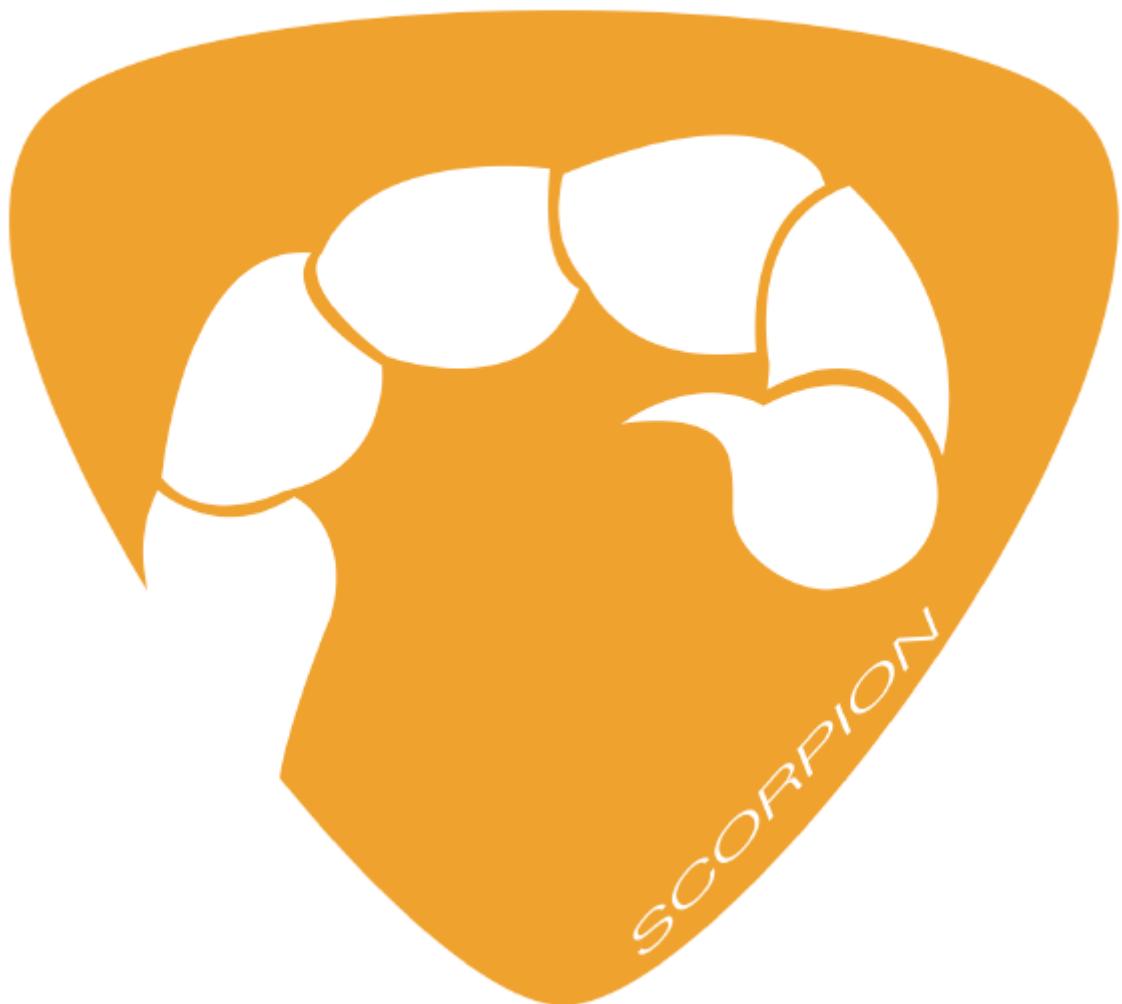


# SCORPION





# Diplomarbeit

## **Chassis-, Fahrwerks- und Designneuentwicklung des Elektrorennfahrzeugs Scorpion**

### **Designkonzept und Aerodynamische Analyse**

Hohla Dominik      5BHMBU      Betreuer:      Dipl.-Ing. Dr. Passrucker Harald

### **Konstruktion Fahrerzelle, Lenkung und Fahrsimulationen**

Ploy Alexander      5BHMBU      Betreuer:      Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas

### **Konstruktion Hinterbau und Bauteilanalyse**

Sommer Paul      5BHMBU      Betreuer:      Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas

ausgeführt im Schuljahr 2021/22

---

Abgabevermerk:

Datum: 04.04.2022

übernommen von:



## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die aus den benutzen Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Salzburg, am 04.04.2022

### Verfasser:

---

Hohla Dominik

---

Ploy Alexander

---

Sommer Paul



# Diplomarbeit

## Dokumentation

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Namen der Verfasser/innen | Hohla Dominik / Ploy Alexander / Sommer Paul  |
| Jahrgang Schuljahr        | 5 BHMBU<br>2021 / 22  |
| Thema der Diplomarbeit    | Chassis-, Fahrwerks- und Designneuentwicklung des Elektrorennfahrzeugs Scorpion                               |
| Kooperationspartner       | HTBLuVA Salzburg / HC-Concepts-Engineering GmbH / W&H Dentalwerk / Meister GmbH / Siegl Elektrovertriebs GmbH |

|                  |  |
|------------------|--|
| Aufgabenstellung | Seit über 10 Jahren strebt das HTL-Racing-Team die jährliche Teilnahme am europaweit ausgerichteten Shell Eco Marathon an. Aufgrund der Änderungen des Reglements ist das derzeitige Fahrzeug nicht mehr teilnahmeberechtigt. Da es nicht möglich ist, das bestehende Fahrzeug anzupassen, ist eine Neuentwicklung erforderlich. Teil dieser ist eine Neugestaltung nahezu aller Fahrzeugkomponenten sowie ein überarbeitetes Designkonzept. |
|------------------|--|

|              |   |
|--------------|---|
| Realisierung | Die parametrische Konstruktion und FEM Berechnung des Chassis wird dabei mit der CAD Software „PTC – Creo 6 <sup>1</sup> “ durchgeführt, wobei die mittels Freiformflächen konstruierte Verkleidung in der Software „Fusion 360 <sup>2</sup> “ entworfen wurde. Um das Design optimieren zu können, wurden numerische Aerodynamik Simulationen mit der Software ANSYS CFX <sup>3</sup> durchgeführt. Die Fertigung aller Bauteile wurde einerseits in der Schule, aber auch durch zahlreiche Partnerfirmen, realisiert. |
|--------------|---|

|            |   |
|------------|---|
| Ergebnisse | Die Konstruktion und Berechnung aller neu entwickelten Teile ist abgeschlossen und die Fertigung der zentralen Fahrzeugkomponenten wurde bereits abgeschlossen. |
|------------|---|

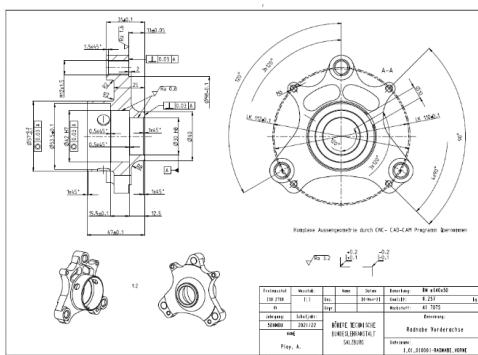
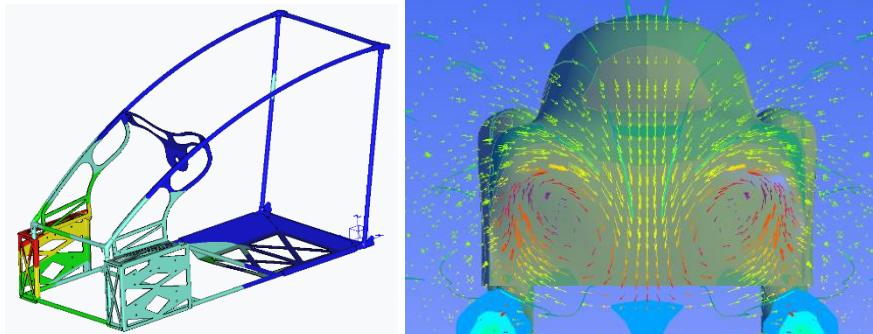
<sup>1</sup> PTC, 2022

<sup>2</sup> Autodesk, 2022

<sup>3</sup> Ansys, Inc., 2022



Typische Grafik, Foto  
etc.





|   |  |
|---|--|
| Teilnahme an Wettbewerben, Auszeichnungen | Bosch Technik fürs Leben, Jugend Innovativ |
|---|--|

|   |  |
|---|--|
| Möglichkeiten der Einsichtnahme in die Arbeit | Absolventen<br>Schulbibliothek<br>Abteilungsvorstand |
|---|--|

|                                       |                 |  |
|---------------------------------------|-----------------|--|
| Approbation<br>(Datum / Unterschrift) | Prüfer/Prüferin | Direktor/Direktorin<br>Abteilungsvorstand/Abteilungsvorständin |
|---------------------------------------|-----------------|--|



# Diploma Thesis

## Documentation

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Author(s)             | Hohla Dominik / Ploy Alexander / Sommer Paul  |
| Form<br>Academic year | 5 BHMBU<br>2021 / 22  |
| Topic                 | design-, chassis and cladding redevelopment of the battery electric vehicle Scorpion                          |
| Co-operation Partners | HTBLuVA Salzburg / HC-Concepts-Engineering GmbH / W&H Dentalwerk / Meister GmbH / Siegl Elektrovertriebs GmbH |

|                     |  |
|---------------------|--|
| Assignment of Tasks | The HTL-Salzburg-Racing-Team has been striving to compete at the annual European Shell Eco-marathon for over ten years. Since the regulations of the Shell Eco-marathon changed drastically, the former vehicle no longer fits the specifications of the urban concept category. This made a redevelopment of the Scorpion necessary. The aim of this diploma thesis is to redevelop the Scorpion vehicle which includes the design, construction and calculation process. |
|---------------------|--|

|             |   |
|-------------|---|
| Realisation | The parametric construction as well as the finite element simulation were carried out in the CAD software "PTC – Creo 6 <sup>4</sup> ". The freeform surfaces for the flow optimized design were created using Autodesk's Software "Fusion 360 <sup>5</sup> ". In order to optimize the design numerical aerodynamic computations were performed with Ansys CFX <sup>6</sup> . All parts were produced in our school's workshop or with the support of local companies. |
|-------------|---|

|         |   |
|---------|---|
| Results | The design and manufacturing of all new parts is completed, and the vehicle is being assembled. The project is taken on by the next generation who aim to compete at the Shell Eco-marathon 2023. |
|---------|---|

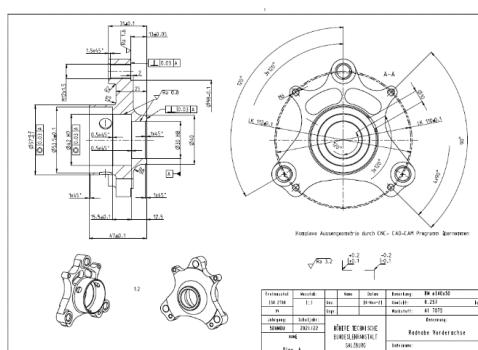
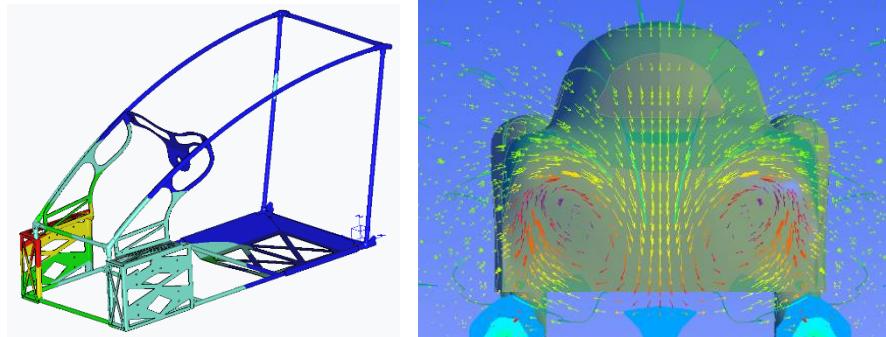
<sup>4</sup> PTC, 2022

<sup>5</sup> Autodesk, 2022

<sup>6</sup> Ansys, Inc., 2022



Illustrative Graph,  
Photo  
(incl. explanation)





|   |   |
|---|---|
| Participation in Competitions<br>Awards | Bosch Technik fürs Leben,<br>Jugend Innovativ |
|---|---|

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Accessibility of<br>Diploma Thesis | graduates<br>school library<br>head of department |
|------------------------------------|---|

|                           |          |                              |
|---------------------------|----------|------------------------------|
| Approval<br>(Date / Sign) | Examiner | Head of College / Department |
|---------------------------|----------|------------------------------|



# Danksagung

Besonders möchten wir unseren vielen Sponsoren und Partnerfirmen danken. Ohne die Material-, Knowhow-, Fertigungs- und auch Geldunterstützungen wäre das Projekt HTL-Salzburg-Racing-Team niemals zu bewältigen gewesen. Im Speziellen möchten wir uns bei den folgenden Unternehmen bedanken:



HC-Concepts



KTM



Industriellenvereinigung



Schlüter Motorsport



G. O. Nilsson



Meister GmbH



Kobler Maschinenbau



W&H Dentalwerk



Carbon-Express



Raceparts Salzburg



Siegl Elektro Produktions-  
und VertriebsgmbH



GMT Wintersteller  
Metalltechnik



Ihr Fachmarkt im Internet - gut, günstig & schnell

Schraubenking

Außerdem möchten wir uns bei den betreuenden Professoren aus der Maschinenbau- sowie der Elektrotechnikabteilung, im Besonderen bei unserem Projektbetreuungslehrer Herrn Prof. Dipl.-Ing. Thomas Weichenberger, für ihr Engagement und die kontinuierliche Unterstützung bedanken. Ein besonderes Dankeschön möchten wir auch an alle Werkstätten-Lehrer richten, welche uns und unsere Vorgänger bereits über Jahre hinweg tatkräftig unterstützen. Das Arbeiten in der hauseigenen Werkstätte ermöglicht es uns, beim gesamten Fertigungsprozess mitzuwirken und der fachliche Input der Werkstätten Lehrer macht diesen Prozess zu einer wertvollen Lernerfahrung.

Das HTL-Salzburg-Racing-Team ist ein jahrgangs- sowie abteilungsübergreifendes Projekt, deshalb möchten wir uns auch bei unseren KollegInnen aus der Elektrotechnik-, Elektronik- und Mediendesignabteilung und unseren Teammitgliedern aus den jüngeren Jahrgängen für die tatkräftige Unterstützung bedanken.



## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Diplomarbeit.....                           | A  |
| Eidesstattliche Erklärung .....             | B  |
| Dokumentation .....                         | C  |
| Documentation.....                          | F  |
| Danksagung .....                            | I  |
| Inhaltsverzeichnis.....                     | J  |
| Abkürzungsverzeichnis.....                  | Q  |
| Literaturabkürzungen.....                   | Q  |
| Allgemeine Abkürzungen .....                | Q  |
| 1 Abstract.....                             | 1  |
| 2 Einleitung .....                          | 2  |
| 3 Teammanagement.....                       | 3  |
| 3.1 Team Aufbau.....                        | 3  |
| 3.1.1 Teamstruktur .....                    | 3  |
| 3.2 Aufgabenverteilung .....                | 3  |
| 3.2.1 Projektstrukturplan.....              | 5  |
| 3.2.2 Terminplan .....                      | 5  |
| 3.2.3 Arbeitspaketbeschreibung.....         | 6  |
| 3.3 Teamkommunikation.....                  | 7  |
| 3.3.1 Microsoft Teams .....                 | 7  |
| 3.4 Projektfinanzierung.....                | 8  |
| 3.4.1 Einteilung der Sponsoren.....         | 8  |
| 3.4.2 Ausgaben.....                         | 9  |
| 3.4.3 Einnahmen .....                       | 9  |
| 3.5 Wettbewerbe .....                       | 10 |
| 3.5.1 Shell Eco Marathon.....               | 10 |
| 3.5.2 Bosch – Technik fürs Leben Preis..... | 10 |
| 3.5.3 Jugend Innovativ .....                | 10 |
| 4 Neuentwicklung des Designs .....          | 11 |
| 4.1 Erarbeitung erster Entwürfe .....       | 11 |
| 4.2 Erste Designideen .....                 | 12 |
| 4.2.1 Designidee Michael Bäuchler.....      | 12 |
| 4.2.2 Designidee Alexander Ploy .....       | 12 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.2.3 | Designidee Vanessa Pugl-Pichler .....      | 13 |
| 4.2.4 | Designidee Paul Sommer .....               | 13 |
| 4.3   | Digitalisierung der Designideen .....      | 13 |
| 4.3.1 | Designentwurf 1.....                       | 14 |
| 4.3.2 | Designentwurf 2.....                       | 15 |
| 4.3.3 | Designentwurf 3.....                       | 16 |
| 4.3.4 | Designentwurf 4.....                       | 17 |
| 4.4   | Finalisierung des Designs .....            | 17 |
| 5     | Strömungssimulation.....                   | 19 |
| 5.1   | Zielsetzung .....                          | 19 |
| 5.2   | Grundlagen .....                           | 19 |
| 5.2.1 | Numerische Lösungsmethodik.....            | 19 |
| 5.2.2 | Navier Stokes Gleichungen .....            | 20 |
| 5.2.3 | Anwendung .....                            | 22 |
| 5.2.4 | Grundlegende Formeln .....                 | 23 |
| 5.2.5 | Ansys CFX .....                            | 24 |
| 5.3   | Netzanalyse .....                          | 25 |
| 5.3.1 | Vorgehensweise .....                       | 25 |
| 5.3.2 | Ergebnisse .....                           | 25 |
| 5.4   | Stationäre Lösung Erstentwurf .....        | 27 |
| 5.4.1 | Zielsetzung .....                          | 27 |
| 5.4.2 | Optische Analyse des Modell .....          | 27 |
| 5.4.3 | Parameter und PrePost Einstellungen .....  | 28 |
| 5.4.4 | Ergebnis.....                              | 28 |
| 5.4.5 | Bewertung der Analyse .....                | 29 |
| 5.5   | Stationäre Lösung Enddesign.....           | 33 |
| 5.5.1 | Zielsetzung .....                          | 33 |
| 5.5.2 | Analyse der Veränderungen .....            | 33 |
| 5.5.3 | Ergebnisse .....                           | 33 |
| 5.5.4 | Bewertung der Analyse .....                | 34 |
| 5.6   | Instationäre Lösung.....                   | 37 |
| 5.6.1 | Aufbau.....                                | 37 |
| 5.6.2 | Komplikationen mit der Simulation .....    | 37 |
| 5.6.3 | Ergebnisse .....                           | 38 |
| 5.7   | Fazit zur aerodynamischen Simulation ..... | 38 |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.7.1 | Einsparnisse aufgrund der Aerodynamikverbesserung ..... | 38 |
| 5.8   | Validierung durch Windkanalmessungen .....              | 41 |
| 5.8.1 | Zielsetzung .....                                       | 41 |
| 5.8.2 | Aufbau .....  | 41 |
| 5.8.3 | Begründung Abweichung des $c_w$ Wertes .....            | 43 |
| 5.8.4 | Persönliches Fazit .....                                | 43 |
| 6     | Chassis Konzept .....                                   | 44 |
| 6.1   | Anforderungen .....                                     | 44 |
| 6.2   | Reglement .....   | 44 |
| 6.3   | Konzeptionierung .....                                  | 44 |
| 6.3.1 | Chassis mit nicht selbsttragender Verkleidung .....     | 44 |
| 6.3.2 | Chassis mit selbsttragender Verkleidung .....           | 46 |
| 6.4   | Bewertungstabellen .....                                | 47 |
| 6.4.1 | Leiter-/Kasten-/Zentralrohr-/Plattformrahmen .....      | 47 |
| 6.4.2 | Gitterrohrrahmen .....                                  | 47 |
| 6.4.3 | Space Frame .....                                       | 47 |
| 6.4.4 | Monocoque .....   | 47 |
| 6.5   | Auswertung .....  | 48 |
| 7     | Fahrerzelle .....                                       | 49 |
| 7.1   | Anforderungen .....                                     | 49 |
| 7.1.1 | Festigkeit & Steifigkeit .....                          | 49 |
| 7.1.2 | Sicherheit & Platz für die/den Fahrer/in .....          | 49 |
| 7.1.3 | Raum für Bedienelemente des Fahrzeugs .....             | 49 |
| 7.1.4 | Anbindung der vorderen Radaufhängung .....              | 49 |
| 7.1.5 | Schnittstelle zur Verkleidung .....                     | 49 |
| 7.2   | Konzeptionierung .....                                  | 50 |
| 7.2.1 | Schweißkonstruktion .....                               | 50 |
| 7.2.2 | Verbindungsmaßen .....                                  | 50 |
| 7.2.3 | Bewertung .....   | 51 |
| 7.3   | Konstruktion .....                                      | 51 |
| 7.3.1 | Erstes Rohrkonstrukt .....                              | 51 |
| 7.3.2 | Anbindmöglichkeit für vordere Aufhängung .....          | 52 |
| 7.3.3 | Anfügen einer Bodenfläche .....                         | 53 |
| 7.3.4 | Pedalerie und Lenkgetriebe .....                        | 55 |
| 7.3.5 | Vordere Radaufhängung .....                             | 57 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 7.3.6 | Sitzgelegenheit und Anbindung .....                | 57 |
| 7.3.7 | Lenkung, Lenkstange und Armaturenbrett.....        | 59 |
| 7.3.8 | Konstruktionsresultat Teilchassis Fahrerzelle..... | 63 |
| 8     | Hinterbau .....                                    | 64 |
| 8.1   | Anforderungen.....                                 | 64 |
| 8.1.1 | Festigkeit und Steifigkeit.....                    | 64 |
| 8.1.2 | Sicherheit .....                                   | 64 |
| 8.1.3 | Antrieb und hintere Radaufhängung .....            | 64 |
| 8.1.4 | Anbindung zur hinteren Verkleidung.....            | 64 |
| 8.1.5 | Platzschaffung.....                                | 64 |
| 8.2   | Konzeptionierung.....                              | 65 |
| 8.2.1 | Gitterrohrrahmen .....                             | 65 |
| 8.2.2 | Gitterrahmen aus Blechteilen.....                  | 66 |
| 8.2.3 | Kombinationsgitterrahmen.....                      | 66 |
| 8.2.4 | Bewertung.....                                     | 67 |
| 8.2.5 | Gittergeometrie .....                              | 69 |
| 8.3   | Kofferraum.....                                    | 72 |
| 8.3.1 | Anforderungen.....                                 | 72 |
| 8.3.2 | Reglement.....                                     | 72 |
| 8.3.3 | Konzeptionierung.....                              | 72 |
| 8.4   | Umsetzung in CAD .....                             | 72 |
| 8.4.1 | Hinterbau Version 1 .....                          | 73 |
| 8.4.2 | Hinterbau Version 2 .....                          | 76 |
| 8.4.3 | Hinterbau Version 3 .....                          | 78 |
| 8.4.4 | Hinterbau Version 4 .....                          | 81 |
| 8.4.5 | Kofferraum.....                                    | 85 |
| 8.4.6 | Hinterbau Endversion .....                         | 87 |
| 9     | Vordere Radaufhängung .....                        | 89 |
| 9.1   | Anforderungen.....                                 | 89 |
| 9.2   | Reglement.....                                     | 89 |
| 9.3   | Konstruktion.....                                  | 89 |
| 9.3.1 | Übernommene Bauteile.....                          | 89 |
| 9.3.2 | Zukaufteile .....                                  | 90 |
| 9.3.3 | Neu entworfene Bauteile.....                       | 90 |
| 9.3.4 | Zusammengestellte vordere Aufhängung .....         | 94 |



|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 10     | Hintere Radaufhängung .....                                    | 95  |
| 10.1   | Anforderungen .....  | 95  |
| 10.1.1 | Gutes Fahrverhalten .....                                      | 95  |
| 10.1.2 | Kraftübertragung .....   | 95  |
| 10.2   | Reglement .....  | 95  |
| 10.3   | Konzeptionierung .....   | 95  |
| 10.3.1 | Bestehende Radaufhängungen .....                               | 95  |
| 10.3.2 | Konzept .....  | 96  |
| 10.3.3 | Bewertung .....  | 97  |
| 10.4   | Umsetzung in CAD .....   | 99  |
| 10.4.1 | Hintere Radaufhängung Version 1 .....                          | 99  |
| 10.4.2 | Hintere Radaufhängung Version 2 .....                          | 101 |
| 10.4.3 | Hintere Radaufhängung Version 3 .....                          | 103 |
| 10.4.4 | Hintere Radaufhängung Version 4 .....                          | 105 |
| 10.4.5 | Endversion .....   | 107 |
| 11     | Ermittlung der Radlasten .....                                 | 110 |
| 11.1   | Allgemeines .....  | 110 |
| 11.2   | Verschiedene Fahrzustände & Belastungsfälle .....              | 110 |
| 11.2.1 | Gleichmäßige Geradeausfahrt .....                              | 110 |
| 11.2.2 | Beschleunigte Geradeausfahrt .....                             | 110 |
| 11.2.3 | Verzögerte Geradeausfahrt .....                                | 110 |
| 11.2.4 | Gleichmäßige Kurvenfahrt .....                                 | 111 |
| 11.2.5 | Beschleunigte Kurvenfahrt .....                                | 111 |
| 11.2.6 | Verzögerte Kurvenfahrt .....                                   | 111 |
| 11.3   | Evaluierung des Lastfalles der höchsten Bauteilbelastung ..... | 111 |
| 11.3.1 | Berücksichtigung dreier Vergleichsfälle .....                  | 111 |
| 11.3.2 | Höchster Belastungsfall .....                                  | 112 |
| 11.4   | Berechnung des Fahrzustandes der größten Belastung .....       | 113 |
| 11.4.1 | Konstante und angenommene Werte .....                          | 113 |
| 11.4.2 | Ermittlung der Radkräfte .....                                 | 113 |
| 12     | Bauteilsimulation .....  | 115 |
| 12.1   | Allgemeines .....  | 115 |
| 12.2   | Methoden der Festigkeitsanalyse .....                          | 115 |
| 12.2.1 | Analytische Methoden .....                                     | 115 |
| 12.2.2 | Numerische Methoden .....                                      | 115 |



|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 12.3   | Finite Elemente Methode .....                                     | 115 |
| 12.3.1 | Funktion .....  | 115 |
| 12.3.2 | Geschichte .....  | 116 |
| 12.3.3 | Verwendung.....   | 117 |
| 12.4   | Bauteilanalyse des Fahrzeugs .....                                | 118 |
| 12.4.1 | Allgemeines.....  | 118 |
| 12.4.2 | Einteilung & Vereinfachungen.....                                 | 118 |
| 12.5   | FEM Fahrerzelle .....   | 121 |
| 12.5.1 | Erstes Rohrkonstrukt .....  | 121 |
| 12.5.2 | Version 2 .....   | 124 |
| 12.6   | FEM Hinterbau .....   | 128 |
| 12.6.1 | Version 2 .....   | 128 |
| 12.6.2 | Version 3 .....   | 131 |
| 12.6.3 | Version 4 .....   | 134 |
| 12.7   | FEM Hintere Radaufhängung.....                                    | 138 |
| 12.7.1 | Version 3 .....   | 138 |
| 12.7.2 | Version 4 .....   | 140 |
| 13     | Fertigung .....   | 143 |
| 13.1   | Lasersinterbauteile bei HC-Concepts.....                          | 143 |
| 13.2   | Komplexe Blechteile bei Meister GmbH.....                         | 145 |
| 13.3   | Blechteile bei Siegl Elektro Produktions- und VertriebsgmbH ..... | 146 |
| 13.4   | CNC Frä-/Drehteile bei Kobler Maschinenbau .....                  | 147 |
| 13.5   | Vordere Radnabe aus den Werkstätten der HTBLuVA Salzburg.....     | 148 |
| 13.6   | Kleinere Frä- & Drehteile von W&H Dentalwerk GmbH .....           | 149 |
| 13.7   | A-Säule bei GMT-Metalltechnik .....                               | 149 |
| 14     | Ausblick .....  | 150 |
| 14.1   | Resümee .....   | 150 |
| 14.2   | Renderbild Scorpion.....  | 151 |
| 15     | Verzeichnisse .....   | 152 |
| 15.1   | Literaturverzeichnis .....  | 152 |
| 15.2   | Online-Quellen .....  | 152 |
| 15.3   | Abbildungsverzeichnis .....                                       | 154 |
| 15.4   | Tabellenverzeichnis.....  | 159 |
| 16     | Anhang .....  | I   |
| 16.1   | Teambesprechungen Gesamtes Team.....                              | I   |



|         |  |       |
|---------|--|-------|
| 16.2    | Teambesprechungen Dominik Hohla.....       | II    |
| 16.3    | Einrichteblätter .....                     | III   |
| 16.3.1  | Einrichteblatt Radnabe Vorderachse .....   | III   |
| 16.3.2  | Einrichteblatt Radnabe Hinterachse .....   | IV    |
| 16.3.3  | Einrichteblatt Lagersitz Hinterachse ..... | V     |
| 16.3.4  | Einrichteblatt Lenkstangenende .....       | VI    |
| 16.3.5  | Einrichteblatt .....                       | VII   |
| 16.4    | Aufgabenverteilung .....                   | I     |
| 16.5    | Gantt Diagramm.....                        | II    |
| 16.6    | Aerodynamik Ergänzungen .....              | III   |
| 16.7    | Fertigungszeichnungen .....                | V     |
| 16.7.1  | Planungstabelle CNC Fertigung.....         | V     |
| 16.7.2  | Radnabe Vorderachse .....                  | VI    |
| 16.7.3  | Radnabe Hinterachse.....                   | VII   |
| 16.7.4  | Bremssattelaufnahme Hinterachse .....      | VIII  |
| 16.7.5  | Lagersitz Hinterachse .....                | IX    |
| 16.7.6  | Lenkstangenende .....                      | X     |
| 16.7.7  | Lenklagerhalterung .....                   | XI    |
| 16.7.8  | Lenkhebel links.....                       | XII   |
| 16.7.9  | Lenkhebel rechts.....                      | XIII  |
| 16.7.10 | Bremssattelaufnahme links .....            | XIV   |
| 16.7.11 | Bremssattelaufnahme rechts.....            | XV    |
| 16.7.12 | Aufhängungsblech Vorderachse .....         | XVI   |
| 16.7.13 | Aufhängungsblech Hinterachse .....         | XVII  |
| 16.7.14 | Pedalerieaufnahmblech .....                | XVIII |
| 16.7.15 | Bodenblech .....                           | XIX   |
| 16.7.16 | Zusammenstellung Aufhängung .....          | XX    |



## Abkürzungsverzeichnis

### Literaturabkürzungen

| Original Titel   | Verwendete Abkürzung |
|--|----------------------|
| Karosserie- und Antriebsstrang<br>Neuentwicklung des<br>Elektrorennfahrzeugs Scorpion        | HTL_RT_DA_2022       |
| I 4.0 Antriebs-, Fahrwerks- und<br>Strömungsoptimierung<br>des Elektrorennfahrzeugs Scorpion | HTL_RT_DA_2018       |
| Weiterentwicklung und Optimierung<br>eines Elektrofahrzeuges für den Shell<br>Eco Marathon   | HTL_RT_DA_2017       |
| Weiterentwicklung eines<br>Elektrofahrzeuges mit Prüfstand für<br>den Shell Eco-Marathon     | HTL_RT_DA_2016       |
| Konstruktion eines Fahrzeuges mit<br>Straßenzulassung für den Shell Eco<br>Marathon          | HTL_RT_DA_2015       |

Tabelle 0-1 Literaturabkürzungen

### Allgemeine Abkürzungen

| Beschreibung  | Verwendete Abkürzung |
|---|----------------------|
| Shell Eco Marathon  | SEM                  |
| Technischer Überwachungsverein  | TÜV                  |
| “ <b>S</b> tandard for the <b>E</b> xchange of <b>P</b> roduct<br>model <b>d</b> a <b>t</b> a” <sup>7</sup> | STEP bzw. STP        |
| Portable Document Format <sup>8</sup>   | PDF                  |
| Computer Aided Design <sup>9</sup>  | CAD                  |
| Computer numerical control <sup>10</sup>  | CNC                  |
| Finite Elemente Methode <sup>11</sup>   | FEM                  |
| Computational fluid dynamics <sup>12</sup>  | CFD                  |
| Turbomachinery CFD Software <sup>13</sup>   | CFX                  |

Tabelle 0-2 Allgemeine Abkürzungen

<sup>7</sup> vgl.: [https://de.wikipedia.org/wiki/Standard\\_for\\_the\\_exchange\\_of\\_product\\_model\\_data](https://de.wikipedia.org/wiki/Standard_for_the_exchange_of_product_model_data)

<sup>8</sup> vgl.: [https://de.wikipedia.org/wiki/Portable\\_Document\\_Format](https://de.wikipedia.org/wiki/Portable_Document_Format)

<sup>9</sup> vgl.: <https://de.wikipedia.org/wiki/CAD>

<sup>10</sup> vgl.: <https://de.wikipedia.org/wiki/CNC-Maschine>

<sup>11</sup> vgl.: <https://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode>

<sup>12</sup> vgl.: [https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics)

<sup>13</sup> vgl.: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>



# 1 Abstract

## Deutsch

Das HTL-Salzburg-Racing hat es sich seit 8 Jahren zum Ziel gesetzt, zusammen mit ca. 2000 Studenten aus über 200 Universitäten und Hochschulen, am jährlichen Shell Eco Marathon (SEM) teilzunehmen. Wie bereits in den vergangenen Jahren wird ein Antritt in der Kategorie Urban Concept Electric angestrebt, parallel wird jedoch ein alternativer Antrieb mit Wasserstoffbrennstoffzelle als Energiequelle entwickelt.

Da sich das Shell Eco Marathon Reglement jährlich ändert, muss das Fahrzeug laufend angepasst werden. Die Änderung der vorgegebenen Fahrzeugabmessungen für die Urban Concept Kategorie seit der Entwicklung des derzeitigen Fahrzeuges (2017) machte jedoch eine grundlegende Neukonstruktion des Fahrzeuges notwendig.

Die vielfältigen technischen Herausforderungen, welche die Entwicklung eines neuen Fahrzeuges beinhaltet, verlangen eine abteilungsübergreifende Arbeitsweise, weshalb im HTL-Racing Team derzeit 15 SchülerInnen aus der Maschinenbau-, Elektrotechnik- und Mediendesign-Abteilung arbeiten.

Das neu entwickelte Fahrzeug hebt sich vor allem durch das drastisch veränderte Chassis von seinem Vorgänger ab. Anstatt eines schwierig anpassbaren, zu fertigenden und kostenintensiven Carbon Monocoque wurde ein CFK-Gitterrohrrahmen entwickelt, welcher sich durch seine hohe Steifigkeit und sein niedriges Gewicht auszeichnet.

Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Diplomarbeit findet die Fertigung der zentralen Fahrzeugkomponenten statt, mit dem Ziel, eine Bewerbung für den Shell Eco Marathon 2023 möglich zu machen.

## Englisch

For the last 8 years the HTL-Racing-Team has been aiming to compete with 2000 students from over 200 European universities at the yearly Shell Eco-marathon. The Scorpion vehicle is built to compete in the urban concept battery powered category. As a part of this year's diploma thesis a hydrogen fuel cell is being developed to fit the upcoming adaptation of the Scorpion.

Each year adaptations according to the changing Shell Eco-marathon regulations are mandatory to implement. Although the current car was permitted to take part according to the 2017 regulation, changes of the maximum outer dimensions as well as the addition of a second side door made it unsuitable for the upcoming competition. That is why the decision was made to redesign the chassis as well as many components of the suspension system.

Due to the versatile technical challenges this project comes with, it is required to work interdivisional for which reason the HTL-Racing Team consists of 15 students out of four departments of the HTBLuVA Salzburg.

The largest change made was discarding the carbon monocoque in favour of a CFK tube frame chassis concept which is adaptable, cheaper, and easier to manufacture. Here we would like to emphasise the custom-made 3D printed aluminium pipe couplings which connect the CFK tubes.

Following the submission of this diploma thesis the Scorpion enters its final manufacturing and assembly state to take part in the Shell Eco-marathon 2023.



## 2 Einleitung

*„Die Zukunft gehört dem, der als erster die Kraft der Sonne in den Tank packt, mit Wasserstoff überholt oder CO<sub>2</sub>-frei vorankommt.“*

Horst Köhler - 14. Januar 2010

Der Individualverkehr ist in einer Zeit des Umbruchs. Wie so viele Bereiche müssen auch die Fortbewegungsmittel der kommenden Jahrzehnte „grün“ werden. Was „grün“ heißt und wie ein Fahrzeug unabhängig von seiner Antriebsart ressourcensparend geplant, gebaut und gefertigt werden kann, ist die Frage, die wir uns alle beantworten müssen. Der Scorpion soll ein Versuch sein, Alternativen aufzuzeigen und dabei das Leistungsspektrum der HTBLuVA Salzburg abzubilden.

Die diesjährige Diplomarbeit hat es sich zum Ziel gesetzt, das gesamte Fahrzeug neu zu entwickeln und dabei unkonventionelle Ideen und Konzepte, wie eine Baumwollbespannung, mit modernen Fertigungs- und Berechnungsmethoden in Verbindung zu bringen.

Da die unterschiedlichen Bereiche des Scorpions auf insgesamt 15 Teammitglieder aufgeteilt wurden, welche insgesamt 5 Diplomarbeiten schreiben, kann in der folgenden Arbeit nur ein Teil der Entwicklung abgedeckt werden. Da die Teamleitung von Dominik Hohla ausgeht, werden das Teammanagement sowie die Projektfinanzierung und Aufgabenplanung des HTL-Racing-Teams in seiner Arbeit abgedeckt. Zusätzlich wird die aerodynamische Simulation des Designkonzeptes beschrieben. Alexander Ploy und Paul Sommer leiten die Konstruktion und Fertigung des Scorpions, wobei die FEM Berechnung von Herrn Sommer abgedeckt wird und die Entwicklung des Designs sowie die Fahrdynamikberechnungen von Herrn Ploy durchgeführt werden.

Entwicklung, Konstruktion und Berechnung der Verkleidung sowie die Entwicklung des Wasserstoffbrennstoffzellenantriebes werden in der Arbeit von Herrn Bäuchler, Herrn Serdar und Frau Pugl-Pichler beschrieben. Die Entwicklung des Motorcontrollers, der Sensorik und der Fahrzeugsteuerung können außerdem in der Arbeit des Elektrotechnik Teams bestehend aus Heinrich Linortner, Fiona Weiß, Roland Hasenauer, Thomas Wallinger und Joshua Gugg nachgelesen werden.



### 3 Teammanagement

Die Hauptaufgabe des Teammanagements liegt in der Koordination und Verwaltung des gesamten Projektes. Weitere wichtige Aufgaben sind die Finanzierung und die Koordination der Fertigung in der Schuleigenen Werkstätte, sowie die Vergaben an externen Fertigungspartner. In den folgenden Kapiteln werden Themen wie die Teamkommunikation, das Fertigungsmanagement oder die Projektfinanzierung behandelt. Grundsätzlich wird die Teamstruktur ausgehend vom bestehenden Team übernommen, aufgrund von Komplikationen bei der Leistungsübergabe musste die Organisation innerhalb des Teams jedoch weitgehend neu aufgestellt werden, wobei in vielen Bereichen auf die Arbeit von Bernd Brenter<sup>14</sup> zurückgegriffen werden konnte.

#### 3.1 Team Aufbau

Wie in den vorangegangenen Diplomarbeiten beschrieben, besteht das HTL-Racing-Team seit mittlerweile vierzehn Jahren und die Diplomanten wurden bereits im dritten Jahrgang ins Team eingeladen und übernahmen dieses auch nach dem Schulabschluss von dem Früheren Teamleiter Andreas Huber. Da es in den Jahrgängen 2019/20 nur ein sehr kleines Racing-Team gab, war eine Einarbeitung in das Team nur bedingt möglich.

##### 3.1.1 Teamstruktur

Der grundsätzliche Aufbau des HTL-Racing-Teams wurde nach dem Vorbild der Jahrgänge 2016-2018 neu aufgebaut. Die Teamleitung wurde dabei von Dominik Hohla übernommen und die Aufgabenbereiche wurden auf die 11 Diplomanten verteilt. Da die Aufgabenverteilung innerhalb des Elektrotechnik Teams nicht vom Maschinenbau Team ausgeht, wird in der folgenden Arbeit auf diese nur überblicksmäßig eingegangen.

#### 3.2 Aufgabenverteilung

##### Dominik Hohla – Teamleiter



Abbildung 3-1  
Dominik Hohla

- Aerodynamik Berechnungen
- Digitalisierung Design
- Teammanagement
- Aufgabenverteilung
- Zeitplanung
- Kommunikation Sponsoren
- Leitung der Meetings

##### Michael Bäuchler – Verkleidung



Abbildung 3-2  
Michael Bäuchler

- Ermitteln der Eigenschaften des Bespann Materials in Versuchsreihen
- Konstruktion/Fertigung des hinteren Stützgerüstes
- Planung der hinteren Verkleidung und der Tür

<sup>14</sup> vgl.: Brenter; HTL\_RT\_DA\_2018 (S.2-18)



Abbildung 3-3  
Alexander Ploy

### Alexander Ploy – Konstruktion Fahrerzelle

- Designentwicklung
- Konstruktion Fahrerzelle
- Konstruktion Lenkung
- Konstruktion vorderer Radaufhängung
- Überprüfung der Fahrdynamik & Radlasten
- Optimierungen des Chassis



Abbildung 3-4 Vanessa  
Pugl-Pichler

### Vanessa Pugl-Pichler – Entwicklung alternativer Antrieb

- Recherche zu unterschiedlichen klimafreundlichen Antriebsarten
- Planung des Antriebsstrangs für Wasserstoffbrennstoffzellen
- Einbindung in die vorhandene Hinterbau Konstruktion



Abbildung 3-5 Niko  
Serdar

### Niko Serdar – Verkleidung

- Ermitteln der Eigenschaften des Bespann Materials in Versuchsreihen
- Konstruktion/Fertigung des vorderen Stützgerüstes
- Planung der vorderen Verkleidung und der Tür



Abbildung 3-6  
Paul Sommer

### Paul Sommer – Konstruktion Hinterbau

- Designentwicklung
- Konstruktion Heckrahmen
- Konstruktion hinterer Radaufhängung
- Festigkeitsanalyse des gesamten Fahrzeugs
- Optimierungen des Chassis

### 3.2.1 Projektstrukturplan

Ziel des Projektstrukturplans ist es, die Aufgabenbereiche in einzelne Aufgabenpakete (abgekürzt: AP) zu unterteilen, welche miteinander in Verbindung gebracht werden können. Die Einteilung dieser erfolgt nach den einzelnen Bereichen, welche am Projekt beteiligt sind, nicht nach den beteiligten Diplomanten. So kann entschieden werden, in welcher Reihenfolge diese zu erledigen sind und in welchen Abstand Meetings/Treffen angesetzt werden müssen, in welchen der Fortschritt auf andere abgestimmt wird.

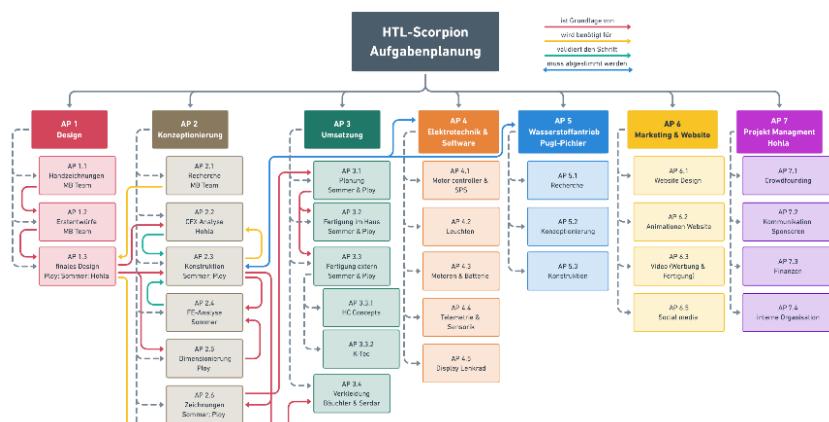


Abbildung 3-7 Projektstrukturplan (im Anhang)

Darüber hinaus können im folgenden Diagramm die Verantwortlichen für einzelne Aufgabenpakete definiert werden. Da das Diagramm aufgrund der Größe nicht lesbar auf einer A4 Seite druckbar ist, finden Sie die volle Abbildung im Anhang der Arbeit.<sup>15</sup>

### 3.2.2 Terminplan

Der Terminplan ist eine direkte Folge aus dem Projektstrukturplan. Zur Aufstellung ist es neben der Reihenfolge der zu erledigenden Aufgaben außerdem wichtig, den Zeitraum in welchem am Projekt gearbeitet wird zu definieren. Da aufgrund nach Abschluss der Umsetzung noch Zeit bleiben muss, die Arbeit zu dokumentieren, sowie die Präsentation vorzubereiten, der absolut letzte Arbeitstag der 18.3.2021 in der 11 Kalenderwoche. Als Beginn wird

der Ende des vorangegangenen Schuljahres definiert, ab welchem am Projekt gearbeitet wurde. Auffallend ist, dass vielen Aufgabenpaketen kein Zeitrahmen zugeordnet ist, da diese laufende Tätigkeiten sind, welche nicht an einen bestimmten Zeitraum gebunden sind. Wie der Projektstrukturplan ist auch der Zeitplan im Anhang in voller Größe zu finden.<sup>16</sup>

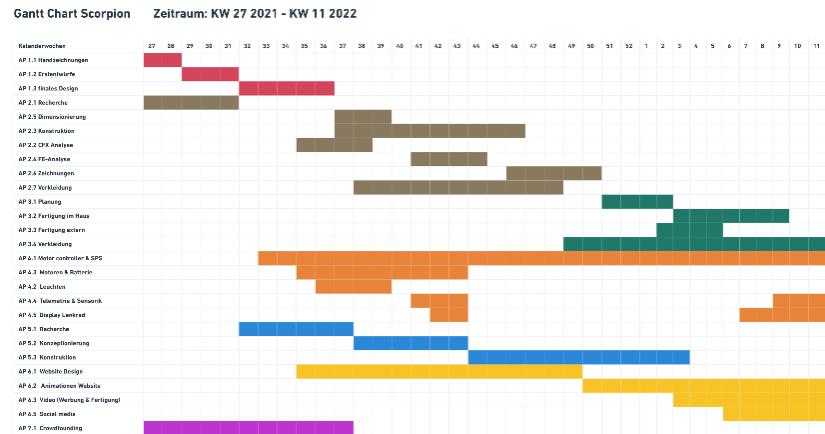


Abbildung 3-8 Gantt Diagramm (Im Anhang)

<sup>15</sup> vgl.: 0 Aufgabenverteilung; Anhang Seite I

<sup>16</sup> vgl.: 16.5 Aufgabenverteilung; Anhang Seite I



### 3.2.3 Arbeitspaketbeschreibung

#### AP1 Design

|                               | Aufgabe  | Ziel                         | Querverweis                         |
|-------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------------|
| <b>AP 1.1 Handzeichnungen</b> | Handgezeichneten Designkonzepte ohne konstruktive Hintergrundgedanken        | Handzeichnungen              | 4.2 Erste Designideen               |
| <b>AP 1.2 Erstentwürfe</b>    | Umsetzung der Konzepte in der CAD Software Fusion Autodesk, 2022             | Modellentwürfe als CAD Datei | 4.3 Digitalisierung der Designideen |
| <b>AP 1.3 finales Design</b>  | Finalisieren eines Konzeptes in Fusion, mit konstruktive Hintergrundgedanken | Abgeschlossenes Design       | 4.4 Finales Design                  |

Tabelle 3-1 Aufgabenpacket Design

#### AP2 Konzeptionierung

|                               | Aufgabe   | Ziel   | Querverweis   |
|-------------------------------|---|--|---|
| <b>AP 2.1 Recherche</b>       | Erstellung einer Literaturliste hinsichtlich Konzeptionierung, Berechnung, Konstruktion und Fertigung | Literaturliste mit Links                     | 6 Chassis Konzept HTL_RT_DA_2022: 4 & 6 Konzept-findung Antrieb Verkleidung |
| <b>AP 2.2 CFD-Analyse</b>     | Bewertung des Designkonzeptes aufgrund von Aerodynamischen Eigenschaften                              | Instationäre-/Stationäre Lösung; Netzanalyse | 5 CFD-Analyse   |
| <b>AP 2.3 Konstruktion</b>    | Konstruktion des Chassis, der Radaufhängung und der Lenkung   | Konstruktion CAD                             | 7 Fahrerzelle; 8 Hinterbau; 10 Radaufhängung                                |
| <b>AP 2.4 FE-Analyse</b>      | Berechnen der auftretenden Spannungen und Verformungen  | Rechenergebnisse                             | 12 Bauteilanalyse   |
| <b>AP 2.5 Dimensionierung</b> | Ermitteln der Radkräfte für die Berechnung  | Radkräfte                                    | 11 Ermittlung der Radlasten   |
| <b>AP 2.6 Zeichnungen</b>     | Aufbereitung der Bauteile für interne und externe Fertigung abgestimmt mit den Fertigenden            | Fertigungszeichnung                          | 16 Anhang   |
| <b>AP 2.7 Verkleidung</b>     | Ausarbeiten eines Verkleidungskonzeptes & Konstruktion des Stützgerüsts                               | Konstruktion Stützgerüst & Material          | vgl.: HTL_- RT_DA_2022 Seite 8-34 Seite 45-56                               |

Tabelle 3-2 Aufgabenpacket Konzeptionierung

#### AP3 Umsetzung

|                       | Aufgabe   | Ziel           | Querverweis           |
|-----------------------|---|----------------|-----------------------|
| <b>AP 3.1 Planung</b> | Erstellen von Fertigungsplänen, Einkauf von Material und Fertigungsdateien (CAM System) | Fertigungsplan | 16.3 Einrichteblätter |



|                                 |  |  |                                     |
|---------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| <b>AP 3.2 Fertigung im Haus</b> | Nachbearbeitung aller extern gefertigten Bauteile, Montage           | Vollständiges Fahrzeugchassis                      | 13.5 Fertigung                      |
| <b>AP 3.3 Fertigung extern</b>  | Fertigung Fahrzeugkomponenten aller bei Projekt sponsoren            | Fertiggestellte Fahrzeugkomponenten                | 13 Fertigung                        |
| <b>AP 3.4 Verkleidung</b>       | Durchführen der Bespannungsversuche und Bespannung von Probemodellen | Bewertung von Bespannungskonturen und -materialien | vgl.:<br>HTL_RT_DA_2022 Seite 36-43 |

Tabelle 3-3 Aufgabenpacket Umsetzung

#### AP5 Wasserstoffantrieb

|                            | Aufgabe   | Ziel                               | Querverweis                         |
|----------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>AP 5.1 Recherche</b>    | Recherche zu unterschiedlichen klimafreundlichen Antriebsarten und Evaluierung dieser | Evaluierung & Literaturliste       | vgl.:<br>HTL_RT_DA_2022 Seite 57-65 |
| <b>AP 5.2 Auslegung</b>    | Planung des Antriebsstrangs für Wasserstoffbrennstoffzellen                           | Konzepte eines Wasserstoffantriebs | vgl.:<br>HTL_RT_DA_2022 Seite 66-69 |
| <b>AP 5.3 Konstruktion</b> | Einbindung in die vorhandene Hinterbaukonstruktion                                    | Abgeschlossene CAD Konstruktion    | vgl.:<br>HTL_RT_DA_2022 Seite 70-94 |

Tabelle 3-4 Aufgabenpacket Wasserstoffantrieb

### 3.3 Teamkommunikation

Um einen reibungslosen Projektablauf zu gewährleisten, darf eine strukturierte Kommunikation zwischen den einzelnen Teammitgliedern nicht fehlen. Das HTL Racing Team hat nun durch das jahrelange Arbeiten am Projekt einen solchen Umfang erreicht, dass eine klassische, rein mündliche Kommunikation nicht mehr ausreicht. Da bereits in der Arbeit von Herrn Brenter eine sehr detaillierte Aufschlüsselung und Bewertung einzelner Programme vorliegt, werden in den folgenden Kapiteln diese nicht mehr ausgeführt und es wird sich auf die Aspekte, welche sich verändert haben, eingegangen. Das Mail System, Bitrix sowie Trello bleiben wie beschrieben mit minimalen Änderungen erhalten.<sup>17</sup>

#### 3.3.1 Microsoft Teams

Als einzige substanzelle Änderung in der Kommunikation ist die Plattform Microsoft Teams<sup>18</sup> welche gleichzeitig als Onlinespeicher Meeting Plattform und Aufgabenverteilungsplattform dienen kann. Die Einbindung von Trello und Sharepoint in Teams erlaubt es außerdem Dateien über alle Teammitglieder und Geräte zu synchronisieren und erleichtert so die Organisierung von Konstruktions- und Recherchedateien, da immer nur eine aktuelle Version auf allen Geräten vorhanden sein kann.

<sup>17</sup> vgl.: HTL\_RT\_DA\_2018 S.19 – S.28

<sup>18</sup> Teams, 2022



## 3.4 Projektfinanzierung

Da mit dem Projekt selbst keinerlei Umsätze generiert werden und kein direkter Projektpartner vorhanden ist, welcher die Projektkosten übernehmen könnte, müssen alle Ausgaben für die Fertigung/Website/Einzelteile von unterschiedlichen Projektunterstützern gedeckt werden. Da für Dienstleistungen, mit welchen Firmen das HTL Racing Team unterstützen keine Rechnung und damit auch kein Geldwert gestellt wird, wurden diese angenommen/vom Firmenbetreuer geschätzt. Einen großen Teil der Sponsorings machen außerdem Preisnachlässe aus, welche ebenfalls geschätzt werden.

### 3.4.1 Einteilung der Sponsoren

Die Gegenleistungen, welche das HTL Racing Teams gegenüber Sponsoren erbringen kann, werden in Kategorien eingeteilt. Die Sponsorenleistungen werden zu diesem Zweck pauschal in Kategorien eingeteilt. Wichtig ist hierbei, dass die Dienstleistungen und materielle Unterstützungen ebenfalls nach einem pauschalen Tarif umgerechnet werden.

#### 3.4.1.1 Kategorien

##### **Supporter:**

Sponsoren, welche einen Betrag bis 50€ spenden, werden als Supporter klassifiziert, auf der Website namentlich erwähnt und erhalten eine Danksagung.

##### **Silber-Supporter**

Bis zu einer Sponsorenleistung bis 100€ werden Sponsoren namentlich auf der Website/Diplomarbeit erwähnt und bekommen eine Danksagung.

##### **Gold-Supporter**

Von einem Sponsor, welcher einen Betrag bis 250€ spendet, wird das Logo auf die Website gestellt, zusätzlich wird eine Danksagung ausgeschickt.

##### **Sponsor**

Sponsoren, welche einen Betrag bis 500€ spenden, werden auf der Website mit dem Firmenlogo angeführt und bekommen eine Werbefläche am Fahrzeug von ca. 100 mm<sup>2</sup> zugesprochen. Darüber hinaus wird eine Danksagung, sowie ein Werbegeschenk ausgeschickt.

##### **Silber-Sponsor**

Bis zu einem Sponsor Betrag von 1500€ werden dem Sponsor eine Werbefläche am Fahrzeug von ca. 200 mm<sup>2</sup> zugesprochen. Das Logo wird außerdem beim der Diplomarbeitspräsentation, sowie auf allen Plakaten bei Ausstellungen und auf der Website angeführt (BIM; Tag der offenen Tür; Bosch Preis des Lebens etc.). Darüber hinaus wird eine Danksagung und ein Werbegeschenk ausgeschickt, sowie ein Werbepost auf allen Social-Media-Kanälen veröffentlicht. Zusätzlich kann über kleinere Gegenleistungen verhandelt werden.

##### **Gold-Sponsor**

Sponsoren welche das Projekt mit einen Betrag über 1500€ unterstützen, bekommen eine ca. 350 mm<sup>2</sup> große Werbefläche auf dem Fahrzeug. Neben allen Vorteilen eines Silber-Sponsors, können außerdem größere individuelle Gegenleistungen erbracht werden.



### Hauptsponsoren

Als Hauptsponsoren werden die drei Sponsoren, welche das Projekt mit den größten Beträgen unterstützen angeführt. Neben den Gegenleistungen von Gold-Sponsoren sind außerdem Gegenleistungen Seitens der HTBLuVA Salzburg möglich (Stand am Tag der Wirtschaft; Werbefläche im Jahresbericht etc.).

#### 3.4.2 Ausgaben

| Pos.<br>Nr. | Beschreibung                 | Einsatzbereich | erwartete<br>Kosten | angefallene<br>Kosten | finanziert durch |
|-------------|------------------------------|----------------|---------------------|-----------------------|------------------|
| 1           | Websitehosting               | -              | 120 €               | 149,76 €              | Projektkonto     |
| 2           | Einzelteile<br>Rennsportshop | Fahrerzelle    | 550 €               | 377,10 €              | Projektkonto     |
| 3           | Carbon Rohre                 | Chassis        | 680 €               | 482,38 €              | HTBLuVA Salzburg |
| 4           | Gaspedal                     | Fahrerzelle    | 31,04 €             | 31,04 €               | Projektkonto     |
| 5           | Epoxi Kleber                 | Chassis        | 150,30 €            | 150,30 €              | HTBLuVA Salzburg |

Tabelle 3-5 Projektfinanzierung Ausgaben

#### 3.4.3 Einnahmen

| Pos.<br>Nr. | Sponsor/ Unterstützer              | Dienstleistung                 | geschätzter<br>Wert | Gegenleistungen                 |
|-------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 1           | Schlüter Motorsport                | Preisnachlass                  | 161,6 €             | Gold Supporter                  |
| 2           | Carbon Express                     | Preisnachlass                  | 192,2 €             | Gold Supporter                  |
| 3           | HC-Concepts                        | Lasersinterteile               | 1500 €              | Gold Sponsor (Beitrag LinkedIn) |
| 4           | KTM                                | Bremssystem                    | 800 €               | Silber Sponsor                  |
| 5           | Industriellenvereinigung           | Geldspende                     | 500 €               | Sponsor                         |
| 6           | G. O. Nilsson                      | Radlager &<br>Normteile        | 320 €               | Sponsor                         |
| 7           | Meister GmbH                       | Komplexe<br>Blechteile         | 600 €               | Silber Sponsor                  |
| 8           | W&H Dentalwerk                     | Diverse Dreh-<br>und Frästeile | 300 €               | Sponsor                         |
| 9           | Siegl                              | Einfache<br>Blechteile         | 500 €               | Sponsor                         |
| 10          | Kobler Maschinenbau                | CNC Teile                      | 1300 €              | Silber Sponsor                  |
| 11          | HTBLuVA Salzburg                   | Geldspenden                    | 650 €               | Silber Sponsor                  |
| 12          | GMT Wintersteller<br>Metalltechnik | Gebogene<br>Rohre              | 120 €               | Gold Supporter                  |
| 13          | Schraubenking                      | Normteile                      | 70 €                | Silber Supporter                |

Tabelle 3-6 Projektfinanzierung Einnahmen



## 3.5 Wettbewerbe

### 3.5.1 Shell Eco Marathon

Aufgrund von Verzögerungen welche hauptsächlich durch die Pandemie bedingt waren, war eine Teilnahme am Shell-Eco-Marathon 2022 leider nicht möglich, da zur Zeit der Anmeldedeadline (10.11.2021) nicht absehbar war, ob die Fertigung der einzelnen Teile abgeschlossen werden könnte.

### 3.5.2 Bosch – Technik fürs Leben Preis

Wie in den letzten Jahren üblich wurde das Projekt auch dieses Jahr wieder beim Bosch – Technik fürs Leben Preis eingereicht. Details zum Wettbewerb können von der Technik fürs Leben Website,<sup>19</sup> sowie den diversen Vorgänger Diplomarbeiten entnommen werden.<sup>202122</sup>

### 3.5.3 Jugend Innovativ

*Jugend Innovativ bietet den Wettbewerbsteilnehmerinnen und Wettbewerbsteilnehmern jede Menge Vorteile und unterstützt sie auf ihrem Weg „von der Idee bis zur Realisierung ihres Projekts“.<sup>23</sup>*

Jugend Innovativ bietet sich als Wettbewerb für das Scorpion Team an, da der Scorpion mit einem neuen Fahrzeugkonzept gestartet wurde und damit von dem Design bis zur Fertigung alle Schritte enthalten sind. Außerdem eignet sich der Abteilungsübergreifende Charakter sowie die Zusammenarbeit mit externen Firmen für die Kriterien des Projekts.

<sup>19</sup> vgl.: Bosch, 2022

<sup>20</sup> Kremsmair, HTL\_RT\_DA\_2016 (S. 50ff)

<sup>21</sup> Eichhorn, HTL\_RT\_DA\_2017 (S. 33ff)

<sup>22</sup> Schallmoser, HTL\_RT\_DA\_2015 (S. 24ff)

<sup>23</sup> Breyer, 2022



## 4 Neuentwicklung des Designs

Da aufgrund der schwerwiegenden Reglementänderungen des SEM die Teilnahme mit dem aktuellen Scorpion nicht mehr möglich wäre, waren grundlegende technische Änderungen durchzuführen, welche schlussendlich zu einer kompletten Neuentwicklung des gesamten Fahrzeugs führten. Weil deshalb auch das Design nicht vorgegeben war, konnte auch die gesamte Formgebung und die optischen Merkmale neu definiert werden. Da die Form der Karosserie für die Konstruktion des gesamten Fahrzeuges ausschlaggebend ist, muss zuerst ein abgeschlossenes Design des Fahrzeugs vorhanden sein, bevor mit der Konstruktion des Chassis, der Radaufhängungen sowie sämtlicher anderer Bauteile des Fahrzeugs begonnen werden kann.

### 4.1 Erarbeitung erster Entwürfe

Anfänglich wurden unterschiedlichste Designideen von allen Scorpion-Teammitgliedern händisch erarbeitet. Dies wurde mittels einer karierten A4 Papiervorlage erreicht, welche die Abmessungen, verhältnismäßig richtig, laut SEM-Reglement andeutete. Im Folgenden ist diese selbst erstellte Vorlage abgebildet:

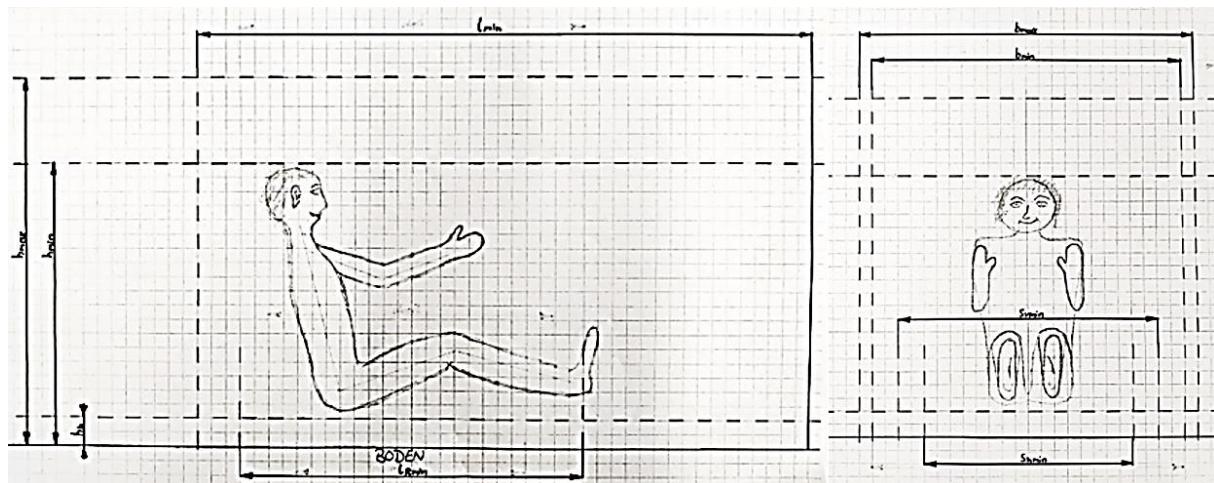


Abbildung 4-1 Vorlage für Designideen



## 4.2 Erste Designideen

Von den Mitgliedern des HTL-Salzburg-Racing-Teams wurden auf Basis dieser Vorlage verschiedenste Konzepte erarbeitet, von jenen schlussendlich vier konkrete Vorschläge, welche im Folgenden zu sehen sind, zur Evaluierung bereitstanden:

### 4.2.1 Designidee Michael Bäuchler

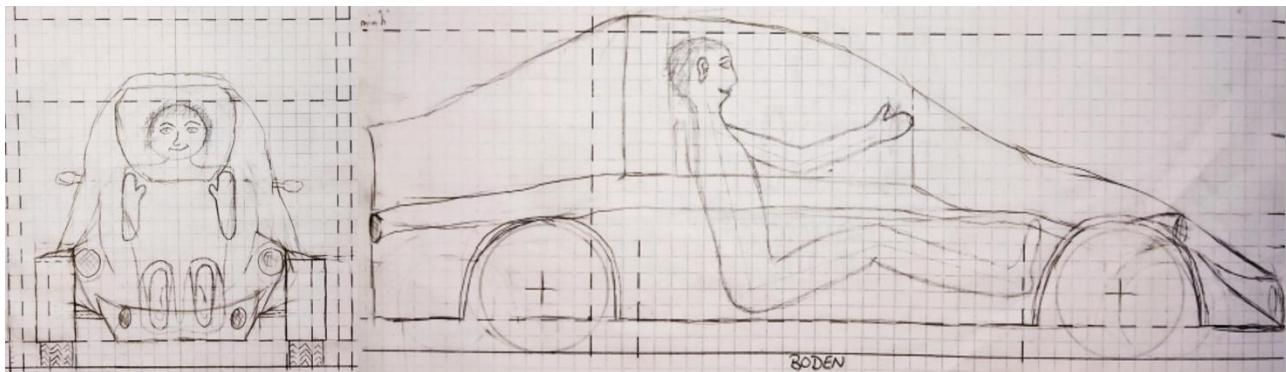


Abbildung 4-2 Designidee Bäuchler Michael

### 4.2.2 Designidee Alexander Ploy

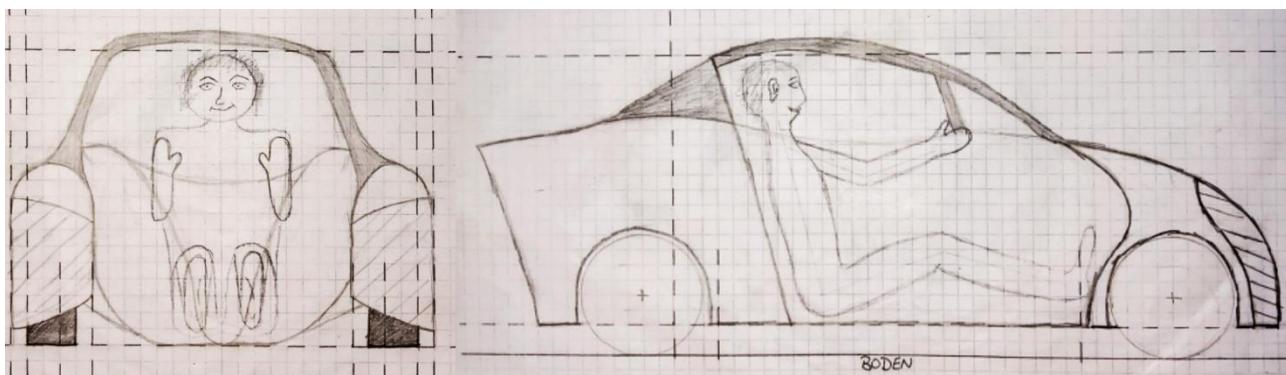


Abbildung 4-3 Designidee Ploy Alexander



#### 4.2.3 Designidee Vanessa Pugl-Pichler

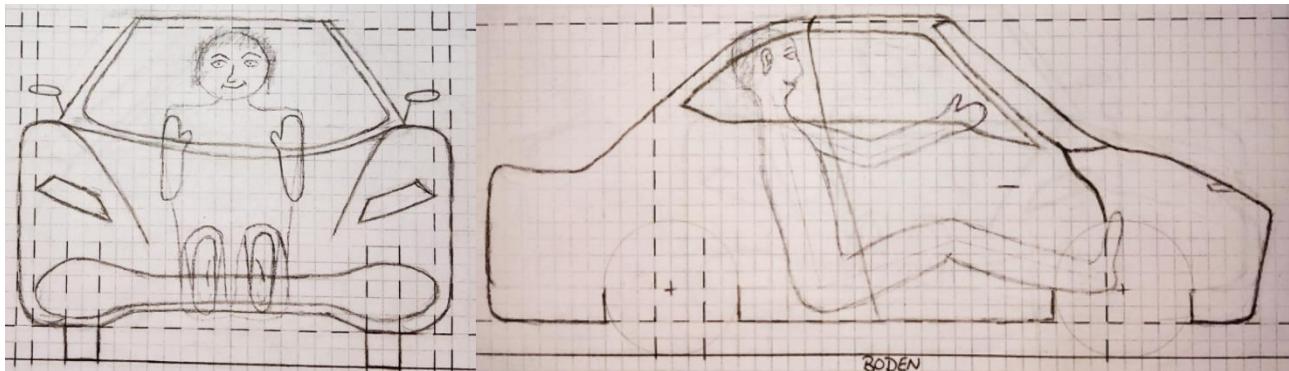


Abbildung 4-4 Designidee Pugl-Pichler Vanessa

#### 4.2.4 Designidee Paul Sommer

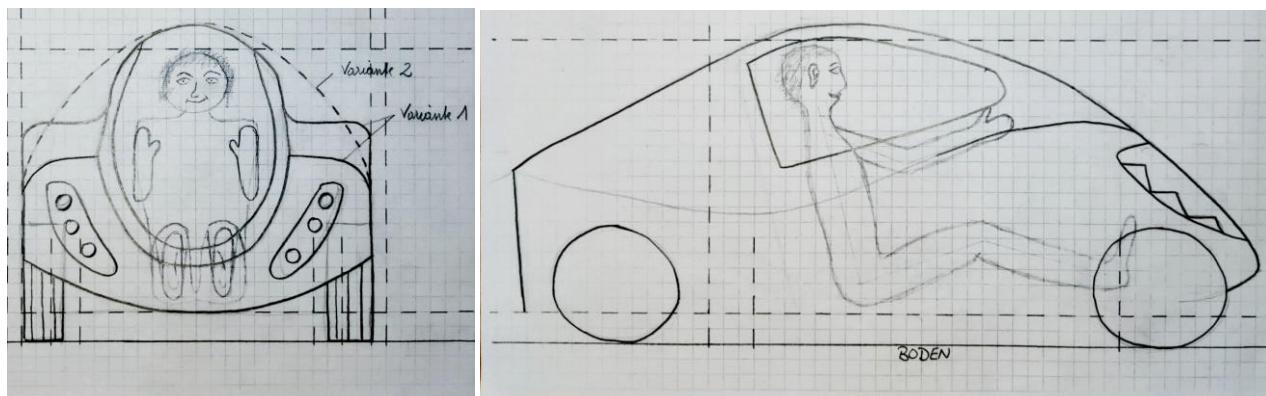


Abbildung 4-5 Designidee Sommer Paul

### 4.3 Digitalisierung der Designideen

Aus sechs Personen (die damaligen Mitglieder des Scorpion-Teams) wurden nun zwei Gruppen gebildet, die nun die Aufgabe hatten, diese Designs digital zu verwirklichen und weiter zu verfeinern. Hierzu wurde die kostenlose Version des Konstruktionsprogrammes „Autodesk Fusion 360<sup>24</sup>“ verwendet, da dieses Programm für Freiformkonstruktion geeignet ist und somit optimale Voraussetzungen für das Erstellen eines 3D-Designs eines Autos bietet.

<sup>24</sup> Autodesk, 2022



#### 4.3.1 Designentwurf 1

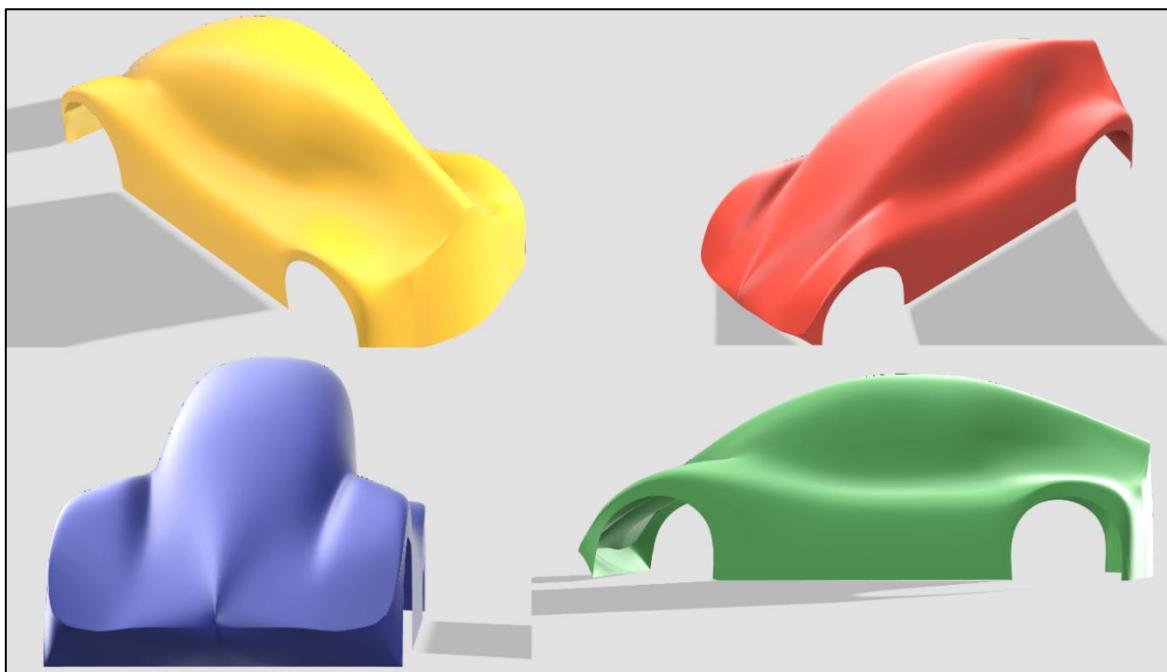


Abbildung 4-6 Designentwurf 1

Bei diesem Designentwurf war die Grundidee, gleich wie beim dritten Designentwurf, eine durchgezogene Seitenlinie des Fahrzeugs, ohne Krümmungsänderungen. Direkt an diesem Beispiel ist dies durch eine, im Rennsport sogenannte, „Shark Fin“ gewährleistet. Weiters würde dies Platz für den erforderlichen Stauraum bieten. Die Front dieses Designs versucht eine Gleichmäßigkeit der Steilheit der angeströmten Fläche zu erzeugen, was an den, im Vergleich zur Motorhaube, niedrig wirkenden Kotflügeln zu erkennen ist. Weiters ist hierbei erkennbar, dass es eine Grundidee dieses Designs ist, die Sitzposition des Fahrers möglichst weit nach vorne zu legen.



#### 4.3.2 Designentwurf 2

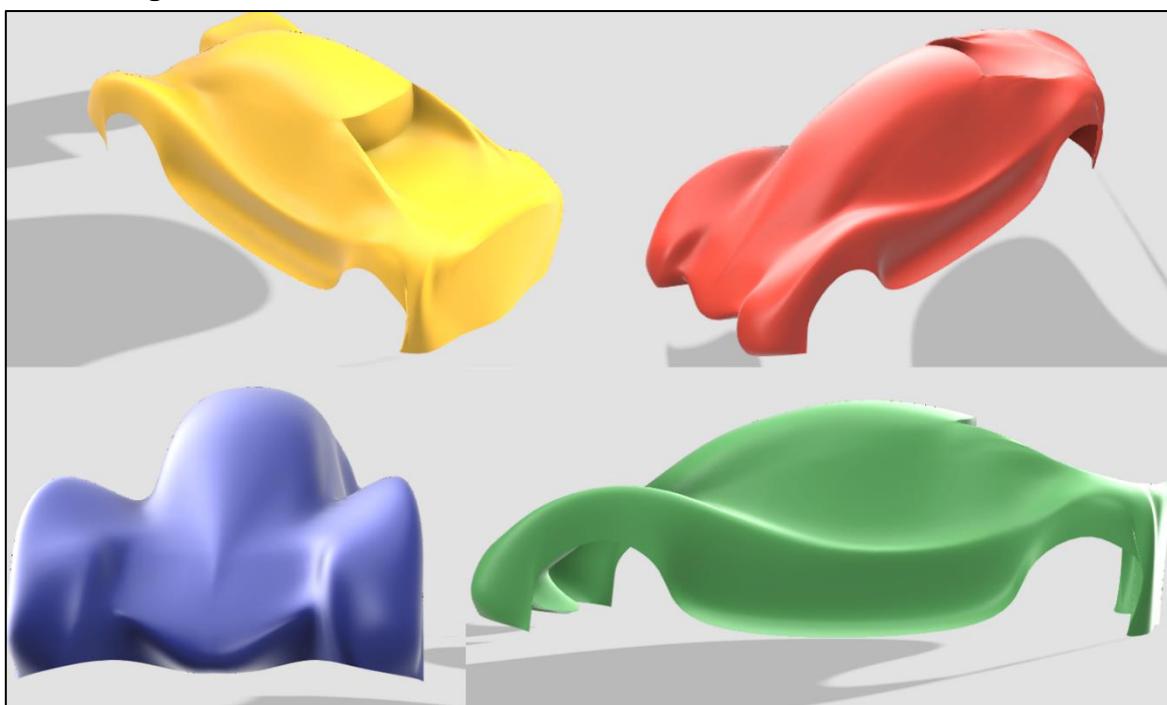


Abbildung 4-7 Designentwurf 2

Bei diesem Designentwurf wird versucht, unter anderem durch Ausnutzen des maximalen Radstandes, der minimalen Fahrzeughöhe sowie der Bodenfreiheit und das Hochziehen der Radkästen, ein möglichst sportliches und rennfahrzeugtypisches Design zu generieren. Auffällig allerdings ist, dass sich auf der Rückseite des Fahrzeuges (hinter der Trennwand zur Fahrgastzelle) eine Abrisskante befindet, welche ein zentrales Designelement darstellen und die Chassiskonstruktion weiter betonen soll.

### 4.3.3 Designentwurf 3

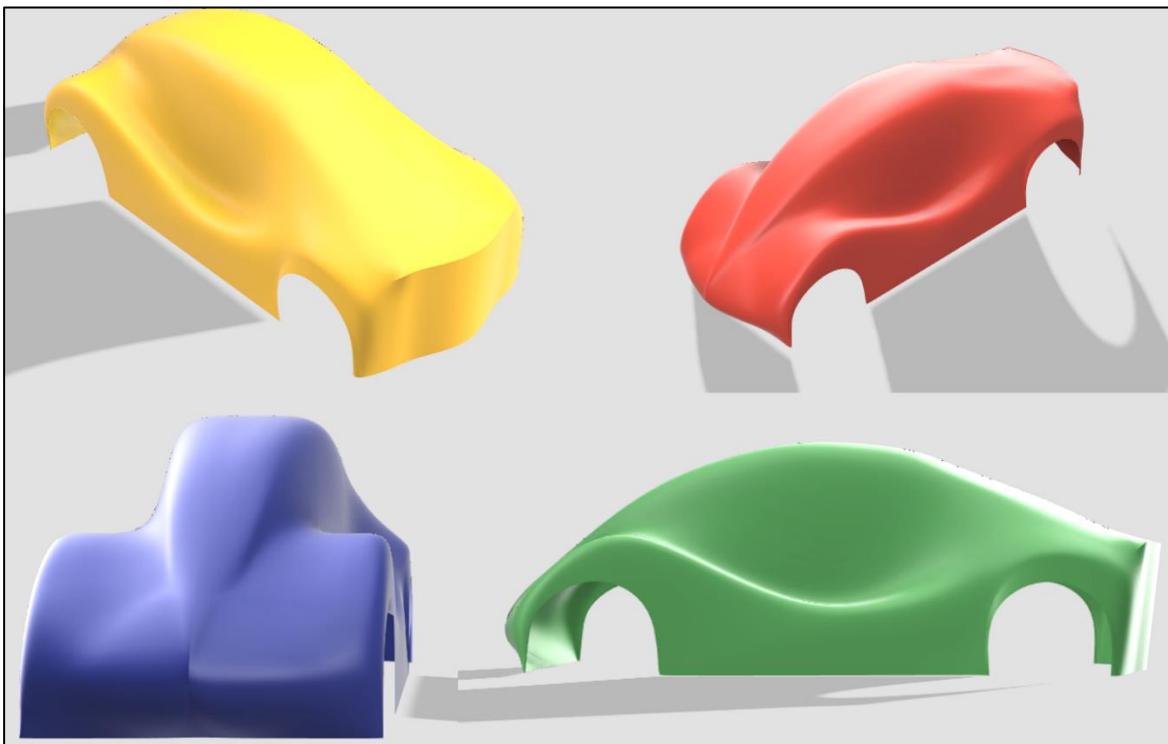


Abbildung 4-8 Designentwurf 3

Dieser Designentwurf basiert im Grundlegenden auf der ersten Designidee wobei hierbei die sog. „Shark Fin“ entfällt und die Sitzposition des Fahrers noch extremer nach vorne gerückt wird. Die Radkästen müssen dazu noch steiler nach oben gezogen werden, da innerhalb eines kürzeren Fahrzeuglängensegmentes die Mindesthöhe des Fahrzeuges erreicht werden sowie Platz für den Fahrer geschaffen werden muss. Dementsprechend fällt die Seitenlinie der Radkästen deutlich steiler ab und die Seitenkästen fallen weitaus voluminöser aus.

#### 4.3.4 Designentwurf 4



Abbildung 4-9 Designentwurf 4

Bei diesem Designentwurf wurde sehr stark auf die sportlichen und konturbetonenden Linien des Fahrzeuges geachtet. Da dies eines feinen Konstruktionsnetzes bedurfte, waren einige Konturen im Rendering schwer widerzuspiegeln. Die Radkästen sind das am stärksten betonte Designelement, welches sich deutlich stärker vom Anstieg der „Motorhaube“ und der Windschutzscheibe abhebt. Die Linienführung des Seitenkastens soll durch den flüssigen Übergang in den Heckradkasten außerdem die sportlich-aerodynamische Optik der Seitenlinienführung betonen.

