



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Ali El Cheikh

### **Entwicklung eines modularen Testrahmens für Anbauteile mittels FEM Catia V5**



**Ali El Cheikh**

**Entwicklung eines modularen  
Testrahmens für Anbauteil  
mittels FEM Catia V5**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelor-/Masterprüfung

im Studiengang Fahrzeugtechnik  
am Department Fahrzeugbautechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Jessica Finke  
Zweitprüfer/in: Prof. Dr. Sven Füsler

Abgabedatum: 15.07.22

# Kurzreferat

Ali El Cheikh

## Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines modularen Testrahmens für Anbauteile (Standardtüren) mittels Catia V5

## Stichworte

Ersatzrahmen, Struktur, Anbauteile, Normtüren, Spannungen, Auslegungsmethoden, Optimierung, Fahrwerkstests, Türtests, VDI 2221, CAD-Geometrie, Randbedingungen, FEM-Analyse, Torsionssteifigkeit, FKM-Richtlinien

## Kurzzusammenfassung

In einer sich entwickelnden Automobilindustrie werden immer noch physikalische Tests für die Erprobung des Fahrzeugrahmens und der Anbauteile, insbesondere der Türen, benötigt. In dieser Arbeit wurde ein Ersatzrahmen entwickelt, der die Prüfung von Rahmen und Anbauteilen ermöglicht. Die Ersatzstruktur wurde nach der Bestimmung der geometrischen Anforderungen, die für die Montage von Standardtüren erforderlich sind, mit dem Ziel entworfen, eine Torsionssteifigkeit zu erreichen, die die eines Stadtautos und einer Limousine simuliert. Das erstellte Konzept wurde im Rahmen einer Ideen-Werkstatt nach VDI 2221 generiert. Auf der Grundlage dieses Konzepts wurde ein CAD-Modell entwickelt und mit CATIA V5 getestet. Anschließend wurde ein Optimierungsprozess am Modell durchgeführt, um sicherzustellen, dass es die Steifigkeitsanforderungen erfüllt und eine Dauerfestigkeit aufweist, die durch eine Dauerfestigkeitsanalyse gemäß den FKM-Richtlinien nachgewiesen wurde. Schließlich wurden einige spezifische fertigungstechnische Aspekte behandelt.

Ali El Cheikh

## Title of the paper

Development of a modular test frame for add-on parts (standard doors) using Catia V5

## Keywords

Substitute frame, structure, add-on parts, standard doors, stresses, design methods, optimization, chassis tests, door tests, VDI 2221, CAD geometry, boundary conditions, FEM analysis, torsional stiffness, FKM guidelines

## Abstract

In an evolving automotive industry, physical tests are still needed for testing the chassis and add-on parts, specifically doors. In this work, a substitute frame that enables frame and add-on parts testing was developed. The substitute structure was designed after determining the geometrical requirements needed for standard doors to be mounted with a goal in mind: achieving a ranging torsional stiffness that simulates that of a city car and a limousine. The concept created was generated by an idea workshop according to VDI 2221. Based on that concept, a CAD Model was generated and tested using CATIA V5. an optimization process is then carried out on the model to ensure it fulfills the stiffness requirements and has a fatigue strength verified by a fatigue strength analysis according to the FKM guidelines. Finally, some specific processing technical challenges were addressed.

# Danksagung

Zuallererst möchte ich Prof. Dr. Jessica Finke meine tiefste Wertschätzung für ihre unverzichtbare Rolle in dieser Arbeit ausdrücken. Frau Prof. Dr. Finke hat mich nicht nur umfassend durch diese Arbeit geführt und mir auf der Grundlage ihrer ausgezeichneten Fachkenntnisse unschätzbare Feedback gegeben, sondern sie war auch meine Mentorin. Prof. Dr. Finke gab mir Ratschläge, die mir nicht nur diese Reise erleichterten, sondern mich auch motivierten, neue Herausforderungen im Leben anzunehmen. Ihre Leidenschaft und Liebe zu dem, was sie tut, und ihre Einstellung zum Leben sind eine Inspiration für jeden, der seine Träume verfolgen möchte. Also, Frau Professor Finke, nochmals vielen Dank für die lebenslangen Erkenntnisse. Ich bin auch Dr. Sven Fuser sehr dankbar für seine wertvolle Zeit und Mühe als zweiter Prüfer.

Die Person, die vom ersten Tag an mich geglaubt hat, ist mein Vater. Mohamed, danke, dass du der Vater bist, der ich sein möchte, ein echtes Vorbild. Diese Arbeit ist dir gewidmet. Mama und Dr. Alaa El Cheikh, danke, dass ihr immer für mich da seid, mich unterstützt und mich täglich daran erinnert, dass ich es schaffen kann.

Schließlich möchte ich mich bei mir selbst dafür bedanken, dass ich an mich geglaubt habe, dass ich nie aufgegeben habe und dass ich die Mühe auf mich genommen habe.

Hamburg, im Juli 2022

Ali El Cheikh



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>9</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>14</b>
<b>2 Aufgabestellung .....</b>	<b>15</b>
<b>3 Grundlagen und Rahmenbedingungen.....</b>	<b>16</b>
3.1 Ist Situation im Fahrzeugindustrie .....	16
3.2 Fahrzeugtypen .....	18
3.3 Standard statische Karosserie Tests in die Automobil Industrie .....	19
3.3.1 Biegung durch Schwerkraftbelastung .....	19
3.3.2 Torsionstest um die Fahrzeuglängsachse .....	20
3.3.3 Pulser Tests und Prüfstände .....	21
3.3.4 FKM Nachweis .....	23
3.3.5 Anbauteilen und deren Tests.....	23
3.3.6 Bauarten .....	29
3.4 Gestaltungsrichtlinien und Verstärkungsmaßnahmen.....	32
<b>4 Testrahmen Entwicklung .....</b>	<b>35</b>
4.1 Anforderungen an das Konzeptmodell .....	35
4.2 Lösungsfindung.....	36
4.2.1 Rahmengeometrie.....	36
4.2.2 Kriterien für das Bewertungssystem .....	38
4.2.3 Bewertung der Rahmenlösungskonzepte .....	40
4.2.4 3-Punkt-Befestigung.....	42
4.2.5 Bewertung der 3-Punkt-Befestigungskonzepte.....	45
4.2.6 Skizzen und Ideensammlung .....	47
4.3 CAD .....	52
4.3.1 Modell 1 .....	55
4.3.2 Modell 2 .....	61
4.3.3 Modell 3 .....	63
4.3.4 Modell 4 .....	64
4.3.5 Modell 5 .....	66
4.3.6 Modell 6 .....	67
4.3.7 Modell 7 .....	68
4.3.8 Modell 8 .....	70
4.4 FEM Modellbildung und Analysen .....	71
4.4.1 Modell 1-FEM.....	72
4.4.2 Modell 2-FEM.....	80

---

4.4.3	Modell 3-FEM.....	82
4.4.4	Modell 4-FEM.....	84
4.4.5	Modell 5-FEM.....	86
4.4.6	Modell 6-FEM.....	88
4.4.7	Modell 7-FEM.....	90
4.4.8	Modell 8-FEM.....	92
4.5	Vergleich der Ergebnisse .....	94
4.6	FKM Nachweis .....	94
4.7	Frequenzanalyse.....	101
4.8	Fertigungstechnische Bearbeitung .....	101
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>106</b>
<b>Anhang A</b>	<b>.....</b>	<b>108</b>
<b>Anhang B</b>	<b>.....</b>	<b>115</b>
<b>Anhang C</b>	<b>.....</b>	<b>122</b>

# Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: die Zunahme der Anzahl der Audi-Produkte, Eigene Darstellung nach **[1]**
- Abbildung 2: die Zunahme der Produktkomplexität, eigene Darstellung nach **[1]**
- Abbildung 3: Reduktion der Entwicklungszeit, eigene Darstellung nach **[1]**
- Abbildung 4: virtuellen und physischen Produktentstehungsprozess, eigene Darstellung nach **[1]**
- Abbildung 5: Biegung eines Balkens, eigene Darstellung nach **[8]**
- Abbildung 6: Position und Ursprung der Gravitationslasten, eigene Darstellung nach **[2]**
- Abbildung 7: Torsion eines Balkens **[8]**
- Abbildung 8: Torsion eines Autos, eigene Darstellung nach **[2]**
- Abbildung 9: Mekka III **[10]**
- Abbildung 10: FDAP **[10]**
- Abbildung 11: Klimakammer **[10]**
- Abbildung 12: Karosserie Test **[10]**
- Abbildung 13: NVH Prüfung **[11]**
- Abbildung 14: YZ-Ansicht Türwinkel
- Abbildung 15: XZ-Ansicht Türwinkel
- Abbildung 16: YZ-Ansicht Türkrümmung
- Abbildung 17: Türgrößen
- Abbildung 18: Tür-Scharniersysteme **[16]**
- Abbildung 19: Tür-Scharniersysteme mit integrierter Türbremse **[16]**
- Abbildung 20: Türabsenkung Darstellung, eigene Darstellung nach **[18]**
- Abbildung 21: Statische Türeindrückung **[19]**
- Abbildung 22: Türüberdruckung Darstellung, eigene Darstellung nach **[18]**
- Abbildung 23: Prüfung der Rahmensteifigkeit, eigene Darstellung nach **[18]**
- Abbildung 24: Tür Oberflächentest eigene Darstellung nach **[18]**
- Abbildung 25: Dauerfestigkeitsprüfung **[19]**
- Abbildung 26: Karosseriebauarten **[20]**
- Abbildung 27: Spaceframe Bauweise **[20]**
- Abbildung 28: Schalenbauweise **[20]**
- Abbildung 29: Gitterrohrrahmen **[20]**
- Abbildung 30: Rahmenbauweise **[20]**
- Abbildung 31: Hybridbauweise **[20]**

- Abbildung 32: Fachwerk- und Vollwandbauweise **[21]**
- Abbildung 33: Belastungsmodell eines Kastenträgers mit Rippen **[21]**
- Abbildung 34: Einfluss der Krümmung auf die Durchsenkung einer Platte **[21]**
- Abbildung 35: Kasten mit Schottwände **[21]**
- Abbildung 36: Beispiele Torsionsmomente für Querschnitte **[21]**
- Abbildung 37: VW Up Maße, eigene Darstellung nach **[14]**
- Abbildung 38: 3-Punkt-Befestigungssystem Drahtgeometrie
- Abbildung 39: Positionierungssystem **[22], [23]**
- Abbildung 40: manuellen Drehmechanismus
- Abbildung 41: Punkt 1 des 3-Punkt-Befestigungssystems mögliche Lösung
- Abbildung 42: Punkt 2 des 3-Punkt-Befestigungssystems mögliche Lösung
- Abbildung 43: manueller Drehmechanismus Vorschlag 1
- Abbildung 44: manueller Drehmechanismus Vorschlag 2
- Abbildung 45: lineares Positionierungssystem
- Abbildung 46: Vorschlag für ein Rahmenkonzept mit variabler Steifigkeit durch Umgestaltung der Struktur
- Abbildung 47: Vorschlag für ein Rahmenkonzept
- Abbildung 48: Rennwagen inspiriertes Rahmenkonzept
- Abbildung 49: Rennwagen inspiriertes Rahmenkonzept mit 3-Punkt-Befestigungssystem
- Abbildung 50: Lastfall Torsion Ansicht von der Seite
- Abbildung 51: Türrahmensteifigkeitstest Ansicht von oben
- Abbildung 52: Türabsenkung Ansicht von vorne
- Abbildung 53: Lastfall Biegung Ansicht von der Seite
- Abbildung 54: Die Querschnitte der Segmente
- Abbildung 55: Gesamt CAD System
- Abbildung 56: 3-Punkt Befestigungssystem
- Abbildung 57: Punkt 1 und 2 des 3-Punkt Befestigungssystem
- Abbildung 58: Rohrverlauf
- Abbildung 59: Punkt 3 des 3-Punkt Befestigungssystem
- Abbildung 60: Punkt 1 und 2 des 3-Punkt Befestigungssystem XZ-Ansicht
- Abbildung 61: Durchschnitt von Punkt 3 des 3-Punkt-Systems
- Abbildung 62: Hebmechanismus
- Abbildung 63: Verstärkungselemente

- Abbildung 64: Modell 2-a CAD mit Verstärkungselemente, siehe auch Abb. 63
- Abbildung 65: Modell 2-b CAD ohne Verstärkungselemente
- Abbildung 66: Modell 3-a CAD mit Verstärkungselemente
- Abbildung 67: Modell 3-b CAD ohne Verstärkungselemente
- Abbildung 68: Modell 4-a CAD mit Verstärkungselemente
- Abbildung 69: Modell 4-b CAD ohne Verstärkungselemente Ansicht YZ
- Abbildung 70: Modell 4-b CAD ohne Verstärkungselemente
- Abbildung 71: Modell 5-a CAD mit Verstärkungselemente
- Abbildung 72: Modell 5-b CAD ohne Verstärkungselemente
- Abbildung 73: Modell 6-a CAD mit Verstärkungselemente
- Abbildung 74: Modell 6-b CAD ohne Verstärkungselemente
- Abbildung 75: Modell 7-a CAD Fachwerk
- Abbildung 76: Modell 7-a CAD mit Verstärkungselemente
- Abbildung 77: Modell 7-b CAD ohne Verstärkungselemente
- Abbildung 78: Modell 8-b CAD ohne Verstärkungselemente
- Abbildung 79: Modell 8-a CAD mit Verstärkungselemente
- Abbildung 80: Modell 1 Randbedingungen für Lastfall Torsion
- Abbildung 81: Modell 1-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises Spannung Lastfall Torsion
- Abbildung 82: Modell 1-a-FEM mit Verstärkungselemente Verformung Lastfall Torsion
- Abbildung 83: Modell 1 Randbedingungen für Lastfall Dachbiegung
- Abbildung 84: aus dem Dachbiegeversuch resultierende von-Mises-Spannungen
- Abbildung 85: Modell 1 Randbedingungen für Türtests
- Abbildung 86: Modell 1 Randbedingungen für Lastfall Türüberdrückung
- Abbildung 87: Modell 1-a mit Verstärkungselemente von-Mises Spannung Lastfall Türüberdrückung
- Abbildung 88: Modell 1 Randbedingungen für Lastfall Türüberdrückung
- Abbildung 89: Modell 1-a mit Verstärkungselemente von-Mises Spannung Lastfall Türabsenkung
- Abbildung 90: Modell 2-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion
- Abbildung 91: Modell 2-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion
- Abbildung 92: Modell 3-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion
- Abbildung 93: Modell 3-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 94: Modell 4-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 95: Modell 4-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 96: Modell 5-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 97:Modell 5-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 98: Modell 6-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 99: Modell 6-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 100: Modell 7-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 101:Modell 7-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 102: Modell 8-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 103: Modell 8-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Abbildung 104: Randbedingungen mit einer Beispieldarstellung

Abbildung 105: Hauptspannungen des Torsionslastfalls für FKM-Nachweis (mit Verstärkungselemente) am Modell 8-FEM

Abbildung 106: Hauptspannungen des Torsionslastfalls für FKM-Nachweis (Ohne Verstärkungselemente) am Modell 8-FEM

