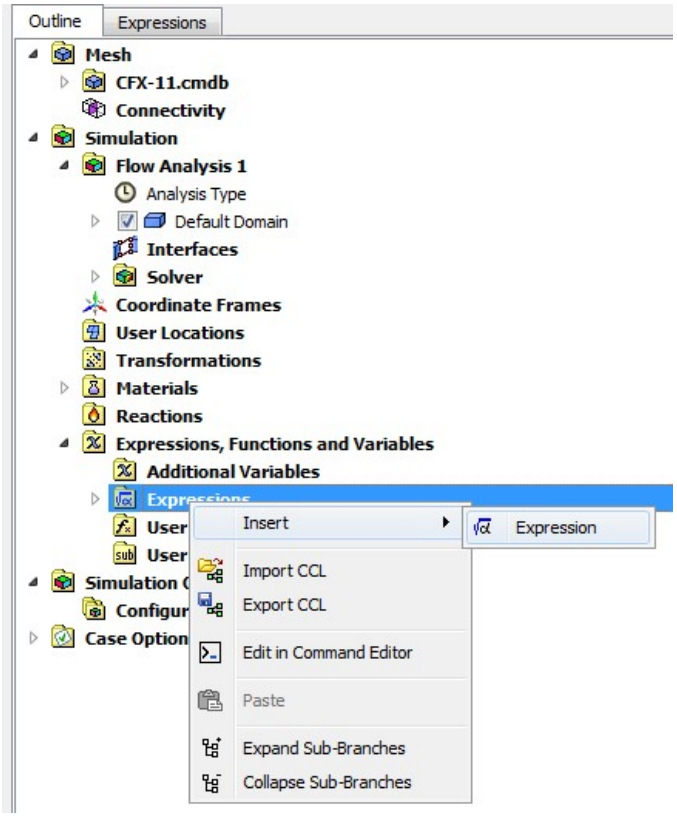
b) Folgende Einstellungen übernehmen bzw. eingeben:



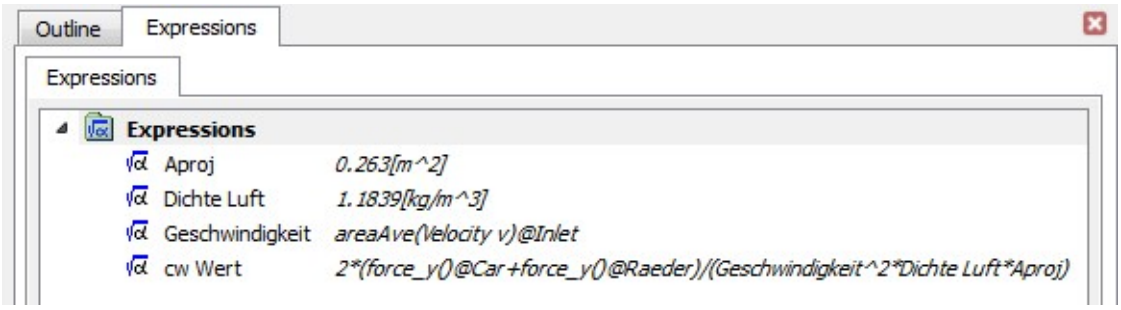


3.3 Expressions

a) Expressions → Insert → Expression

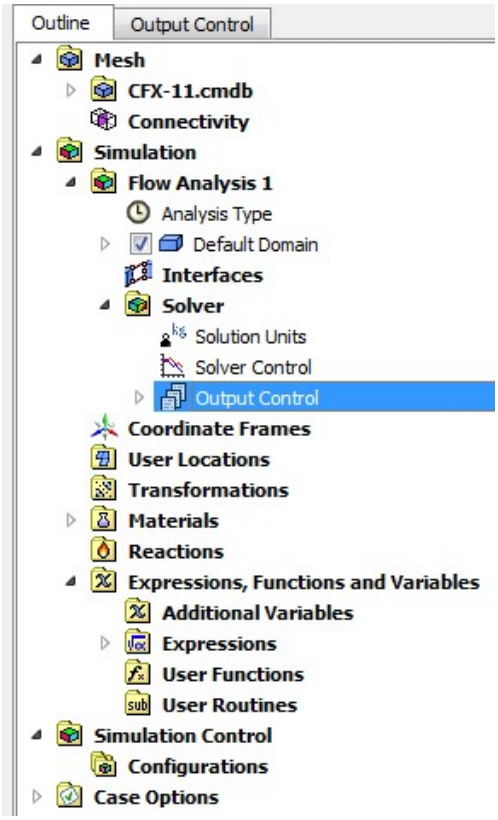


b) Expressions wie in folgender Abbildung benennen und entsprechende Werte/Formel eingeben