### 4.4 Finalisierung des Designs

Im letzten Schritt stellten alle drei Verfasser dieser Diplomarbeit in gemeinsamer Arbeit das Design, auf Basis der soeben genannten Designentwürfe fertig und verfeinerten es (auch bzgl. Sauberkeit der Konstruktion). Zusätzlich wurden bereits Designelemente wie Scheinwerfen und Rücklichter, oder auch funktionelle Bereiche wie die Windschutzscheibe, die Seitenfenster und die Kofferraumhaube in das Design eingefügt. Allerdings wurde beim Designen der Fahrzeugaußenhaut bewusst wenig Rücksicht auf die praktische Umsetzung genommen, da dies die Kreativität einschränken würde. Schlussendlich ergab sich folgendes finalisiertes Design:



Abbildung 4-10 Finalisiertes Design 1

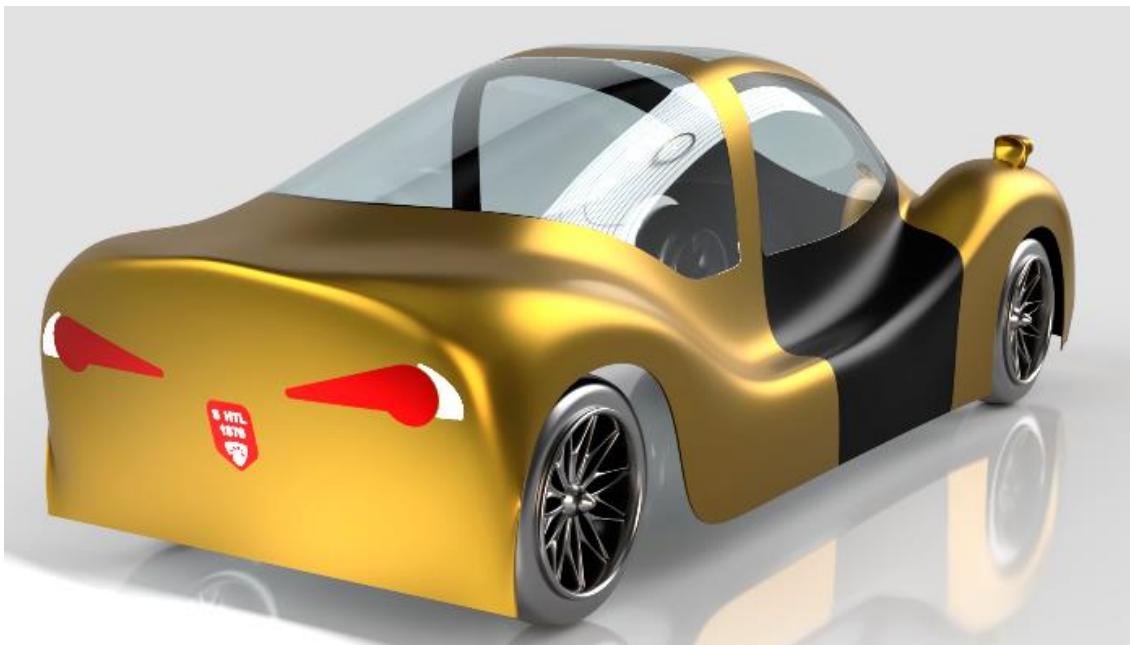


Abbildung 4-11 Finalisiertes Design 2

Hierbei ist zu erkennen, dass die experimentellen Ideen wie zum Beispiel die „Shark Fin“ oder die Abrisskante direkt hinter der Fahrgastzelle verworfen worden waren. Einerseits hatte dies optische Gründe, andererseits stellte sich, trotz der geringen Rücksichtnahme auf das Design, die Frage der Umsetzung, wodurch man sich, relativ schnell, einstimmig gegen diese beiden Elemente entschieden hatte. Andere Designelemente wie beispielweise die in einem Radius, (fast) ohne Gegenkrümmung durchgezogene Seitenlinie, sowie die extra hochgezogenen Radkästen sind direkt übernommen worden. Dies hatte im Falle der Radkästen auch Gründe der Scheinwerferplatzierung. Auf diesen Radkästen können nun auch die erforderlichen Rückspiegel angebracht werden.



## 5 Strömungssimulation

Die Strömungsgleichungen haben nur für einfachste Anwendungen wie die ebene Platte oder die Zylinderumströmung theoretische Lösungen. Nur für diese Spezialfälle können die Drücke, Geschwindigkeiten und Temperaturen analytisch berechnet werden. Numerische Lösungsmethoden helfen hier, wie auch in der Festigkeitsberechnung, diese Nachteile zu überwinden. Durch die Entwicklung von leistungsfähigen Computern lassen sich die Strömungsgleichungen numerisch lösen und reale Probleme aus der Praxis können genau, schnell und kostengünstig berechnet werden.<sup>25</sup>

### 5.1 Zielsetzung

Das Design des Scorpions verfolgt vor allem das Ziel, Basis für ein effizientes Fahrzeug zu sein, welches mit minimalen Energiekonsum eine maximale Strecke zurücklegen kann. Neben den Verlusten durch mechanische Reibung und elektronische Verluste spielt speziell bei konstanten Geschwindigkeiten die aerodynamischen Verluste eine große Rolle. Um diese Verluste auf ein Minimum zu reduzieren, sind aerodynamische Analysen notwendig, welche Probleme im Design aufzeigen.

Ziel dieser Simulationen ist es mehrere Versionen des finalen Fahrzeugdesigns zu simulieren, um mit den gewonnenen Erkenntnissen in der Konstruktion zu nutzen. Wichtig für die Verluste sind vor allem der  $c_w$ -Wert und die Luftwiderstandskraft bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten.

### 5.2 Grundlagen

#### 5.2.1 Numerische Lösungsmethodik

Grundsätzlich erfährt jeder bewegte Körper in einem Fluid eine Widerstandskraft entgegen der Bewegungsrichtung. Diese Widerstandskraft ist durch die Arten der Strömung bestimmt, welche sich aufgrund der Bauteilgeometrie bilden. Grundlage für die numerische Strömungsmechanik ist die Einhaltung von fünf grundlegenden Erhaltungsgleichungen:

- Massenerhaltung
- Impulserhaltung in x-Richtung
- Impulserhaltung in y-Richtung
- Impulserhaltung in z-Richtung
- Energieerhaltung

Da die Herleitung dieser fünf Erhaltungsgleichungen sehr umfassendes thermodynamisches Wissen benötigt, wird auf diese nicht weiter eingegangen.<sup>26</sup>

<sup>25</sup> Lecheler, 2018 S.2

<sup>26</sup> vgl.: Lecheler, 2018 S.10-20

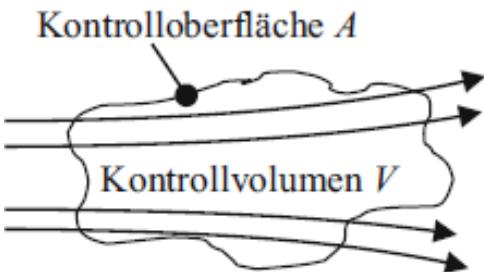


Abbildung 5-1 Lösungsmethode Simulationselement Prinzip

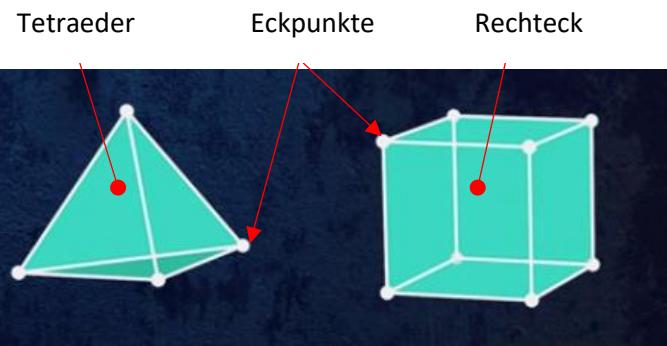


Abbildung 5-2 numerische Lösungsmethode Volumens Elemente<sup>27</sup>

Diese Gleichungen werden anhand einer finiten Menge von Volumens Elementen gelöst, welche den Körper mit geometrisch einfachen Formen (Tetraedern; Rechtecken) unterteilen. Dieser Prozess wird als Diskretion des Körpers bezeichnet, die Summe aller Körper und Eckpunkte als Netz. (engl. Mesh) An den Flächen der einzelnen Elemente können alle Erhaltungsgleichungen gelöst werden. Durch diese Methode müssen die Erhaltungsgleichungen nicht indiskret im gesamten Körper gelöst werden, sondern können anhand einer finiten Menge von Volumen berechnet werden.

### 5.2.2 Navier Stokes Gleichungen<sup>28</sup>

Zusammengefasst können alle Erhaltungsgleichungen jedoch in Form der Navier-Stokes-Gleichungen gelöst werden. Um die Navier-Stokes Gleichungen für ein CFD Programm mathematisch einfacher lösbar zu machen, werden diese oft wie folgt in Matrixform mithilfe der Divergenz angeschrieben:

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad \vec{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} \quad \vec{\nabla} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

Ableitung nach allen Raumdimensionen

Spannungen in allen Raumdimensionen als Matrix (Normalspannung auf Fläche; Schubspannung in Komponentenform)

Geschwindigkeitsvektor  $\vec{u}$  Gravitationsvektor  $\vec{g}$  Divergenz  $\vec{\Delta}$   
Einheitsmatrix  $I$  Spannungsmatrix  $\tau$

#### 5.2.2.1 Massenerhaltung:

Die Masseerhaltungsgleichung wird beschrieben durch:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = 0$$

Änderung der Dichte über die Zeit

Änderung des Massestromes in allen drei Raumdimensionen (Matrix der Masseströme [Dichte x Geschwindigkeit] wird nach der Raumdimension mittels der Divergenz abgeleitet)

<sup>27</sup> Engineer, 2021

<sup>28</sup>vgl.: Lecheler, 2018 S. 20-25



### 5.2.2.2 Impulsgleichungen:

Der Impulsstrom, welcher auf ein Volumens Element wirkt, muss sich aus der Kraft sowie der Masse  $\rho$  der Beschleunigung, welche in einer bestimmten Raumdimensionen wirken entsprechen. Die Kraft besteht dabei aus dem Druck, welcher auf das Element wirkt, der Spannung, welche in allen Achsen auf das Element wirkt, sowie der Gravitation, welche ebenfalls auf das Fluid wirkt, zusammen. Die Beschleunigung muss dabei in alle Komponenten zerlegt werden und entspricht der vollständigen Ableitung aller Geschwindigkeitskomponenten nach der Zeit sowie nach allen Raumdimensionen.

$$\vec{a} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \cdot \vec{u} \otimes \vec{u}) + (\vec{F} - p \cdot I - \tau) = \rho \cdot \vec{g}$$

Ableitung der Geschwindigkeitskomponenten nach der Zeit (mit Dichte Volumens bezogener Impuls nach der Zeit)

Ableitung der Geschwindigkeitskomponenten nach alle Raumdimensionen (mit Dichte Volumens bezogener Impuls nach der Zeit)

Kraft welche auf das Element wirkt zerlegt in Spannungs, Druck und Gravitations-komponente (Gravitationsrichtung durch  $\vec{g}$ ; Druck Einheitlich durch  $I$ ; Spannung in allen Dimensionen)

### 5.2.2.3 Energiegleichung:

Die Energie, welche sich in einem speziellen Volumens Element befindet, muss immer konstant bleiben. Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik für ein geschlossenes System ohne Massentransfer wird das System von drei Größen bestimmt:

- Die Summe aus kinetische, sowie innere Energie, welche nach allen Raumdimensionen sowie der Zeit abgeleitet werden muss.
  - Der Wärmestrom welcher dem Element in allen Raumdimensionen zu-/abgeführt wird.
  - Die Leistung  $\dot{W}$  in Richtung der Komponente, welche dem Produkt aus Geschwindigkeitskomponente in der jeweiligen Kraftrichtung und der Summe aus Oberflächen und inneren Kräfte entspricht. Die Summe der Kräfte kann, wie schon beim Impulssatz gezeigt, in eine Druck-, Spannungs- und Gravitationskomponente zerlegt werden.
- Durch Umstellen der Gleichung ist es möglich, dass der Druckterm durch Einsetzen der Enthalpie wegfällt.

$$\vec{E}_{ges} = \vec{E}_{kin} + \vec{E}_I$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \cdot \left( e + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2 \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot \left[ \rho \cdot \vec{u} \cdot \left( h + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2 \right) - \tau \cdot \vec{u} - \lambda \cdot \vec{\nabla} T \right] = \rho \cdot \vec{g} \cdot \vec{u}$$

$$\dot{W} = \vec{F} * \vec{u}$$



Da die Rechenzeiten, welche zur Lösung der vollständigen Navier-Stokes Gleichungen notwendig wären, zu hoch sind, wird in der Praxis mit Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen gerechnet. Diese Rechenmodelle nutzen zur Berechnung von schwierig zu bestimmenden hochfrequenten Turbulenzen Turbulenzmodelle, welche den Rechenaufwand stark reduzieren, jedoch nach wie vor sehr nah an die reellen Gegebenheiten herankommen. Im Programm werden Turbulenzen, welche auftreten durch sogenannte Reynoldsspannungen ersetzt, welche in weiterer Folge mittels Turbulenzmodelle gelöst werden.

Formel unterscheiden sich die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen jedoch kaum von den vollständigen Gleichungen, die Vereinfachung ist vor allem in den mathematischen Details zu finden.<sup>29</sup>

### 5.2.3 Anwendung

numerische Strömungsanalysen finden heutzutage in den Unterschiedlichsten Branchen Anwendungsfelder. Neben der klassischen Berechnung von Luftwiderstandskräften bzw. Strömungen um ein Fahrzeug (Rad; PKW; Rennwagen; LKW usw.) können CFD Programme für eine Vielzahl von Anwendung verwendet werden:

- Verbrennungsmotoren:  
Durch CFD Analysen können die Strömungseigenschaften des in den Brennraum eingesetzten Gases bestimmt werden, so können Ventilsteuzeiten Einspritzintervalle sowie Verbrennungsraum Geometrien optimiert werden.
- Lärmemission:  
Mittlerweile werden CFD Programme ebenfalls verstärkt zur Berechnung von der Ausbreitung von Lärm genutzt, was die Lärmemission ausgelöst durch Luftverwirbelungen berechenbar macht.
- Hydromechanik:  
In der Hydromechanik werden CFD Analysen unter anderem zur Berechnung von Turbinen Pumpen und Krümmern verwendet um Bauteile optimieren zu können.
- thermische Turbomaschinen:  
Turbulenzen und Strömungseigenschaften haben einen sehr großen Einfluss auf pneumatische Turbinen Verdichter usw. welche durch numerische Analysen berechnet werden können.
- Gebäudebau:  
Auch Gebäude, welche eine komplexe Geometrie aufweisen werden aerodynamisch berechnet, um Belastungen durch unterschiedliche Windstärken berechnen zu können.
- Luftfahrt:  
Speziell in der Luftfahrt sind CFD Berechnungen zentral um Eigenschaften von unterschiedlichen Flieger Geometrien bestimmen und optimieren zu können.

<sup>29</sup> vgl.: Lecheler, 2018 S 33



## 5.2.4 Grundlegende Formeln

### 5.2.4.1 Strömungswiderstandskoeffizient ( $c_w$ -Wert)

Der Strömungswiderstandskoeffizient, Widerstandsbeiwert, Widerstandskoeffizient, Stirnwiderstand oder  $c_w$ -Wert ist ein dimensionsloses Maß (Koeffizient) für den Strömungswiderstand eines von einem Fluid umströmten Körpers.<sup>30</sup>

Der  $c_w$ -Wert ist ein, von der Reynolds Zahl und damit von Turbulenzverhalten abhängiger Wert, welcher quantifiziert wie Strömungseffizient (ugs. Windschlüpfig) ein Körper ist. Er ist über die Luftwiderstandskraft, den auftretenden Staudruck und die projizierende Fläche des untersuchten Körpers definiert:

$$c_w = \frac{F_w}{p_{stau} * A_{proj}} = \frac{2 * F_w}{\rho_{Fluid} * A_{proj} * v^2} [-]$$

$F_w$ ..... Widerstandskraft [N]

$p_{stau}$ .... Staudruck [Pa]

$A_{proj}$ ... projizierende Fläche [ $m^2$ ]

$v$ ..... Anströmgeschwindigkeit [m/s]

$\rho_{Fluid}$ .. Dichte des Fluids [ $kg/m^3$ ]

### 5.2.4.2 Dichte eines Fluids

In aerodynamischen Berechnungen werden Gase als ideale Gase angenommen, da die Vereinfachungen das Ergebnis nicht negativ beeinflusst, solange das Verhalten des Fluids als gesamtes betrachtet wird und nicht die einzelnen Teilchen, welches dieses ausmachen. In einem idealen Gas werden die einzelnen Gasteilchen als Massenpunkte angenommen, welche kein Volumen einnehmen und weder rotieren noch vibrieren. Jedes Teilchen besitzt so nur eine translatorische Bewegung im Raum und Anziehung/Abstoßung zwischen den Teilchen werden vernachlässigt.<sup>31</sup>

Der Zustand des Fluids kann durch diese Annahmen jederzeit durch die allgemeine Gasgleichung beschrieben werden, welche in der folgenden Berechnung genutzt wird, um die Dichte des Fluids in Abhängigkeit von der Temperatur sowie des Drucks zu berechnen.

$$p * V = n * R * T$$

$\rho_{Fluid}$ ... Dichte des Fluids [ $kg/m^3$ ]

$p$ ..... Druck im Fluid [Pa]

$$p * V = m * R_s * T$$

$V$ ..... Volumen des Fluids [ $m^3$ ]

$$p * v = R_s * T \Rightarrow \rho_{Fluid} = \frac{p}{R_s * T} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$n$ ..... Stoffmenge [mol]

$R$ ..... allgemeine Gaskonstante [ $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$R_s$ ..... spezifische Gaskonstante [Luft =  $287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]

### 5.2.4.3 kalorischen Zustandsgleichungen

$T$ ..... Temperatur [K]

Die kalorischen Zustandsgleichungen koppeln die spezifische innere Energie und die spezifische Enthalpie  $h$  mit der Temperatur  $T$ . Für ein ideales Gas lautet sie mit  $c_v$  als spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen und  $c_p$  als spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck:

$de$ ..... innere Energie [J/kg]

$$de = c_v * dT$$

$dh$ ..... Enthalpie [J/kg]

$$dh = c_p * dT$$

$c_v / c_p$ ..... spezifische Wärmekapazität konst. Volumen/Druck [J/kgK]

$dT$ ..... Temperatur [K]

<sup>30</sup> Strömungswiderstandskoeffizient, 2022

<sup>31</sup> Gas, 2022



## 5.2.5 Ansys CFX

In der folgenden Berechnung wird das Workbench basiertes Programm Ansys Workbench 2021 verwendet. Innerhalb von Ansys Workbench wird Ansys CFX verwendet, welches in der Industrie vorrangig für die Simulation von Abgasturboladern benutzt wird.<sup>32</sup>

Die Struktur eines vollständigen CFX Programms wird jeweils in fünf Unterprogramme unterteilt, welche die einzelnen Schritte einer CFD Simulation darstellen, welche jeweils die Daten von dem übergeordneten Programm bekommen, mit welchen Sie arbeiten:

- Geometrie:

Die Geometrie, welche für die Simulation verwendet wird, kann entweder als STEP Datei hinterlegt sein oder mittels einer Verknüpfung mit einem CAD Programm (z.B. Creo Parametrik) zur Verfügung gestellt werden. Das Modell wird in Ansys SpaceClaim importiert, in welchem die Positionierung festgelegt und rudimentäre Änderungen am Modell vorgenommen werden können.

- Netz:

Die zu simulierende Geometrie wird wie in 5.2.1 beschrieben in eine finite Menge an Elementen unterteilt. Die Eigenschaften eines generierten Netzes können innerhalb des CFX PrePost Programms angepasst werden, um so die Qualität des Netzes zu verbessern. Außerdem werden für die Simulation essenzielle Geometrien, wie der Ein-/Auslass, die Körperoberfläche oder Wandoberflächen definiert.

- Setup:

Im Setup wird die Simulation vorbereitet. Es werden die Anfangsbedingungen für die Berechnung (Masestrom; Fluid; Temperatur usw.) festgelegt, den vorher definierten Geometrien werden Eigenschaften zugewiesen (Einlass; Auslass; Reibungslose Wände (Grenze); Körperoberfläche) und es wird die Simulationsart (stationär; instationär) vorgegeben. Außerdem können Parameter, wie der  $c_w$ -Wert oder die Widerstandskraft, festgelegt werden, welche vom Solver berechnet werden sollen.

- Lösung:

Der Ansys Solver simuliert nach den definierten Ausgangsbedingungen das Verhalten des Fluids. Das Ergebnis wird als Textdokument ausgegeben und bietet eine detaillierte Aufschlüsselung der Simulationsschritte.

- Ergebnis:

Im Post Programm können die aerodynamischen Eigenschaften sichtbar gemacht werden. Druckverläufe, Strömungslinien und Geschwindigkeitsverläufe können beliebig sichtbar gemacht werden.

- Parameter:

Wenn benötigt können Aus-/Eingabeparametersätze definiert werden, wodurch der Effekt eines Parameters (z.B. Geschwindigkeit) auf andere Parameter (z.B.  $c_w$ -Wert; Widerstandskraft) berechnet werden kann.

| A                    |
|----------------------|
| 1  Fluidynamik (CFX) |
| 2  Geometrie ✓ ↗     |
| 3  Netz ✓ ↗          |
| 4  Setup ✓ ↗         |
| 5  Lösung ✓ ↗        |
| 6  Ergebnisse ✓ ↗    |
| 7  Parameter         |

Abbildung 5-3 Aufbau CFX Analyse

<sup>32</sup> Ansys, Inc., 2022

## 5.3 Netzanalyse

### 5.3.1 Vorgehensweise

Mithilfe der Netzanalyse soll ermittelt werden, bei welcher mittleren Größe an Simulationselementen die repräsentativsten Ergebnisse zu erwarten sind. Im Hinblick auf die Berechnungszeit ist es fortteilhaft eine möglichst große Elementgröße zu benutzen, da die Anzahl an zu berechnender Elemente mit der sinkenden Größe exponentiell zunimmt, gleiches gilt in weiterer Folge ebenfalls für die Simulationszeit.

Um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten, wurde die mittlere Elementgröße der Netzelemente als Eingabeparameter definiert. Anschließend wurden mehrere Werte bei jedem vorgegebenen Berechnungspunkt zwischen einer genauen Elementgröße von 1 mm und einer sehr groben Netzgröße von 200 mm berechnet.

Als die wichtigsten Parameter sind hier die Netzqualität, welche wie ähnlich die einzelnen Elemente gemittelt der anzustrebenden grundlegenden Geometrischen Form, in diesem Fall einem Tetraeder, sind, sowie die Standartabweichung von diesem Mittelwert. Der Mittelwert der Netzqualität sollte dabei möglichst nahe an Eins liegen wobei die Standartabweichung möglichst gegen Null gehen sollte. Als Basis für die Netzanalyse wird das in 0 beschriebene Designmodell herangezogen.

### 5.3.2 Ergebnisse

Wie in den folgendem Diagramm sowie der Tabelle klar zu erkennen ist, nimmt die Elementqualität mit steigender Elementgröße ab und die Standartabweichung nimmt proportional zu. Dabei ist wichtig zu betonen, dass bei der Netzqualität ein Wert unter 0,8 keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Daraus folgt, dass eine Elementgröße über 40 mm folglich nichtmehr zulässig wäre. Um einen Kompromiss zwischen Berechnungszeit und Netzqualität zu wählen, wurde für die Simulation ein Netz mit einer mittleren Elementgröße von 20mm gewählt.

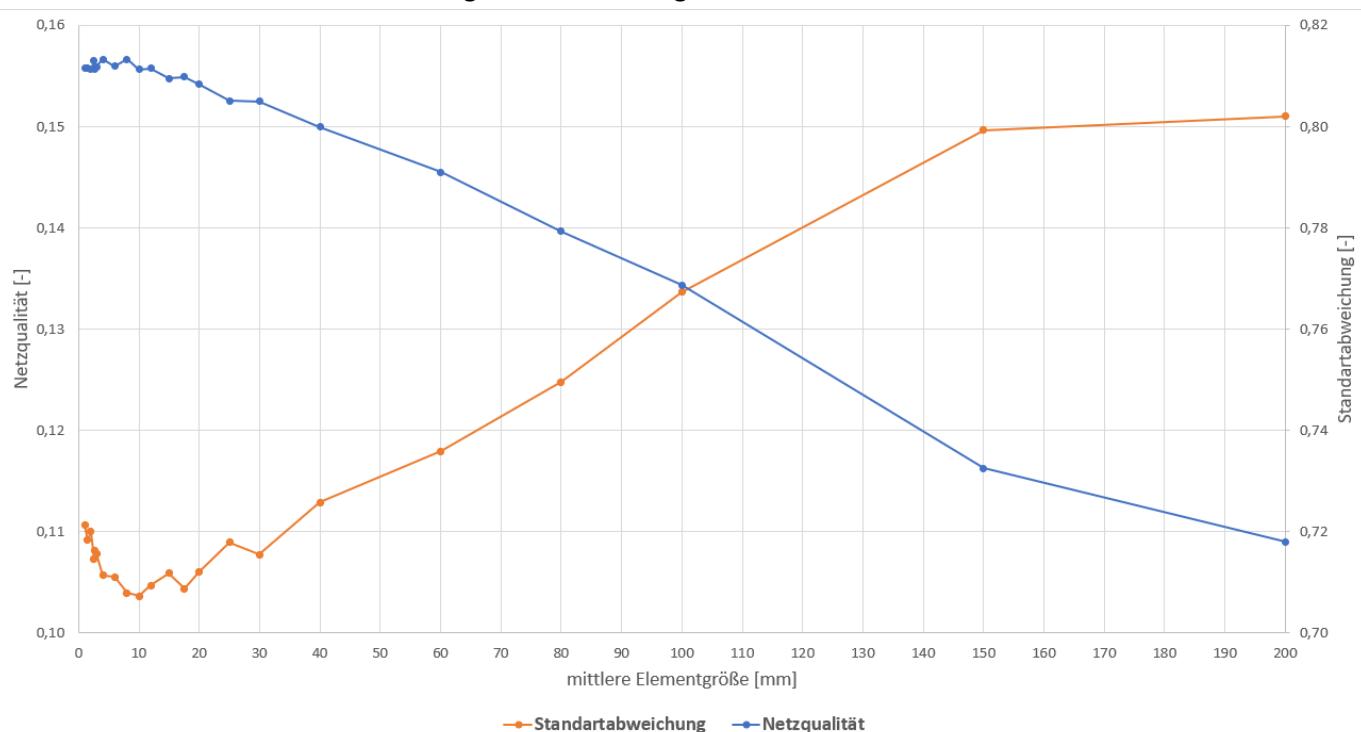


Abbildung 5-4 Ergebnisse Netzanalyse

| mittlere Elementgröße [mm] | Netzqualität Mittelwert | Standartabweichung vom Mittelwert | Anzahl Netznoten | Anzahl Netzelemente |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------|---------------------|
| 1                          | 0,81                    | 0,11                              | 71998            | 368884              |
| 1,5                        | 0,81                    | 0,11                              | 65749            | 340406              |
| 2                          | 0,81                    | 0,11                              | 64113            | 333421              |
| 2,5                        | 0,81                    | 0,11                              | 64013            | 333218              |
| 2,75                       | 0,81                    | 0,11                              | 63413            | 329708              |
| 3                          | 0,81                    | 0,11                              | 62930            | 327559              |
| 4                          | 0,81                    | 0,11                              | 62164            | 323225              |
| 6                          | 0,81                    | 0,11                              | 59302            | 307848              |
| 8                          | 0,81                    | 0,10                              | 52789            | 271832              |
| 10                         | 0,81                    | 0,10                              | 45099            | 230268              |
| 12                         | 0,81                    | 0,10                              | 39665            | 200895              |
| 15                         | 0,81                    | 0,11                              | 33959            | 170153              |
| 17,5                       | 0,81                    | 0,10                              | 30436            | 151979              |
| 20                         | 0,81                    | 0,11                              | 27259            | 135195              |
| 25                         | 0,81                    | 0,11                              | 22642            | 111010              |
| 30                         | 0,80                    | 0,11                              | 19602            | 94907               |
| 40                         | 0,80                    | 0,11                              | 14115            | 66668               |
| 60                         | 0,79                    | 0,12                              | 8666             | 38502               |
| 80                         | 0,78                    | 0,12                              | 5616             | 23476               |
| 100                        | 0,77                    | 0,13                              | 4051             | 16078               |
| 150                        | 0,73                    | 0,15                              | 2082             | 7377                |
| 200                        | 0,72                    | 0,15                              | 1255             | 4104                |

Tabelle 5-1 Netzanalyse Ergebnisse

### 5.3.2.1 Wandfunktion Funktion

Die Y-Plus Funktion, welche auch oft als Wandfunktion bezeichnet wird und ein dimensionsloser Richtwert für die Berechnung des Turbulenzmodells ist, welches für die Berechnung zur Auflösung der Turbulenzen an der Wand der Geometrie verwendet wird, liegt wie in Abbildung 5-5 im Bereich 20 – 120. Bei einem k-epsilon Turbulenzmodell, welches in diesem Fall zur Auflösung der Turbulenzen verwendet wird, liegen diese im Zulässigen Bereich für präzise Ergebnisse.<sup>33</sup>

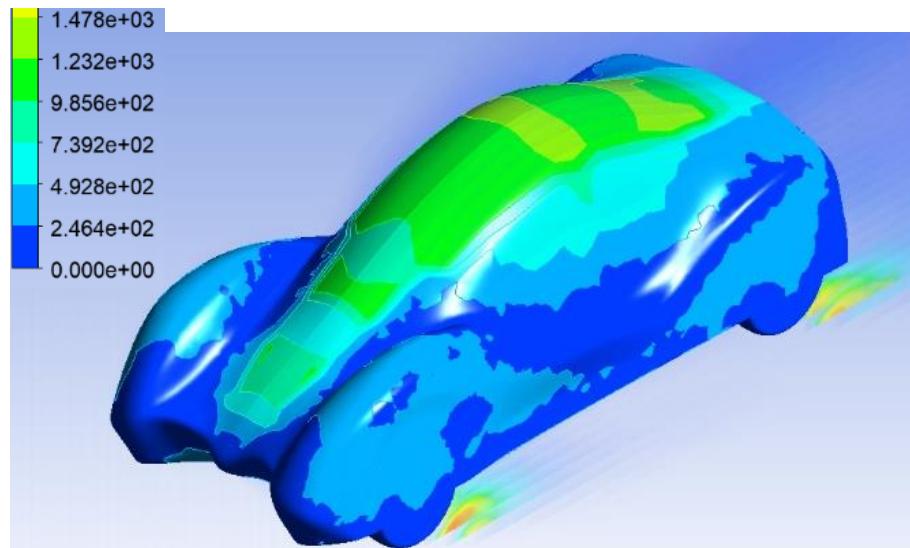


Abbildung 5-5 Y Plus Werte Netzanalyse

<sup>33</sup> Udo Hellwig, 2004

## 5.4 Stationäre Lösung Erstentwurf

### 5.4.1 Zielsetzung

Ziel der aerodynamischen Analyse des Erstentwurfes war es, das Design, welches größtenteils unter optischen Gesichtspunkten entworfen wurde, zu bewerten, um schwerwiegende Fehlerquellen zu korrigieren, bevor das Konzept für das Chassis auf Basis des Designkonzeptes entworfen wurde.

Die Simulation soll also keine Basis für einen Neuentwurf sein, sondern lediglich Grundlage für lokale Änderungen sein.

### 5.4.2 Optische Analyse des Modell

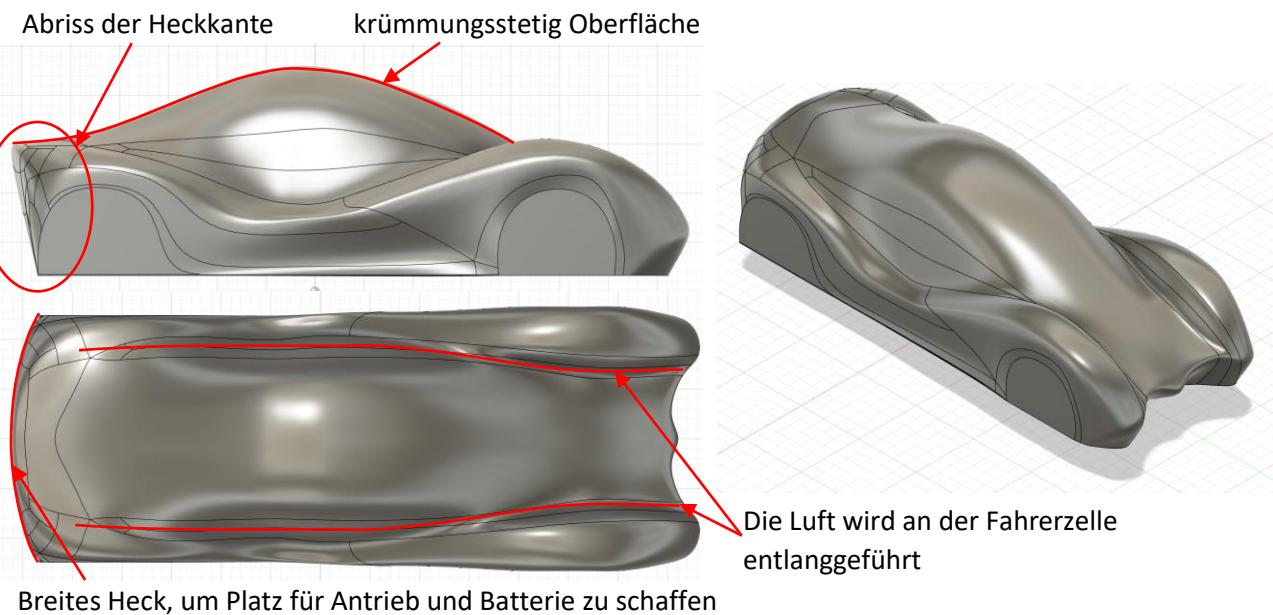


Abbildung 5-6 Optische Analyse erstes Modell

Neben den in 4.4 beschriebenen Faktoren, welche zum finalen Design des Fahrzeugs geführt haben, wurden außerdem folgende aerodynamische Gesichtspunkte (vgl. Abbildung 5-6) berücksichtigt. Diese werden nach Fertigstellung der numerischen Analyse bewertet:

- Krümmungsstetige Oberfläche:  
Im Gegensatz zum bisherigen Design des Scorpions wurde, um aerodynamische Verluste an scharfen Kanten zu vermeiden, beim Neudesign darauf geachtet, die Oberfläche krümmungsstetig zu gestalten. Wichtig zu bedenken ist, dass das Design nicht wie im Programm Fusion in die Realität umgesetzt werden kann, da die wirkliche Geometrie durch das Chassis sowie die Bespannung des Fahrzeug bestimmt ist. (vgl. HTL\_RT\_DA\_2022)
- Fahrerzelle & Radkästen:  
Um einen gleichmäßigen Luftstrom über die Front des Fahrzeugs zu begünstigen, wurde versucht den Querschnitt des Fahrzeugs möglichst minimal zu halten. Außerdem ist ein zentraler Designaspekt, dem Luftstrom eine Möglichkeit zu geben an der Fahrerzelle entlangzuströmen, was durch die abfallende Linie der vorderen Radkästen, welche in das Heck des Fahrzeugs übergeht, möglich wird.



- Abriss der Heckkante:  
Wie schon beim bisherigen Fahrzeug wurde aufgrund von der vom Reglement vorgegebenen Maximallänge des Fahrzeugs, eine Abrisskannte am Heck gewählt. Diese wurde bereits vor der Simulation als die wichtigste Problemzone ausgemacht, da die Kante eine Unterdruckzone und in weiterer Folge Verwirbelungen und aerodynamischen Drag hinter dem Heck des Fahrzeugs generiert.

#### 5.4.3 Parameter und PrePost Einstellungen

Wie Bereits in 5.1 angesprochen besteht das Ziel der Strömungsberechnung vor allem in der Ermittlung der  $c_w$ -Wertes (Aussagekraft über die Strömungseffizienz des Fahrzeugs) und der Luftwiderstandskraft bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten.

Die Geschwindigkeit am Inlet (Front des Fahrzeuges) wird also als Eingabeparameter eingestellt, wodurch 8 Simulationspunkte bei folgenden Geschwindigkeiten berechnet werden können: [5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 20; 22,5; 25] m/s

Die Widerstandskomponente in Fahrtrichtung kann direkt ausgelesen werden und der  $c_w$ -Wert wird nach der in 5.2.4 beschriebenen Formeln berechnet.

#### 5.4.4 Ergebnis

Wie in der Tabelle/Diagramm sichtbar wird, ist der  $c_w$ -Wert wie zu erwarten über den gesamten Geschwindigkeitsbereich annähernd konstant mit 0,43 im Durchschnitt. Die Widerstandskraft, welche auf das Fahrzeug wirkt, steigt ebenfalls mit dem Quadrat der Geschwindigkeit an und kann annäherungsweise mit einer Polynomfunktion 2. Ordnung beschrieben werden, welche zu den berechneten Punkten ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9999935$  besitzt, also nahezu perfekt den Verlauf beschreibt.

| Simulationspunkt | $V_{\text{Inlet}}$<br>[m s <sup>-1</sup> ] | $c_w$ [-] | Widerstandskraft [N] |
|------------------|--|-----------|----------------------|
| SP 0             | 5  | 0,457     | 8,2                  |
| SP 1             | 7,5  | 0,447     | 18,8                 |
| SP 2             | 10   | 0,440     | 32,0                 |
| SP 3             | 12,5                                       | 0,435     | 49,4                 |
| SP 4             | 15   | 0,432     | 70,7                 |
| SP 5             | 17,5                                       | 0,429     | 95,6                 |
| SP 6             | 20   | 0,427     | 124,2                |
| SP 7             | 22,5                                       | 0,425     | 156,5                |
| SP 8             | 25   | 0,423     | 192,5                |

Tabelle 5-2 Ergebnis stationäre Lösung Erstentwurf

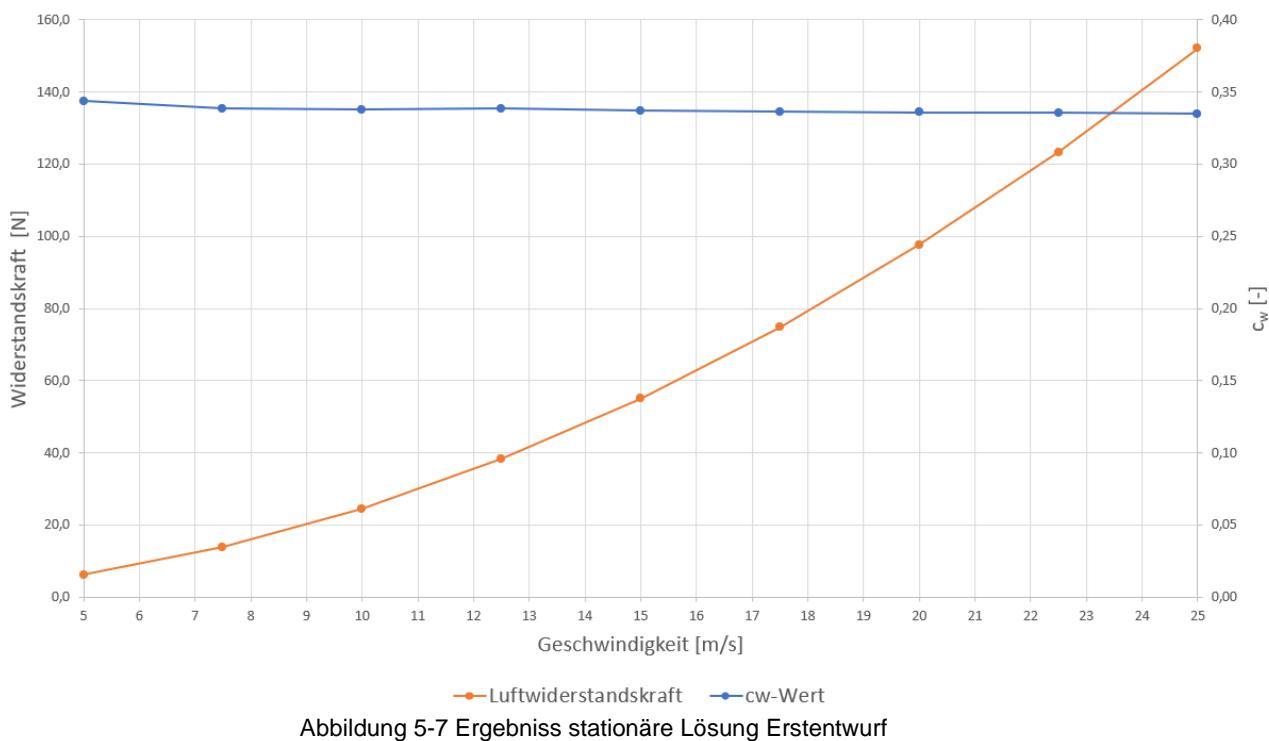


Abbildung 5-7 Ergebniss stationäre Lösung Erstentwurf

#### 5.4.5 Bewertung der Analyse

Bei einer genaueren Analyse zeigt sich, dass über die gesamte Fahrzeuggeometrie keine überraschenden Über-/Unterdruckzonen auftreten und das sich der Strom des Fluids nicht, oder nur minimal von der Fahrzeugoberfläche ablöst. Die Form der Fahrerzelle sowie die Linie der Radkästen erzeugen daher den gewünschten Effekt. Wie vorhergesehen bildet sich jedoch hinter dem Heck des Fahrzeugs eine Zone, in welcher sich eine Unterdruckzone ausbildet (Druckunterschied zum Inlet ca. 34 Pa) und zu einem Ablösen des Luftstroms kommt, was zur Folge hat das sich Verwirbelungen hinter der Abrisskante bilden. Diese haben wie in der Abbildung 5-7 einen Anstieg der Wirbelviskosität als Effekt, welche ein Maß für die Turbulenzen in diesem Bereich ist. Durch die Geschwindigkeitsvektoren, welche in Abbildung 5-8 visualisiert sind werden diese Verwirbelungen sehr schön grafisch sichtbar gemacht. An dieser Stelle ist wichtig zu beachten, dass sich die stärkere Abrundung an den Ecken der Fahrzeugheckfläche bemerkbar macht, an welcher der Luftstrom signifikant besser haften kann, wodurch in dieser Region deutlich weniger Verwirbelungen entstehen. Daher bilden sich 3 klar erkennbare Unterdruckzonen aus.

Dieser Effekt wird von zwei Hauptfaktoren ausgelöst, welche im weiteren Konstruktionsprozess beachtet werden müssen:

- Größere Abrundung der Abrisskante:  
Eine scharfe Abrisskante hat zur Folge, dass sich der Luftstrom früher und stärker von der Geometrie der Verkleidung ablöst, da diese plötzlich wegbricht. Dieser Effekt kann durch eine Vergrößerung des Radius gemindert werden.
- Verkleinerung der Heckfläche:  
Wenn sich das Fahrzeug durch den Raum bewegt, entsteht auf natürliche Weise hinter dem Heck eine Zone, in welcher weniger Luft vorhanden ist. Diese Unterdruckzone hat einen Luftstrom zur Folge. Um den Sog, den dieser Strom auf das Fahrzeug ausübt zu minimieren ist es zielführend die Fläche des Hecks möglichst zu minimieren.

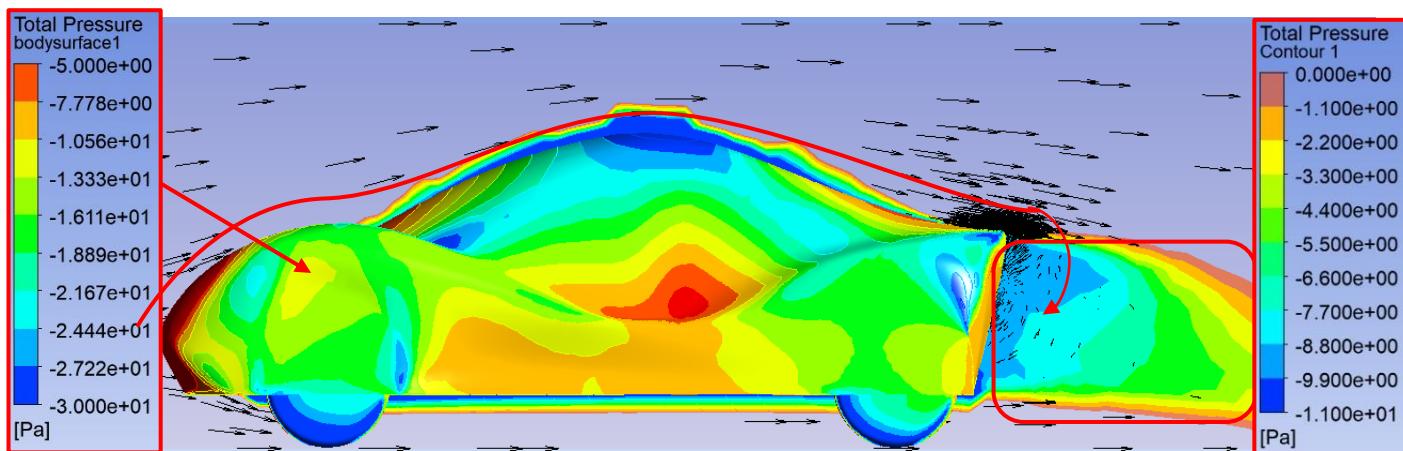


Abbildung 5-9 Aufriss Erstentwurf Druckkontur

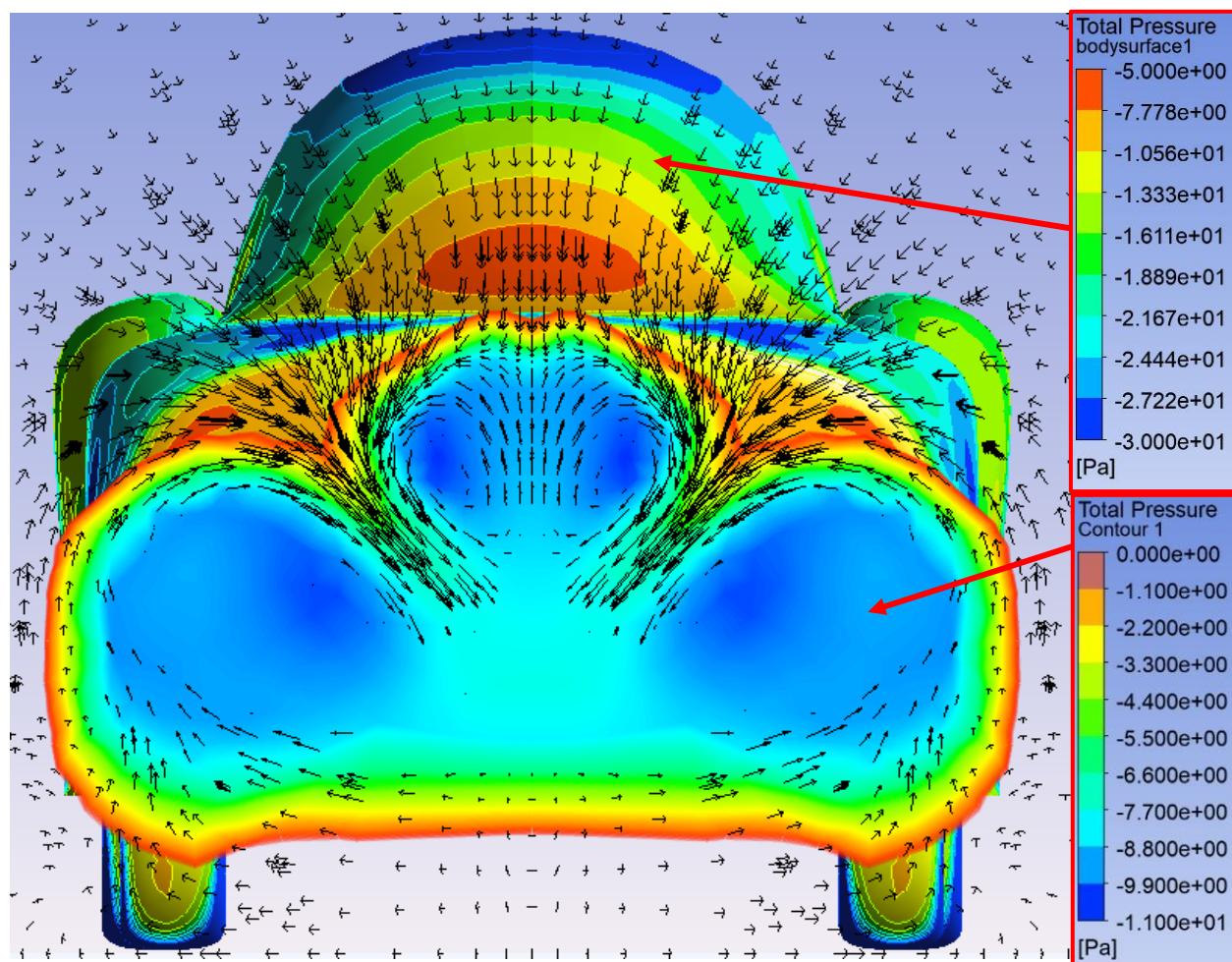


Abbildung 5-8 Ebene 0,3 m hinter dem Heck des Fahrzeugs Erstentwurf Druck

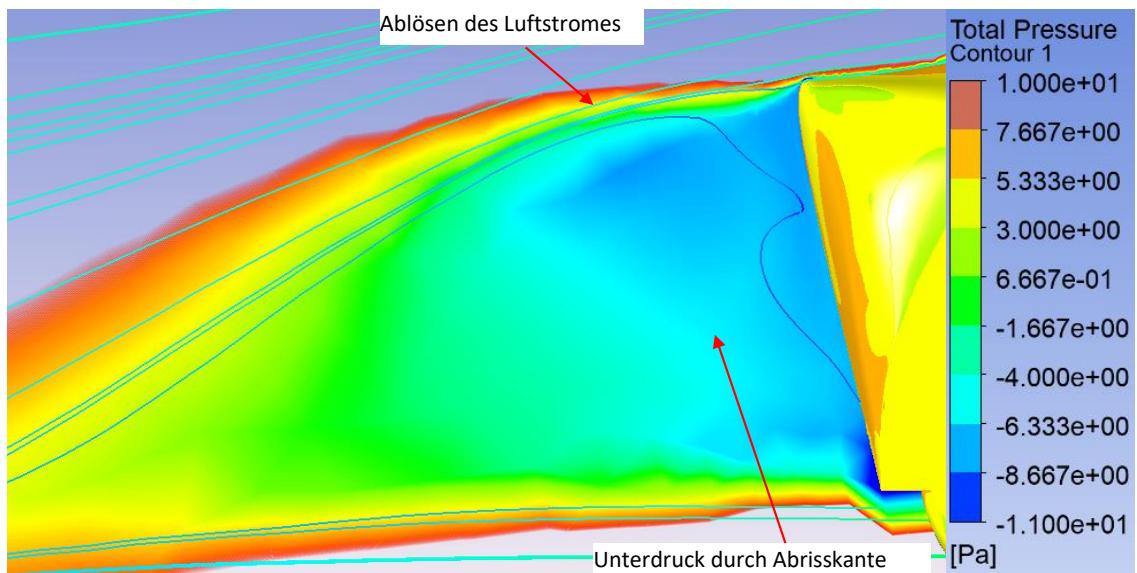


Abbildung 5-10 Abrisskante Heck Detail Druck

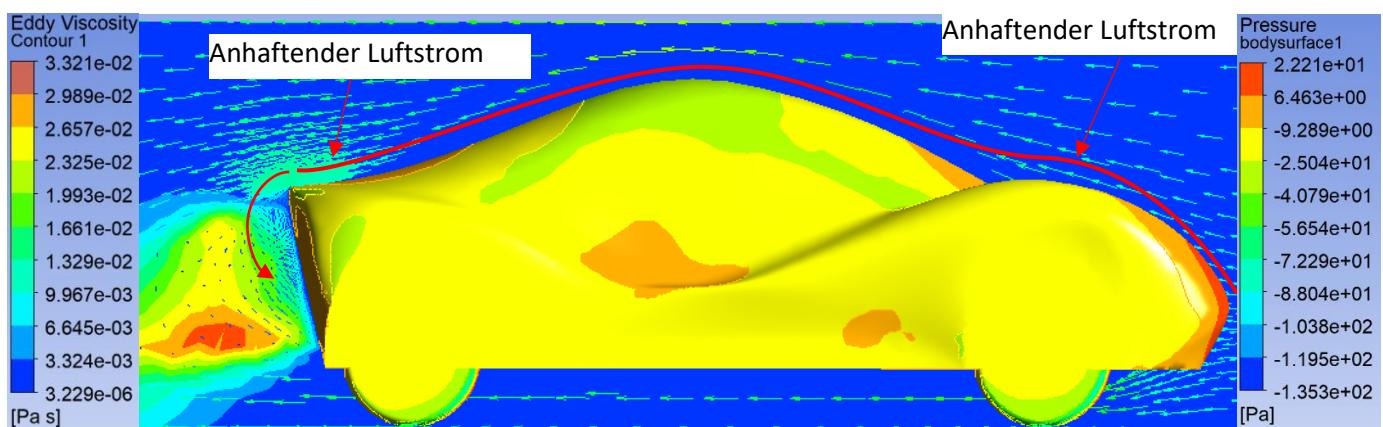


Abbildung 5-12 Aufriss Erstentwurf Wirbelviskosität

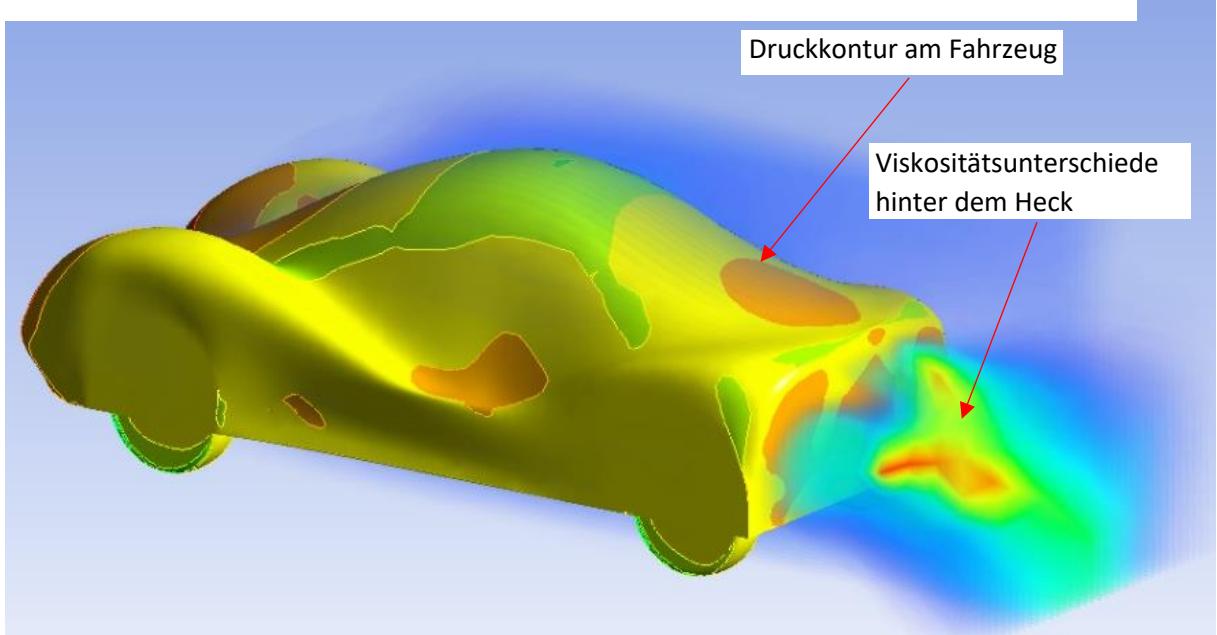


Abbildung 5-11 Isoansicht Erstentwurf

Aerodynamischer Sog und daraus resultierende  
Verwirbelungen

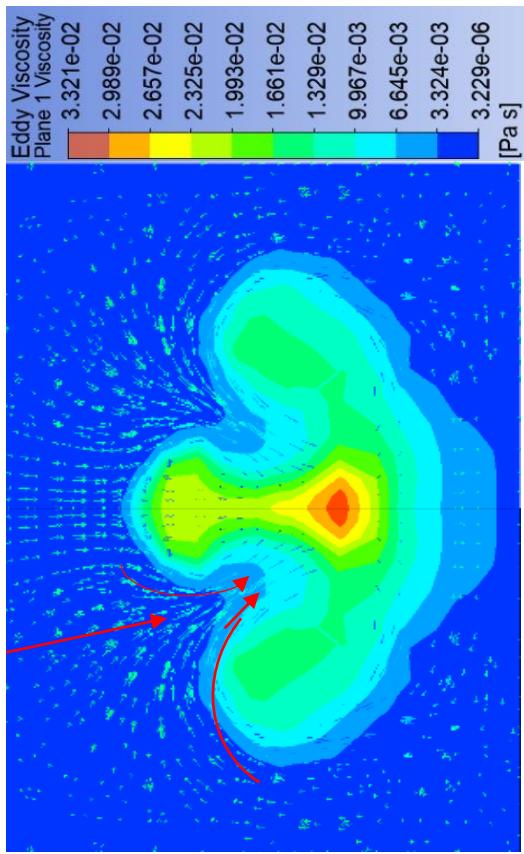


Abbildung 5-15 Ebene 0,3 m hinter dem Heck des Fahrzeuges  
Erstentwurf

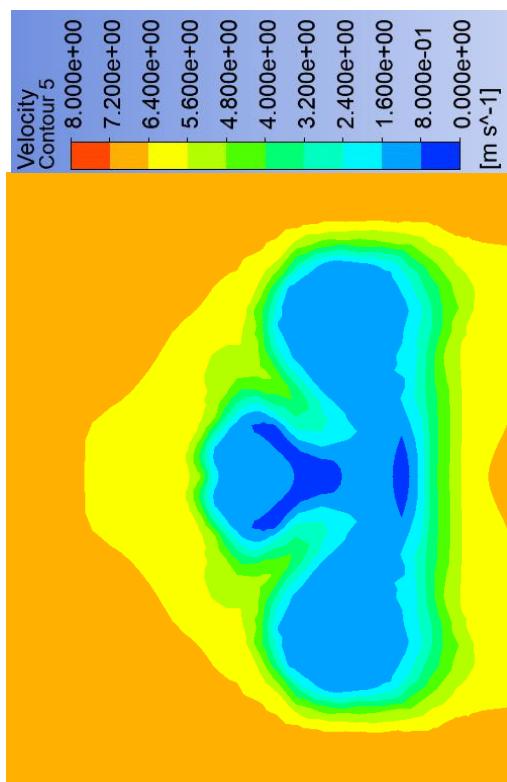


Abbildung 5-15 Geschwindigkeitskontur Heck Geschwindigkeit

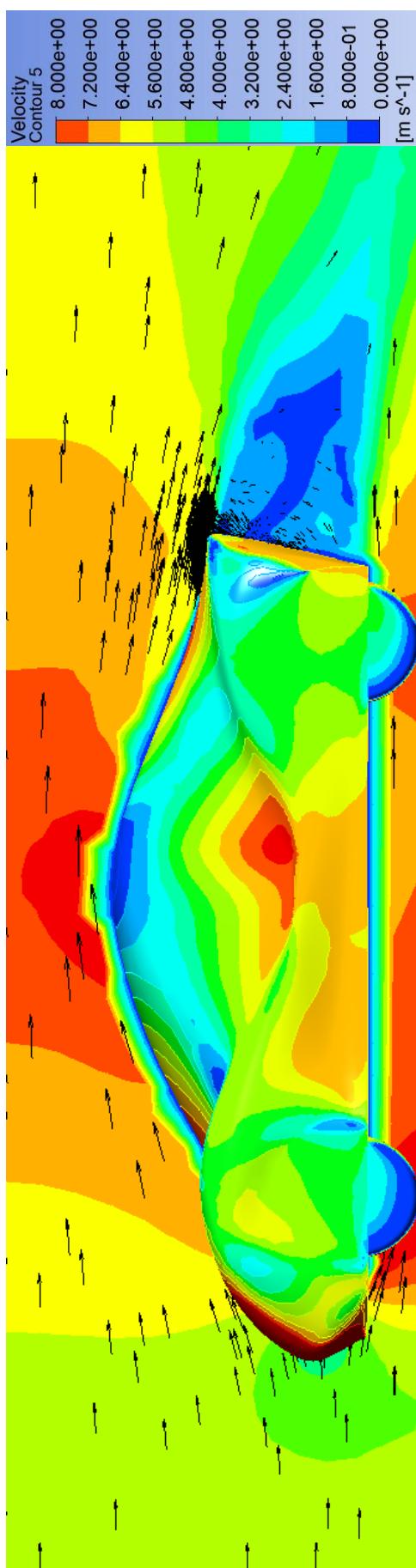


Abbildung 5-15 Geschwindigkeit Aufriß Fahrzeug

## 5.5 Stationäre Lösung Enddesign

### 5.5.1 Zielsetzung

Die Erkenntnisse, welche durch die statische Analyse in 5.4 gewonnen wurden, führten zu einem Neudesign des Hecks des Fahrzeugs. Diese Änderungen sollen auf Ihre Auswirkungen überprüft werden, um zusammen mit der instationären Lösung endgültige Empfehlungen für die Konstruktion bereitstellen zu können.

### 5.5.2 Analyse der Veränderungen

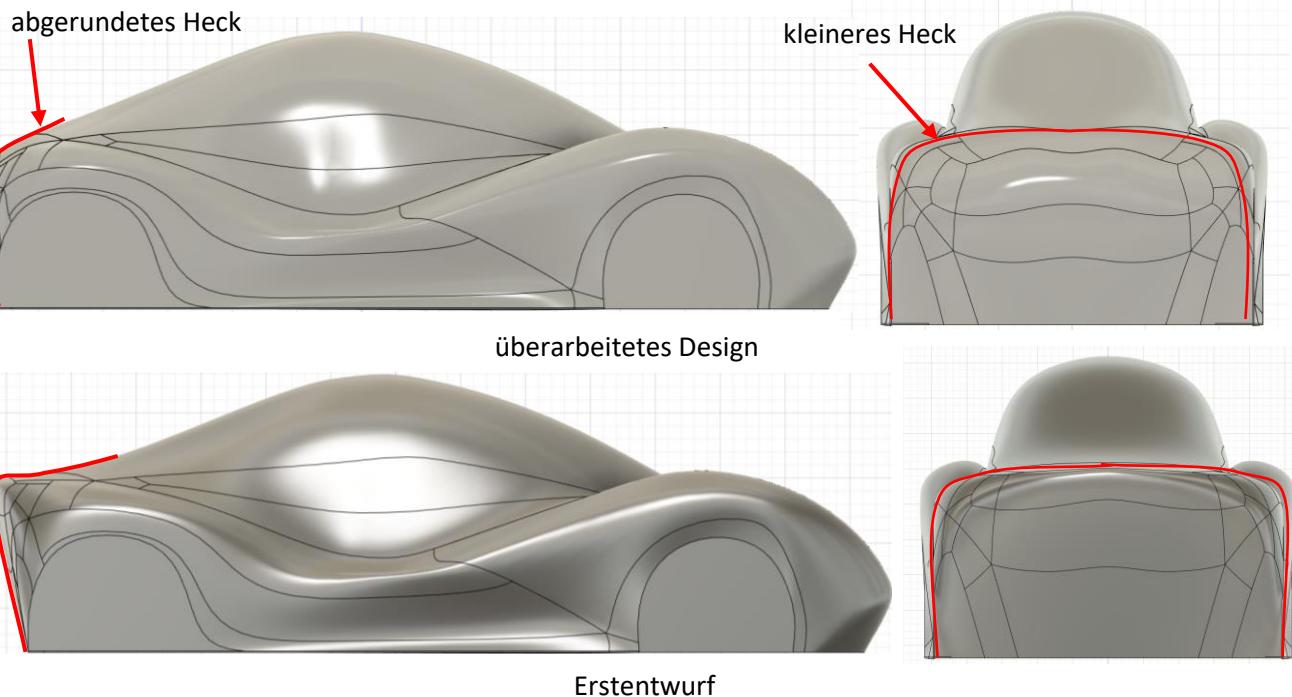


Abbildung 5-16 Analyse Veränderungen überarbeitetes Konzept

Wie in 5.4.4 Ergebnis dargelegt, war der Hauptgrund für den aerodynamischen Drag, das Heck des Fahrzeuges. Daher wurde im überarbeiteten Entwurf die scharfe Abrisskante stark verändert, um die Differenz anschaubar nachweisen zu können.

Wie in der Abbildung zu sehen, fällt das Heck deutlich steiler ab, die Abrisskante wurde von einer großzügigen Rundung ersetzt und die seitlichen Kanten wurden ebenfalls stark abgerundet, was die Fläche des Hecks signifikant verkleinert.

### 5.5.3 Ergebnisse

| Simulationspunkt | $v_{inlet}$ [m s^-1] | $c_w$ [-] | Widerstandskraft [N] |
|------------------|----------------------|-----------|----------------------|
| SP 0             | 5                    | 0,344     | 6,2                  |
| SP 1             | 7,5                  | 0,338     | 13,8                 |
| SP 2             | 10                   | 0,338     | 24,5                 |
| SP 3             | 12,5                 | 0,339     | 38,4                 |
| SP 4             | 15                   | 0,337     | 55,1                 |
| SP 5             | 17,5                 | 0,336     | 74,8                 |
| SP 6             | 20                   | 0,336     | 97,6                 |
| SP 7             | 22,5                 | 0,335     | 123,3                |
| SP 8             | 25                   | 0,335     | 152,1                |

Tabelle 5-3 stationäre Lösung  
Ergebnisse überarbeitetes Konzept

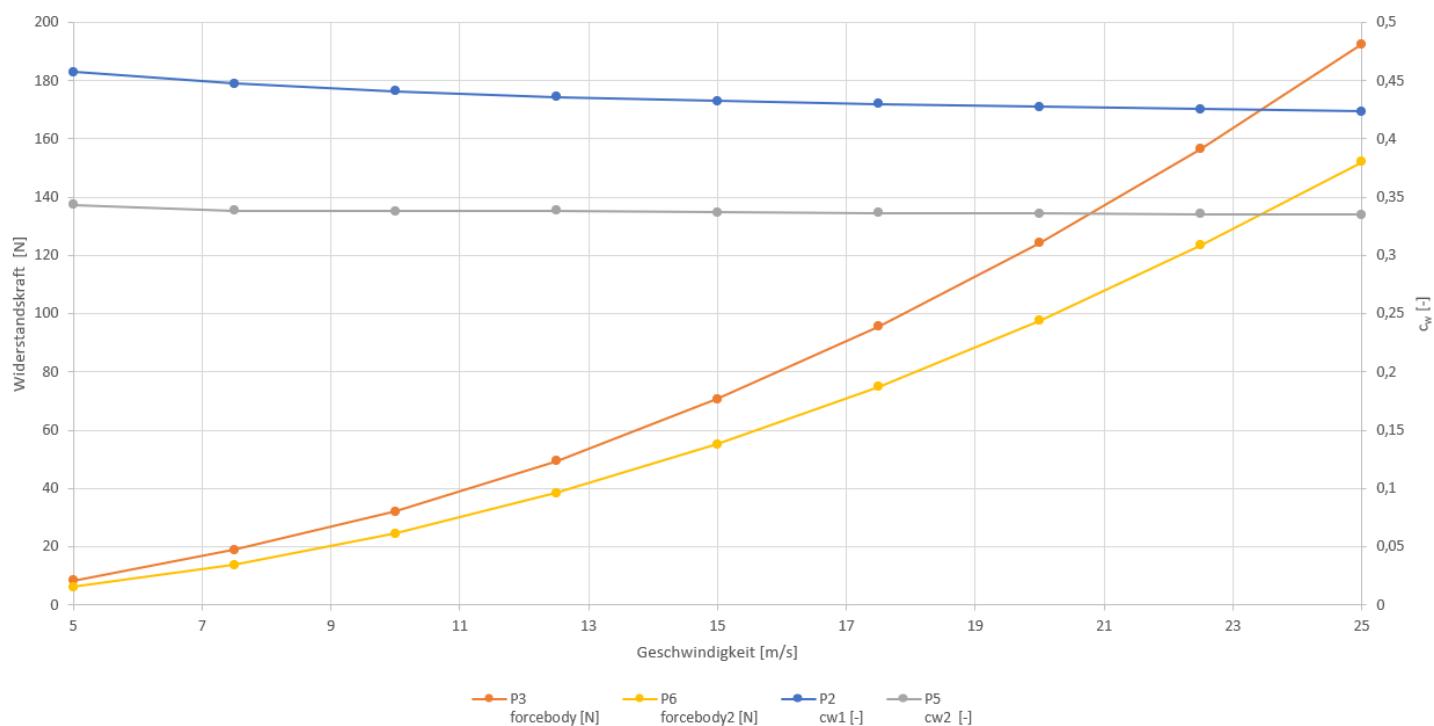


Abbildung 5-17 Vergleich stationäre Lösungen

#### 5.5.4 Bewertung der Analyse

Wie in anhand der Veränderung des  $c_w$ -Werts von 0,43 auf 0,37 sichtbar wird hat die Veränderung der Abrisskante tatsächlich einen signifikanten Einfluss auf das aerodynamische Verhalten des gesamten Fahrzeugs.

Um diese Erkenntnis möglichst sinnvoll in den Konstruktionsprozess einzubinden, wurde in weitere Folge ein verbessertes Konzept für die Verkleidung konstruiert, welches die Erkenntnisse der aerodynamischen Simulation berücksichtigt. Außerdem spielt der berechnete  $c_w$ -Wert für die Berechnung des Verbrauchs und damit für die Auslegung der Wasserstoffbrennstoffzelle eine große Rolle.

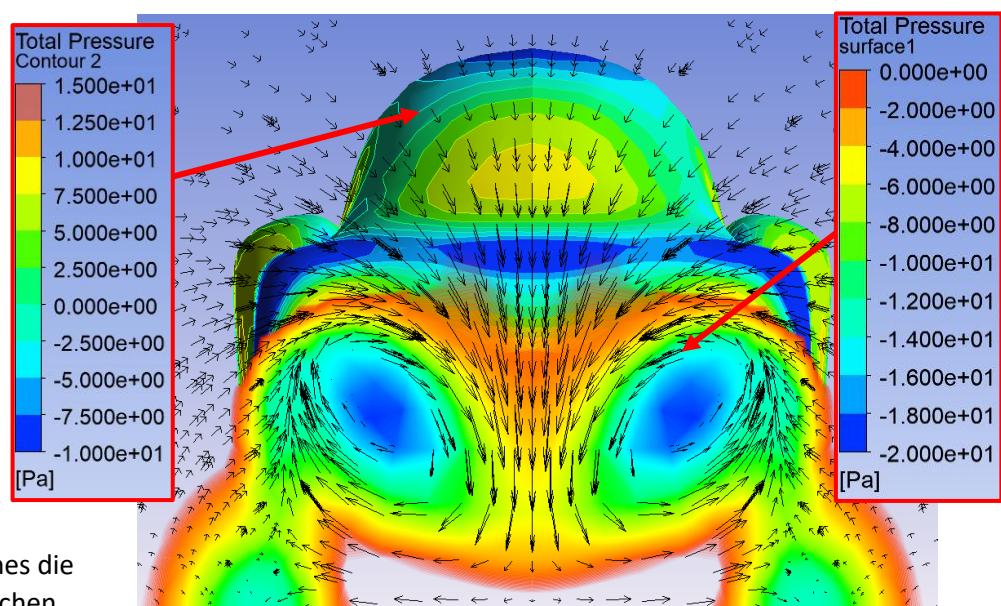


Abbildung 5-18 Ebene 0,3 m hinter dem Heck des Fahrzeugs finales Design Druck

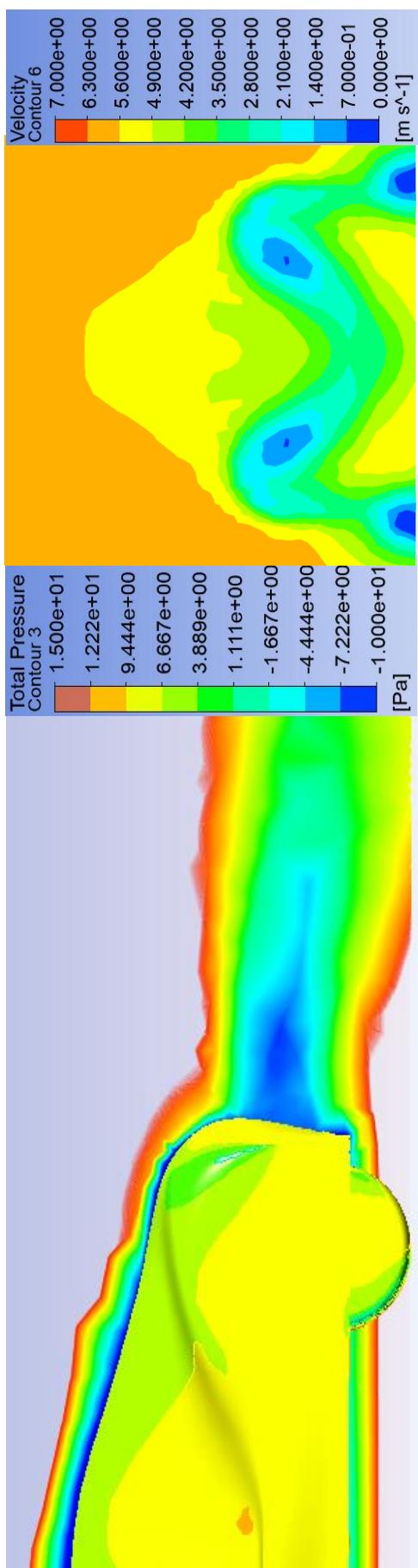


Abbildung 5-21 Geschwindigkeitsprofil Heck finales Konzept

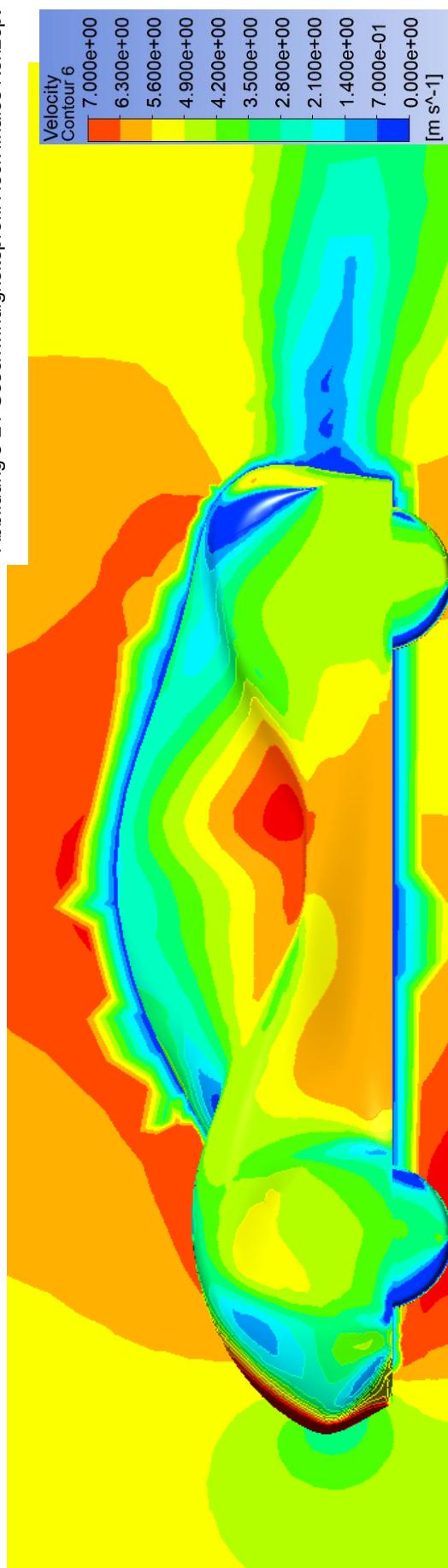


Abbildung 5-21 Geschwindigkeitsprofil Aufriß finales Konzept

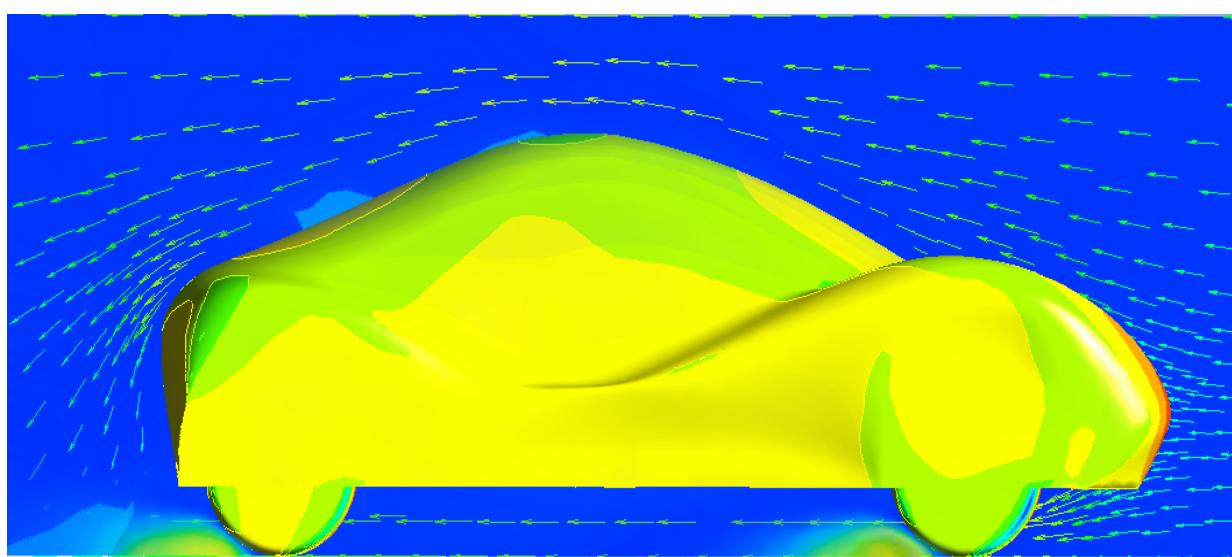


Abbildung 5-23 Aufriss überarbeitetes Konzept

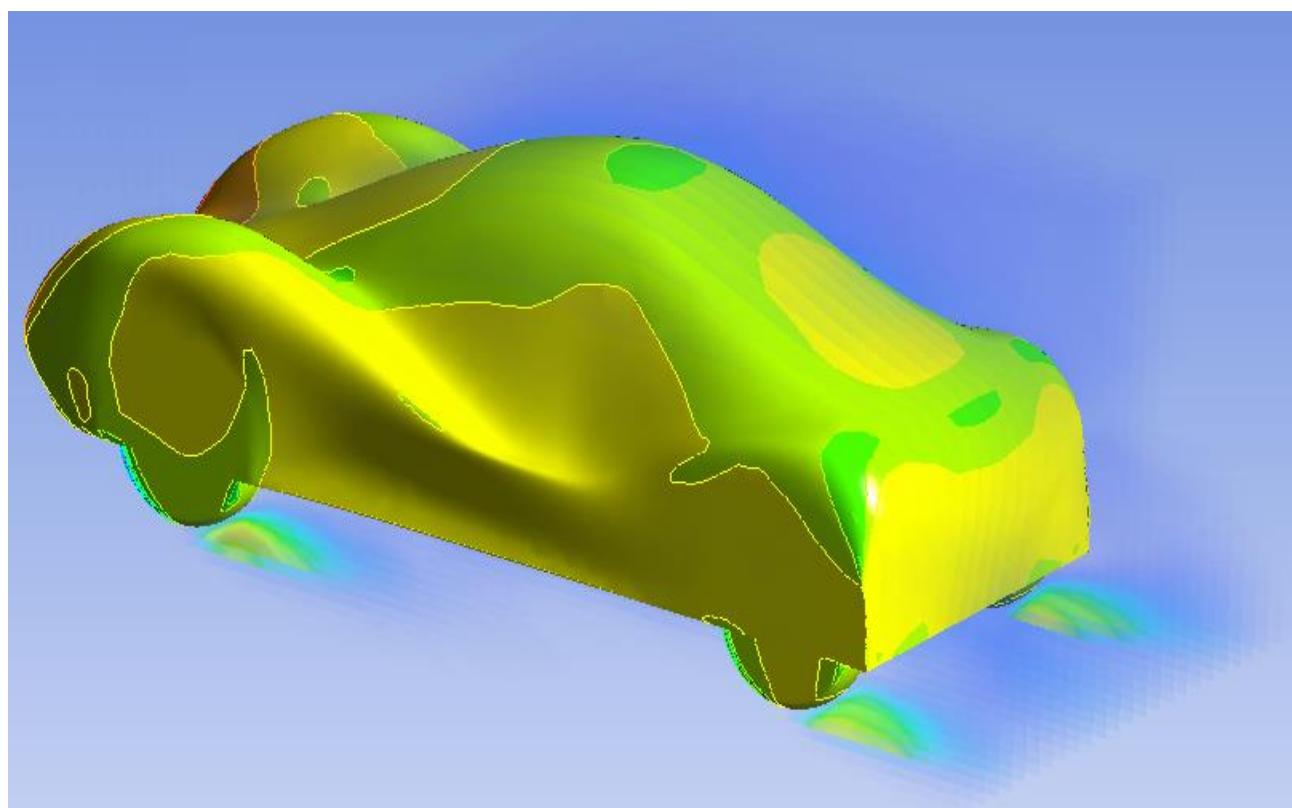


Abbildung 5-23 Isoansicht überarbeitetes Konzept

## 5.6 Instationäre Lösung

### 5.6.1 Aufbau

Eine instationäre Lösung, auch transiente Lösung ist im Gegensatz zu einer stationären Lösung nicht auf ein Endstadium, in welchem sich ein statischer Zustand eingestellt hat ausgerichtet. Es werden hingegen mehrere Zeitschritte mit einer gegebenen Ausgangslage berechnet, welche jeweils einen zeitlichen Abstand  $\Delta t$  zwischen einander besitzen. Die Länge eines Zeitschrittes kann vor der Simulation mit der Courant-Friedrichs-Levy-Zahl (CFL)<sup>34</sup> abgeschätzt werden, wird jedoch nach der ersten Simulation angepasst werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

$$CFL = c * \frac{\Delta t}{\Delta x} \Rightarrow \Delta t = CFL * \frac{\Delta x}{c} = 0,018 \text{ s}$$

$$CFL \geq 1 \quad \Delta x \dots \text{Zellengröße} = 0,27 \text{ m}$$

$$c \dots \text{Strömungsgeschwindigkeit} = 15 * \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Das Netz sowie die initialen Werte, welches für die transiente Simulation benutzt werden, wird direkt von der stationären Lösung übernommen.

Ausgehend von dieser Lösung werden eine im Setup bestimmte Anzahl an Zeitschritten gewählt, um eine bestimmte Simulationszeit zu erreichen. jeder der Zeitschritte wird im Hintergrund abgespeichert und kann im Post Programm analysiert werden. Dies bietet die Möglichkeit die einzelnen Bilder in einem Stop-Motion Film zu exportieren, in welchem die Turbulenzen und Schwingungen, welche entstehen, animiert dargestellt werden können.

### 5.6.2 Komplikationen mit der Simulation

Da selbst nach mehreren Simulationen, mit unterschiedlichen Zeitschritten [0,01; 0,015; 0,02; 0,03; 0,05] und Anzahl an Zeitschritten, [500; 700; 1000] keine periodisch sichtbaren Schwingungen erkennbar wurden konnte leider nur der Einschwingvorgang visualisiert werden, da sich das System nach ca. 1,5 s in einem annähernd stationären Zustand befindet. Wie im Solver sichtbar wird treten nach ca. 1,5s Simulationszeit keine Schwingungen außerhalb einer begrenzten Amplitude mehr auf und das System befindet sich in einem annähernd stationären Zustand.

In diesem können zwar Druckkonturen und Turbulenzen analysiert werden, in der Animation werden jedoch keine Schwingungen sichtbar.

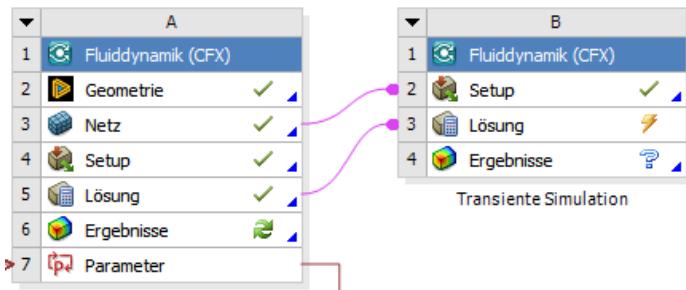


Abbildung 5-24 Übernahme der stationären Ergebnisse aus 5.5

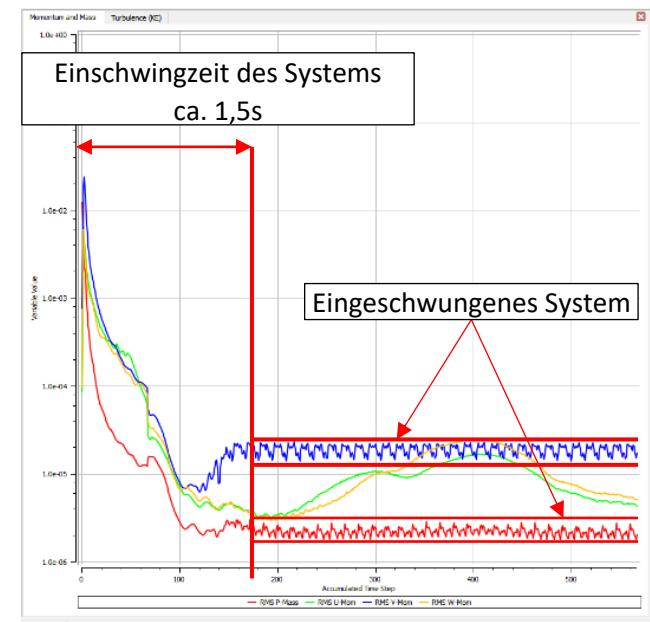


Abbildung 5-25 Einschwingverhalten der instationären Lösung

<sup>34</sup> Lecheler, 2018 S.61



### 5.6.3 Ergebnisse

Da das Ergebnis der Transienten Lösung in Form einer Animation dargestellt wird können nur unterschiedliche Zeitschritte verglichen werden.