Abbildung 107: FKM Sicherheitsfaktor (Bereich 6)

Abbildung 108: Bereich 4 Querschnitt

Abbildung 109: Bereich 4 Querschnitt mit 2mm lokales Netz

Abbildung 110: Schweißnaht der Dreiecksecksteife und Fuß

Abbildung 111: Balken Schweißfall

Abbildung 112: Verstärkungselemente technisches Problem

Abbildung 113: Verstärkungskomponente - Vorschlag für eine technische Lösung

Abbildung 114: Verstärkungskomponente - Vorschlag für eine technische Lösung (einzelne Stange)

# Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Fahrzeugtypen und ihre Eigenschaften
- Tabelle 2: Anforderungsliste
- Tabelle 3: Funktionsstruktur für Rahmen
- Tabelle 4: Morphologische Kasten für Rahmen
- Tabelle 5: Bewertung von Ideenkombinationen
- Tabelle 6: Gesamtbeträge im Vergleich
- Tabelle 7: Funktionsstruktur für 3 Punkt Befestigung
- Tabelle 8: Morphologische Kasten für 3-Punkt Befestigung
- Tabelle 9: 3-Punkt-System Funktionsliste
- Tabelle 10: Gesamtbeträge im Vergleich
- Tabelle 11: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche Modell 1-a-FEM
- Tabelle 12: technische Merkmale von Modell 1
- Tabelle 13: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche
- Tabelle 14: technische Merkmale von Modell 2
- Tabelle 15: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche
- Tabelle 16: technische Merkmale von Modell 3
- Tabelle 17: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche
- Tabelle 18: technische Merkmale von Modell 4
- Tabelle 19: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche
- Tabelle 20: technische Merkmale von Modell 5
- Tabelle 21: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche
- Tabelle 22: technische Merkmale von Modell 6
- Tabelle 23: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche
- Tabelle 24: technische Merkmale von Modell 7
- Tabelle 25: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche
- Tabelle 26: technische Merkmale von Modell 8
- Tabelle 27: Modellvergleichstabelle
- Tabelle 28: Absolute Hauptspannungen in den 8 Bereichen
- Tabelle 29: Absolute Hauptspannungswerte (Bereich 4)
- Tabelle 30: Ergebnis der FKM-Analyse (Bereich 6)
- Tabelle 31: Absolute Hauptspannungswerte (Bereich 6)
- Tabelle 32: Ergebnis der FKM-Analyse (Bereich 6)
- Tabelle 33: Eigenfrequenzen

# 1 Einleitung

Nicht nur die Nachfrage nach Autos ist gestiegen, sondern auch der Bedarf an Vielfalt, um den wachsenden Zielgruppen gerecht zu werden. Jede Gruppe hat ihre eigenen Anforderungen an Fahrzeuggrößen und -formen. Diese Zielgruppen haben Standard-Komfortanforderungen wie minimale Vibrationen, effektives akustisches Verhalten und präzise Fahrdynamik. Die von den Verbrauchern gewünschten Eigenschaften bedeuten, dass auch die Karosserie ideale Eigenschaften aufweisen sollte.

Da der Verbrauchermarkt wächst, wird von den Herstellern verlangt, dass sie Autos schneller liefern. Als Antwort auf diese Herausforderung hat die Automobilindustrie CAX-Methoden eingeführt, die Geometrieonstruktion (CAD) und Strukturanalyse (FEM) integrieren. Der Einsatz von CAX-Methoden ist, selbst wenn sie voll ausgeschöpft werden, bis heute nicht ideal für umfassende Strukturtests [1]. Das liegt an den immer noch bestehenden Einschränkungen dieser Methode, auf die später in dieser Arbeit eingegangen wird. So sind die Hersteller an gehalten, auf physikalische Untersuchungen der Strukturen nicht zu verzichten.

Zu den üblichen Konstruktionsverfahren in der Industrie gehören frühzeitige physikalische Prüfungen der Fahrzeugstruktur und der Anbauteile nach der Montage am Rahmen. Die Tests werden auf so genannten Pulsern oder Rollenprüfständen durchgeführt, auf die später in dieser Arbeit eingegangen wird. Eine weitere Herausforderung stellen die benötigten Strukturen selbst dar.

Die benötigten Rahmen müssen schließlich in hohen Stückzahlen produziert werden, um das Fahrgestell selbst und die zahlreichen und unterschiedlichen Anbauteile einzeln zu testen. Diese Strategie erhöht den Preis des Endprodukts und senkt damit die Attraktivität des Produkts für den Verbraucher - der schlimmste Albtraum eines Herstellers.

Die Herstellung von Fahrzeugstrukturen ist aus mehreren Gründen kostspielig. Zu nennen sind die Konstruktionskosten und die hohen Investitionen für die erforderlichen Maschinen. Eine weitere Herausforderung ist der erhöhte Zeitaufwand für die Mitarbeiter, die Betriebszeiten der Maschinen und die erforderlichen Reparaturen. Hinzu kommen Einschränkungen wie die Forderung nach einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und ständige Änderungen der Vorschriften.

Infolgedessen ist das Interesse an einer alternativen Lösung hoch. Der modulare Rahmen sollte die oben genannten Probleme entgegenwirken. Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit diesem Thema. Die Arbeit nutzt methodische Verfahren, um ein Fahrzeugrahmen mit modularen Eigenschaften zu versehen, die zwei spezifischen Fahrzeugtypen ähnelt und gleichzeitig als modulare Lösung für die Prüfung der verschiedenen Standard-Autotüren dient.

## 2 Aufgabestellung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Testrahmens mit Catia-V5. Dieser Rahmen soll modulare Eigenschaften in Bezug auf die Torsionssteifigkeit haben und dient in erster Linie dazu, Anbauteile, insbesondere verschiedene Standard-Autotüren, kostengünstig zu testen.

Fahrzeugrahmen und Anbauteile werden in der Testphase unterschiedlichen Lastfällen ausgesetzt, die in dieser Arbeit ebenso ermittelt werden sollen. Dafür werden die Grundlagen der Anbauteile und deren Lastfall insbesondere der Türen erarbeitet.

Mit Hilfe der konstruktiven Parameter, oder die sogenannte Verstärkungselemente, kann die Torsionssteifigkeiten eines Kleinwagens und einer Limousine erreicht werden. Infolge der unterschiedlichen Steifigkeiten variieren auch die hochbelasteten Stellen, zu deren Bestimmung eine FEM-Analyse des Rahmens durchgeführt werden sollte.

Die modulare Charakteristik der Struktur des Fahrzeugrahmens ermöglicht auch die Durchführung eines Biegetests, dessen Werte in dem Bereich einer durchschnittlichen Pkw-Biegesteifigkeit liegen soll und mit Verstärkungselemente, auch verändert werden soll. Die Arbeit folgt einer methodischen Systematik zur Erstellung des CAD-Modells, an der eine Frequenzanalyse und eine FKM-Analyse und Nachweisführung mit Refist in Abhängigkeit von der variierenden Torsionssteifigkeit durchgeführt wird.

# 3 Grundlagen und Rahmenbedingungen

## 3.1 Ist Situation im Fahrzeugindustrie

Das Erkennen von Kundenwünschen ist für das Wachstum eines Unternehmens unerlässlich. Der Wunsch, etwas Exklusives zu besitzen, führt dazu, dass der Kunde danach strebt, sein Fahrzeug zu personalisieren. Die Wünsche der Kunden führen zu einer Vielzahl von Kombinationen und Varianten, wie in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt, so dass die Hersteller die Komplexität in der Produktentwicklung und -produktion beherrschen müssen, um das Produkt schnell und dem Trend folgend zu liefern, wie in Abbildung 3 dargestellt [1].

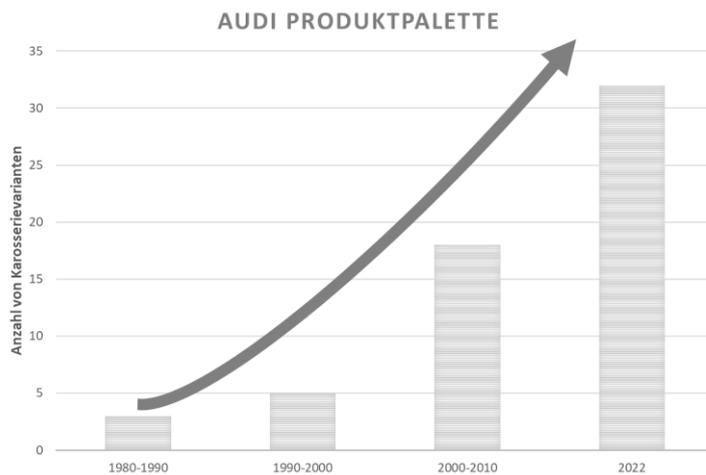


Abbildung 1: die Zunahme der Anzahl der Audi-Produkte, Eigene Darstellung nach [1]

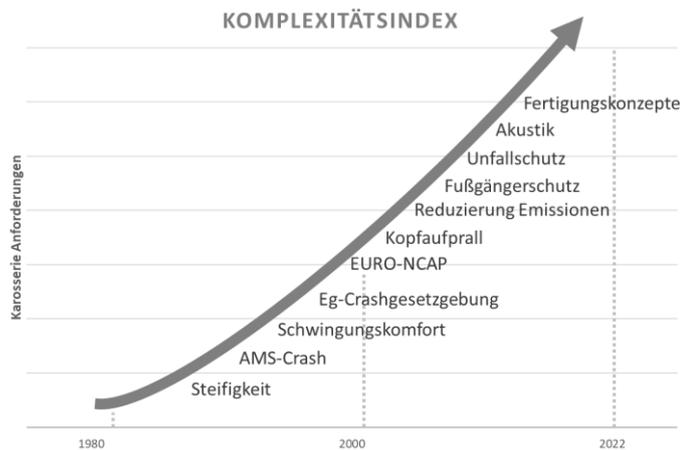


Abbildung 2: die Zunahme der Produktkomplexität, eigene Darstellung nach [1]

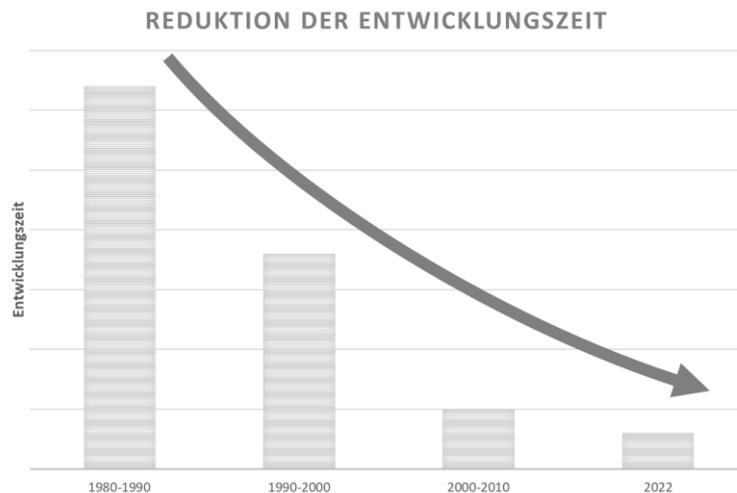


Abbildung 3: Reduktion der Entwicklungszeit, eigene Darstellung nach [1]

Die Beherrschung der Produkte bedeutet, dass qualitativ hochwertige und geprüfte Produkte schnell auf den Markt gebracht werden. Der Produktionsprozess wurde an die neuen Anforderungen angepasst, indem verschiedene virtuelle Techniken, die so genannten CAX-Methoden, integriert wurden, wodurch der Testprozess in zwei Teile aufgeteilt wurde, einen virtuellen und einen physischen, wie in Abbildung 4 dargestellt [1].

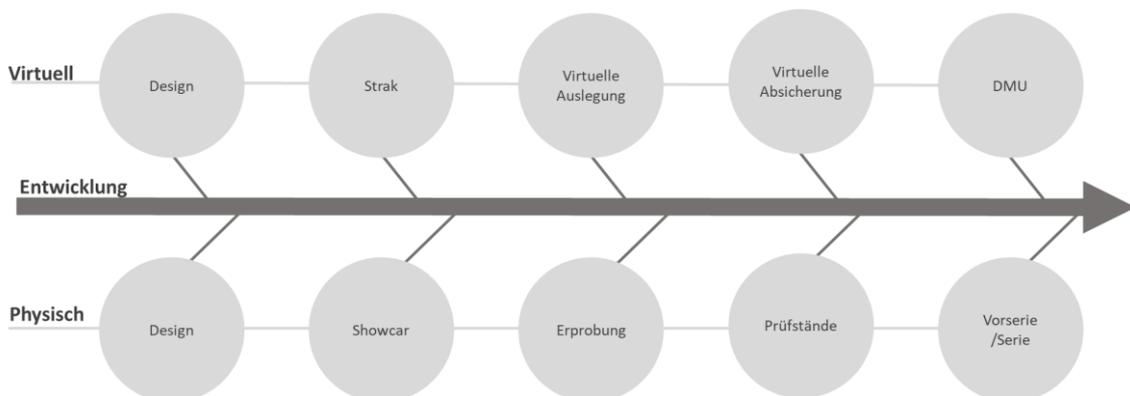


Abbildung 4: virtuellen und physischen Produktentstehungsprozess, eigene Darstellung nach [1]

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass die virtuelle Entwicklung die Hardware nicht ersetzt, sondern ergänzend und unterstützend eingesetzt wird. Das liegt an mehreren Einschränkungen des virtuellen Testens. Einige dieser Einschränkungen sind nach [1] nachfolgend erläutert.

Es werden unzureichende Simulationsmethoden genannt. Das unzureichend bezieht sich auf das abzubildende Phänomen kann nicht ausreichend modellhaft beschrieben und somit nicht virtuell dargestellt werden [1].

Ein weitere Aspekt sind unterbrochene Prozessketten. Einzelne Simulationsmethoden, meist zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Produktentwicklungsprozess verankert, decken das Problem nicht oder nur unzureichend ab. Daten, die aufgrund einer Simulation als Input für eine

nachfolgende Methode verwendet werden sollten, sind nicht verfügbar, weil die gesamte Prozesskette nicht geschlossen ist [1].

Als unbekannte Phänomene werden technische Zusammenhänge beschrieben, wenn ihrer Wirkungskette physikalisch in sich nicht eindeutig sind. Dann können entsprechende Modelle nicht erstellt und validiert werden unter einem nicht konkurrenzfähiger Simulationsaufwand wird verstanden wenn der Aufwand für Modellierung, Datenerfassung, Simulation und Auswertung im direkten Vergleich zum experimentellen Aufwand zu hoch ist. Dann sollten besser konventionelle Methoden eingesetzt werden [1].

Gegenwärtig werden die Standardtests, entweder von den Zulieferern oder den OEMs, an den Rahmen des in Produktion befindlichen Fahrzeugs durchgeführt, wodurch der Ablauf der Testphase verlangsamt wird. Die Prüfung von Standardtüren wird hauptsächlich auf so genannten Pulsern durchgeführt, auf die später in dieser Arbeit eingegangen wird. Daher sollte der Ersatzrahmen auch auf diesen Pulsern montiert werden können.