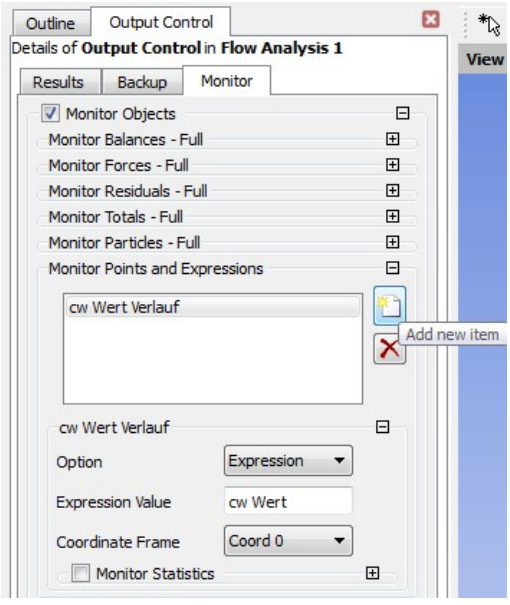


3.4 Monitor Points

a) Doppelklick auf Output Control



b) Output Control:
Klicken auf „Add new item“
Neues Item wie in der Abbildung benennen
Option: Expression
Expression Value: cw-Wert



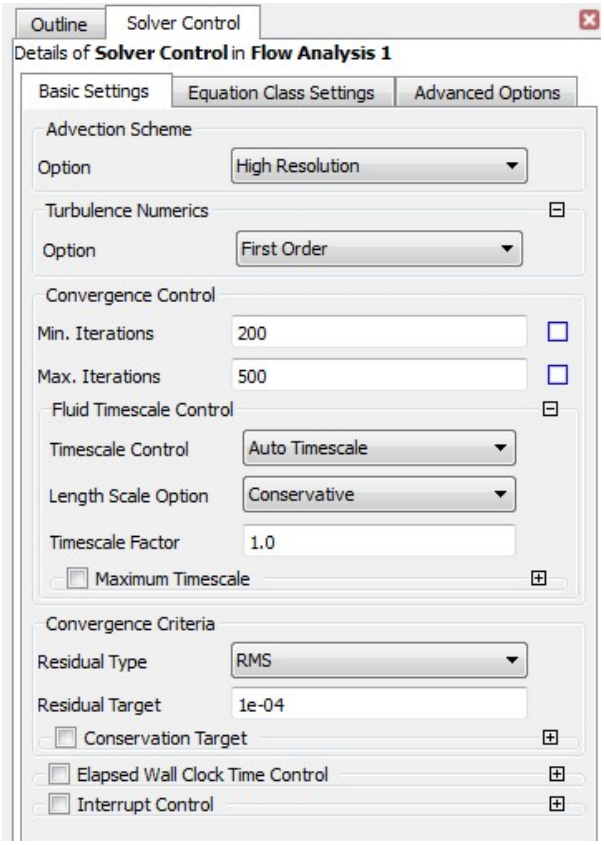
3.5 Solver Control

a) Doppelklick auf Solver Control

b) Convergence Control:

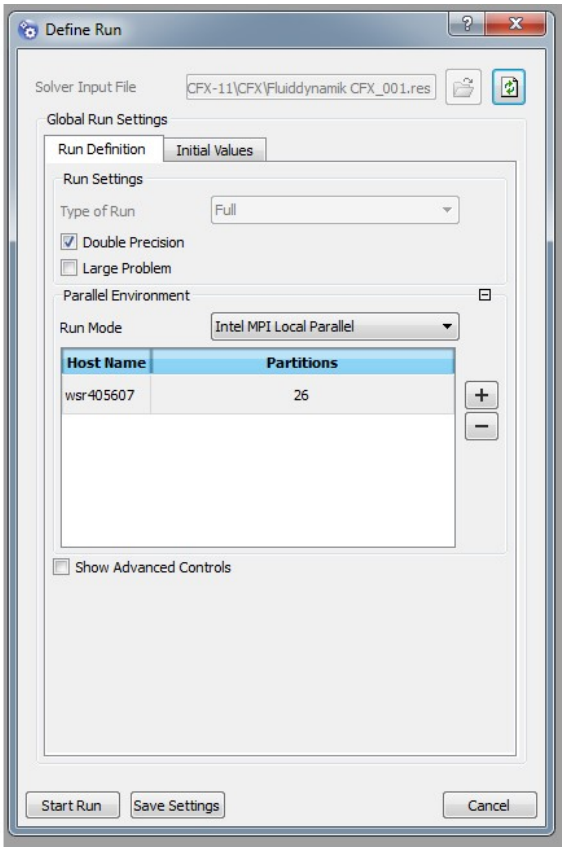
Min. Iterations, Max. Iterations je nach Konvergenzverlauf wählen.