## 5.7 Fazit zur aerodynamischen Simulation

### 5.7.1 Einsparnisse aufgrund der Aerodynamikverbesserung

Um den Effekt der Aerodynamik auf den Verbrauch des Fahrzeuges einschätzen zu können müssen alle relevanten Verzögerungs Kräfte, welche auf das Fahrzeug wirken abgeschätzt und deren Summe mit dem Anteil der Luftwiderstandskraft verglichen werden. Hierbei wird von zwei Szenarien ausgegangen:

- 1) Fahrzeug bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit auf ebener Strecke mit 50 km/h
- 2) Fahrzeug beschleunigt von 0 km/h gleichmäßig auf eine Geschwindigkeit von 70 km/h

Kräfte welche durch die Steigung der Rennstrecke, mechanische Verluste im Antriebsstrang oder durch Lenkbewegungen auftreten werden nicht miteinkalkuliert, da diese in der Praxis sehr stark variieren (Steigung) oder nicht ohne Messungen seriös angegeben werden können. (mechanische Verluste)

#### 5.7.1.1 Rollwiderstand

Die Ermittlung der Reifenkräfte wird im Kapitel „11 Ermittlung der Radlasten“ im Detail von Herrn Ploy abgehandelt, welcher eine Gewichtskraft von 2942 N für das Fahrzeug inklusive Fahrer ermittelt.

Gemäß dem Buch Rennwagentechnik von Michael Trzesniowski<sup>35</sup> kann bis 60 km/h der Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$  als konstante mit  $k_R=0,01$  angenommen werden. Daraus ergibt sich folgende Rollwiderstandskraft:

$$F_{Roll} = F_g * k_R = 2942 \text{ N} * 0,01 = 29,42 \text{ N}$$

#### 5.7.1.2 theoretischer Beschleunigungswiderstand

Neben der Masse des Fahrzeuges sowie des Fahrers, auf den die Trägheitskräfte beim Beschleunigen wirken außerdem die Trägheiten der rotierenden Massen, welche in der Berechnung berücksichtigt werden müssen. Da die genauen Werte für das Trägheitsmoment des Antriebes nicht ermittelt werden können, muss dieses geschätzt werden. Die Trägheitsmomente der Radbaugruppe (Lager; Reifen; Felge; Bremse; Nabe) können von Creo ermittelt werden. Für die Beschleunigung wird eine gemessene Vollbeschleunigung des Vorgängers herangezogen, welcher von 5 km/h (Haftreibung muss ausgeschlossen werden) auf 50 km/h in 25 Sekunden beschleunigte.<sup>36</sup>

<sup>35</sup> Trzesniowski, 2010

<sup>36</sup> Peter Will, 1998



$$J_{Radgruppe} = 0,49 \text{ kgm}^2 \quad J_{Antrieb} = 0,2 \text{ kgm}^2 \quad \Delta v = 45 \frac{\text{km}}{\text{h}} \triangleq 12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \Delta t = 25\text{s}$$

$$r_{dyn} = \frac{d_{Rad}}{2} = \frac{576 \text{ mm}}{2} = 0,288 \text{ m} \quad m_{Fahrzeug} = 300 \text{ kg}$$

$$F_a = a * m_{red} = \frac{\Delta v}{\Delta t} * \left( m_{Fahrzeug} + \frac{4 * J_{Radgruppe} + 2 * J_{Antrieb}}{r_{dyn}^2} \right) = 164,22 \text{ N}$$

### 5.7.1.3 Vergleich Aerodynamikkonzepte

Wie im folgenden Diagramm sichtbar wird wirken sich die Änderungen am Fahrzeugdesign stark auf die insgesamten Verluste aus. Hierbei wird von Szenario 1 (ebene Strecke; konstante Geschwindigkeit) ausgegangen. Sichtbar wird das bei einer Geschwindigkeit von 15 m/s eine Reduktion der Widerstandskraft um rund 20 N erreicht werden konnte, was einer prozentualen Einsparung von ca. 20% entspricht.

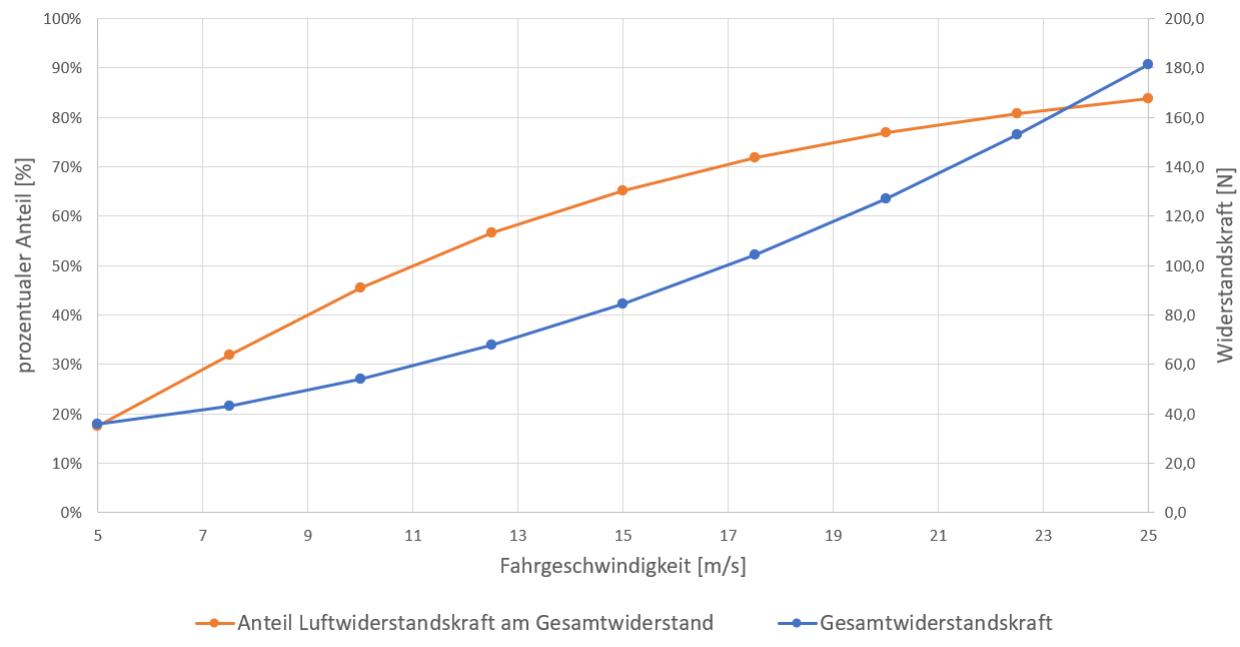


Abbildung 5-26 Vergleich Aerodynamikkonzepte

### 5.7.1.4 Szenario 1

Im ersten zeigt sich, dass bei einer Fahrt mit konstanten Geschwindigkeit auf ebener Strecke die Aerodynamik einen sehr großen Anteil an den insgesamten Verlusten hat. Die Widerstandskraft steigt dabei bis auf einen Wert von 180 N an, woran die Luftwiderstandskraft einen prozentualen Anteil von 83% hat.

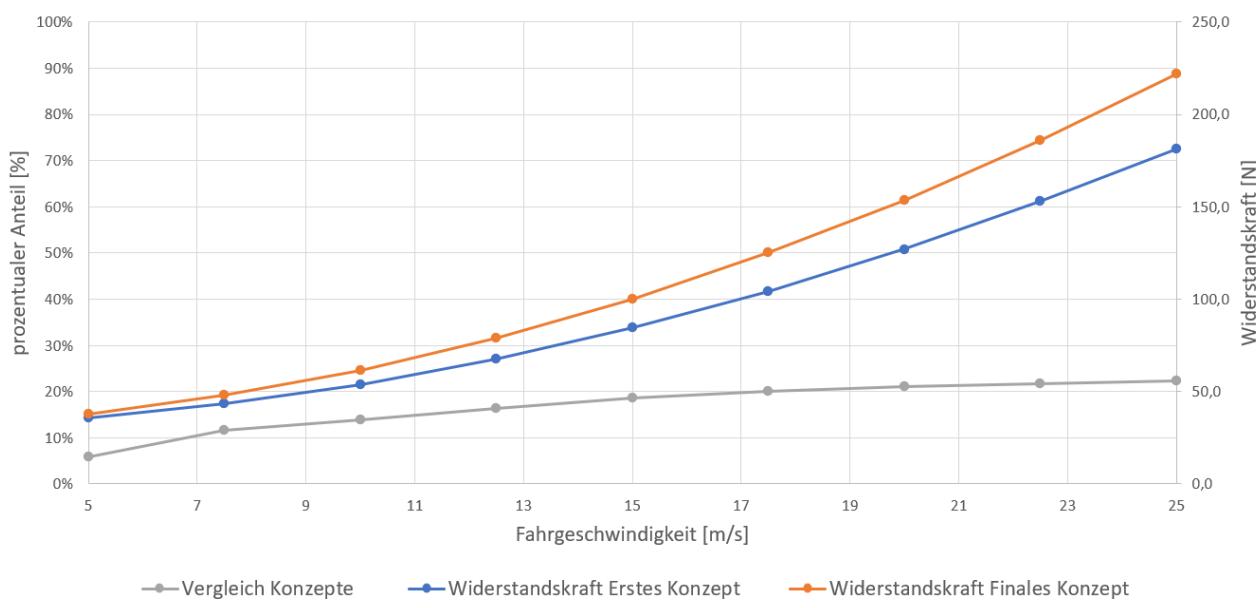


Abbildung 5-27 Aerodynamisches Fazit Szenario 1

### 5.7.1.5 Szenario 2

Im Szenario wird die Relevants des Fahrzeuggewichtes sowie der rotierenden Massen sichtbar. Besonders im niedrigen Geschwindigkeitsbereich [5-10 m/s] ist die Verzögerung welcher durch die Fahrzeugbeschleunigung besonders relevant. Im relevanten Geschwindigkeitsbereich [19-21m/s] sieht man einen Anstieg des prozentuellen Anteils der Luftwiderstandskraft, welche bis auf 35% ansteigt. In der Realität treten jedoch weitere Verluste (mechanisch) auf weshalb die hier präsentierten Statistiken nur ein verzerrtes Bild zeichnen.

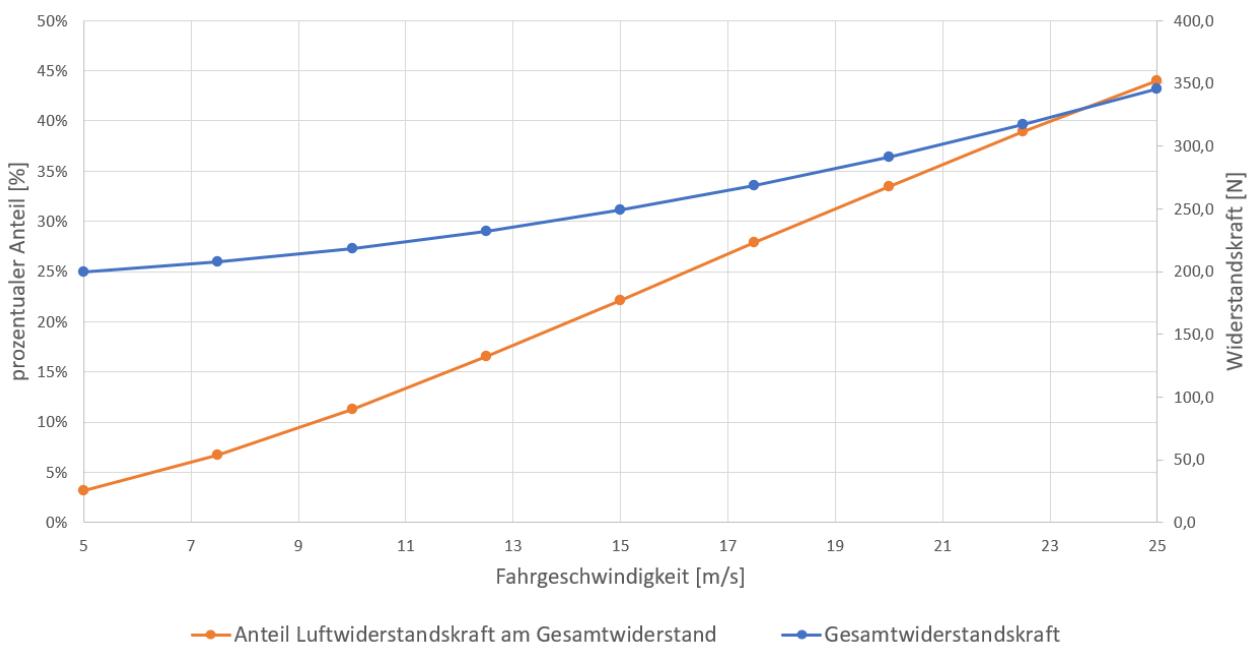


Abbildung 5-28 Aerodynamisches Fazit Szenario 2

## 5.8 Validierung durch Windkanalmessungen

### 5.8.1 Zielsetzung

Um die Berechnung mittels Daten aus dem Windkanal auf Ihre Richtigkeit zu prüfen, wurde das überarbeitete Designkonzept im Maßstab 1:15 als 3D Druckteil auf einem FDM Drucker angefertigt. Dieses Modell wurde anschließend im Strömungslabor vermessen um den  $c_w$ -Wert sowie den Luftwiderstandswert in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich zu vermessen. Wichtig ist, dass bei dem Vergleich der Werte beachtet werden muss, dass die Werte, welche im Windkanal gemessen werden, nicht zu 100% bei den gleichen Bedingungen durchgeführt werden können wie die Berechnung, da die Strömungsverhältnisse und damit die Messergebnisse stark durch die Größe des verkleinerten Modelles beeinflusst werden. Außerdem muss bedacht werden, dass der Rundstahl, an welchem das 3d Druckmodell im Windkanal befestigt war, ebenfalls einen Strömungswiderstand zur Folge hat, welcher den  $c_w$ -Wert weiter verschlechtert.

Die Messwerte haben somit nur eine begrenzte Aussagekraft, da Versuche an einem ähnlich großen Modell durchgeführt werden müssten, um eine fundierte Aussage über die Richtigkeit der Aerodynamiksimulation zu treffen.

### 5.8.2 Aufbau

In den folgenden Abbildungen sind der Aufbau der Windkanalmessungen dargestellt. Es wird dabei an der Messstelle (M) die Kraft, welche aus dem Kraftarm und der Luftwiderstandskraft resultiert, gemessen. Mit dieser gemessenen Kraft wird um den Lagerpunkt (L) ein Momentensatz angesetzt.

$$\sum M_L = 0 : F_{gem} * (L_2 - L_1) - F_{Luft} * L_2 = 0 \Rightarrow F_{Luft} = F_{gem} * \frac{(L_2 - L_1)}{L_2}$$

Mithilfe der in 5.2.4.1 beschriebenen Formel wird nun der resultierende  $c_w$ -Wert berechnet, welcher neben der gemessenen Kraft außerdem von der projizierenden Fläche des Fahrzeugs abhängig ist, welche bei einem 1/15 Modelles des Scorpions  $0,00502 \text{ m}^2$  beträgt.

$$F_{Luft} = \frac{c_w * A_{proj} * v_1^2}{2} \Rightarrow c_w = \frac{F_{Luft} * 2}{A_{proj} * v^2}$$

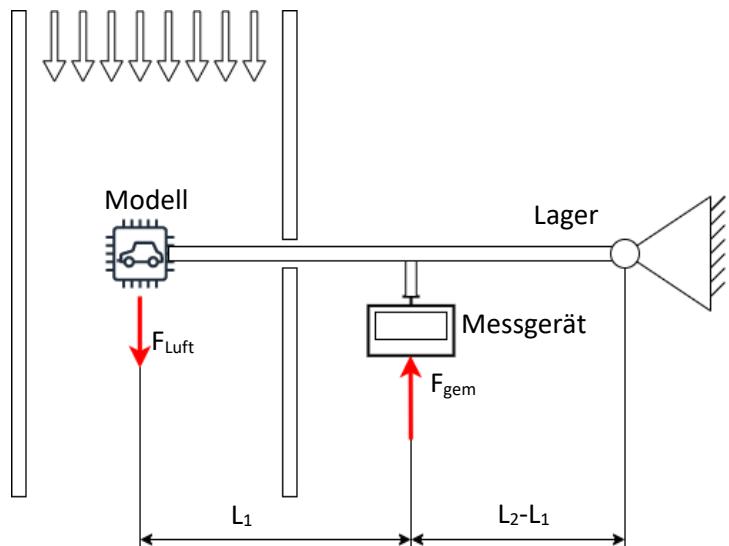


Abbildung 5-29 Aufbau Windkanalmessungen Schema

Im Rahmen der Messungen wurden folgende Werte berechnet:

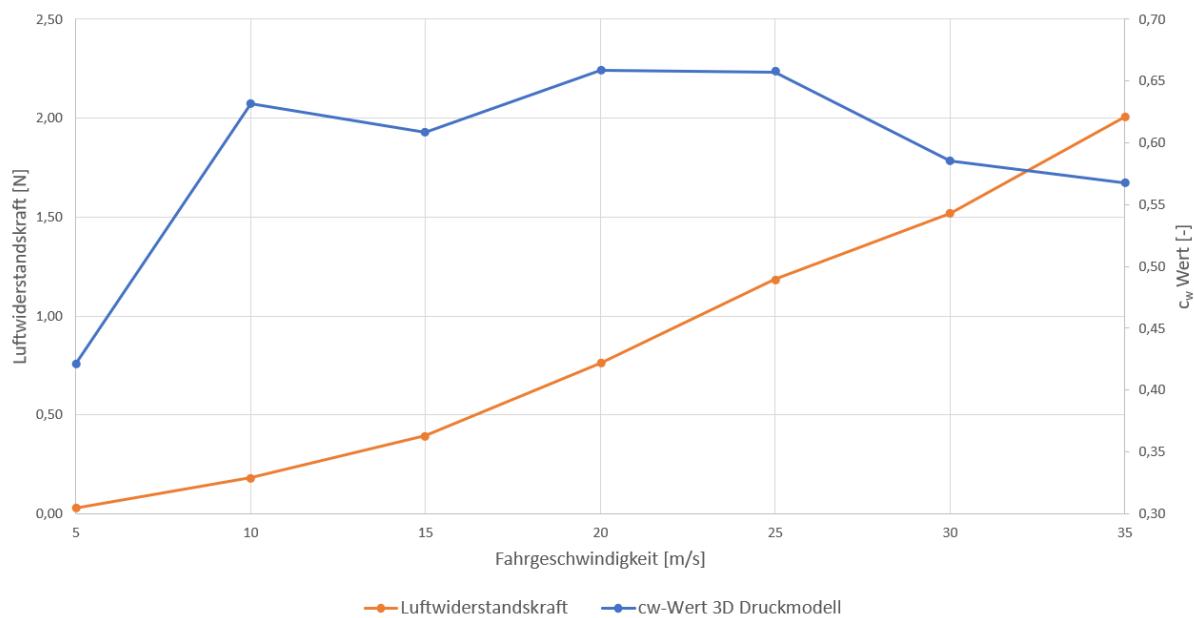


Abbildung 5-30 Messergebnisse 3D Modellversuch



Abbildung 5-31 Aufbau Windkanalmessungen



### 5.8.3 Begründung Abweichung des $c_w$ Wertes

Wie bei dem Vergleich zur numerischen Lösung sichtbar wird, weichen der  $c_w$ -Wert und die Luftwiderstandskraft stark von den berechneten Werten ab. Dies kann durch die unterschiedlichen auftretenden Strömungszustände begründet werden. Ein Maß für diese ist vor allem die Reynoldszahl<sup>37</sup> ( $R_e$ ) welche durch folgende Beziehung mit dem Zustand des Objektes und des Fluids verknüpft ist:

$$R_e = \frac{\rho_{Luft} * v * d}{\eta}$$

$\rho_{Luft}$ .....Dichte Luft [1,15 kg/m<sup>3</sup>]     $\eta$ .....Viskosität Luft [18,2 µPas\*s]  
 $v$ .....Geschwindigkeit Luft [m/s]     $d$ .....Charakteristische Länge [m]

In den zwei berechneten Fällen (Maßstab 1:1 in der Simulation; Maßstab 1:15 im Windkanal) ergeben sich somit bei gleicher Geschwindigkeit (15 m/s) folgende  $R_e$  Zahlen:

$$R_{e1} = \frac{\rho_{Luft} * v * d_1}{\eta} = 2,843 * 10^6 \quad R_{e1} = \frac{\rho_{Luft} * v * d_2}{\eta} = 1,896 * 10^5$$

Beispielhaft für den Effekt, den eine solche Änderung der Reynoldszahl kann die Abhängigkeit des  $c_w$ -Wertes von einfachen Geometrischen Körpern herangezogen werden, welche jedoch nicht die genaue Abhängigkeit im Fall des Scorpions widerspiegeln. Somit kann keine Aussage darüber gemacht werden ob und wie stark die Messungen mit den berechneten Werten korrelieren.

Um eine ähnliche Reynoldszahl zu erreichen müsste folglich die Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal auf mindestens 150 m/s erhöht werden, was jedoch eine Vielzahl von anderen Problemen zur Folge hätte, oder es müsste ein deutlich größeres Modell vermessen werden, wofür ein größerer Windkanal notwendig wäre.

### 5.8.4 Persönliches Fazit

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben war es durch die numerische Aerodynamiksimulation möglich Änderungen am Design vorzunehmen, um eine bessere Ausgangslage für die Dimensionierung des Antriebstranges zu schaffen.

Außerdem war das Erlernen von Ansys CFX für mich eine neue Erfahrung, bot mir die Möglichkeit mich mit dem Bereich der numerischen Simulationen auseinanderzusetzen. Viele der Erkenntnisse welche Ich speziell durch das Lesen der Literatur sowie das Berechnen von Probestücken gewonnen habe stellen für mich neben den Rechenergebnissen einen großen Mehrwert dar.

<sup>37</sup> Reynolds-Zahl, 2022



## 6 Chassis Konzept

Nach Abschluss der Designphase und Kontrolle durch Aerodynamiksimulation, kann mit der Konstruktion begonnen werden. Ein zentrales Element der Konstruktion sowie des gesamten Fahrzeugs ist der Aufbau des Chassis. Hierzu gibt es unterschiedlichste Ansätze wie ein solches Chassis umgesetzt werden kann, auch wenn die heutige Automobilindustrie, ausgenommen ist hierbei der Renn- und Supersportwagensektor, mittlerweile fast ausschließlich auf nur ein Konzept zurückgreift. Da der Scorpion allerdings um vieles leichter und kompakter als ein gewöhnliches Straßenfahrzeug ausgeführt, sowie ein Prototypenfahrzeug sein wird, können ungewöhnlichere Konzepte sowie serienuntaugliche Konzepte ebenfalls angestrebt werden.

### 6.1 Anforderungen

- Verbindung sämtlicher Bauteile:  
Das Chassis (oft auch umgangssprachlich als „Rahmen“ bezeichnet) eines Fahrzeuges hat im Generellen die Aufgabe den Antriebsstrang (Motor, Kupplung, Getriebe, Kardanwelle, Differential, usw.), die Radaufhängung (Querlenker, Radträger, usw.), die Karosseriebleche (Kotflügel, Motorhaube, Türen, usw.) und sämtliche weitere Anbauteile (innen sowie außen) miteinander zu verbinden.
- Aufnahme von Kräften:  
Weiters muss es die Kräfte der Radaufhängungen (Radlasten) sowie des Motors, oder auch die Vibrationen desjenigen aufnehmen.
- Platzschaffung:  
Zusätzlich muss es Platz für den Fahrer und sämtliche Bauteile bieten und ist somit das zentrale Element eines jeden Fahrzeuges.

### 6.2 Reglement

Hierin ist festgeschrieben, dass, in Bezug auf die Konstruktion des Chassis, Folgendes eingehalten werden muss:

- Das Chassis muss den Fahrer vor äußeren Umwelteinflüssen schützen.
- Im Falle eines Einschlages muss genügend Knautschzone in jede Richtung vorhanden sein.
- Die Fahrzeugaufnahmepunkte sollten klar markiert werden.

### 6.3 Konzeptionierung

#### 6.3.1 Chassis mit nicht selbsttragender Verkleidung

Bei einem Chassis mit nicht selbsttragender Verkleidung hat die Verkleidung des Fahrzeugs keinen Einfluss auf die Steifigkeit und hat daher, neben dem Schutz vor Umwelteinflüssen sowie der Aerodynamik, nur optische Zwecke. Der Vorteil hierbei ist, dass die Verkleidung unabhängig vom Rest des Fahrzeugs konstruiert und designet werden kann. Im Folgenden werden nun verschiedenste Chassisvarianten betrachtet:



### 6.3.1.1 Leiter-/Kasten-/Zentralrohr-/Plattformrahmen

Bei diesen Konzepten, welche heutzutage vor allem in Geländefahrzeugen noch zum Einsatz kommen, sind das Gewicht und der hohe Aufbau, welche sich hierbei grundsätzlich ergeben, Ausschlusskriterien, die eine weitere Evaluierung eines solchen Konzeptes unnötig machen.



Abbildung 6-1 Kastenrahmen<sup>38</sup>



Abbildung 6-3 Zentralrohrrahmen<sup>40</sup>



Abbildung 6-2 Plattformrahmen<sup>39</sup>

### 6.3.1.2 Gitterrohrrahmen

Der Gitterrohrrahmen war lange Zeit im Rennsport- sowie Sportwagensektor ein gängiges Konzept und hält sich bis heute im Motorradbau. Ein Gitterrohrrahmen besteht grundsätzlich aus einem dreidimensionalen Fachwerk aus Rohren und Stäben, welche die Stabilität des Fahrzeugs garantieren. Da dieses Konzept klassischerweise mit vielen komplizierten Schweißoperationen verbunden und daher nur schwer zu automatisieren ist, sind Automobile mit einem reinen Gitterrohrrahmenchassis eine Seltenheit. Nachteilig bei einem Chassis dieser Art ist, dass alle benötigten Anbauteile (Knöpfe, Lenkgetriebe, Aufhängung, Brems- sowie Gaspedal, Motorcontroller und Akkumulatoreinheit bei Elektrofahrzeug, usw.) eine eigene Befestigungsmöglichkeit benötigen, welche diese Anbauteile mit dem tragenden Rohrkonstrukt verbindet, was einen Konstruktions-, Fertigungs- sowie Montagemehraufwand zur Folge hat. Allerdings spielt die Serienfertigbarkeit für ein Prototypenfahrzeug wie dem Scorpion eine

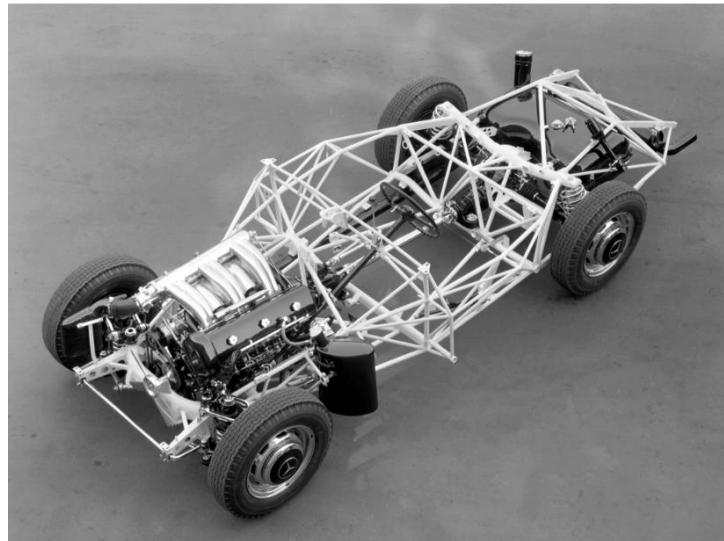


Abbildung 6-4 Typ 300 SL-Coupe<sup>41</sup>

<sup>38</sup> Leiterrahmen, 2022

<sup>39</sup> Fahrgestell, 2022

<sup>40</sup> Fahrgestell, 2022

<sup>41</sup> Mercedes-Benz, 2022



eher unbedeutende Rolle. Vorteilhaft an diesem Konzept ist, speziell in Hinblick auf die Umsetzung als Schulprojekt, dass keine Abhängigkeit von einzelnen Großsponsoren besteht, da es sich bei nahezu allen benötigten Bauteilen um „vergleichsweise“ einfache Bauteile handelt (Rohre, Bleche, usw.) die einigermaßen simpel und kostengünstig zu beschaffen sind. Aufgrund dieses Vergleiches kann dieses Konzept genauer evaluiert werden.

### 6.3.2 Chassis mit selbstragender Verkleidung

#### 6.3.2.1 Space-Frame Chassis

Beim Space-Frame Chassis handelt es sich um die, bereits oben beschriebene, weit verbreitete Lösung der heutigen Automobilindustrie. Das Space-Frame Chassis besteht aus einer verklebten sowie verschweißten Konstruktion aus Schmiede- und Gussteilen sowie Halbzeugen und ist so ausgelegt, dass es möglichst viele Aufgaben übernehmen kann. Die Konstruktion und Fertigung eines solchen Space-Frame Chassis erfordert eine technische Ausstattung auf Industriestandard, welche einem Schulprojekt nicht zur Verfügung steht. Daher ist die Umsetzung eines solchen Konzeptes für die bereitstehenden Möglichkeiten weitaus zu komplex.



Abbildung 6-5 Space-Frame Chassis<sup>42</sup>

#### 6.3.2.2 Monocoque

Das Monocoque, welches bereits vom Vorgänger-Scorpion verwendet wurde, ist im Rennsport- sowie Sportwagensektor, aus Gewichtsgründen, sehr weit verbreitet. Dieses Konzept bietet insbesondere für Prototypenfahrzeuge den Vorteil, dass sämtliche Anbauteile einfach an der gewünschten Stelle installiert werden können. Hierzu kann, da die gesamte Oberfläche des Fahrzeugs aus einem Materialstück besteht, das Fahrzeug an den benötigten Stellen mit Bohrungen versehen werden, woran die verschiedensten Bauteile, montierbar sind. Die einzige realistische, den Fertigungsmöglichkeiten entsprechende Möglichkeit ein Monocoque in diesem Projekt umzusetzen, ist dieses als Kohlefaser-Monocoque auszuführen. Allerdings bedürfe es hierzu erneut dem Großsponsoring eines Unternehmens wie der Mubea Carbo Tech. Da auch dieses Konzept viele Vorteile bietet und, sobald das Chassis vorhanden ist, sehr viel Konstruktions- und Montageaufwand erspart, wird dies ebenfalls genauer betrachtet.

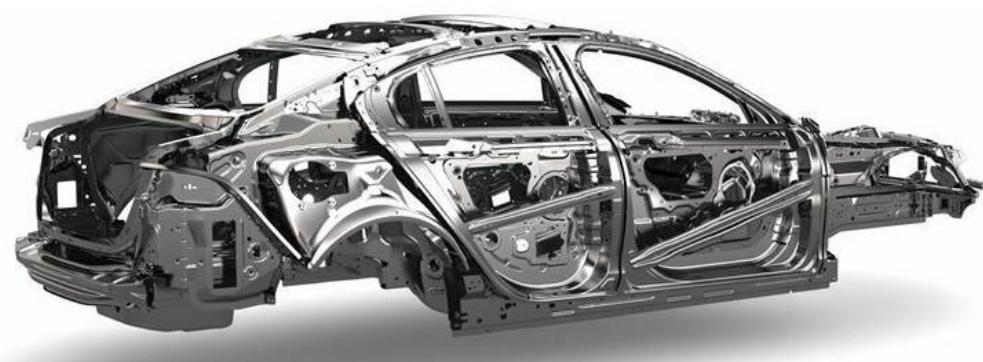


Abbildung 6-6 Monocoque<sup>43</sup>

<sup>42</sup> Audi AG, 2022

<sup>43</sup> motor-talk, 2022



## 6.4 Bewertungstabellen



Tabelle 6-1 Schema der Punktevergabe

### 6.4.1 Leiter-/Kasten-/Zentralrohr-/Plattformrahmen

| Kategorie              | Punkte | Begründung                                 |
|------------------------|--------|--|
| Gewicht                | 2      | Schwere Platten oder Halbzeug-Konstruktion |
| Komplexität            | 8      | Einfache Konstruktion                      |
| Steifigkeit            | 7      | Durch massive Ausführung                   |
| Montage/Zugänglichkeit | 8      | Gute Anbindungsmöglichkeiten für Bauteile  |
| Verwendbarkeit         | 0      | Zu hoher Aufbau                            |

**Punktzahl**      **25**

Tabelle 6-2 Bewertungstabelle Leiter-/Kasten-/Zentralrohr-/Plattformrahmen

### 6.4.2 Gitterrohrrahmen

| Kategorie              | Punkte | Begründung  |
|------------------------|--------|---|
| Gewicht                | 10     | Rohrkonstruktion sehr leicht                      |
| Komplexität            | 5      | Sämtliche Bauteile sind separat zu befestigen     |
| Steifigkeit            | 9      | Fachwerk ist biege- und torsionssteif             |
| Montage/Zugänglichkeit | 7      | Viel Platz; schwierige Befestigung der Anbauteile |
| Verwendbarkeit         | 9      | Passend zu Prototypenfahrzeug                     |

**Punktzahl**      **40**

Tabelle 6-3 Bewertungstabelle Gitterrohrrahmen

### 6.4.3 Space Frame

| Kategorie              | Punkte | Begründung                                     |
|------------------------|--------|--|
| Gewicht                | 9      | Leichtbauweise wie in Industrie möglich        |
| Komplexität            | 2      | Hochkomplexe Fertigung und Konstruktion        |
| Steifigkeit            | 8      | Hohe Steifigkeit in alle Richtungen erzielbar  |
| Montage/Zugänglichkeit | 8      | Anbindungsmöglichkeiten für Bauteile vorhanden |
| Verwendbarkeit         | 4      | Techn. Ausstattung auf Industrielevel nötig    |

**Punktzahl**      **31**

Tabelle 6-4 Bewertungstabelle Space Frame

### 6.4.4 Monocoque

| Kategorie              | Punkte | Begründung                                     |
|------------------------|--------|--|
| Gewicht                | 10     | Faserverbundwerkstoffe                         |
| Komplexität            | 5      | Aufwendige Konstruktion/Fertigung              |
| Steifigkeit            | 9      | Verkleidung mittragend                         |
| Montage/Zugänglichkeit | 8      | Anbindungsmöglichkeiten für Bauteile vorhanden |
| Verwendbarkeit         | 6      | Abhängigkeit von großen Sponsoren              |

**Punktzahl**      **38**

Tabelle 6-5 Bewertungstabelle Monocoque



## 6.5 Auswertung

Aufgrund der durchgeföhrten Evaluierung sowie der Vergleiche, Recherchen und Zielsetzungen ergibt sich das Gitterrohrrahmenchassis als das anzustrebende Konzept. Allerdings werden an verschiedenen Teilen des Fahrzeugs Blechteile in Erwägung gezogen, welche zu komplexen Rohrkonstruktionen ersetzen könnten.



## 7 Fahrerzelle

### 7.1 Anforderungen

Der vordere Teil des Chassis wird als Fahrerzelle bezeichnet, sie bildet mit dem zweiten Teil, dem Hinterbau, das komplette Chassis. Im Folgenden sind die Prioritäten der Fahrerzelle genauer angeführt:

#### 7.1.1 Festigkeit & Steifigkeit

Eine der wichtigsten Aufgaben des Teilchassis der Fahrerzelle ist die Stabilität und Festigkeit gegenüber den im Fahrbetrieb auftretenden Kräften. Das Chassis muss sämtliche Lasten aufnehmen und verteilen, muss allerdings trotzdem in seiner Form bleiben und darf nicht in unkontrollierbare Manöver ausbrechen.

#### 7.1.2 Sicherheit & Platz für die/den Fahrer/in

Neben der Sicherheit entgegen unkontrollierbarer Fahrensituationen, muss die Fahrerzelle auch im Falle eines Aufpralles den Fahrer schützen, dies ist durch eine Knautschzone, welche in Kombination mit der Frontverkleidung gebildet wird, gewährleistet. Weiters muss die Fahrerzelle den Fahrer gegen technische Gebrechen des Antriebsstranges schützen, weshalb die Fahrerzelle mittels einer Trennwand entgegen dem technischen Bereich, beispielweise gegen Brand, abgeschirmt ist. Zusätzlich darf der Fahrer keinesfalls in Kontakt mit der Fahrbahn oder rotierenden Bauteilen wie den Rädern kommen, weshalb alle Öffnungen und Räume abgeschirmt werden müssen. Zusätzlich muss die Fahrerzelle noch genug Platz für den Fahrer bieten, welcher in einer ergonomischen Sitzposition eine größere Distanz ohne unvertretbare Ermüdungserscheinungen zurücklegen können muss.

#### 7.1.3 Raum für Bedienelemente des Fahrzeugs

Um dies zu gewährleisten, müssen auch die Bedienelemente des Fahrzeugs passend in der Fahrerzelle positioniert werden. Dazu müssen Abstände der Pedalerie sowie des Lenkrades zur Sitzfläche aufeinander abgestimmt werden. Dieser Raum muss zur Verfügung stehen, um eventuelle Anpassungen zu ermöglichen. Weiters müssen auch Bauteile wie das Lenkgetriebe mit seiner Lenksäule und den Spurstangen, welche mit den Lenkhebeln der Radaufhängung verbunden sind, Platz finden und befestigt werden.

#### 7.1.4 Anbindung der vorderen Radaufhängung

Die Verbindung des Fahrzeuges zu den Rädern erfolgt durch die Radaufhängung, welche wiederum am Fahrzeug angebracht werden muss. Daher muss die Fahrerzelle Anbindungs möglichkeiten für die vorderen Radaufhängungen bieten. Die Position dieser hat hohe Priorität da diese die Position des Rades bedingt, welches wiederum mit der Außenhaut (Türen, Verkleidung) des Fahrzeugs korreliert.

#### 7.1.5 Schnittstelle zur Verkleidung

Die Fahrerzelle muss auch die Schnittstelle zu den Verkleidungsteilen definieren. Dies ist abhängig von den Anbindungspunkten sowie der Kontur der Türen und der Windschutzscheibe. Um eine optisch ansprechende Außenhaut des Fahrzeuges zu erreichen, ist es notwendig das vor allem die Übergänge gleichmäßig und verlaufend sind.

## 7.2 Konzeptionierung

Wie bereits im Vorhinein ermittelt, wird es sich bei der Rahmenkonstruktion des Fahrzeugs um einen Gitterrohrrahmen handeln. Die genauere Umsetzung dieses Konzeptes, speziell in Bezug auf die Verbindung der Rohre untereinander, wird aufgrund der Anforderungen des jeweiligen Teilchassis extra gefällt.

### 7.2.1 Schweißkonstruktion

Es besteht die Möglichkeit, dass Chassis der Fahrerzelle aus einer geschweißten Rohrkonstruktion (siehe Bild) zu fertigen. Allerdings bedingt dies die Notwendigkeit von Metallrohren, welche im gesamten Fahrzeug zwingend aus demselben Material bestehen müssen. Weiters stellt die verzugsbehaftete Fertigung eine Schwierigkeit für die Genauigkeit des Chassis dar. Zusätzlich benötigt die Fertigung eines solchen geschweißten Gitterrohrrahmens eine hohe praktische Schweißkompetenz, weshalb dies, bei der Fertigung an der Schule, der Arbeit einer Werkstätten-Lehrkraft bedürfte. Die Stabilität einer solchen Schweißkonstruktion steht außer Frage, da grundsätzlich alle bis jetzt in der Automobil- und Motorradindustrie sowie im Rennsport eingesetzten Gitterrohrrahmen aus Schweißkonstruktionen bestehen.



Abbildung 7-1 Schweißkonstruktion<sup>44</sup>

### 7.2.2 Verbindungsmuffen

Eine weitere Umsetzungsmöglichkeit ist durch die Rohrverbindung mittels Verbindungselementen bzw. Verbindungsmuffen gegeben (siehe Bild). Dies ermöglicht den Einsatz einer Hybrid-Bauweise, durch welche die verschiedensten Rohrmaterialien, je nach Anforderung und Belastungsfall, an den jeweiligen passenden Stellen im Fahrzeug verbaut werden können. Die Montage eines solchen Konstruktes stellt, bei Kenntnis der Bauteile, eine geringe Schwierigkeit dar. Unter Annahme einer hohen Genauigkeit der Verbindungselemente, ist eine ausreichende Genauigkeit des gesamten Chassis, durch dieses Konzept, ohne große Anstrengungen erreichbar. Da die benötigten Muffen allerdings nicht als Normteile existieren, müssen diese nach Abmessung und Anforderung selbst konstruiert und gefertigt werden.



Abbildung 7-2 Verbindungsmuffen<sup>45</sup>

<sup>44</sup> Heggemann Ag , 2022

<sup>45</sup> quomus, 2022

### 7.2.3 Bewertung

Da es sich beim Scorpion um ein Prototypenfahrzeug handelt, Faserverbundrohre (Naturfaser, Glasfaser, Kohlefaser) bevorzugt werden und Schweißvorgänge möglichst vermieden werden wollen, fällt die Entscheidung auf ein Gitterrohrrahmenkonstrukt mit selbstgefertigten Rohrverbindern.

## 7.3 Konstruktion

Nach ausreichender Evaluierung der Umstände und Bewertung verschiedener Konzepte, kann nun mit der Konstruktion der Fahrerzelle begonnen werden.

### 7.3.1 Erstes Rohrkonstrukt

Zu Beginn war es erforderlich ein räumliches Rohrkonstrukt zu schaffen, welches das Design in den Grundzügen nachahmt. Dazu musste beispielsweise die sogenannte „A-Säule“ als ein gebogenes Rohr ausgeführt werden.

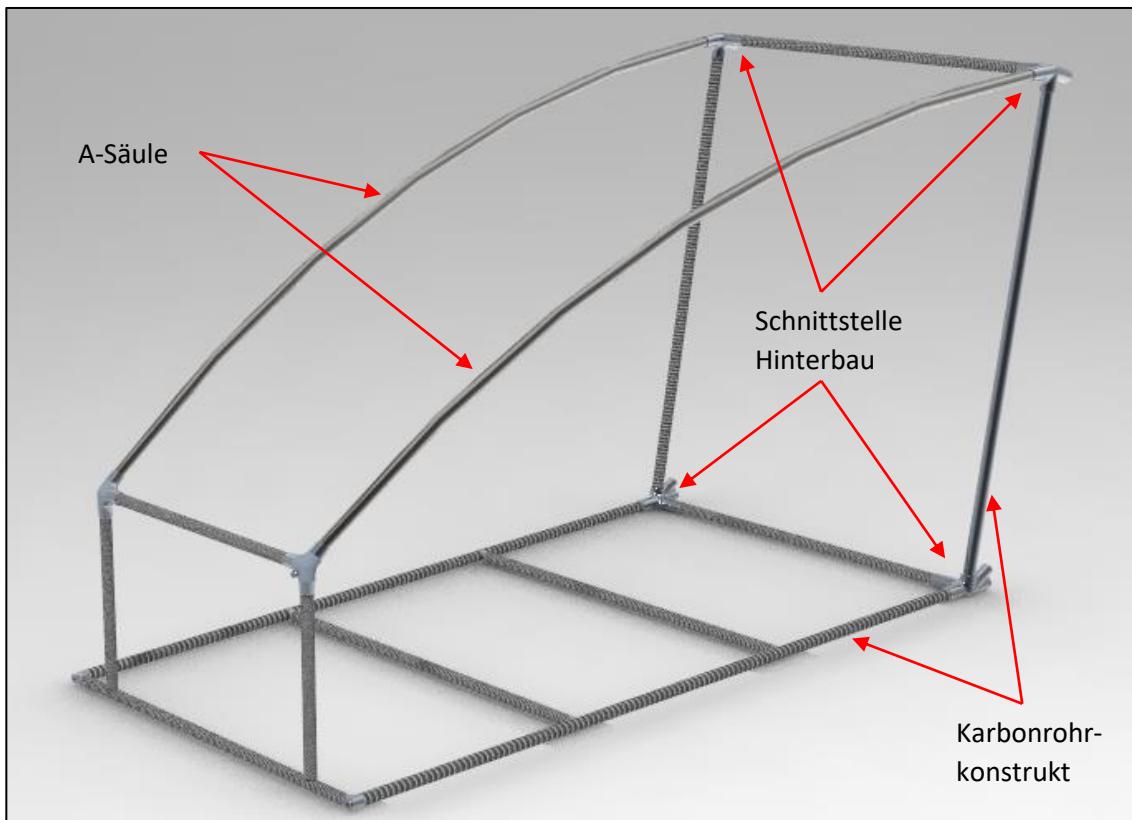


Abbildung 7-3 Erstes Rohrkonstrukt

### 7.3.1.1 Rohrverbindmuffen

Für sämtliche Verbindungsstellen zwischen den Rohren müssen nun Rohrverbindmuffen entworfen werden. Dazu wird bei den betreffenden Muffen die Konstruktion des Hinterbaus berücksichtigt, um die Rohrverbinder auch als Schnittstelle zum Hinterbau vorzugeben.



Abbildung 7-4 Verbindmuffen

### 7.3.2 Anbindungsmöglichkeit für vordere Aufhängung

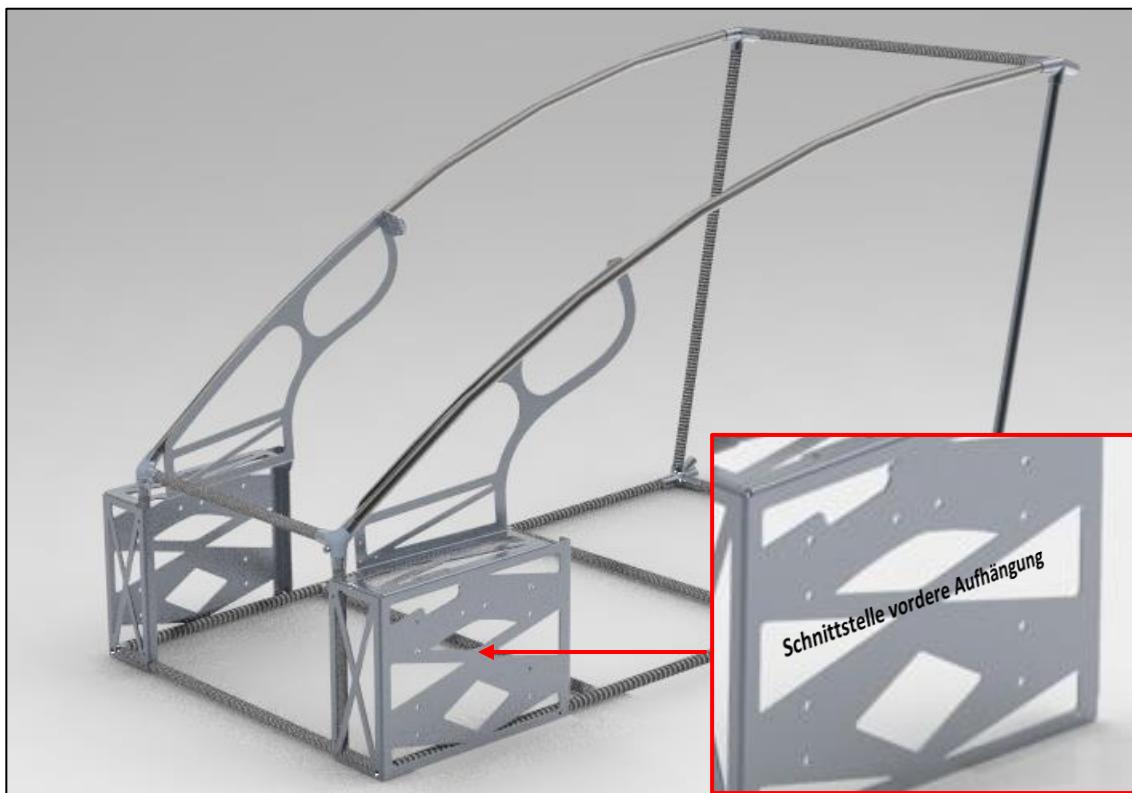


Abbildung 7-5 Anbindungsmöglichkeit für vordere Aufhängung

Da die Fahrerzelle die Aufgabe hat, die vordere Radaufhängung anzubinden waren ebene Flächen, im richtigen Abstand zueinander (Spurweite ist einzuhalten), nötig. Da die vordere Aufhängung teilweise vom Vorgänger-Scorpion übernommen wird, war die Geometrie der Anbindungspunkte bereits



vorgegeben. Zusätzlich kann speziell durch dieses Blechteil die Steifigkeit und Stabilität des gesamten Rohrsystems unterstützt werden. Dazu muss dieses entsprechend konstruiert werden. Der „Flügel“ des Bleches verstellt die A-Säule, durch das Vernieten und Verkleben mit derselben. Zusätzlich kann dieses Blech zur Anbindung des Armaturenbrettes dienen. Weiters hat die Fahrerzelle für Platz und Sicherheit des Fahrers zu sorgen, was die Notwendigkeit einer Bodenfläche/-platte bedingt.

### 7.3.3 Anfügen einer Bodenfläche

Um eine Bodenfläche zu erhalten, ist es notwendig, verschiedene Plattenmaterialien zu vergleichen und das Geeignete zu bestimmen. Dies wird mittels einer Bewertungstabelle durchgeführt.

#### 7.3.3.1 Materialen:

- Holzplatten
- Metallblech
- Wabenplattenmaterial

#### 7.3.3.2 Bewertungskriterien:

- Gewicht
- Komplexität/Montage
- Steifigkeit
- Kosten

#### 7.3.3.3 Schema der Punktevergabe:



Tabelle 7-1 Schema der Punktevergabe

#### 7.3.3.4 Holzplatten:

| Kategorie           | Punkte    | Begründung  |
|---------------------|-----------|---|
| Gewicht             | 9         | Leichtes Holz                                     |
| Komplexität/Montage | 8         | Gut bearbeitbar/leicht zu installierende Bauteile |
| Steifigkeit         | 7         | zB. 3-Schichtplatte: geringe Durchbiegung!        |
| Kosten              | 9         | Sehr günstig und leicht zu beschaffen             |
| <b>Punktzahl</b>    | <b>33</b> |   |

Tabelle 7-2 Bewertungstabelle Holzplatten

#### 7.3.3.5 Metallblech:

| Kategorie           | Punkte    | Begründung                           |
|---------------------|-----------|--------------------------------------|
| Gewicht             | 5         | Durchgängiges Blech notwendig        |
| Komplexität/Montage | 7         | Leicht zu installierende Bauteile    |
| Steifigkeit         | 5         | Hohe Durchbiegungen bei dünnem Blech |
| Kosten              | 10        | Laserblech: Sponsoring               |
| <b>Punktzahl</b>    | <b>27</b> |                                      |

Tabelle 7-3 Bewertungstabelle Metallblech



### 7.3.3.6 Wabenplattenmaterial:

| Kategorie           | Punkte    | Begründung                                  |
|---------------------|-----------|---|
| Gewicht             | 9         | Sehr leichtes Material                      |
| Komplexität/Montage | 4         | Schwierige Bearbeitung, Schlecht kompatibel |
| Steifigkeit         | 10        | Sehr hohe Steifigkeit                       |
| Kosten              | 7         | Vergleichsweise teuer                       |
| <b>Punktzahl</b>    | <b>30</b> |   |

Tabelle 7-4 Bewertungstabelle Wabenplattenmaterial

### 7.3.3.7 Ergebnis:

Die Wahl des Bodenplattenmaterials fällt nach obigem Vergleich auf das Holzplattenmaterial. Nach einiger Überlegung war die Verwendung von 15mm Dreischicht-Holzplatten definiert, und diese konnten in die bisherige Konstruktion miteingebunden werden.

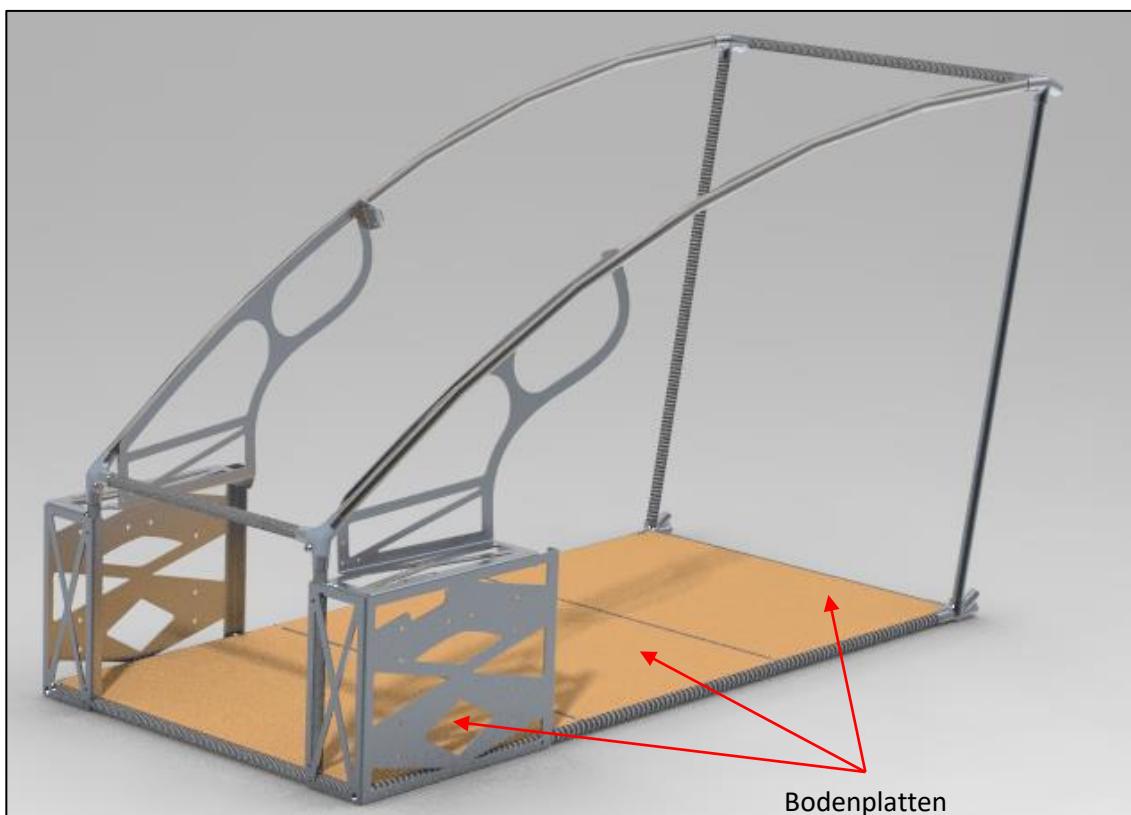


Abbildung 7-6 Anfügen einer Bodenplatte

Die einzelnen Bodenplattensegmente sind so konstruiert, dass sich die Platten in den umgebenden Rohren „liegen“, worin diese dann eingeklebt werden können, wie in Abbildung 7-7 dargestellt.



Abbildung 7-7 Verankerung der Bodenplatte

Um das Fahrzeug möglichst leicht und kompakt zu halten, wird als Bodenfläche des Fahrzeuges nur der schmale Bereich zwischen den beiden Aufhängungsblechen verwendet. Die Bodenfläche, welche sich links und rechts neben dem Fahrer (hinter dem Radkasten) ergibt, ist an der Tür angebracht und öffnet sich daher mit der Tür. Dies soll zusätzlich das Ein- sowie Aussteigen für den Fahrer erleichtern.



### 7.3.4 Pedalerie und Lenkgetriebe

#### 7.3.4.1 Aufnahmeblech

Nun müssen die Pedale und das Lenkgetriebe installiert werden, wozu ein Pedalier- und Lenkgetriebeaufnahmeblech notwendig wird. Hierzu wird versucht sämtliche Bauteile so zu gestalten das möglichst viele Aufgaben auf einmal übernommen werden können, um das Aufsummieren von Fertigungsungenauigkeiten zu verringern.



Abbildung 7-8 Aufnahmeblech



Abbildung 7-9  
Bremsystemsaktuierung

Da aufgrund des Reglements zwei Bremskreisläufe (in X-Anordnung oder achsenweise) erforderlich sind, werden zwei parallel aktivierte Bremszylinder verbaut, wovon einer die Vorderachse, der andere die Hinterachse mit den Bremsdrücken versorgt. Diese zwei Bremszylinder werden über einen Hebel aktuiert, welcher wiederum die Trittfäche in einer ergonomisch passenden Position hält.

#### 7.3.4.3 Lenkgetriebe & Spurstangen

Das Lenkgetriebe selbst wird vom Vorgänger übernommen, daher sind sämtliche Anbindungsgeometrien vorgegeben. Um eine sinnvolle Position des Lenkrades zu erreichen, ist es von Nöten, dass die Lenksäule schräg nach oben (Richtung Fahrer) ausgerichtet werden kann. Zusätzliche sollte die gesamte Baugruppe im Chassis positionierbar sein. Daher sind seitenweise zwei „Arme“ angebracht, wodurch sich das Blech an den Rohren fixiert und positioniert.

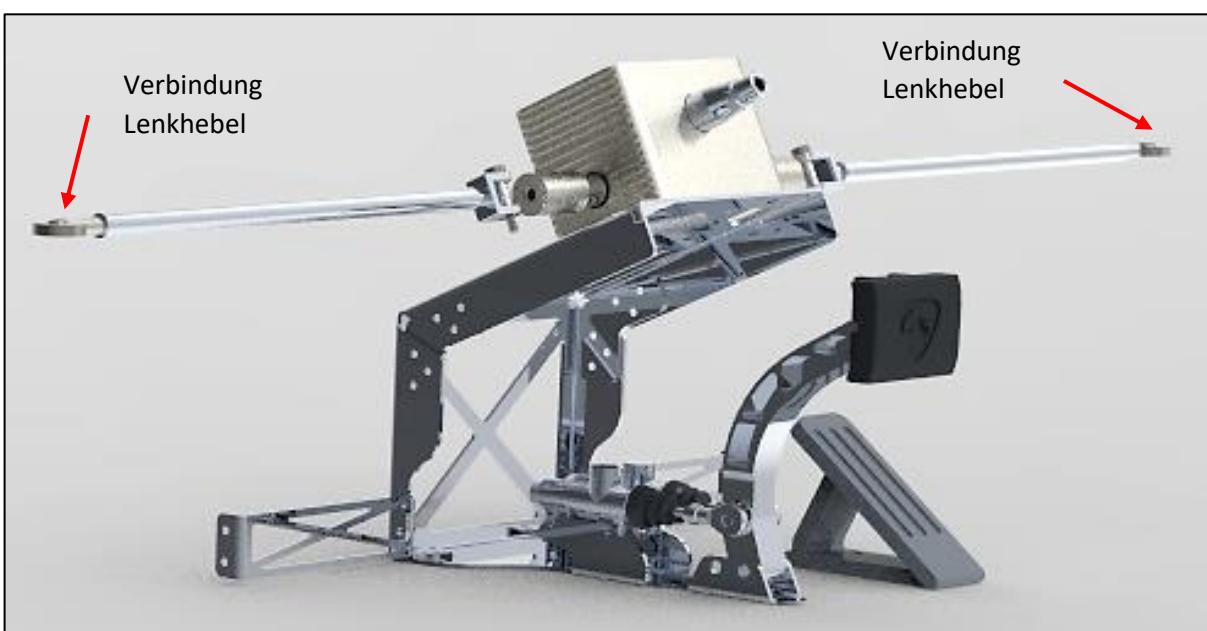


Abbildung 7-10 Pedalerie & Lenkgetriebe

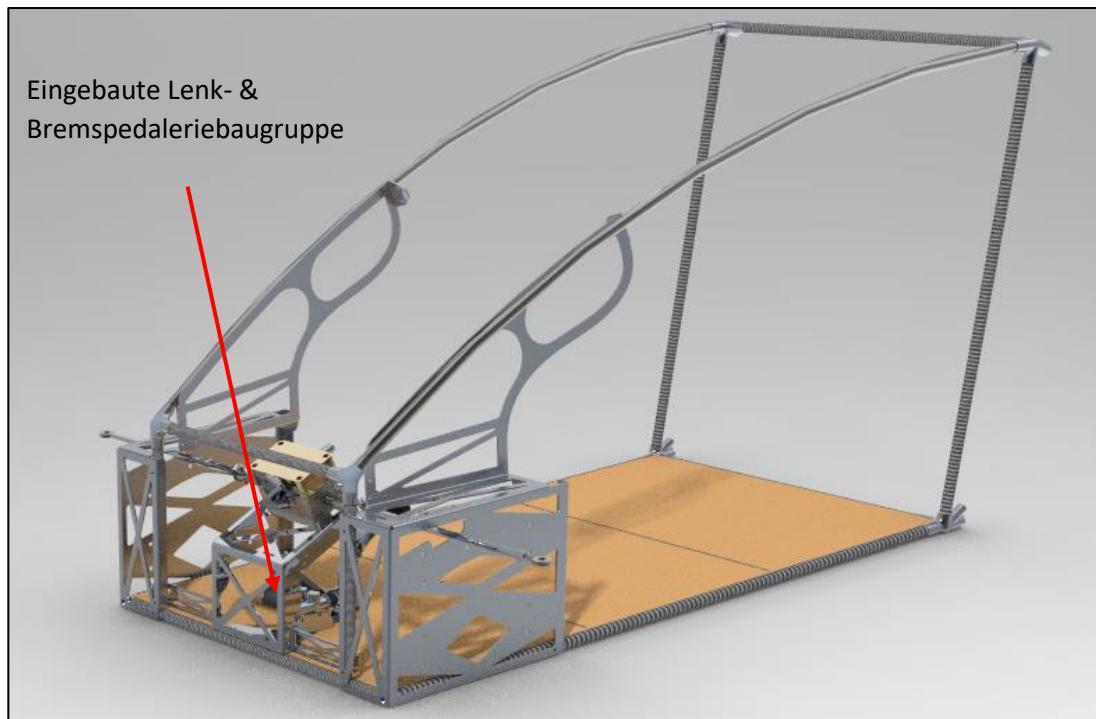


Abbildung 7-11 Verbaute Bremsbaugruppe 1

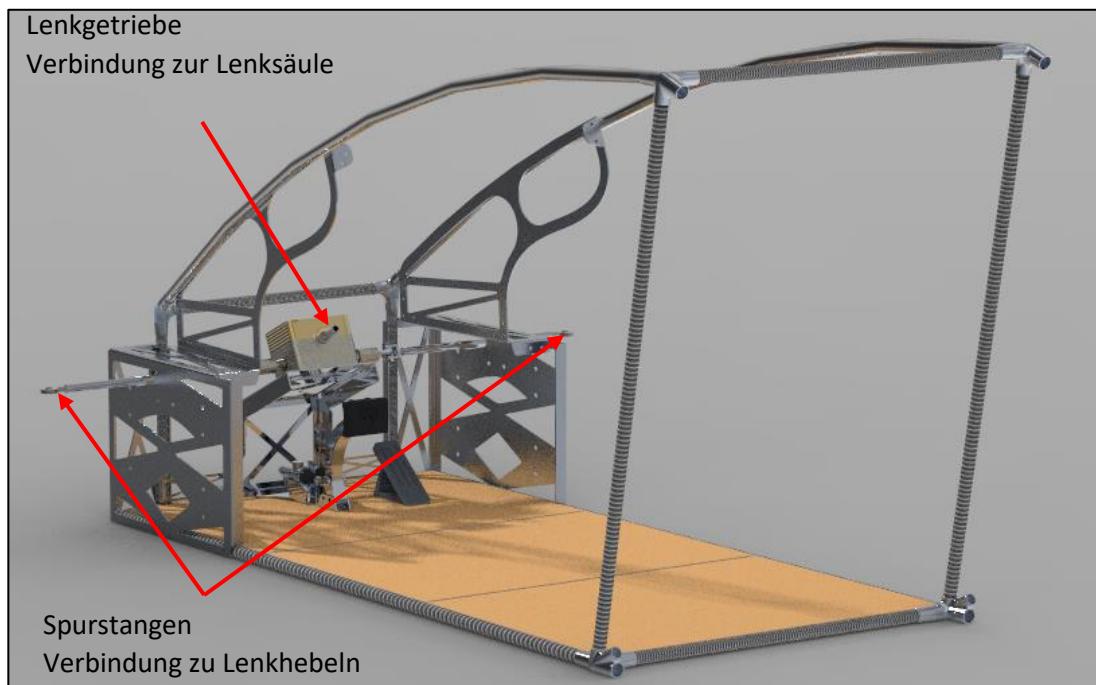


Abbildung 7-12 Verbaute Bremsbaugruppe 2

Da die Position des Lenkgetriebes durch die Achse der Lenk- bzw. Spurstangen bestimmt wird, welche sich wiederum aus der Position der Lenkhebel und infolgedessen aus der Radaufhängung ergibt, muss das Lenkgetriebe an oben ersichtlicher Position installiert werden. Das Gaspedal kann, während des Einbaus, variabel an der gewünschten Position an die Bodenplatte angeschraubt werden. Die Bremsleitungen und Potentiometersignalleitungen von Gas- und Bremspedalerie werden in der Praxis auf die benötigten Dimensionen abgelängt und sind daher im 3D-Modell nicht berücksichtigt.

### 7.3.5 Vordere Radaufhängung

Da die vordere Radaufhängung, ebenso wie das Lenkgetriebe, zum Großteil vom Vorgänger Scorpion übernommen wurde, waren die meisten Anbindungsschnittstellen bereits vorgegeben. Für sämtliche Informationen zur Radaufhängung selbst, siehe: „9. Vordere Radaufhängung“. Nun wird die Radaufhängung mittels M8 Innensechskantschrauben und Sechskantmuttern an das Chassis (bzw. Aufhängungsblech) angebracht und die Spurstangen auf die Lenkhebel fixiert.

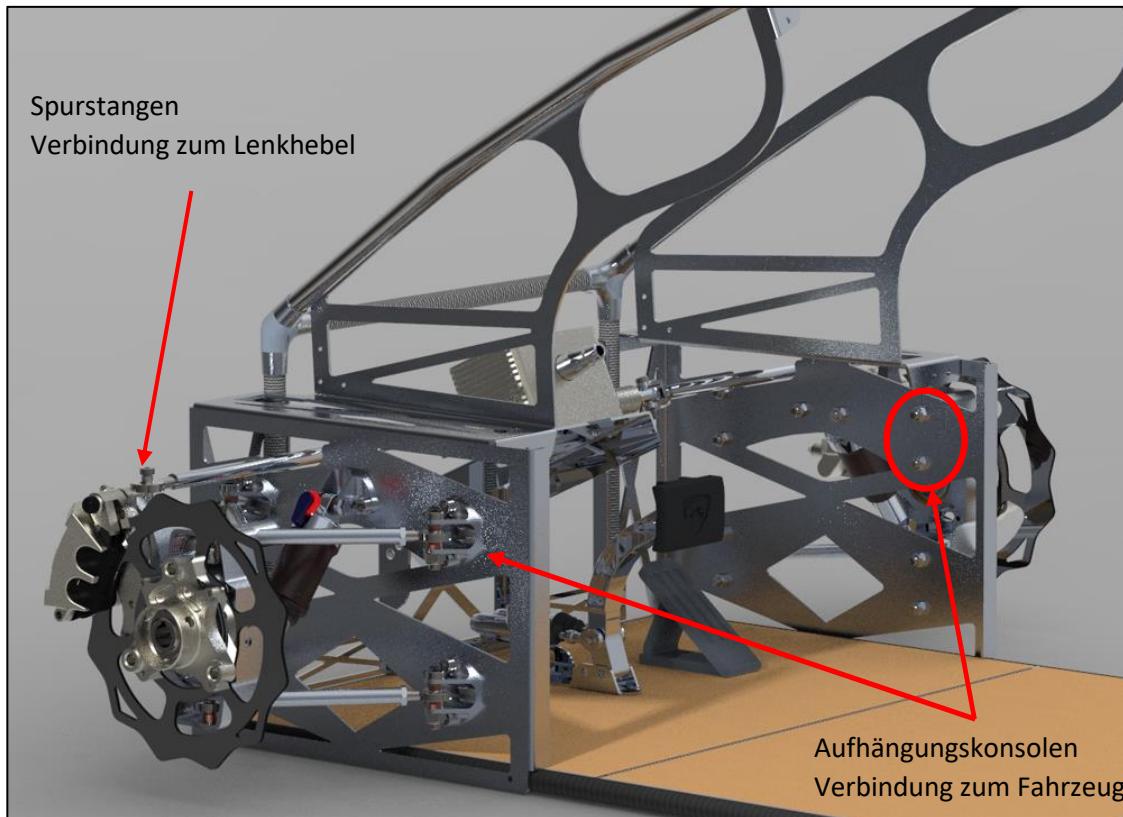


Abbildung 7-13 Verbaute vordere Radaufhängung

### 7.3.6 Sitzgelegenheit und Anbindung

Nach Bestellung des Fahrzeugsitzes war nun eine Sitzanbindungsmöglichkeit notwendig. Da bei der Bestellung, sowie auf Bildern und Zeichnungen des Sitzes keine genaueren Daten bzgl. der Position oder den Abständen von Gewindebohrungen oder Ähnlichem zueinander zu finden waren, musste der Sitz nach der Anlieferung selbst vermessen und ins CAD übertragen werden. Da sich kurzfristig die Möglichkeit ergab, den Sitz mit einem Smartphone eines Klassenkollegen 3D zu scannen und dieses Dateiformat in Creo zu importieren, entstand ein schematisches 3D Modell des Sitzes. Dieses 3D Modell spiegelt die Größe des Sitzes sehr gut wider, ist allerdings nicht millimetergenau. Deshalb war eine zusätzliche händische Abmessung der Bohrungsabstände nötig. Die Bohrungen befinden sich auf der Unterseite des Sitzes und konnten daher nicht „eingescannt“ werden.



Abbildung 7-14 Fahrersitz 3D-gescannt

Weiters wurde festgestellt, dass bei normalem Bodenaufbau, der Abstand zwischen Sitz und Fahrzeugdach sehr knapp ist, was bei eventuellen Ungenauigkeiten in der Praxis zu Problemen führen könnte. Daher war es notwendig, den Sitz etwas tiefer zu legen. Da das Fahrzeug laut Reglement die nötige Bodenfreiheit von 100mm um beinahe 70mm überschreitet, kann die Bodenfläche des Sitzes unter die des Fahrzeuges sinken, wodurch mehr Platz nach oben generiert wird. Diese 70mm wurden als Sicherheit voreingearbeitet. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass der Abstand und die Sitzposition im Verhältnis zum Lenkrad sowie zur Pedalerie, auch weiterhin ein ergonomisch passendes und platzeffizientes Sitzen im Fahrzeug gewährleistet. Mit den (wie oben beschrieben) ermittelten benötigten Maßen des Sitzes wurde nun ein Blechteil erarbeitet, welches all diese Aufgaben erfüllt und statt dem hintersten hölzernen Holzbodensegment verwendet wird. Daran wird nun mittels vier M8 Schrauben an den Schraubpunkten, an der Unterseite des Sitzes, der Sitz mit dem Fahrzeug verbunden.



Abbildung 7-15 Verbauter Sitz

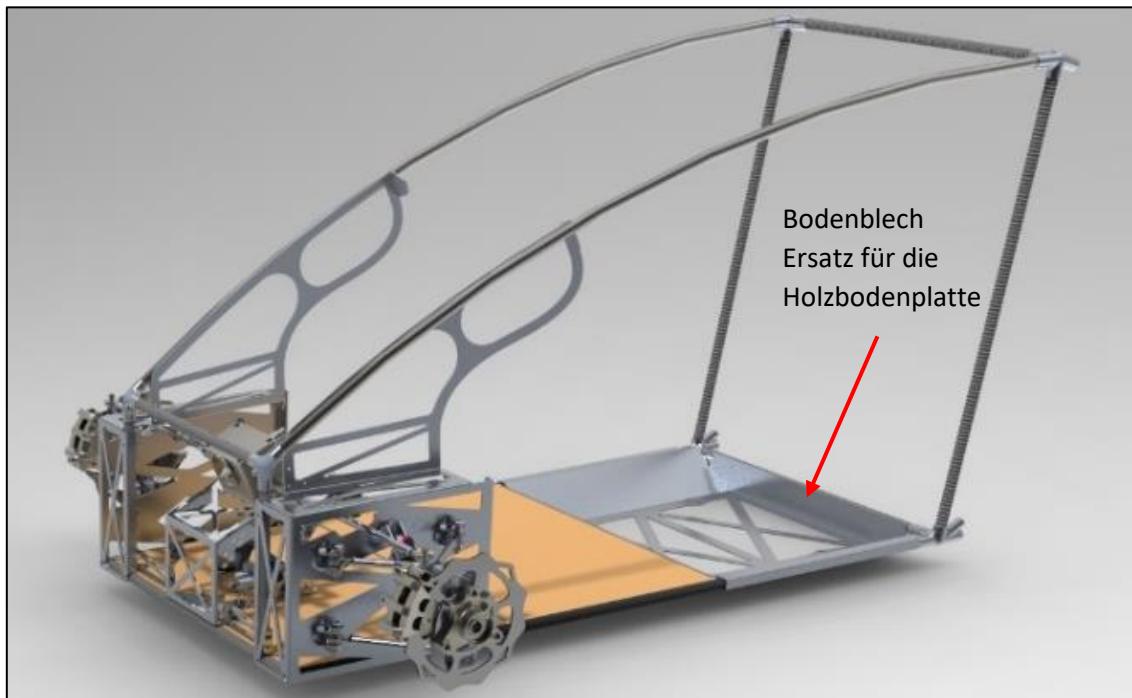


Abbildung 7-16 Fahrerzelle mit Bodenblech

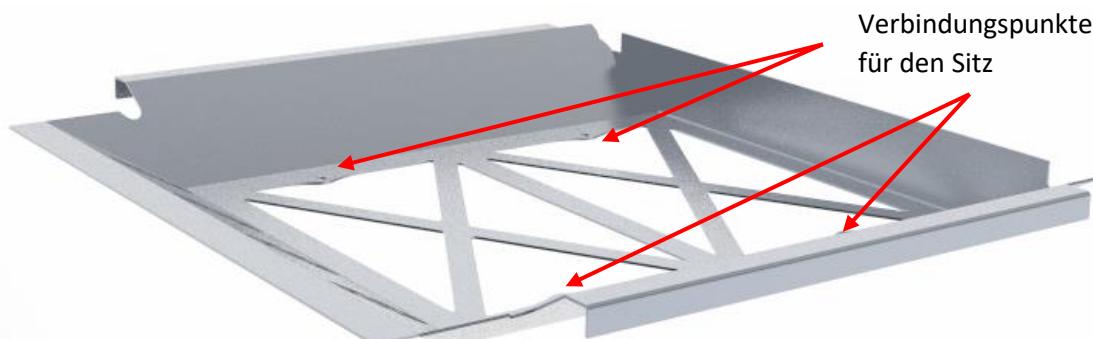


Abbildung 7-17 Bodenblech Fahrerzelle

### 7.3.7 Lenkung, Lenkstange und Armaturenbrett

Als weiteren essentiellen Konstruktionsfortschritt kann die Umsetzung der Lenkung (bis zum Lenkgetriebe) gesehen werden, da diese sich unerwarteterweise komplexer als angenommen erwies. Zuerst war ein Anbauteil notwendig, welches die Halterung für die Lenkradbaugruppe darstellt und ausreichende Stabilität gewährleistet. Diese Aufgabe wurde vom Armaturenbrett übernommen, welches schon seit Konstruktionsbeginn mit eingeplant worden war (Daher die Laschen an den Aufhängungsblechen). Da nun das Armaturenbrett bereits als „Gehäuse“ für die Lenkungslagergruppe mit Lenkbefehlsumlenkung feststeht, kann mit der genaueren Umsetzung der Lenkradbaugruppe begonnen werden.

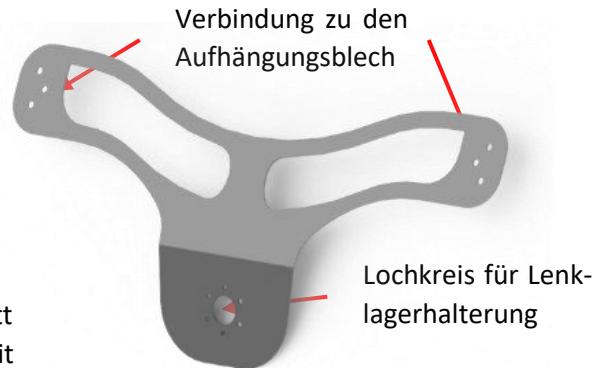


Abbildung 7-18 Grundversion Armaturenbrett

#### 7.3.7.1 Anforderungen an die Lenkradbaugruppe

Zuerst war eine Evaluierung der Anforderungen notwendig. Die grundlegende Anforderung der Lenkradbaugruppe beläuft sich auf die Verbindung zwischen dem Lenkgetriebe (im speziellen dem „Lenkstangenende“) und der Lenkradaufnahmewelle. Da das Lenkrad per Schnellverschlussystem abnehmbar gestaltet ist, ist die Lenkradaufnahmewelle (mit Keilwellenprofil und Positionierungsnase), so auszurichten, dass bei geradestehenden Rädern das Lenkrad in seiner 12Uhr Position steht. Da dies einer Einstellmöglichkeit bedarf, muss die Verbindung zwischen Lenksäule und Lenkradaufnahme einerseits lösbar, andererseits den Umständen entsprechend, fest verbunden sein. Da es sich beim Scorpion um ein Fahrzeug mit Direktlenkung handelt, war ein Einstellen des Lenkradwinkels über die Spurstangen zu riskant, da dadurch eine zu große Lenkwegsabweichung (definiert über die Lenkanschläge) in die beiden Richtungen entstehen kann. Weiters steht das Lenkrad, (fast) senkrecht im Fahrzeug, ein Resultat einer Maßnahme, welche ergonomisches Sitzen im Fahrzeug ermöglicht. Allerdings ist aufgrund des zur Verfügung stehenden Bauraumes die Notwendigkeit einer steil stehenden Lenksäule gegeben. Daher muss die Lenkradbaugruppe auch den Winkelausgleich zwischen Lenksäule und Lenkradaufnahmewelle ausgleichen. Zusätzlich muss diese noch gelagert werden, was durch ein Wälzlager und dessen Halterungsflansch, welcher im Armaturenbrett sitzt, gewährleistet wird. Im Folgenden werden die Aufgaben der beschriebenen Baugruppe wiederholt zusammengefasst:

- Übertragung des Lenkbefehls an das Lenkgetriebe
- Lösbarkeit der Verbindung (Einstellen des Lenkradwinkels)
- Drehbarer Winkelausgleich zwischen Lenksäule und Lenkradaufnahmewelle
- Lagerung im Armaturenbrettlech

#### 7.3.7.2 Zukaufteile

Da bei der Lenkung vergleichsweise viele Zukaufteile, wie zum Beispiel das Lenkrad selbst (Abbildung 7-20), die Lenkradeilwelle (schwarzer Zapfen in Abbildung 7-24) der Lenkradschnellverschluss (Abbildung 7-19), das Kreuzgelenk (Abbildung 7-21), die Klemmkupplung (Abbildung 7-22) sowie das Lenkungslager (RKL in Abbildung 7-24) zum Einsatz kommen, wird die Konstruktionsfreiheit etwas eingeschränkt.



Abbildung 7-20 Lenkrad inkl.  
Schnellverschluss

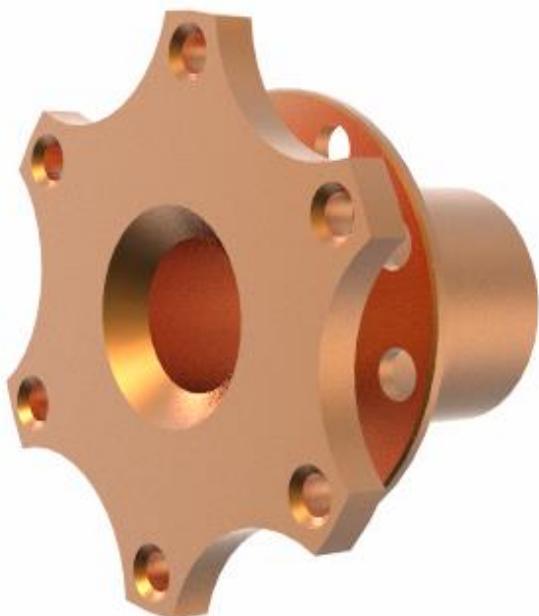


Abbildung 7-19 Schnellverschluss



Abbildung 7-21 Kreuzgelenk Lenkrad

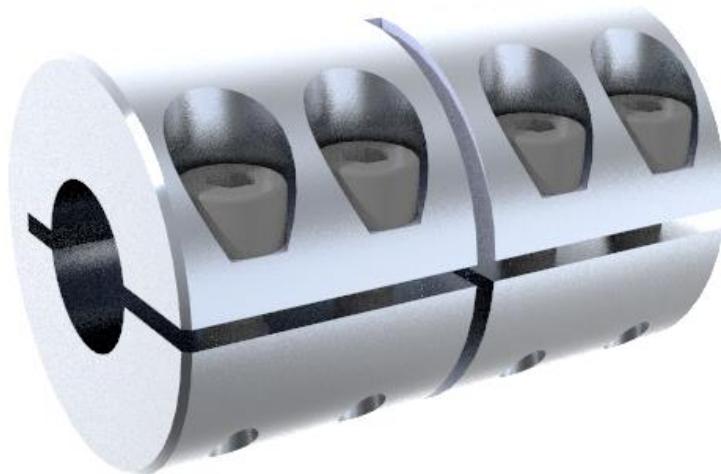


Abbildung 7-22 Klemmkupplung Lenkung

### 7.3.7.3 Konstruktive Lösung

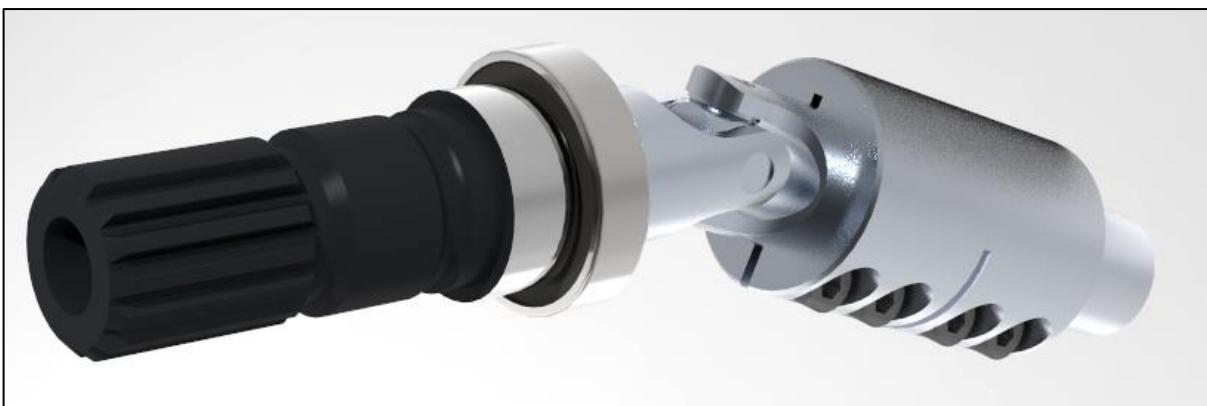


Abbildung 7-24 Lenkungsbaugruppe

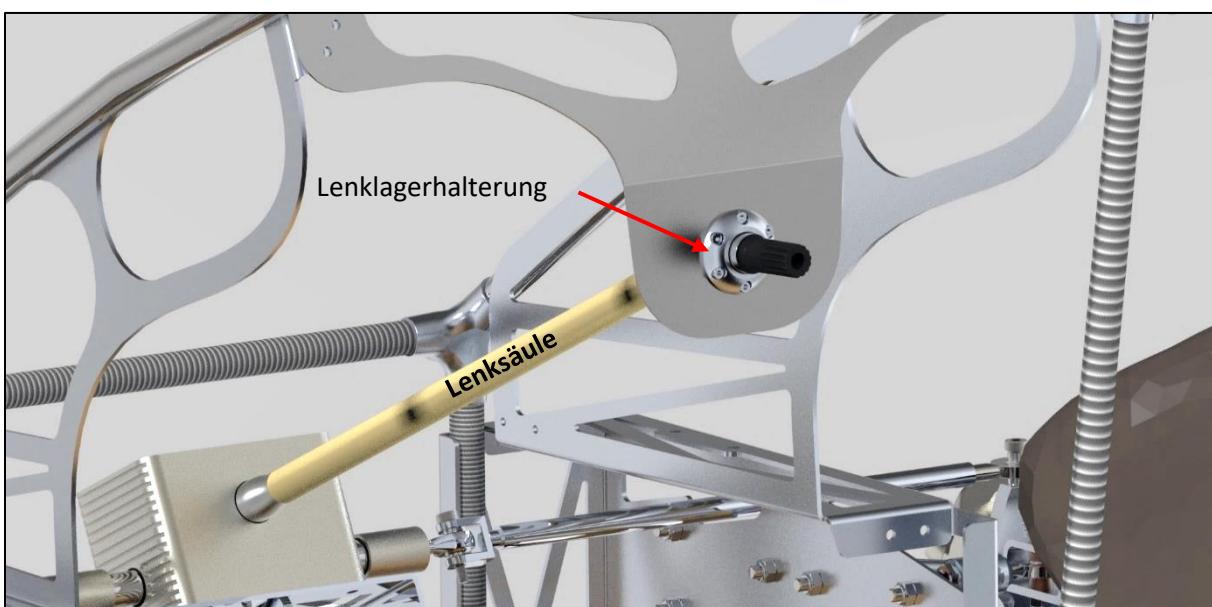


Abbildung 7-23 Verbaute Lenkungsbaugruppe

Die Lösbarkeit der Verbindung wird durch die Klemmkupplung gewährleistet, welche im Betriebsfall eine reibschlüssige Verbindung zwischen Kreuzgelenk und Lenkstangenanfang (beide mit entsprechendem Durchmesser ausgeführt) bildet. Die Aufgabe des Winkelausgleiches von ca. 4° zur Horizontalen der Lenkradachse, auf 25° zur Horizontalen von der Lenksäulenachse wird durch das Kreuzgelenk übernommen. Dies muss sinnvollerweise drehbar sein und wird daher außen mittels eines Wälzlagers gelagert. Nach Rücksprache mit SKF war es möglich ein Kugellager mit Bohrungsdurchmesser 18mm zu erhalten, da dies aufgrund des Außendurchmessers des Kreuzgelenkes notwendig war, allerdings ist ein Kugellager dieser Dimension selten in Verwendung, wodurch es nicht im Online-Suchregister zu finden war. Weiters musste nun eine Verbindung zwischen dem Kreuzgelenk und der Lenkradkeilwelle umgesetzt werden. Da das Kreuzgelenk eine Radialbohrung für eine M4 – Senkkopfschraube aufwies, ergab sich die Möglichkeit die Lenkradkeilwelle nach schneiden eines M12 Innengewindes mittels eines Adapterzapfens im Kreuzgelenk zu verankern. Die Lenkradkeilwelle selbst, wurde nachgearbeitet da in Serie ein Flansch vorhanden war, der für diese Zwecke keinen technischen Nutzen darstellte. Allerdings musste darauf geachtet werden, dass weiterhin ein definierter Anschlag für den Lenkradschnellverschluss vorhanden war. Diese ganze Baugruppe wird nun über das RKL im Außenring im Lenkungslagerflansch und dem Armaturenbrett gelagert.