### 3.2 Fahrzeugtypen

Abhängig von der Fahrzeuggröße und der Anzahl der Fahrgäste können viele Fahrzeugtypen bestimmt werden; acht davon werden in Tabelle 1 behandelt.. Jeder Fahrzeugtyp hat seine eigenen Spezifikationen und Steifigkeitswerte. Diese Werte variieren stark von einem Fahrzeug zum anderen, auch innerhalb desselben Fahrzeugtyps. Diese Unterschiede sind auf die Intention des Fahrzeugs und seine Größe zurückzuführen. Der Trend geht dahin, dass es ein Standardfahrzeug gibt und dann mehrere modifizierte Fahrzeuge, die ebenfalls eine hohe Agilität und ein sportliches, dynamisches Verhalten in Kurven bieten, was die Spannweite z. B. der Torsionssteifigkeit innerhalb desselben Fahrzeugtyps und manchmal sogar desselben Fahrzeugmodells erklärt [2].

Es ist erwähnenswert, dass die Automobilhersteller aus Wettbewerbsgründen verschiedene Werte für das bei Tests gemessene Karosserieverhalten beibehalten. Um diese Werte, insbesondere die Torsions- und Biegesteifigkeit, zu erhalten und einen genauen Bereich aktuellerer Fahrzeugwerte zu schaffen, wurden verschiedene Quellen verwendet. Um die Knappheit der verfügbaren Werte zu umgehen, werden die Werte aus den verschiedenen Quellen notiert, was zu einer Liste mit einem realistischen Wertebereich für acht Fahrzeugtypen führt, auf die sich der Rest der Arbeit stützt. Siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Fahrzeugtypen und ihre Eigenschaften

Angaben								
Fahrzeugtyp	Kombi	SUV	Coupe	Kompaktwagen	Stadt Auto	MPV	Limousine	Pickup
Beispiel	VW Passat, VW Sharan	Jeep Grand Cherokee, BMW X6	E-Klasse Coupe	Golf, Ford Focus	VW Up	VW Sharan	Mercedes C-Klasse, Audi A4	Ford F-150
Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	22400-25000	23000-29000	22000	17600-25000	17000-19800	22400	23100-30200	20100
Biegesteifigkeit [N/mm]	Durchschnittlich: 11902							
Eigenfrequenz [Hz]	Durchschnittlich: 38							
Spurweite [mm]	1568	1628	1.605	1.540	1.428	1.617	1601	1950

Radstand [mm]	2791	2915	2873	2679	2420	2920	2865	3696
Leergewicht [Kg]	1367–1776	2418 - 2.573	1970	1630	1248	1755	2120	2100

In Anlehnung an: [2], [3], [4], [5], [6] und [7].

In Tabelle 8 sind die wesentlichen 8 Fahrzeugtypen mit den Eigenschaften wie Fahrzeugtyp, für diese Arbeit wichtige Torsionssteifigkeit, Biegesteifigkeit, Eigenfrequenz und für die geometrischen Abmaße des Modells.

### 3.3 Standard statische Karosserie Tests in die Automobil Industrie

Nachfolgend werden die statischen Standardtests beschrieben, da sie als Lastfälle für die folgenden FEM Betrachtung genutzt werden.

#### 3.3.1 Biegung durch Schwerkraftbelastung

In Abb. 5 ist ein vereinfachtes, freigeschnittenes System, dargestellt, um die Biegesteifigkeit einer Fahrzeugstruktur zu ermitteln. Der Radstand ist als Fest- Loslager dargestellt.

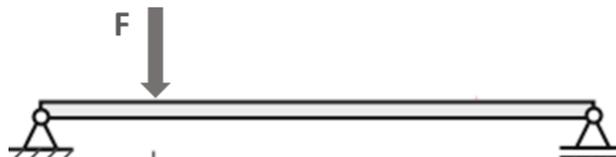


Abbildung 5: Biegung eines Balkens, eigene Darstellung nach [8]

Die Biegesteifigkeit gibt an, welche Kraft (kN) aufgebracht werden muss, um die Karosserie zwischen den beiden Achsen um einen bestimmten Betrag, z.B. 1 mm abzusenken. Diese Belastungen treten im Fahrbetrieb insbesondere beim Durchfahren von Bodenwellen auf. Hohe Steifigkeit erreicht man, wenn die Längsträger, Vorder- und Hinterrahmen sowie der Schweller in ihrer Profilhöhe aufgebaut werden oder eine Verstärkung eingebracht wird [2], siehe Abb.5.

In Abb. 6 sind die Separaten Positionen für die Jeweiligen Schwerpunktkoordinaten dargestellt.

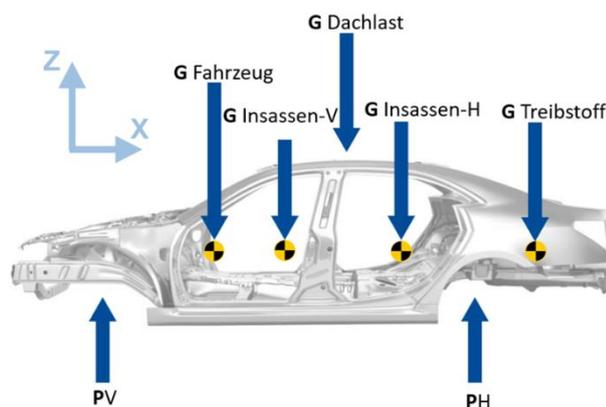


Abbildung 6: Position und Ursprung der Gravitationslasten, eigene Darstellung nach [2]

Für die Dachlasttest wird die Dachlast benötigt. Die Dachlast, wird in der Regel mit 100[kg] angegeben, wie in den Broschüren der Autos zu lesen ist. 100[Kg] symbolisiert die maximale Maß, die der Benutzer z.B. ein Zelt auf das Dach seines Autos legen kann. Die Last wird in der Regel definiert auf bestimmte Eintrittspunkte des Dachrahmens, siehe Abb. 6.

### 3.3.2 Torsionstest um die Fahrzeuglängsachse

In Abb. 7 ist ein vereinfachtes, freigeschnittenes System dargestellt, um die Torsionssteifigkeit zu ermitteln. Das System ist einseitig als Festlager gelagert. An der anderen Seite greift eine Kraft  $F$  an.

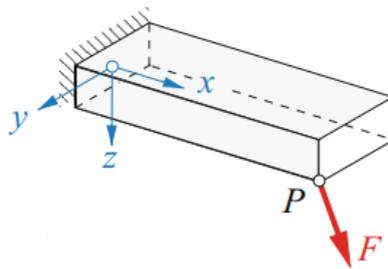


Abbildung 7: Torsion eines Balkens [8]

Torsionssteifigkeit ist im Allgemeinen der Widerstand eines auf Torsion beanspruchten Bauteils im Querschnitt gegen eine Verwindung um die Längsachse [8], siehe Abb. 7.

In Fahrzeuge versteht man unter Torsionssteifigkeit die Verwindung der Karosserie um eine Achse aufgrund eines Moments. Im Fahrbetrieb kommt es, z.B. durch Fahrbahnebenheiten häufig zur Einleitung solcher Momente und dabei zu Relativbewegungen zwischen der Karosserie und deren Anbauteilen. Diese Verformungen können unerwünschten Schwingungen führen und Geräuschen erzeugen, weshalb man sich um möglichst hohe Torsionssteifigkeit bemüht [2].

Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Torsion entlang der X-Achse eines Autofahrgestells, wie in Abbildung 8 dargestellt. Eine solche Torsion tritt bei einem Auto auf, wenn ein Rad auf dem Bordstein steht. Diese unebene Oberfläche, kombiniert mit der Gewichtsverteilung der Insassen und dem Gewicht des Fahrgestells, verursacht eine hohe Belastung der Struktur. Dieser Aspekt spielt bei der Entwicklung und Anwendung der Tests eine Rolle.

Im Abb. 8 ist ein vereinfachtes, freigeschnittenes System dargestellt, um die Torsionssteifigkeit am Fahrzeugrahmen zu definieren. An der Hinterachse ist eine Festlagerung und an der Vorderachse greifen gleich große Kräfte  $F$  mit unterschiedlichen Vorzeichen an. Es entsteht ein Winkel  $\vartheta_1$ . Die Winkel  $\vartheta_1$  berechnet sich nach Formel (1).

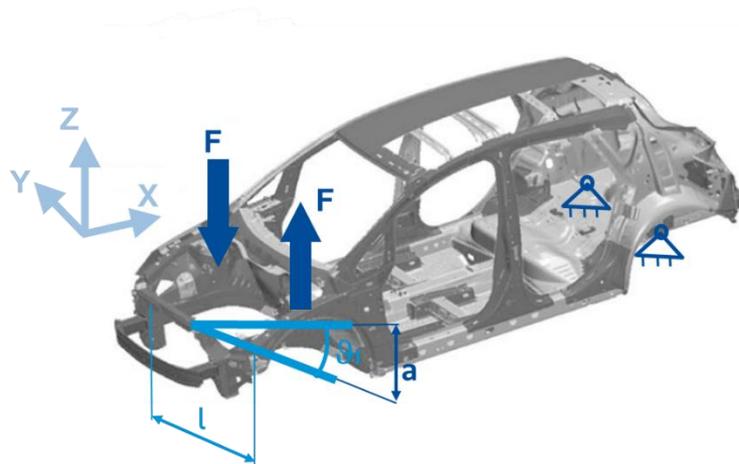


Abbildung 8: Torsion eines Autos, eigene Darstellung nach [2]

Berechnung von Torsionssteifigkeit und Drehwinkel (siehe Abb. 8 als Referenz):

$$\vartheta_1 = \frac{M_T}{GI_T} \quad (1) \text{ [9]}$$

$$M_T = F \cdot l \quad (2) \text{ [9]}$$

$$\tan \vartheta_1 = \frac{a}{l/2} \quad (3) \text{ [9]}$$

$M_T$ : Torsionsmoment [Nm]

$GI_T$ : Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]

$a$ : die Verschiebung in z-Richtung [m]

$l$ : der Abstand zwischen den beiden Knotenpunkten, an denen die Last angreift [m]

### 3.3.3 Pulser Tests und Prüfstände

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Entwicklung eines Ersatzrahmens, der die Prüfung von Türen als Anbauteile ermöglicht. Es wird erwartet, dass die Ersatzstruktur für eine längere Zeit in Betrieb bleibt. Während dieser Zeitspanne werden die eingebauten Türen umfangreichen FKM-Ermüdungstests unterzogen, um die strukturelle Solidität sicherzustellen. Außerdem werden sie verschiedenen anderen Tests unterzogen, die später in dieser Arbeit behandelt werden. Für die Durchführung der Tests werden Fahrzeugprüfstände und Pulsers verwendet. Es gibt sie in verschiedenen Formen und für verschiedene Zwecke, die speziell auf die Anforderungen des Tests zugeschnitten sind. Einige Beispiele sind unten aufgeführt.

#### Mehrkomponenten-Karosserieprüfstand (Abb. 9)

Ist ein Prüfstand für den Betriebsfestigkeitsnachweis der Karosserie unter realitätsnaher Simulation relevanter Umgebungsbedingungen. Es schafft Echtzeitsimulation von Fahrbetriebsmessungen, Iterative Abgleich der Betriebslasten am Fahrzeug gemessene Strukturlasten, und Überlagerte Simulation von Temperatur, Feuchte und Sonnenstrahlung [10].



Abbildung 9: Mekka III [10]

**Fahrdynamischer Achsenprüfstand (Abb. 10)**

Ist ein Prüfstand zur Erprobung der Betriebsfestigkeit von Rädern und Bremsscheiben im Betriebslastennachfahrversuch. Es sind dynamische Belastung durch Lenk und Bremsmanöver, Fahrunebenheiten und Lastwechselreaktionen. Nachbildung der Vertikal-, Wank-, Nick- und Lenkbewegung des Fahrzeugs in Echtzeit. Es schafft realitätsnahe Simulation der Dauereprobung in Extremer Fahrweise [10].



Abbildung 10: FDAP [10]

**Klimakammer (Abb. 11)**

Es schafft Höhensimulation, Unterdruckkammer, Temperaturkammer, Klimakammer, Sonnensimulation, Korrosionskammer, Staubprüfkammer [10].



Abbildung 11: Klimakammer [10]

**Fahrdynamischer Achsenprüfstand (Abb. 12)**

Ist ein Prüfstand zur Erprobung der Betriebsfestigkeit von Rädern und Bremsscheiben im Betriebslastennachfahrversuch [10].



Abbildung 12: Karosserie Test [10]

**Tür NVH Prüfung Testanlage (Abb. 13)**

Ist Lärm-Vibrations-Härte-Test für Standardtüren.



Abbildung 13: NVH Prüfung [11]

### 3.3.4 FKM Nachweis

Der Festigkeitsnachweis in der FKM-Richtlinie ist in einen Statischen und einen Ermüdungsfestigkeitsnachweis unterteilt. Für Bauteile, die lediglich statischen Lasten ausgesetzt sind, muss nur der Statische Festigkeitsnachweis erbracht werden. Für Bauteile, die schwingenden Belastungen unterworfen sind, müssen hingegen beide Festigkeitsnachweise erfüllt werden, um die Bauteile sowohl gegen Schwing- als auch gegen Gewaltbruch bzw. plastischen Kollaps auszulegen [12].

Die Festigkeitsnachweise (Statisch als auch Ermüdungsfestigkeit) können mithilfe von Nennspannungen als auch mit örtlichen Spannungen durchgeführt werden. Beide Spannungsarten sind rein elastizitätstheoretisch ermittelt, d. h. es wird ein linearer Zusammenhang zwischen äußerer Belastung und innerer Beanspruchungsgröße unterstellt. Nennspannungen können nur bei stab- oder flächenförmigen Bauteilen definiert werden. Die für einen Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen (Normalspannung  $\sigma$  und Schubspannung  $\tau$ ) benötigten Spannungen werden in der Praxis mithilfe von Finite-Elemente-Rechnungen mit linear-elastischem Materialverhalten ermittelt. Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis kann abhängig von der Beanspruchung unterschiedliche Ausprägungen haben, die sich durch die Struktur der FKM Richtlinie automatisch ergeben: Dauerfestigkeitsnachweis, Zeitfestigkeitsnachweis, und Betriebsfestigkeitsnachweis [12].

Der Nachweis auf sogenannte Dauerfestigkeit steht im Mittelpunkt dieser Arbeit, und wird gemäß den FKM-Richtlinien durchgeführt werden wird.

### 3.3.5 Anbauteilen und deren Tests

Unter Anbauteilen versteht man alle zur Karosserie gehörigen Teile, die nicht mit der Rohkarosserie verschweißt werden, also unter anderem Türen, Klappen, Kotflügel und Stoßfänger [2].

Einer der Hauptschwerpunkte dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung eines Ersatzrahmens für die Prüfung von Autotüren, und zwar für genau eine Art von Türen, Standardtüren. Standardtüren sind eine Art von verschiedenen Typen, die im Folgenden aufgeführt sind.

Türen können nach ihrem Öffnungsmechanismus unterschieden und kategorisiert werden. Es lassen sich mehr als 50 Türmodelle identifizieren, die jedoch alle als Replikation und Erweiterung von hauptsächlich neun Typen betrachtet werden können. Nachfolgend werden einige Türarten beschrieben [13].