Ziel: Residuen schwingen nicht und befinden sich am Ende des Lösungsvorgangs unter 10e-4.



4. Lösung

a) Solver starten→ Double Precision wählen → Auswählen ob lokal oder auf dem Server gerechnet werden soll (an der HS lokal) und parallel auswählen → Anzahl der zur Verfügung stehenden Kerne (Partitions) wählen

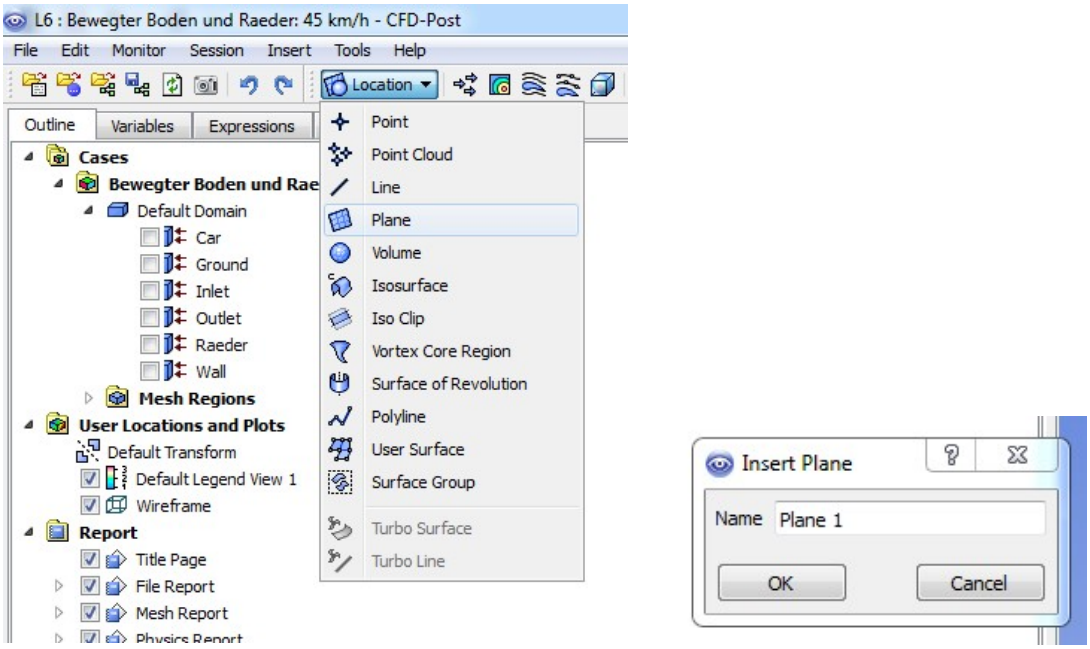


b) Start Run

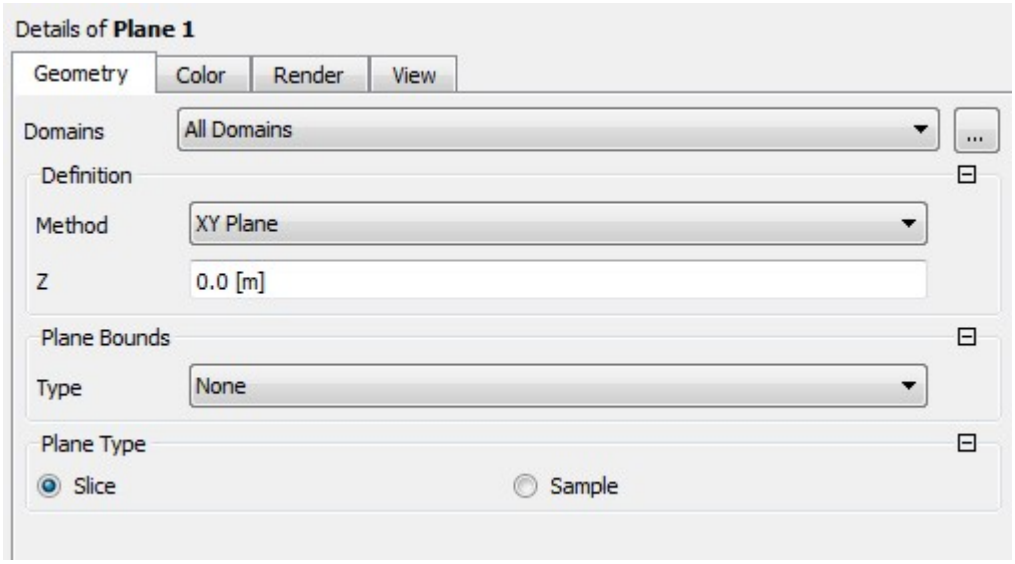
5. Post Processing

Um Konturplots zu generieren, muss zuerst eine Ebene erstellt werden, auf der der Plot angeschaut werden soll.