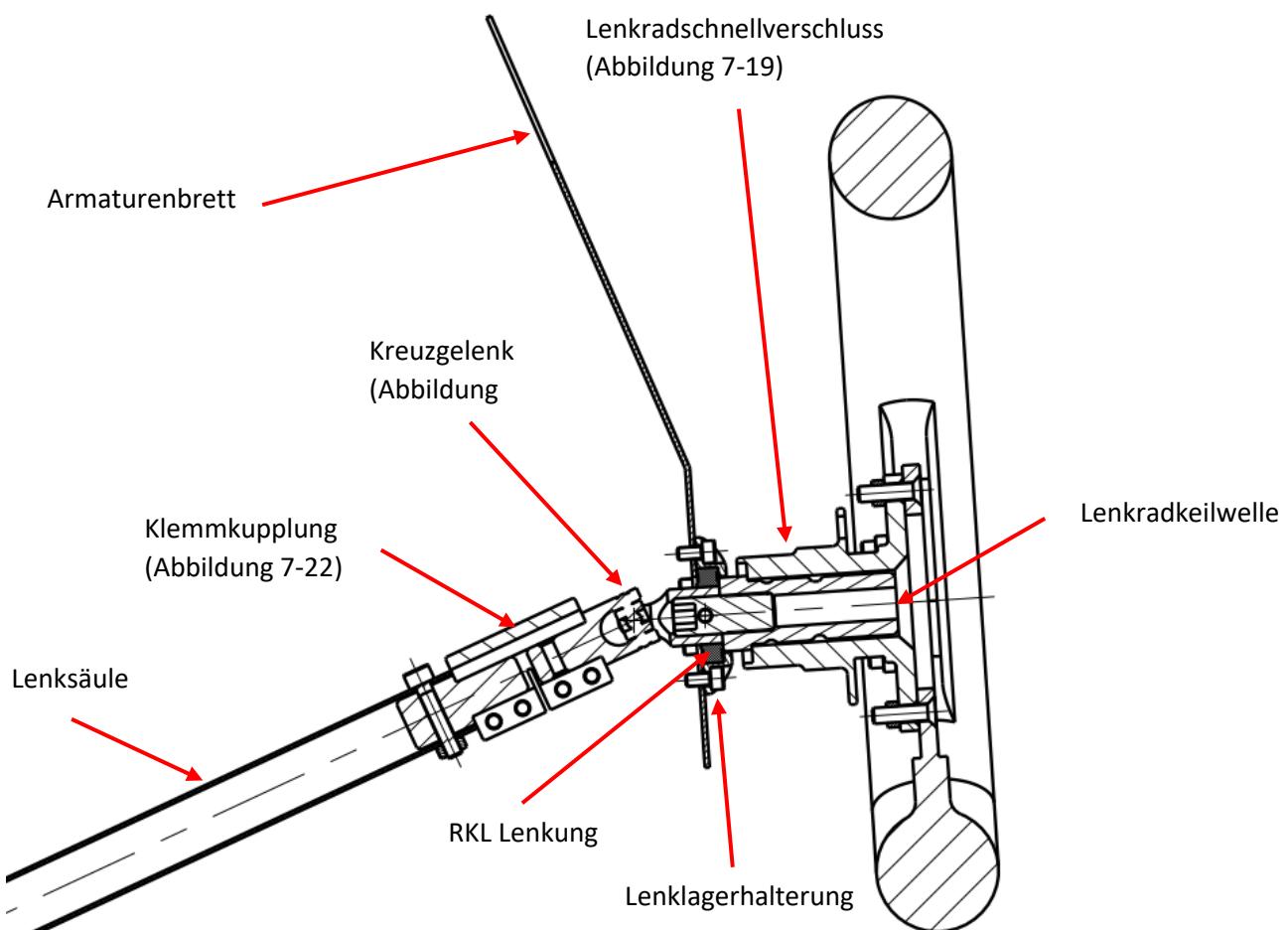


Abbildung 7-25 Zusammenstellungszeichnung Lenkungsbaugruppe

Auf dieser Zusammenstellungs-zeichnung ist das oben beschriebene Funktionsprinzip zur Erfüllung der bereits festgehaltenen Anforderungen erkennbar. Der Lenkradschnellverchluss ist in der Realität zweiteilig ausgeführt, wurde aber im CAD nur als ein Teil konstruiert, da es als Zukaufteil nur als ein solches gehandhabt wird.

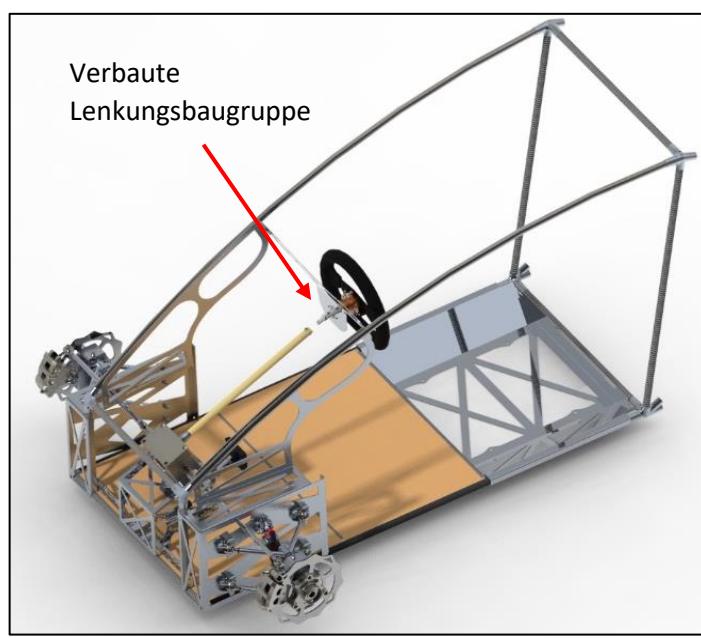


Abbildung 7-26 Verbaute Lenkungsbaugruppe

### 7.3.8 Konstruktionsresultat Teilchassis Fahrerzelle

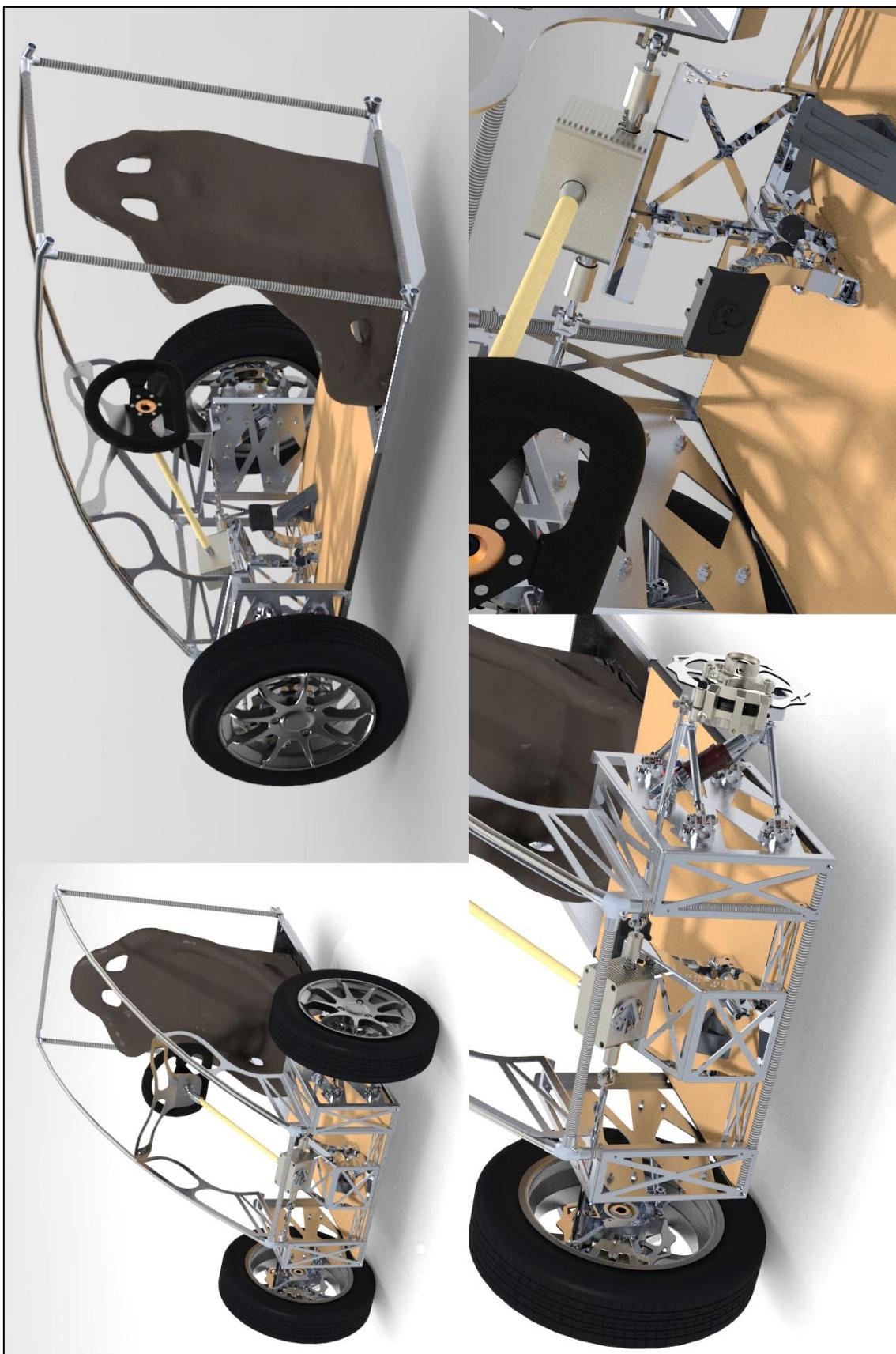


Abbildung 7-27 Renderbild Collage Fahrerzelle



## 8 Hinterbau

### 8.1 Anforderungen

Der hintere Teil des Chassis wird als Hinterbau bezeichnet. Dieser bildet mit der Fahrerzelle ein gemeinsames Chassis und muss verschiedene Aufgaben erfüllen.

#### 8.1.1 Festigkeit und Steifigkeit

Die wichtigste Aufgabe des Hinterbaus ist die Aufnahme von Kräften. Der Hinterbau muss daher so gestaltet sein, dass er eine ausreichende Festigkeit gegenüber den maximalen Belastungen aufweist und sich dabei auch nicht zu stark verformt. Am Hinterbau wirken Radkräfte, die während der Fahrt sowie im Stand des Fahrzeugs auftreten und sich über die Radaufhängung und der Hinterbaukonstruktion verteilen. Hierbei ist wichtig anzumerken, dass der Hinterbau nicht nur die Aufstandskräfte der Räder aufnehmen muss, sondern auch den Querkräften, welche bei Kurvenfahrten auftreten, standhalten muss. Es ist daher für einen steifen Hinterbau essenziell, nicht nur auf Biegung, sondern auch auf Verdrehung ausgelegt zu sein.

#### 8.1.2 Sicherheit

Im Falle einer unkontrollierten Fahrsituation oder eines Einschlags muss der Hinterbau die Fahrerzelle unterstützen, um den Fahrer zu schützen. Dies wird durch die Steifigkeit des Hinterbaus sowie der hinteren Knautschzone erreicht. Die Knautschzone besteht hierbei aus der Hinterbaukonstruktion und der hinteren Verkleidung, welche die Energie bei einem Heckeneinschlag absorbiert.

#### 8.1.3 Antrieb und hintere Radaufhängung

Beim Scorpion handelt es sich um ein heckangetriebenes Fahrzeug, wodurch sich die Antriebseinheit im hinteren Teil des Fahrzeugs befindet. Der Hinterbau muss somit stabile Anbindungsstellen für die hintere Radaufhängung sowie für den Antriebsstrang bieten, um ein sicheres und stabiles Fahrverhalten zu erreichen. Die Anbindung für den Motor muss einerseits die Antriebskräfte übertragen können, andererseits ist eine definierte Zentrierung zwischen Motor und Radnabe sicherzustellen.

#### 8.1.4 Anbindung zur hinteren Verkleidung

Um die Torsionssteifigkeit des gesamten Fahrzeugs zu verbessern, handelt sich bei der hinteren Verkleidung um eine mittragende Karosserie. Daher ist es wichtig, definierte Verbindungsstellen zwischen dem Hinterbau und der hinteren Verkleidung einzuplanen, um die auftretenden Kräfte übertragen zu können.

#### 8.1.5 Platzschaffung

Im Hinterbau müssen diverse Komponenten des Fahrzeugs (z.B. Akku, Platinen für die Elektronik, Verkabelungen etc.) untergebracht werden. Da es an anderen Stellen des Fahrzeugs nur ein sehr geringes Platzangebot gibt und der Hinterbau vom Fahrer abgeschirmt ist, ist es sinnvoll, diese Komponenten im Hinterbau unterzubringen.



## 8.2 Konzeptionierung

Wie in „6 Chassis Konzept“ zu sehen ist, wurde beim Chassis für einen Gitterrohrrahmen entschieden. Für den Hinterbau wurden weiters noch verschiedene Abwandlungen eines Gitterrohrrahmens ausgearbeitet, um sich für die beste Variante entscheiden zu können. Hierbei wurde auf das Verwenden verschiedener Materialformen (Rohre, Bleche) geachtet, wobei die Gitterstruktur aufgrund der Vorteile erhalten bleiben sollte. Diese Konzepte wurden mittels Bewertungstabellen beurteilt und miteinander verglichen. Es wurden drei verschiedene Möglichkeiten entwickelt:

### 8.2.1 Gitterrohrrahmen

Hierbei handelt es sich um ein räumliches Fachwerk aus Rohren, welche miteinander verbunden sind. Diese Rohrverbindungen können, wie bereits in „7.2.1 Schweißkonstruktion“ und „7.2.2 Verbindungsmuffen“ beschrieben, verschieden gestaltet sein. Der Vorteil an diesem Konzept ist die hohe Belastbarkeit der Rohre, da diese hauptsächlich auf Zug oder Druck belastet werden und sich somit die Last über den gesamten Rohrquerschnitt verteilt. Weiters ist ein Gitterrohrrahmen verhältnismäßig torsionssteif, da sich die Last auf die einzelnen Rohre verteilt und somit die Verformung gering ist. Um das Gewicht noch weiter senken zu können, ist der Einsatz von nicht metallischen Werkstoffen notwendig, wodurch die Rohre mittels Muffen oder Blechen verklebt bzw. vernietet werden müssen, Schweißverbindungen allerdings nicht möglich sind.

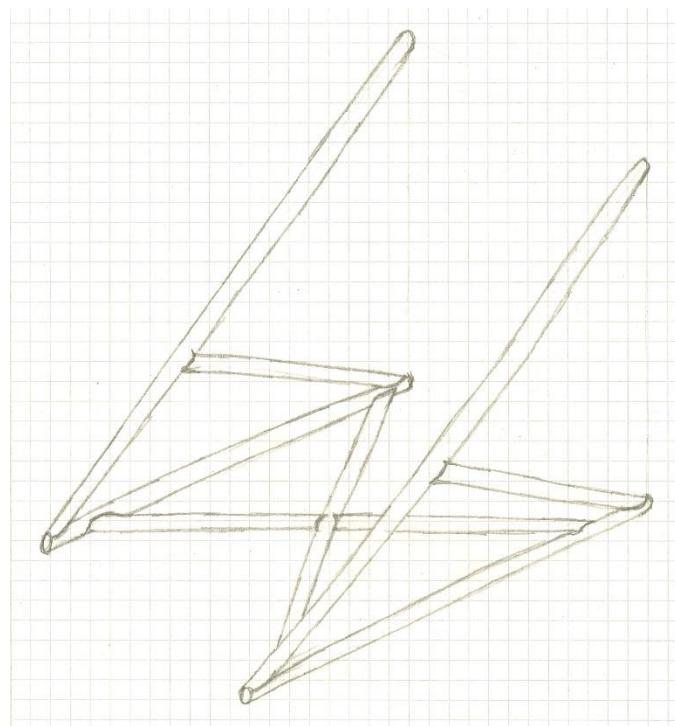


Abbildung 8-1 Gitterrohrrahmen Handskizze

## 8.2.2 Gitterrahmen aus Blechteilen

Diese Möglichkeit ist eine Abwandlung des klassischen Gitterrohrrahmens. Es handelt sich um eine Blechkonstruktion aus Blechteilen, wobei die Blechteile eine Gitterstruktur bilden. Dies kann durch das Anordnen verschiedener Blechteile sowie durch das Verwenden bestimmter Blechkonturen erreicht werden. Eine solche Blechkonstruktion ist in der Fertigung schnell und kostengünstig herzustellen und durch den Laserzuschnitt lassen sich komplexe Geometrien realisieren. Nachteilig an einer solchen Konstruktion ist die geringe Torsionssteifigkeit, wodurch es bei einer Belastung zu starken Verformungen kommt bzw. der Hinterbau massiver ausgeführt werden muss.

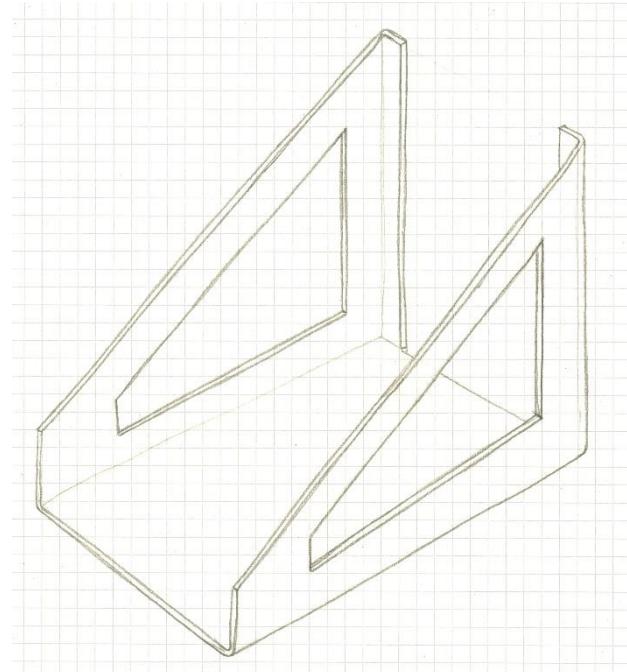


Abbildung 8-2 Blech-Gitterrahmen Handskizze

## 8.2.3 Kombinationsgitterrahmen

Der Hinterbau besteht bei dieser Variante aus einem Blechtrog, welcher an der Trennwand befestigt wird. Dieser Blechtrog dient als Anbindmöglichkeit für die hintere Radaufhängung sowie als Platzangebot für die Antriebskomponenten. Der Blechtrog wird von einem Rohr, welches als C-Säule angeordnet ist, zusätzlich unterstützt. Aufgrund der Rohr C-Säule ist diese Variante torsionssteifer als die Blechkonstruktion, allerdings weicher als der Gitterrohrrahmen. Die Verbindungsstellen sind deutlich komplexer als bei der Blechkonstruktion, da es sich um Rohr-Blech-Verbindungen handelt.

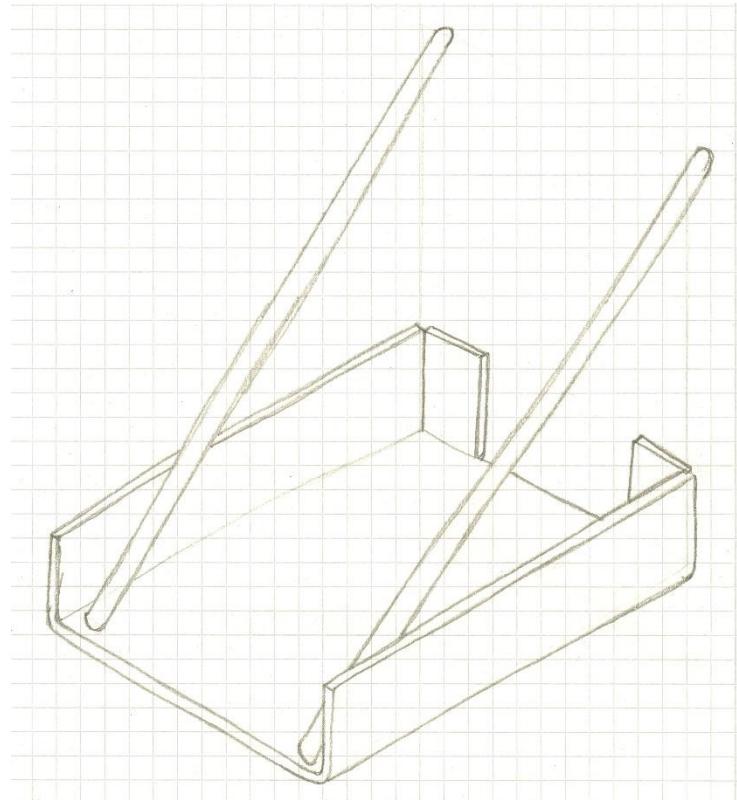


Abbildung 8-3 Kombinationsgitterrahmen Handskizze



## 8.2.4 Bewertung

### 8.2.4.1 Bewertungskriterien

- **Gewicht**

Das wichtigste Kriterium ist das Gewicht, da das Fahrzeug ein geringes Gewicht haben sollte, um den Energieverbrauch so gering wie möglich zu halten.

- **Komplexität**

Hierbei handelt es sich um die Komplexität bzw. den Aufwand der Hinterbaukonstruktion. Der Konstruktionsaufwand sollte so gering wie möglich sein, damit man sich auch auf die anderen Bereiche des Fahrzeugs konzentrieren kann. Dies spart Zeit und verbessert die Konstruktion des gesamten Fahrzeugs.

- **Steifigkeit**

Wie in „8.1.1 Festigkeit und Steifigkeit“ beschrieben, ist das Ziel des Hinterbaus, so steif wie möglich zu sein. Dies verringert einerseits das Gewicht und verbessert andererseits die Sicherheit und das Fahrverhalten.

- **Montage/Zugänglichkeit**

Um bei der Montage des Hinterbaus und den darin befindlichen Komponenten keine Schwierigkeiten zu bekommen, ist eine montagefreundliche Konstruktion wichtig. Dadurch können Zeit und aufwendige Messarbeit beim Zusammenbau gespart werden.

- **Kosten**

Um bei der Fertigung nicht in finanzielle Probleme zu geraten, muss dieser Punkt miteinbezogen werden. Bei diesem Kriterium ist auch die Erreichbarkeit von Sponsoren einbezogen, welche die Kosten für bestimmte Teile oder Konstruktionen teilweise oder vollständig übernehmen können.

### 8.2.4.2 Punkteverteilung

Jedem Konzept werden für die gegebenen Kategorien Punkte vergeben. Diese Punkte werden aufsummiert und je nach Höhe der Punktzahl ist erkennbar, wie brauchbar das jeweilige Konzept für die Anforderungen ist.





### Gitterrohrrahmen

| Kategorie              | Punkte    | Begründung                                     |
|------------------------|-----------|--|
| Gewicht                | 10        | Faserverbundrohre sehr leicht                  |
| Komplexität            | 5         | Komplexe Verbindungen zwischen den Rohren      |
| Steifigkeit            | 9         | Fachwerk ist biege- und torsionssteif          |
| Montage/Zugänglichkeit | 7         | Aufwendiger Zusammenbau                        |
| Kosten                 | 6         | Verbindungsteile sind teuer, Rohre sind billig |
| <b>Punktezahl</b>      | <b>38</b> |  |

Tabelle 8-1 Konzept Gitterrohrrahmen

### Gitterrahmen aus Blechteilen

| Kategorie              | Punkte    | Begründung   |
|------------------------|-----------|--|
| Gewicht                | 6         | Blechtrog ist schwer                               |
| Komplexität            | 9         | Einfach konstruierbarer Blechteil                  |
| Steifigkeit            | 5         | Biegesteifigkeit gut, Torsionssteifigkeit schlecht |
| Montage/Zugänglichkeit | 8         | Einfacher Zusammenbau                              |
| Kosten                 | 9         | Billige und schnelle Blechfertigung                |
| <b>Punktezahl</b>      | <b>37</b> |  |

Tabelle 8-2 Konzept Gitterrahmen aus Blechteilen

### Blechtrog mit Blech-C-Säule

| Kategorie              | Punkte    | Begründung                          |
|------------------------|-----------|-------------------------------------|
| Gewicht                | 5         | Blechtrog ist schwer                |
| Komplexität            | 9         | Einfach konstruierbarer Blechteil   |
| Steifigkeit            | 4         | Schlechte Torsionssteifigkeit       |
| Montage/Zugänglichkeit | 8         | Einfacher Zusammenbau               |
| Kosten                 | 9         | Billige und schnelle Blechfertigung |
| <b>Punktezahl</b>      | <b>35</b> |                                     |

Tabelle 8-3 Blechtrog mit Blech-C-Säule

#### 8.2.4.3 Auswertung

Die Entscheidung fiel auf den Gitterrohrrahmen, da dieser die meisten Punkte erreichte und die Vorteile vor allem in den Punkten Gewicht und Steifigkeit liegen, welche bei der Leichtbauweise maßgeblich sind.

Der Gitterrohrrahmen bietet im Vergleich zu den anderen Varianten in den Punkten Gewicht und Steifigkeit die größten Vorteile. Der Hinterbau kann aufgrund der geometrischen Gegebenheiten sehr gut auf Biegebelastungen ausgelegt werden. Zusätzlich ist eine Gitterrohrkonstruktion vergleichsweise verdrehungssteif, wodurch sich diese Variante für Kurvenfahrten sehr gut eignet. Da es sich hierbei um keine Schweißkonstruktion handelt, sondern Verbindungsmuffen verwendet

werden, können die Rohre aus Faserverbundmaterialien bestehen, um das Gewicht weiter senken zu können. Ein weiterer Vorteil ist die Anbindung zur Fahrerzelle, da es sich hierbei ebenfalls um eine Gitterrohrkonstruktion handelt. Dies beiden Baugruppen können daher bei den Verbindungstellen problemlos verbunden werden.

## 8.2.5 Gittergeometrie

Das Grundkonzept des Hinterbaus ist bekannt, allerdings ist das genaue Aussehen und die Geometrie des Fachwerkes noch nicht bekannt. Da die Rohranordnung für ein biege- und verdrehsteifes Fachwerk essenziell ist, müssen nun verschiedene Gitterrohrrahmenkonzepte ausgearbeitet und bewertet werden. Die ausgewählte Geometrie kann später in CAD konstruiert werden.

### 8.2.5.1 Geometrie 1

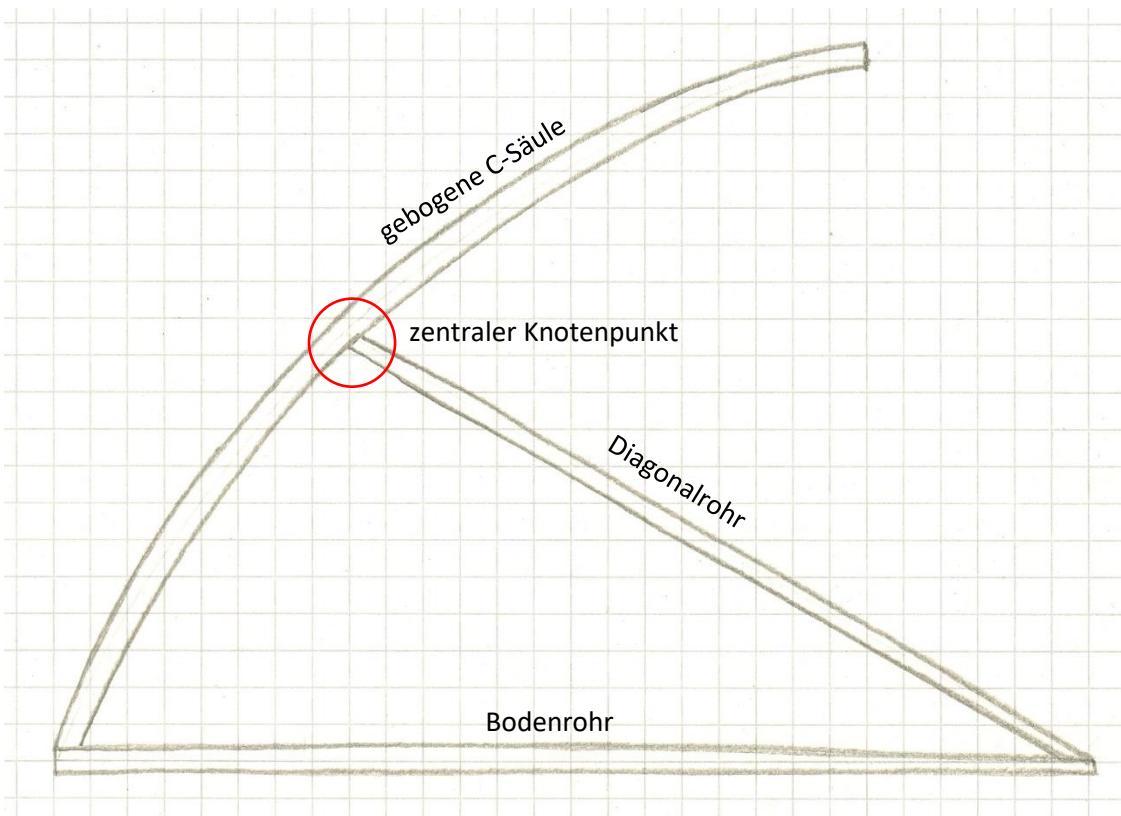


Abbildung 8-4 Gittergeometrie 1 Handskizze

Die C-Säule besteht aus einem gebogenen Rohr, welches am zentralen Knotenpunkt mit dem Diagonalrohr und am unteren Ende mit dem Bodenrohr verbunden ist. Das Diagonalrohr erhöht bei dieser Anordnung die Biegesteifigkeit des Hinterbaus maßgeblich. Das Bodenrohr fungiert als Anbindungspunkt für das Bodenblech, an welchem das Akkupaket und weitere Antriebskomponenten befestigt werden können. Diese Anordnung ist vorteilhaft, da hierfür nur drei Rohre und somit weniger Teile erforderlich sind. Allerdings wird die C-Säule aufgrund der gebogenen Form sehr stark auf Biegung belastet, wodurch dieses Rohr stabiler ausgeführt werden muss. Weiters ergibt sich aufgrund der gebogenen Form ein federndes Verhalten der C-Säule, wodurch sich die Steifigkeit verringert. Wegen der erforderlichen Biegeoperation der C-Säule kann hierfür kein Faserverbundrohr verwendet werden, wodurch ein Metallrohr erforderlich ist und sich somit das Gewicht des Hinterbaus erhöht.



## 8.2.5.2 Geometrie 2

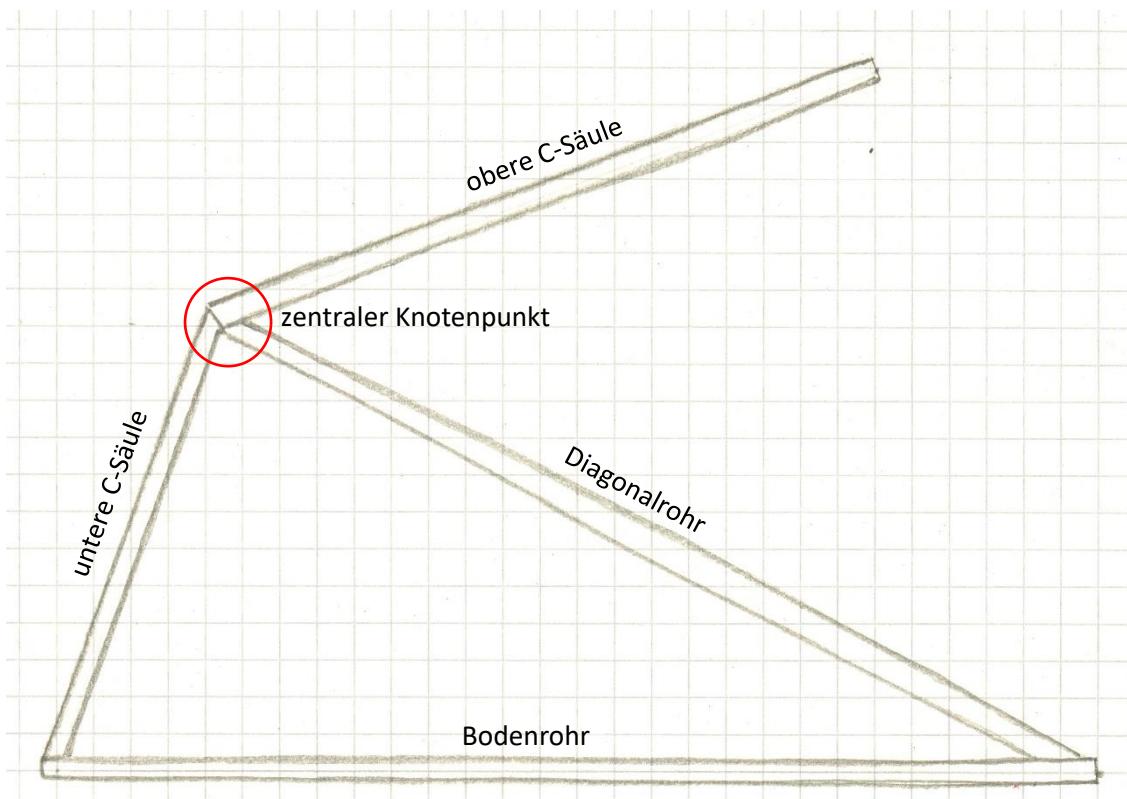


Abbildung 8-5 Gittergeometrie 2 Handskizze



Abbildung 8-6 Diamantrahmen eines Rennrades<sup>46</sup>

<sup>46</sup> Velocista, 2022



Hierbei handelt es sich um einen Diamantrahmen, wie er in ähnlicher Form bei Fahrrädern Verwendung findet. Die C-Säule ist bei diesem Konzept zweigeteilt und wurde in ein oberes und ein unteres Segment unterteilt. Im zentralen Knotenpunkt ist die zweiteilige C-Säule ebenfalls mit dem Diagonalrohr verbunden. Auf der Unterseite des Hinterbaus befindet sich wie im ersten Konzept („8.3.5.1 Geometrie 1“) das Bodenrohr, an dem das Bodenblech befestigt werden kann. Diese Rohranordnung erweist sich als vorteilhaft, da hierfür nur gerade Rohrsegmente notwendig sind und somit die Belastung durch Druck- und Zugkräfte auf die Rohre übertragen wird. Durch diese Belastung verteilt sich die Last über den gesamten Rohrquerschnitt gleichmäßig, wodurch das Material besser ausgenutzt und die Komponenten kleiner ausgeführt werden können. Weiters können bei diesem Konzept ausschließlich Faserverbundrohre verwendet werden, welche das Gewicht weiter senken. Der Nachteil an diesem Konzept ist der zentrale Knotenpunkt, an welchem drei Rohre miteinander verbunden werden müssen. Dieser Knotenpunkt ist im Vergleich zum ersten Konzept („8.3.5.1 Geometrie 1“) komplexer, hat höhere Anforderungen und muss stabiler ausgeführt werden.

#### 8.2.5.3 Bewertung

Die Bewertung sowie die Bewertungskriterien erfolgen nach gleichem Prinzip wie in „8.3.4 Bewertung“.

#### Geometrie 1

| Kategorie         | Punkte    | Begründung                                     |
|-------------------|-----------|--|
| Gewicht           | 7         | Schweres Metallrohr                            |
| Komplexität       | 8         | Einfachere Verbindungsmuffen und weniger Rohre |
| Steifigkeit       | 8         | Weiches gebogenes Rohr                         |
| Kosten            | 7         | C-Säule muss gebogen werden                    |
| <b>Punktezahl</b> | <b>30</b> |  |

Tabelle 8-4 Konzept Gitterrohrrahmen: Geometrie 1

#### Geometrie 2

| Kategorie         | Punkte    | Begründung                                  |
|-------------------|-----------|---|
| Gewicht           | 10        | Leichte Faserverbundrohre                   |
| Komplexität       | 7         | Komplexere Verbindungsmuffen und mehr Rohre |
| Steifigkeit       | 10        | Zug/Druck Belastung, daher hohe Steifigkeit |
| Kosten            | 7         | Mehr Faserverbundrohre erforderlich         |
| <b>Punktezahl</b> | <b>34</b> |   |

Tabelle 8-5 Konzept Gitterrohrrahmen: Geometrie 2

#### 8.2.5.4 Auswertung

Aufgrund der höheren Steifigkeit fiel die Entscheidung, trotz der komplexeren Geometrie, auf den Diamantrahmen. Dieser Rahmen hat sich seit Jahrzehnten im Fahrradbau durchgesetzt, wodurch sich die Vorteile praktisch zeigen lassen.



## 8.3 Kofferraum

### 8.3.1 Anforderungen

Der Kofferraum ist, neben der Fahrerzelle, der einzige Platz, an dem Gegenstände transportiert werden können. Da es in der Fahrerzelle allerdings nur kleine Fächer gibt, ist der Kofferraum für das Transportieren von größeren Gegenständen vorgesehen. Der Kofferraum wird von einer Heckklappe überragt, welche das aerodynamische Verhalten des Fahrzeugs verbessern soll.

### 8.3.2 Reglement

Laut Reglement des SEM sind für den Kofferraum folgende Bedingungen vorgegeben:

- Der Kofferraum muss leicht zugänglich sein
- Mindestdimensionen des Kofferraums in [mm]: 500mm x 400mm x 200mm
- Der Kofferraum muss einen Boden und Seitenwände besitzen

Das Verwenden einer Kofferraumklappe ist nicht im Reglement vorgeschrieben, bietet jedoch aerodynamische Vorteile.

### 8.3.3 Konzeptionierung

Der Kofferraum wird im Hinterbau so eingebaut, dass er durch das Öffnen der Heckklappe benutzt werden kann. Diese Anordnung ist vorteilhaft, da im vorderen Bereich des Fahrzeugs nicht genügend, über dem Akkupaket allerdings ausreichend Platz ist. Außerdem befindet sich der Kofferraum dort in Bauchhöhe, wodurch das Ein- und Ausladen von Gegenständen ohne Umstände möglich ist.

## 8.4 Umsetzung in CAD

Nach der Konzeptionierungsphase wurde das ausgearbeitete Konzepte in Creo Parametric konstruiert und weiter optimiert.

## 8.4.1 Hinterbau Version 1

### 8.4.1.1 Konstruktion



Abbildung 8-7 Hinterbau Version 1

Beim ersten in Creo Parametric konstruierten Hinterbau handelt es sich um den Diamantrahmen, wobei die Rohre mit Verbindungsblechen verbunden sind. Alle Karbonrohre sind mit einer Dimension von 20mm x 1,5mm (Außendurchmesser x Wandstärke) gleich groß dimensioniert. Als Bodenplatte wurde vorerst ein Blech angenommen, welches mit dem Bodenrohr verbunden ist und somit die beiden Seiten des Hinterbaus verbindet. Das Aufhängungsblech befindet sich im hinteren Teil des Hinterbaus und verbindet das Bodenrohr und die hintere C-Säule. Am Aufhängungsblech wird die hintere Radaufhängung befestigt.

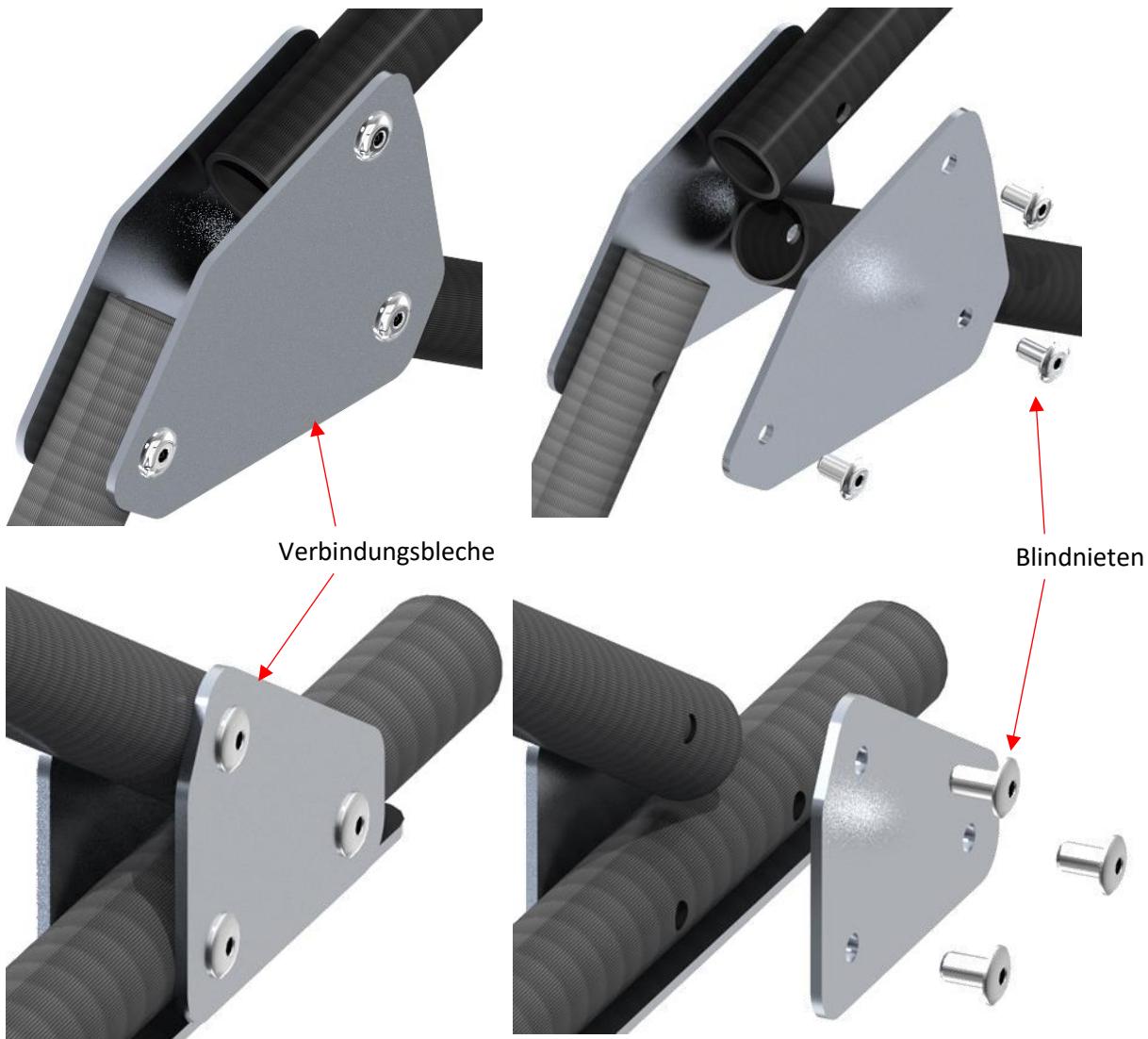


Abbildung 8-8 Hinterbau Version 1: Verbindungsbleche

Da alle Rohre gleich große Außendurchmesser besitzen, ist es möglich, die Rohre mit ungekanteten „flachen“ Verbindungsblechen zu verbinden. Hierbei befinden sich an den Rohrenden Bohrungen, welche mit den Bohrungen der Aluminiumbleche übereinstimmen. An den Bohrungen können die Rohre und Bleche mit Blindnieten befestigt werden. Da die Blindnieten allerdings keine ausreichende Festigkeit besitzen und das Risiko hoch ist, dass aufgrund der Schläge im Fahrbetrieb die Bohrungen „ausleihen“, werden die Rohre und Verbindungsbleche an den Berührungsflächen zusätzlich verklebt. Dadurch vergrößert sich die kraftübertragende Fläche und die Verbindungen sind unempfindlicher gegenüber Schlägen.



Abbildung 8-9 Hinterbau Version 1: Aufhängungsblech

Beim hinteren Aufhängungsblech handelt es sich um ein ausgelasertes Aluminiumblech, welches an den Rohren befestigt wird. Auch hier wird das Blech mit den Rohren vernietet und entlang der Kontaktflächen verklebt, um die kraftübertragende Fläche zu vergrößern.

#### 8.4.1.2 Auswertung

Der Vorteil an dieser Variante ist die kostengünstige und einfache Fertigung der Verbindungsbleche, da es sich hierbei um Laserteile handelt. Nachteilig sind die Nietverbindungen, welche zu Querschnittsverringerungen führen und Nachbearbeitungen an den Rohren erforderlich machen. Außerdem ist aufgrund der verhältnismäßig kleinen Klebeflächen die Belastbarkeit gering. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Rohraußendurchmesser bei den Verbindungen gleich sein müssen. Falls aufgrund der auftretenden Belastungen allerdings die Rohre verkleinert werden bzw. unterschiedlich groß sein können, wird das Material nicht ausreichend ausgenutzt und der Hinterbau wird unnötig schwer.



## 8.4.2 Hinterbau Version 2

### 8.4.2.1 Konstruktion



Abbildung 8-10 Hinterbau Version 2

Bei diesem CAD Modell handelt es sich weiterhin um den Diamantrahmen mit dem selben hinteren Aufhängungsblech als Anbindung für die Radaufhängung sowie dem selben Bodenblech, welches die beiden Hälften des Hinterbaus verbindet. Bei den Verbindungsteilen, welche die Rohre miteinander verbinden, handelt es sich nun um Verbindungsmuffen.

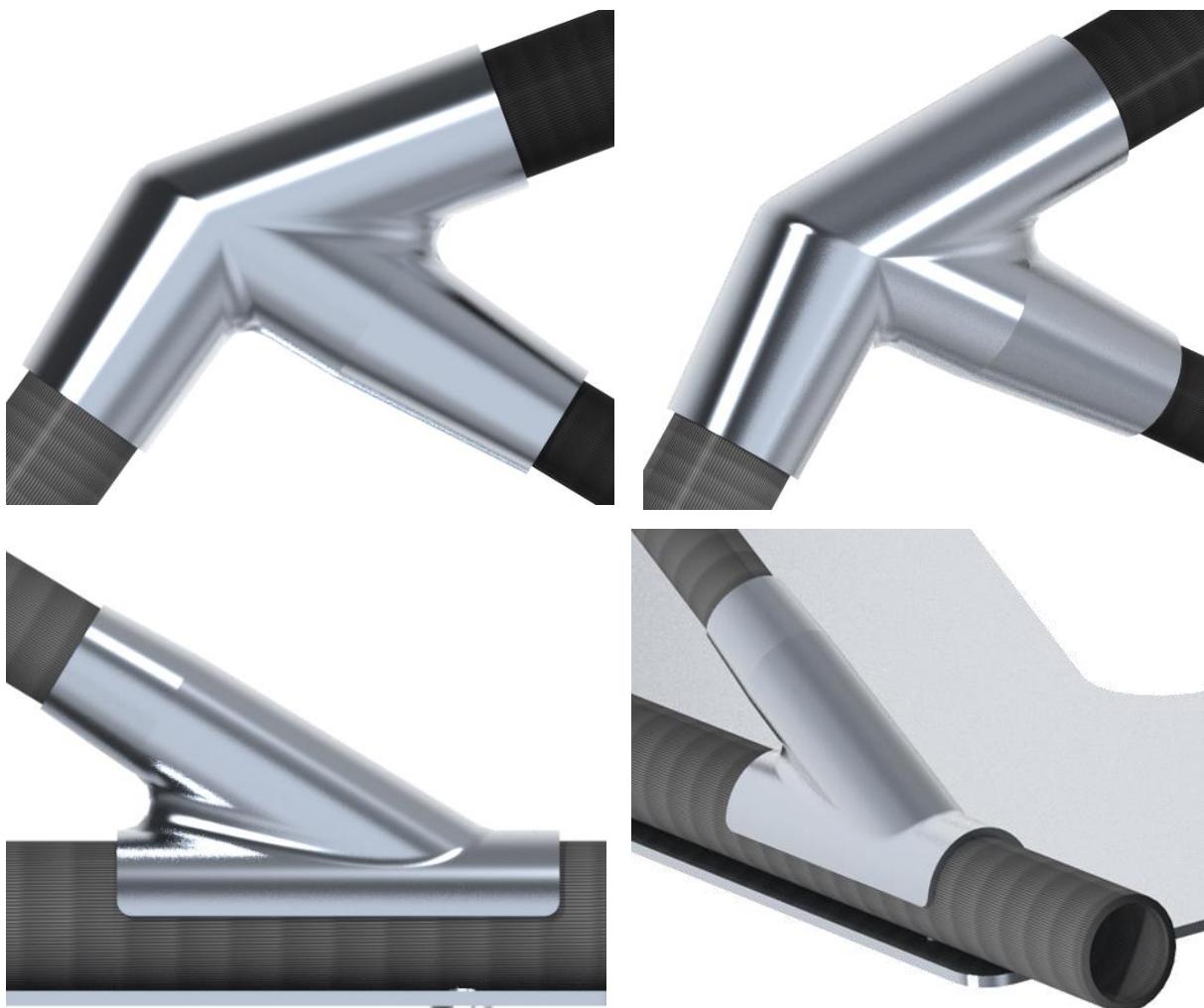


Abbildung 8-11 Hinterbau Version 2: Verbindungsmauffen

Die 3D lasergesinterten Verbindungsmauffen verbinden die Karbonrohre, indem die Rohre mit den Bohrungen der Muffen verklebt werden. Es handelt sich um eine spezielle Aluminiumlegierung, welche auf das Fertigungsverfahren optimiert ist. Die Muffen können direkt auf Maß gesintert werden und benötigen keine weitere Nachbearbeitung. Die Verbindungsmauffe für den unteren Knotenpunkt wurde so konstruiert, um beim Zusammenbau des Chassis' die Muffe entlang des Bodenrohrs verschieben zu können. Dadurch können Toleranzen und Ungenauigkeiten ausgeglichen werden. Das Diagonalrohr wurde auf ein 16mm x 1,5mm Rohr geändert, da aufgrund der Geometrie ein kleineres Rohr verwendet werden kann und somit Gewicht eingespart wird.

#### 8.4.2.2 Auswertung

Der Vorteil dieser Hinterbaukonstruktion liegt in der höheren Belastbarkeit und der einfacheren Montage. Die Klebeflächen der Verbindungen verteilen sich über den gesamten Rohrumfang, und durch das Wegfallen von Bohrungen für Nietverbindungen kommt es zu keinen Querschnittsverringerungen, wodurch sich die Last gleichmäßiger verteilt. Weiters ist der Zusammenbau unkomplizierter, da die Rohre nicht nachbearbeitet, keine Nieten gesetzt werden müssen und das Einrichten mit Muffen einfacher ist. Nachteil an den Verbindungsmauffen sind die

hohen Fertigungskosten. Diese Teile werden allerdings von der Firma HC-Concepts gefertigt, welche die Fertigungskosten übernimmt und somit die Kosten kein Problem darstellen.

Wie aus der FEM in „12.6.1 Version 2“ hervorgeht, ist der Hinterbau biegesteif, allerdings auf Verdrehung stark unterdimensioniert. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken, ist eine Verbindung zwischen den beiden Hinterbauhälften zu entwerfen, um die Torsionssteifigkeit zu erhöhen. Da es sich um einen Gitterrohrrahmen handelt, kann die Steifigkeit durch geschicktes Positionieren von Rohren maßgeblich beeinflusst werden. Die Hinterbauhälften bei diesem Modell sind sehr unabhängig voneinander, wodurch sich ein einfach verformbares Bauteilverhalten ergibt. Die anschließende Version versucht dies mit einer Rohrverbindung zu verbessern.

### 8.4.3 Hinterbau Version 3

#### 8.4.3.1 Konstruktion

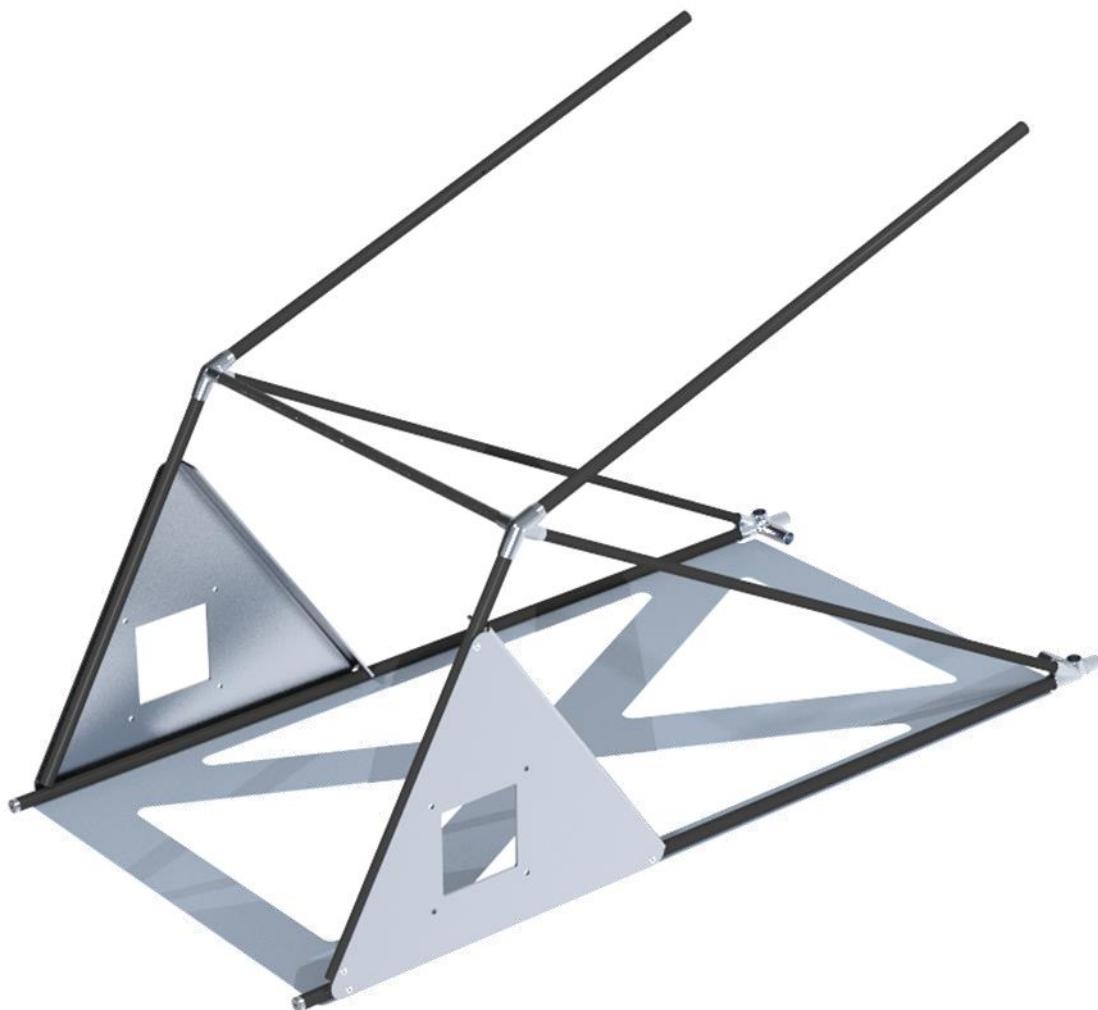


Abbildung 8-12 Hinterbau Version 3

Bei dieser Version wurden Bauteile und Geometrie in den Grundzügen von der Vorgängerversion übernommen, allerdings auf Torsionssteifigkeit optimiert. Bei den Verbindungsteilen handelt es sich weiterhin um Verbindungsmuffen, wobei für das erforderliche Querrohr kleine Änderungen erforderlich waren. Das Querrohr ist ein unbearbeitetes Karbonrohr der Dimension 16mm x 1,5mm.

Das Aufhängungsblech erhielt eine zusätzliche Abkantung und aufgrund des neuen Aufhängungskonzeptes (siehe „10.4.2 Hintere Radaufhängung Version 2“) umgeänderte Anbindungspunkte für die hintere Radaufhängung.

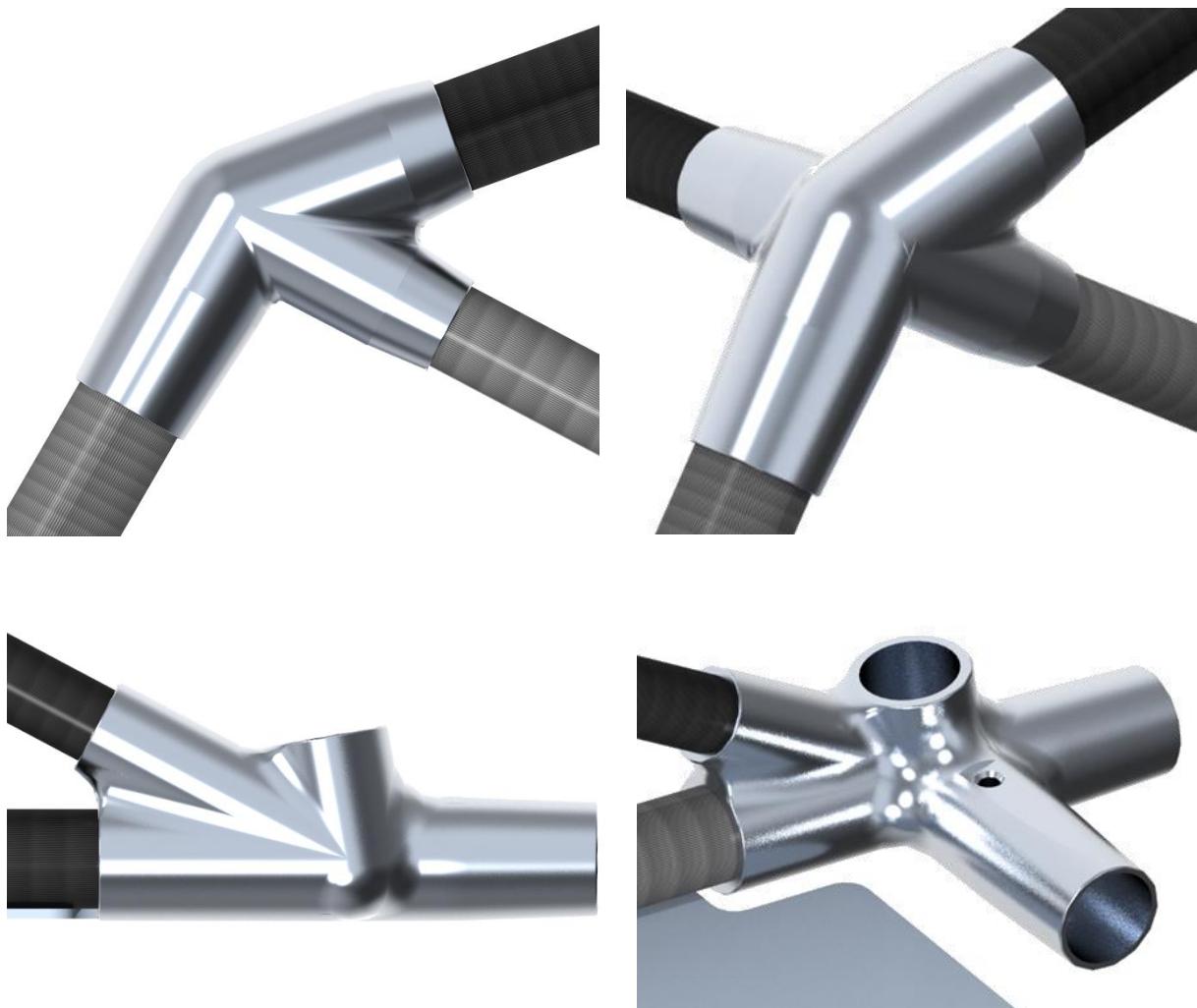


Abbildung 8-13 Hinterbau Version 3: Verbindungsmuffen

Die Verbindungsmuffe für den unteren Knotenpunkt wurde stark abgeändert, es handelt sich nun um eine Verbindungsmuffe, welche den Hinterbau mit der Fahrerzelle sowie das Diagonalrohr verbindet. Dadurch verringert sich die Anzahl der erforderlichen Verbindungsmuffen sowie die Anzahl der Klebestellen, wodurch Klebefehler minimiert und die Stabilität erhöht werden. Bei der Muffe für den zentralen Knotenpunkt wurde eine zusätzliche Anbindung für das Querrohr erforderlich, wobei die grundlegende Geometrie beibehalten wurde. Die Formen der Verbindungsmuffen wurden überarbeitet. Diese besitzen nun Fasen und Rundungen an den Enden, um gleichmäßige Krafteinleitungen zu erreichen.



Abbildung 8-14 Hinterbau Version 3: Heckansicht

Das hintere Aufhängungsblech wird weiterhin mit Blindnieten an den Rohren befestigt und an den Kontaktflächen verklebt. Um die Steifigkeit bei axialen Kräften zu erhöhen, wurde eine Abkantung eingefügt. Dadurch sollte sich vor allem die Stabilität bei Kurvenfahrten verbessern.

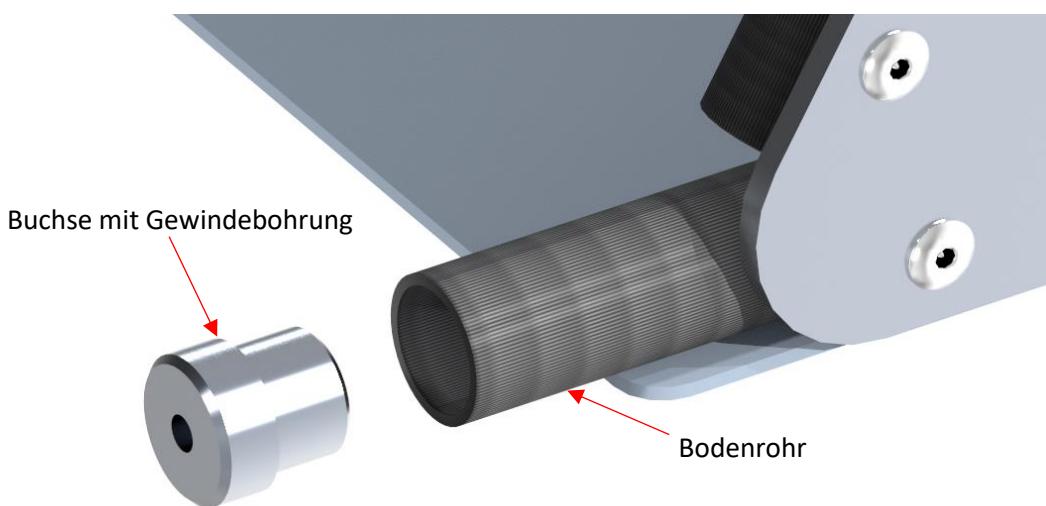


Abbildung 8-15 Hinterbau Version 3: Anbindung zur hinteren Verkleidung

Es wurde auch auf Anbindungsmöglichkeiten für die hintere Verkleidung geachtet. Aufgrund der hinteren mittragenden Karosserie sind Anbindungspunkte zwischen der Verkleidung und dem Hinterbau unausweichlich. Hierbei handelt es sich um Buchsen mit Gewindebohrungen, welche an den Enden der Bodenrohre eingeklebt werden. Die hintere Verkleidung kann mit dieser Buchse verschraubt werden, wodurch die Kräfte über die Schrauben geleitet werden. Diese



Schraubverbindung kann schnell und unkompliziert gelöst und die Verkleidung abgenommen werden.

#### 8.4.3.2 Auswertung

Durch das Verändern der Verbindungsstücke ist der Zusammenbau unkomplizierter. Die Steifigkeit konnte deutlich erhöht werden, allerdings ist die Verformung, wie in der FEM in „12.6.2 Version 3“ erkennbar, weiterhin zu hoch. Es ist somit eine weitere Verbindung zwischen den beiden Hinterbauhälften erforderlich. Die Verbindungsstücke sowie die Buchsen für die Verkleidungsanbindung erfüllen ihre Aufgaben und können so in den weiteren Versionen übernommen werden.

#### 8.4.4 Hinterbau Version 4

##### 8.4.4.1 Konstruktion



Abbildung 8-16 Hinterbau Version 4

Bei dieser Version des Hinterbaus wurden die Verbindungsstücke sowie die Rahmengeometrie übernommen, allerdings wurden die angebundenen Blechteile stark verändert. Aufgrund der bekannten Akkuabmaße wurde das Bodenblech geändert und darauf abgestimmt. Um die Steifigkeit

weiter zu erhöhen, besitzt dieser Hinterbau ein Versteifungsblech am Heck. Außerdem wurde das Aufhängungsblech, wie in „10.4.3 Hintere Radaufhängung Version 3“ erkennbar, überarbeitet.

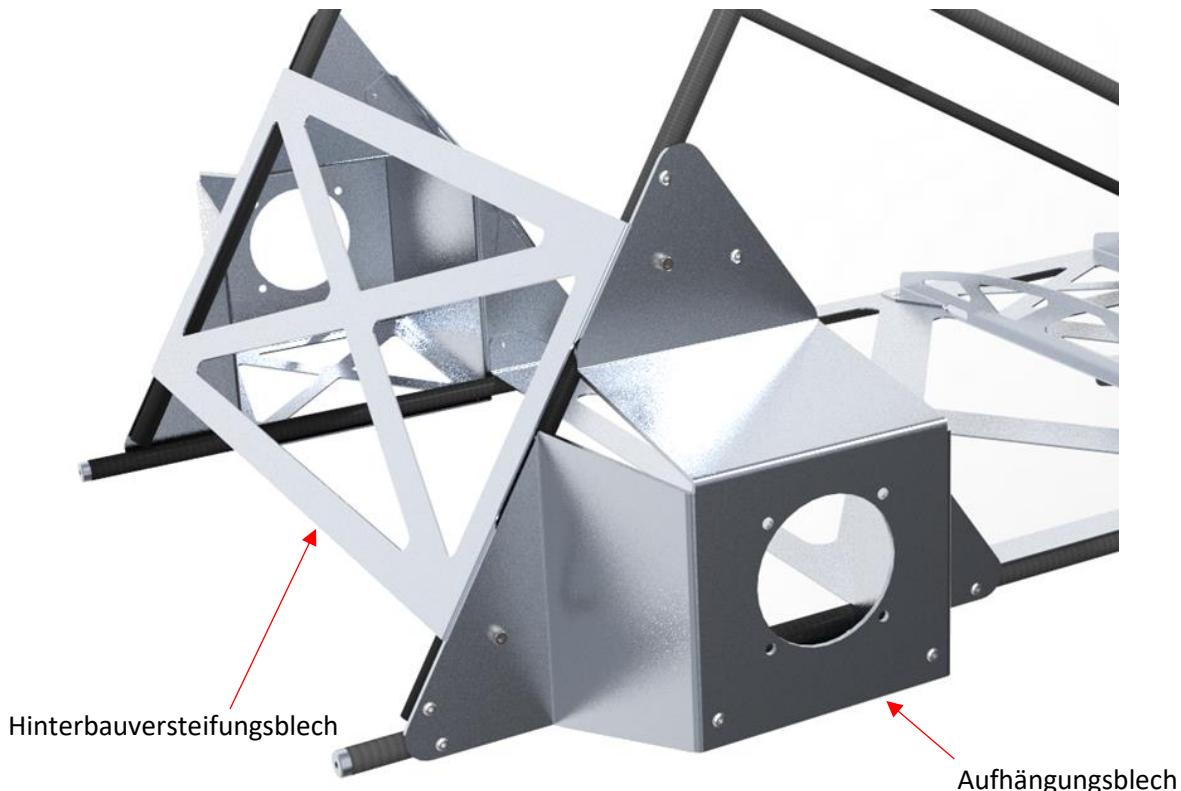


Abbildung 8-17 Hinterbau Version 4: Heckansicht

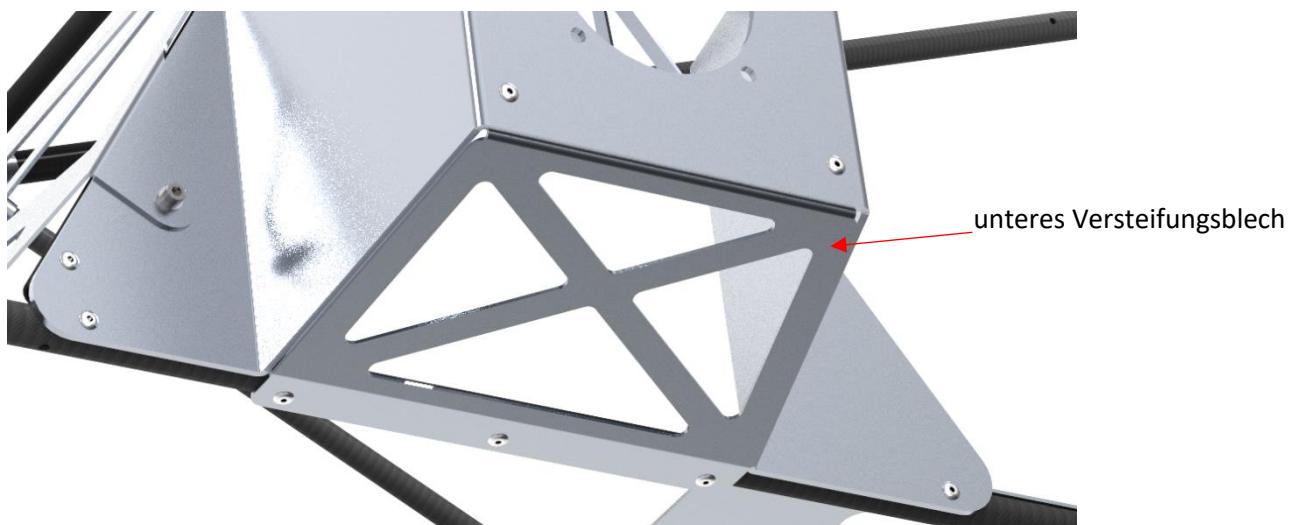


Abbildung 8-18 Hinterbau Version 4: Aufhängungsblech untere Ansicht

Trotz der Änderungen am hinteren Aufhängungsblech konnten die bereits definierten Verbindungsbohrungen für die Blindnieten übernommen werden. Aufgrund der Form des Aufhängungsbleches ist eine Versteifung auf der Unterseite erforderlich. Dieses Versteifungsblech wird mittels Bohrungen und Blindnieten an das Bodenrohr sowie an das Aufhängungsblech angenietet und zusätzlich an der Kontaktfläche verklebt. Die Verbindung zwischen dem Aufhängungsblech und dem Rahmen ist unverändert, es handelt sich weiterhin um eine Nietverbindung mit Verklebungen an den Kontaktflächen.

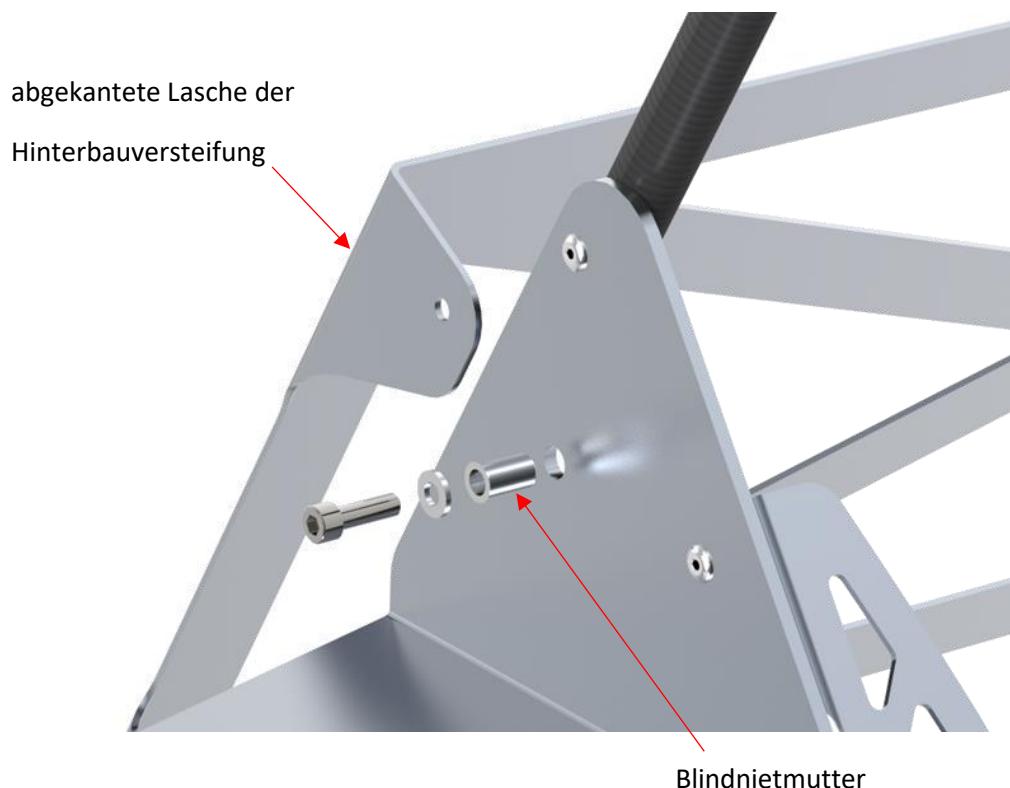


Abbildung 8-19 Hinterbau Version 4: Verschraubung Hinterbauversteifung

Bei der Hinterbauversteifung handelt es sich um ein Aluminiumblech, welches an den Seiten jeweils zwei abgekantete Laschen mit einer Bohrung besitzt. An diesen Laschen ist das Blech mit den beiden hinteren Aufhängungsblechen verschraubt. Es wurde eine Schraubverbindung gewählt, da das Versteifungsblech somit abnehmbar ist und dadurch die Motoren und die hintere Radaufhängung besser zugänglich sind. An den Verbindungsstellen ist jeweils eine Blindnietmutter eingenietet, dadurch sind keine Nachbearbeitungen an den Aufhängungsblechen erforderlich. Bei der Befestigung des Versteifungsbleches wird eine Schraube in die Blindnietmutter geschraubt und angezogen. Um die Schraubenkraft gleichmäßig zu verteilen, wird zusätzlich eine Scheibe zwischen dem Schraubenkopf und das Versteifungsblech gegeben.



Abbildung 8-21 Hinterbau Version 4: Akkuhalterung

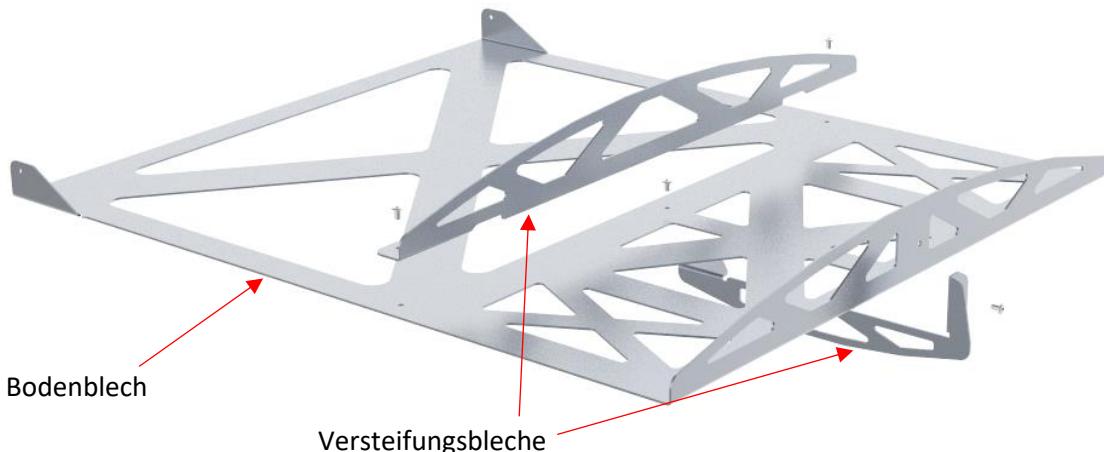


Abbildung 8-20 Hinterbau Version 4: Akkuhalterung Explosion

Die Akkuhalterung wirkt als weitere Versteifung des Hinterbaus sowie als Halterung des Akkupakets und sonstigen elektronischen Bauteilen. Das Akkupaket wird im vorderen Teil des Bodenbleches befestigt. Da das Akkupaket die schwerste Komponente des gesamten Fahrzeugs ist, sind zusätzliche Versteifungsbleche nötig, um die Verformung sowie die Beanspruchung gering zu halten. Diese Versteifungsbleche werden an den definierten Bohrungen mit dem Bodenblech vernietet und zusätzlich an den Kontaktflächen verklebt. Das Bodenblech besitzt am hinteren Ende zwei Laschen, an denen die Akkuhalterung mit dem Hinterbau verbunden wird. Diese Laschen werden an den Bohrungen mit den hinteren Aufhängungsblechen vernietet und verklebt. Zusätzlich wird das Bodenblech an den Kontaktflächen mit den beiden Bodenrohren verklebt.

#### 8.4.4.2 Auswertung

Das Ergänzen der Hinterbauversteifung ist, wie in der FEM in „12.6.3 Version 4“ erkennbar, eine extreme Verbesserung der Steifigkeit sowie der Beanspruchbarkeit des Hinterbaus. Durch die Schraubverbindung stellt das erforderliche Blech keine Behinderung für Servicearbeiten dar. Die Akkuhalterung sorgt für eine Verbesserung der Gesamtstabilität des Hinterbaus. Die Rahmengeometrie und die Verbindungsarten der Blech- und Anbauteile sind für die Anforderungen ausreichend, und es sind somit keine grundlegenden Überarbeitungen am Hinterbau erforderlich.

## 8.4.5 Kofferraum

### 8.4.5.1 Konstruktion

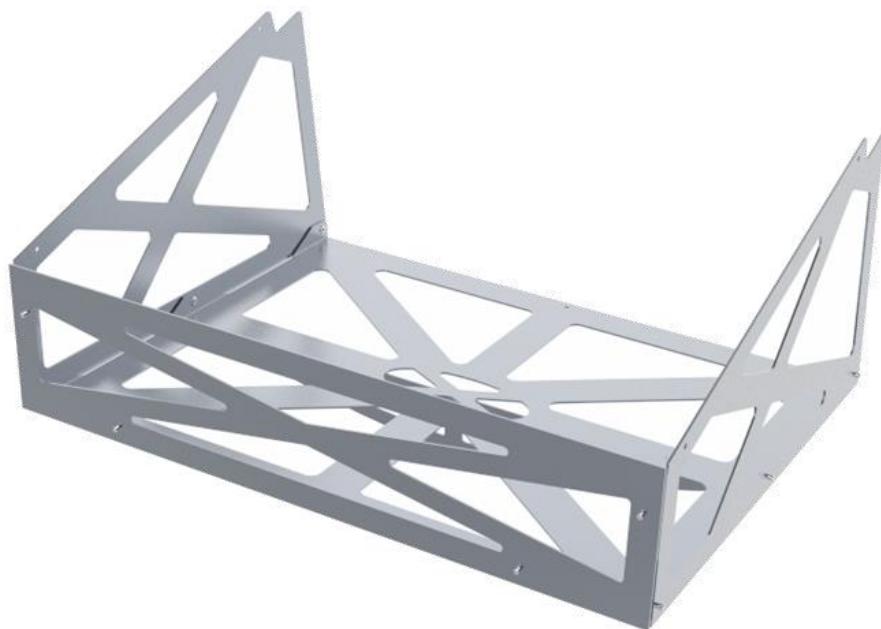


Abbildung 8-22 Kofferraum

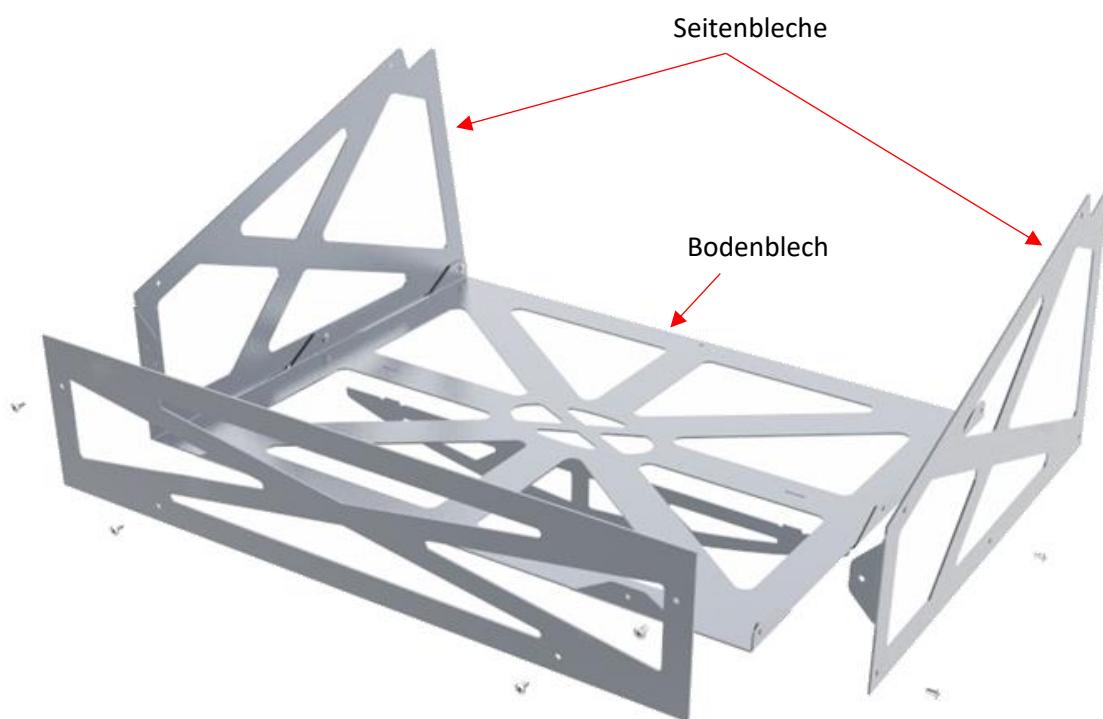


Abbildung 8-23 Kofferraum Explosion 1

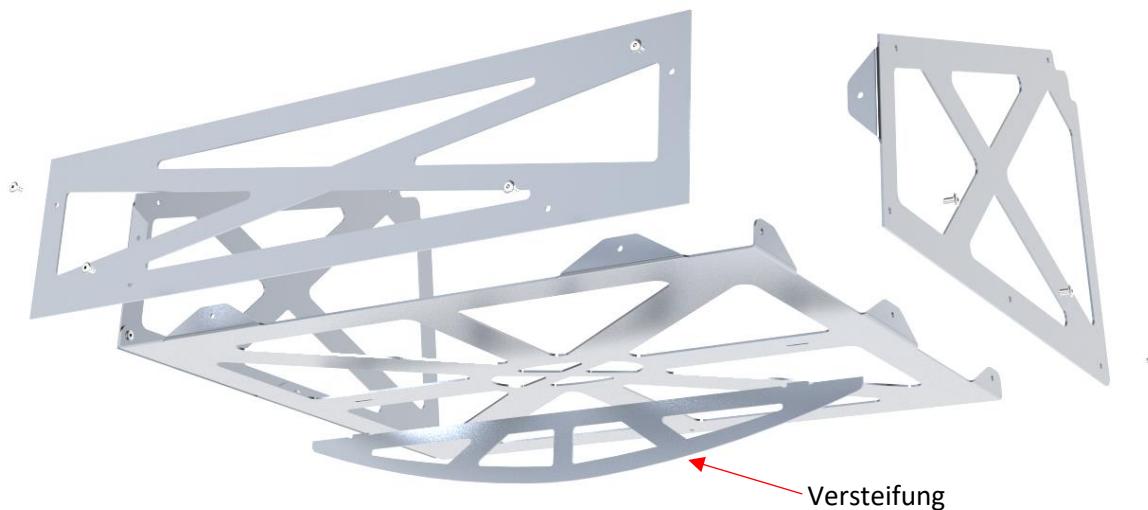


Abbildung 8-24 Kofferraum Explosion 2

Es wird eine Blechkonstruktion aus Aluminiumblechen verwendet. Hierbei sind das Bodenblech sowie die Seitenbleche an den Laschen abgekantet, um die einzelnen Bleche miteinander verbinden zu können. Diese einzelnen Bleche werden mittels Blindnieten an den Bohrungen befestigt und zusätzlich an den Kontaktflächen der Laschen verklebt. Da die Steifigkeit aufgrund der dünnen Bleche sehr gering und dadurch die Verformung bei Beladung sehr groß ist, wird auf der Unterseite des Bodenbleches eine Versteifung angeklebt. Durch die Zentrierungsnase kann das Versteifungsblech am Bodenblech positioniert und an den entstehenden Kehlen sowie Kontaktflächen verklebt werden. Um das Gewicht gering zu halten, sind die Bleche stark ausgelasert, wobei größere Gegenstände (Schuhe, Körbe, Kisten etc.) problemlos transportiert werden können, kleinere Gegenstände (Karten, kleinere Lebensmittel etc.) allerdings in der Fahrerzelle aufbewahrt werden müssen. Der Kofferraum wird an der oberen C-Säule mit Blindnieten an den oben befindlichen Bohrungen befestigt und zusätzlich an den Kontaktflächen zwischen den Rohren und den Blechen verklebt.