#### Scherentüren

Exklusive Marken wie Ferrari, Lamborghini und McLaren rüsten ihre Fahrzeuge mit diesen Türen aus. Dabei handelt es sich um Fahrzeugtüren, die vertikal nach oben schwingen, anstatt sich wie herkömmliche Autotüren nach außen zu öffnen. Ein frontales Scharnier fixiert die Vorderseite der Tür, so dass sich die Autotür öffnen lässt. Ein Beispiel dafür wäre die Lamborghini Aventador [13].

#### Flügeltüren

Flügeltüren bezieht sich auf Autotüren, die auf dem Dach und nicht an der Seite des Fahrzeugs angebracht sind. Die Türen öffnen sich nach oben und spreizen sich wie Flügel. Ein Auto, das solche Türen hat, wäre DMC Delorean [13].

#### Schmetterlingstüren

Schmetterlingstüren schwingen durch Scharniere, die an der A-Säule befestigt sind, nach oben und außen. Aufgrund ihres praktischen Öffnungsmechanismus hat der Benutzer mehr Platz zum Ein- und Aussteigen als bei Scherentüren. Ein Beispiel für diese Art von Türen ist ein McLaren [13].

### **Selbstmördertüren**

Es handelt sich um eine Fahrzeugschleuse, die an der Rückseite und nicht an der Vorderseite angeschlagen ist. Ein Beispiel dafür wäre die Rolls Royce Phantom [13].

### **Schiebetüren**

Eine Schiebetür ist eine Autotür, die an einer Schiene aufgehängt ist, so dass die Tür horizontal gleiten kann. Diese Art von Tür wird heutzutage in Transportern, Minivans und Bussen eingesetzt und bietet den Fahrgästen einen großen Ein- und Ausstiegsbereich. Ein Auto, das solche Türen hat, wäre VW Sharan [13].

### **Vordach-Türen**

Die Tür ist an der Oberseite des Fahrzeugs angebracht. Wenn sie geöffnet wird, wird sie angehoben und die Kabine wird vollständig freigelegt. Ein Auto, das solche Türen hat, wäre Sterling Nova [13].

### **Schwanentüren**

Diese Art von Tür ist den Standardtüren ähnlich. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das Scharnier einen Winkel hat, der es ermöglicht, die Tür leicht geneigt zu öffnen. Durch den Öffnungswinkel kann die Tür dem Bordstein ausweichen, was bei tiefergelegten Fahrzeugen hilfreich ist. Der Aston Martin ist ein Beispiel dafür [13].

### **Dihedral-Türen**

Dihedraltüren ähneln Scherentüren. Der einzige Unterschied besteht darin, dass sich diese Türen öffnen, indem sie sich nach außen bewegen und dabei am Türscharnier um 90 Grad drehen. Ein Beispiel dafür wäre die Koenigsegg Agera [13].

### **Vorne angehängte Autotüren**

Es handelt sich um eine Art von Tür, die ausschließlich für eintürige Fahrzeuge bestimmt ist. Sie ist an der vorderen Nase des Fahrzeugs angebracht. Ein Beispiel dafür ist die BMW Isetta [13].

### **Standardtüren**

Diese Art von Tür ist in der Automobilindustrie am weitesten verbreitet. Die einfachere Herstellung, die erhöhte Sicherheit und die relativ niedrigen Produktionskosten machen sie zum Industriestandard. Sie sind an der Vorderseite angelenkt und öffnen sich von hinten nach vorne. Ein Beispiel für diese Art von Türen ist ein Mercedes-Benz C-Klasse [13].

Die Standardtürgeometrie ist durch eine leichte Neigung zur Z-Achse gekennzeichnet, wie in Abb. 14 und Abb. 15 dargestellt. Sie sind auch durch eine Wölbung gekennzeichnet, die direkt vom Außendesign des Fahrzeugs abhängt, wie in Abb. 16 dargestellt.

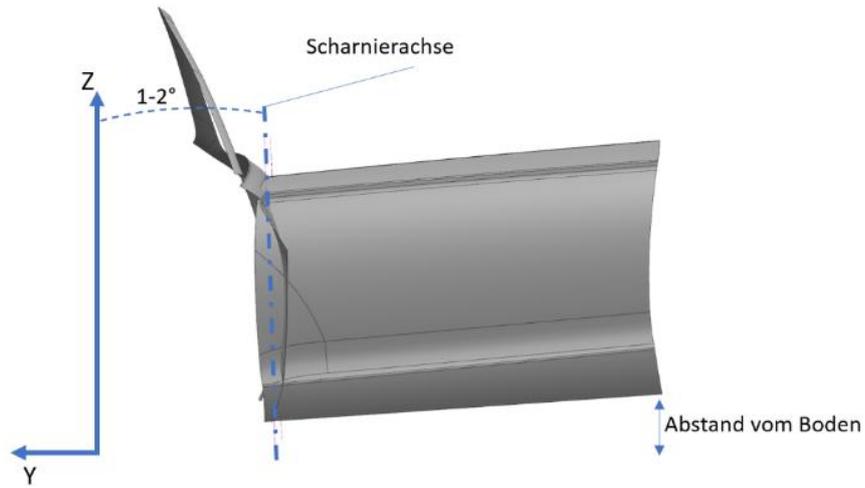


Abbildung 14: YZ-Ansicht Türwinkel

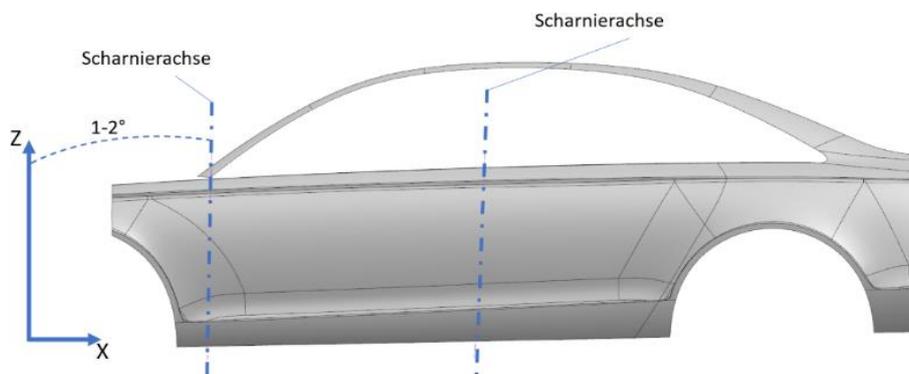


Abbildung 15: XZ-Ansicht Türwinkel

Abbildung 16 zeigt anhand einer Beispieltür, wie die Krümmung normalerweise aussieht.

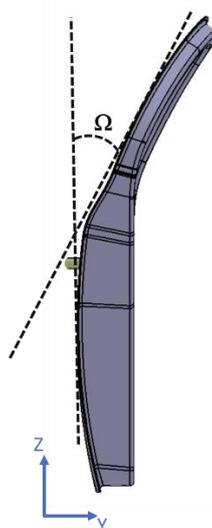


Abbildung 16: YZ-Ansicht Türkrümmung

Abbildung 17 verdeutlicht die Unterschiede in den Türlängen zwischen den beiden Fahrzeugklassen, Stadtauto (VW Up) und Limousine (Mercedes S-Klasse) [14], [15].

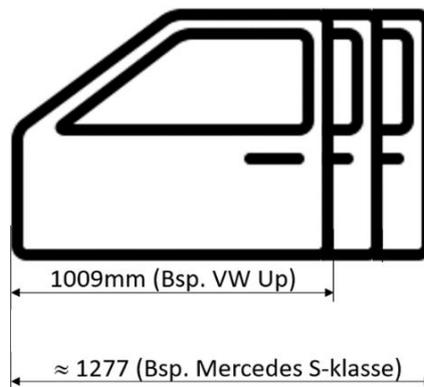


Abbildung 17: Türlängen

Ein weiteres, für diese Arbeit relevantes Anbauteil sind die Scharnier- und Türbefestigungssysteme, siehe Abb. 18 und Abb. 19 [16].

Die Schwenkturscharniere bestehen aus einem Türscharnier, dieses Türscharnier ist an der Tür befestigt, weiterhin aus einem Karosseriescharnier, dieses Karosseriescharnier ist an der Karosserie angebracht und einem Scharnierbolzen. Dieser verbindet beide Scharniere und legt die Schwingachse fest [17], siehe Abb.18 und Abb.19 [16].

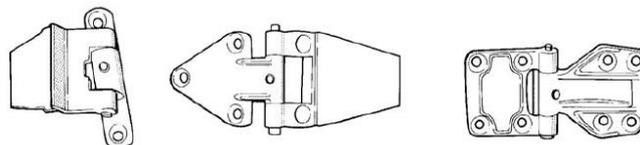


Abbildung 18: Tür-Scharniersysteme [16]

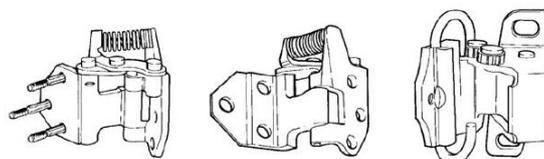


Abbildung 19: Tür-Scharniersysteme mit integrierter Türbremse [16]

### 3.3.5.1 Türabsenkung

Der Türabsenkungstest wird durch Aufbringen einer vertikalen Kraft im Bereich des Türschlosses durchgeführt. Die anfängliche Prüfkraft beträgt 200 N und wird jede Minute kontinuierlich auf 1000 N erhöht. Der Scharnierbereich wird einmal am starren Rahmen und einmal an der Kabinenserie des Wagens eingespannt. Die Prüfung wird einmal bei fast geschlossener und einmal bei vollständig geöffneter Tür durchgeführt. Nach jedem Prüfabschnitt wird die plastische Verformung im Bereich der Scharniere oder an der Rohkarosserie gemessen. Nach der Prüfung sollte die Tür

noch funktionsfähig sein. Die Verformungswerte sollten bestimmte Standardwerte nicht überschreiten, siehe Abb. 20 [18].

In Abb. 20 sind die beiden Lastfälle bei geschlossener und geöffneter Tür vereinfacht dargestellt.

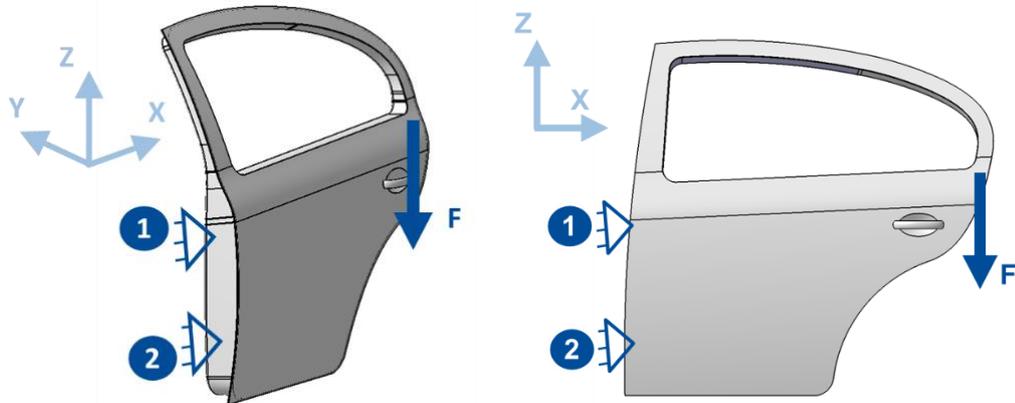


Abbildung 20: Türabsenkung Darstellung, eigene Darstellung nach [18]

### 3.3.5.2 Statische Türeindrückung

Zur Bewertung der Türfestigkeit wird ein Seitencrash durchgeführt, siehe Abb. 21 [19].



Abbildung 21: Statische Türeindrückung [19]

### 3.3.5.3 Statische Türüberdrückung

Die Türüberdrückung wird zum Beispiel dadurch verursacht, dass die Tür auffällt, wenn das Fahrzeug schräg geparkt ist. Er kann auch durch das Anschieben eines Fahrzeugs bei geöffneter Tür entstehen. Die Verformung tritt im Bereich von Tür und A-Säule oder an der Türbremse auf. In diesem Lastfall müssen die Scharniere und die Türbremse eine ausreichende Steifigkeit aufweisen, und der Türrahmen muss an den Verbindungspunkten der Scharniere und der Türbremse eine ausreichende lokale Steifigkeit aufweisen [18], siehe Abb. 22.

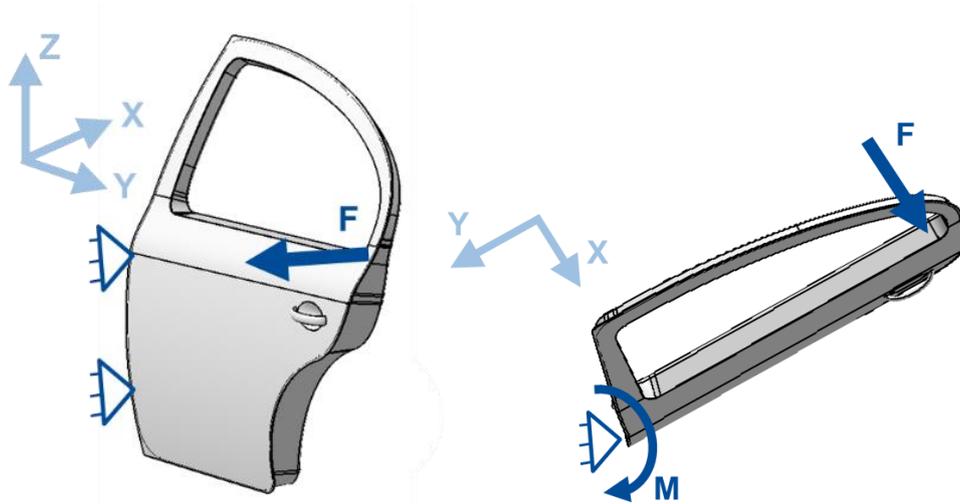


Abbildung 22: Türüberdruckung Darstellung, eigene Darstellung nach [18]

### 3.3.5.4 Tür Rahmensteifigkeit

Während der Fahrt wirken bei höheren Geschwindigkeiten aerodynamische Kräfte auf die Windschutzscheibe und den Türrahmen ein. Da eine Dichtung das Glas am Türrahmen führt, können die aerodynamischen Kräfte auf den Türrahmen übertragen werden und so dazu führen, dass sich der Rahmen von der Karosseriedichtung löst. Diese Ablösung kann ein störendes Windgeräusch im Fahrzeuginnenraum verursachen. Die aerodynamischen Kräfte werden durch definierte Kräfte an definierten Punkten eingeleitet. Mit diesem Test soll überprüft werden, ob der Rahmen eine ausreichende Rahmensteifigkeit aufweist [18], siehe Abb. 23.