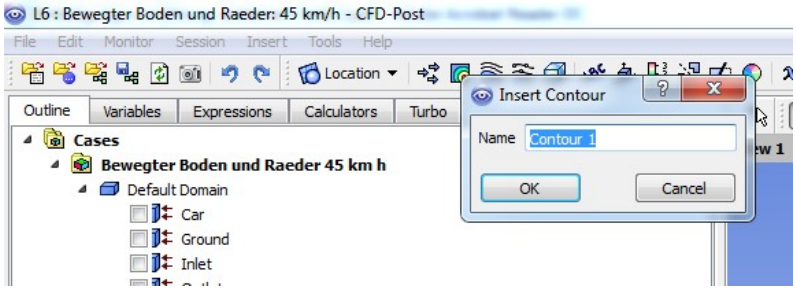
a) Ergebnisse starten → Location → Plane → Name vergeben



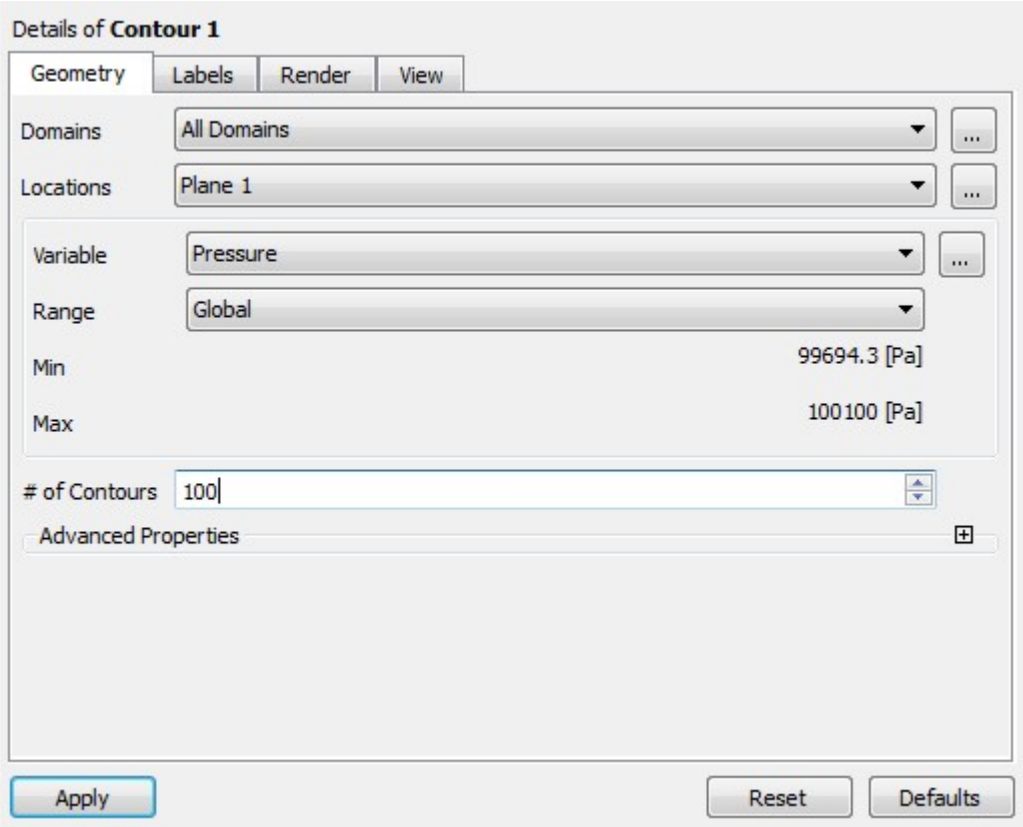
b) Details der Ebene eingeben, in welche Richtung die Ebene steht und mit welchem Versatz → bestätigen → Ebene wird erstellt



c) Contur auswählen → Name geben



d) Details der Contur eingeben: vorher erstellte Ebene auswählen (oder andere wie z. B. Wall) → Variable auswählen, dessen Verlauf dargestellt werden soll → und die Anzahl der Konturen (Auflösung) festlegen → bestätigen → Konturplot wird erstellt



e) Dieser Vorgang kann für alle Flächen und Ebenen wiederholt werden. Desweitern können alle Variablen bzw. Expressions dargestellt werden, welche im Setup definiert sind.