#### 8.4.5.2 Auswertung

Der Kofferraum ist einfach zu fertigen und erfüllt den Zweck ausreichend gut, wodurch keine Überarbeitungen erforderlich sind. Als leichtere Alternative zu den Aluminiumblechen standen Faserverbund- oder Holzplatten zur Auswahl. Diese könnten in den gleichen Geometrien wie die Bleche zugeschnitten werden, benötigen allerdings zusätzliche Blechwinkel als Verbindung der einzelnen Platten, da Faserverbundmaterialien sowie Holz nicht abkantbar sind. Ein solcher Kofferraum würde zwar das Gewicht senken, allerdings sind Sponsoren hierfür sehr schwierig zu finden. Da wir schon Blechfertiger als Sponsoren gewinnen konnten, ist ein Blechkofferraum die zielführendste Variante.



#### 8.4.6 Hinterbau Endversion

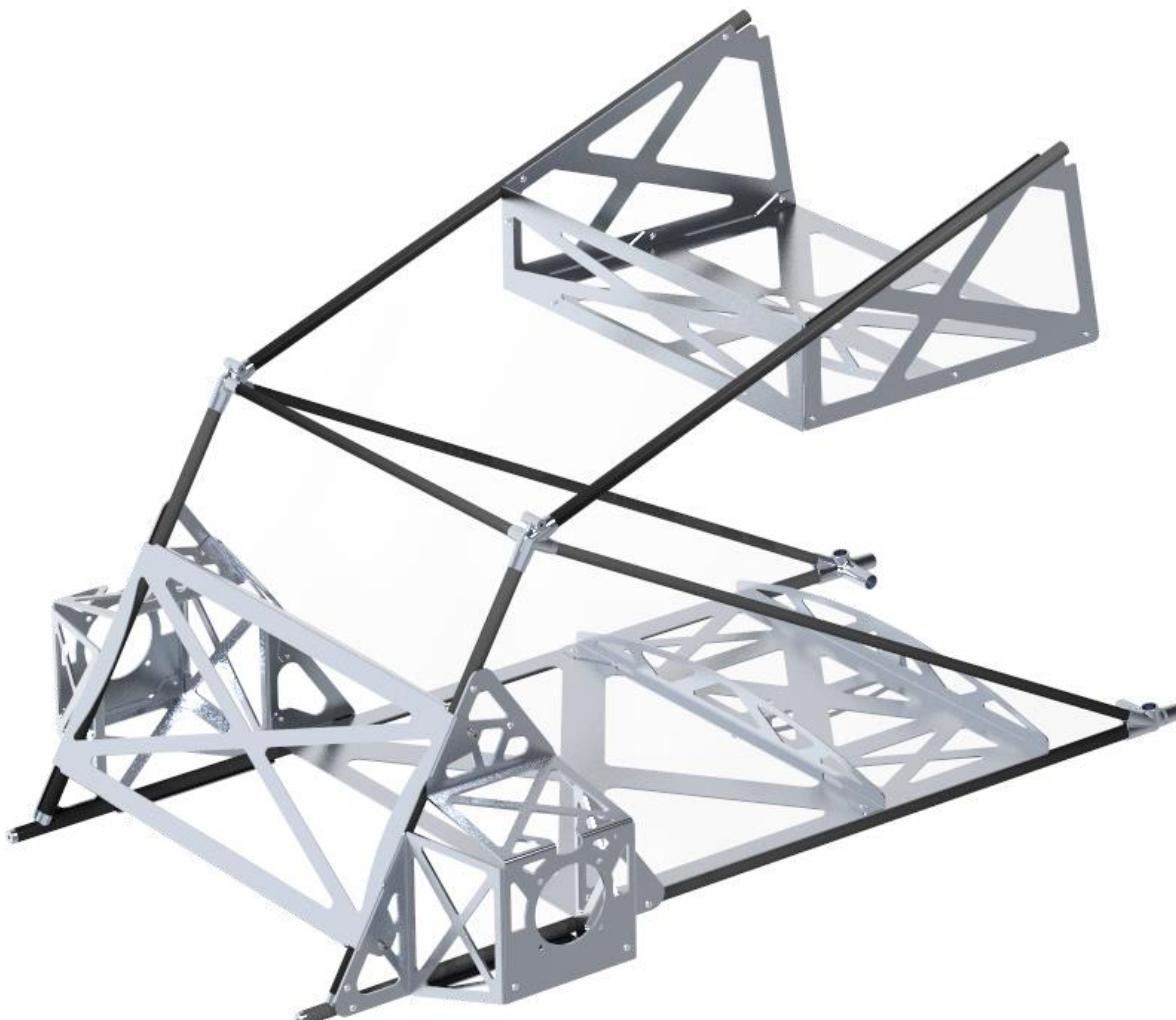


Abbildung 8-25 Hinterbau Endversion

Bei der umgesetzten Version des Hinterbaus wurde der Kofferraum eingebaut und es wurden kleine Änderungen an der Hinterbauversteifung durchgeführt. Weiters wurden zwei Positionermuffen im hinteren Bereich des Hinterbaus eingefügt, um den Zusammenbau zu vereinfachen.

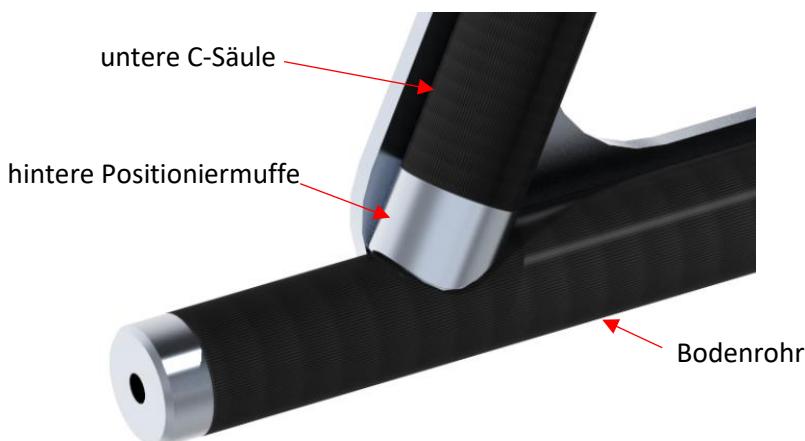


Abbildung 8-26 Hinterbau Endversion: Positionermuffe eingebaut



Abbildung 8-27 Positionermuffe



Die Positionermuffe ist ebenfalls ein Lasersinterteil der Firma HC Concepts. Diese Muffe wird an der unteren C-Säule eingeklebt und über eine definierte Bohrung am Bodenrohr mittels der Zentriernase positioniert. Dadurch wird der Zusammenbau des Hinterbaus einfacher.



Abbildung 8-28 Hinterbau Endversion: Heckansicht

zusätzliche Abkantungen

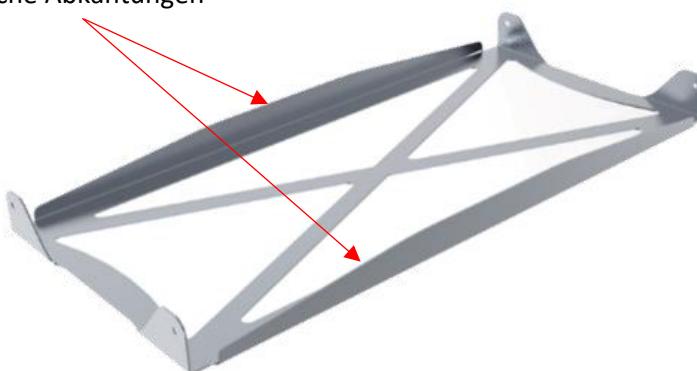


Abbildung 8-29 Hinterbauversteifung

Die Hinterbauversteifung erhielt noch weitere Abkantungen, um die Stabilität und Steifigkeit des Bleches sowie des Hinterbaus weiter zu erhöhen.



## 9 Vordere Radaufhängung

### 9.1 Anforderungen

Eine Radaufhängung im Generellen stellt die Verbindung zwischen dem Rad und dem Fahrzeug dar. Je nach Antriebsart (Front-, Heck-, Allrad) muss die vordere Radaufhängung bei Automobilen zusätzliche verschiedene Aufgaben erfüllen. Grundsätzlich muss die Aufhängungsbaugruppe, offensichtlich, eine Verbindung darstellen und eine kontrollierte Kraftübertragung in das Chassis gewährleisten. Da der Scorpion als heckgetriebenes Fahrzeug ausgeführt wird, ist die Hauptfunktion der vorderen Radaufhängung, neben den grundsätzlichen generellen Aufgaben einer Radaufhängung, die Umsetzung des Lenkbefehls (ausgehend vom Lenkgetriebe) in eine Lenkbewegung der Vorderräder. Eine Vortriebsbewegung, beispielsweise über eine Antriebswelle, ist daher nicht zu übernehmen. Allerdings ist an der Vorderachse ein Bremssystem zu installieren.

### 9.2 Reglement

Laut Reglement des SEM sind für die vordere Radaufhängung folgende Bedingungen vorgegeben:

- Mindestspurweite an der Vorderachse: 1000mm (gemessen an den Mittelpunkten der Reifenaufstandsfläche)
- Bodenfreiheit: 100mm (inkl. Fahrer und notwendigem Ballast)
- Die Lenkung muss an der Vorderachse angebracht werden
- Felgendurchmesser zwischen 15 und 17 Zoll.
- Bremsscheibendicke mind. 3mm (Keine Fahrradbremsen!)

### 9.3 Konstruktion

Da die vordere Radaufhängung aus Kosten-, Zeit- und Aufwandsgründen vom Vorgänger Scorpion übernommen wurde, allerdings aufgrund des neuen Chassis-Konzeptes sowie des neuen Bremssystems stark angepasst werden musste, bedurfte es einer Neukonstruktion vieler Bauteile.

#### 9.3.1 Übernommene Bauteile

1. Radträger + Radlagerblech
2. Querlenkergestänge oben
3. Querlenkergestänge unten
4. Dämpfer
5. Konsolen
6. Rad (Felge + Reifen)

Diese Baugruppe ist in Abbildung 9-1 zu erkennen (aus Übersichtlichkeitsgründen wird das Rad nicht dargestellt). Zusätzlich ist zu bemerken, dass manche Kugelkopfschrauben gegen neue ersetzt wurden, da diese bereits durch die statische Dauerbelastung (hervorgerufen durch das Fahrzeuggewicht) ein zu hohes axiales Spiel aufwiesen. Außerdem wurden sämtliche Schrauben gegen Niro-Schrauben (meist Zylinder-, oder Senkkopfschrauben mit Innensechskant) ausgetauscht, um eine beständige Optik zu garantieren.



Abbildung 9-1 Übernommene Bauteile

### 9.3.2 Zukaufteile

Einfachere Normteile wie Schrauben und Muttern werden hierbei nicht berücksichtigt.

1. Bremssattel (inkl. Bremsbacken und Bolzen)
2. Bremsscheibe
3. Nutmutter und Spannhülse
4. Radlager (2-reihiges Schrägkugellager)

Bei den Nutmuttern, den Spannhülsen oder den Radlagern handelt es sich um Restbestandteile, die im Scorpion-Lagerregal noch vorhanden waren. Die Bremssättel inklusive deren Zubehörteile, sowie die Bremsscheibe sind als Sponsoring von KTM zur Verfügung gestellt worden. Da es allerdings nicht möglich war, CAD-Dateien der Bremsscheibe, oder des Bremssattels zu erhalten, war es notwendig, die Maße der in der Praxis vorhandenen Bauteile ins CAD zu übertragen. Die Schnittstelle des Bremssattels war ein kritisches Element, weshalb zur Kontrolle der Maße eine Schablone dieser Schnittstelle 3D-gedruckt wurde. Nach einmaligem Nachjustieren war die Geometrie im CAD, dem des echten Bauteiles entsprechend.



Abbildung 9-3 Bremssattel

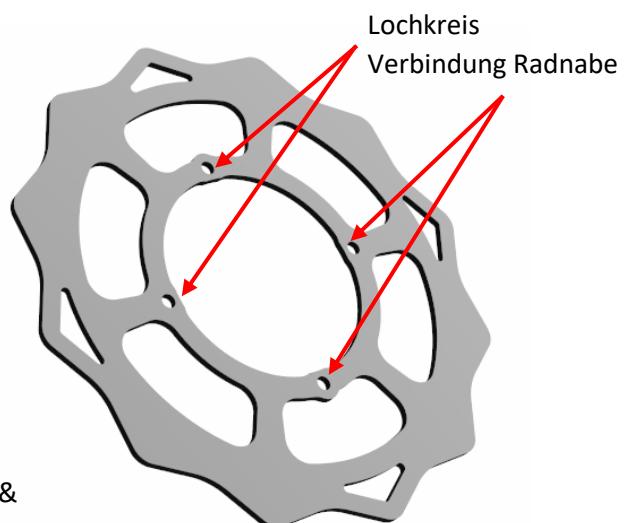


Abbildung 9-2 Bremsscheibe

### 9.3.3 Neu entworfene Bauteile

1. Lenkhebel (Links & Rechts)
2. Bremssattelaufnahmen (Links & Rechts)
3. Radnabe
4. Radnabenwelle

Nun war es notwendig die Aufhängung mit ihren Funktionen wie der Übertragung des Lenkbefehles oder das zur Verfügung stellen eines Radaufnahmepunktes zu versehen. Abgesehen von diesen konstruktiven und funktionellen Anforderungen waren zusätzlich sämtliche Zukaufteile passend in das System zu integrieren. Hierbei wurde, hauptsächlich aus Toleranzgründen, das Ziel möglichst weniger Einzelbauteile verfolgt, auch wenn diese einzelnen Bauteile dadurch an Komplexität gewinnen.

### 9.3.3.1 Aufgabenerfüllung Lenkhebel & Bremssattelaufnahmen

Die Lenkhebel übernehmen neben der Annahme des Lenkbefehls von den Spurstangen, auch die Aufgabe einer Anbindungsmöglichkeit für den Bremssattel.

An der Oberseite des Lenkhebels wird eine Passschraube angebracht, worauf die Kugelkopfschraube der Spurstange sitzt. Wird nun ein Lenkbefehl vom Fahrer über das Lenkgetriebe in eine axiale Bewegung der Spurstange eingeleitet, so führt dies zu einem nahezu axialen Verschieben der Lenkhebelachse, was wiederum im Schwenken des Radträgers um seine Drehachse resultiert. Eine Kollision des Rades mit dem Fahrzeug bei maximalen Lenkeinschlag, wird durch Lenkanschläge auf der Zahnstange verhindert.

An der Seite des Lenkhebels ist eine M8 Durchgangsbohrung angebracht, welche für die Befestigung des Bremssattels sorgt. Zusätzlich wird die Bremssattelaufnahme an der Unterseite des Lenkhebels befestigt, welche als zweiter Anschraubpunkt für den Bremssattel dient. Da die Bremssättel für beide Seiten gleich sind, war es notwendig seitenweise unterschiedliche Lenkhebel zu konstruieren. Dies gilt ebenso für beide Bremssattelaufnahmen.

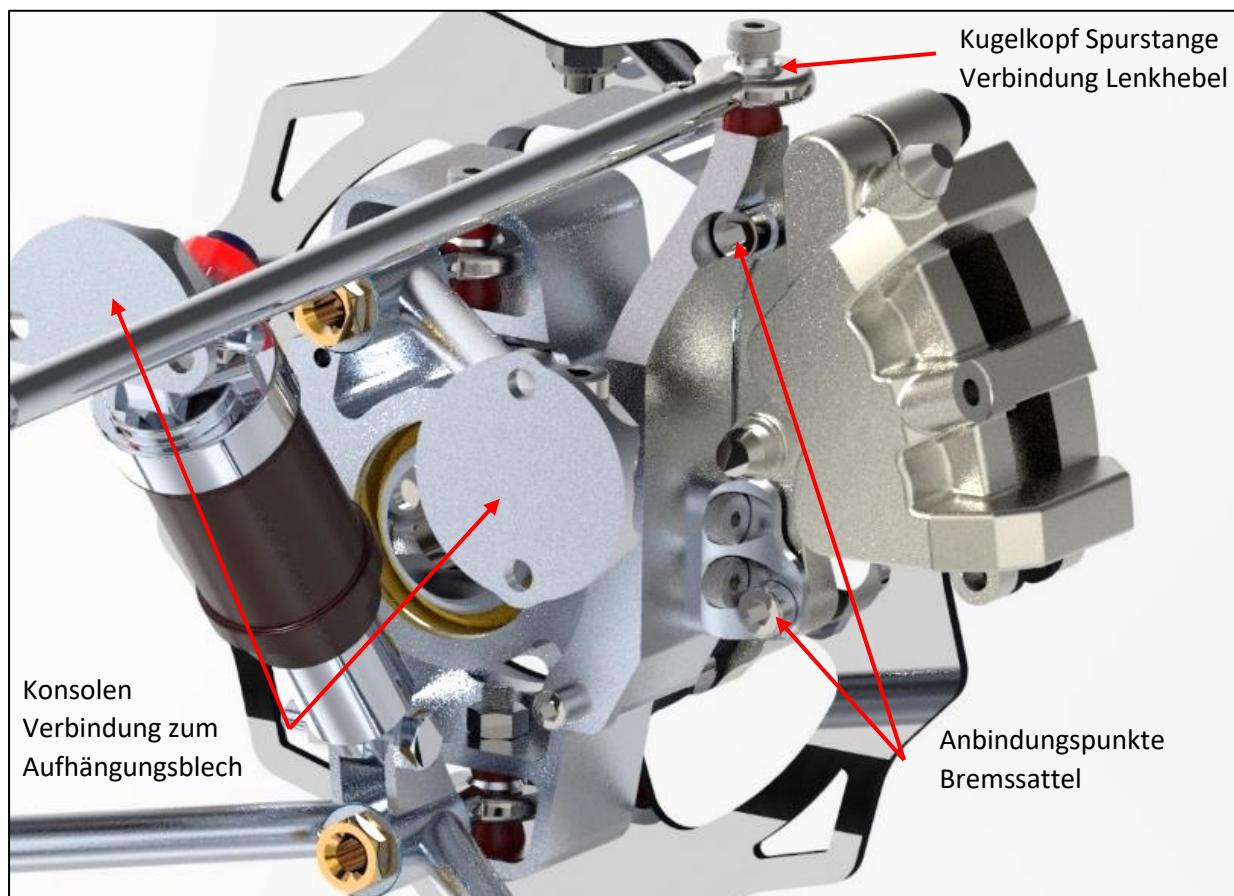


Abbildung 9-4 Zusammengebauter Aufhängung mit Lenkfunktion

Verbindung zum Radträger  
mittels Passschrauben

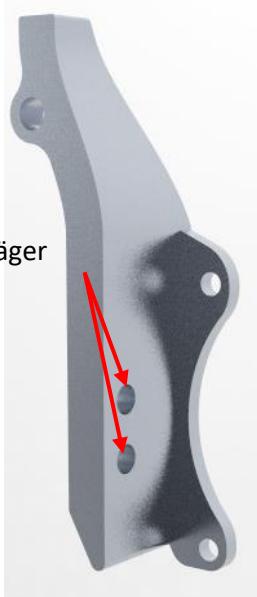
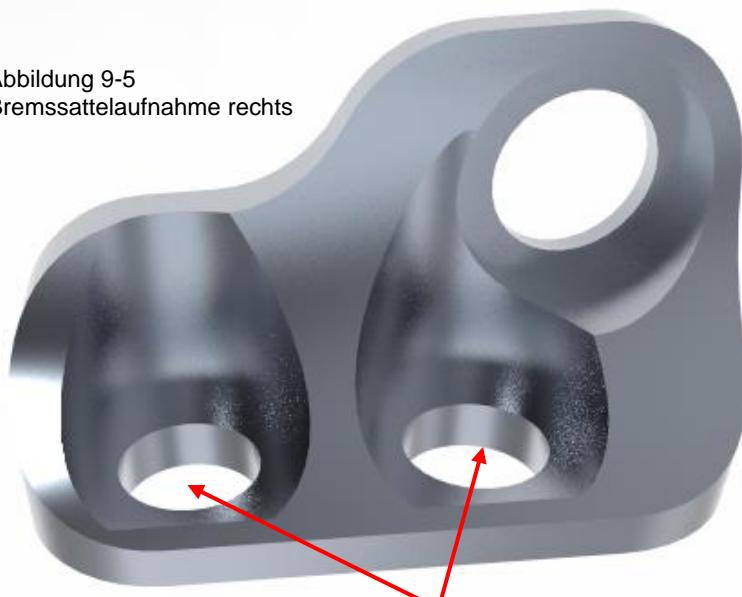


Abbildung 9-6  
Lenkhebel rechts

Abbildung 9-5  
Bremssattelaufnahme rechts



Bremssattelaufnahmen L&R  
Verbindung zum Radträger

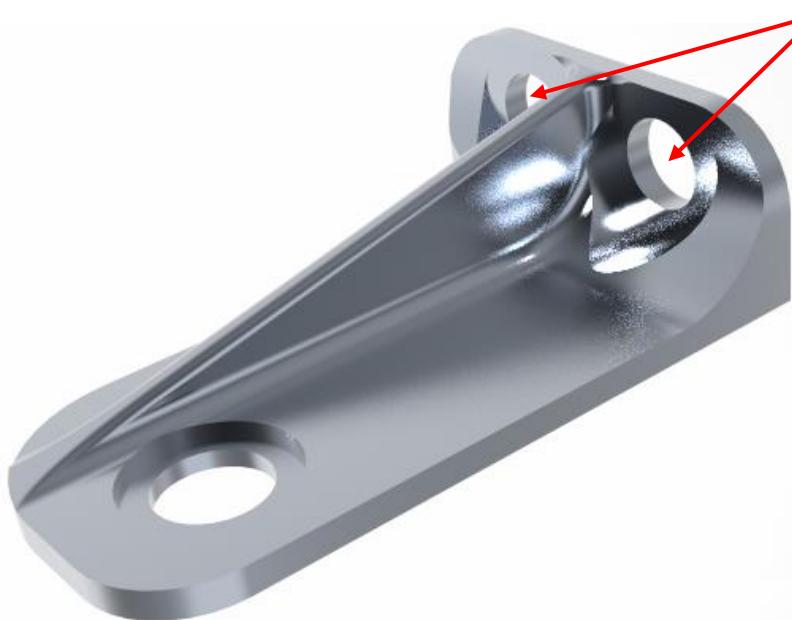


Abbildung 9-7 Bremssattelaufnahme links

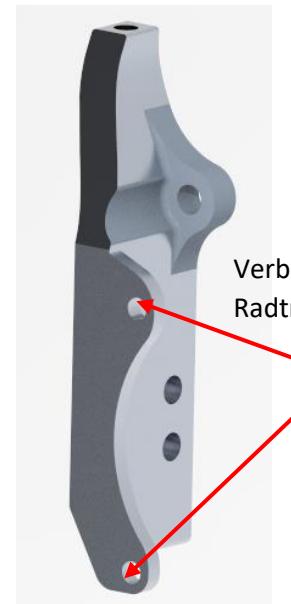


Abbildung 9-8  
Lenkhebel links

### 9.3.3.2 Aufgabenerfüllung Radnaben & Radnabenwelle

Die Radnaben haben die Aufgabe das Rad sowie die Bremsscheibe als rotierende Bauteile auf der Radnabenwelle und infolgedessen im Radlager zu lagern.

Um das Rad auf der Radnabe anzubringen ist eine Radzentrierung sowie ein Bohrungslochkreis erforderlich, um das Gegenstück zur Felge bilden. Im Falle der bereits vorhandenen Felgen handelt es sich um einen dreifach Lochkreis mit M12x1.5 Radschrauben. Dies gilt ebenso für die Schnittstelle zur Bremsscheibe. Hierzu wurde die Bremsscheibe manuell nachgearbeitet. Allerdings ist hierbei explizit auf die axiale Position der Bremsscheibe zu achten, da diese zwischen den Bremsbacken laufen muss und daher ein ständiges Schleifen vermieden werden sollte. Auch die Bremsscheibe wird mit einem vorgegebenen Lochkreis auf der Radnabe montiert.



Abbildung 9-10 Verbindung zwischen Rad und Radnabe 1



Abbildung 9-9 Verbindung zwischen Rad und Radnabe 2

Im Zuge der Änderung der Radnabe musste auch die Radnabenwelle angepasst werden. Die Anpassung der Radnabe konnte durch eine Kürzung des alten Bauteils kompensiert werden. Hierbei wurde aus Materialeinsparungsgründen dasselbe Bauteil wiederverwertet, allerdings wurde die Welle manuell gekürzt und das Gewinde für die Nutmutter neu geschnitten.



Abbildung 9-11 Radnabenwelle

Lochkreis  
Verbindung Rad

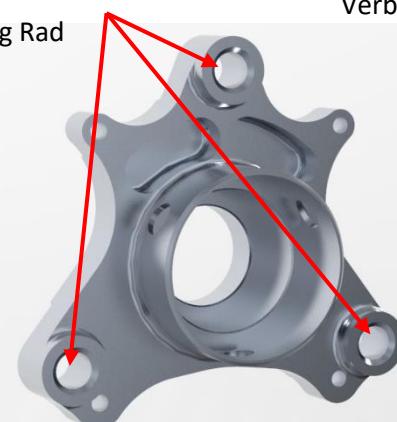


Abbildung 9-12 Radnabe Vorderseite

Lochkreis  
Verbindung Bremsscheibe

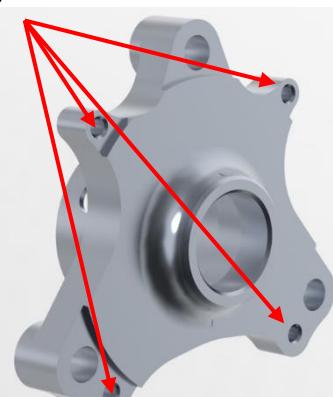


Abbildung 9-13 Radnabe Hinterseite

Da die Radnabe mit dem Rad, der Bremsscheibe, der Radnabenwelle sowie dem Innenring des Radlagers den rotierenden Teil der gesamten Aufhängungsbaugruppe darstellt (Klein- und Normteile nicht berücksichtigt), ist die Radnabe so auszuführen, dass im Betrieb keinerlei Unwuchten auftreten. Dies wurde in der Konstruktion mittels der Schwerpunktsabstände berücksichtigt. Die Tiefe der Frästaschen wurde dementsprechend so gewählt, dass der Schwerpunkt genau auf der Rotationsachse liegt, und somit eine Auswuchtung des Bauteils gewährleistet ist.



### 9.3.4 Zusammengestellte vordere Aufhängung



Abbildung 9-14 Explosionsansicht vordere Aufhängung



Abbildung 9-15 Vordere Aufhängung



# 10 Hintere Radaufhängung

## 10.1 Anforderungen

Die Räder sind die einzigen Verbindungspunkte zwischen dem Fahrzeug und dem Untergrund. Somit übernimmt die hintere Radaufhängung folgende wichtige Aufgaben.

### 10.1.1 Gutes Fahrverhalten

Die hintere Radaufhängung ist für das Fahr- und Kurvenverhalten des Fahrzeugs vor allem im Heckbereich zuständig. Hierfür ist vor allem entscheidend, dass die hintere Radaufhängung stabil und steif konstruiert wird, damit es nicht zu einem „schwammigen“ Fahrverhalten kommt.

### 10.1.2 Kraftübertragung

Da es sich um ein heckangetriebenes Fahrzeug handelt, erfolgt die Kraftübertragung über die Hinterräder. Daher ist die hintere Radaufhängung einer zusätzlichen Belastung ausgesetzt. Die hintere Radaufhängung ist aufgrund des Antriebs stabiler auszulegen als die vordere Radaufhängung.

## 10.2 Reglement

Laut Reglement des SEM sind für die hintere Radaufhängung folgende Bedingungen vorgegeben:

- Hintere Spurweite: mind. 800mm
- Bodenfreiheit: 100mm  
(inkl. Fahrer und notwendigem Ballast)
- Felgendurchmesser 15 - 17 Zoll.
- Bremsscheibendicke: mind. 3mm, wobei das Verwenden von Fahrradbremse verboten ist

## 10.3 Konzeptionierung

Da die hintere Radaufhängung an den Hinterbau befestigt wird, ist es wichtig, diese beiden Baugruppen aufeinander abzustimmen. Es wurden die bestehenden Konzepte der beiden Scorpions angedacht und ein eigenes Konzept entwickelt.

### 10.3.1 Bestehende Radaufhängungen

#### 10.3.1.1 Doppelquerlenker

Das Rad wird mittels zwei übereinanderliegender Querlenker gehalten. Die Abstützung erfolgt über einen darin liegenden Dämpfer bzw. einer Druckstange. Dieses Konzept ist eine im Automobilbau sehr bewährte Bauweise, da es kompakt ist und ein gutes Fahrverhalten bietet, allerdings ist es verhältnismäßig komplex. Eine Doppelquerlenkeraufhängung ist eine mit dem Hinterbau kompatible Bauweise und könnte in ähnlicher Form am neuen Scorpion verwendet werden.

#### 10.3.1.2 Schwinge

Hier ist das Rad an einem Achsschenkel, welcher gegen die Fahrtrichtung angebunden ist, befestigt. Der Achsschenkel wird von einer Druckstange abgestützt. Diese Bauweise ist mit der neuen Konstruktion nicht kompatibel, da die Aufhängung den Hinterbau ersetzen müsste und so die Steifigkeit des Chassis nicht gewährleistet wäre.

### 10.3.2 Konzept

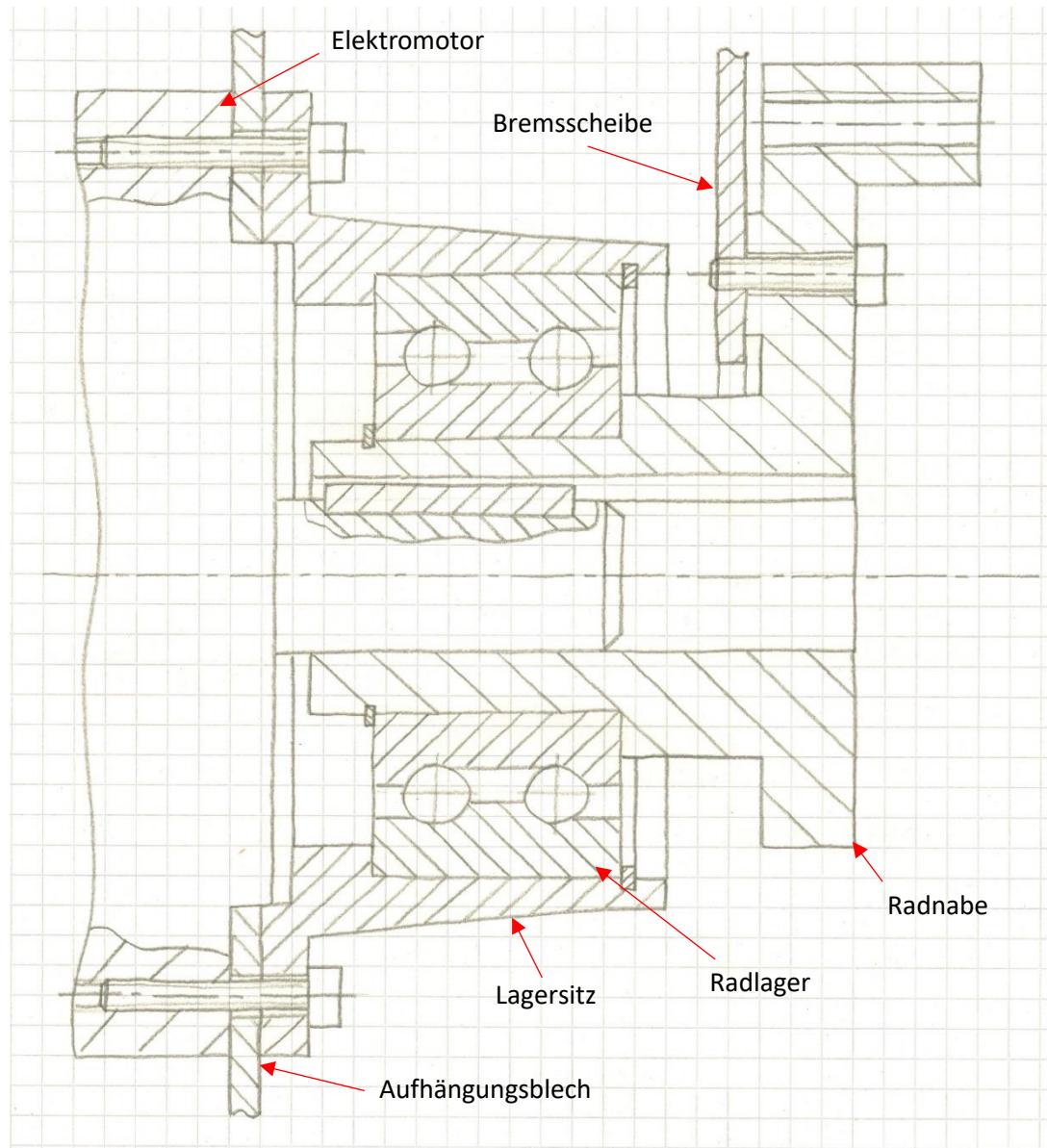


Abbildung 10-1 Hintere Radaufhängung Handskizze

Nach Rücksprache mit den Betreuungslehrern, welche im Laufe der Jahre viele Erfahrungen mit diesem Projekt sammeln konnten, wurde beschlossen, dass eine Federung aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Geschwindigkeiten nicht erforderlich ist. Dadurch kommt es zu keiner Bewegung der Aufhängungsteile, wodurch diese nicht drehbar gelagert werden müssen. Somit sind typische Aufhängungsteile (Querlenker, Querlenkeraufnahmen, Gelagerte Radträger etc.) nicht nötig, wodurch es möglich ist, auf diese Aufhängungsteile zu verzichten und eine starre Radaufhängung zu konzipieren.

In der obigen Abbildung ist das Konzept der neuen hinteren Radaufhängung skizziert. Der Lagersitz für das Radlager wird an der Außenseite des Aufhängebleches befestigt, wobei das Radlager mittels Sicherungsringen axial gesichert ist. Der Elektromotor wird an der Innenseite des Aufhängebleches angeflanscht, welcher die Radnabe über eine Passfederantriebswelle antreibt. Die Bremsscheibe wird an der Rückseite der Radnabe angeschrägt.



### 10.3.3 Bewertung

#### 10.3.3.1 Bewertungskriterien

- **Gewicht**

Das wichtigste Kriterium ist das Gewicht, da das Fahrzeug ein geringes Gewicht haben sollte, um den Energieverbrauch so gering wie möglich zu halten.

- **Fahreigenschaft**

Das Fahrzeug sollte möglichst gute Fahreigenschaften besitzen und vor allem bei Kurvenfahrten stabil bleiben.

- **Komplexität**

Der Konstruktionsaufwand sollte so gering wie möglich sein, damit man sich auch auf die anderen Bereiche des Fahrzeugs konzentrieren kann. Dies spart Zeit und verbessert die Konstruktion des gesamten Fahrzeugs.

- **Montage**

Eine montagefreundliche Konstruktion ist wichtig, um Zeit beim Zusammenbau sparen zu können.

- **Kosten**

Um bei der Fertigung nicht in finanzielle Probleme zu geraten, muss dieser Punkt miteinbezogen werden. Bei diesem Kriterium ist auch die Erreichbarkeit von Sponsoren einbezogen, welche die Kosten für bestimmte Teile oder Konstruktionen teilweise oder vollständig übernehmen können.

#### 10.3.3.2 Punkteverteilung

Jedem Konzept werden für die gegebenen Kategorien Punkte vergeben. Diese Punkte werden aufsummiert und je nach Höhe der Punktzahl ist erkennbar, wie brauchbar das jeweilige Konzept für die Anforderungen ist.

Völlig ungeeignete Kategorie ←      **Punktevergabe**      → Sehr geeignete Kategorie

0      1      2      3      4      5      6      7      8      9      10



### Doppelquerlenker Aufhängung

| Kategorie         | Punkte    | Begründung                              |
|-------------------|-----------|---|
| Gewicht           | 9         | Leichte Querlenker, wenig Material      |
| Fahreigenschaft   | 7         | Stabiles Fahrverhalten                  |
| Komplexität       | 5         | Aufwendige Geometrie, viele Komponenten |
| Montage           | 6         | Viele Komponenten                       |
| Kosten            | 7         | Viele, dafür meist einfache Teile       |
| <b>Punktezahl</b> | <b>34</b> |   |

Tabelle 10-1 Konzept Doppelquerlenker Aufhängung

### Starre Aufhängung

| Kategorie         | Punkte    | Begründung                             |
|-------------------|-----------|--|
| Gewicht           | 6         | Schweres/großes Drehteil               |
| Fahreigenschaft   | 7         | Stabil in alle Richtungen              |
| Komplexität       | 8         | Wenig Teile                            |
| Montage           | 9         | Schneller, unkomplizierter Zusammenbau |
| Kosten            | 7         | Wenig, dafür CNC Teile                 |
| <b>Punktezahl</b> | <b>37</b> |  |

Tabelle 10-2 Konzept starre Aufhängung

#### 10.3.3.3 Auswertung

Schlussendlich wurde für die starre Aufhängung entschieden, da diese einfach aufgebaut ist und eine aufwendige Aufhangungsgeometrie aufgrund der fehlenden Federung nicht notwendig ist. Durch das Verwenden einer Feder bzw. eines Dämpfers ist eine bewegliche Aufhängung erforderlich, da es zu Geometrieveränderungen kommt. Bei einer ungefederten Aufhängung ist dies nicht der Fall, wodurch eine starre Aufhängung gegenüber herkömmlicher ungefederter Aufhängungen keine bis nur geringe Nachteile aufweist.



## 10.4 Umsetzung in CAD

### 10.4.1 Hintere Radaufhängung Version 1

#### 10.4.1.1 Konstruktion

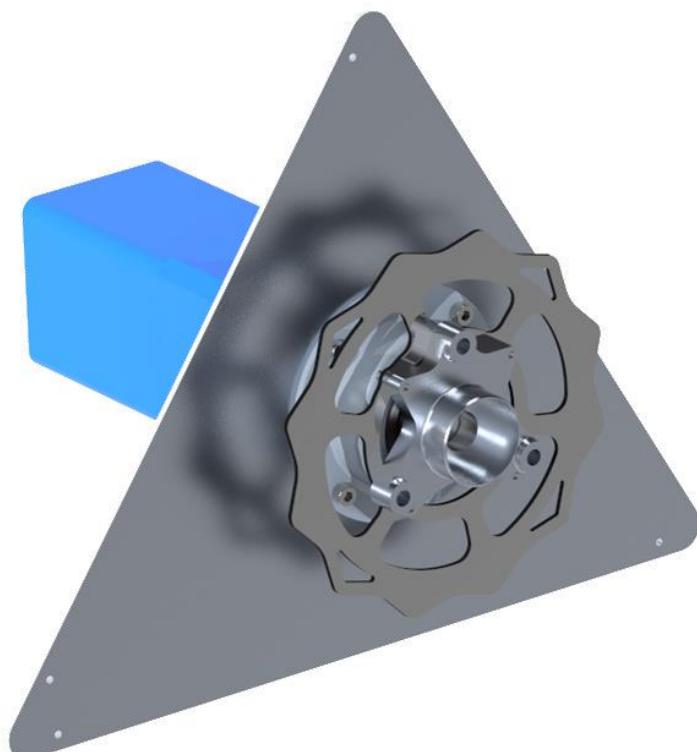


Abbildung 10-2 Hintere Radaufhängung Version 1

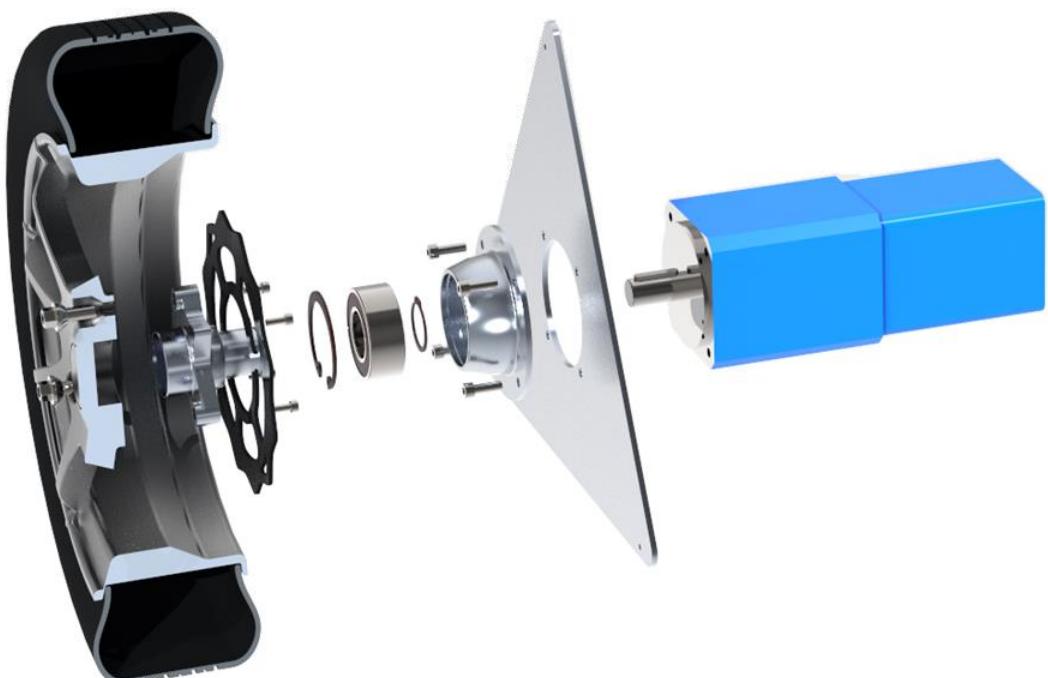


Abbildung 10-3 Hintere Radaufhängung Version 1 Explosion

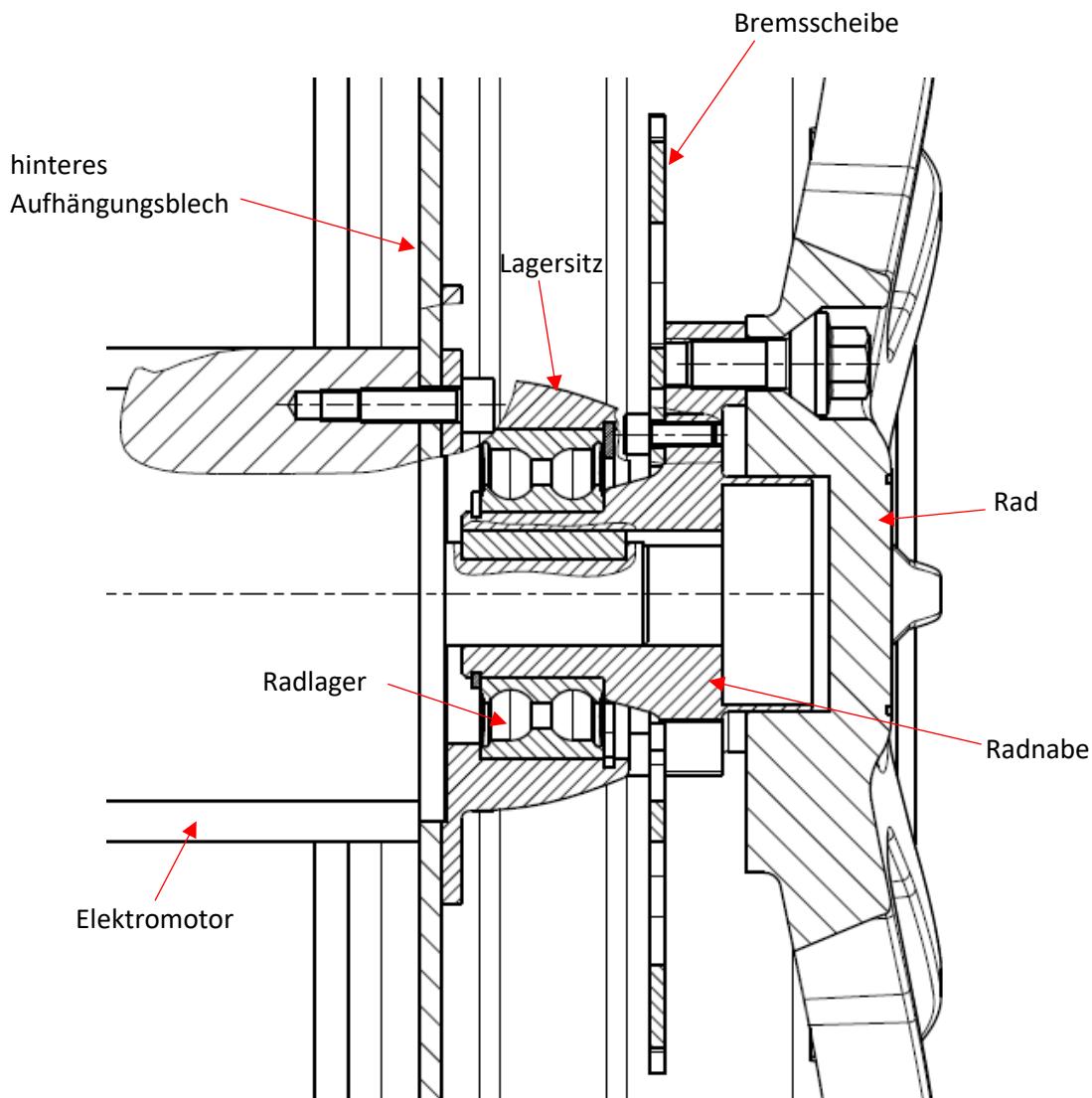


Abbildung 10-4 Hintere Radaufhängung Version 1 Schnittdarstellung

Die hintere Radaufhängung besteht aus dem Lagersitz, welcher mit dem Radnabenmotor verschraubt ist. Für eine problemlose Kraftübertragung ist der Elektromotor über eine Zentriernase am Aufhängungsblech sowie am Lagersitz zentriert. Die Radnabe ist am Innenring des Radlagers eingepresst, wobei das Radlager ebenfalls im Lagersitz eingepresst ist. Das Lager und die Radnabe sind mittels Sicherungsringen axial gesichert. Die Bremsscheibe ist an der Radnabe angeschraubt und das Rad ist an der Radnabe zentriert und angeschraubt.

#### 10.4.1.2 Auswertung

Das Prinzip der hinteren Radaufhängung kann beibehalten werden, da sehr wenige Teile erforderlich sind und die Radlagerung stabil ist. Allerdings kommt es aufgrund des geringen Abstands zu einer Kollision mit dem Rad und dem Aufhängungsblech und ist somit nicht funktionsfähig, es muss deshalb der Abstand vergrößert werden.



## 10.4.2 Hintere Radaufhängung Version 2

### 10.4.2.1 Konstruktion

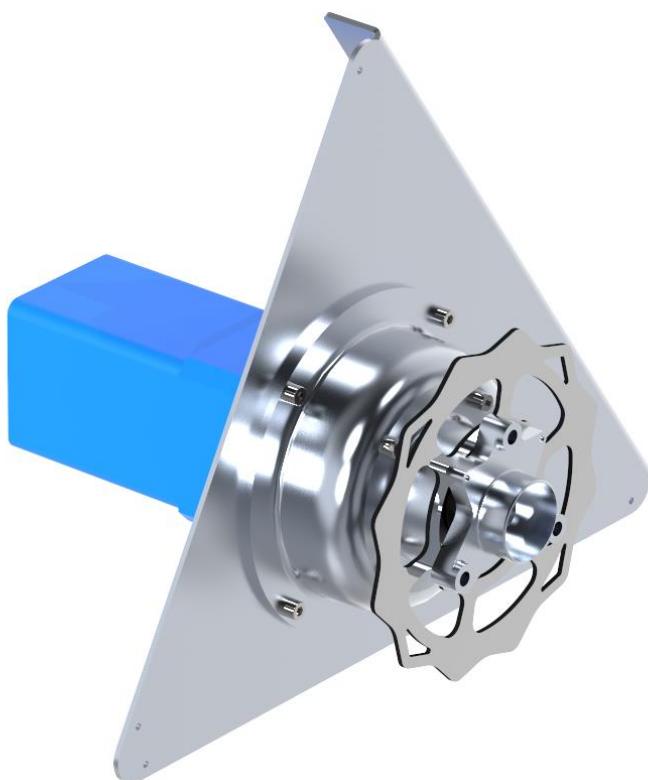


Abbildung 10-6 Hintere Radaufhängung Version 2

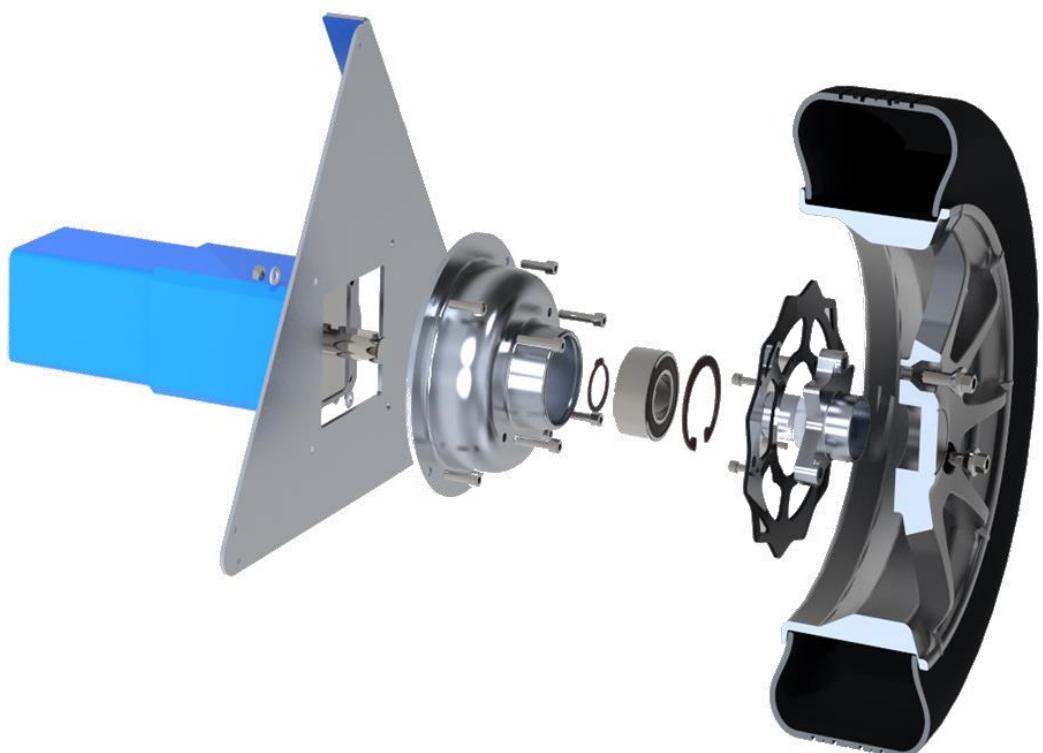
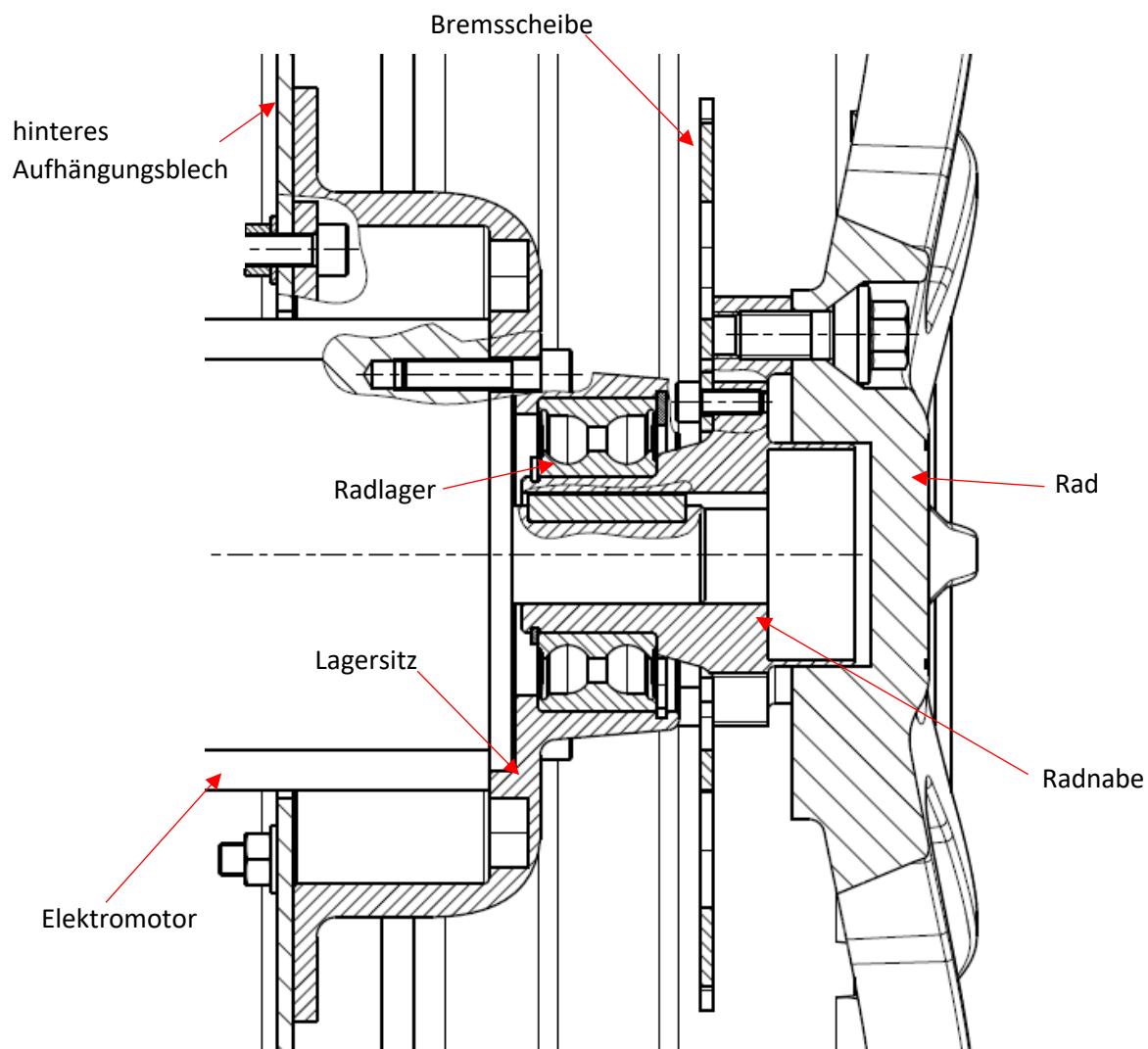


Abbildung 10-5 Hintere Radaufhängung Version 2 Explosion



Bei dieser überarbeiteten Version wurde der Lagersitz verändert. Das Radlager befindet sich im vorderen Teil des Lagersitzes, wobei der Elektromotor auf der Innenseite angeschraubt, über die Zentriernase zentriert und somit im Lagersitz teilweise versenkt ist. Der Lagersitz ist am Aufhängungsblech angeflanscht, wobei hierbei Muttern verwendet werden müssen. Die restlichen Komponenten blieben unverändert.

#### 10.4.2.2 Auswertung

Das Ziel, das Rad weiter nach außen zu positionieren, ist mit dieser Variante möglich, allerdings ist der erforderliche Lagersitz sehr komplex und schwer. Dieses Teil müsste spanend bearbeitet werden, wodurch es zu hohem Materialabtrag kommen würde. Das hohe Gewicht könnte durch Änderungen an der Geometrie zwar verringert werden, würde aber weiterhin sehr hoch bleiben. Zudem ist die hintere Spurweite bei dieser Variante noch zu schmal, wodurch das Rad weiter nach außen gerückt werden müsste. Mit diesem Konzept würde das Gewicht weiter stark ansteigen und die Fertigung wäre sehr unwirtschaftlich.

## 10.4.3 Hintere Radaufhängung Version 3

### 10.4.3.1 Konstruktion

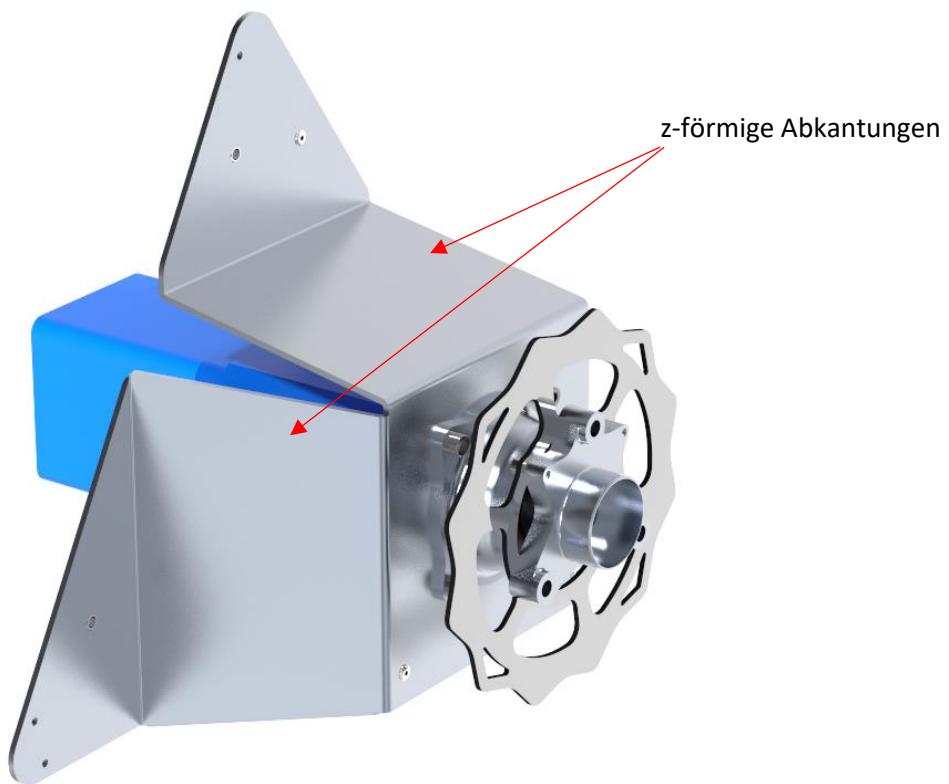


Abbildung 10-9 Hintere Radaufhängung Version 3

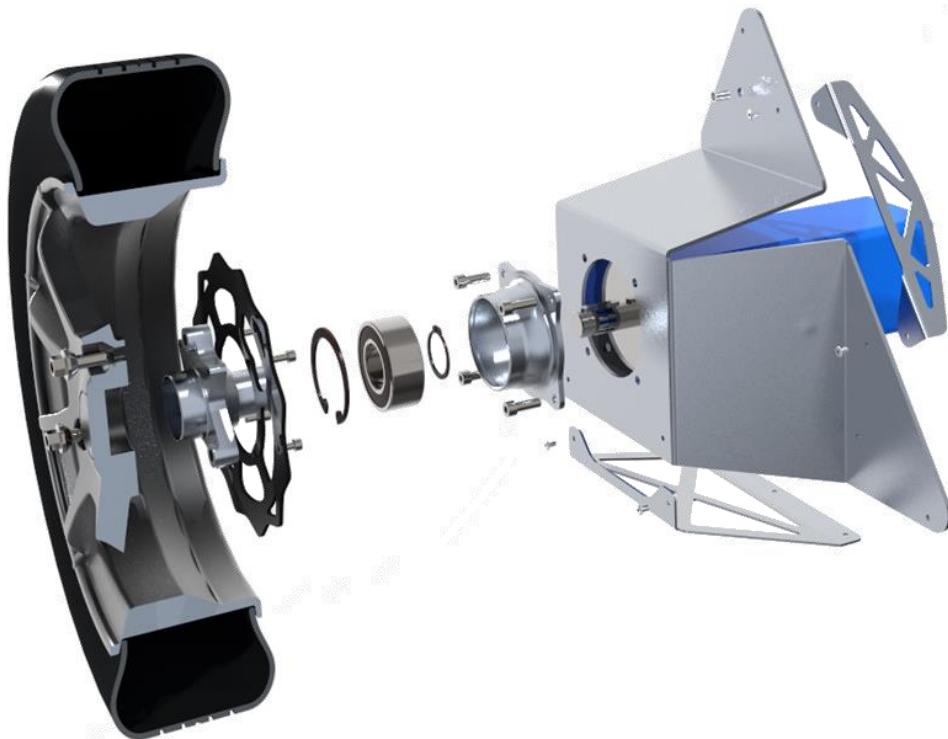
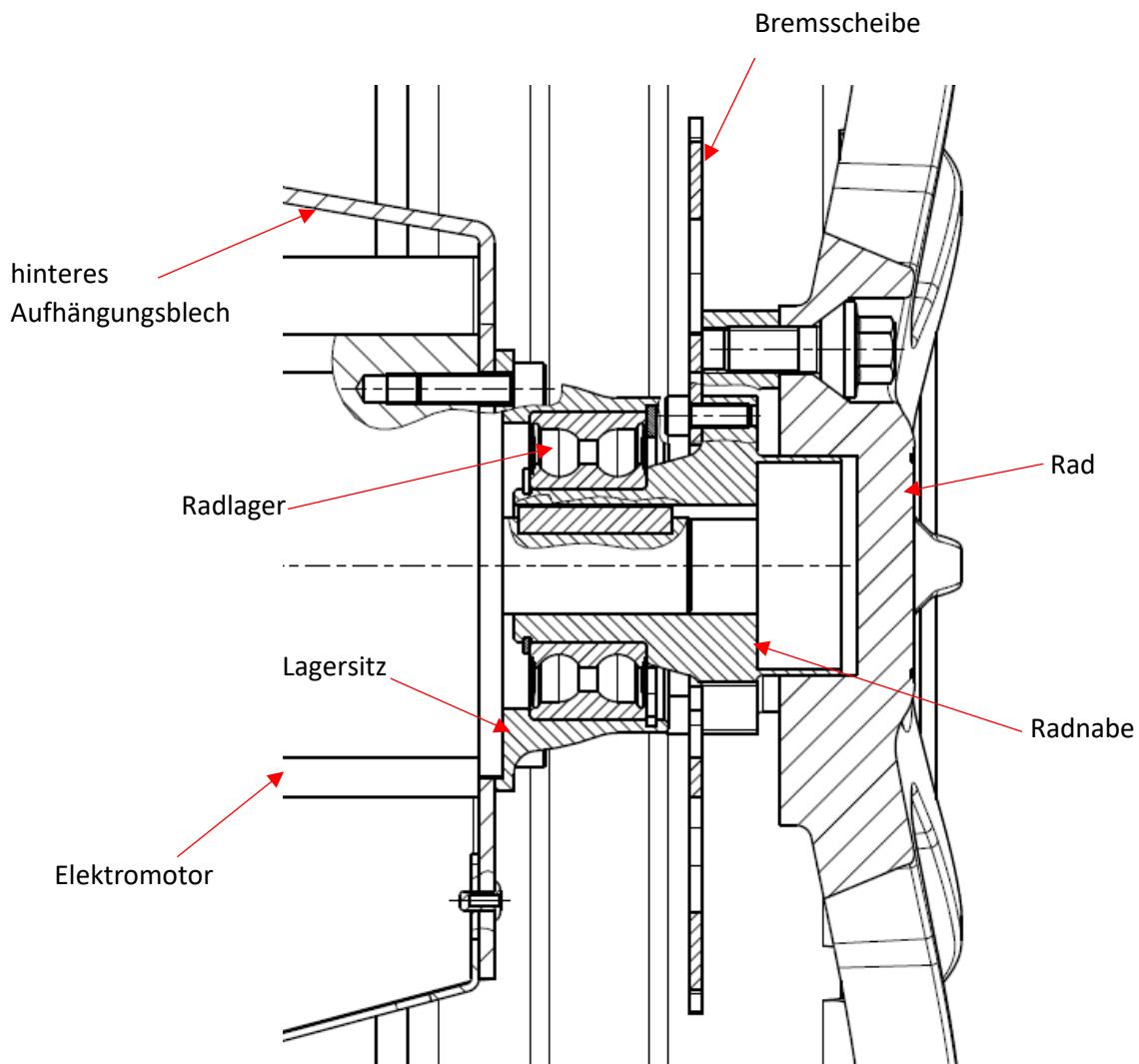


Abbildung 10-8 Hintere Radaufhängung Version 3 Explosion



Um die Spurweite zu vergrößern, wurde das Aufhängungsblech stark verändert. Es handelt sich nun um ein Blech mit drei z-förmig abgekanteten Segmenten. Um die Steifigkeit der Aufhängung bei axialer Radbelastung zu erhöhen, ist das seitliche Versteifungsblech am Aufhängungsblech angenietet und an den Kontaktflächen verklebt. Zur Erhöhung der Gesamtstabilität, wurde ein zusätzliches unteres Versteifungsblech am Aufhängungsblech befestigt. Dieses Versteifungsblech ist an der Seitenfläche vernietet und entlang der seitlichen Segmente des Aufhängungsbleches verklebt. An der Seitenfläche sind die weiteren Komponenten gleich wie bei der ersten Version („10.4.1 Hintere Radaufhängung Version 1“) angeordnet. Der Lagersitz wurde überarbeitet, die Umfangsfläche weiter spannungsoptimiert und der Befestigungsflansch gewichtsoptimiert.

#### 10.4.3.2 Auswertung

Die Spurweite konnte weiter vergrößert werden und die Fertigung ist einfacher sowie kostengünstiger, da es sich bei den Komponenten hauptsächlich um Blechteile handelt. Wie in der FEM in „12.7.1 Version 3“ erkennbar, handelt es sich um eine stabile Aufhängung, welche festigkeitstechnisch im unkritischen Bereich liegt. Dadurch ist es aufgrund der heute fortschrittlichen Blechfertigung problemlos möglich, das Gewicht der Bleche durch Auslaserungen weiter zu senken.

## 10.4.4 Hintere Radaufhängung Version 4

### 10.4.4.1 Konstruktion

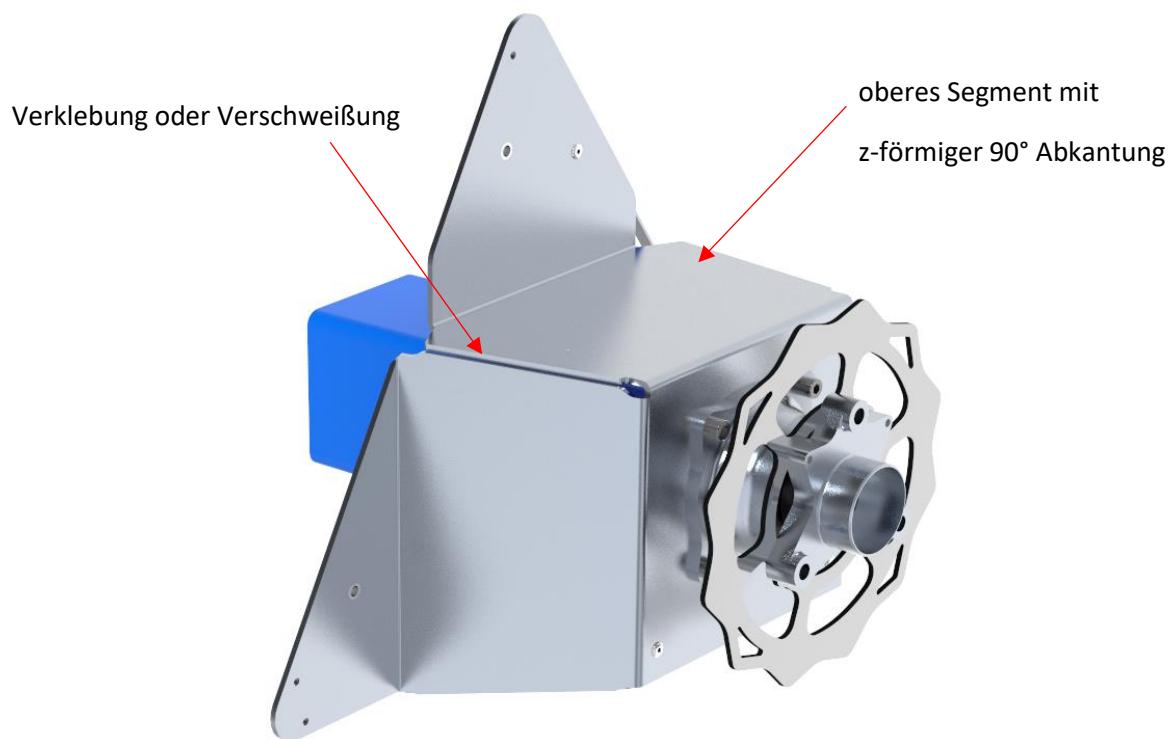


Abbildung 10-12 Hintere Radaufhängung Version 4

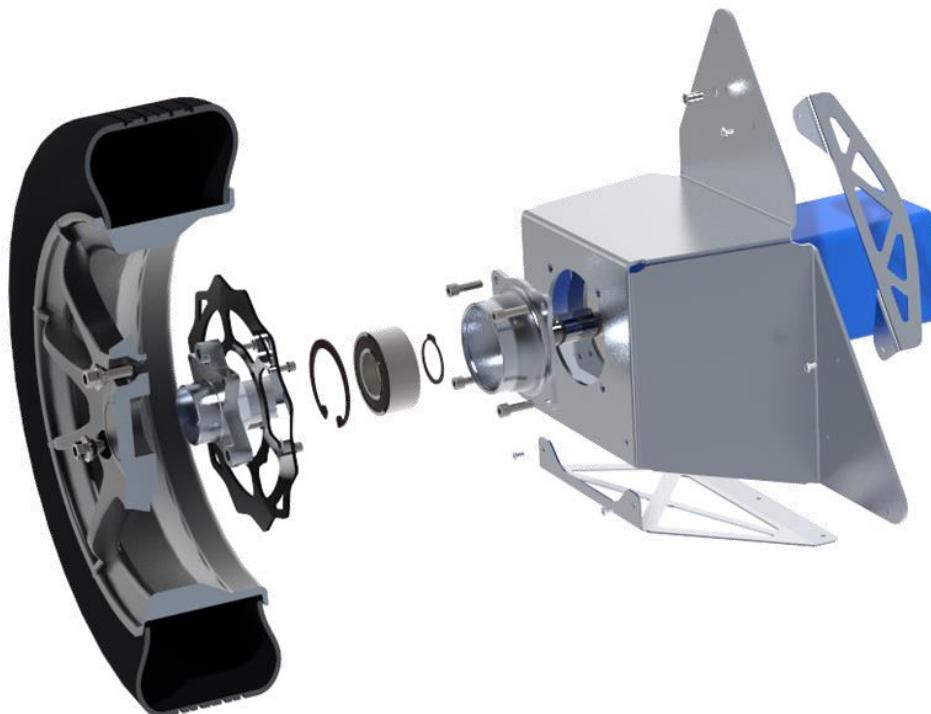


Abbildung 10-11 Hintere Radaufhängung Version 4 Explosion

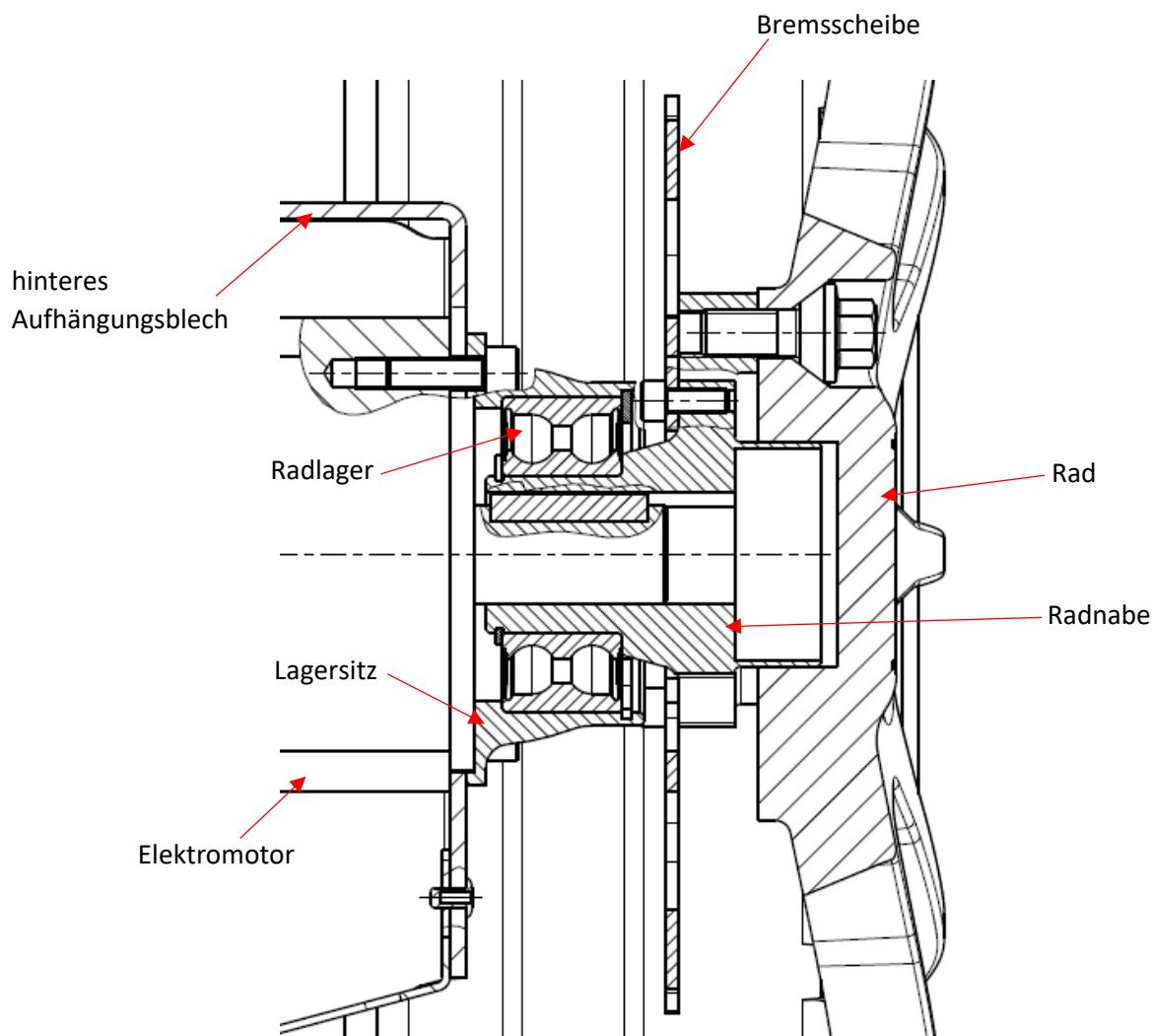


Abbildung 10-13 Hintere Radaufhängung Version 4 Schnittdarstellung

Diese Version ist der vorherigen Version („10.4.3 Hintere Radaufhängung Version 3“) sehr ähnlich. Die Versteifungsbleche sowie die Komponenten für die Radlagerung und Radbefestigung sind von der vorherigen Version übernommen. Der Unterschied zur vorherigen Version ist das Aufhängungsblech, welches geometrisch verändert wurde. Die drei z-förmig abgekanteten Segmente wurden übernommen, wobei das obere Segment eine 90° Abkantung besitzt. Diese Abkantung wird an den seitlichen Flächen mit den seitlichen Segmenten verklebt oder verschweißt, wodurch sich ein geschlossener Blechkörper ergibt. Ziel der Änderungen an der hinteren Radaufhängung ist, eine Verbesserung der Steifigkeit zu erreichen.

#### 10.4.4.2 Auswertung

Aus der FEM in „12.7.2 Version 4“ ist erkennbar, dass keine Verbesserung der bereits vorhandenen Aufhängung erzielt werden konnte. Die Verformung dieser Version ist höher, wodurch die Änderungen nicht die erhoffte Verbesserung der Steifigkeit aufweisen. Deshalb wird auf die vorherige Version („10.4.3 Hintere Radaufhängung Version 3“) zurückgegriffen.