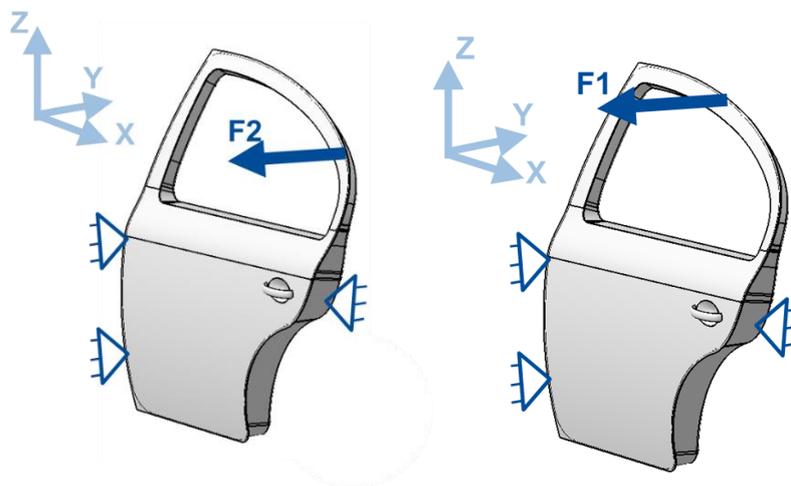


Abbildung 23: Prüfung der Rahmensteifigkeit, eigene Darstellung nach [18]

### 3.3.5.5 Tür Oberflächentest

Das Oberflächentest beschreibt den Widerstand gegen Verformung, wenn eine Kraft auf einen Körper einwirkt. Die Kraft wird bei der Prüfung über einen Druckzylinder oder einen Spindeltrieb übertragen. Diese Prüfung erfolgt mit einer definierten Kraft ( $F$ ) in Normalrichtung auf die Außenhaut der Tür. Die Außenhaut sollte so gestaltet sein, dass keine permanente Verformung bleibt [18], siehe Abb. 24.

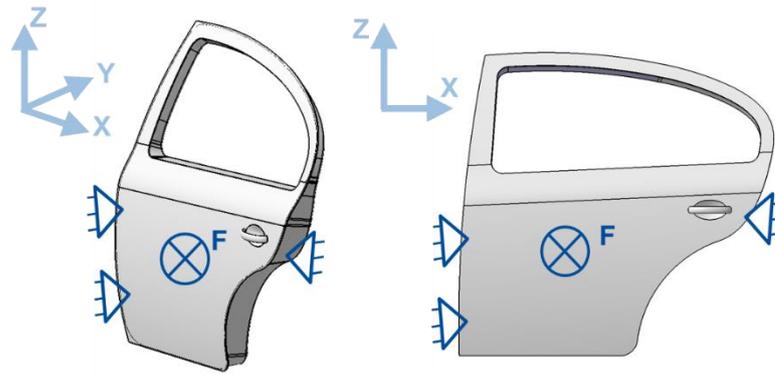


Abbildung 24: Tür Oberflächentest eigene Darstellung nach [18]

### 3.3.5.6 Prüfung der Lebensdauer der Tür beim Öffnen und Schließen

Bei dieser Prüfung wird hauptsächlich das Scharniersystem getestet, das mit einer Maschine verbunden ist, die die Tür über einen bestimmten Zeitraum hinweg mit einer bestimmten Häufigkeit öffnet und schließt. Siehe Abb. 25.



Abbildung 25: Dauerfestigkeitsprüfung [19]

### 3.3.5.7 Vibrationsprüfung

Bei der Vibrationsprüfung werden die Bauteile zu Schwingungen mit einer bestimmten Frequenz angeregt. Die Teile (z.B. Schrauben) dürfen sich durch die Schwingungen nicht lösen. Die einwandfreie Funktion der Bauteile muss gewährleistet sein.

### 3.3.6 Bauarten

Wie in Abb. 26 dargestellt, lassen sich insgesamt acht Karosserieformen unterscheiden, wobei insbesondere die selbsttragende Karosserie und die Space-Frame-Konstruktion bei der Konstruktion von Personenkraftwagen verwendet werden. Die Mehrstoff-, die selbsttragende und die Gitterrohrrahmenbauweise sind ebenfalls für Personenkraftwagen geeignet, werden aber weit weniger eingesetzt als die erstgenannten. Die für Personenkraftwagen idealen Aufbauten werden im Folgenden kurz vorgestellt. Rahmenaufbauten werden hauptsächlich für Lastkraftwagen und schwere Geländewagen verwendet. [Freialdenhoven u.a. 2009].

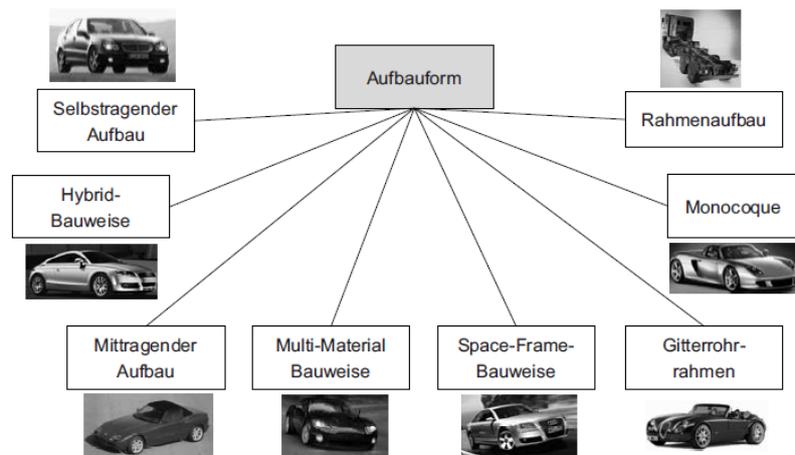


Abbildung 26: Karosseriebauarten [20]

### Spaceframe

Space Frames hingegen bestehen aus Strangpressprofilen, welche die Fahrgastzelle wie einen Sicherheitskäfig umgeben, Abb. 27. Die Profile werden über Knotenpunkte miteinander verbunden. Diese Knotenpunkte können beispielsweise als Gussteil dargestellt werden.

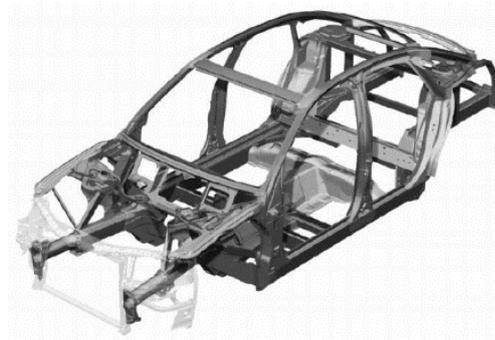


Abbildung 27: Spaceframe Bauweise [20]

### Schalenbauweise

Diese wird üblicherweise aus Stahl gefertigt. Es kann eine hohe Steifigkeit und Festigkeit durch das verschweißte Bodenblech sowie eingebrachte Strukturelemente erreicht werden. Dies ist besonders für die Sicherheitszelle von Vorteil, die den Fahrer und die anderen Insassen umgibt. Vorderwagen und Fahrzeugheck können so gestaltet werden, dass im Crashfall grobe Energiebeträge absorbiert, werden können.

Bei der Fertigung selbsttragender Karosserien lassen sich hohe Automatisierungsgrade erreichen.

Voraussetzung hierfür sind allerdings große Investitionen in Press- und Umformwerkzeuge. Daher wird die selbsttragende Bauweise für Fahrzeugmodelle im oberen Stückzahlenbereich eingesetzt. Für Änderungen bei der Modellpflege oder für die Fertigung von Varianten werden erneute

Investitionen notwendig, so dass die Rentabilität insbesondere bei variantenreichen Modellen stark sinkt [20], siehe Abb. 28.

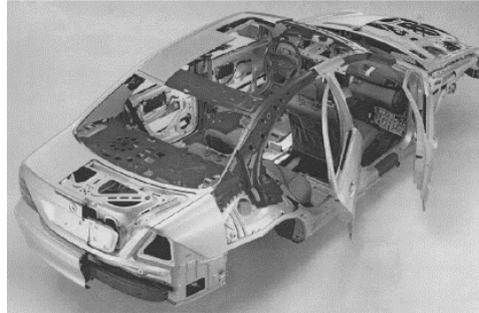


Abbildung 28: Schalenbauweise [20]

### Gitterrohrrahmen

Bei der Gitterrohrbauweise bildet ein Rahmen aus zusammengeschweißten Rohren das Tragwerk, Abb.5. An diesem Gitterrohrrahmen werden die Aggregate, das Fahrwerk und weitere Karosseriebauteile befestigt. Die Außenhaut wird auf die Rahmenstruktur geplant. Werden Aluminium- und Kunststoffbauteile verwendet, so lässt sich im Gegensatz zur selbsttragenden Bauweise eine deutliche Gewichtseinsparung erzielen.

Problematisch bei dieser Bauweise ist, dass die Tragstruktur im Crashfall undefiniert versagen kann. Das Energieabsorptionspotential ist bei geringen Profilquerschnitten als niedrig einzustufen. Bei steigender Stückzahl und wenigen Varianten steigen zudem die Herstellungskosten an, so dass sich die Gitterrohrbauweise nur für kleine Serien anbietet [20], siehe Abb. 29.

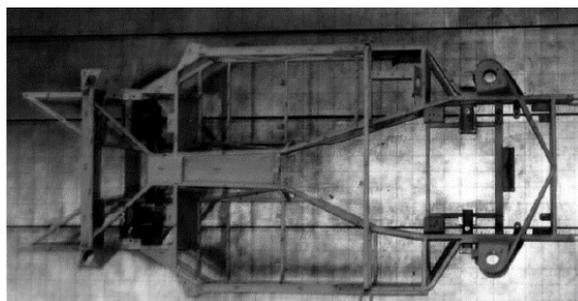


Abbildung 29: Gitterrohrrahmen [20]

**Vorteile** von Gitterrohrrahmen sind eine gute Steifigkeits-/ Gewichtsverhältnis, gewichtsparende Bauweise bei gleichzeitigem Potential hoher Biege- und Torsionssteifigkeit, es gibt als einfache und kostengünstige Herstellung, einfache Reparatur Möglichkeit nach Unfällen, einfache Möglichkeit nachträglicher Änderungen in bestimmten Bereichen; z. B. Motoreinbau, gute Zugänglichkeit zu innenliegenden Komponenten, und eine Überrollstruktur kann leicht integriert werden.

**Nachteile** sind teilweise aufwändige Vorbereitung der Stabenden vor dem Fügen und Eigenspannungen durch Toleranzen und Schweißverbindungen [20].

### Rahmenbauweise (Leiterrahmen)

Der Begriff Leiterraahmen resultiert aus den beiden Längsträgern, die durch Querstreben verbunden werden, Abb. 30. Hierbei ist das Transportgefäß vom eigentlichen Tragwerk getrennt verbaut. Die Karosserie übernimmt somit keine tragende Funktion, sie wird lediglich auf den Leiterraahmen aufgesetzt [20], siehe Abb. 30.

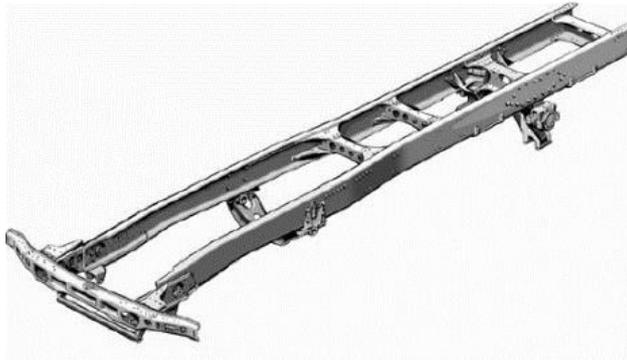


Abbildung 30: Rahmenbauweise [20]

### Hybridbauweise

Bei der Hybridbauweise wird die Karosserie aus zwei unterschiedlichen Materialien gefertigt. Durch diese Kombination von beispielsweise Aluminium und Stahl kann ein optimales Achslast Verhältnis, ein geringeres Gesamtgewicht bei hoher Steifigkeit und eine verbesserte Gewichtsverteilung erreicht werden. Nachteilig zu bewerten ist, dass nur durch eine aufwändige Konstruktion Kontaktkorrosion vermieden werden kann und innovative Fügetechnologien notwendig sind. Zudem wirken sich die hohen Materialkosten von Aluminium negativ auf den realisierbaren Fahrzeugpreis aus [20], siehe Abb. 31.

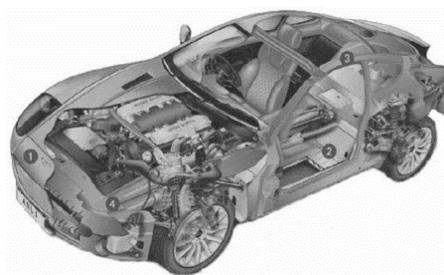


Abbildung 31: Hybridbauweise [20]

## 3.4 Gestaltungsrichtlinien und Verstärkungsmaßnahmen

Im Verlauf dieser Arbeit soll ein Ersatzrahmen konstruiert. Das Ziel ist es, hohe Steifigkeiten zu erreichen; mehrere Maßnahmen können eingesetzt werden, um die Steifigkeiten zu erhöhen, ohne das Gewicht der Struktur dramatisch zu steigern. Einige dieser Maßnahmen werden nachfolgend erläutert:

### Bauweise

Das Hinzufügen von dünnen Flächen zur Aussteifen der Struktur und zur Erhöhung der Torsionssteifigkeit [21], siehe Abb. 32

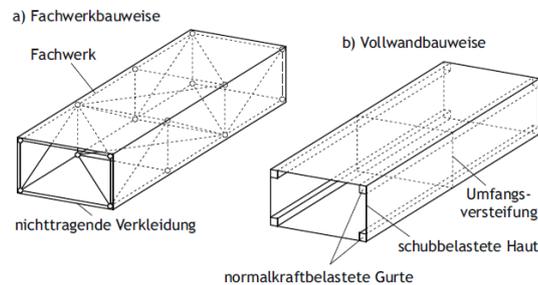


Abb. 9.1 Kasten in a) Fachwerkbauweise und b) Vollwandbauweise

Abbildung 32: Fachwerk- und Vollwandbauweise [21]

Ein Vollwandssystem besteht aus Steifen und dünnen Hautfeldern, die nur in Hautfeldebene (bzw. in der Tangentialebene) beansprucht werden. Die Steifen sind üblicherweise gerade und verlaufen entweder nur in Längs- oder in Längs- und Querrichtung. Eine Anpassung an die Belastung im Sinne einer gleichmäßigen Beanspruchung bis zur zulässigen Belastungsgrenze ist beim Vollwandssystem einfacher möglich als bei einer Schale oder einem Hauptfeld konstanter Dicke. Bei diesen bewirkt eine beliebige Belastung zwar eine stetige, i. Allg. aber ungleichmäßige Verteilung von Normal- und Schubkräften bzw. -spannungen.

Die Steifen eines Vollwandsystems müssen über ihre gesamte Länge mit den Hautfeldern verbunden sein. Dies kann z. B. durch Kleben oder Nieten erfolgen [21].

### Rippen

Das Hinzufügen von Rippen erhöht die Torsionssteifigkeit, siehe Abb. 33 [21].

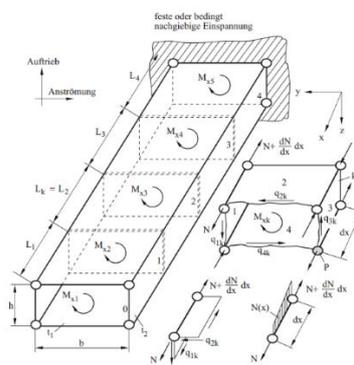


Abbildung 33: Belastungsmodell eines Kastenträgers mit Rippen [21]

### Versteifende Formgebung

Die Krümmung von Oberflächenelementen kann deren Steifigkeit erhöhen, siehe Abb. 34.

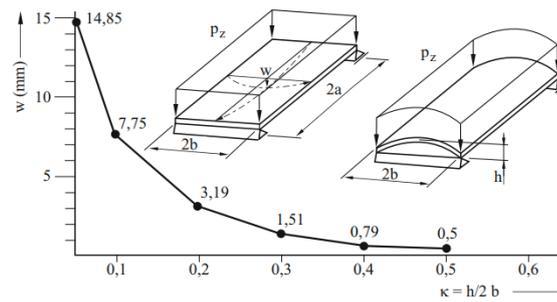


Abbildung 34: Einfluss der Krümmung auf die Durchsenkung einer Platte [21]

**Schottwände**

Die Schottwände erhöhen die gesamte Biegesteifigkeit, siehe Abb.46 [21]

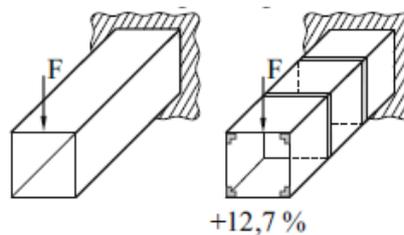


Abbildung 35: Kasten mit Schottwände [21]

**Die Verwendung von verschiedenen Querschnitten**

Jede Querschnittsform hat ihr eigenes Trägheitsmoment. Je nach Beanspruchungsart sollen verschiedene Querschnitte verwendet werden. Einige Beispiele sind in Abb. 36 dargestellt.

Querschnittsform	$I_y$	$I_z$	$I_{yz}$
Rechteck 	$\frac{b h^3}{12}$	$\frac{b^3 h}{12}$	0
Rechtwinkliges Dreieck 	$\frac{b h^3}{36}$	$\frac{b^3 h}{36}$	$\frac{b^2 h^2}{72}$
Kreis 	$\frac{\pi r^4}{4}$	$\frac{\pi r^4}{4}$	0
Dünner Kreisring ( $t \ll r_m$ ) 	$\pi r_m^3 t$	$\pi r_m^3 t$	0

Abbildung 36: Beispiele Torsionsmomente für Querschnitte [21]

## 4 Testrahmen Entwicklung

### 4.1 Anforderungen an das Konzeptmodell

In der nach VDI-Richtlinien 2221 erstellten Liste sind die Anforderungen an den Ersatzrahmen zusammengefasst. Entsprechend der Zuordnung sind einige Anforderungen obligatorisch, die mit dem Buchstaben "F" für Forderung versehen sind, andere sind gewünscht, die mit dem Buchstaben "W" versehen sind.

Der Ersatzrahmen hat verschiedene Anforderungen. Der Rahmen soll in der Lage sein, die Eigenschaften eines Stadtautos und einer Limousine zu repräsentieren. Die beabsichtigte Haupteigenschaft ist die Torsionssteifigkeit. Die Variation der Torsionssteifigkeit soll durch mechanische Modularität erreicht werden können. Ein Beispiel dafür ist die Montage und Demontage von zusätzlichen Elementen. Der Rahmen ohne die Verstärkungselemente soll eine Torsionssteifigkeit aufweisen, die im Bereich der Torsionssteifigkeit eines Stadtautos liegt, und wenn die Verstärkungselemente montiert sind, erhöht sich die Torsionssteifigkeit, um im Torsionssteifigkeitsbereich einer Limousine zu liegen; die genauen Werte sind Tabelle 1 zu entnehmen. Damit kann ein einziger Rahmen mit zusätzlichen Teilen die Eigenschaften (Torsionssteifigkeit) sowohl eines Stadtautos als auch einer Limousine darstellen.

Die Größe des Rahmens ist konstant - Höhe, Breite und Länge entsprechen denen eines VW Up. Die Größe ändert sich nicht durch Hinzufügen oder Entfernen von Verstärkungselementen; sie bleibt konstant.

Der Rahmen sollte durch einen noch zu bestimmenden Mechanismus auf einen Pulser montiert werden können.

Das Gewicht hingegen sollte maximal 1200 [kg] betragen, was dem Wert eines VW Up entspricht.

Der Wert des Gewichts variiert, wenn Elemente entfernt oder hinzugefügt werden; das Gewicht kann jedoch 1200 [kg] nicht überschreiten.

Der Rahmen sollte so konstruiert sein, dass er eine Dauerfestigkeit aufweist.

Einige Anforderungen sind erwünscht, wie z.B. die Eigenfrequenz von weniger als 38Hz. Die Fähigkeit des Ersatzrahmens, eine unterschiedliche Biegesteifigkeit (Karosserie- und Dachbiegesteifigkeit) zu haben, ist ebenfalls ein Wunsch.

Der Rahmen ist modular aufgebaut; verschiedene Türgrößen, insbesondere die zuvor beschriebenen Standardtüren, sollen auf dem Rahmen montiert und getestet werden können. Der Rahmen sollte in der Lage sein, Standardtüren unterschiedlicher Länge zu begleiten; daher sollte das Befestigungssystem sorgfältig untersucht werden, um die verschiedenen Türgrößen befestigen zu können, damit sie bei verschiedenen Türprüfungen getestet werden können. Das Befestigungssystem sollte auf die Türprüfungen zugeschnitten sein. In Tabelle 2 sind die genannten Anforderungen zusammengefasst.

Tabelle 2: Anforderungsliste

Anforderungskategorie	Unterkategorie	Art	Anforderung	Angaben	Beschreibung
<b>Geometrie</b>	Rahmen	F	Höhe	1492 [mm]	Daten, die denen eines VW-UP ähneln
		F	Länge	2417 [mm]	
		F	Breite	1428 [mm]	
		F	Auf Pulser Montierbarkeit	-	-
<b>Mechanik</b>	Rahmen	F	Torsionssteifigkeit	17000 bis 30200 [Nm/Grad]	VW Up Daten
		W	Biegesteifigkeit	11902 [N/mm]	Testausführbarkeit möglich
		W	Dachlast	100 [Kg]	Durchschnittswert Testausführbarkeit möglich
		W	Eigenfrequenz	38 [Hz]	Durchschnittswert Testausführbarkeit möglich
		F	Dauerfestigkeit	Nach FKM geprüft	Unter Torsionsbeanspruchung
	Tür	W	Türabsenkung	100 [Kg]	Testausführbarkeit möglich
		W	Türüberdruckung	100 [Kg]	Testausführbarkeit möglich
		W	Außenhauttest	-	Testausführbarkeit möglich
		W	Türrahmenfestigkeit	-	Testausführbarkeit möglich
<b>Modularität</b>	Türen	F	Montierbarkeit von Standardtüren	Länge 1009 bis 1277 [mm]	2 Scharniere und ein Ankerpunkt
	Steifigkeit	F	Variierende Torsionssteifigkeit	Anhand Mechanische Lösung	z.B. Verstärkungselemente
<b>Gewicht</b>	-	W	-	Bis Maximum 1200 [kg]	VW Up Daten

[14]

Die Maße von VW Polo, Höhe, Länge und Breite, sind in Abbildung 37 zu sehen.

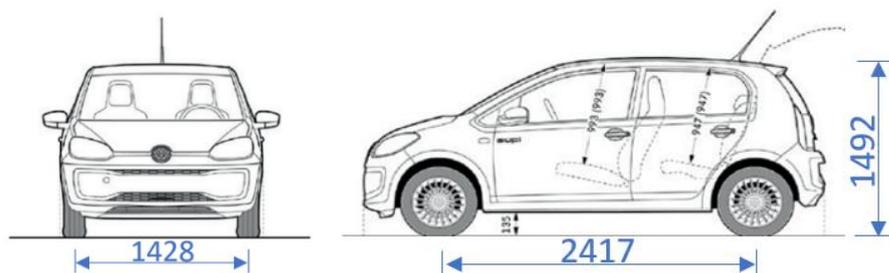


Abbildung 37: VW Up Maße, eigene Darstellung nach [14]

## 4.2 Lösungsfindung

### 4.2.1 Rahmengeometrie

Eine Funktionsliste schafft einen Überblick über alle Funktionen des Ersatzrahmens, siehe Tabelle 3. Diese Liste fasst alle Funktionen der Struktur zusammen, die dann in Teilfunktionen unterteilt werden. Und für die Teilfunktionen gibt es dann eine Liste möglicher geeigneter Lösungen,

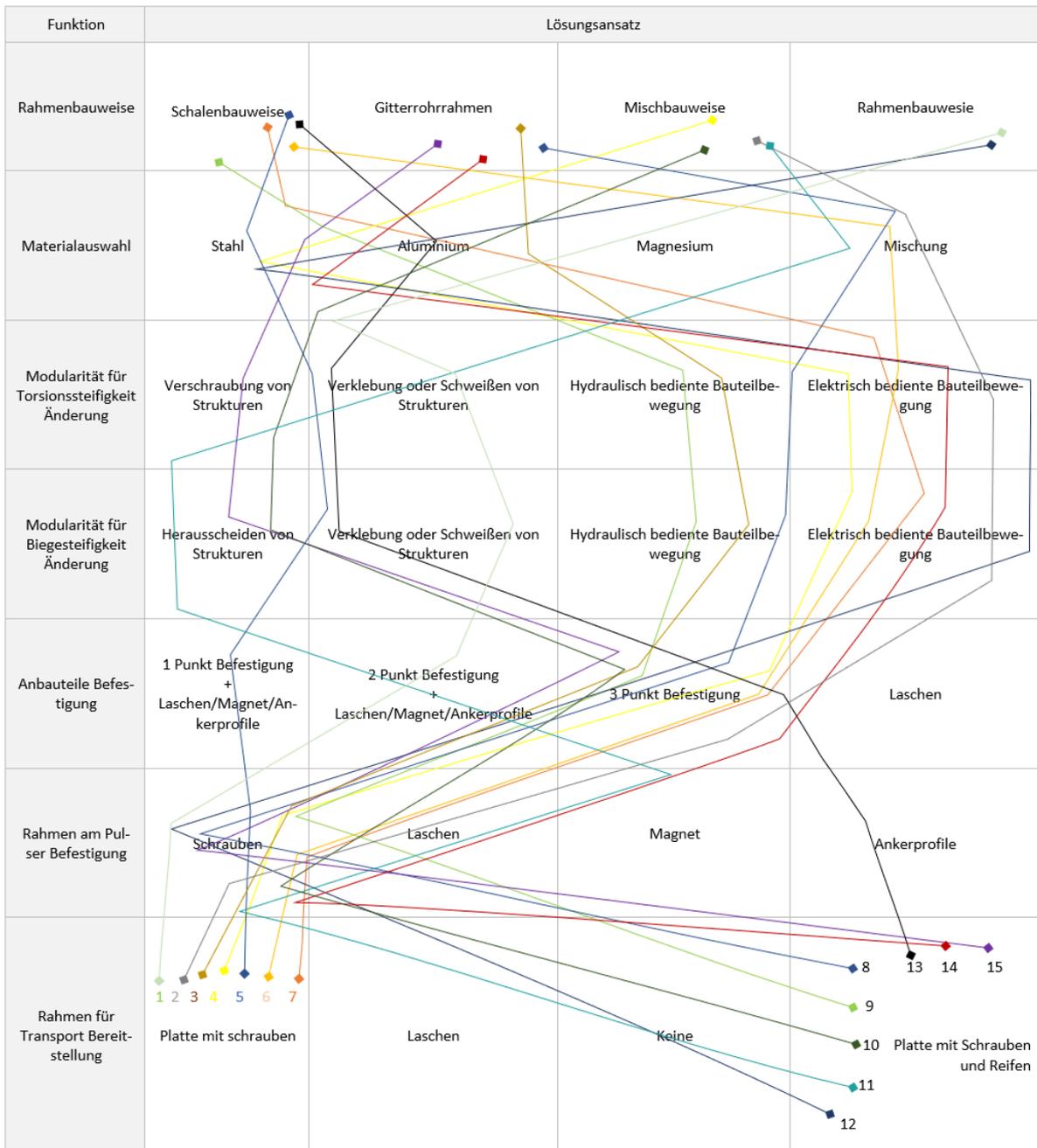
die jedoch keine endgültige Lösung liefert. Tabelle 4 bietet 15 verschiedene Kombinationen der in Tabelle 3 aufgeführten Lösungsansätze, die dann mit Hilfe eines später in dieser Arbeit erläuterten Bewertungssystems bewertet werden.

Tabelle 3: Funktionsstruktur für Rahmen

Hauptfunktion	Teilfunktion	Prinzip Lösungsansätze
Steifigkeitswerte Erreichen	Rahmenbauweise	Schalenbauweise Gitterrohr Mischbauweise
Leichtbau	Materialauswahl	Alu Stahl Magnesium etc.
Steifigkeitsänderung	Torsionssteifigkeit	Verschraubung von Strukturen Verklebung Schweißen von Strukturen Elektrisch bediente Bauteilbewegung Hydraulisch aktivierte Befestigung
	Biegesteifigkeit	Verschraubung von Strukturen Verklebung Schweißen von Strukturen Elektrisch bediente Bauteilbewegung Hydraulisch aktivierte Befestigung
Anbauteilemontage (Türen)	Befestigung	1 Punkt Befestigung 2 Punkt Befestigung 3 Punkt Befestigung Laschen Magnet
Rahmen Befestigung	Am Pulser	Magnet Laschen Schrauben
	Für Transport	Platte mit schrauben Laschen Reifen

Die Darstellung der Teilfunktionen für die Lösungsansätze ergibt den morphologischen Kasten als Gedächtnisspeicher für Ideen. Mit Hilfe des morphologischen Kastens können viele Ideen dargestellt werden, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Morphologische Kasten für Rahmen



In Tabelle 4 ist der Morphologische Kasten mit 15 farblich dargestellten Ideen abgebildet. Um die beste Idee auszuwählen, werden Kriterien festgelegt, mit denen die 15 Ideen bewertet werden.

### 4.2.2 Kriterien für das Bewertungssystem

Für jedes Kriterium sind 5 Punkte zu vergeben. Die 5 Punkte werden nicht gleichmäßig vergeben. Sie werden nach dem Beitrag der Funktionen zum Ziel des Bewertungskriteriums verteilt. Die Bewertungskriterien lauten wie folgt:

- I. **Einfachheit des Aufbaus:** Dieses Kriterium berücksichtigt die Komplexität der Geometrie. Die Geometrie hat den Zweck, zunächst die durch Biegung und Torsion verursachten Lasten aufzunehmen und die Tür in ihrer Position zu halten, die dann Prüfungen

unterzogen wird. Wenn die Geometrie also praktisch und einfach ist, erhält sie die volle Punktzahl. Die Komplexität der Geometrie wird durch die Art ihrer Konstruktion, die verwendeten Materialien usw. bestimmt.