#### 10.4.5 Endversion

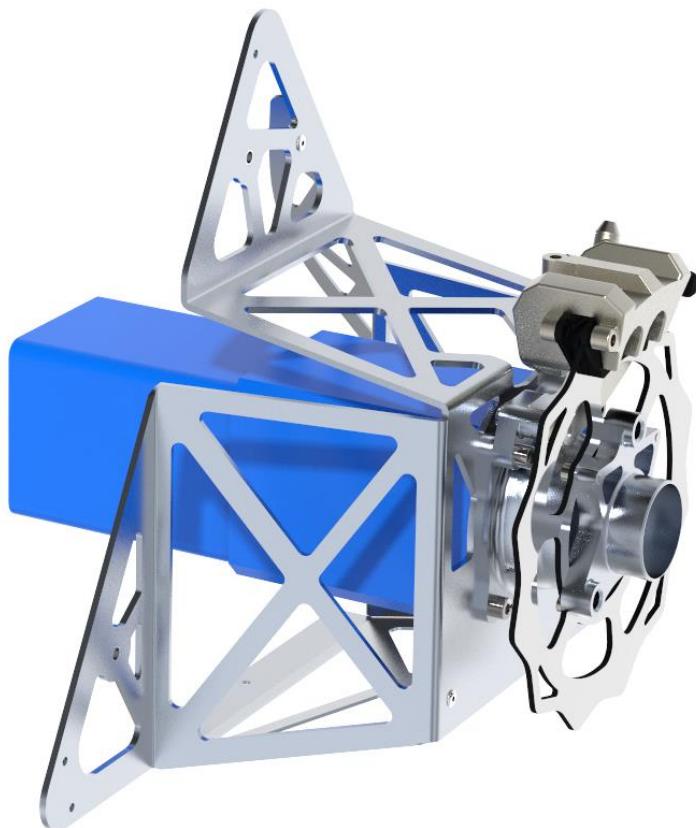


Abbildung 10-15 Hintere Radaufhängung Endversion Ansicht 1

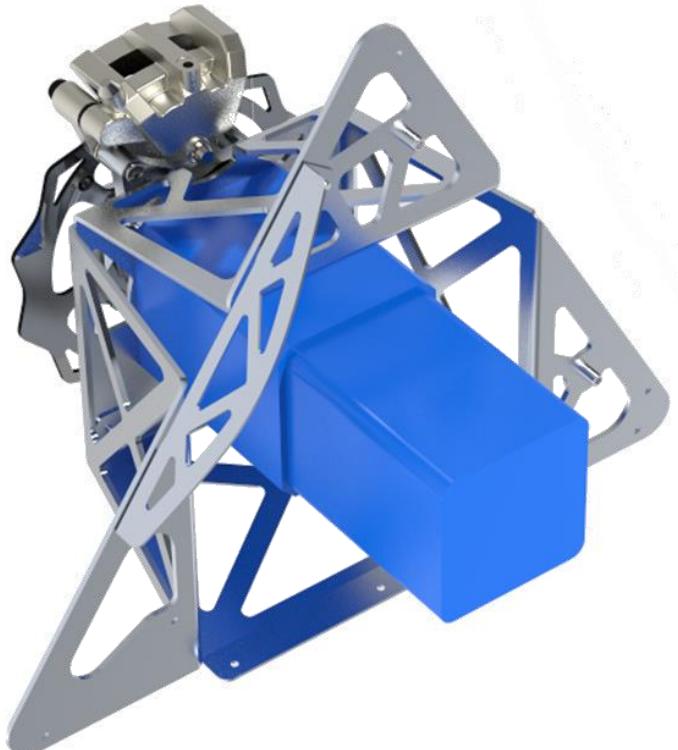


Abbildung 10-14 Hintere Radaufhängung Endversion Ansicht 2

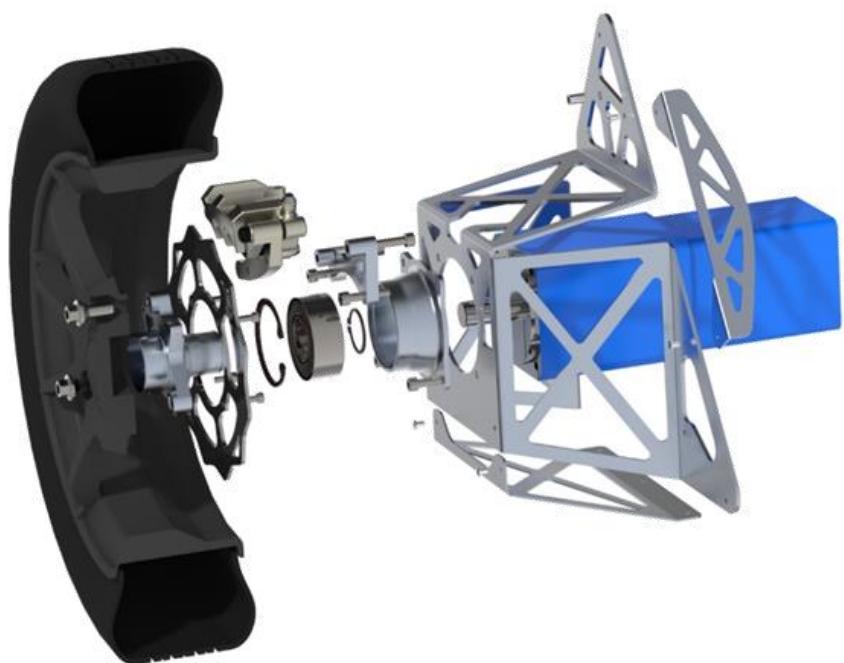
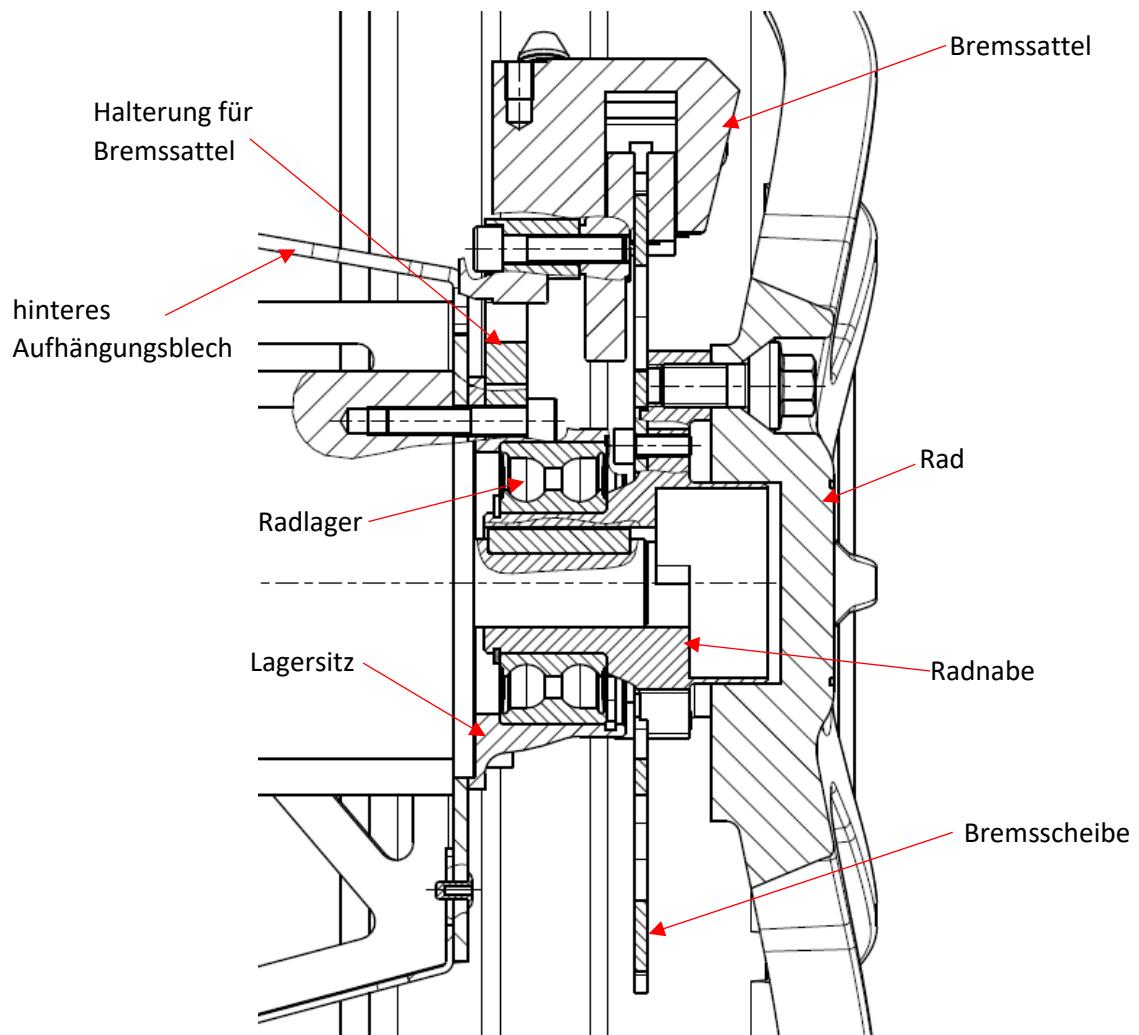
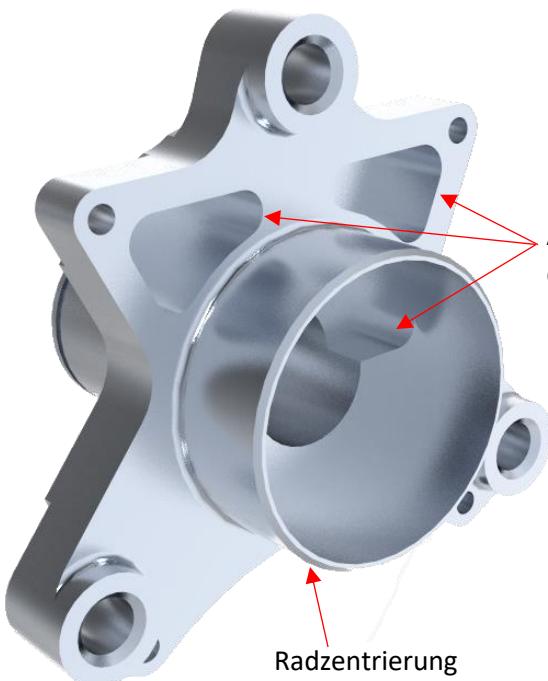


Abbildung 10-17 Hintere Radaufhängung Endversion Explosion



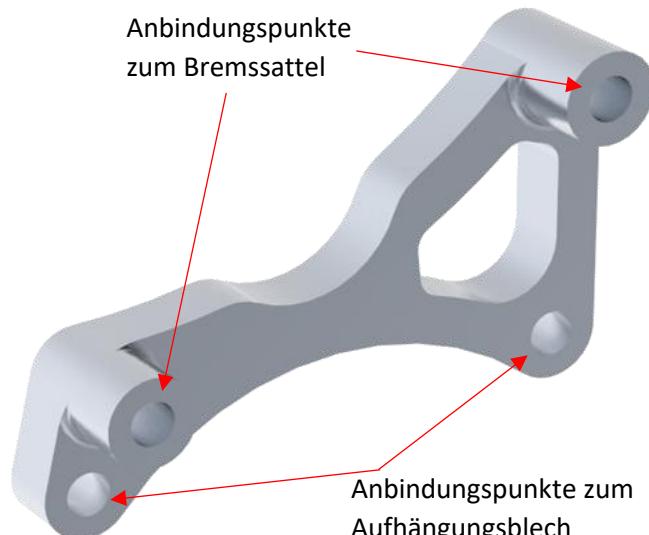
Die umgesetzte Version der hinteren Radaufhängung wurde deutlich gewichtsreduziert. Das Aufhängungsblech wurde mit Auslaserungen konstruiert, wobei die Steifigkeit unbedenklich darunter leidet. Bei der Radlagerung handelt es sich weiterhin um den gewichtsoptimierten Lagersitz. Auf der Innenseite des Aufhängungsbleches ist der Elektromotor angeflanscht, welcher über die Zentriernase am Aufhängungsblech zentriert wird. Die Radnabe wurde bei der Endversion überarbeitet. Aufgrund der gegebenen Anschraubpunkte für das Rad und der Bremsscheibe liegt der Schwerpunkt nicht in der Rotationsachse des Antriebs, wodurch es zu Schwingungen im Fahrbetrieb kommt. Diese Schwingungen schädigen die Aufhängungskomponenten und können zu Schwingungsversagen führen. Die Geometrie der hinteren Radnabe wurde daher so geändert, dass diese ausgewuchtet und somit im Betrieb schwingungsfrei ist. Die Bremsscheibe ist bei dieser Radnabe über einen Absatz zentriert, dadurch können eventuelle Schwingungen aufgrund außermittiger Befestigung beseitigt werden. Die Halterung für den Bremssattel wird mit den beiden oberen Schrauben des Lagersitzes befestigt. Der Bremssattel selbst wird mit zwei Schrauben an die Halterung angeschraubt.



Ausfrässungen für Auswuchtung  
der Radnabe

Radzentrierung

Abbildung 10-19 Hintere Radnabe



Anbindungspunkte  
zum Bremssattel

Anbindungspunkte zum  
Aufhängungsblech

Abbildung 10-18 Hintere Bremssattelaufnahme



## 11 Ermittlung der Radlasten

### 11.1 Allgemeines

Um ein Fahrzeug zu dimensionieren bzw. die jeweiligen erforderlichen Bauteilfestigkeiten herauszufinden, ist es notwendig die im Fahrbetrieb auftretenden Belastungen zu ermitteln. Da die Räder die Kontaktpunkte zum Untergrund darstellen, handelt es sich bei den ermittelten Kräften um die einzelnen maximalen Radlasten in radialer, tangentialer sowie axialer Richtung, welche durch das Gewicht des Fahrzeugs, die Bremsmanöver oder die Kurvenfahrt hervorgerufen werden können. Diese Werte können daraufhin auch in der FEM-Simulation verwendet werden und sind daher die Grundlage für sämtliche Berechnungsmodelle des Fahrzeugs. Es ist allerdings zu erwarten, dass die ermittelten Werte der Radlasten höher sind, als sie in der Realität auftreten, da bei an zunehmenden Werten, wie zum Beispiel dem Reifenreibwert oder dem Fahrzeuggewicht inkl. Fahrer, immer der theoretische höchstmögliche Wert angenommen wurde, um das Fahrzeug gegen eventuelle Überbelastung abzusichern.

### 11.2 Verschiedene Fahrzustände & Belastungsfälle

#### 11.2.1 Gleichmäßige Geradeausfahrt

Bei der gleichmäßigen Geradeausfahrt treten nur die Aufstandskräfte, welche durch die Gewichtskraft hervorgerufen werden, sowie die tangentialen Antriebskräfte (wirken dem Luftwiderstand entgegen), welche durch das benötigte Antriebsmoment entstehen, auf. Dieser Fahrzustand stellt daher eine eher geringe Belastung auf das Chassis sowie die Aufhängungsbaugruppen dar, und wird daher auch in der Berechnung nicht näher behandelt.

#### 11.2.2 Beschleunigte Geradeausfahrt

Bei der beschleunigten Geradeausfahrt tritt nun eine Gewichtsverlagerung zwischen Hinterachse und Vorderachse um den Fahrzeugschwerpunkt auf, weshalb die Hinterachsbelastung höher wird als die Vorderachsbelastung. Da allerdings in der Regel die maximal mögliche Beschleunigung eines Fahrzeugs geringer ist als die maximal mögliche Verzögerung, stellt auch dieser Fall eine vergleichsweise geringe Belastung für die belasteten Bauteile dar. Daher wird auch dieser Lastfall nicht näher in der Berechnung berücksichtigt.

#### 11.2.3 Verzögerte Geradeausfahrt

Bei der verzögerten Geradeausfahrt tritt ebenfalls eine Gewichtsverlagerung zwischen Hinterachse und Vorderachse um den Fahrzeugschwerpunkt auf. Allerdings ist durch das maximale übertragbare Bremsmoment, welches wesentlich höher ist als das maximal mögliche Beschleunigungsmoment, die Gewichtsverlagerung, und daher auch die Erhöhung bzw. Verringerung der Radlasten auf den jeweiligen Achsen, für die Berechnung von signifikant höherer Priorität. Daher wird bei der Ermittlung der maximalen Belastung des Fahrzeugs dieser Fall mitberücksichtigt.



## 11.2.4 Gleichmäßige Kurvenfahrt

Bei der gleichmäßigen Kurvenfahrt treten die Aufstandskräfte, die tangentialen Antriebskräfte sowie axiale Seitenführungskräfte auf. Da diese maximalen Seitenführungskräfte, welche die Trägheitskraft des Fahrzeugs ausgleichen, über den Reifenreibwert von den Radlasten abhängig sind, sind diese ebenfalls durch die Gewichtsverlagerung spurweise höher (kurvenaußenseitig) bzw. niedriger (kurveninnenseitig). Dieser Belastungszustand stellt eine signifikante Strapazierung der Bauteile dar, daher wird dieser bei der Evaluierung des schlimmsten Lastzustandes miteinbezogen.

## 11.2.5 Beschleunigte Kurvenfahrt

Wie im Punkt 10.2.2 *Beschleunigte Geradeausfahrt* bereits erwähnt ist die Belastung durch die Beschleunigung des Fahrzeugs weitaus geringer als durch die Verzögerung. Daher wird dieser Fall nicht weiter berücksichtigt.

## 11.2.6 Verzögerte Kurvenfahrt

Bei der verzögerten Kurvenfahrt treten die Aufstandskräfte, die tangentialen Bremskräfte sowie axiale Seitenführungskräfte auf. Die maximale übertragbare resultierende Kraft aus den beiden ebenen „Reifenhaftungskräften“ (Seitenführungskraft durch Kurvenfahrt sowie der Tangentialkraft durch Bremsmanöver) ist abhängig vom Reifenreibwert, weshalb sich starke Bremsmanöver und starke Kurvenradien zur gleichen Zeit, gegenseitig ausschließen. Ein starkes Einlenken während des Abrufens einer hohen Bremsleistung (oder umgekehrt), würde unweigerlich zu einer Überlastung des Reifens führen, was im Falle der verzögerten Kurvenfahrt das Fahrzeug zum Untersteuern bringen würde. Daher bringt auch dieser Fall das Fahrzeug an seine Grenzen, weshalb auch dieser Fall in die Ermittlung des schlimmsten Falles miteinbezogen wird.

# 11.3 Evaluierung des Lastfalles der höchsten Bauteilbelastung

Bei sämtlichen Fällen ist zu beachten, dass die höchste Belastung des Fahrzeugs sowie seiner Bauteile an der Grenze zwischen Reifenmaximallast und Reifenüberlastung stattfindet. Eine Überlastung wäre beispielsweise das Unter- sowie Übersteuern des Fahrzeugs sowie das Blockieren der Räder bei zu hohem Bremsdruck.

## 11.3.1 Berücksichtigung dreier Vergleichsfälle

### 11.3.1.1 Verzögerte Geradeausfahrt

Abrufen der maximal möglichen Verzögerung („Vollbremsung“)

### 11.3.1.2 Gleichmäßige Kurvenfahrt

Abrufen des kleinstmöglichen Kurvenradius bei bestimmter Geschwindigkeit

### 11.3.1.3 Verzögerte Kurvenfahrt

Abrufen der maximal noch möglichen Bremsleistung bei bestimmtem Kurvenradius sowie bestimmter Geschwindigkeit.

### 11.3.2 Höchster Belastungsfall

Hierbei zu beachten, dass ein Reifen eine gewisse Kraft (in Straßenebene) übertragen kann, deren Betrag nur vom Reifreibwert sowie der Aufstandschaft beeinflusst werden kann, wodurch die Höhe der maximal übertragbaren Kraft unabhängig von der Richtung der Kraft ist. Daher ist es nicht ausschlaggebend, ob die Kraft in Form einer tangentialen Bremskraft, einer axialen Seitenführungskraft oder in einer Kombination aus beiden auftritt, weshalb auf Basis folgender Gründe die **gleichmäßige Kurvenfahrt** als die größte Belastung für das Fahrzeug und seine Bauteile/-gruppen wie Chassis und Aufhängung angenommen werden:

- Da die Spurweite signifikant geringer ist als der Radstand, ist bei der Gewichtsverlagerung um den Schwerpunkt der Kraftarm geringer, wodurch sich eine höhere Reifenaufstandschaft ergibt, um dasselbe Wankmoment auszugleichen.

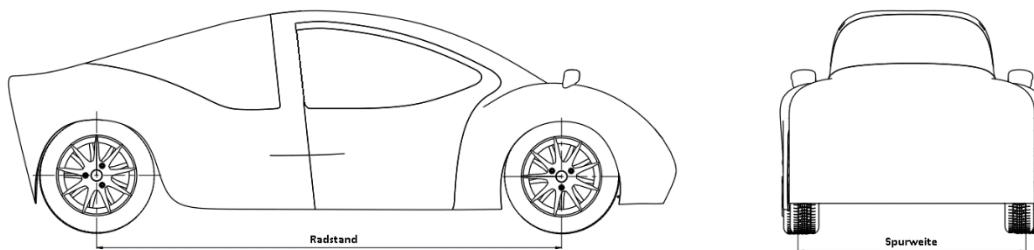


Abbildung 11-1 Radstand - Spurweite

- Weiters ist bei der Kurvenfahrt die maximale Haftung der Reifen ausnutzbar, was im Vergleich zur maximalen Verzögerung nicht zwingend der Fall sein muss. Die maximale Bremsleistung kann auch durch das Bremssystem bedingt sein und daher die Belastung des Fahrzeuges verringern.

Zusätzlich zur maximalen Belastung, die durch Fahrmanöver hervorgerufen wird, können, durch Unebenheiten oder Schäden, welche die Fahrbahn aufweist, weitere erhöhte Belastungen auftreten. Um dies zu berücksichtigen, wird in die Berechnung die „Schlaglochsicherheit“ mit einbezogen, welche die maximale Radlast um den Faktor drei erhöht.

In der folgenden Renderbildcollage ist der angenommene Fahrzustand schematisch dargestellt:

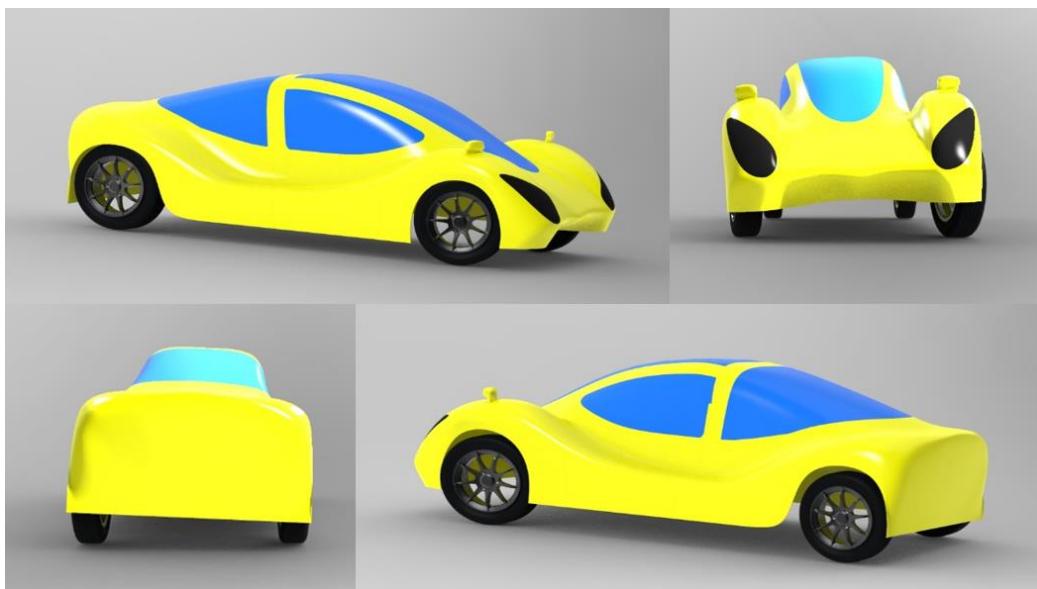


Abbildung 11-2 Collage Fahrzustand volle Kurvenfahrt



## 11.4 Berechnung des Fahrzustandes der größten Belastung

### 11.4.1 Konstante und angenommene Werte

Aufgrund der soeben durchgeführten Evaluierung des Lastfalles der höchsten Bauteilbelastung, sind nun folgende Werte für die Berechnung des „schlimmsten Radlastenfalles“ ausschlaggebend:

Konstante und angenommene Werte:

$$m := 300 \text{ kg} \quad \rightarrow \text{Gewichtsverteilung VA 50\% - HA 50\%}$$

$$h_{Schwerpunkt} := 300 \text{ mm} = h_1 \quad \mu_{Gummi\_Asphalt} := 0.9$$

$$s_{Spurweite\_m} := 1000 \text{ mm} = S_1 \quad \nu_{Schlagloch} := 3$$

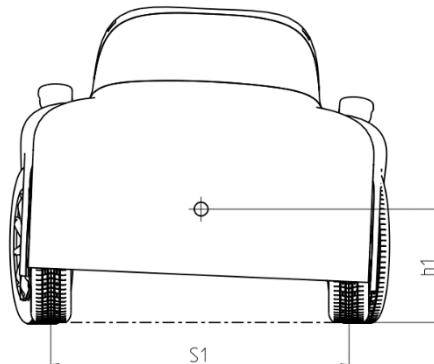


Abbildung 11-3 Berechnungsskizze Radlasten 1

Da sämtliche der Daten von verschiedenen Faktoren abhängig sind, welche zum Zeitpunkt der Fahrdynamikberechnung noch nicht genauer bekannt waren, können die Werte noch abweichen. Allerdings wurden die Werte so gewählt, dass sie für das Fahrzeug eine höhere Belastung bedeuten, als diese in der Realität auftreten wird. (Beispielhaft: Das Gesamtfahrzeuggewicht inkl. Fahrer wird 300kg niemals überschreiten, da hierbei von dem maximal zulässigen Fahrzeuggewicht von 225kg ausgegangen wurde, welches aber höchstwahrscheinlich um vieles unterschritten wird.)

### 11.4.2 Ermittlung der Radkräfte

$$F_G := m \cdot g = 2941.995 \text{ N}$$

$$F_{Radlast} := \frac{F_G}{4} = 735.499 \text{ N}$$

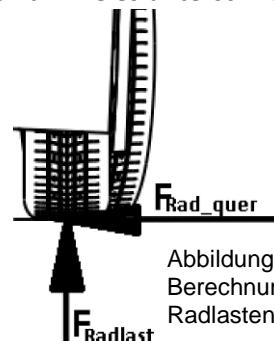


Abbildung 11-5  
Berechnungsskizze  
Radlasten 2

$$F_{Rad\_quer} := F_{Radlast} \cdot \mu_{Gummi\_Asphalt} = 661.949 \text{ N}$$

$$F_{quer\_max} := 4 \cdot F_{Rad\_quer} = 2647.796 \text{ N} = \text{konst.}$$

$$F_{T\_max} := F_{quer\_max}$$

$$F_{Radlast\_L} := F_{Radlast} - F_{Radlast\_zu}$$

$$F_{Radlast\_R} := F_{Radlast} + F_{Radlast\_zu}$$

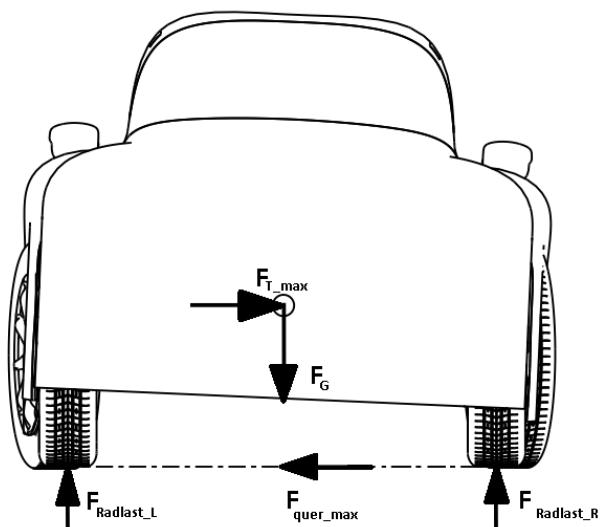


Abbildung 11-4 Berechnungsskizze Radlasten 3



$$\Sigma M_S := -M_{Radlast\_L} + M_{Radlast\_R} + M_{Wank} = 0$$

$$M_{Radlast\_L} := F_{Radlast\_L} \cdot \frac{s_{Spurweite\_m}}{2}$$

$$M_{Radlast\_R} := F_{Radlast\_R} \cdot \frac{s_{Spurweite\_m}}{2}$$

$$M_{Wank} := F_{quer\_max} \cdot h_{Schwerpunkt}$$

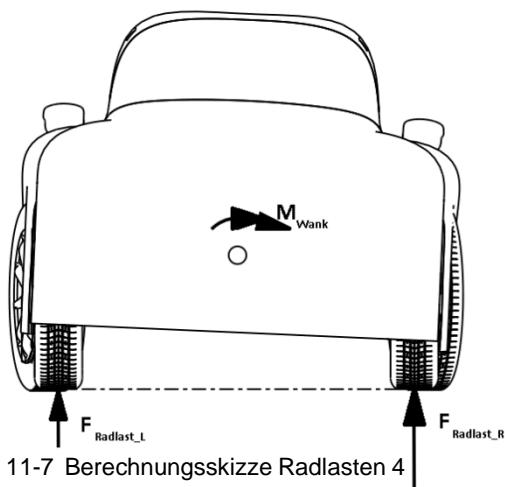


Abbildung 11-7 Berechnungsskizze Radlasten 4

$$\Sigma M_S := -F_{Radlast\_L} \cdot \frac{s_{Spurweite\_m}}{2} + F_{Radlast\_R} \cdot \frac{s_{Spurweite\_m}}{2} + F_{quer\_max} \cdot h_{Schwerpunkt} = 0$$

$$\Sigma M_S := \frac{s_{Spurweite\_m}}{2} \cdot [-F_{Radlast} + F_{Radlast\_zu} + F_{Radlast} + F_{Radlast\_zu}] + F_{quer\_max} \cdot h_{Schwerpunkt} = 0$$

$$\Sigma M_S := \frac{s_{Spurweite\_m}}{2} \cdot 2 \cdot F_{Radlast\_zu} + F_{quer\_max} \cdot h_{Schwerpunkt} = 0$$

$$\rightarrow F_{Radlast\_zu} := \frac{F_{quer\_max} \cdot h_{Schwerpunkt}}{s_{Spurweite\_m}} = 794.339 \text{ N}$$

$$F_{Radlast\_max} := F_{Radlast} + F_{Radlast\_zu} = 1529.84 \text{ N}$$

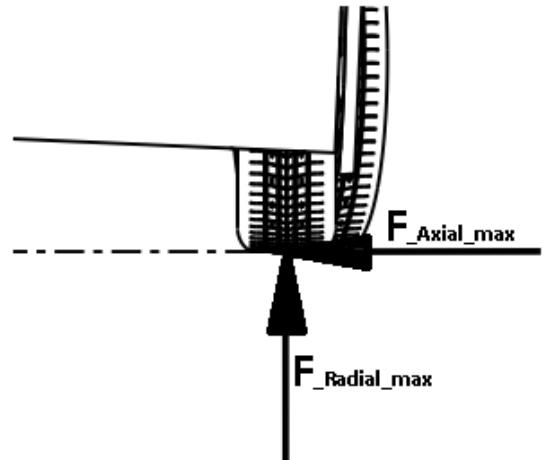


Abbildung 11-6 Berechnungsskizze Radlasten 5

Die maximal auftretende radiale Radlast, unter Berücksichtigung einer erhöhten Belastung durch Durchfahren eines Schlagloches, beläuft sich auf 4,6 kN. Die maximal auftretende axiale Radlast, beläuft sich auf 1,4 kN. Diese Werte können nun in der FEM-Simulation als Grundlage für die Auslegung des Fahrzeugs nach der höchsten auftretenden Belastung verwendet werden.



## 12 Bauteilsimulation

### 12.1 Allgemeines

Das Ziel einer Berechnung bzw. einer Bauteilanalyse ist, zu erkennen, wie sich ein Bauteil unter bestimmten Lastfällen verhält und wie stark es beansprucht wird. Dies ist einerseits wichtig, um sicherzustellen, dass gewisse Grenzfälle, wie beispielsweise die maximal zulässige Spannung, nicht überschritten werden, andererseits, dass Bauteile weiter optimiert werden können, um deren Hauptaufgaben zu verbessern.

### 12.2 Methoden der Festigkeitsanalyse

#### 12.2.1 Analytische Methoden

Bei den analytischen Methoden werden zuerst die Kräfte rechnerisch ermittelt. Je nach Wirkung der Kräfte kann zwischen verschiedenen Spannungsarten unterschieden und gerechnet werden. Analytische Methoden sind einfach anwendbar und erfordern keinen Rechner, komplexe Bauteilgeometrien und Lastfälle sind jedoch nicht berechenbar. In der Praxis wird dieses Verfahren vor allem für Dimensionierungen und grobe Auslegungen angewendet, da es schnell und unkompliziert ist.

#### 12.2.2 Numerische Methoden

Hierbei handelt es sich meistens um die Finite Elemente Methode oder kurz FEM, oft auch Finite Elemente Analyse, oder kurz FEA genannt. Es ist ein computerunterstütztes, numerisches Verfahren, welches die Spannungen an einem Bauteil mit Hilfe von hinterlegten Differentialgleichungen ermittelt, und so das Verhalten des Bauteils abbildet. Im folgenden Punkt wird genauer auf die FEM eingegangen.

### 12.3 Finite Elemente Methode

#### 12.3.1 Funktion<sup>47 48</sup>

Bei der FEM wird über das Bauteil ein Netz aus endlichen Teilen, den sogenannten „finiten Elementen“, gelegt. Das Bauteil wird in unterschiedliche Teilbereiche unterteilt, wobei ein Teilbereich die Form eines einfachen geometrischen Körpers besitzt. Bei der Form der Elemente handelt es sich meist um die Form eines Dreiecks, Vierecks oder Tetraeders, welche an definierten Knotenpunkten mit den benachbarten Elementen verbunden sind.

Jeder Teilbereich besitzt eine einfache Ansatzfunktion, welche das physikalische Verhalten des Körpers nachbildet. Durch Definition von Randbedingungen, wie Kräfte und Lagerbedingungen, kann das Verhalten des Bauteils näherungsweise nachgebildet werden. Das näherungsweise Bauteilverhalten ergibt sich aus dem Lösen der hinterlegten Differentialgleichungen. Die Differentialquotienten werden numerisch berechnet, wodurch es zu Abweichungen kommt. Durch die definierten Knotenpunkte der einzelnen Elemente können die Differentialgleichungen der benachbarten Elemente numerisch ermittelt werden. Das Verhalten des gesamten Netzes und somit des Bauteils kann so näherungsweise nachgebildet werden.

<sup>47</sup> Zwettler, 2021

<sup>48</sup> Finite-Elemte-Methode, 2021



Die Genauigkeit der FEM kann mit der Feinheit des Netzes sowie mit der Form der Elemente bestimmt werden. Ein grobes Netz führt zu einer verhältnismäßig ungenauen Lösung und kann vor allem bei kleinen Konturen problematisch werden, da die Kontur nicht nachgebildet werden kann. Die Verwendung einer feinen Netzrasterung erhöht die Genauigkeit, allerdings ist aufgrund der größeren Menge an Elementen eine höhere Rechenleistung bzw. Rechenzeit erforderlich.

Weiters ist die Form der einzelnen Elemente für die Genauigkeit der FEM mitentscheidend, da diese die Anzahl an Knotenpunkten und der damit verbundenen Freiheitsgrade sowie den hinterlegten Differentialgleichungen der einzelnen Elemente festlegt. Eine höhere Anzahl an Knotenpunkten wirkt sich positiv auf die Genauigkeit der Analyse aus, da es dadurch zu einer höheren Anzahl an definierten Freiheitsgraden kommt. Meist werden dreidimensionale Körper, wie Tetraeder, verwendet, wobei für geringere Rechenleistungen auch zweidimensionale, viereckige Flächen verwendet werden. Die Verwendung von dreieckigen Flächen erfordert eine geringere Rechenleistung, zeigt allerdings eine größere Abweichung zur Realität.

### 12.3.2 Geschichte<sup>49</sup> <sup>50</sup>

Als Vater der Finite Elemente Methode gilt Ray William Clough, welcher Anfang der 1950er Jahre bei Boeing die Aufgabe hatte, das Schwingungsverhalten von Flugzeugflügeln zu untersuchen. Clough hatte die Idee, ein mathematisches Modell zu erstellen, welches auf der Verkettung mehrerer Teile beruhte. Nach einem anfänglichen 1D-Balken Modell, welches nicht die gewünschte Genauigkeit erzielte, entwickelten Ray William Clough und M. Jonathan Turner ein 2D-Flächen Modell. Bei diesem Modell wurden die Flächen, Drei- oder Vierecke, miteinander verbunden, wobei Clough eine Steifigkeitsmatrix für die Verkettung der einzelnen Flächen entwickelte.

Die Pioniere der FEM im Automobilbau waren Ende der 1950er Jahre Daimler-Benz und Alfred Zimmer. Zimmer, Berechnungsingenieur bei der PKW-Vorentwicklung, entwickelte ein Berechnungsprogramm für räumliche Rahmen, welches er „Rahmen-Berechnung“, kurz „RB“, nannte. Die Richtigkeit des Berechnungsprogramms wurde Anfang der 1960er Jahre am Rahmenboden des Mercedes W100 geprüft.

Später wurde die Berechnung der Staatskarosse W100 vollständig dem „RB“ überlassen. Ab 1963 wurden bei Daimler-Benz Karosserieberechnungen durchgeführt, wobei das Netz aus Stab- und Flächenelementen bestand. Die Karosserien des Auto-Union 102, sowie des Audi 100 zählen zu den ersten von Computern berechneten Karosserien. Die Weiterentwicklung von „Rahmen-Berechnung“ führte schließlich zu ESEM (Elasto-Statik-Element-Methode). Die ESEM wurde anfangs noch für

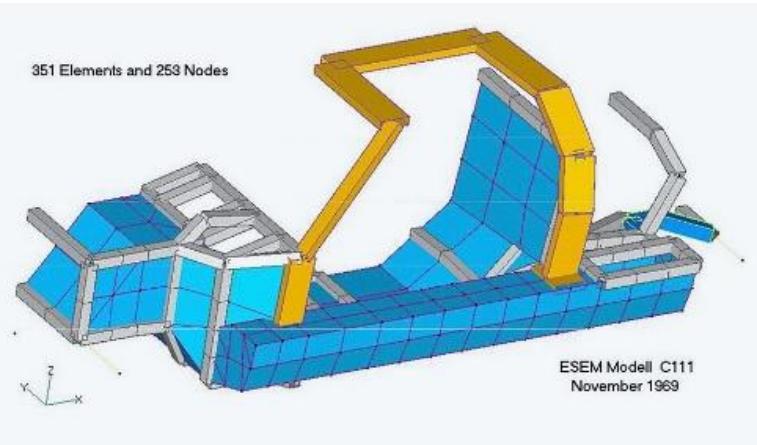


Abbildung 12-1 Mercedes C111 FEM Modell<sup>51</sup>

<sup>49</sup> one, 2021

<sup>50</sup> Zimmer, 2021

<sup>51</sup> Groth, 2021



Karosserieberechnungen verwendet, ehe es Ende der 1960er Jahre für die Neuentwicklung des Sportwagens Mercedes C111 verwendet wurde und im Unternehmen eine immer größere Rolle spielte.

Die Finite Elemente Methode fand seit dem Einsatz bei Mercedes-Daimler rasch bei Automobilkonzernen auf der ganzen Welt Anwendung. Neben der Berechnung von Karosserien bei Audi wurde unter anderem auch bei General Motors (USA) das Potenzial erkannt und für Crashtest-Simulationen angewandt. Die FEM wurde anfangs nur für Festigkeits- und Steifigkeitsanalysen von Karosserien und Rahmen verwendet. Später hat sich das numerische Analyseverfahren aufgrund der strenger werdenden Emissionsstandards auch bei der Motorentwicklung durchgesetzt. Hierbei wurde nicht nur auf die Festigkeit der Bauteile Rücksicht genommen, sondern vor allem das Schwingungsverhalten, die Wärmeausdehnungen und Wärmeverteilung im Verbrennungsmotor untersucht. Mit Hilfe von Frequenzanalysen konnte die Geräuschentwicklung der Motoren untersucht und durch Änderungen an der Gehäusegeometrie die Lärmentwicklung verringert werden. Die FEM hatte sich somit nicht nur für technische Zwecke durchgesetzt, sondern wurde seitdem auch aus Komfortgründen verwendet.

Die Finite Elemente Methode erreichte in kürzester Zeit viele Facetten der Automobilbranche und verkürzte so die Entwicklungszeiten und verringerte die Kosten deutlich. Der Einsatz modernerer Technik und Computer, die höhere Rechenleistungen erreichten, war es möglich, die Genauigkeit dieser Analysen immer weiter zu verbessern. Während Ende der 1960er Jahre die Modelle in wenige hundert Teile unterteilt wurden, sind nun Modellnetze mit Millionen von Elementen keine Seltenheit. Heutzutage ist die Finite Elemente Methode nicht mehr wegzudenken und ist ein fixer Bestandteil bei der Entwicklung oder Verbesserung von Bauteilen.

### 12.3.3 Verwendung<sup>52</sup>

Die FEM wird hauptsächlich in technischen Bereichen, wie der Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt und dem Maschinenbau verwendet. Anwendungsbeispiele in der Automobilbranche sind:

- **Festigungsberechnung**  
Rahmen, Karosserien, Motorkomponenten
- **Wärmeverhalten**  
Motorkomponenten, Auspuffanlagen
- **Schwingungssimulation**  
Schwingungsdämpfer, Motorkomponenten, Federelemente
- **Dichtungsverhalten**  
Motordichtungen, Scheibenabdichtungen, Dichtungslippen
- **Lackuntersuchung**  
Lacktrocknung, Lackauhärtung
- **Systemsimulation**  
Fahrdynamik, Verbrauch

Die Ergebnisse solcher Simulationen sind aufgrund der hohen Rechenleistungen so genau, dass Versuche und Testmodelle eingespart und die Entwicklungszeit sowie Kosten verringert werden können.

---

<sup>52</sup> Wiki, 2021



## 12.4 Bauteilanalyse des Fahrzeugs

Die FEM des Fahrzeugs wird analog zur Entwicklung der gesamten Konstruktion abgehandelt.

### 12.4.1 Allgemeines

Um das Gewicht des Scorpion so gering wie möglich zu halten, ist es wichtig, die essenziellen Komponenten wie das Chassis und die Aufhängungen zu überprüfen. So kann nicht nur sichergestellt werden, dass diese Komponenten ausreichend dimensioniert sind, mit Hilfe der FEM lassen sich noch weitere Optimierungsmöglichkeiten feststellen. In der Konzeptionierungsphase werden die Bauteile hauptsächlich überschlagsmäßig berechnet, um sicherzustellen, damit die Dimensionen näherungsweise richtig gewählt werden. Für die Berechnung einfacher Bauteile können analytische Methoden herangezogen werden. Bei komplexen Geometrien und Baugruppen, wie beispielsweise dem Chassis, sind diese Ansätze allerdings zu ungenau, wodurch die FEM verwendet wird.

### 12.4.2 Einteilung & Vereinfachungen

Beim gesamten Fahrzeug handelt es sich um eine sehr komplexe Konstruktion. Daher ist es wichtig, das Fahrzeug in verschiedene Gruppen zu unterteilen und sehr komplexe Zukauf- bzw. Normteile zu vereinfachen, um den Berechnungsaufwand gering zu halten. Dadurch ergeben sich einige Vorteile.

#### 12.4.2.1 Vorteile

- **Kürzere Rechenzeiten**

Es werden nicht so viele und auch vereinfachte Komponenten berechnet, wodurch sich kürzere Rechenzeiten bzw. geringere Rechenleistungen ergeben.

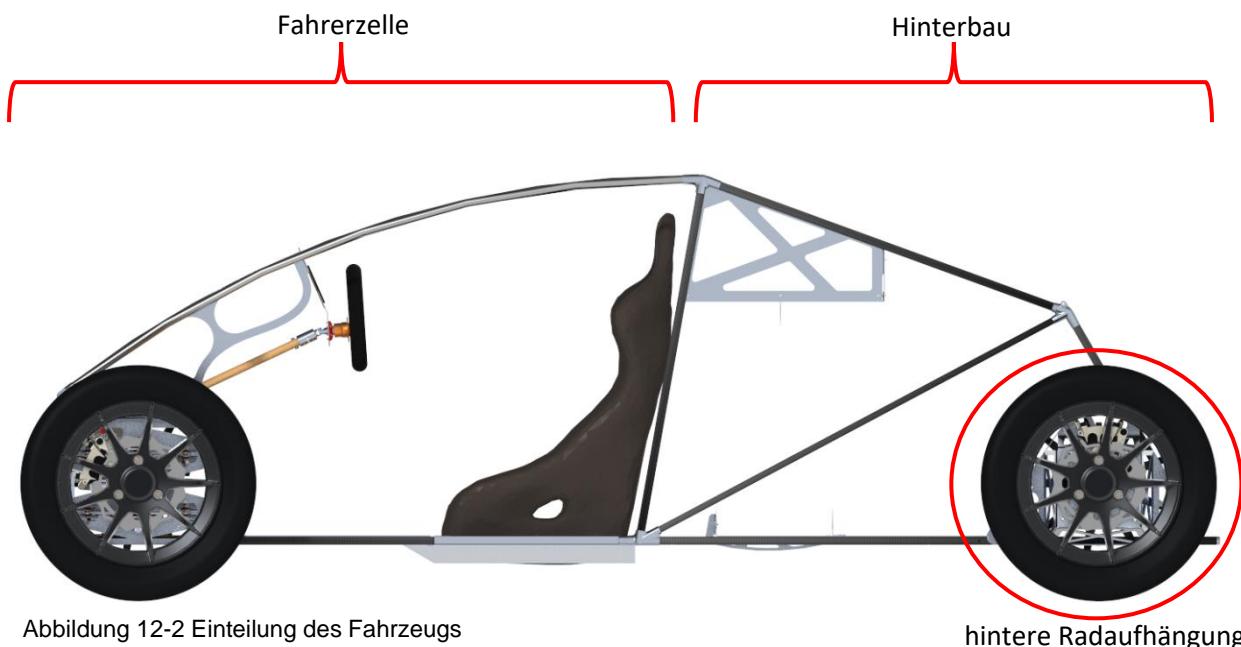
- **Schnellere Anpassbarkeit**

Die Rechenzeiten sind kürzer, daher können Änderungen schneller unternommen werden.

- **Geringeres Fehlerpotenzial**

Bei der FEM ist das eindeutige Definieren der Bauteile wichtig. Sollte es hierbei zu Fehlern kommen, kann kein Rechenergebnis ausgewertet werden, da das Programm die Definitionen nicht kennt. Es ist daher vorteilhaft kleine Baugruppen zu simulieren, die das Fehlerpotenzial verringern.

#### 12.4.2.2 Einteilung des Fahrzeugs



Das Fahrzeug wurde in folgende Gruppen eingeteilt:

- **Fahrerzelle**

Als Schnittstelle zwischen dem Hinterbau und der Fahrerzelle werden die oberen und unteren Verbindungsmuffen beim Überrollbügel verwendet. Bei der FEM der Fahrerzelle werden die vorderen Radkräfte verwendet. Die vordere Radaufhängung bleibt, bis auf kleine Änderungen, bestehen, und wird bei der FEM nicht mitsimuliert, da diese in der Praxis bereits verwendet wird. Die Kräfte werden an den Anschraubpunkten der vorderen Aufhängung angesetzt, wobei hierfür die Kräfte ermittelt werden müssen.

- **Hinterbau**

Für die FEM des Hinterbaus werden die Radkräfte der hinteren Räder verwendet. Da es sich bei der hinteren Radaufhängung um eine Neukonstruktion handelt, wird diese bei der Analyse des Hinterbaus mitanalysiert. Wie aus der Ermittlung der Radkräfte („11.4 Berechnung des Fahrzeugzustandes der größten Belastung“) hervorgeht, wird beim höchsten Belastungsfall nur ein Hinterrad belastet, somit wird für die FEM nur die belastete Seite der hinteren Radaufhängung mitsimuliert. Dadurch wird, wie bei den Vorteilen beschrieben („12.4.2.1 Vorteile“), die Rechenzeit und das Fehlerpotenzial verringert.

- **Hintere Radaufhängung**

Die hintere Radaufhängung wird zwar bereits beim Hinterbau mitsimuliert, allerdings handelt es sich hierbei lediglich um den Vergleich der „10.4.3 Hintere Radaufhängung Version 3“ und der „10.4.4 Hintere Radaufhängung Version 4“. Die bessere Version wird als hintere Radaufhängung verwendet. Als entscheidender Parameter wird hierfür die Verformung verwendet, da sich die Aufhängung wenig verformen sollte, um ein stabiles Fahrverhalten zu erreichen. Die auftretenden Spannungen werden ebenfalls berücksichtigt, allerdings wird dieser Parameter bei der Simulation des Hinterbaus bereits mitanalysiert.



### 12.4.2.3 Vereinfachungen

Um den Rechenaufwand gering zu halten, werden bestimmte Bauteile vereinfacht in der FEM analysiert. Andere Bauteile werden überhaupt aus der Analyse ausgeschlossen, da diese das Ergebnis nicht oder nur gering beeinflussen würden.

Es handelt sich um folgende Komponenten:

- **Räder**

Bei der FEM werden vereinfachte einteilige Räder verwendet. Es ist bekannt, dass diese den Lasten bei der Fahrt standhalten, wodurch ein vereinfachtes Modell ausreichend ist. Bei der Vereinfachung wird auf die rundliche Reifenkontur sowie auf die Speichen verzichtet.

- **Bremsanlage**

Die maximale Belastung des Fahrzeugs tritt bei der Kurvenfahrt auf. Somit wirkt auf die Bremsanlage keine Belastung und die Komponenten können entfernt werden.

- **Motor**

Bei der maximalen Fahrzeugbelastung wirkt keine Antriebskraft, der Motor kann daher auch aus dem FEM Modell entfernt werden.

- **Radaufhängungen**

Hierbei ist zwischen der Analyse der Fahrerzelle und des Hinterbaus zu unterscheiden.

Die vordere Radaufhängung wird, bis auf kleine Änderungen, übernommen, eine Analyse der vorderen Radaufhängung ist folglich nicht notwendig. Die Kräfte an der Fahrerzelle werden an den Anschraubpunkten der vorderen Radaufhängung angesetzt.

Wie aus der Ermittlung der Radkräfte hervorgeht, wird beim höchsten Belastungsfall nur eine Seite der Räder belastet, somit wird für die FEM des Hinterbaus nur die belastete Seite der hinteren Radaufhängung mitsimuliert, wobei die gegenüberliegende Radaufhängung aus dem Modell entfernt werden kann.

- **Nichtmittragende Bauteile**

Einige Bauteile wurden als nichtmittragende Bauteile konzeptioniert. Das heißt, dass diese Bauteile keine Kräfte übernehmen müssen und somit nicht für die Steifigkeit des Chassis beitragen. Diese Bauteile können daher aus dem FEM Modell entfernt werden. In diese Kategorie fallen folgende Komponenten:

- Kofferraum
- Lenkung und Lenkkomponenten
- Bodenplatten
- Sitz

Durch diese Maßnahmen wird die Komplexität des FEM Modells deutlich reduziert.

## 12.5 FEM Fahrerzelle

### 12.5.1 Erstes Rohrkonstrukt

#### 12.5.1.1 Bedingungen

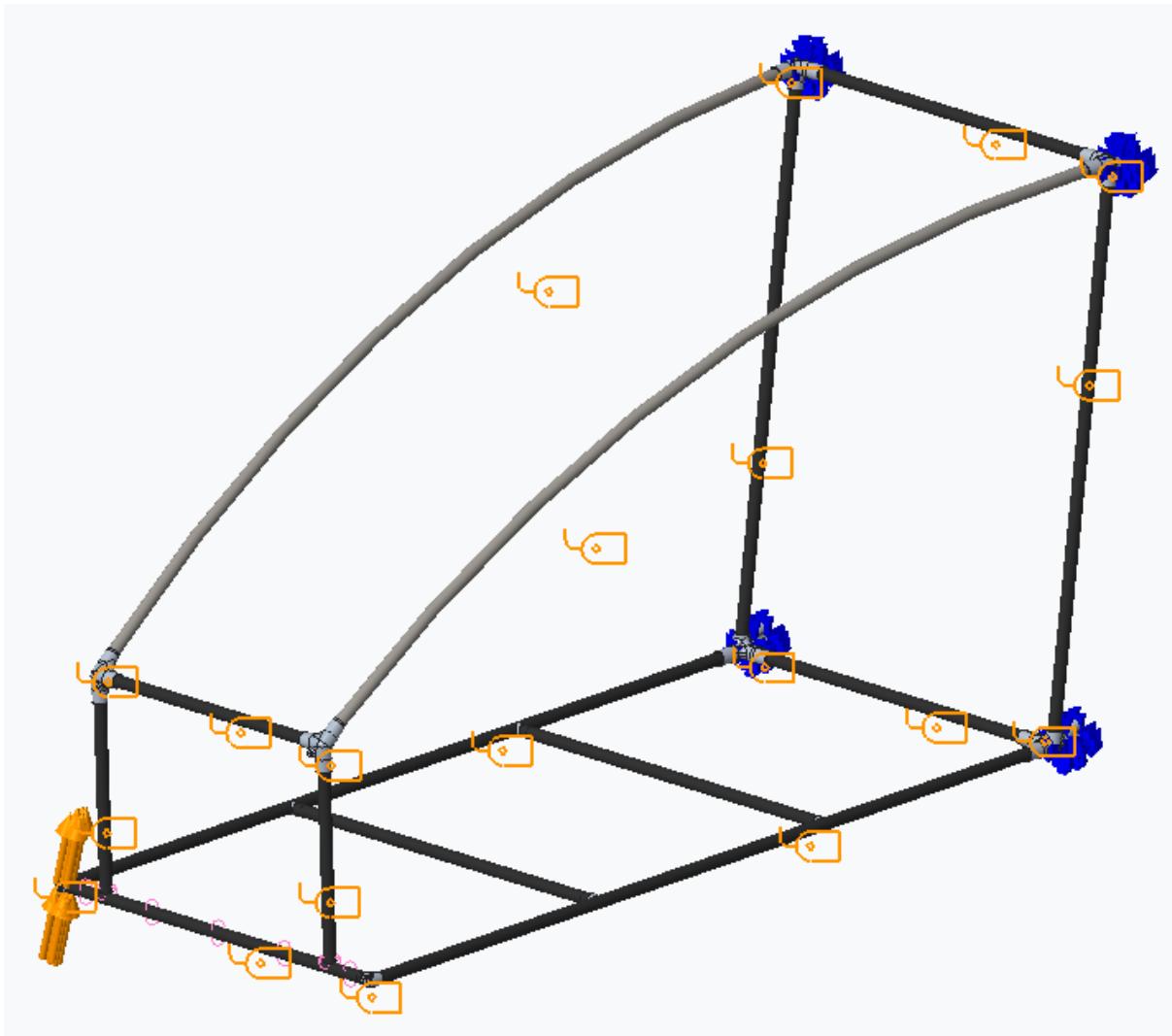


Abbildung 12-3 FEM Fahrerzelle: Bedingungen

#### Materialien:

- Rohre aus Karbon
- Verbindungsstücke aus Aluminium
- A-Säulen aus Stahl

#### Bedingungen:

- Der wahre Angriffspunkt der Kraft ist an diesem Modell nicht einleitbar, daher wird diese vereinfacht an der vorderen rechten Muffe angesetzt.
- Einspannung an den mittleren Verbindungsstücken
- Feste Verbindung zwischen der vorderen vertikalen Strebe und dem vordersten Bodenrohr

Anzahl an Elementen: 143.008

### 12.5.1.2 Analyse

Spannung von Mises [MPa]:

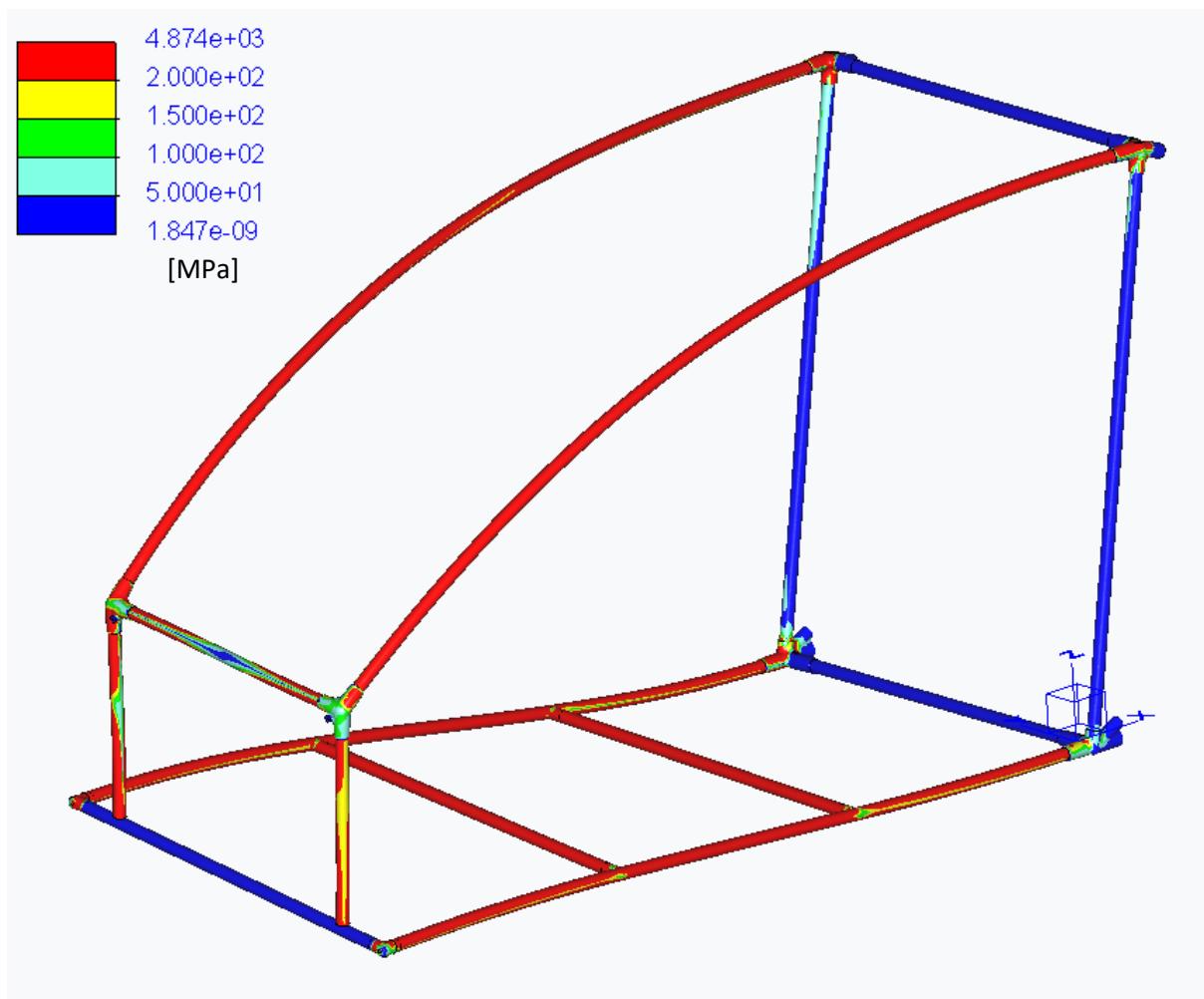


Abbildung 12-5 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion

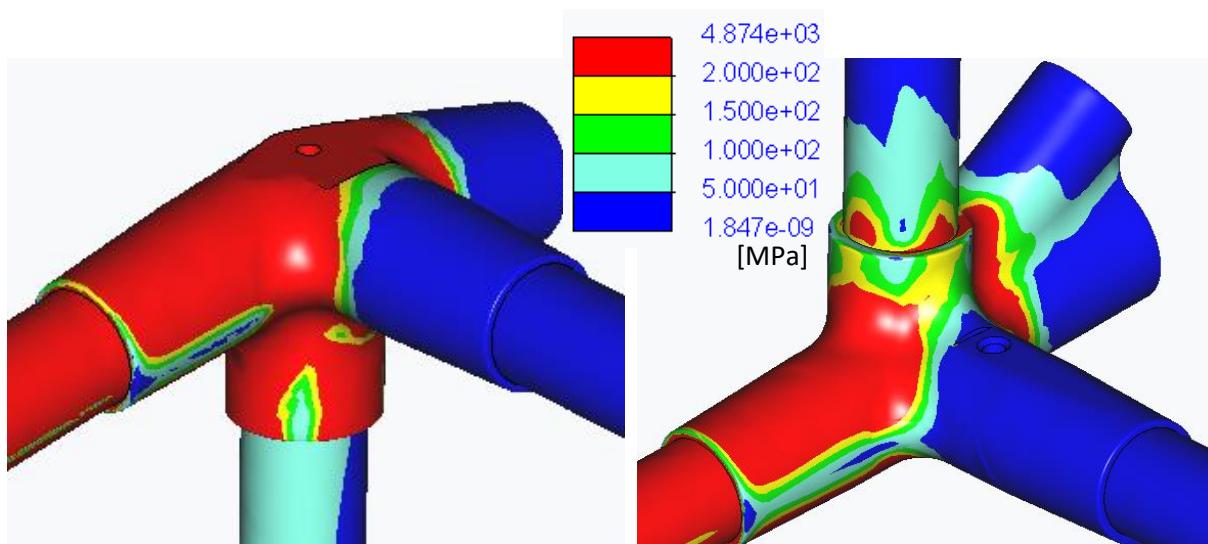


Abbildung 12-4 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] der Verbindungsmuffen

### Verformung [mm]:

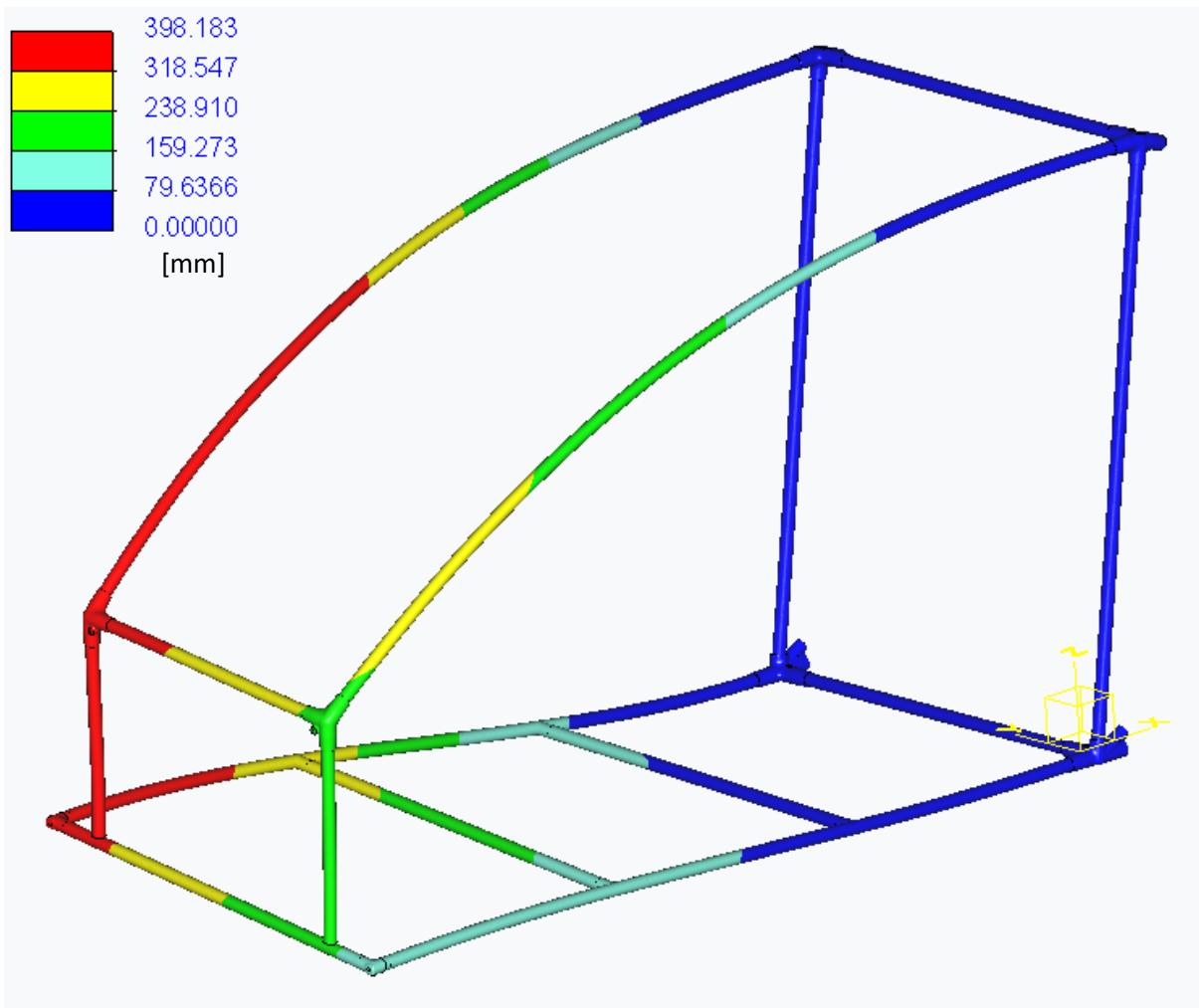


Abbildung 12-6 FEM Fahrerzelle: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion

#### 12.5.1.3 Auswertung

Es ist erkennbar, dass das Rohrkonstrukt alleine den Belastungen nicht standhält. Sowohl die auftretenden Spannungen als auch die Verformung sind über den zulässigen Werten. Aus der Spannungsanalyse zeigt sich, dass vor allem die Rohre in Längsrichtung stark beansprucht werden. Die hohe Verformung ergibt sich aufgrund der niedrigen Anzahl an Verbindungen und Rohren. Die Spannung sowie Verformung des Rohrkonstruktur können durch das Anbringen von Versteifungsblechen und Versteifungsrohren deutlich reduziert werden. Allerdings handelt es sich, wie in „7.3.1 Erstes Rohrkonstrukt“ beschrieben, nur um die grundlegende Rohrkonstruktion. Diverse essenzielle Anbauteile wie Aufhängungs- oder Bodenbleche, welche die Fahrerzelle unterstützen, fehlen noch. Diese Bleche müssen so ausgeführt werden, dass sie die Spannungen sowie die Verformung verringern.

## 12.5.2 Version 2

### 12.5.2.1 Bedingungen

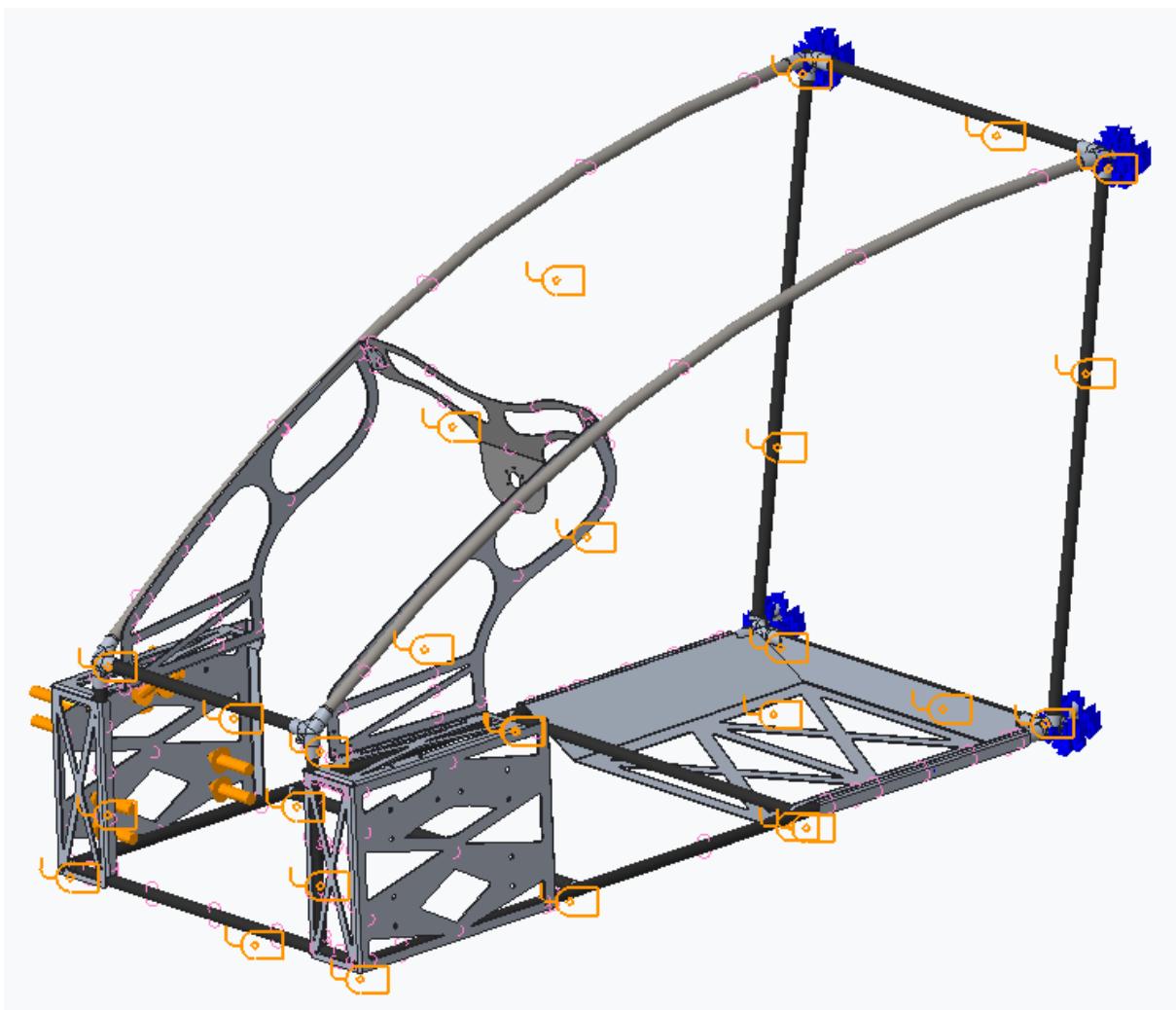


Abbildung 12-7 FEM Fahrerzelle: Bedingungen

#### Materialien:

- Rohre aus Karbon
- Verbindungsmuffen, Aufhängungs- und Sitzblech aus Aluminium
- A-Säule und Armaturenbrett aus Stahl

#### Bedingungen:

- Einspannung an den mittleren Verbindungsmuffen
- Feste Verbindung zwischen den Aufhängungsblechen und den anliegenden Rohren
- Feste Verbindung zwischen dem Sitzblech und den anliegenden Rohren
- Feste Verbindung zwischen dem Armaturenbrett und den Aufhängungsblechen

Anzahl an Elementen: 162.642

## 12.5.2.2 Analyse

**Spannung von Mises [MPa]:**

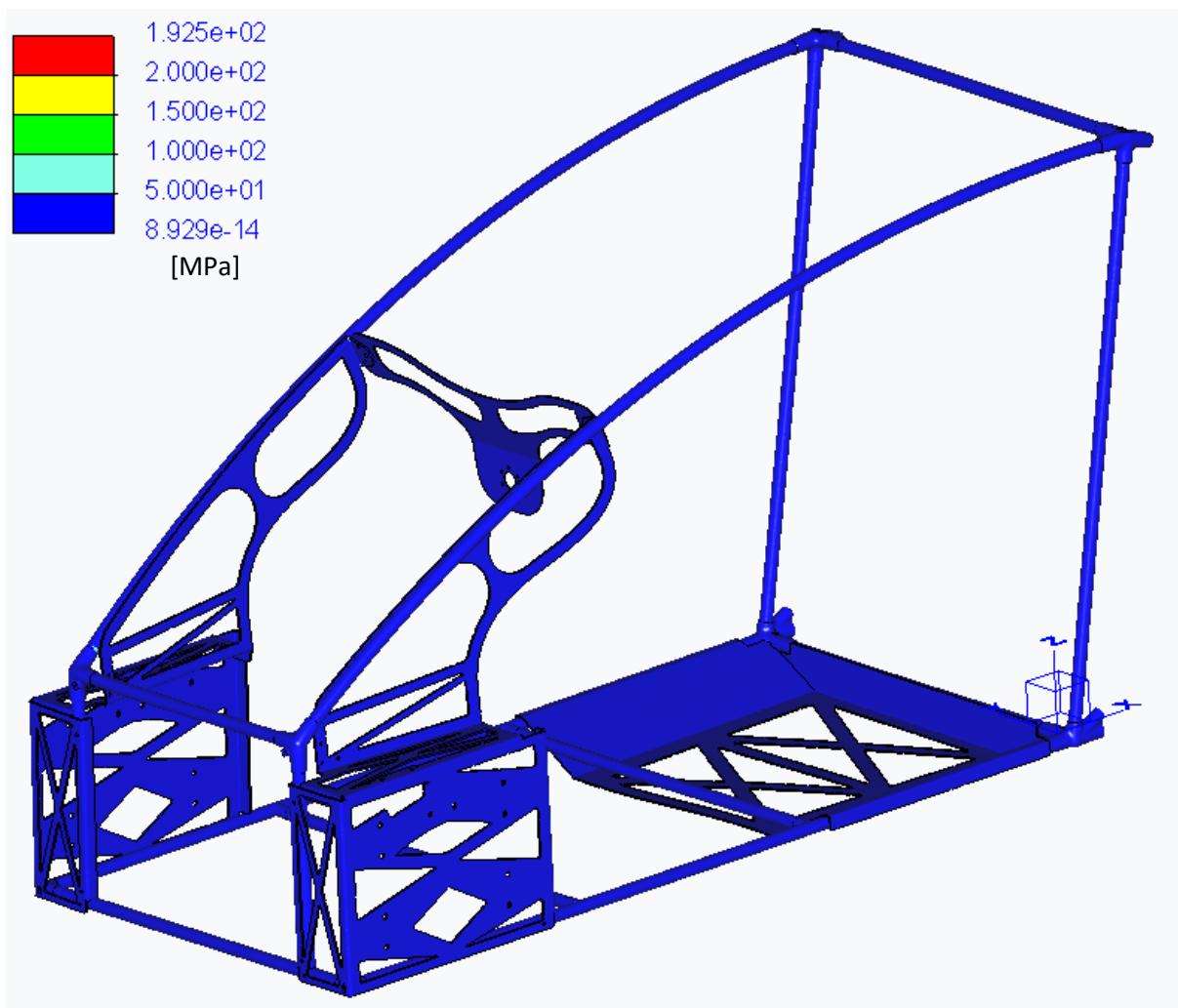


Abbildung 12-8 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion

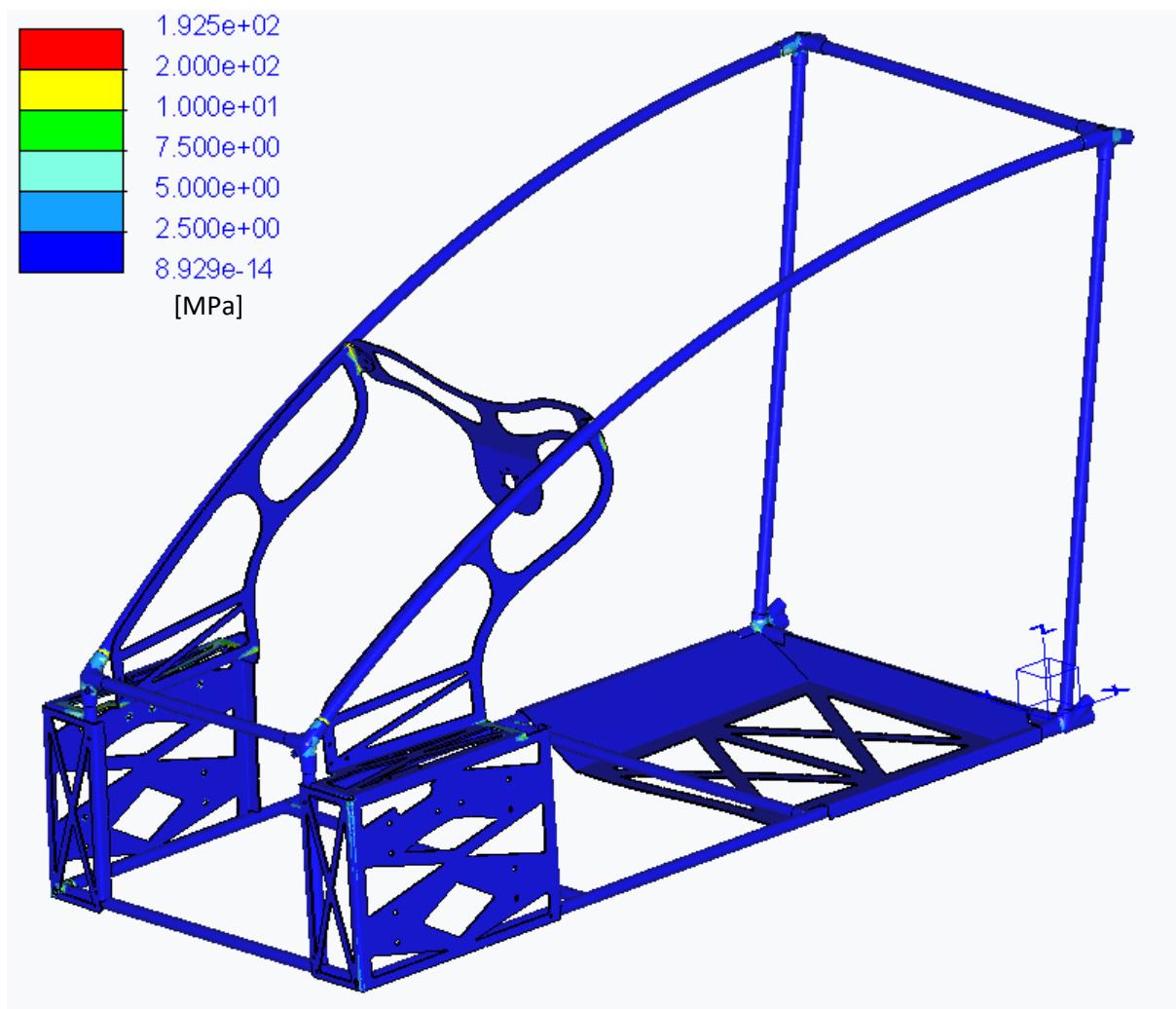


Abbildung 12-10 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion

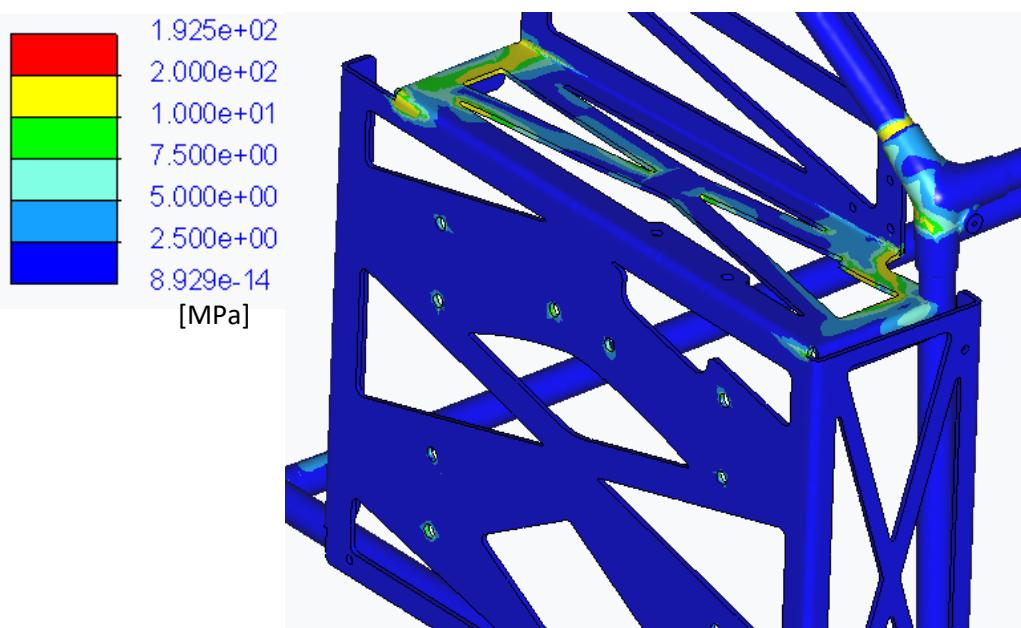


Abbildung 12-9 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] des vorderen Aufhängungsbleches

### Verformung [mm]:

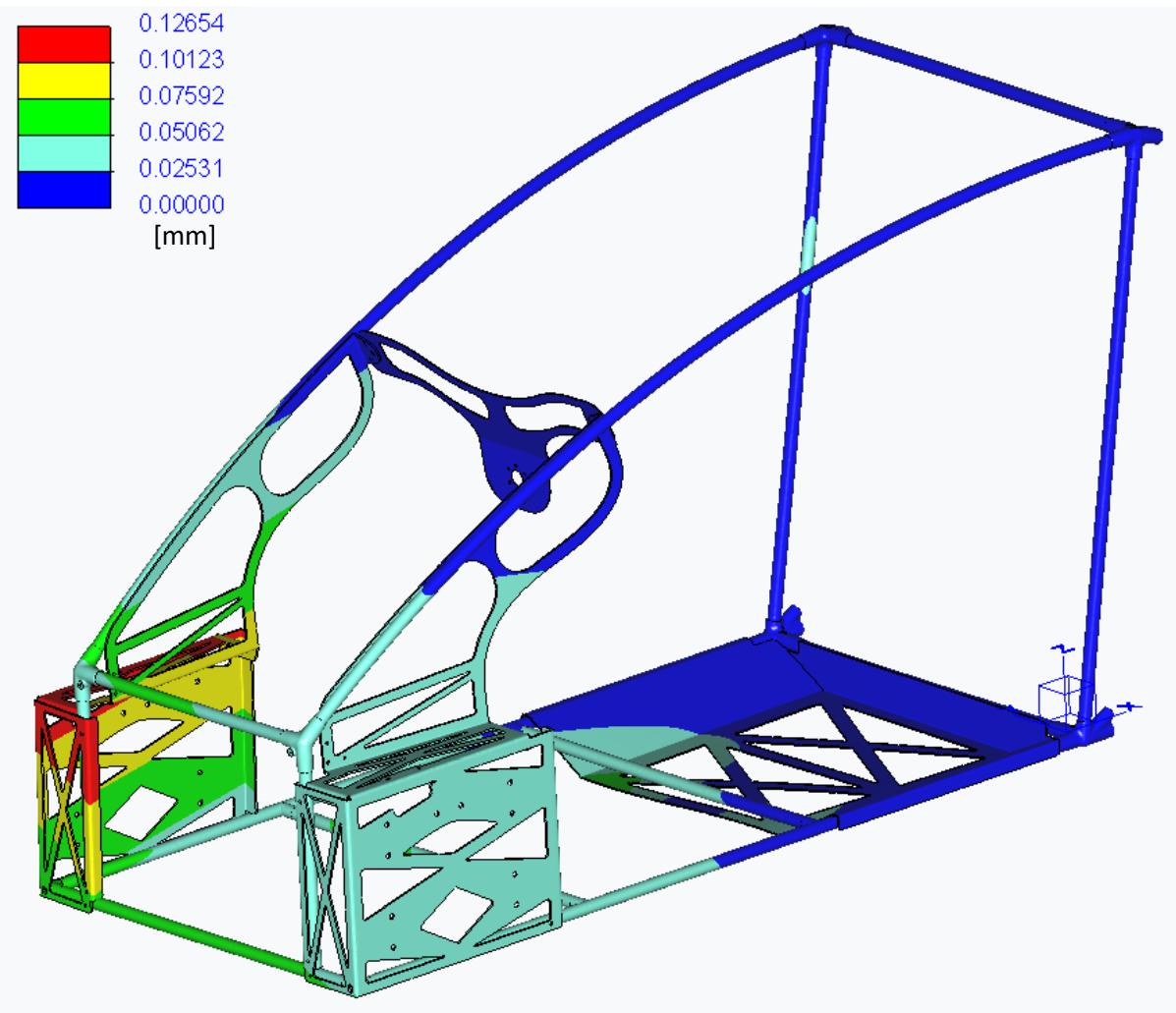


Abbildung 12-11 FEM Fahrerzelle: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion

#### 12.5.2.3 Auswertung

Durch das Anbringen der Blechteile konnten die mechanischen Eigenschaften deutlich verbessert werden. Die Kraft verteilt sich durch die beiden vorderen Aufhängungsbleche gleichmäßiger auf die A-Säulen. Die auftretenden Spannungen der Rohre konnten so minimiert werden. Wie erkennbar, wird das vordere rechte Aufhängungsblech am stärksten beansprucht, wobei die geringen Spannungen von maximal  $20 \text{ N/mm}^2$  weit unter der kritischen Grenze liegen. Die Steifigkeit konnte durch das Anbringen weiterer Blechteile sowie durch die Form der Aufhängungsbleche verbessert werden. Mit Hilfe der hochgezogenen Geometrie der Aufhängungsbleche konnte die Biegesteifigkeit verbessert werden, da diese beiden Aufhängungsbleche einen Großteil der Kräfte übernehmen. Die Torsionssteifigkeit konnte maßgeblich durch das Anbringen des Armaturenbretts sowie des Bodenbleches erhöht werden. Diese verbinden die beiden Seiten der Fahrerzelle und übertragen so das Verdrehungsmoment besser. Dadurch ergibt sich eine maximale Verformung der Fahrerzelle von 0,13 mm.