- II. **Robustheit und Bedarf and routinemäßigen Reparaturen:** Dieses Kriterium gibt vor allem an, wie empfindlich die Konstruktion gegenüber einer möglichen rauen Nutzung ist, z. B. bei der Montage der Türen. Die Reparaturfreundlichkeit kann anhand der Verfügbarkeit der in der Konstruktion verwendeten Teile gemessen werden. Auch die Art und Weise, wie diese Teile zusammengefügt wurden, kann bei der Reparatur eine Rolle spielen. Die Reparaturfreundlichkeit kann auch anhand der Zugänglichkeit zu den verschiedenen Elementen der Konstruktion gemessen werden.
- III. **Einfachheit der Montage:** Es bedeutet, wie einfach es ist, all die verschiedenen Teile zusammenzubringen. Viele Dinge können dabei eine Rolle spielen und möglicherweise eine Herausforderung darstellen. Zum Beispiel diktierten die Komplexität des Schweißens einiger Materialien oder die Erreichbarkeit aufgrund komplexer Geometrien die Art und Weise, wie die Struktur gebaut wurde, und das Gewicht der einzelnen Teile, was deren Transport schwierig machte. Die Notwendigkeit einer speziellen Ausrüstung ist etwas, das eine einfache Montage verhindert.
- IV. **Multifunktionalität der verwendeten Strukturen:** Es trägt dazu bei, das Gesamtgewicht und die Kosten zu senken, indem ein Teil der Struktur für mehrere Zwecke verwendet wird. Ein Beispiel dafür wäre ein Träger, der für Biege- und Torsionslasten verwendet wird.
- V. **Innovationsgrad:** Der Grad der Innovation bestimmt, wie neu etwas ist. Er lässt sich in Markt-Pull-Innovationen und Technologie-Push-Innovationen unterteilen. Technologie-Push-Innovationen gehen vom Markt aus und werden durch einen konkreten Kundenwunsch initiiert, in diesem Fall einen modularen Ersatzrahmen, der eine Standardtürprüfung ermöglicht. Bei dieser Bewertung werden die geschaffenen Kombinationen, ihre Weiterentwicklung und ihre Fähigkeit, ihren Zweck auf möglichst einfache Weise zu erfüllen, beurteilt.
- VI. **Erforderliche Investitionen (Ersparnis):** Bei den Investitionen handelt es sich um das Geld, das für die Ausrüstung benötigt wird, die zur Herstellung, Verbindung und Reparatur der erforderlichen Teile der Struktur erforderlich ist. Die Investitionen berücksichtigen auch die Komplexität, die durch verschiedene Faktoren wie Material, Verbindungsmethoden und Konstruktionsmethoden verursacht wird, die sich direkt auf Produktion, Montage, Arbeit und Maschinenzeit auswirken. Je niedriger die Investitionen sind, desto mehr Punkte gibt es.
- VII. **Multifunktionalität des Ersatzrahmens, Anpassungsfähigkeit und Erweiterbarkeit:** Der Schwerpunkt liegt auf den künftigen Verwendungsmöglichkeiten des Rahmens. In dieser Arbeit geht es in erster Linie darum, dass ein solcher Rahmen entwickelt wird, dauerhaft ausgelegt ist und die Prüfung von Türen ermöglicht. Türen sind nicht das einzige Anbauteil. Verschiedene andere Komponenten können getestet werden, und diese Bewertung

misst, wie flexibel dieser Rahmen sein kann, um z. B. die Prüfung von Windschutzscheiben zu ermöglichen. Die Leichtigkeit der Flexibilität hängt direkt von der Komplexität ab, die zur Erstellung dieser Struktur verwendet wurde. Komplexität ist gleichbedeutend mit Schwierigkeiten bei der Einführung anderer Teile, die für die Prüfung anderer Anbauteile wie Schmetterlingstüren erforderlich sind.

### 4.2.3 Bewertung der Rahmenlösungskonzepte

Mit Hilfe von Tabelle 5 können die Ideenkombinationen bewertet werden, gefolgt von einem Vergleich der Gesamtsummen der einzelnen Konzepte in Tabelle 6.

Tabelle 5: Bewertung von Ideenkombinationen

Bewertungskriterium	Faktor	Funktion								Summe	
		Konzept	Bauweise	Materialauswahl	Torionssteifigkeitsänderungsparameter	Biegesteifigkeitsänderungsparameter	Anbauteilebefestigung	Rahmen am Pulser Befestigung	Rahmen für Transport Befestigung		
Einfachheit des Aufbaus:	Maximum		2,5	0,25	0,25	0,25	0,25	1,25	0,25	0,25	5
	Erreichte Wert	1.	0,25	0,25	0	0	0	0,25	0,25	0,25	1,25
		2.	0,75	0	0	0	0	0,25	0,25	0,25	1,5
		3.	2,5	0,25	0	0	0	0,25	0,25	0,25	3,5
		4.	0,75	0,25	0	0	0	0,25	0,25	0,25	1,75
		5.	1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	2,5
		6.	1	0	0	0	0	0	0,25	0,25	1,25
		7.	1	0,25	0	0	0	0	0,25	0,25	1,75
		8.	2,5	0	0	0	0	0,25	0,25	0,25	3,25
		9.	1	0,25	0	0	0	0,25	0,25	0,25	2
		10.	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	2,25
		11.	0,75	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	2
		12.	0,25	0,25	0	0	0	0,25	0,25	0,25	1,25
		13.	1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0,25	2,25
		14.	2,5	0,25	0	0	0	0,25	0,25	0,25	3,5
		15.	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,75
Robustheit und Bedarf and routinemäßigen Reparaturen:	Maximum		1	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	5	
	Erreichte Wert	1.	1	1	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	3,5
		2.	1	1	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	3,5
		3.	1	0,75	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	3,75
		4.	1	0,75	0	0	0	0,5	0,5	0,5	3,25
		5.	0,75	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	4,75
		6.	0,75	1	0	0	0	0,5	0,5	0,5	3,25
		7.	0,75	1	0	0	0	0,5	0,5	0,5	3,25
		8.	1	1	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	4
		9.	0,75	1	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	3,75
		10.	1	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	4,25
		11.	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	4,5
		12.	1	1	0	0	0	0,5	0,5	0,5	3,5
		13.	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,5	3,75
		14.	1	1	0	0	0	0,5	0,5	0,5	3,5
		15.	1	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	4,25
Einfachheit der Montage	Maximum		1,5	1,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	5	
	Erreichte Wert	1	0,25	1,25	0	0	0,5	0,5	0,25	2,75	
		2	0,25	0,25	0	0	0	0,5	0,25	1,25	
		3	1,5	0,5	0,25	0,25	0	0,5	0,5	3,5	
		4	0,25	0,75	0	0	0	0,5	0,5	2	
		5	0,75	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	4,25	
		6	0,75	0,25	0	0	0	0,5	0,25	1,75	
		7	0,75	1	0	0	0	0,5	0,5	2,75	

		8	1,5	0,25	0,25	0,25	0	0,5	0,5	3,25
		9	0,75	1	0,25	0,25	0	0,5	0,5	3,25
		10	0,25	0,75	0,5	0,5	0	0,5	0,5	3
		11	0,25	0,25	0,5	0,5	0	0,5	0,5	2,5
		12	0,25	1,25	0	0	0	0,5	0,5	2,5
		13	0,75	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	3,25
		14	1,5	1	0	0	0	0,5	0,5	3,5
		15	1,5	0,75	0,5	0,5	0	0,5	0,5	4,25
<b>Multifunktionalität der verwendeten Strukturen:</b>	Maximum		2,5	0	0,75	0,75	0,5	0,25	0,25	5
	Erreichte Wert	1.	0	0	0,25	0,25	0	0,25	0,25	1
		2.	2,5	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	4
		3.	2	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	3,5
		4.	2,5	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	4
		5.	1	0	0,75	0,75	0,5	0,25	0,25	3,5
		6.	1	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	2,5
		7.	1	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	2,5
		8.	2	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	3,5
		9.	1	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	2,5
		10.	2,5	0	0,75	0,75	0,5	0,25	0,25	5
		11.	2,5	0	0,75	0,75	0,5	0,25	0,25	5
		12.	0	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	1,5
		13.	1	0	0,75	0,75	0,5	0	0,25	3,25
		14.	2	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	3,5
15.	2	0	0,75	0,75	0,5	0,25	0,25	4,5		
<b>Innovationsgrad</b>	Maximum		1	1	0,5	0,5	1	0,25	0,75	5
	Erreichte Wert	1.	0	0	0	0	0	0	0	0
		2.	1	1	0,5	0,5	1	0	0	4
		3.	0,25	0,25	0,5	0,5	1	0	0	3,5
		4.	1	0	0,5	0,5	1	0	0	3
		5.	0,75	0	0	0	0,25	0	0	1
		6.	0,75	1	0,5	0,5	1	0	0	3,75
		7.	0,75	0,25	0,5	0,5	1	0	0	3
		8.	0,25	0,5	0,5	0,5	1	0	0	2,75
		9.	0,75	0	0,5	0,5	1	0	0	2,75
		10.	1	0	0	0	1	0	0	2
		11.	1	1	0	0	1	0	0	3
		12.	0	0	0,5	0,5	1	0	0	2
		13.	0,75	0,25	0	0	1	0,25	0	2,25
		14.	0,25	0,5	0,5	1	0	0,25	0	2,5
15.	0,25	0	0	0	1	0	0	1,25		
<b>Erforderliche Investitionen (Ersparnis):</b>	Maximum		1,5	1,5	0,25	0,25	1	0,25	0,25	5
	Erreichte Wert	1.	1	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	3,5
		2.	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0,5
		3.	1	0,75	0	0	0,25	0,25	0,25	2,5
		4.	0	1,5	0	0	0	0,25	0,25	2
		5.	0,25	1	0,5	0,5	0,75	0,25	0,25	3,5
		6.	0,25	0	0	0	0	0,25	0,25	0,75
		7.	0,25	1	0	0	0	0,25	0,25	1,75
		8.	1	0	0	0	0,25	0,25	0,25	1,75
		9.	0,25	1	0	0	0,25	0,25	0,25	2
		10.	0	1,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	3,25
		11.	0	0	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	1,75
		12.	1	1	0	0	0,25	0,25	0,25	2,75
		13.	0,25	0,75	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	2,75
		14.	1	1	0	0	0	0,25	0,25	2,5
15.	1	1,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	4,25		
<b>Multifunktionalität des Ersatzrahmens, Anpassungsfähigkeit und Erweitbarkeit:</b>	Maximum		1,5	0,25	0,25	0,25	1	1	0,5	5
	Erreichte Wert	1.	0	0,25	0	0	0	1	0	1,25
		2.	1,5	0,25	0	0	1	1	0,5	4,25
		3.	1	0	0	0	1	1	0,5	3,5
		4.	1,5	0,25	0	0	1	1	0,5	4,25
		5.	0,75	0,25	0,25	0,25	1	1	0,5	4
		6.	0,75	0,25	0	0	1	1	0,5	3,5
7.	0,75	0,25	0	0	1	1	0,5	3,5		

		8.	1	0,25	0	0	1	1	0,5	3,75
		9.	0,75	0,25	0	0	1	1	0,5	3,5
		10.	1,5	0,25	0,25	0,25	1	1	0,5	4,75
		11.	1,5	0,25	0,25	0,25	1	1	0,5	4,75
		12.	0	0,25	0	0	1	1	0,5	2,75
		13.	0,75	0	0,25	0,25	1	0,25	0,5	3
		14.	1	0,25	0	0	1	1	0,5	3,75
		15.	1	0,25	0,25	0,25	1	1	0,5	4,25

Tabelle 6: Gesamtbeträge im Vergleich

Idee	Gesamtsumme [Pkt.]
1	13
2	19
3	22,75
4	20,25
5	23,5
6	17
7	18,5
8	22,75
9	19,75
10	24,5
11	23,5
12	16,25
13	20,5
14	22,75
15	24,5

Mit Hilfe der beiden obigen Tabellen wird hier festgestellt, dass die Kombinationen 10 und 15 am vielversprechendsten sind.

Idee 15 ist diejenige, die in dieser Arbeit verfolgt wird. Als Bauweise wird ein Gitterrohrrahmen aus Stahl gewählt. Die Torsionssteifigkeit kann durch Verstärkungselemente von einem niedrigen Wert, der der Torsionssteifigkeit eines Stadtautos entspricht, bis zu einem höheren Wert, der der Torsionssteifigkeit einer Limousine entspricht, variiert werden. Die Verstärkungselemente werden mit Schrauben an der Struktur befestigt. Die gemäß der Anforderungsliste gewünschte Variation der Biegesteifigkeit kann durch Ausschneiden von Elementen erreicht werden. Für die Montage von Standardtüren in verschiedenen Größen wurde ein 3-Punkt-Befestigungssystem gewählt. Der Rahmen sollte auf Pulsern befestigt werden können, dazu 4 FüÙe mit je vier Löchern, die zur Befestigung des Ersatzrahmens auf der Plattform der verschiedenen Pulsern genutzt werden können. Für die Mobilität wird in Idee 15 vorgesehen, eine Struktur auf dem Rahmen zu konstruieren, an der Räder angebracht werden können.

Das vorgeschlagene Drei-Punkte-System ist eine allgemeine Idee; im folgenden Abschnitt wurden weitere Details zu diesem System anhand der VDI 2221 und dem gleichen Bewertungssystem wie in diesem Abschnitt ermittelt.

#### 4.2.4 3-Punkt-Befestigung

Das vorgeschlagene Bewertungssystem bestätigt, dass ein 3-Punkt-System zur Befestigung von Standardtüren am Ersatzrahmen geeignet ist. Abb. 38 zeigt, wo die drei Bereiche dieses Systems liegen. Eine genauere Betrachtung ist erforderlich, um zu definieren, wie die Geometrie innerhalb dieser drei Bereiche aussehen könnte. Wie in 4.2.1 wird die VDI-2221 verwendet, um

systematisch die für die Funktion dieses 3-Punkt-Systems erforderlichen Funktionen und die verfügbaren Lösungsansätze für diese Funktionen zu ermitteln und anschließend verschiedene Kombinationen zu erstellen. Die Struktur der Funktionen und der morphologische Kasten sind in Tabelle 7 und 8 zu sehen.