## 12.6 FEM Hinterbau

### 12.6.1 Version 2

#### 12.6.1.1 Bedingungen

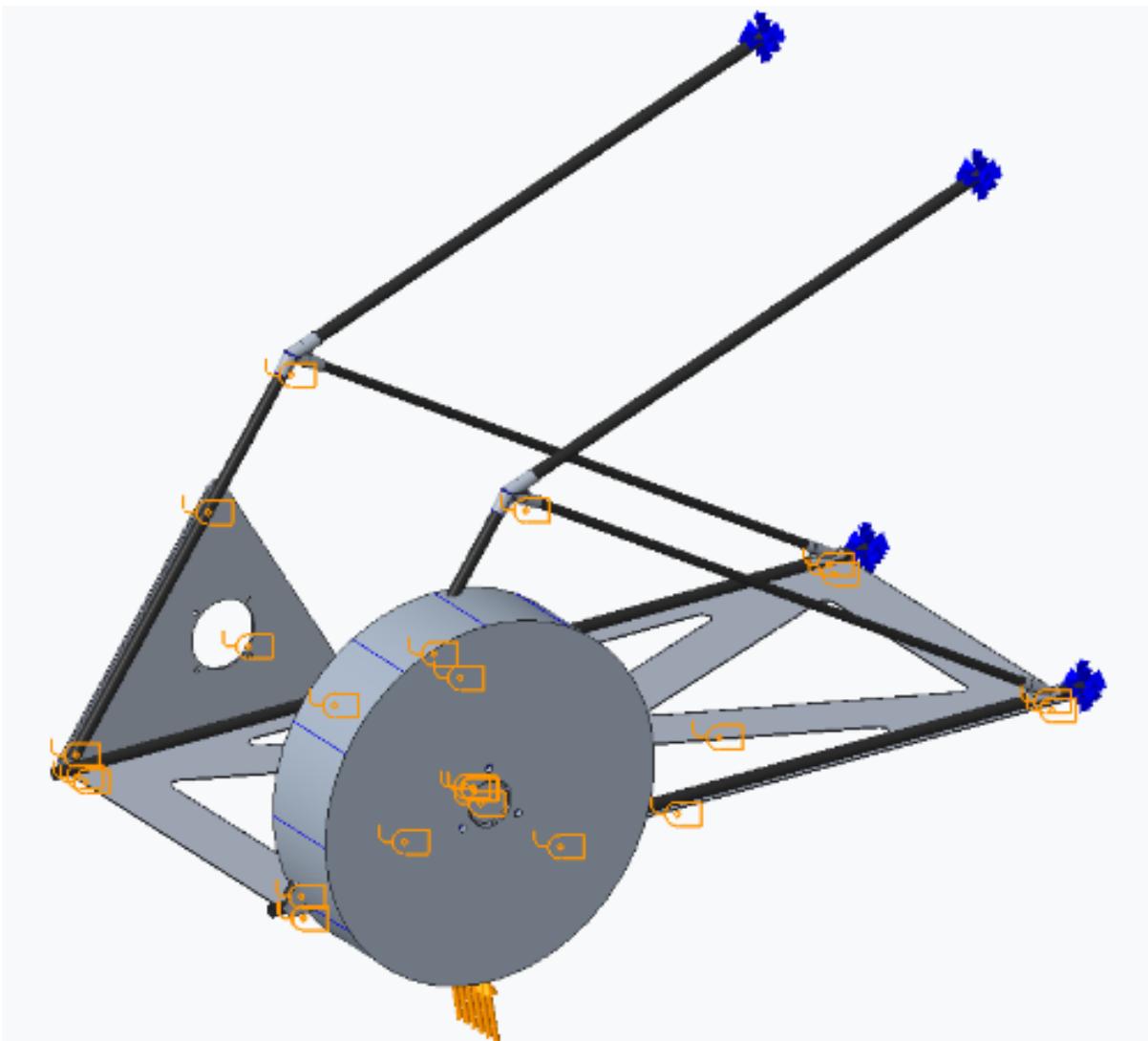


Abbildung 12-12 FEM Hinterbau: Bedingungen

#### Materialien:

- Rohre aus Karbon
- Verbindungsmuffen und Bleche aus Aluminium
- Blindnieten aus Stahl

#### Bedingungen:

- Einspannung am Ende der oberen C-Säule und des Bodenrohrs
- Feste Verbindung an den Verschraubungspunkten
  - Lagersitz mit Aufhängungsblech
  - Rad mit Radnabe

Anzahl an Elementen: 115.519

## 12.6.1.2 Analyse

**Spannung von Mises [MPa]:**

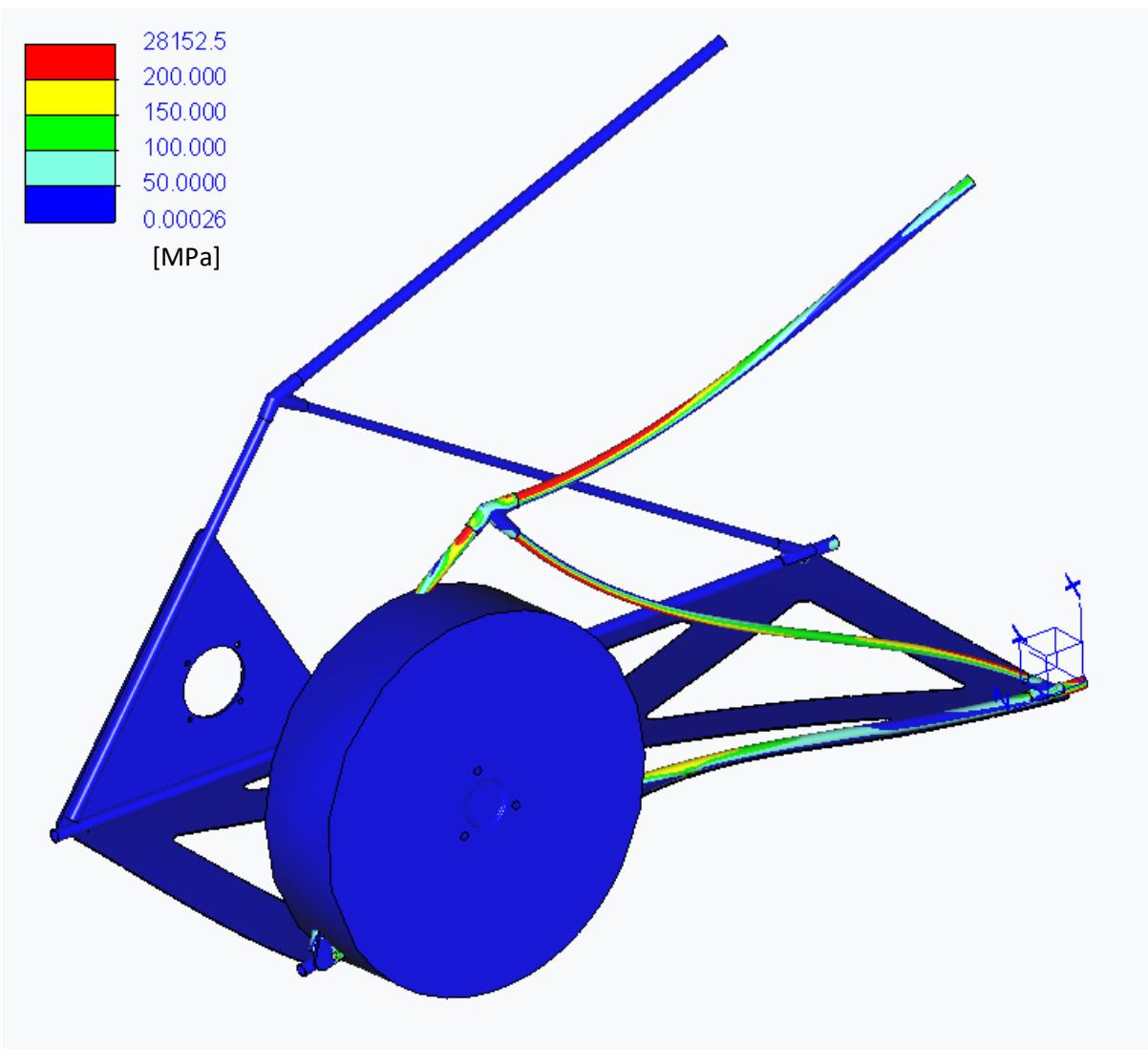


Abbildung 12-13 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion

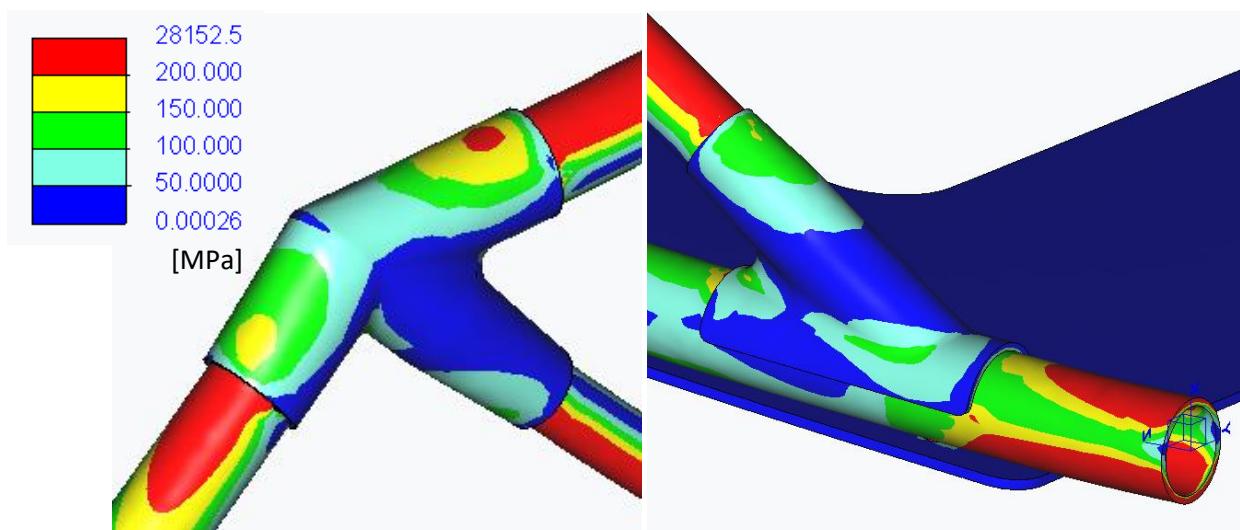


Abbildung 12-14 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der Verbindungs muffen

#### Verformung [mm]:

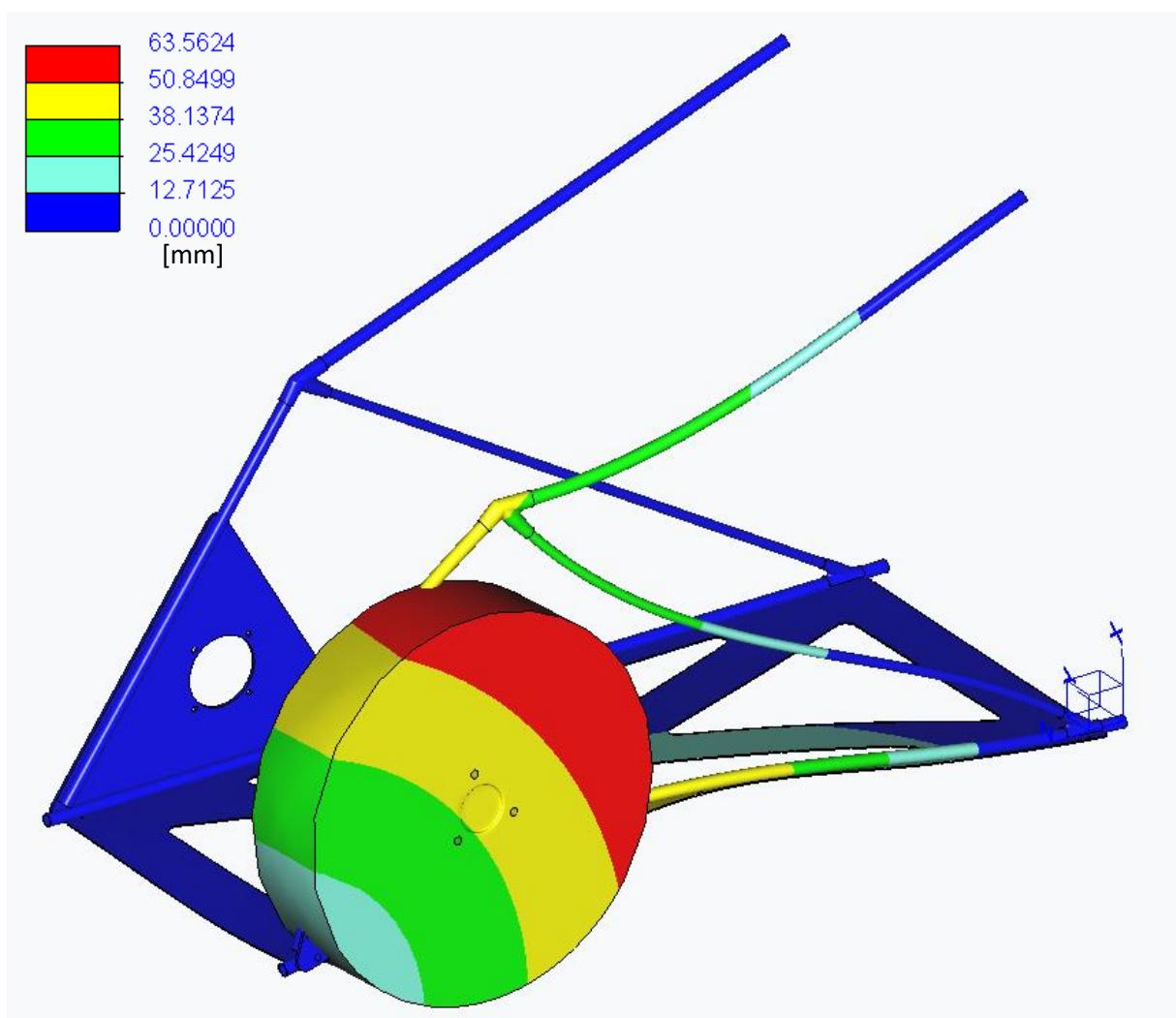


Abbildung 12-15 FEM Hinterbau: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion

### 12.6.1.3 Auswertung

Es zeigt sich, dass diese Version des Hinterbaus stark unterdimensioniert ist. Sowohl bei der Festigkeitsanalyse als auch bei der Verformungsanalyse sind große Mängel erkennbar. Vor allem die starke Verformung erweist sich als problematisch, kann durch Erweiterung der Gitterstruktur jedoch verbessert werden, wodurch die Spannung ebenfalls sinken würde. Als erste Verbesserung wird ein Querrohr zwischen den beiden zentralen Verbindungsmuffen gelegt, wodurch sich die Last auf beide Hinterbauhälften verteilt.

### 12.6.2 Version 3

#### 12.6.2.1 Bedingungen:

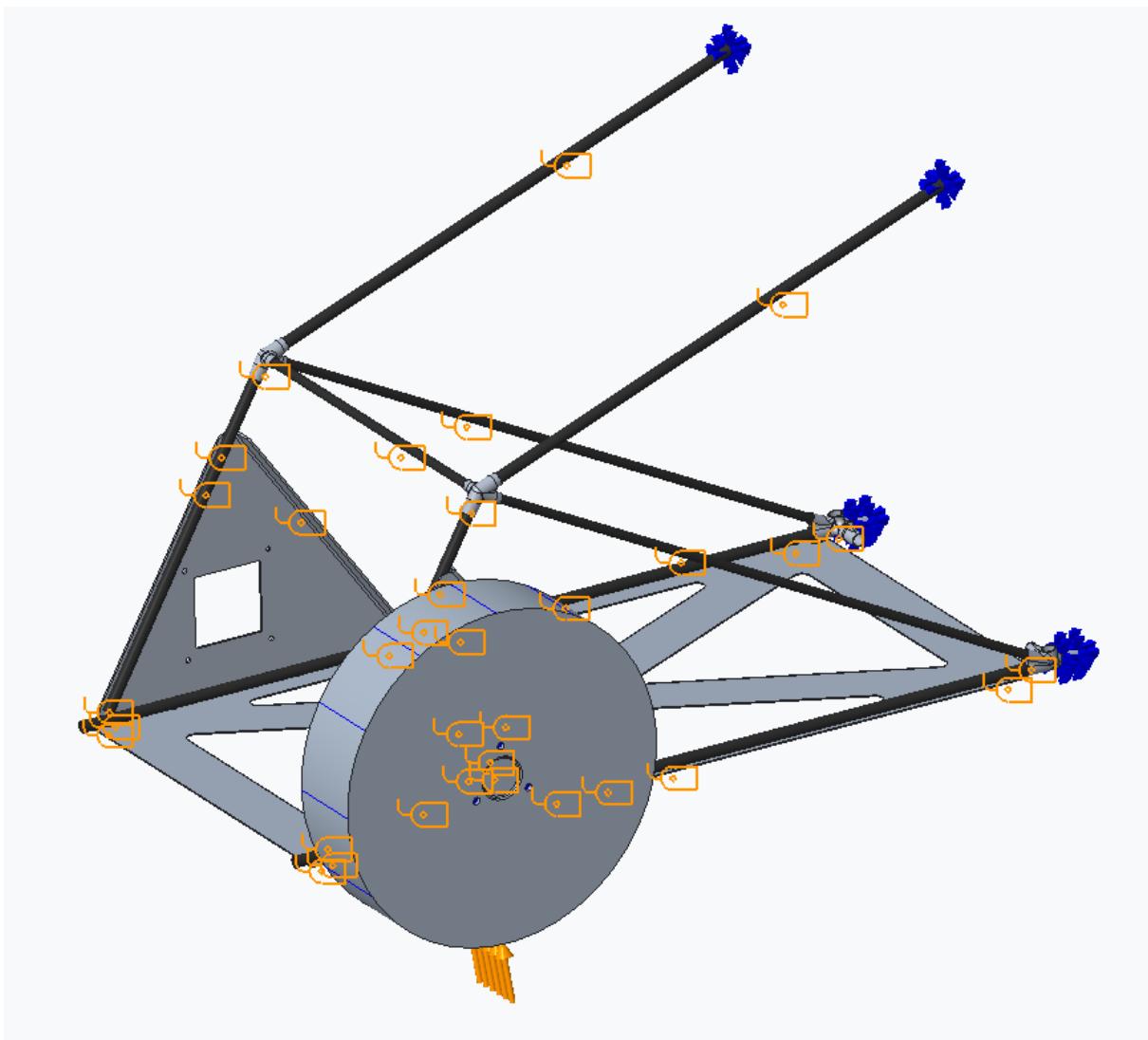


Abbildung 12-16 FEM Hinterbau: Bedingungen

**Materialien:**

- Rohre aus Karbon
- Verbindungsstücke und Bleche aus Aluminium
- Blindnieten aus Stahl

**Bedingungen:**

- Einspannung am Ende der oberen C-Säule und an unteren Verbindungsstücken
- Feste Verbindung an den Verschraubungspunkten
  - Lagersitz mit Aufhängungsblech
  - Rad mit Radnabe

**Anzahl an Elementen:** 124.857

### 12.6.2.2 Analyse

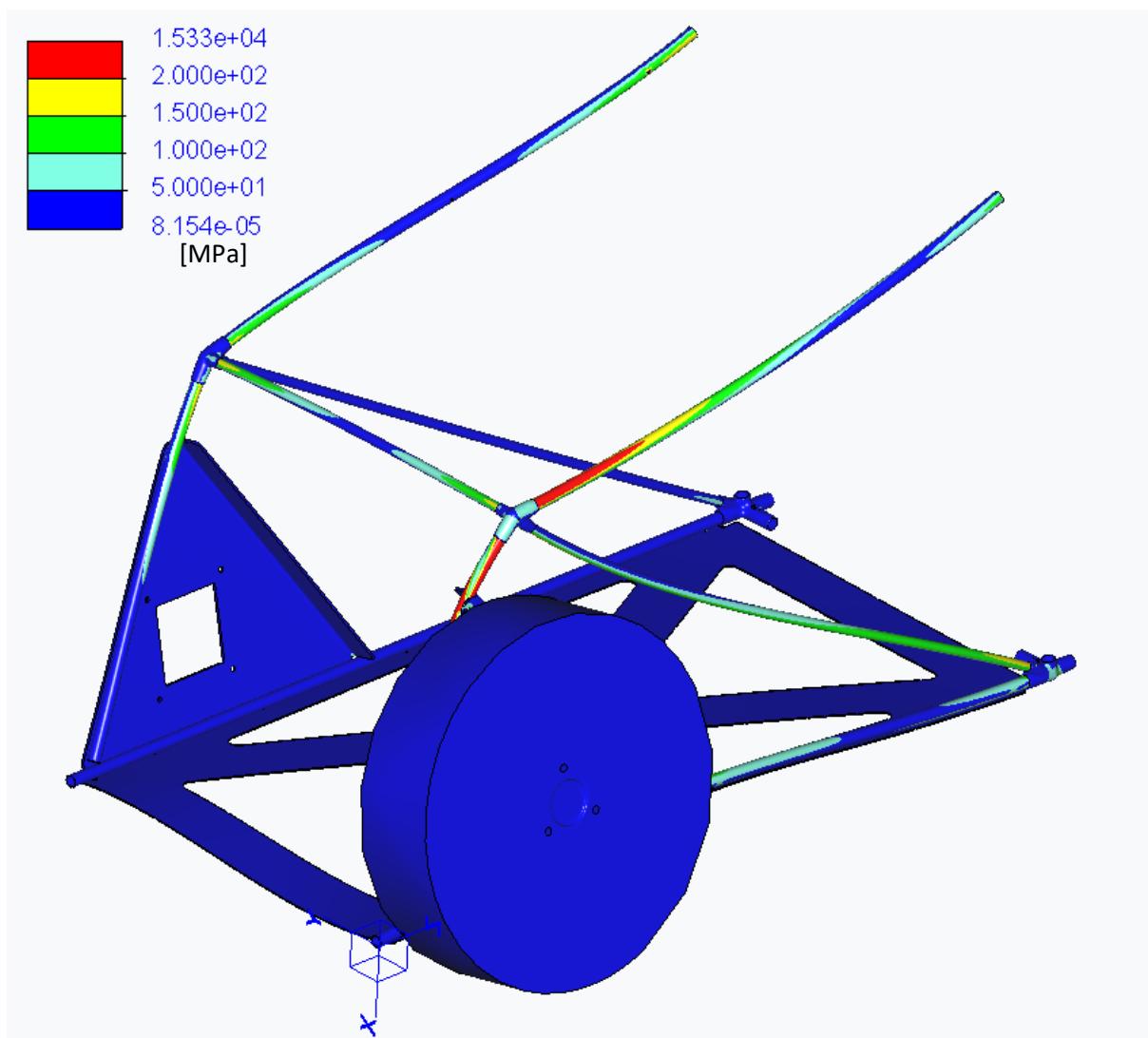
**Spannung von Mises [MPa]:**

Abbildung 12-17 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion

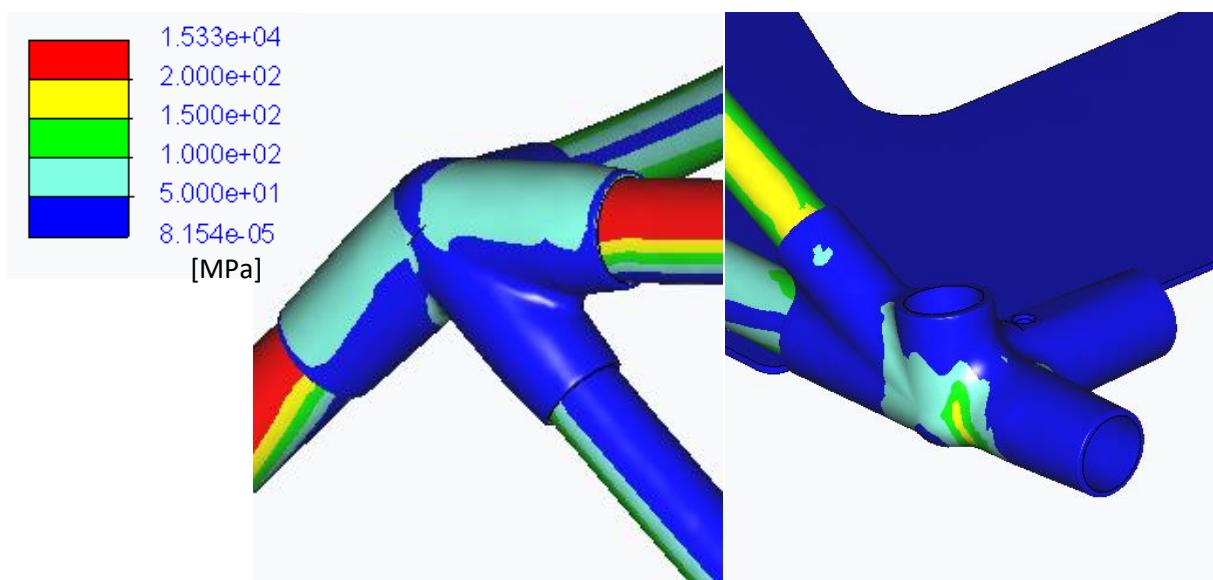


Abbildung 12-18 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der Verbindungsmaffen

#### Verformung [mm]:

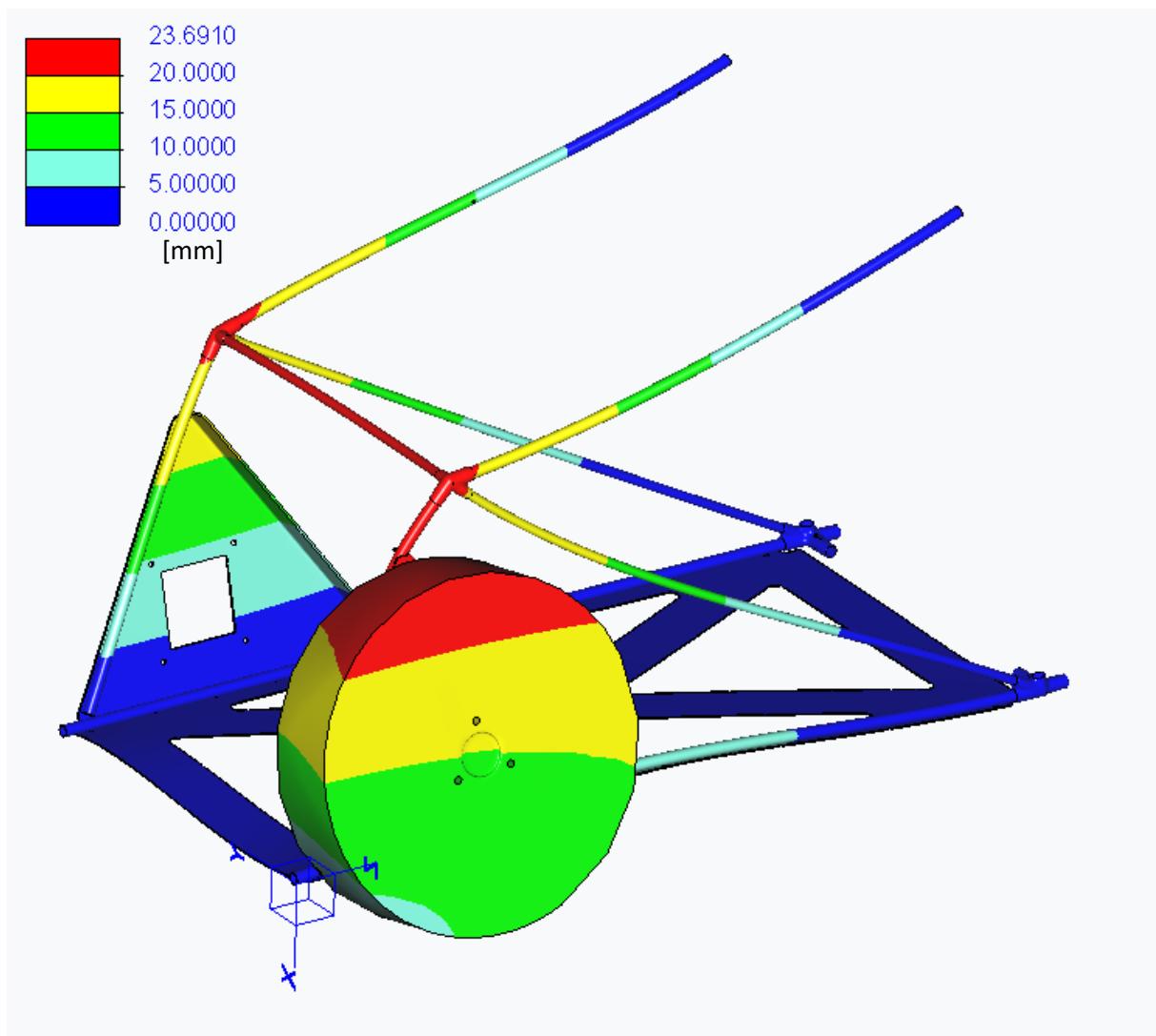


Abbildung 12-19 FEM Hinterbau: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion

### 12.6.2.3 Auswertung

Durch das Einsetzen des Querrohrs konnte die Steifigkeit des Hinterbaus etwa verdoppelt werden. Die Konstruktion ist zwar weiterhin zu instabil, allerdings ist erkennbar, dass durch das Einsetzen von Bauteilen, welche die beiden Hälften verbinden, die Steifigkeit maßgeblich beeinflusst bzw. verbessert werden kann. Bei der Festigkeitsanalyse ist erkennbar, dass sich die Last aufgrund des Querrohrs über den gesamten Hinterbau verteilt und somit die Beanspruchung der einzelnen Komponenten sinkt. Dies ist an den Verbindungsmuffen, dem Diagonalrohr und der oberen C-Säule sichtbar. Bei diesen Komponenten konnte die auftretende Spannung unter den kritischen Bereich gebracht werden.

### 12.6.3 Version 4

#### 12.6.3.1 Bedingungen

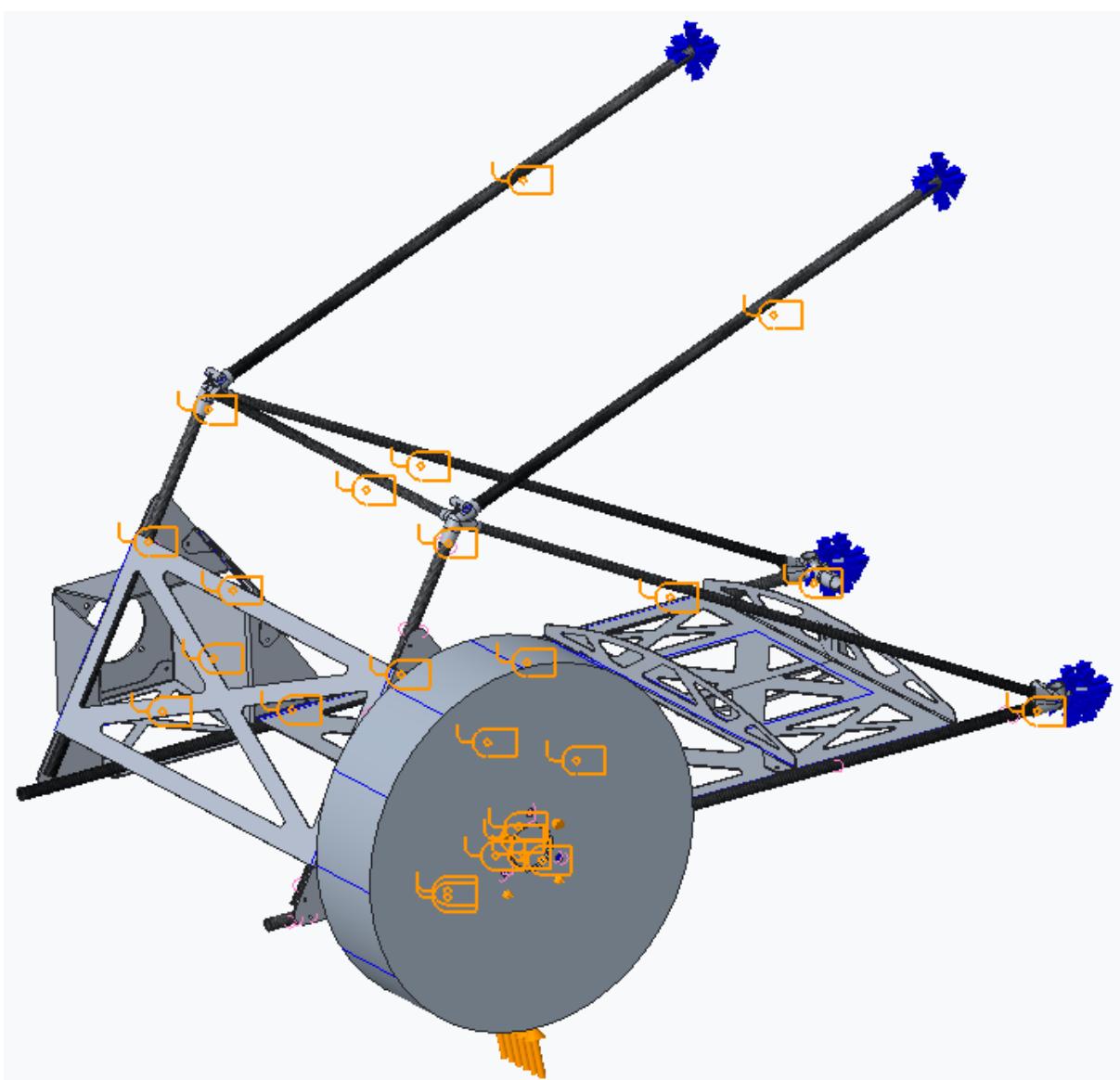


Abbildung 12-20 FEM Hinterbau: Bedingungen

**Materialien:**

- Rohre aus Karbon
- Verbindungsmuffen und Bleche aus Aluminium
- Blindnieten aus Stahl

**Bedingungen:**

- Einspannung am Ende der oberen C-Säule und an unterer Verbindungsmuffe
- Feste Verbindung an den Verschraubungspunkten
  - Lagersitz mit Aufhängungsblech
  - Rad mit Radnabe
  - Hinterbauversteifung mit hinteren Aufhängungsblechen

**Anzahl an Elementen:** 145.158

### 12.6.3.2 Analyse

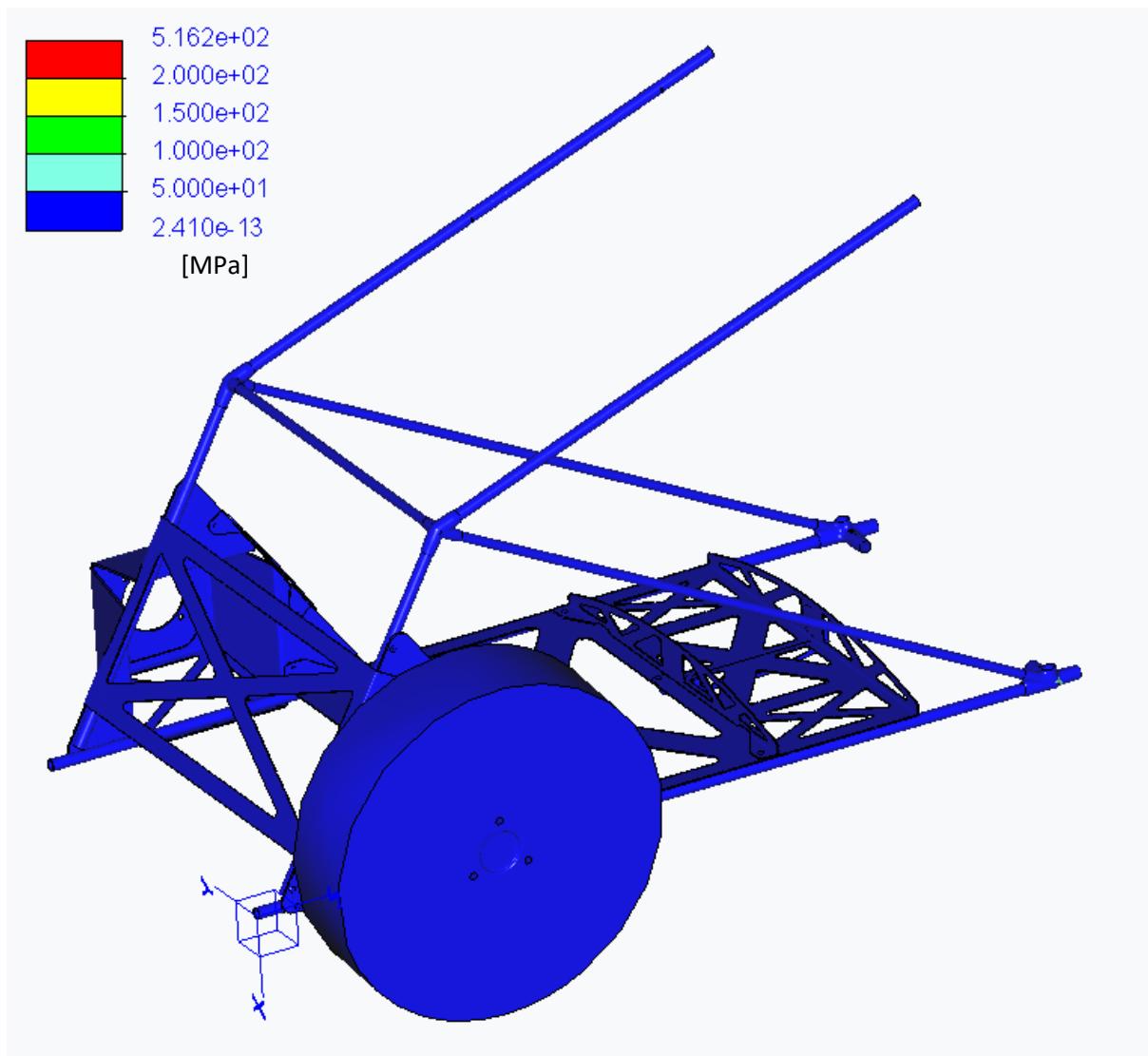
**Spannung von Mises [MPa]:**

Abbildung 12-21 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion

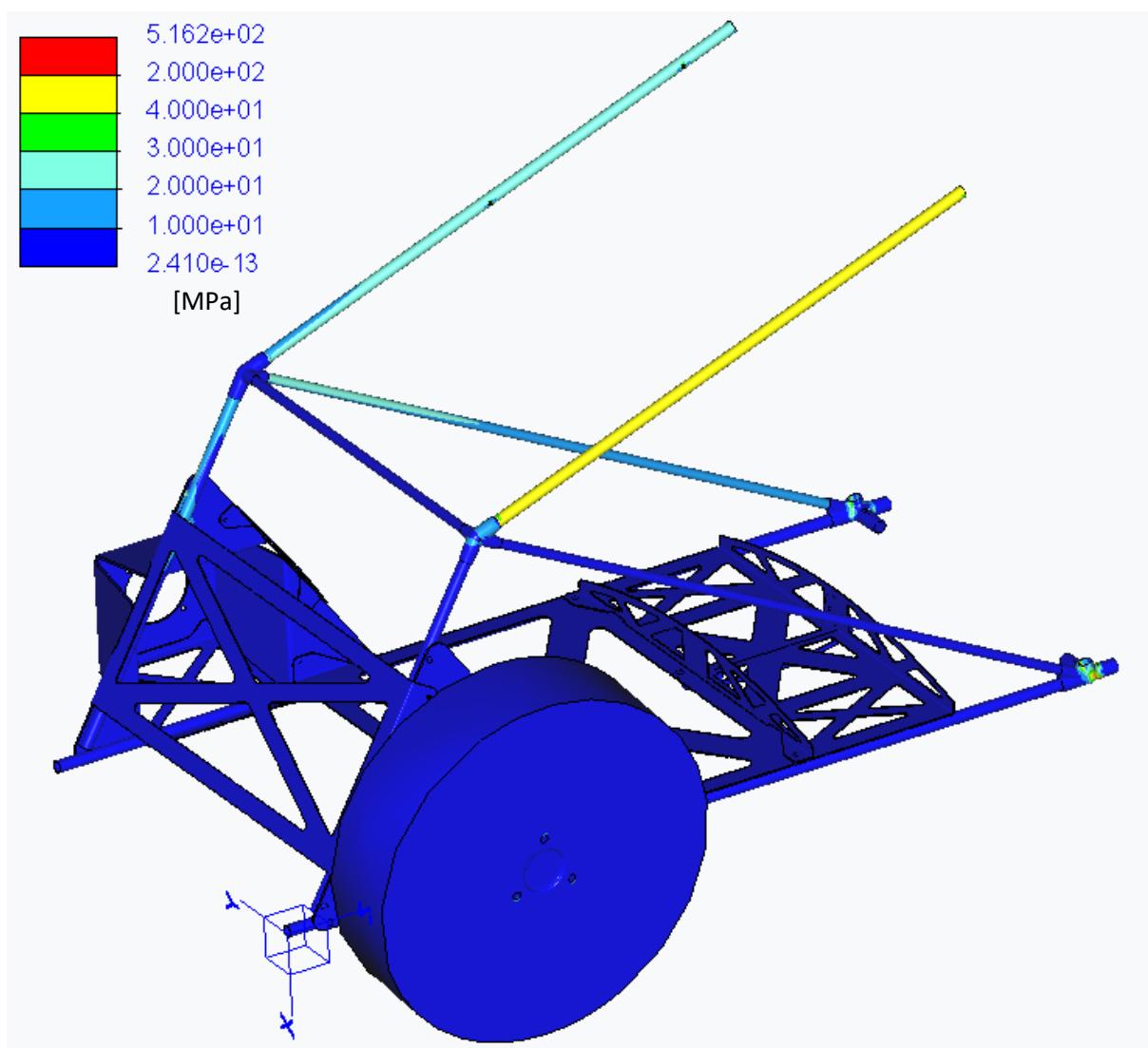


Abbildung 12-23 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion

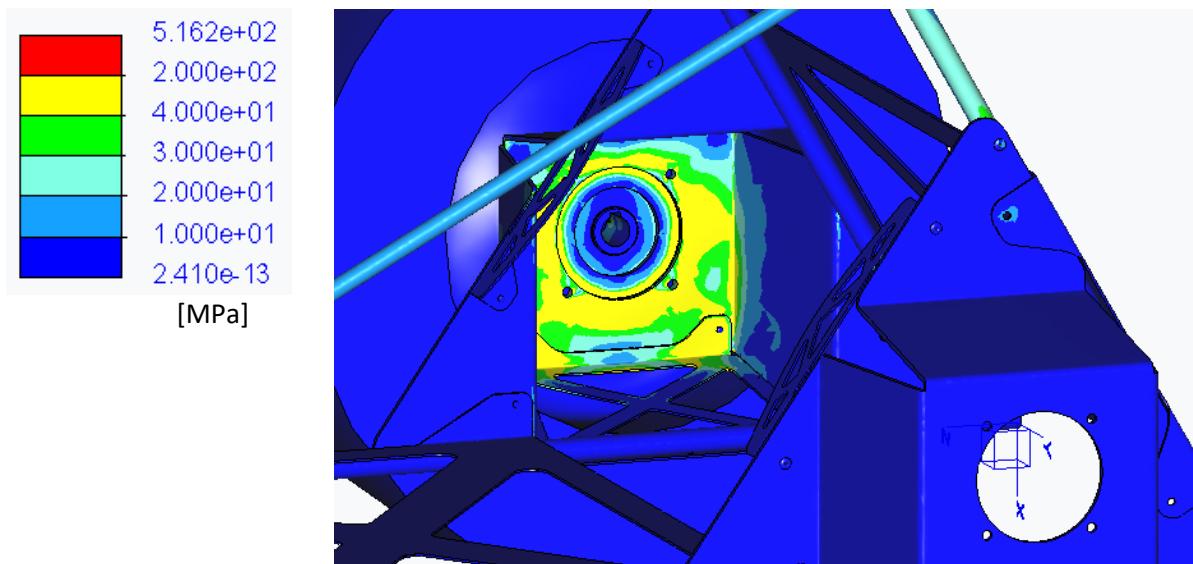


Abbildung 12-22 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] des Heckbereichs

**Verformung [mm]:**

|         |
|---------|
| 3.13586 |
| 2.50868 |
| 1.88151 |
| 1.25434 |
| 0.62717 |
| 0.00000 |

[mm]

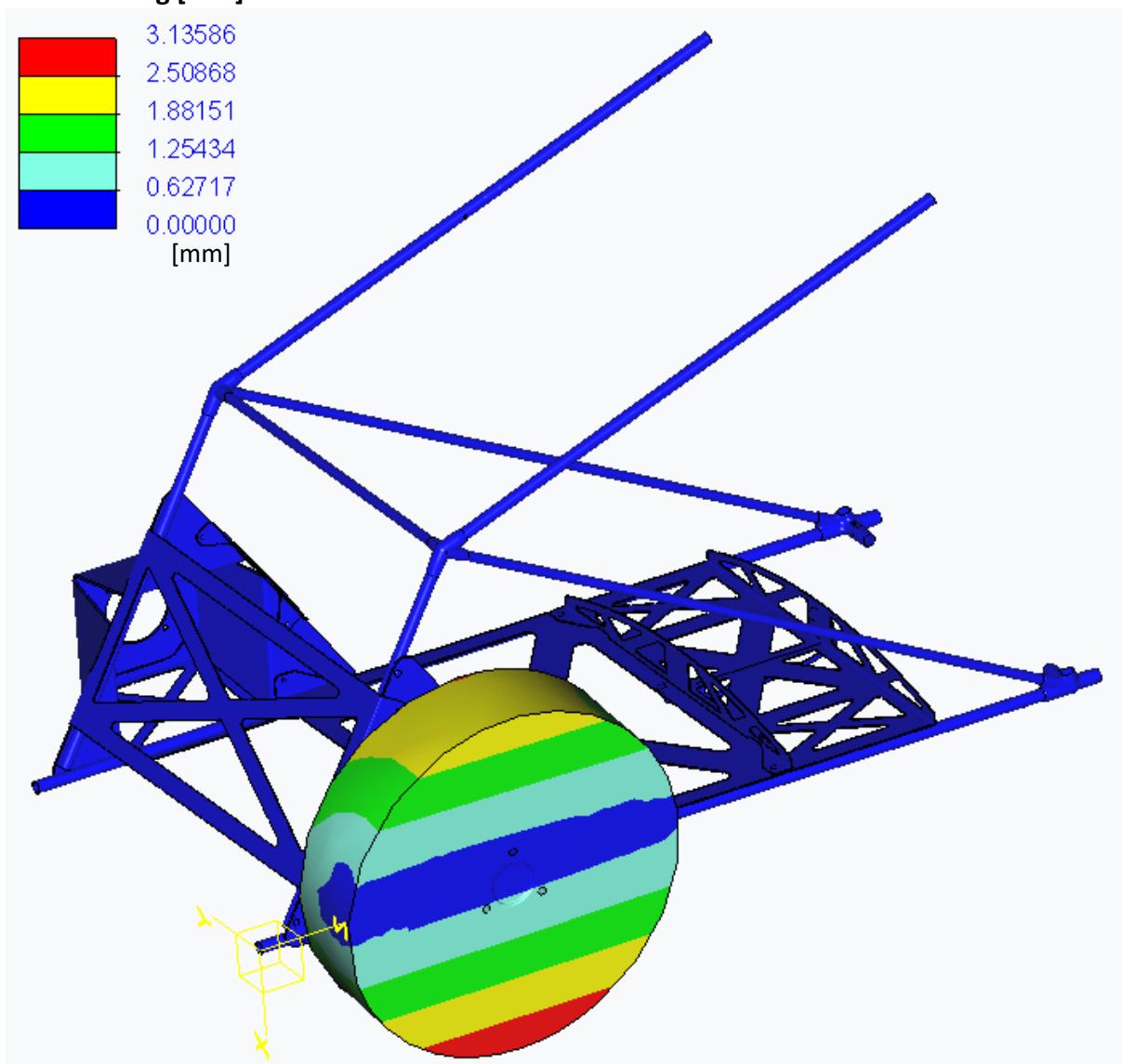


Abbildung 12-24 FEM Hinterbau: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion

#### 12.6.3.3 Auswertung

Mit Hilfe der Hinterbauversteifung konnte die Verformung deutlich reduziert werden. Die maximale Verformung des Rahmens (Rad ausgenommen) beträgt etwa 0,5 mm. Die auftretenden Spannungen konnten ebenfalls stark reduziert werden. Vor allem die Beanspruchung der Rohre und Verbindungsmuffen ist weit unter die zulässigen Spannungen gesunken. Die Beanspruchung der rechten hinteren Radaufhängung ist aufgrund der außermittigen Belastung sehr hoch, jedoch im zulässigen Bereich.

## 12.7 FEM Hintere Radaufhängung

### 12.7.1 Version 3

#### 12.7.1.1 Bedingungen

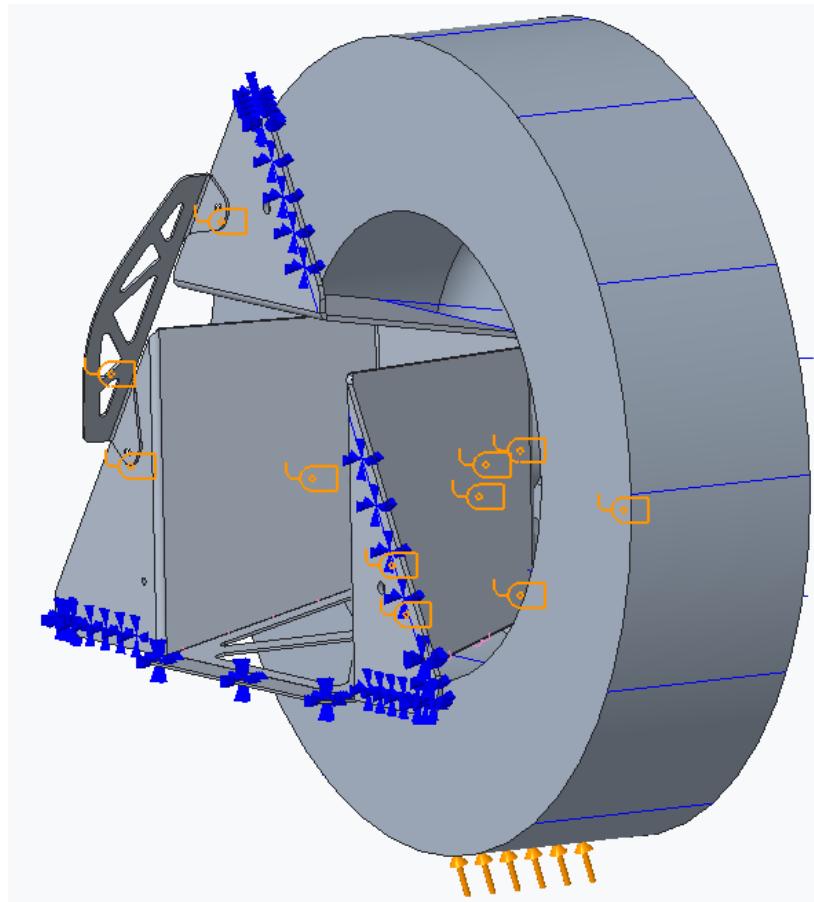


Abbildung 12-25 FEM Hintere Radaufhängung: Bedingungen

#### Materialien:

- Bleche aus Aluminium
- Blindnieten aus Stahl

#### Bedingungen:

- Einspannung an den Verbindungen zum Hinterbau
  - Bohrungen für die Nietverbindungen
  - Klebeflächen entlang der Kontaktflächen mit den Rohren
- Feste Verbindung an den Verschraubungspunkten
  - Lagersitz mit Aufhängungsblech
  - Rad mit Radnabe
- Feste Verbindung an den Klebeflächen
  - Aufhängungsblech mit unterem Versteifungsblech

Anzahl an Elementen: 20.960

### 12.7.1.2 Analyse

#### Spannung von Mises [MPa]:

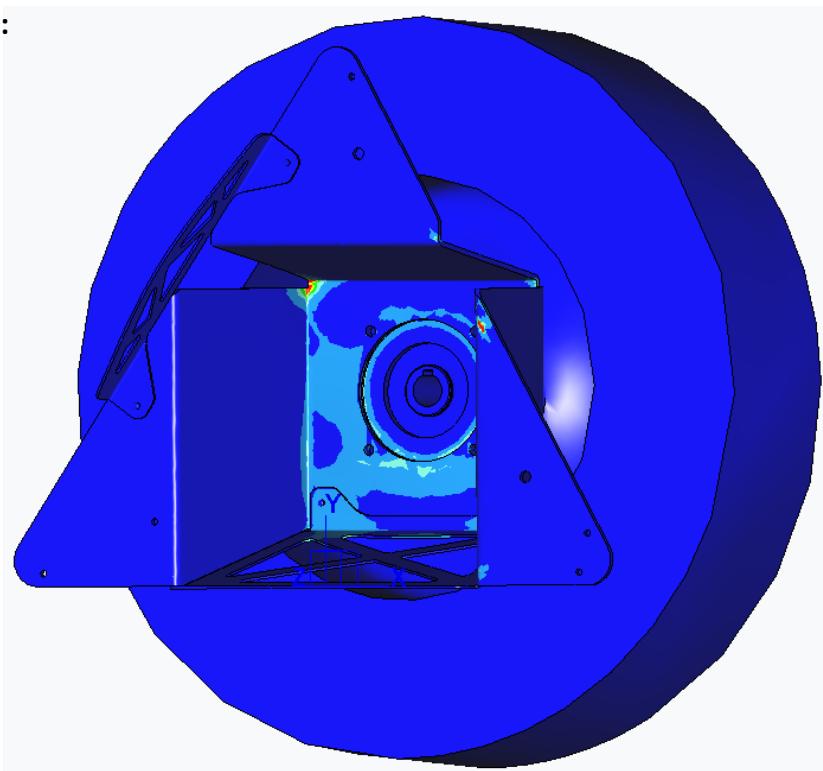
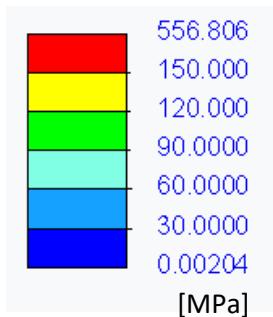


Abbildung 12-26 FEM Hintere Radaufhängung: Spannung von Mises [MPa]

#### Verformung [mm]:

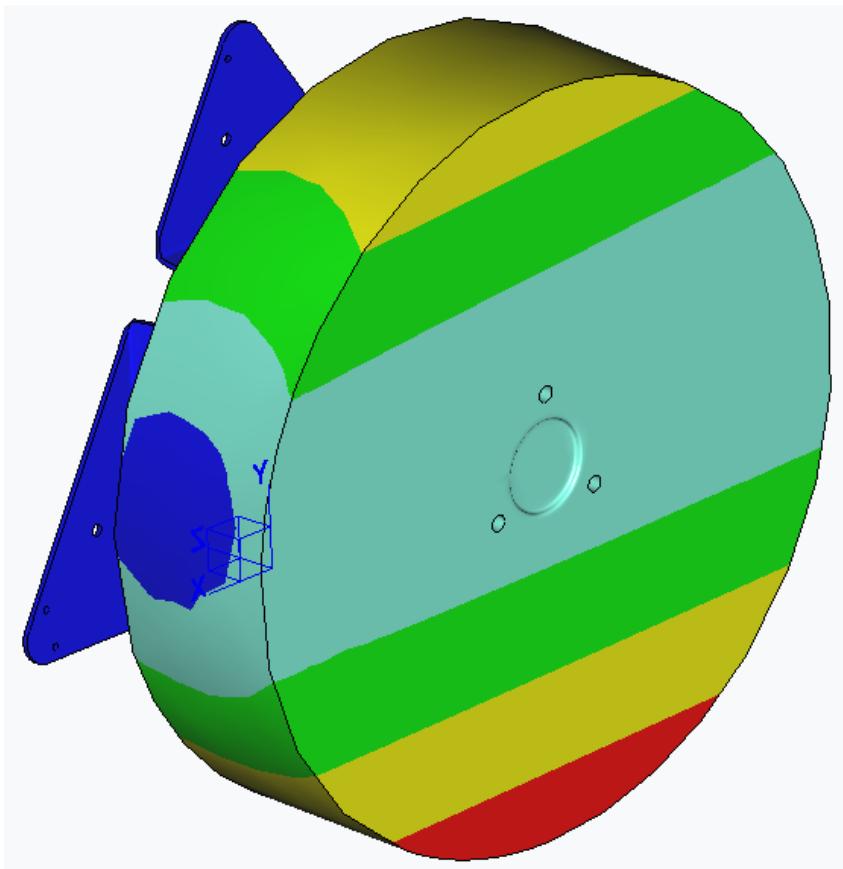
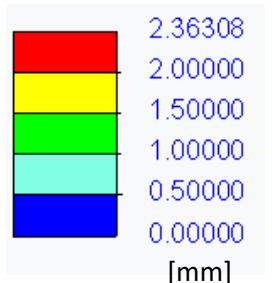


Abbildung 12-27 FEM Hintere Radaufhängung: Verformung [mm]

### 12.7.1.3 Auswertung

Die auftretenden Spannungen liegen unter dem kritischen Bereich des Materials. An zwei flächenmäßig kleinen Stellen treten sehr hohe Spannungsspitzen auf. Diese Spalten finden sich ebenfalls bei der FEM des Hinterbaus, allerdings ist der Betrag der Spannung deutlich geringer. Da davon ausgegangen werden kann, dass es sich hierbei um Abweichungen aufgrund der Anordnung des Netzes handelt, stellen diese Spannungsspitzen kein Problem dar. Die maximale Verformung tritt am unteren Ende des Rades auf und beträgt etwa 2,4 mm.

## 12.7.2 Version 4

### 12.7.2.1 Bedingungen

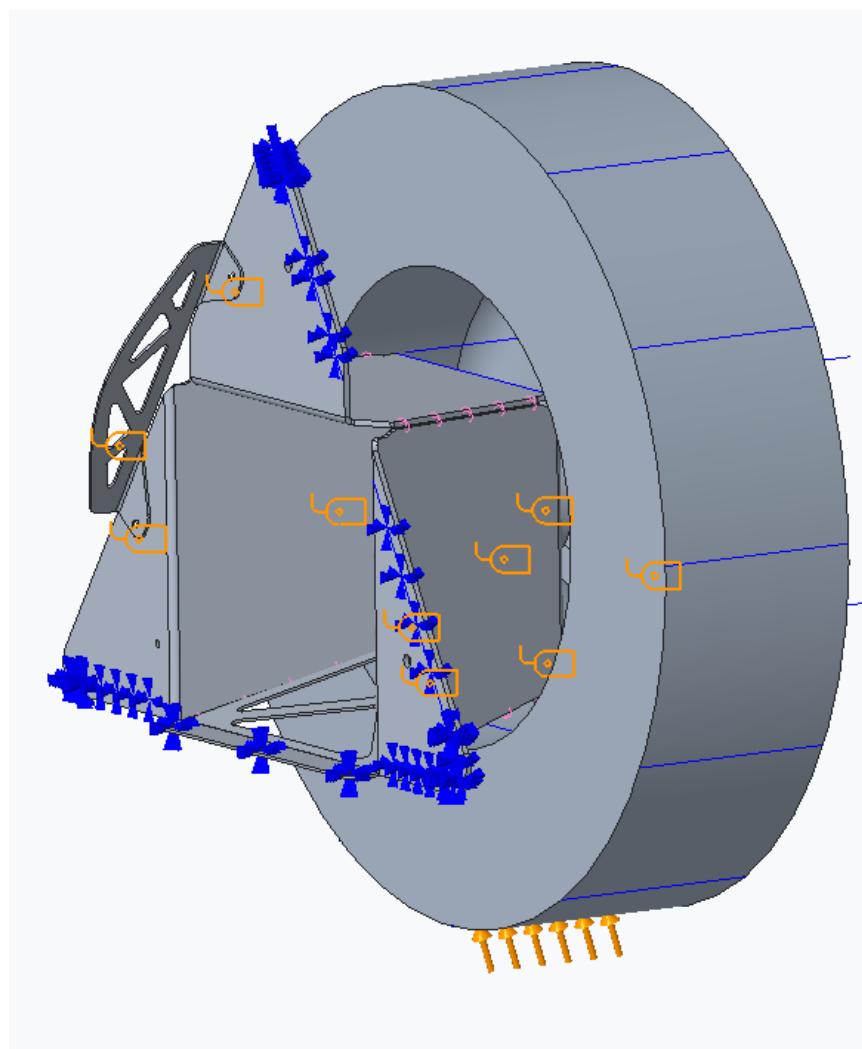


Abbildung 12-28 FEM Hintere Radaufhängung: Bedingungen

#### Materialien:

- Bleche aus Aluminium
- Blindnieten aus Stahl

**Bedingungen:**

- Einspannung an den Verbindungen zum Hinterbau
  - Bohrungen für die Nietverbindungen
  - Klebeflächen entlang der Kontaktflächen mit den Rohren
- Feste Verbindung an den Verschraubungspunkten
  - Lagersitz mit Aufhängungsblech
  - Rad mit Radnabe
- Feste Verbindung an den Klebeflächen
  - Laschen des Aufhängungsbleches
  - Aufhängungsblech mit unterem Versteifungsblech

**Anzahl an Elementen:** 20.646

#### 12.7.2.2 Analyse

**Spannung von Mises [MPa]:**

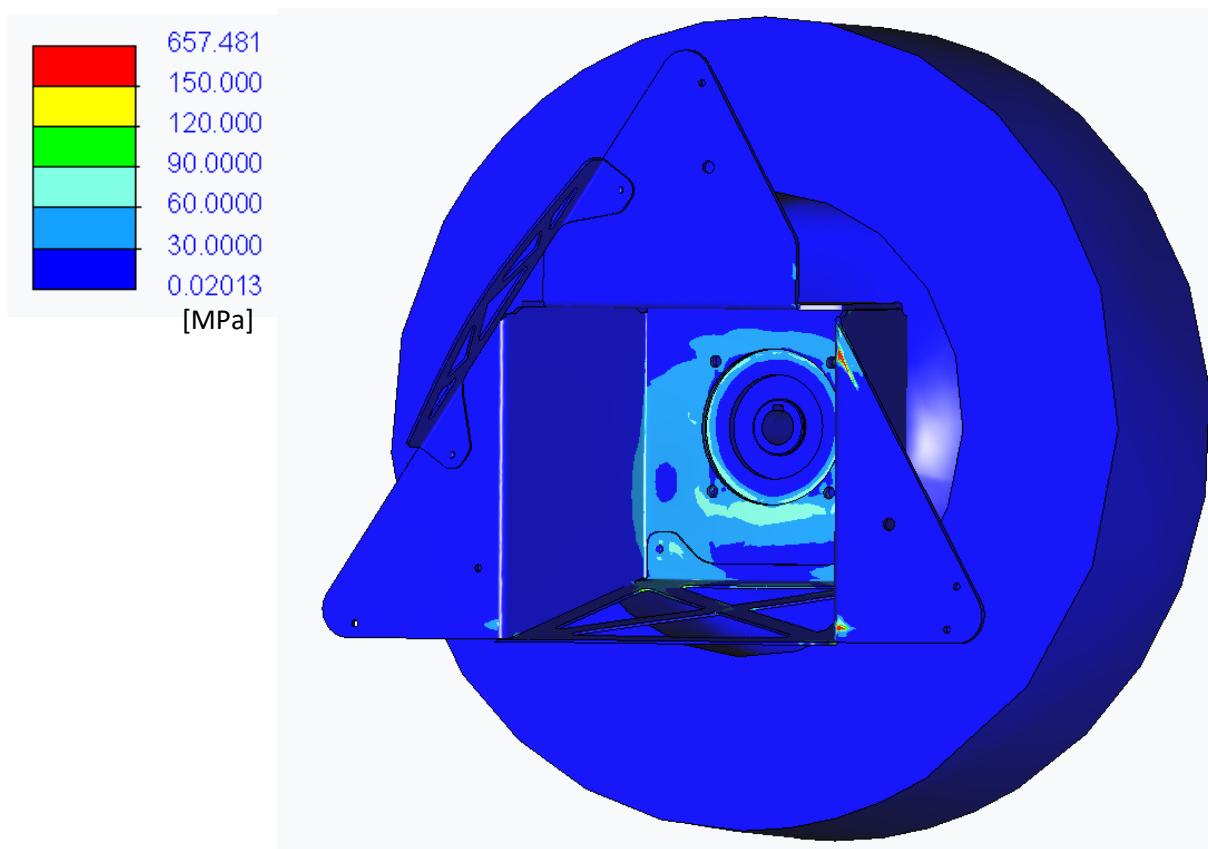


Abbildung 12-29 FEM Hintere Radaufhängung: Spannung von Mises [MPa]

### Verformung [mm]:

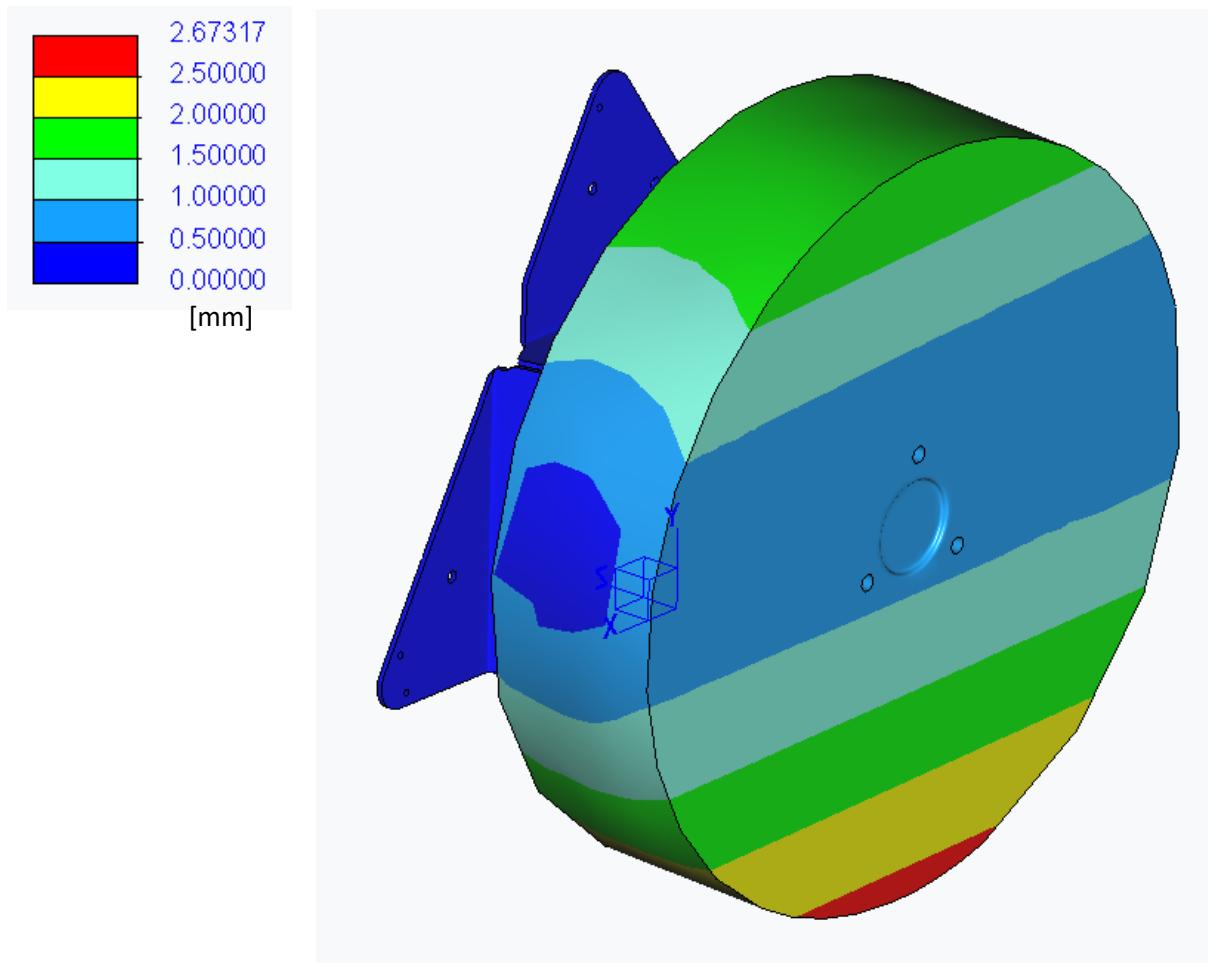


Abbildung 12-30 FEM Hintere Radaufhängung: Verformung [mm]

#### 12.7.2.3 Auswertung

Die Spannungen liegen im unkritischen Bereich, wobei bei dieser Version kleinere Spannungsspitzen auftreten. Die maximale Verformung beträgt bei dieser Version etwa 2,7 mm und tritt am unteren Ende des Rades auf.

## 13 Fertigung

### 13.1 Lasersinterbauteile bei HC-Concepts

Aufgrund der komplexen Geometrie der Rohrverbindungsmuffen, welche als zentrale Bauteile den Gitterrohrrahmen zusammenfügen, waren die Auswahl der Fertigungsverfahren, mit welchen die Muffen gefertigt werden konnten, begrenzt. Daher wurde schon vor Beginn der Diplomarbeit eine Kooperation mit der Firma HC-Concepts angestrebt, welche als eine von fünf österreichischen Firmen einen additiven 3D Metall-Lasersinterdrucker (EOS M 290<sup>53</sup>) besitzt, mit welchem sie im Bereich des Prototypenbaus mit Marktführenden Automobilherstellern zusammenarbeiten.

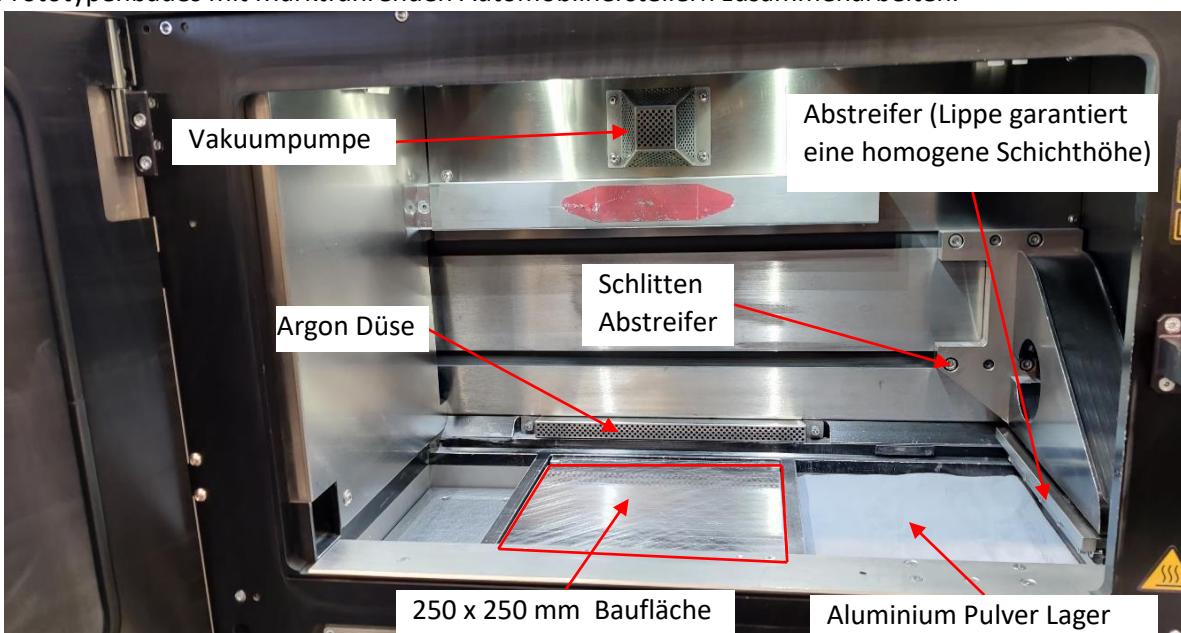


Abbildung 13-1 Aufbau 3D Lasersinterdrucker

3D Metalldrucker basieren auf dem Konzept des Lasersinterns, bei welchem Metallpulver mittels eines 400 W starkem Yb-Faserlasers miteinander schichtweise verschmolzen wird. Schicht für Schicht werden dabei auf der Buildplate (Bauraum in welchem gedruckt wird) des Druckers die Bauteilgeometrien aufgebaut. Um den Energieverbrauch bei diesem Prozess den Energieverbrauch zu senken und Kreuzreaktionen mit der Umgebungsluft zu vermeiden, muss in der Prozesskammer ein Vakuum mit möglichst geringer Sauerstoffkonzentration herrschen. Zusätzlich wird über eine Düse ein Inertgas (nicht reaktionsfähiges Gas in diesem Fall Argon) während des Fertigungsprozesses in die Kammer eingeblasen.

Beim Druckjob bei HC-Concepts wurden 48 Modelle auf der 250 x 250 mm großen Buildplate platziert. Diese wurden bei folgenden Parametern gedruckt:

- Material: AlSi10Mg
- Schichthöhe: 0.03 mm
- Bauplattformtemperatur: 135 °C
- Sauerstoffkonzentration Filter: 0.1%
- Sauerstoffkonzentration Kammer: 0.08% Unterdruck: 0.36 mbar

<sup>53</sup> EOS, 2022



Wie in der Abbildung 13-2 sichtbar werden sämtliche Teile, welche lasergesintert werden, mittels Support Material (brüchiges Stützmaterial, welches nur auf jeder zweiten Schicht gedruckt wird) auf der Aluminium-Bauplatte befestigt. Beim Entfernen der Teile muss dieses Supportmaterial händisch entfernt und die unterstützten Flächen nachbearbeitet werden. Vor einem neuen Druckprozess muss die Bauplatte außerdem abgefräst werden, da eine planare Oberfläche für das Aufbringen der ersten Pulverschicht notwendig ist.

Da die Geometrie der Verbindungsmuffen nur in Form von STEP Dateien an die Firma HC-Concepts übergeben wurden, sind von diesen keine Fertigungszeichnungen im Anhang zu finden. Von den Lenkhebeln und Bremssattelaufnahmen, welche ursprünglich als CNC Frästeile gedacht waren, jedoch kurzfristig aufgrund von freien Kapazitäten 3D Lasergesintert werden konnten, sind im Anhang Fertigungszeichnungen an die Diplomarbeit angefügt.

Am Beispiel einer Lasersintermuffe wird sichtbar, dass der Lasersinterdruck seine Stärken vor allem in der Fertigung von Prototypenbauteilen hat, welche mit konventionellen Fertigungsmethoden nur schwer hergestellt werden können. Daher findet diese Fertigungstechnik vor allem im Bereich des rapid Prototyping Anwendung.

Im Zuge dessen möchten wir uns herzlichst für die Unterstützung von HC-Concepts bedanken.

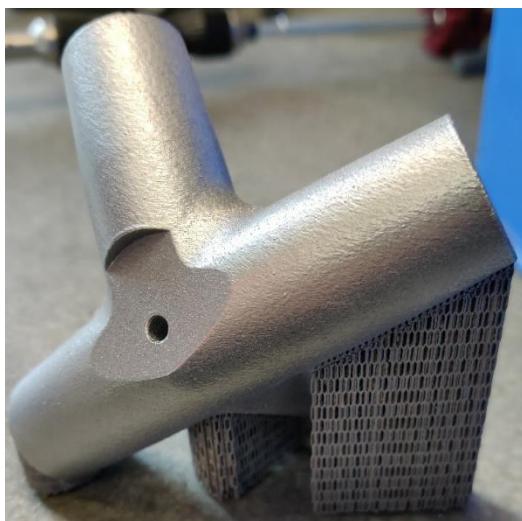


Abbildung 13-4 3D Lasersintermuffe mit Support Material



Abbildung 13-2 Bauplatte  
3D Lasersinterteile

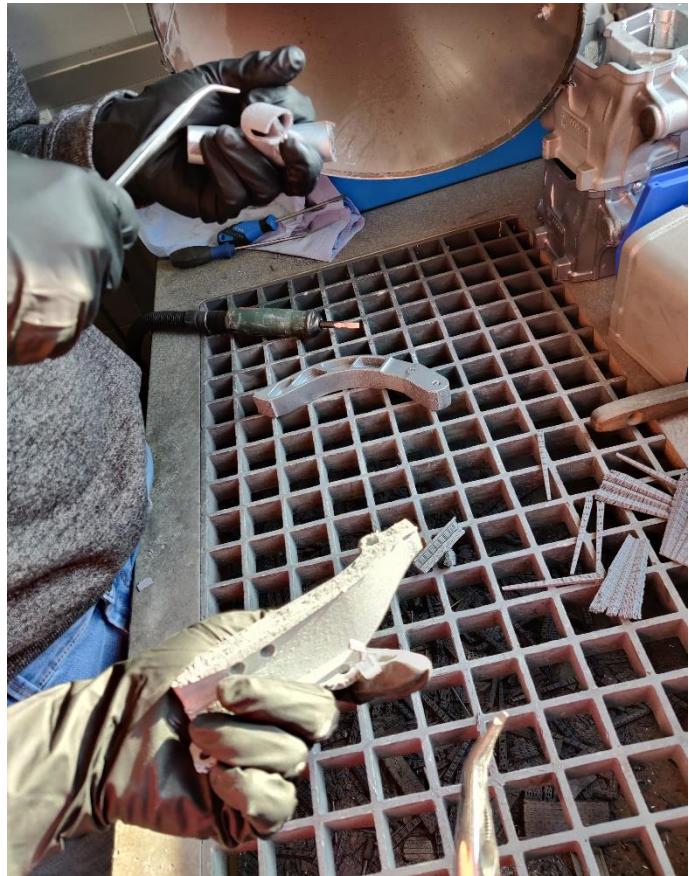


Abbildung 13-3 händisches Entfernen des Supportmaterials

## 13.2 Komplexe Blechteile bei Meister GmbH

Da durch die Aufhängungsbleche (wie unter Kapitel 9 Vordere Radaufhängung sowie 10 Hintere Radaufhängung beschrieben) sowie das Pedalerieaufnahmblech (Lenkgetriebeaufnahme unter 7.3.7) mehrere komplexe Blechteile nötig waren und bereits lange vor Konstruktionsabschluss ein Sponsoring der Firma Meister GmbH feststand, lag diese Option nahe. Nach Rücksprache bezüglich der Fertigbarkeit der Teile wurden von allen Abwicklungen DXF-Dateien erstellt, sowie die 3D CAD-Modelle als STEP-Datei exportiert. Da es sich bei den Abkantpressen der Meister GmbH um CNC gesteuerte Maschinen handelt, war das Erstellen von Fertigungszeichnungen hinfällig, weshalb von diesen Bauteilen auch keine Zeichnungen im Anhang zu finden sind. Diese Maschinen können das 3D-STEP-Teil auf seine Machbarkeit überprüfen und erstellen eine Biegereihenfolge aus dem abgewickelten Blechteil, welches von der Laserschneidmaschine anhand der DXF-Datei gefertigt wurde.

Im Zuge dessen möchten wir uns herzlichst für die Unterstützung der Meister GmbH bedanken.

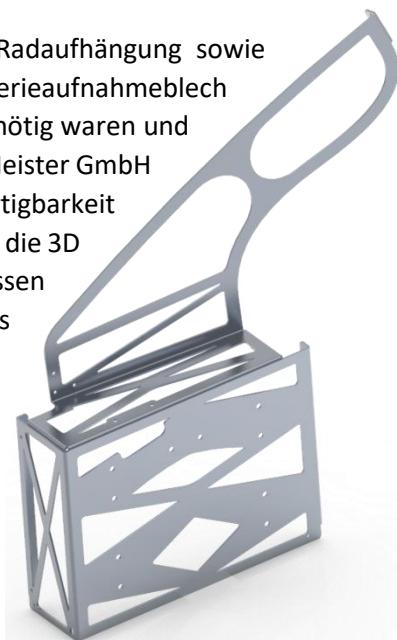


Abbildung 13-5 Versteifungsblech  
A-Säule Vorderradaufhängung



Abbildung 13-6 Hinterradaufhängung

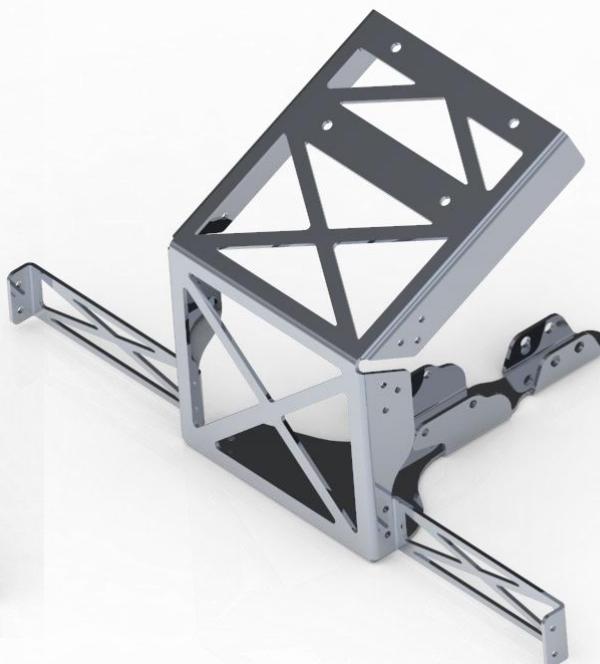


Abbildung 13-7 Versteifungsblech Lenkgetriebe



### 13.3 Blechteile bei Siegl Elektro Produktions- und VertriebsgmbH

Aufgrund der Notwendigkeit einiger Blechteile, welche Großteils keine Biegeoperationen benötigen, war ein Blechteilefertiger für einen großen Teileumfang (Laserblechschneiden) von Nöten. Da aus dem Ferialpraktikum noch die Siegl Elektro- und VertriebsgmbH bekannt war, wurde der Kontakt mit jener aufgenommen und ein paar Tage später das Projekt vor Ort in Moosdorf präsentiert. Diese stimmten dankenswerterweise einem Sponsoring zu. Nach Konstruktionsabschluss wurden die Dateien der Bauteile vorbereitet, Zeichnungen erstellt und nach



Abbildung 13-8 Kofferraumbleche

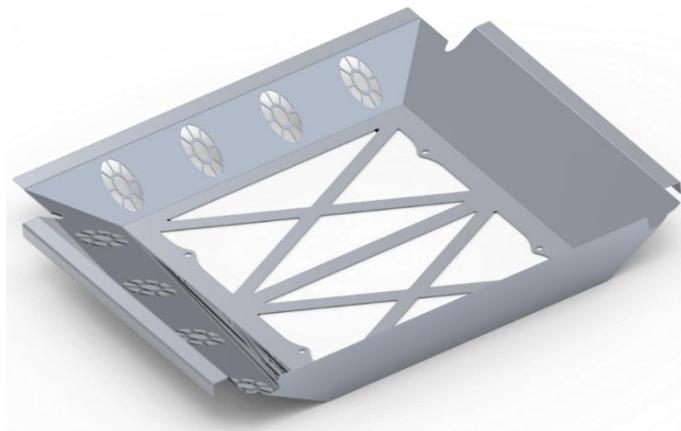


Abbildung 13-9 Sitzblech

Rücksprache alles für die Fertigung vorbereitet. Das Sitzblech bedurfte aufgrund der vier Schweißnähte und der Abkantungen einer genaueren Abstimmung, bei allen anderen Teilen handelt es sich meist um ebene Blechteile, für welche nur eine DXF-Datei notwendig war. Sämtliche Fertigungszeichnungen dieser Teile sind im Anhang zu sehen.

Im Zuge dessen möchten wir uns herzlichst für die Unterstützung der Siegl Elektro- und VertriebsgmbH bedanken.

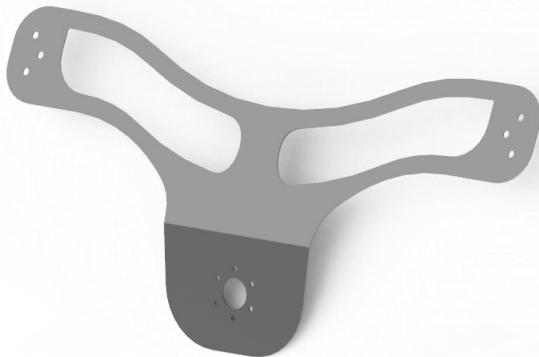


Abbildung 13-10 Armaturenbrett



Abbildung 13-11 Hinterbauboden mit Versteifungen

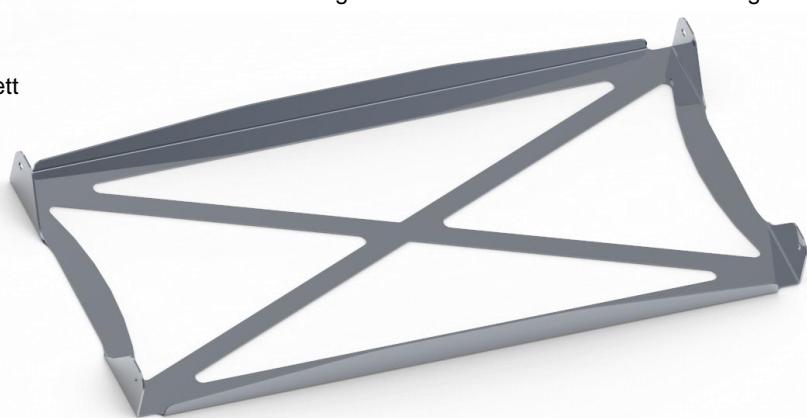


Abbildung 13-12 Hinterbauversteifung



## 13.4 CNC Frä-/Drehteile bei Kobler Maschinenbau

Ursprünglich war eine Fertigung aller CNC Dreh- und Frästeile in der Schule angestrebt worden, allerdings konnten diese Kapazitäten nicht zur Verfügung gestellt werden. Daher mussten Teile, wie der hintere Lagersitz (Abbildung 13-14), die hintere Radnabe (Abbildung 13-13) sowie die hintere Bremssattelaufnahme (jeweils links & rechts Abbildung 13-15) extern gefertigt werden. Aufgrund von persönlichen Kontakten zur Kobler Maschinenbau GmbH, bot sich dies als Möglichkeit an. Nach Rücksprache stimmte die Firma einem Sponsoring der sechs Bauteile zu. Hierzu wurden notwendige Fertigungsdateien in Form von STEP-Dateien, und Zeichnungen (im Anhang ersichtlich) vorbereitet und der Fertigungsfirma zur Verfügung gestellt.

Im Zuge dessen möchten wir uns herzlichst für die Unterstützung der Kobler Maschinenbau GmbH bedanken.



Abbildung 13-14 Hinterer Lagersitz

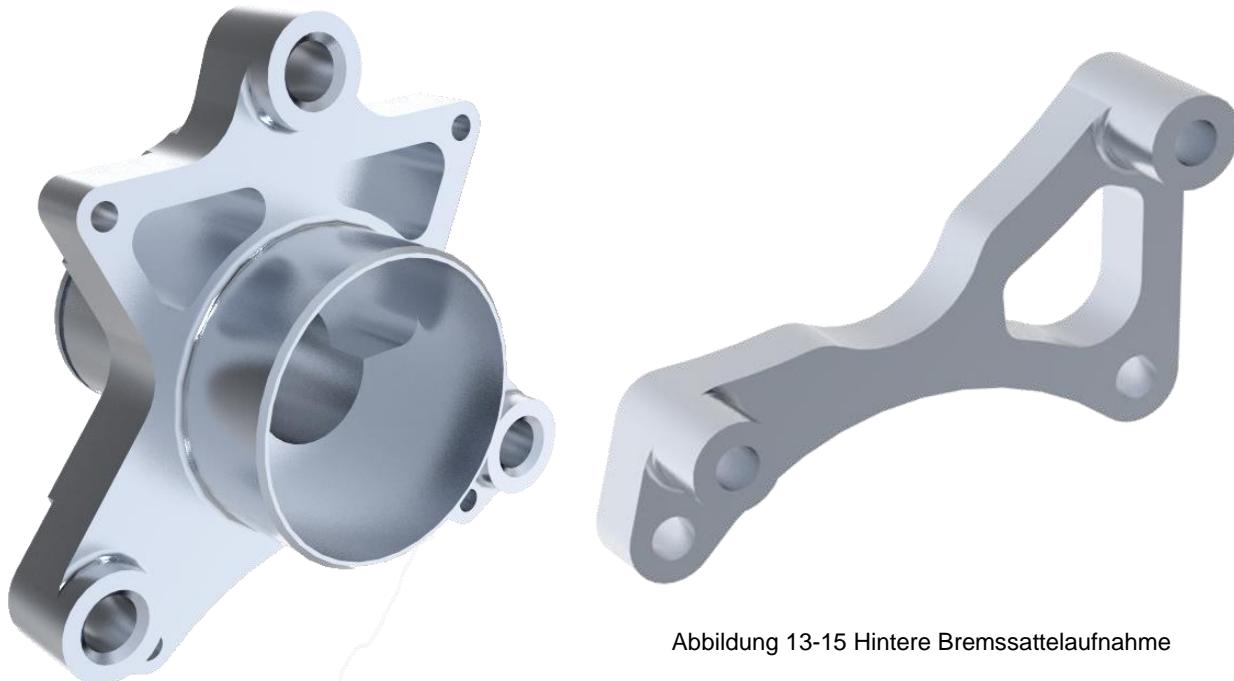


Abbildung 13-15 Hintere Bremssattelaufnahme

Abbildung 13-13 Hintere Radnabe



### 13.5 Vordere Radnabe aus den Werkstätten der HTBLuVA Salzburg

Im Rahmen der Neukonstruktion der vorderen Radaufhängungen wurden unter anderem wie unter 9 Vordere Radaufhängung beschrieben, die Radnaben angepasst weshalb eine neue Fertigung der Bauteile notwendig war. (Abbildung 13-17)

Da bereits die Vorgängerversion der Radnaben in der CNC Werkstätte innerhalb der HTL Salzburg gefertigt wurden, war bereits Vorwissen sowie die geeigneten Spannvorrichtungen vorhanden. Das Rohmaterial, (Al7075) welches großzügigerweise von der Schulwerkstätte zur Verfügung gestellt wurde von den Diplomanten zugeschnitten und vorbereitet.

Die Daten für die Fertigung wurden in Form der im Anhang zu findenden Fertigungsblätter, Fertigungszeichnungen sowie STEP Dateien in Absprache mit der CNC Werkstätte erstellt und überarbeitet.

Die Fertigung wurde anschließend von Herrn FOL Dipl.-Päd. Josef Diemling übernommen. Im Zuge dessen möchten wir uns herzlichst für die Unterstützung der HTL-Salzburg und insbesondere bei Herrn Diemling bedanken.



Abbildung 13-16 Gefertigte Radnabe



Abbildung 13-18 Gespanntes Rohmaterial



Abbildung 13-17 Renderbild vordere Radnabe



## 13.6 Kleinere Fräse- & Drehteile von W&H Dentalwerk GmbH

Da für das gesamte Fahrzeug sehr viele Kleinteile, beispielsweise kleinere Hülsen, Gewindeguss, Distanzstücke usw. notwendig sind, sowie auch komplexere Drehteile oder auch verschiedene 3D-Druckteile, war ein Fertigungsunternehmen notwendig, worüber eine schnelle und unkomplizierte Fertigung solcher Bauteile möglich ist. Aufgrund familiärer Umstände bot sich hierzu die Firma W&H Dentalwerk Bürmoos GmbH an, welche in der Lehrwerkstatt, sowie in der Entwicklungsabteilung dankenswerterweise die notwendigen Kapazitäten zur Verfügung stellten. Als repräsentative Bauteile können die Lenklagerhalterung (Abbildung 13-19) und das Lenkstangenende (Abbildung 13-20) herangezogen werden. Im Zuge dessen möchten wir uns herzlichst für die Unterstützung der W&H Dentalwerk GmbH bedanken.



Abbildung 13-19 Lenklagerhalterung

Abbildung 13-20 Lenkstangenende

## 13.7 A-Säule bei GMT-Metalltechnik

Aufgrund der höheren Festigkeitsanforderungen an die gebogene A-Säule, musste diese als einziges Rohrbauteil als Edelstahlrohr ausgeführt werden. Die Geometrie des Rohres wurde als STEP Datei und Fertigungszeichnung (im Anhang ersichtlich) an die Firma GMT-Metalltechnik übergeben, welche das Rohr auf der CNC gestützten Rohrbiegemaschine problemlos anfertigen konnten.

Im Zuge dessen möchten wir uns herzlichst für die Unterstützung der GMT- Wintersteller Metalltechnik GmbH bedanken.

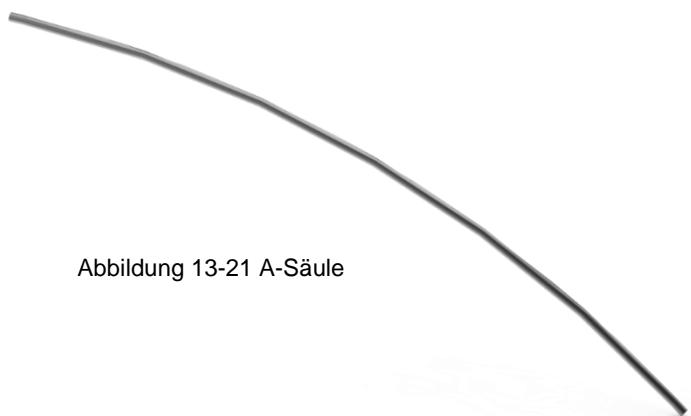


Abbildung 13-21 A-Säule



## 14 Ausblick

### 14.1 Resümee

Mit diesem Sommer wird das Projekt wie bisher an die nächste Schülergeneration weitergegeben, mit der Aussicht, kommendes Jahr wieder mit einem vollständigen Fahrzeug am Shell Eco Marathon teilzunehmen.

Um dieses Ziel zu erreichen, muss noch die Verkleidung des Fahrzeugs fertiggestellt und es müssen die Scheiben des Fahrzeugs gefertigt werden, welche jedoch bereits mit der Firma K-Tec in Entwicklung sind.

Da sich der Shell Eco Marathon mit jedem Jahr verändert, jedes Jahr ein neues Rennreglement formuliert wird und sich damit die Anforderungen an die teilnehmenden Teams permanent verändert, gilt es, das Projekt weiterzuführen und auch in den kommenden Jahren zu verbessern. Kein Aspekt des Fahrzeugs ist in Stein gemeißelt und Veränderung ist Teil der Idee, jede Generation des Racing Teams geht ihren eigenen Weg und versucht innovative und kreative Lösungen für komplexe Probleme zu finden.

Wie die Vergangenheit gezeigt hat, können die Erkenntnisse, welche durch ein solches Projekt gewonnen werden, vor allem in unserer weiteren Bildungs- und Berufslaufbahn von Nutzen sein, da sich jeder von uns weit über das in der Schule übliche Maß Fähigkeiten und Wissen aneignen musste, auf welche wir in Zukunft zurückgreifen können.

Darüber hinaus lernt man innerhalb eines so großen vielfältigen Teams zwangsläufig Soft Skills wie Teamfähigkeit, Kommunikation und Organisation, welche in einer modernen dynamischen Marktwirtschaft mehr denn je eine zentrale Rolle spielen.

Zusätzlich wollen wir den Nutzen für kommende SchülerInnen und unsere Schule betonen. Der Scorpion ist seit Jahren nicht nur Aushängeschild für die HTL Salzburg, sondern auch eine Quelle für Inspiration für angehende HTL SchülerInnen. Wie wir selbst vor mittlerweile 5 Jahren von diesem Projekt beeindruckt worden sind, wollen wir andere 15-Jährige beeindrucken. Es gilt mit dem trockenen und zermürbenden Image, welches eine technische Ausbildung in Österreich genießt, aufzuräumen und zu zeigen, was mit Motivation, Kreativität und einem Team aus SchülerInnen möglich ist.

Außerdem wollen wir abteilungsübergreifende Projekte fördern. Zu oft sehen wir die einzelnen technischen Disziplinen isoliert in Abteilungen, Klassen und Diplomprojekte unterteilt. Was die österreichische Wirtschaft braucht, sind keine Fachidioten, sondern angehende Ingenieure, die außerhalb der eigenen technischen Disziplin Fähigkeiten besitzen und auch in einem interdisziplinären Team funktionieren können.



## 14.2 Renderbild Scorpion

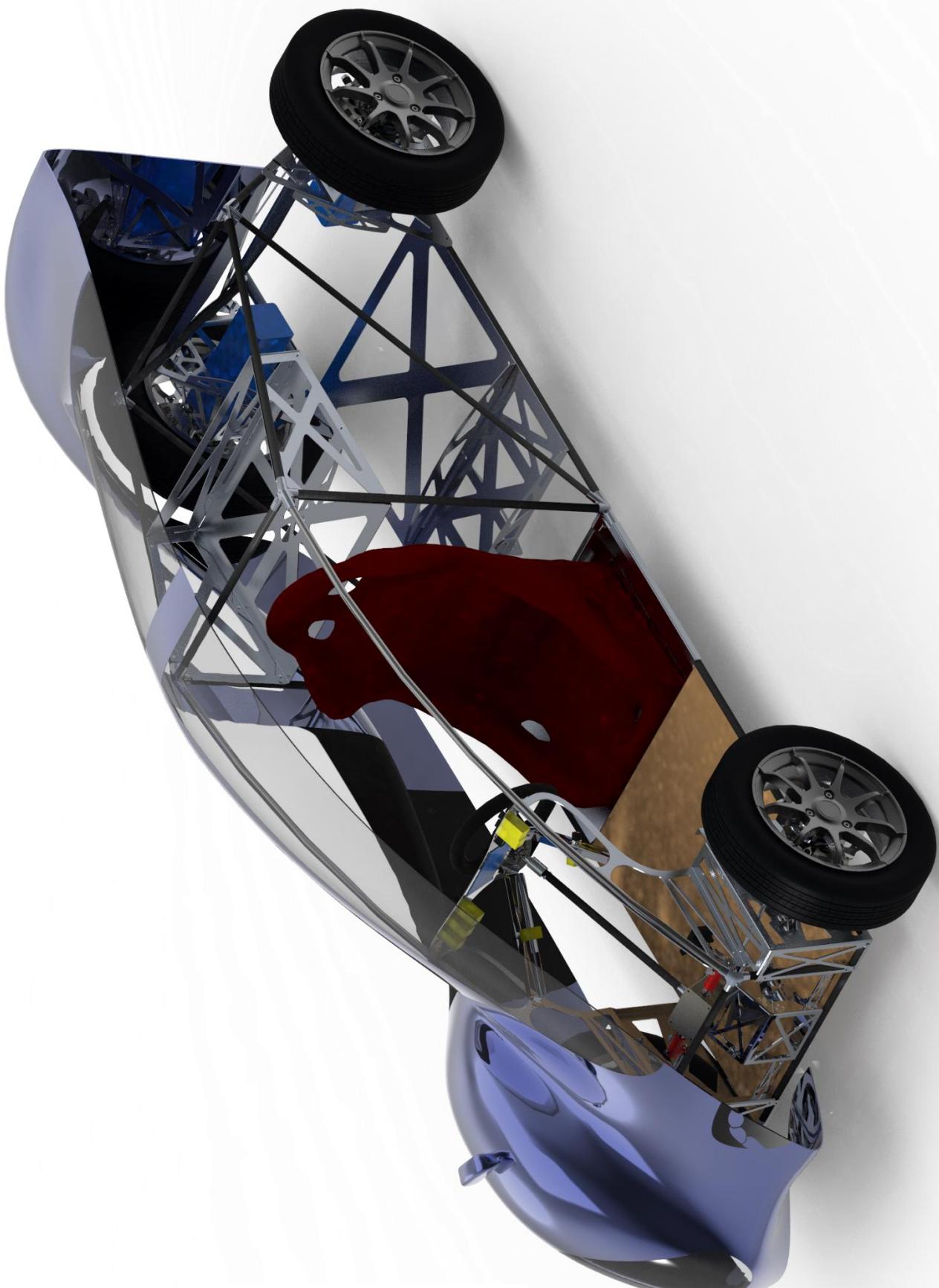


Abbildung 14-1 Finales Renderbild



## 15 Verzeichnisse

### 15.1 Literaturverzeichnis

Lecheler, S. (2018). *Numerische Strömungsberechnung*. Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg.

Peter Will, B. L. (1998). *Kleine Formelsammlung technische Mechanik*. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig.

Trzesniowski, M. (2010). *Rennwagentechnik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme*. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag.

Udo Hellwig, H. N. (2004). *CFD-Simulation zur Untersuchung des Strömungsverhaltens*. Wildau: Technische Fachhochschule Wildau.

### 15.2 Online-Quellen

Ansys, Inc. (13. 01 2022). *Ansys CFX*. Von <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx> abgerufen

Audi AG. (20. 03 2022). *Audi A6 Avant*. Von <https://www.audi-mediacenter.com/de/fotos/detail/audi-a6-avant-67257> abgerufen

Autodesk. (10. 01 2022). *Autodesk*. Von <https://www.autodesk.de/products/fusion-360/overview> abgerufen

Bosch. (06. 01 2022). *Technik fürs Leben-Preis*. Von <https://www.bosch.at/news-and-stories/technik-fuers-leben-preis/> abgerufen

Breyer, J. (29. 01 2022). *Jugend Innovativ*. Von <https://www.jugendinnovativ.at/wettbewerb/ueber-jugend-innovativ> abgerufen

Engineer, T. E. (27. 04 2021). *Understanding the Finite Element Method*. Von <https://www.youtube.com/watch?v=GHjopp47vvQ&t=328s> abgerufen

EOS. (22. 03 2022). *EOS M 290*. Von <https://www.eos.info/de/additive-fertigung/3d-druck-metall/eos-metall-systeme/eos-m-290> abgerufen

Fahrgestell. (12. 01 2022). *Wikipedia*. Von <https://de.wikipedia.org/wiki/Fahrgestell> abgerufen

Finite-Elemte-Methode. (27. 08 2021). *Wikipedia*. Von <https://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode> abgerufen

Gas, I. (01. 15 2022). *Wikipedia*. Von [https://de.wikipedia.org/wiki/Ideales\\_Gas](https://de.wikipedia.org/wiki/Ideales_Gas) abgerufen

Groth, P. D.-I. (27. 09 2021). *Cadfem*. Von <https://www.cadfem.net/at/de/cadfem-informiert/cadfem-newsroom/cadfem-journal/fem-zimmer.html> abgerufen

Heggemann Ag . (20. 03 2022). *Rollcage Heggemann*. Von <https://www.heggemann.com/de/presse/2018/1000-rollcages-made-by-heggemann> abgerufen



- Leiterrahmen. (12. 01 2022). *Wikipedia*. Von <https://de.wikipedia.org/wiki/Leiterrahmen> abgerufen
- Mercedes-Benz. (03. 20 2022). *Typ 300 SL Coupé*. Von <https://mercedes-benz-publicarchive.com/marsClassic/de/instance/picture/Typ-300-SL-Coup.xhtml?oid=133573> abgerufen
- motor-talk. (20. 03 2022). *Der Jaguar fürs Volk*. Von <https://www.motor-talk.de/news/der-jaguar-fuers-volk-t4945398.html> abgerufen
- one, o. (27. 08 2021). Von <https://www.optimum.one/infos/geschichte-der-fem/> abgerufen
- PTC. (17. 03 2022). Von <https://www.ptc.com/de/products/creo> abgerufen
- quomus. (22. 03 2022). *3-Wege-Eckverbinder 90°*. Von <https://quomus.de/3-Wege-Eckverbinder-90-fuer-O-424-mm-Rundrohre-V2A-Edelstahl-geschliffen> abgerufen
- Reynolds-Zahl. (30. 03 2022). *Wikipedia*. Von <https://de.wikipedia.org/wiki/Reynolds-Zahl> abgerufen
- Strömungswiderstandskoeffizient. (15. 01 2022). *Wikipedia*. Von <https://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstandskoeffizient> abgerufen
- Teams, M. (06. 01 2022). *Wikipedia*. Von [https://de.wikipedia.org/wiki/Microsoft\\_Teams](https://de.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Teams) abgerufen
- Velocista, C. (24. 01 2022). *Cicli Velocista*. Von <https://ciclivelocista.com/product/rennrad-rahmen-fahrradrahmen-columbus-sl-rohre-retro-chrom/> abgerufen
- Wiki, C. (27. 08 2021). *Automobilindustrie Fallbeispiele*. Von [http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Automobilindustrie\\_Fallbeispiele](http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Automobilindustrie_Fallbeispiele) abgerufen
- Zimmer, K. (27. 08 2021). *Cadfem*. Von <https://www.cadfem.net/at/de/cadfem-informiert/cadfem-newsroom/cadfem-journal/fem-zimmer.html> abgerufen
- Zwettler, D.-I. (. (27. 08 2021). *Konstruktionspraxis*. Von <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/was-ist-eigentlich-fem-a-969326/> abgerufen



## 15.3 Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 3-1 Dominik Hohla .....  | 3  |
| Abbildung 3-2 Michael Bäuchler .....   | 3  |
| Abbildung 3-3 Alexander Ploy .....   | 4  |
| Abbildung 3-4 Vanessa Pugl-Pichler .....   | 4  |
| Abbildung 3-5 Niko Serdar .....  | 4  |
| Abbildung 3-6 Paul Sommer.....   | 4  |
| Abbildung 3-7 Projektstrukturplan (im Anhang) .....                                  | 5  |
| Abbildung 3-8 Gantt Diagramm (Im Anhang).....  | 5  |
| Abbildung 4-1 Vorlage für Designideen .....  | 11 |
| Abbildung 4-2 Designidee Bäuchler Michael.....                                       | 12 |
| Abbildung 4-3 Designidee Ploy Alexander .....  | 12 |
| Abbildung 4-4 Designidee Pugl-Pichler Vanessa .....                                  | 13 |
| Abbildung 4-5 Designidee Sommer Paul.....  | 13 |
| Abbildung 4-6 Designentwurf 1.....   | 14 |
| Abbildung 4-7 Designentwurf 2.....   | 15 |
| Abbildung 4-8 Designentwurf 3.....   | 16 |
| Abbildung 4-9 Designentwurf 4.....   | 17 |
| Abbildung 4-10 Finalisiertes Design 1 .....  | 18 |
| Abbildung 4-11 Finalisiertes Design 2 .....  | 18 |
| Abbildung 5-1 Lösungsmethode Simulationselement Prinzip.....                         | 20 |
| Abbildung 5-2 numerische Lösungsmethode Volumens Elemente .....                      | 20 |
| Abbildung 5-3 Aufbau CFX Analyse .....   | 24 |
| Abbildung 5-4 Ergebnisse Netzanalyse .....   | 25 |
| Abbildung 5-5 Y Plus Werte Netzanalyse .....   | 26 |
| Abbildung 5-6 Optische Analyse erstes Modell.....                                    | 27 |
| Abbildung 5-7 Ergebniss stationäre Lösung Erstentwurf .....                          | 29 |
| Abbildung 5-8 Ebene 0,3 m hinter dem Heck des Fahrzeuges Erstentwurf Druck .....     | 30 |
| Abbildung 5-9 Aufriss Erstentwurf Druckkontur .....                                  | 30 |
| Abbildung 5-10 Abrisskante Heck Detail Druck.....                                    | 31 |
| Abbildung 5-11 Isoansicht Erstentwurf .....  | 31 |
| Abbildung 5-12 Aufriss Erstentwurf Wirbelviskosität .....                            | 31 |
| Abbildung 5-15 Geschwindigkeitskontur Heck Geschwindigkeit .....                     | 32 |
| Abbildung 5-15 Ebene 0,3 m hinter dem Heck des Fahrzeuges Erstentwurf.....           | 32 |
| Abbildung 5-15 Geschwindigkeit Aufriss Fahrzeug .....                                | 32 |
| Abbildung 5-16 Analyse Veränderungen überarbeitetes Konzept.....                     | 33 |
| Abbildung 5-17 Vergleich stationäre Lösungen .....                                   | 34 |
| Abbildung 5-18 Ebene 0,3 m hinter dem Heck des Fahrzeuges finales Design Druck ..... | 34 |
| Abbildung 5-21 Geschwindigkeitsprofil Aufriss finales Konzept .....                  | 35 |
| Abbildung 5-21 Totaldruck Aufriss finales Konzept Heck.....                          | 35 |
| Abbildung 5-21 Geschwindigkeitsprofil Heck finales Konzept .....                     | 35 |
| Abbildung 5-23 Aufriss überarbeitetes Konzept .....                                  | 36 |
| Abbildung 5-23 Isoansicht überarbeitetes Konzept .....                               | 36 |
| Abbildung 5-24 Übernahme der stationären Ergebnisse aus 5.5 .....                    | 37 |
| Abbildung 5-25 Einschwingverhalten der instationären Lösung.....                     | 37 |
| Abbildung 5-26 Vergleich Aerodynamikkonzepte .....                                   | 39 |



|   |    |
|---|----|
| Abbildung 5-27 Aerodynamisches Fazit Szenario 1.....              | 40 |
| Abbildung 5-28 Aerodynamisches Fazit Szenario 2.....              | 40 |
| Abbildung 5-29 Aufbau Windkanalmessungen Schema .....             | 41 |
| Abbildung 5-30 Messergebnisse 3D Modellversuch .....              | 42 |
| Abbildung 5-31 Aufbau Windkanalmessungen .....                    | 42 |
| Abbildung 6-1 Kastenrahmen.....                                   | 45 |
| Abbildung 6-2 Plattformrahmen .....                               | 45 |
| Abbildung 6-3 Zentralrohrrahmen .....                             | 45 |
| Abbildung 6-4 Typ 300 SL-Coupe.....                               | 45 |
| Abbildung 6-5 Space-Frame Chassis.....                            | 46 |
| Abbildung 6-6 Monocoque.....                                      | 46 |
| Abbildung 7-1 Schweißkonstruktion .....                           | 50 |
| Abbildung 7-2 Verbindungsmuffen .....                             | 50 |
| Abbildung 7-3 Erstes Rohrkonstrukt .....                          | 51 |
| Abbildung 7-4 Verbindungsmuffen .....                             | 52 |
| Abbildung 7-5 Anbindungs möglichkeit für vordere Aufhängung ..... | 52 |
| Abbildung 7-6 Anfügen einer Bodenplatte .....                     | 54 |
| Abbildung 7-7 Verankerung der Bodenplatte .....                   | 54 |
| Abbildung 7-8 Aufnahmblech.....                                   | 55 |
| Abbildung 7-9 Bremssystemsaktuierung.....                         | 55 |
| Abbildung 7-10 Pedalerie & Lenkgetriebe .....                     | 55 |
| Abbildung 7-11 Verbaute Bremsbaugruppe 1 .....                    | 56 |
| Abbildung 7-12 Verbaute Bremsbaugruppe 2.....                     | 56 |
| Abbildung 7-14 Verbaute vordere Radaufhängung .....               | 57 |
| Abbildung 7-13 Fahrersitz 3D-gescannt .....                       | 57 |
| Abbildung 7-15 Verbauter Sitz .....                               | 58 |
| Abbildung 7-16 Fahrerzelle mit Bodenblech .....                   | 58 |
| Abbildung 7-17 Bodenblech Fahrerzelle .....                       | 58 |
| Abbildung 7-18 Grundversion Armaturenbrett.....                   | 59 |
| Abbildung 7-19 Schnellverschluss .....                            | 60 |
| Abbildung 7-20 Lenkrad inkl. Schnellverschluss.....               | 60 |
| Abbildung 7-21 Kreuzgelenk Lenkrad.....                           | 60 |
| Abbildung 7-22 Klemmkupplung Lenkung .....                        | 60 |
| Abbildung 7-23 Verbaute Lenkungsbaugruppe .....                   | 61 |
| Abbildung 7-24 Lenkungsbaugruppe.....                             | 61 |
| Abbildung 7-25 Zusammenstellungszeichnung Lenkungsbaugruppe ..... | 62 |
| Abbildung 7-26 Verbaute Lenkungsbaugruppe.....                    | 62 |
| Abbildung 7-27 Renderbild Collage Fahrerzelle .....               | 63 |
| Abbildung 8-1 Gitterrohrrahmen Handskizze .....                   | 65 |
| Abbildung 8-2 Blech-Gitterrahmen Handskizze .....                 | 66 |
| Abbildung 8-3 Kombinationsgitterrahmen Handskizze.....            | 66 |
| Abbildung 8-4 Gittergeometrie 1 Handskizze .....                  | 69 |
| Abbildung 8-5 Gittergeometrie 2 Handskizze .....                  | 70 |
| Abbildung 8-6 Diamantrahmen eines Rennrades .....                 | 70 |
| Abbildung 8-7 Hinterbau Version 1 .....                           | 73 |
| Abbildung 8-8 Hinterbau Version 1: Verbindungsbleche .....        | 74 |
| Abbildung 8-9 Hinterbau Version 1: Aufhängungsblech .....         | 75 |



|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 8-10 Hinterbau Version 2 .....                                     | 76  |
| Abbildung 8-11 Hinterbau Version 2: Verbindungsmaffen.....                   | 77  |
| Abbildung 8-12 Hinterbau Version 3 .....                                     | 78  |
| Abbildung 8-13 Hinterbau Version 3: Verbindungsmaffen.....                   | 79  |
| Abbildung 8-14 Hinterbau Version 3: Heckansicht .....                        | 80  |
| Abbildung 8-15 Hinterbau Version 3: Anbindung zur hinteren Verkleidung ..... | 80  |
| Abbildung 8-16 Hinterbau Version 4 .....                                     | 81  |
| Abbildung 8-17 Hinterbau Version 4: Heckansicht .....                        | 82  |
| Abbildung 8-18 Hinterbau Version 4: Aufhängungsblech untere Ansicht .....    | 82  |
| Abbildung 8-19 Hinterbau Version 4: Verschraubung Hinterbauversteifung ..... | 83  |
| Abbildung 8-20 Hinterbau Version 4: Akkuhalterung Explosion .....            | 84  |
| Abbildung 8-21 Hinterbau Version 4: Akkuhalterung .....                      | 84  |
| Abbildung 8-22 Kofferraum.....   | 85  |
| Abbildung 8-23 Kofferraum Explosion 1 .....                                  | 85  |
| Abbildung 8-24 Kofferraum Explosion 2 .....                                  | 86  |
| Abbildung 8-25 Hinterbau Endversion .....                                    | 87  |
| Abbildung 8-26 Hinterbau Endversion: Positionermuffe eingebaut.....          | 87  |
| Abbildung 8-27 Positionermuffe .....   | 87  |
| Abbildung 8-28 Hinterbau Endversion: Heckansicht.....                        | 88  |
| Abbildung 8-29 Hinterbauversteifung.....                                     | 88  |
| Abbildung 9-1 Übernommene Bauteile .....                                     | 89  |
| Abbildung 9-2 Bremsscheibe.....  | 90  |
| Abbildung 9-3 Bremssattel .....  | 90  |
| Abbildung 9-4 Zusammengebaute Aufhängung mit Lenkfunktion .....              | 91  |
| Abbildung 9-5 Bremssattelaufnahme rechts.....                                | 92  |
| Abbildung 9-6 Lenkhebel rechts.....  | 92  |
| Abbildung 9-7 Bremssattelaufnahme links .....                                | 92  |
| Abbildung 9-8 Lenkhebel links .....  | 92  |
| Abbildung 9-9 Verbindung zwischen Rad und Radnabe 2 .....                    | 93  |
| Abbildung 9-10 Verbindung zwischen Rad und Radnabe 1 .....                   | 93  |
| Abbildung 9-11 Radnabenwelle .....   | 93  |
| Abbildung 9-12 Radnabe Vorderseite .....                                     | 93  |
| Abbildung 9-13 Radnabe Hinterseite .....                                     | 93  |
| Abbildung 9-14 Explosionsansicht vordere Aufhängung.....                     | 94  |
| Abbildung 9-15 Vordere Aufhängung.....                                       | 94  |
| Abbildung 10-1 Hintere Radaufhängung Handskizze .....                        | 96  |
| Abbildung 10-2 Hintere Radaufhängung Version 1.....                          | 99  |
| Abbildung 10-3 Hintere Radaufhängung Version 1 Explosion .....               | 99  |
| Abbildung 10-4 Hintere Radaufhängung Version 1 Schnittdarstellung .....      | 100 |
| Abbildung 10-5 Hintere Radaufhängung Version 2 Explosion .....               | 101 |
| Abbildung 10-6 Hintere Radaufhängung Version 2 .....                         | 101 |
| Abbildung 10-7 Hintere Radaufhängung Version 2 Schnittdarstellung .....      | 102 |
| Abbildung 10-8 Hintere Radaufhängung Version 3 Explosion .....               | 103 |
| Abbildung 10-9 Hintere Radaufhängung Version 3 .....                         | 103 |
| Abbildung 10-10 Hintere Radaufhängung Version 3 Schnittdarstellung .....     | 104 |
| Abbildung 10-11 Hintere Radaufhängung Version 4 Explosion .....              | 105 |
| Abbildung 10-12 Hintere Radaufhängung Version 4 .....                        | 105 |



|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 10-13 Hintere Radaufhängung Version 4 Schnittdarstellung .....                    | 106 |
| Abbildung 10-14 Hintere Radaufhängung Endversion Ansicht 2 .....                            | 107 |
| Abbildung 10-15 Hintere Radaufhängung Endversion Ansicht 1 .....                            | 107 |
| Abbildung 10-16 Hintere Radaufhängung Endversion Schnittdarstellung.....                    | 108 |
| Abbildung 10-17 Hintere Radaufhängung Endversion Explosion.....                             | 108 |
| Abbildung 10-18 Hintere Bremssattelaufnahme .....   | 109 |
| Abbildung 10-19 Hintere Radnabe .....   | 109 |
| Abbildung 11-1 Radstand - Spurweite.....  | 112 |
| Abbildung 11-2 Collage Fahrzustand volle Kurvenfahrt.....                                   | 112 |
| Abbildung 11-3 Berechnungsskizze Radlasten 1 .....  | 113 |
| Abbildung 11-4 Berechnungsskizze Radlasten 3 .....  | 113 |
| Abbildung 11-5 Berechnungsskizze Radlasten 2 .....  | 113 |
| Abbildung 11-6 Berechnungsskizze Radlasten 5 .....  | 114 |
| Abbildung 11-7 Berechnungsskizze Radlasten 4 .....  | 114 |
| Abbildung 12-1 Mercedes C111 FEM Modell.....  | 116 |
| Abbildung 12-2 Einteilung des Fahrzeugs .....   | 119 |
| Abbildung 12-3 FEM Fahrerzelle: Bedingungen .....   | 121 |
| Abbildung 12-4 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] der Verbindungsmuffen.....         | 122 |
| Abbildung 12-5 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion .....    | 122 |
| Abbildung 12-6 FEM Fahrerzelle: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion .....             | 123 |
| Abbildung 12-7 FEM Fahrerzelle: Bedingungen .....   | 124 |
| Abbildung 12-8 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion .....    | 125 |
| Abbildung 12-9 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] des vorderen Aufhängungsbleches... | 126 |
| Abbildung 12-10 FEM Fahrerzelle: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion .....   | 126 |
| Abbildung 12-11 FEM Fahrerzelle: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion .....            | 127 |
| Abbildung 12-12 FEM Hinterbau: Bedingungen.....   | 128 |
| Abbildung 12-13 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion .....     | 129 |
| Abbildung 12-14 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der Verbindungsmuffen .....         | 130 |
| Abbildung 12-15 FEM Hinterbau: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion.....               | 130 |
| Abbildung 12-16 FEM Hinterbau: Bedingungen.....   | 131 |
| Abbildung 12-17 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion .....     | 132 |
| Abbildung 12-18 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der Verbindungsmuffen .....         | 133 |
| Abbildung 12-19 FEM Hinterbau: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion.....               | 133 |
| Abbildung 12-20 FEM Hinterbau: Bedingungen.....   | 134 |
| Abbildung 12-21 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion .....     | 135 |
| Abbildung 12-22 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] des Heckbereichs.....               | 136 |
| Abbildung 12-23 FEM Hinterbau: Spannung von Mises [MPa] der gesamten Konstruktion .....     | 136 |
| Abbildung 12-24 FEM Hinterbau: Verformung [mm] der gesamten Konstruktion.....               | 137 |
| Abbildung 12-25 FEM Hintere Radaufhängung: Bedingungen .....                                | 138 |
| Abbildung 12-26 FEM Hintere Radaufhängung: Spannung von Mises [MPa].....                    | 139 |
| Abbildung 12-27 FEM Hintere Radaufhängung: Verformung [mm] .....                            | 139 |
| Abbildung 12-28 FEM Hintere Radaufhängung: Bedingungen .....                                | 140 |
| Abbildung 12-29 FEM Hintere Radaufhängung: Spannung von Mises [MPa].....                    | 141 |
| Abbildung 12-30 FEM Hintere Radaufhängung: Verformung [mm] .....                            | 142 |
| Abbildung 13-1 Aufbau 3D Lasersinterdrucker .....   | 143 |
| Abbildung 13-2 Bauplatte 3D Lasersinterteile .....  | 144 |
| Abbildung 13-3 händisches Entfernen des Supportmaterials.....                               | 144 |



---

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 13-4 3D Lasersintermuffe mit Support Material.....       | 144 |
| Abbildung 13-5 Versteifungsblech A-Säule Vorderradaufhängung ..... | 145 |
| Abbildung 13-6 Hinterradaufhängung .....                           | 145 |
| Abbildung 13-7 Versteifungsblech Lenkgetriebe .....                | 145 |
| Abbildung 13-8 Kofferraumbleche .....                              | 146 |
| Abbildung 13-9 Sitzblech .....                                     | 146 |
| Abbildung 13-10 Armaturenbrett .....                               | 146 |
| Abbildung 13-11 Hinterbauboden mit Versteifungen.....              | 146 |
| Abbildung 13-12 Hinterbauversteifung.....                          | 146 |
| Abbildung 13-13 Hintere Radnabe .....                              | 147 |
| Abbildung 13-14 Hinterer Lagersitz.....                            | 147 |
| Abbildung 13-15 Hintere Bremssattelaufnahme .....                  | 147 |
| Abbildung 13-16 Gefertigte Radnabe.....                            | 148 |
| Abbildung 13-17 Renderbild vordere Radnabe .....                   | 148 |
| Abbildung 13-18 Gespanntes Rohmaterial .....                       | 148 |
| Abbildung 13-19 Lenklagerhalterung .....                           | 149 |
| Abbildung 13-20 Lenkstangenende.....                               | 149 |
| Abbildung 13-21 A-Säule .....                                      | 149 |
| Abbildung 14-1 Finales Renderbild .....                            | 151 |
| Abbildung 16-1 Einrichteblatt Radnabe Vorderachse.....             | III |
| Abbildung 16-2 Einrichteblatt Radnabe Hinterachse.....             | IV  |
| Abbildung 16-3 Einrichteblatt Lagersitz Hinterachse.....           | V   |
| Abbildung 16-4 Einrichteblatt Lenkstangenende .....                | VI  |
| Abbildung 16-5 Einrichteblatt Bremssattelaufnahme.....             | VII |
| Abbildung 16-6 Aufgabenverteilung .....                            | I   |
| Abbildung 16-7 Gantt Diagramm .....                                | II  |
| Abbildung 16-8 Luftwiderstandskraft cw Wert-Elementgröße.....      | III |
| Abbildung 16-9 Netzqualität-Elementgröße .....                     | III |
| Abbildung 16-10 Netzelemente .....                                 | III |
| Abbildung 16-11 Isoansicht finales Design.....                     | IV  |
| Abbildung 16-12 Widerstandskraft-cw Wert Erstentwurf .....         | IV  |
| Abbildung 16-13 Isoansicht Aerodynamik Erstentwurf .....           | IV  |
| Abbildung 16-14 Widerstandskraft-cw Wert finales Design .....      | IV  |



## 15.4 Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 0-1 Literaturabkürzungen .....  | Q  |
| Tabelle 0-2 Allgemeine Abkürzungen.....   | Q  |
| Tabelle 3-1 Aufgabenpacket Design .....   | 6  |
| Tabelle 3-2 Aufgabenpacket Konzeptionierung .....                               | 6  |
| Tabelle 3-3 Aufgabenpacket Umsetzung.....                                       | 7  |
| Tabelle 3-4 Aufgabenpacket Wasserstoffantrieb.....                              | 7  |
| Tabelle 3-5 Projektfinanzierung Ausgaben .....                                  | 9  |
| Tabelle 3-6 Projektfinanzierung Einnahmen .....                                 | 9  |
| Tabelle 5-1 Netzanalyse Ergebnisse .....  | 26 |
| Tabelle 5-2 Ergebnis stationäre Lösung Erstentwurf .....                        | 28 |
| Tabelle 5-3 stationäre Lösung Ergebnisse überarbeitetes Konzept.....            | 33 |
| Tabelle 6-1 Schema der Punktevergabe.....                                       | 47 |
| Tabelle 6-2 Bewertungstabelle Leiter-/Kasten-/Zentralrohr-/Plattformrahmen..... | 47 |
| Tabelle 6-3 Bewertungstabelle Gitterrohrrahmen.....                             | 47 |
| Tabelle 6-4 Bewertungstabelle Space Frame .....                                 | 47 |
| Tabelle 6-5 Bewertungstabelle Monocoque .....                                   | 47 |
| Tabelle 7-1 Schema der Punktevergabe.....                                       | 53 |
| Tabelle 7-2 Bewertungstabelle Holzplatten.....                                  | 53 |
| Tabelle 7-3 Bewertungstabelle Metallblech .....                                 | 53 |
| Tabelle 7-4 Bewertungstabelle Wabenplattenmaterial.....                         | 54 |
| Tabelle 8-1 Konzept Gitterrohrrahmen.....                                       | 68 |
| Tabelle 8-2 Konzept Gitterrahmen aus Blechteilen .....                          | 68 |
| Tabelle 8-3 Blechtrog mit Blech-C-Säule .....                                   | 68 |
| Tabelle 8-4 Konzept Gitterrohrrahmen: Geometrie 1.....                          | 71 |
| Tabelle 8-5 Konzept Gitterrohrrahmen: Geometrie 2.....                          | 71 |
| Tabelle 10-1 Konzept Doppelquerlenker Aufhängung .....                          | 98 |
| Tabelle 10-2 Konzept starre Aufhängung.....                                     | 98 |
| Tabelle 16-1 Planung CNC Fertigung .....  | V  |



## 16 Anhang

### 16.1 Teambesprechungen Gesamtes Team

#### Erste Teambesprechung

- **Datum:** 09. Juni 2021
- **Teilnehmer:** Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas, Hohla Dominik, Ploy Alexander, Sommer Paul
- **Thema:** Teambesprechung über die aktuelle Lage des Scorpions, Strukturierung und Einteilung der Teammitglieder und Erstellen eines Zeitplans

#### Designideen

- **Datum:** 07. Juli 2021
- **Teilnehmer:** Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas, Hohla Dominik, Ploy Alexander, Sommer Paul
- **Thema:** Evaluierung der verschiedenen Designkonzepte und Vorschläge für mögliche Kompromisse

#### Update über die Sommerferien

- **Datum:** 15. September 2021
- **Teilnehmer:** Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas, Hohla Dominik, Ploy Alexander, Sommer Paul
- **Thema:** Besprechen des finalen Designs und der ersten Chassiskonzepte bzw. Chassisstrukturen

#### Konstruktion

- **Datum:** 17. November 2021
- **Teilnehmer:** Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas, Hohla Dominik, Ploy Alexander, Sommer Paul
- **Thema:** Besprechen der detaillierten Konstruktion, verschiedene Verbindmöglichkeiten und Fertigung der Komponenten

#### Fertigungszeichnungen

- **Datum:** 24. November 2021
- **Teilnehmer:** Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas, Ploy Alexander, Sommer Paul
- **Thema:** Besprechen und Überarbeiten der Fertigungszeichnungen für die CNC-Teile

#### Konstruktion & Fertigung

- **Datum:** 26. Jänner 2022
- **Teilnehmer:** Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas, Hohla Dominik, Ploy Alexander, Sommer Paul
- **Thema:** Besprechen der finalen Konstruktion, Update zur Fertigung der Komponenten

#### Diplomarbeit

- **Datum:** 15. März 2022
- **Teilnehmer:** Dipl.-Ing. Weichenberger Thomas, Hohla Dominik, Ploy Alexander, Sommer Paul
- **Thema:** Vorstellen der Diplomarbeit, Besprechen der Einteilung und Formatierung



## 16.2 Teambesprechungen Dominik Hohla

### Erste Beurteilung des Aerodynamikkonzeptes

- **Datum:** 15. September 2021
- **Teilnehmer:** Prof. Dipl.-Ing. Dr. Harald Passrucker, Hohla Dominik
- **Thema:** Beurteilung des finalen Designs aus Aerodynamiksicht; Festlegung Diplomarbeitsthemen für Hohla Dominik; Besprechung von Teammanagement und Aufgabenplanungstools

### Besprechung der Software Ansys

- **Datum:** 28. September 2021
- **Teilnehmer:** Prof. Dipl.-Ing. Dr. Harald Passrucker, Hohla Dominik
- **Thema:** Durchbesprechung der Software Ansys Workbench; Übergabe von Installationsdateien und Begleitmaterial

### Besprechung Testsimulationen

- **Datum:** 13. Oktober 2021
- **Teilnehmer:** Prof. Dipl.-Ing. Dr. Harald Passrucker, Hohla Dominik
- **Thema:** Besprechung von ersten Testsimulationen und weitere Einführung in Ansys CFX

### Besprechung statische Lösung erstes Design

- **Datum:** 09. November 2021
- **Teilnehmer:** Prof. Dipl.-Ing. Dr. Harald Passrucker, Hohla Dominik
- **Thema:** Besprechung der statischen Lösung sowie Ausarbeitung von möglichen Verbesserungen

### Besprechung statische Lösung finales Design

- **Datum:** 14. Dezember 2021
- **Teilnehmer:** Prof. Dipl.-Ing. Dr. Harald Passrucker, Hohla Dominik
- **Thema:** Besprechung der statischen Lösung des finalen Designs; Bewertung der Verbesserungen

### Besprechung Instationäre Lösung

- **Datum:** 12. Januar 2022
- **Teilnehmer:** Prof. Dipl.-Ing. Dr. Harald Passrucker, Hohla Dominik
- **Thema:** Besprechung der instationären Lösung des finalen Designs

### Validierung der Ergebnisse

- **Datum:** 25. Januar 2022
- **Teilnehmer:** Prof. Dipl.-Ing. Dr. Harald Passrucker, Hohla Dominik
- **Thema:** Durchführung und Bewertung von Windkanalversuchen

### Diplomarbeit

- **Datum:** 15. März 2022
- **Teilnehmer:** Prof. Dipl.-Ing. Dr. Harald Passrucker, Hohla Dominik
- **Thema:** Vorstellen der Diplomarbeit, Besprechen der Einteilung und Formatierung



## 16.3 Einrichteblätter

### 16.3.1 Einrichteblatt Radnabe

#### Werkstückdaten:

**Benennung:** Radnabe Vorderachse

Stückzahl: 2

Werkstoff: Al 7075

Rohmaße: Ø150x50

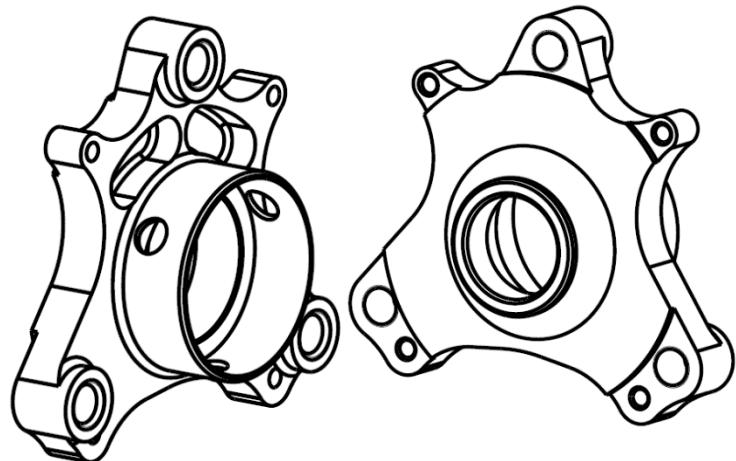
Maschine: DMU50

NC-Steuerung: Heidenhain

Einspannung: 3-Backenfutter

Werkstücknullpunkt: Mitte Teil

Vorderachse



#### Fertigungsbeschreibung:

##### **Vorderseite 1. Aufspannung**

|                                      |                |        |       |
|--------------------------------------|----------------|--------|-------|
| 1. Vorbohren                         | Spibo_20       | S 1100 | F 100 |
| 2. Außen- und Innenkontur Schruppen  | SF_16_SCHRUPP  | S 1400 | F 300 |
| 3. Außen- und Innenkontur Schlichten | TOR_12_1.5_VHM | S 6000 | F 800 |
| 4. Taschen Fräsen                    | TOR_6_1_VHM    | S 8000 | F 800 |
| 5. Bohrungen zentrieren              | ANBOHR_10_90°  | S 2000 | F 350 |
| 6. Fase für Radzentrierung           | ANBOHR_10_90°  | S 2000 | F 350 |
| 7. Kernloch M12 Bohren               | SPIBO_10,2     | S 2000 | F 200 |
| 8. M 12 senken                       | SENKER_14_90°  | S 600  | F 60  |
| 9. Kernloch M6 Bohren                | SPIBO_4,8      | S 4500 | F 300 |
| 10. M12 Gewinde Bohren               | GEWB_M12X1.75  | S 300  |       |
| 11. M6 Gewinde Bohren                | G EWB_M6X1     | S 300  |       |

Abbildung 16-1 Einrichteblatt Radnabe Vorderachse

##### **Rückseite 2. Aufspannung**

|                                       |                 |        |       |
|---------------------------------------|-----------------|--------|-------|
| 1. Außenkontur Schruppen              | SF_16_SCHRUPP   | S 1400 | F 300 |
| 2. Außenkontur Schlichten             | TOR_12_1.5_VHM  | S 6000 | F 800 |
| 3. Absatz für Bremsscheibe Schlichten | SF_16_SCHLICHT  | S 1600 | F 270 |
| 4. Fasen 1 x45°                       | FASE_VHM_10_90° | S 2000 | F 400 |

### 16.3.2 Einrichteblatt Radnabe Hinterachse

#### Werkstückdaten:

**Benennung:** Radnabe Hinterachse

Stückzahl: 2

Werkstoff: Al 7075

Rohmaße: ø150x83

Maschine: DMU50

NC-Steuerung: Heidenhain

Einspannung: 3-Backenfutter

Werkstücknullpunkt: Mitte Teil

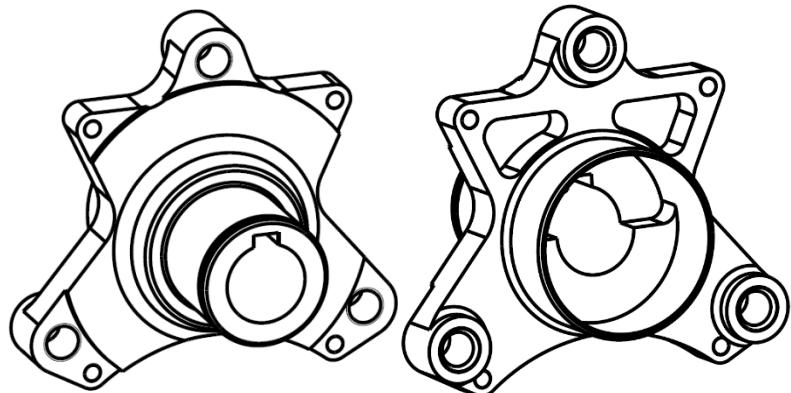


Abbildung 16-2 Einrichteblatt Radnabe Hinterachse

#### Fertigungsbeschreibung:

#### **Vorderseite 1. Aufspannung**

|                                      |                |        |       |
|--------------------------------------|----------------|--------|-------|
| 1. Vorbohren                         | Spibo_20       | S 1100 | F 100 |
| 2. Außen- und Innenkontur Schruppen  | SF_16_SCHRUPP  | S 1400 | F 300 |
| 3. Außen- und Innenkontur Schlichten | TOR_12_1.5_VHM | S 6000 | F 800 |
| 4. Taschen Fräsen                    | TOR_6_1_VHM    | S 8000 | F 800 |
| 5. Bohrungen zentrieren              | ANBOHR_10_90°  | S 2000 | F 350 |
| 6. Fase für Radzentrierung           | ANBOHR_10_90°  | S 2000 | F 350 |
| 7. Kernloch M12 Bohren               | SPIBO_10,2     | S 2000 | F 200 |
| 8. M 12 senken                       | SENKER_14_90°  | S 600  | F 60  |
| 9. Kernloch M6 Bohren                | SPIBO_4,8      | S 4500 | F 300 |
| 10. M12 Gewinde Bohren               | GEWB_M12X1.75  | S 300  |       |
| 11. M6 Gewinde Bohren                | G EWB_M6X1     | S 300  |       |

#### **Rückseite 2. Aufspannung**

|                                       |                 |        |       |
|---------------------------------------|-----------------|--------|-------|
| 1. Außenkontur Schruppen              | SF_16_SCHRUPP   | S 1400 | F 300 |
| 2. Außenkontur Schlichten             | TOR_12_1.5_VHM  | S 6000 | F 800 |
| 3. Absatz für Bremsscheibe Schlichten | SF_16_SCHLICHT  | S 1600 | F 270 |
| 4. Lagersitz Schlichten               | SF_16_SCHLICHT  | S 1600 | F 270 |
| 5. Nut für Sicherungsring Fräsen      | SÄGEBL_32x1     | S 2000 | F 200 |
| 6. Fasen 1 x45°                       | FASE_VHM_10_90° | S 2000 | F 400 |



### 16.3.3 Einrichteblatt Lagersitz Hinterachse

#### Werkstückdaten:

##### **Benennung: Lagersitz Hinterachse**

Stückzahl: 2

Werkstoff: Al 7075

Rohmaße: Ø150x50

Maschine: DMU50

NC-Steuerung: Heidenhain

Einspannung: 3-Backenfutter

Werkstücknullpunkt: Mitte Teil

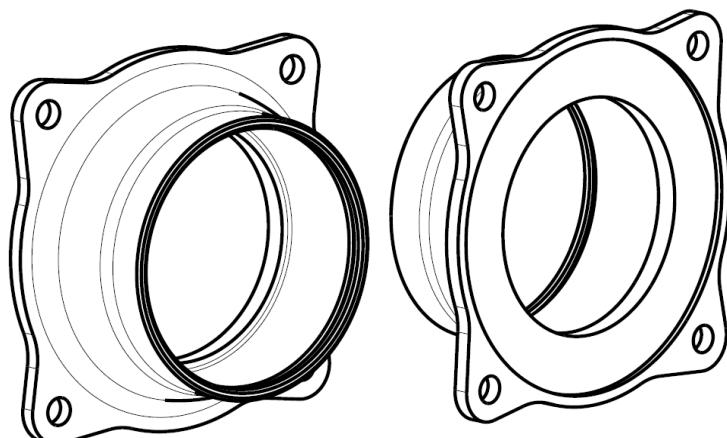


Abbildung 16-3 Einrichteblatt Lagersitz Hinterachse

#### Fertigungsbeschreibung:

##### **Vorderseite 1. Aufspannung**

|                                       |                |              |
|---------------------------------------|----------------|--------------|
| 12. Vorbohren                         | Spibo_20       | S 1100 F 100 |
| 13. Außen- und Innenkontur schruppen  | SF_16_SCHRUPP  | S 1400 F 300 |
| 14. Außen- und Innenkontur schlichten | SF_16_SCHLICHT | S 1600 F 270 |
| 15. Bohrungen zentrieren              | ANBOHR_10_90°  | S 2000 F 300 |
| 16. Fasen fräsen                      | ANBOHR_10_90°  | S 2000 F 300 |
| 17. Bohrungen Bohren                  | SPIBO_8,5      | S 2700 F 250 |
| 18. Nut für Sicherungsring fräsen     | SÄGEBL_32x1    | S 2000 F 200 |

##### **Rückseite 2. Aufspannung**

|                                     |                |              |
|-------------------------------------|----------------|--------------|
| 7. Außenkontur schruppen            | SF_16_SCHRUPP  | S 1400 F 300 |
| 8. Außenkontur schlichten           | SF_16_SCHLICHT | S 1600 F 270 |
| (-0,2mm Übermaß!)                   |                |              |
| 9. Zentrierung für Motor schlichten | SF_16_SCHLICHT | S 1600 F 270 |



#### 16.3.4 Einrichteblatt Lenkstangenende

##### Werkstückdaten:

##### **Benennung: Lenkstangenende**

Stückzahl: 1

Werkstoff: Al 7075

Rohmaße: Ø25x135

Maschine: Siemens Spinner

NC-Steuerung: Siemens Sinumerik

Einspannung: 3-Backenfutter

Werkstücknullpunkt:

Referenzfläche

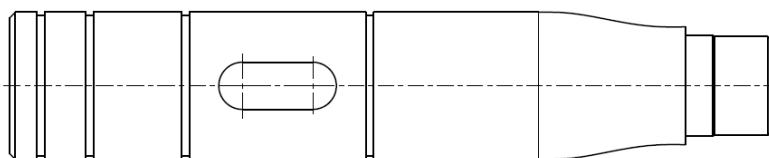
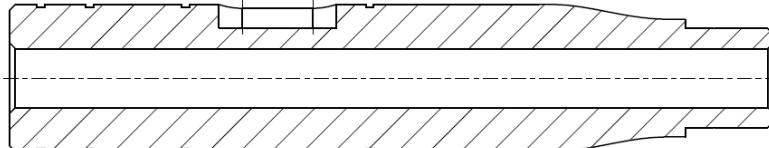


Abbildung 16-4 Einrichteblatt Lenkstangenende

##### Fertigungsbeschreibung:

##### **Aufspannung im 3-Backenfutter**

|     |                                  |                 |        |        |
|-----|----------------------------------|-----------------|--------|--------|
| 19. | Planen Referenzfläche            | Schlichter      | S 2000 | F 0,05 |
| 20. | Schruppen Außenkontur            | Schrupper       | S 2000 | F 0,2  |
| 21. | Schlichten Außenkontur & Passung | Schlichter      | S 2500 | F 0,04 |
| 22. | Einstiche Sicherungsringe        | Einstichstahl   | S 1800 | F 0,05 |
| 23. | Fräsen Passfeder                 | Schaftfräser Ø8 | S 3500 | F 350  |
| 24. | Bohren                           | Spibo_10        | S 2000 | 0,1    |
| 25. | Fase 1x45°                       | Schlichter      | S 2500 | F 0,05 |



## 16.3.5 Einrichteblatt

### Werkstückdaten:

#### **Benennung: Bremssattelaufnahme hinten**

Stückzahl: 2

Werkstoff: Al 7075

Rohmaße: 70x35x120

Maschine: DMU50

NC-Steuerung: Heidenhain

Einspannung: NC-Spanner

Werkstücknullpunkt: Mittig, vordere

Oberkante

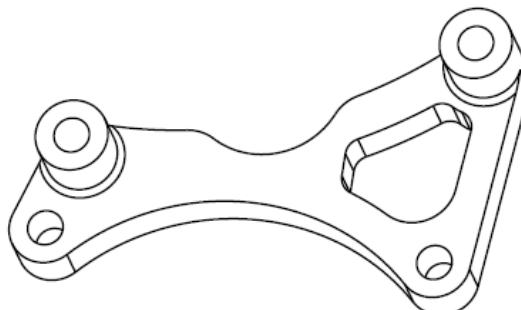


Abbildung 16-5 Einrichteblatt Bremssattelaufnahme

### Fertigungsbeschreibung:

#### **Vorderseite 1. Aufspannung**

|     |                        |                |        |        |
|-----|------------------------|----------------|--------|--------|
| 26. | Außenkontur schrappen  | SF_16_SCHRUPP  | S 1400 | F 300  |
| 27. | Außenkontur schlichten | TOR_12_1.5_VHM | S 6000 | F 1000 |
| 28. | Tasche schrappen       | SF_8_SCHRUPP   | S 2700 | F 400  |
| 29. | Tasche schlichten      | SF_8_SCHLICHT  | S 3000 | F 350  |
| 30. | Bohrungen zentrieren   | ANBOHR_10_90°  | S 2000 | F 300  |
| 31. | Bohrungen bohren       | SPIBO_8,3      | S 2700 | F 250  |

#### **Rückseite 2. Aufspannung**

|     |                             |           |         |       |
|-----|-----------------------------|-----------|---------|-------|
| 10. | Planfräsen                  | MK_63_ECK | S 1200  | F 400 |
| 11. | Zylindrische Senkung fräsen | SF_8_VHM  | S 10000 | F 600 |

## 16.4 Aufgabenverteilung

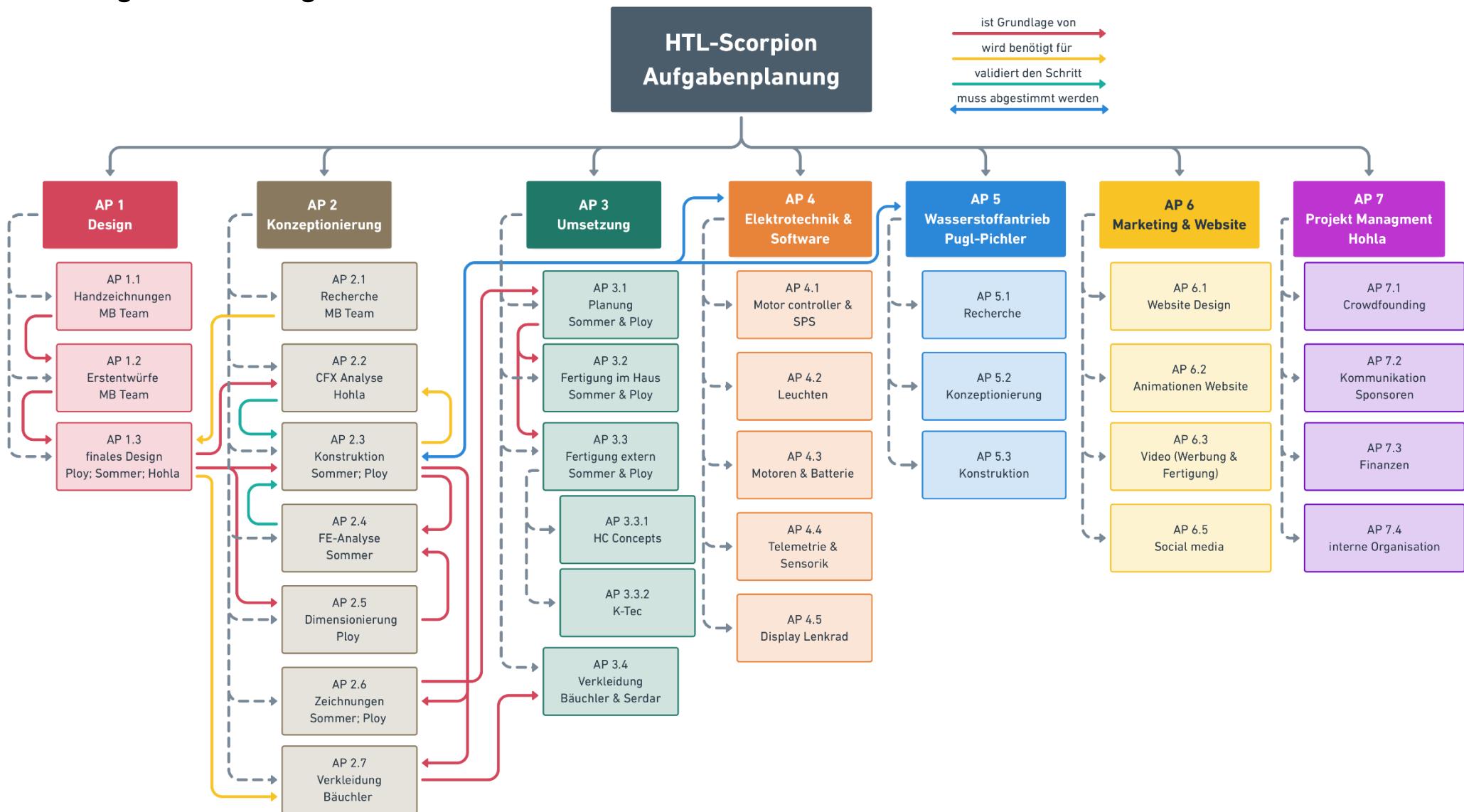


Abbildung 16-6 Aufgabenverteilung

## 16.5 Gantt Diagramm

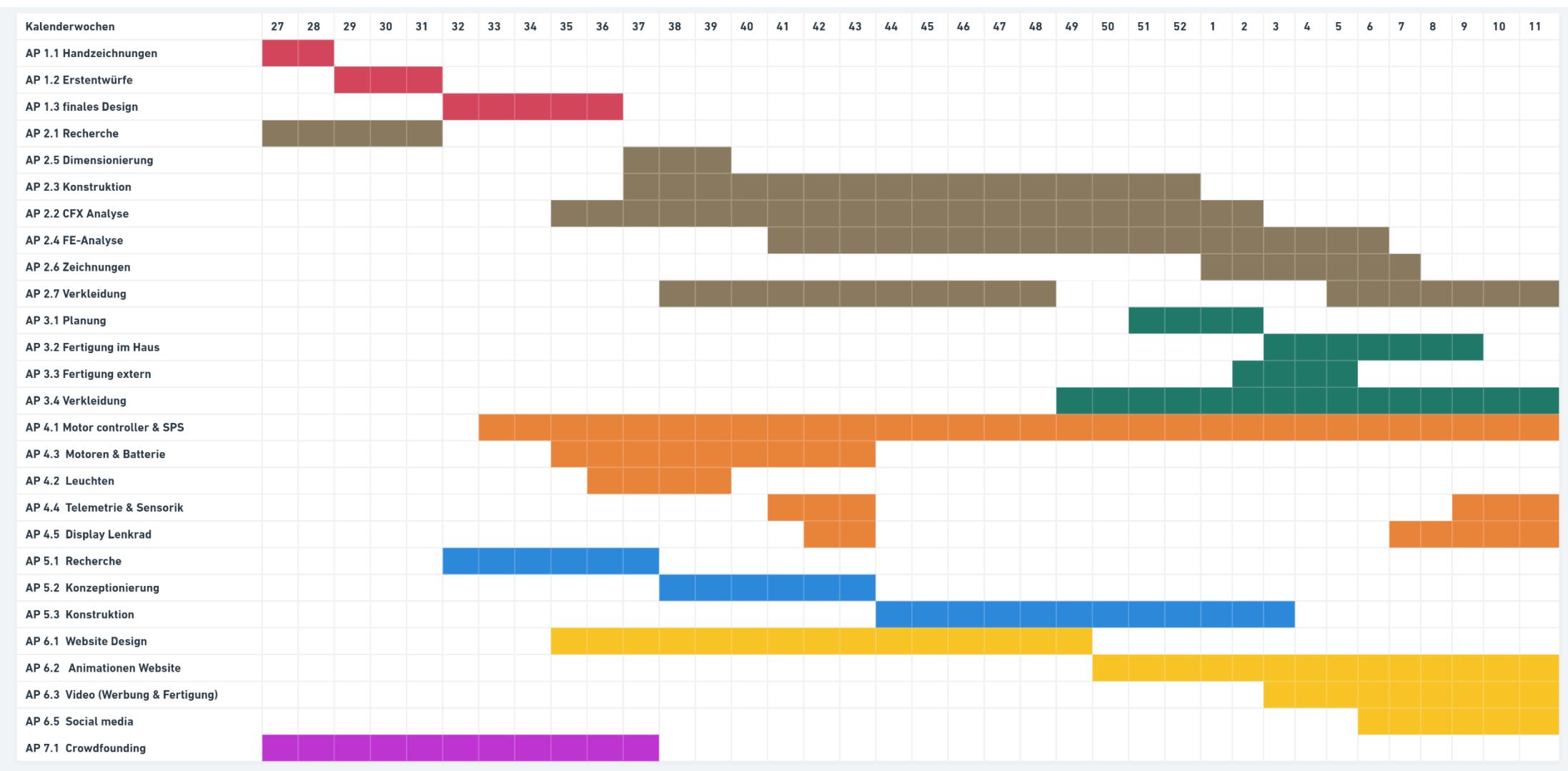


Abbildung 16-7 Gantt Diagramm

## 16.6 Aerodynamik Ergänzungen

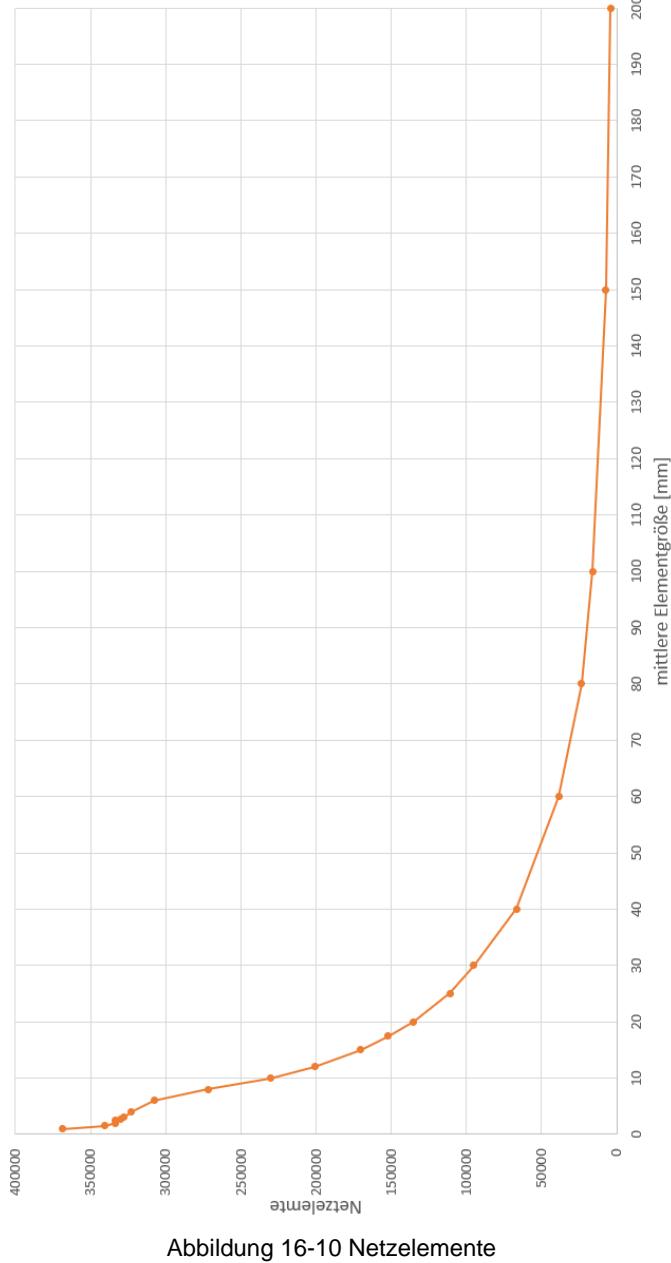


Abbildung 16-10 Netzelemente

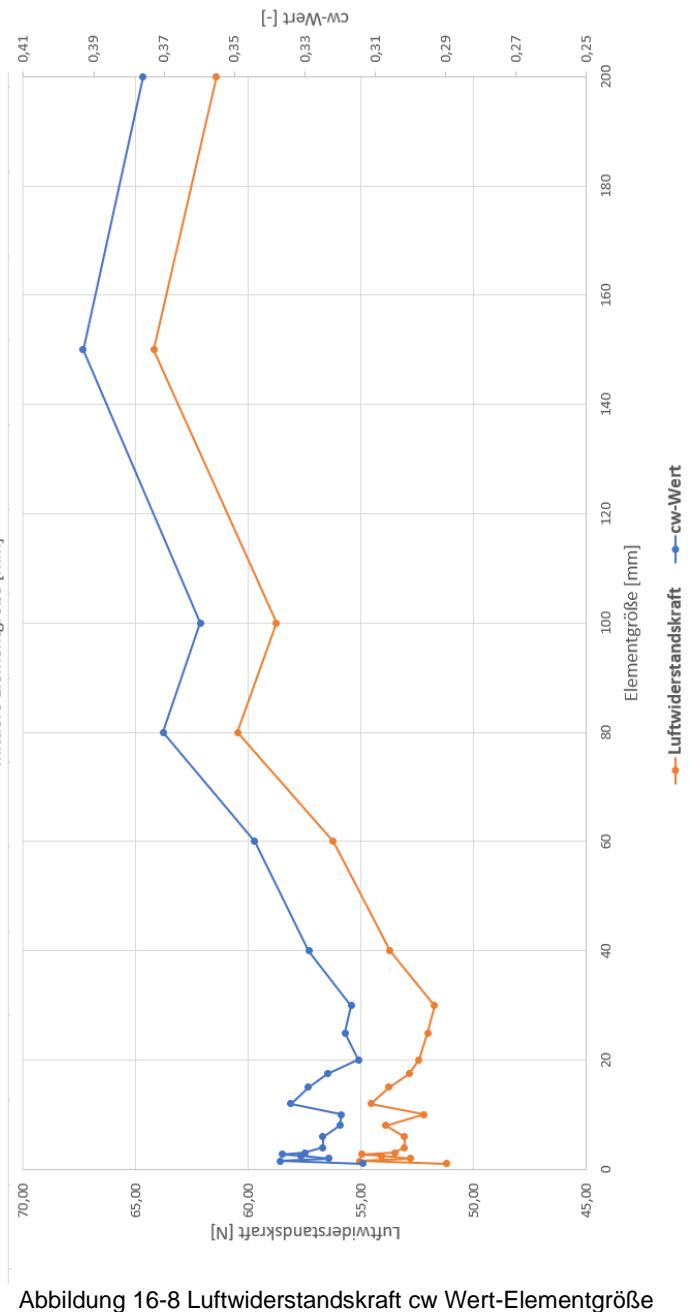


Abbildung 16-8 Luftwiderstandskraft cw Wert-Elementgröße

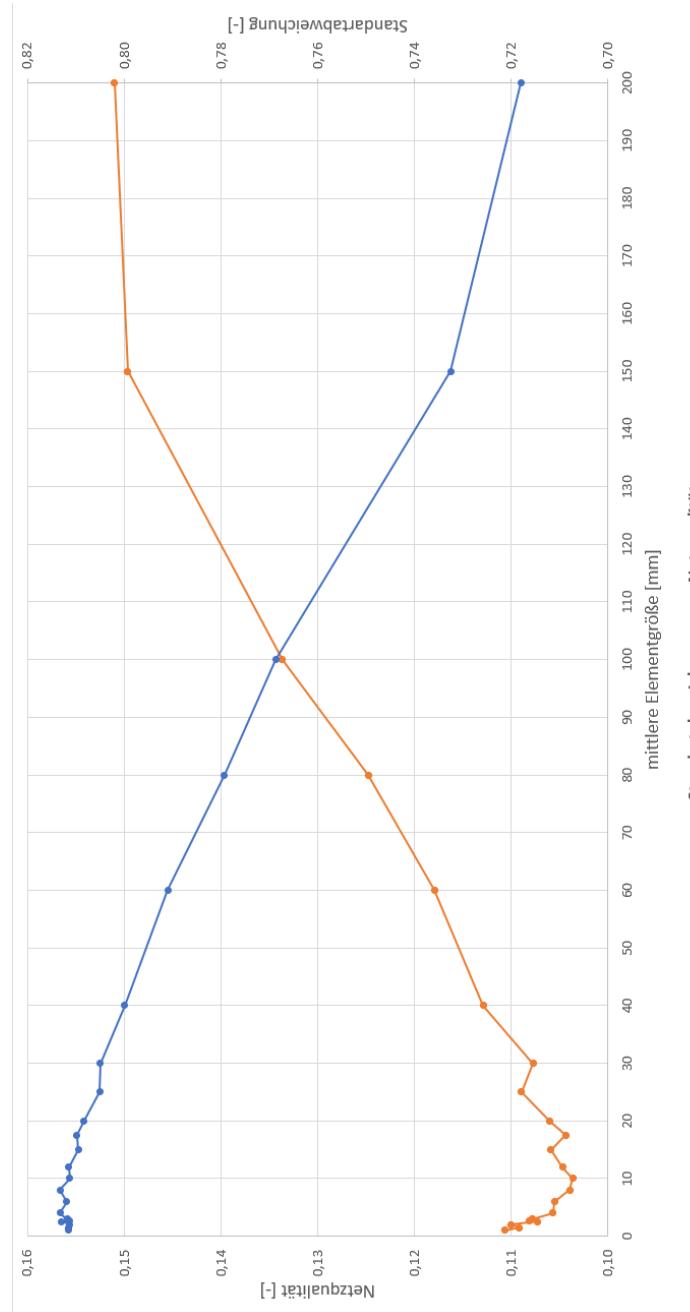


Abbildung 16-9 Netzqualität-Elementgröße

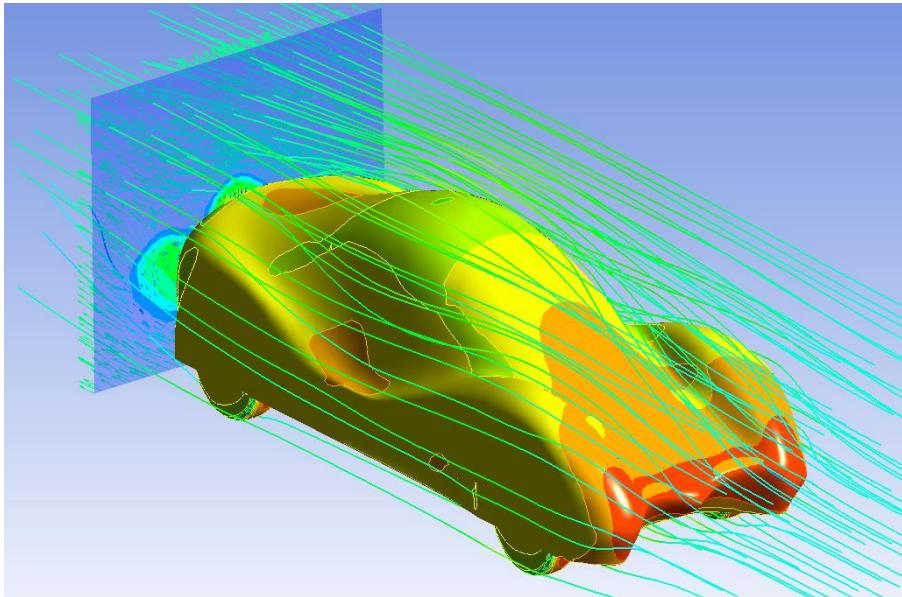


Abbildung 16-13 Isoansicht Aerodynamik Erstentwurf

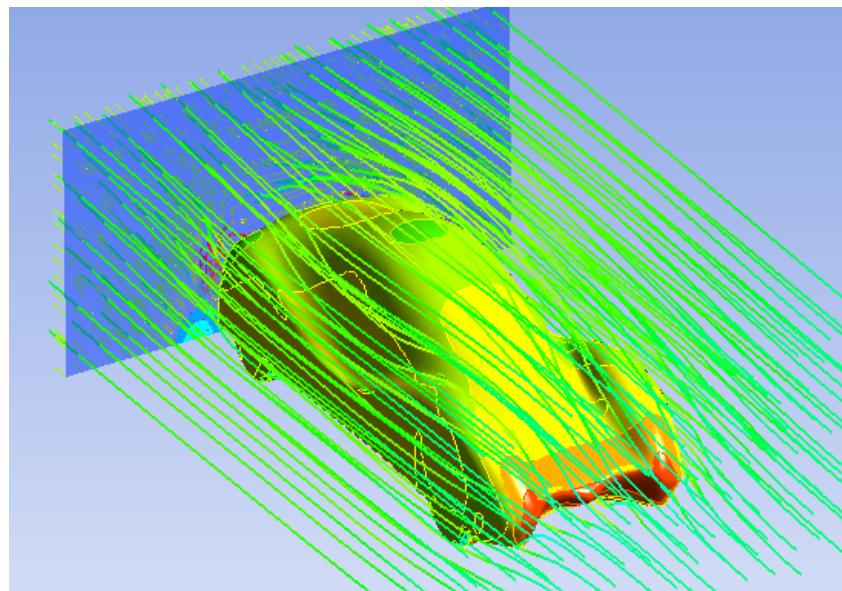
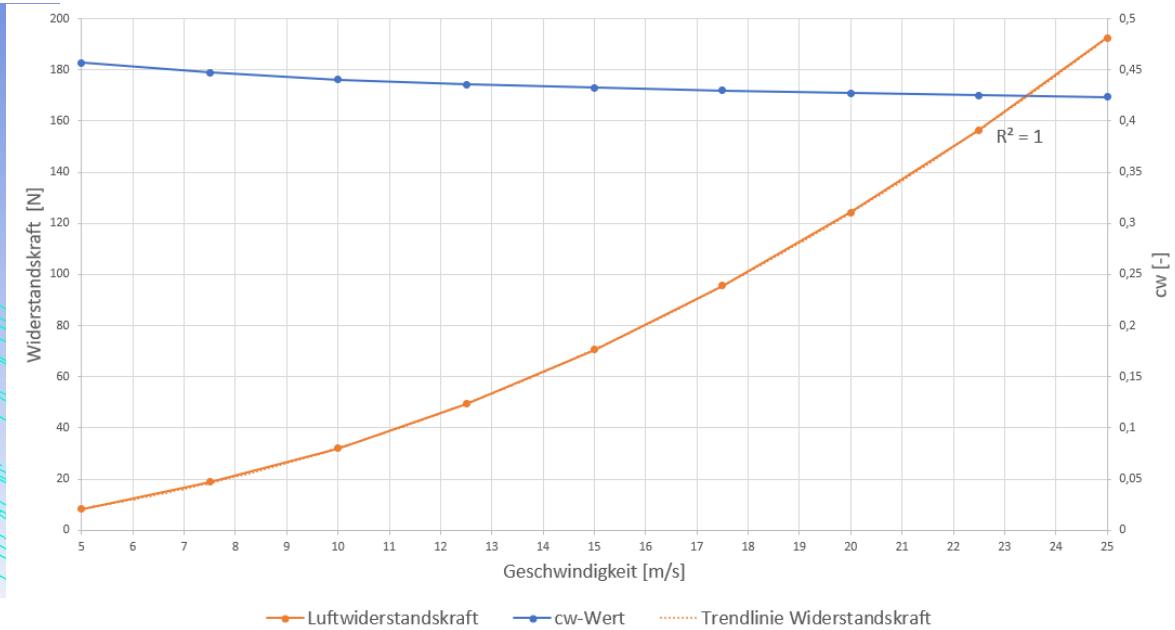


Abbildung 16-11 Isoansicht finales Design

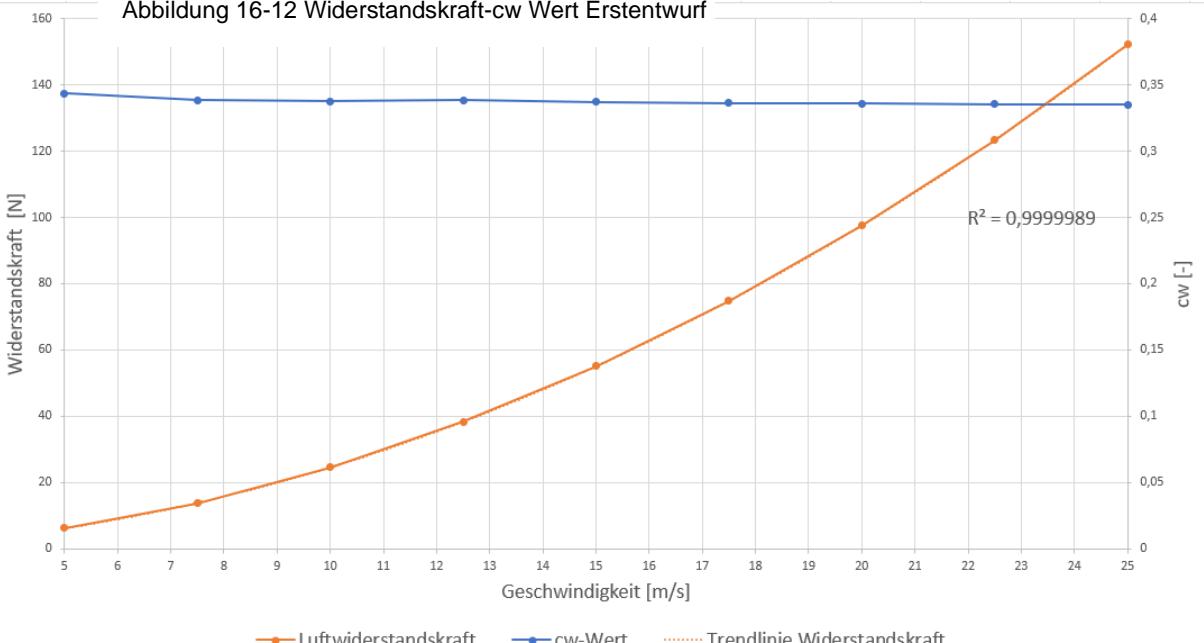


Abbildung 16-14 Widerstandskraft-cw Wert finales Design

## 16.7 Fertigungszeichnungen

### 16.7.1 Planungstabelle CNC Fertigung

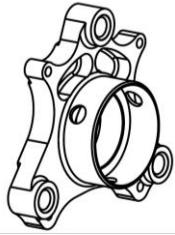
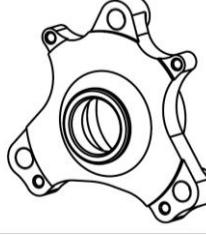
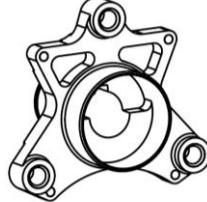
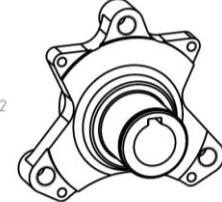
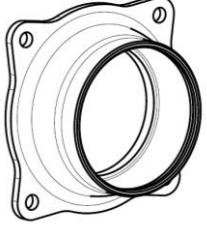
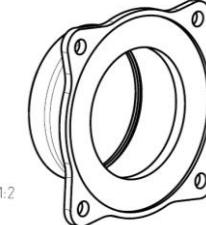
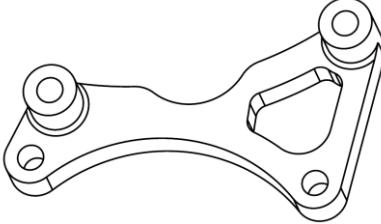
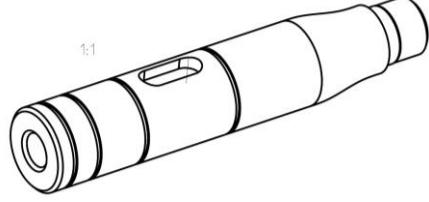
| Planung CNC Fertigung        |       |                   |           |          |  |         |                |
|------------------------------|-------|-------------------|-----------|----------|--|---------|----------------|
| Benennung                    | Stück | Fertigungsvorgang | Rohmaße   | Material | Abbildung  | geprüft | Fertig. abgsl. |
| Radnabe<br>Vorderachse       | 2     | CNC Frä-/Drehteil | ø150x50   | Al 7075  |      | X       | X X            |
| Radnabe<br>Hinterachse       | 2     | CNC Frä-/Drehteil | ø150x83   | Al 7075  |     | X       | X X            |
| Lagersitz<br>Hinterachse     | 2     | CNC Drehteil      | ø150x50   | Al 7075  |   | X       | X X            |
| Bremsaufnahme<br>Hinterachse | 2     | CNC Frästeil      | 120x70x35 | Al 7075  |    | X       | X X            |
| Lenkstangenende              | 1     | CNC Drehteil      | ø25x135   | Al 7075  |    | X       | X X            |
| Lenklagerhalterung           | 1     | CNC Frä-/Drehteil | ø50x25    | Al 7075  |    | X       | X X            |

Tabelle 16-1 Planung CNC Fertigung

## 16.7.2 Radnabe Vorderachse

### **16.7.3 Radnabe Hinterachse**

## **16.7.4Bremssattelaufnahme Hinterachse**

## **16.7.5 Lagersitz Hinterachse**

## 16.7.6 Lenkstangenende

## **16.7.7 Lenklagerhalterung**

## 16.7.8 Lenkhebel links

## 16.7.9 Lenkhebel rechts

**16.7.10      Bremssattelaufnahme links**

## 16.7.11 Bremssattelaufnahme rechts

## 16.7.12 Aufhängungsblech Vorderachse

## 16.7.13 Aufhängungsblech Hinterachse

**16.7.14 Pedalerieaufnahmblech**

16.7.15 Bodenblech

## 16.7.16 Zusammenstellung Aufhängung