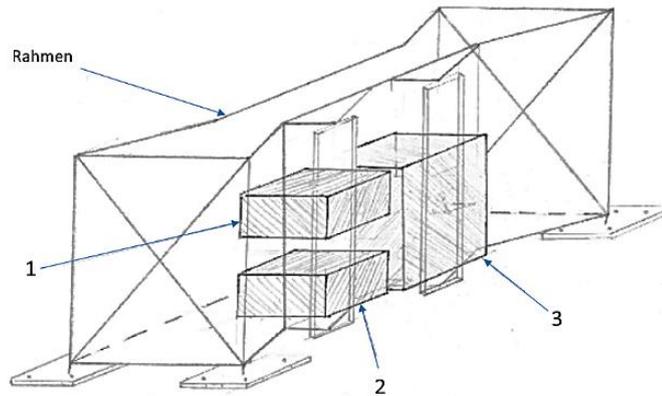


Abbildung 38: 3-Punkt-Befestigungssystem Drahtgeometrie

Tabelle 7: Funktionsstruktur für 3 Punkt Befestigung

	<b>Nebenfunktion</b>	<b>Prinzip Lösung</b>
<b>Hauptfunktion</b>	Befestigungsform	Austauschbarer Platten Modularer Platte Laschen Magnet
	Geometrie Bauweise	Schalenbauweise Gitterrohr Mischbauweise
	2-3 Grad um X-Achse	Drehteller Anschraubpunkte Austauschbarer Befestigungsausrüstung
	2-3 Grad um Y-Achse	Drehteller Anschraubpunkte Austauschbarer Befestigungsausrüstung
	Translation entlang X-Achse	Austauschbarer Platten Modularer Platte Laschen Magnet
	<b>Befestigung von Punkt 2</b>	Befestigungsform
Geometrie Bauweise		Schalenbauweise Gitterrohr Mischbauweise
2-3 Grad um X-Achse		Drehteller Anschraubpunkte Austauschbarer Befestigungsausrüstung
2-3 Grad um Y-Achse		Drehteller Anschraubpunkte Austauschbarer Befestigungsausrüstung

<b>Befestigung von Punkt 3</b>	Translation entlang X-Achse	Austauschbarer Platten Modularer Platte Laschen Magnet
	0-85 Grad um Y-Achse	Verschraubung von Strukturen Verklebung Schweißen von Strukturen Elektrisch bediente Bauteilbewegung Hydraulisch aktivierte Befestigung
	Translation entlang X-Achse	Anschraubpunkte Austauschbarer Befestigungsausrüstung Translatorische Gleitmechanismus
	Translation entlang Z-Achse	Anschraubpunkte Austauschbarer Befestigungsausrüstung Translatorische Gleitmechanismus

Tabelle 8: Morphologische Kästen für 3-Punkt Befestigung

Funktion	Lösung				
Punkt 1: Befestigungsform (für Scharniere)	Austauschbarer Platten	Austauschbarer Gesamtsystem	Modularer Platte/Wand	Laschen	Ankerprofile
Punkt 1: Umgebende Geometrie Bauweise	Schalenbauweise	Gitterrohr	Mischbauweise		
Punkt 1: 2-3 Grad um X-Achse	Drehteller	Anschraubpunkte	Austauschbarer Befestigungsausrüstung	Keine	Gebaut in der geeigneten Position
Punkt 1: 2-3 Grad um Y-Achse	Drehteller	Anschraubpunkte	Austauschbarer Befestigungsausrüstung	Keine	Gebaut in der geeigneten Position
Punkt 1: Translation entlang Z-Achse	Anschraubpunkte/Bestimmte Anschraubpositionen	Austauschbarer Befestigungsausrüstung	Manuelle Translatorische Gleitmechanismus	Keine	
Punkt 2: Befestigungsform (für Scharniere)	Austauschbarer Platten	Austauschbarer Gesamtsystem	Modularer Platten/Wand	Laschen	Ankerprofile
Punkt 2: Umgebende Geometrie Bauweise	Schalenbauweise	Gitterrohr	Mischbauweise		
Punkt 2: 2-3 Grad um X-Achse	Drehteller	Anschraubpunkte	Austauschbarer Befestigungsausrüstung	Keine (schon in der Position)	
Punkt 2: 2-3 Grad um Y-Achse	Drehteller	Anschraubpunkte	Austauschbarer Befestigungsausrüstung	Keine (schon in der Position)	
Punkt 2: Translation entlang Z-Achse	Anschraubpunkte	Austauschbarer Befestigungsausrüstung	Translatorische Gleitmechanismus	Keine	
Punkt 3: Umgebende Geometrie Bauweise	Schalenbauweise	Gitterrohr	Mischbauweise		
Punkt 3: 0-85 Grad um Y-Achse	Verschraubung von Strukturen	Verklebung	Schweißen von Strukturen	Manuelle Mechanismus	Elektrisch oder hydraulisch aktivierte Befestigung
Punkt 3: Translation entlang X-Achse	Anschraubpunkte	Austauschbarer Befestigungsausrüstung	Manuelle Translatorische Gleitmechanismus		
Punkt 3: Translation entlang Z-Achse	1 Anschraubpunkte	3 Austauschbarer Befestigungsausrüstung	4 Translatorische Gleitmechanismus	5 6 7 Positionierungssystem	

Ein Beispiel für das Positionierungssystem und den erwähnten manuellen Mechanismus ist in den Abbildung 39 und Abb. 40 dargestellt.



Einfachheit des Aufbaus:	Max																	
	Erreichte Wert	1.	0,75	0,25	0,5	0,5	1	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5	0,25	0,75	0,5	0,5	8	
Einfachheit des Aufbaus:	Max		1	1	0,5	0,5	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	12	
	Erreichte Wert	2.	1	1	0,5	0,5	1	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5	0,25	0,75	0,5	0,5	9	
	Erreichte Wert	3.	0,25	1	0,5	0,5	1	0,25	0,75	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	6,75	
	Erreichte Wert	4.	1	1	0,25	0,5	0,75	1	1	0,25	0,5	0,25	0,25	0,75	0,25	0,5	8,25	
	Erreichte Wert	5.	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	1	0,25	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25	0,75	0,75	6,5	
	Erreichte Wert	6.	0,75	0,25	0,5	0,5	1	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5	0,25	0,75	0,75	0,75	8,5	
	Erreichte Wert	7.	1	1	0,5	0,5	1	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5	0,25	0,75	0,75	0,75	9,5	
Robustheit und Bedarf und routinemäßigen Reparaturen:	Max																	
	Erreichte Wert	1.	0,75	1	0,5	0,5	1	0,75	1	0,5	0,5	0,5	1	0,75	1	1	10,75	
	Erreichte Wert	2.	0,5	0,25	0,5	0,5	1	0,75	1	0,5	0,5	0,5	1	0,75	1	1	9,75	
	Erreichte Wert	3.	1	0,75	0,5	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	10,25	
	Erreichte Wert	4.	0,5	0,75	0,25	0,5	0,75	0,5	0,75	0,25	0,5	0,25	0,5	0,75	0,5	0,5	7,25	
	Erreichte Wert	5.	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,25	0,25	7,5	
	Erreichte Wert	6.	0,75	1	0,5	0,5	1	0,75	1	0,5	0,5	0,5	1	0,75	0,25	0,25	9,25	
Einfachheit der Montage	Max																	
	Erreichte Wert	1.	0,75	0,25	0,5	0,5	1	0,75	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	6,5	
	Erreichte Wert	2.	0,75	0,5	0,5	0,5	1	0,75	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	6,75	
	Erreichte Wert	3.	0,25	1	0,5	0,5	1	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	6	
	Erreichte Wert	4.	0,75	1	0,5	0,5	0,5	0,75	1	0,5	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	7,5	
	Erreichte Wert	5.	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,75	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,75	0,75	6	
	Erreichte Wert	6.	0,75	0,25	0,5	0,5	1	0,75	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0,5	0,75	0,75	7,5	
Multifunktionalität der verwendeten Strukturen:	Max																	
	Erreichte Wert	1.	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0,25	1	1	1	1	8,25	
	Erreichte Wert	2.	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0,25	1	1	1	1	8,25	
	Erreichte Wert	3.	1	0,75	0	0	0	1	1	0	0	0,25	1	0,25	0,25	0,25	5,75	
	Erreichte Wert	4.	1	0,75	0,25	0,5	0,5	1	0,75	0,25	0,5	0,25	0,25	1	0,25	0,25	7,5	
	Erreichte Wert	5.	1	0,25	0,5	0,5	0,25	1	0,25	0,5	0,5	1	0,25	0,25	1	1	8,25	
	Erreichte Wert	6.	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0,25	1	1	1	1	8,25	
Innovationsgrad	Max																	
	Erreichte Wert	1.	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0,5	0,25	0,25	7	
	Erreichte Wert	2.	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0,5	0,25	0,25	6	
	Erreichte Wert	3.	0,25	0,25	0	0	0	0,25	1	0	0	1	1	1	1	0,5	6,25	
	Erreichte Wert	4.	1	0,25	0,5	0	0,75	1	0,25	0,5	0	1	0,75	0,5	1	1	8,5	
	Erreichte Wert	5.	0,25	0,75	0	0	1	1	0,75	0	0	0,25	0,75	1	1	1	7,75	
	Erreichte Wert	6.	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0,5	1	1	8,5	
Erforderliche Investitionen (Ersparnis)	Max																	
	Erreichte Wert	1.	0,75	0	0,5	0,5	1	0,5	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	1	1	1	8	
	Erreichte Wert	2.	1	1	0	0	1	0,5	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	1	1	1	8,25	
	Erreichte Wert	3.	0	1	0,5	0,5	1	0	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	5,75	
	Erreichte Wert	4.	1	1	0	0,5	0,25	1	1	0	0,5	0	0	1	0,25	0,25	6,75	
Erreichte Wert	5.	0	0	0,5	0,5	0,25	1	0	0,5	0,5	1	0	0,25	0,25	0,25	5		

		6.	0,75	0	0,5	0,5	1	0,5	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	1	0,25	0,25	6,5
		7.	1	1	0	0	1	0,5	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	1	0,25	0,25	6,75

Tabelle 10: Gesamtbeträge im Vergleich

Idee	Gesamtsumme [Pkt.]
1	48,5
2	48
3	40,75
4	45,75
5	41
6	48,5
7	48

Mit Hilfe der beiden obigen Tabellen wird hier festgestellt, dass die Kombinationen 1 und 6 am vielversprechendsten sind.

In dieser Arbeit wird die Idee 6 verfolgt. Bei dieser Idee werden die Punkte 1 und 2 des Dreipunkt-befestigungssystems, deren Lage aus Abbildung 38 ersichtlich ist, vertikal zur Z-Achse aufgebaut. Für die Montage verschiedener Scharniere, die sich in der Regel von Fahrzeugtür zu Fahrzeugtür unterscheiden, wird an den Punkten 1 und 2 des 3-Punkt-Befestigungssystems ein modulares Element mit austauschbaren Platten eingesetzt, auf denen die Scharniere montiert werden. Punkt 1 des 3-Punkt-Befestigungssystems ist fest, während Punkt 2 entlang der Z-Achse translatorisch ist. Punkt 3 des 3-Punkt-Befestigungssystems ist in X- Y- und Z-Richtung beweglich und um die Y-Achse drehbar. Punkt 3 des 3-Punkt-Befestigungssystems bewegt sich translatorisch mit Hilfe von elektrisch angetriebenen Schienen (Positionierungssystem) und dreht sich manuell um die Y-Achse.

#### 4.2.6 Skizzen und Ideensammlung

Die Arbeit ist an einem Punkt angelangt, an dem die Kombinationen festgelegt sind und Details benötigt werden, um einen realistischen dreidimensionalen und funktionierenden Ersatzrahmen zu konstruieren. In diesem Teil der Arbeit werden also Skizzen der unterschiedliche Teilsysteme, wie die manuelle Drehmechanismus angefertigt, um verschiedene Komponenten der Struktur zu beschreiben.

Begonnen wird mit der Detaillierung des Türbefestigungssystem, auch 3-Punkt-Befestigungssystem, genannt. Abb. 41 beschreibt Punkt 1 mit modularen Platten, die die Montage verschiedener Scharniere ermöglichen. Die Montage verschiedener Scharniere wird durch austauschbare Platten erleichtert, die sich in erster Linie durch die Position der Bohrungen unterscheiden siehe Abb.41. Die Abb. 42 hingegen zeigt Punkt 2 des 3-Punkt-Systems; sie stellt dar, wie eine modulare Platte in Kombination mit einem Translationssystem aussehen würde. Ein elektrischer Gewindetrieb kann die Translationsbewegung in Z-Richtung ausführen und die vertikale Last, die durch die Türprüfung entsteht, aufnehmen.

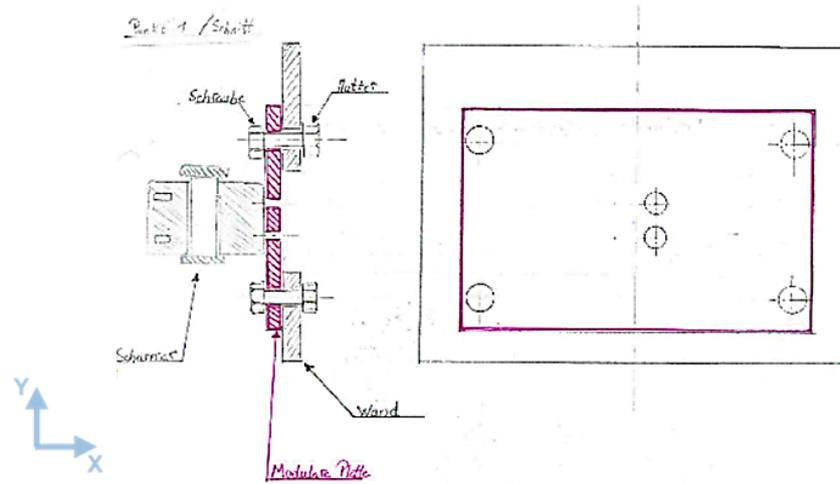


Abbildung 41: Punkt 1 des 3-Punkt-Befestigungssystems mögliche Lösung

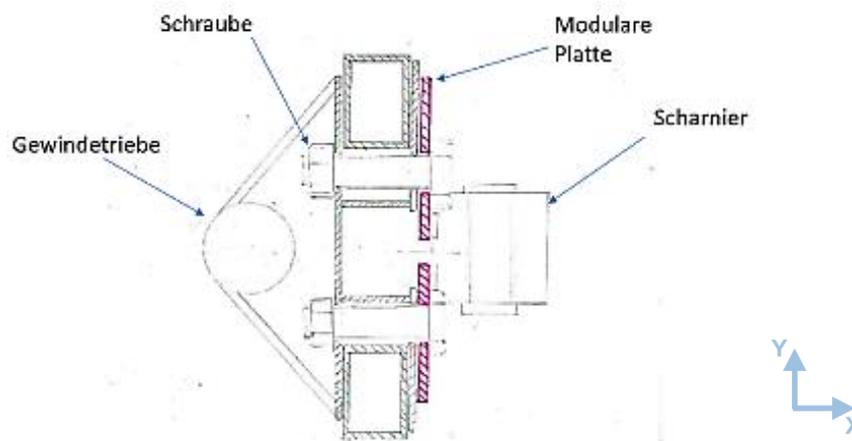


Abbildung 42: Punkt 2 des 3-Punkt-Befestigungssystems mögliche Lösung

Punkt 3 der 3-Punkt-Befestigung sollte um die Y-Achse drehbar sein, damit das Verriegelungssystem (u-Profil) mitgedreht werden kann und eine genaue Positionierung möglich ist, damit die Türen unabhängig von der Position des Verriegelungssystems montiert werden können. Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen zwei verschiedene mögliche Lösungen für den Drehmechanismus.

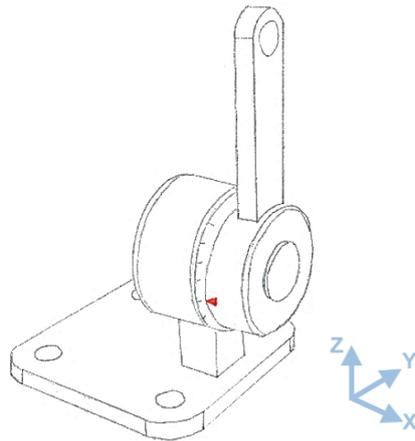


Abbildung 43: manueller Drehmechanismus Vorschlag 1

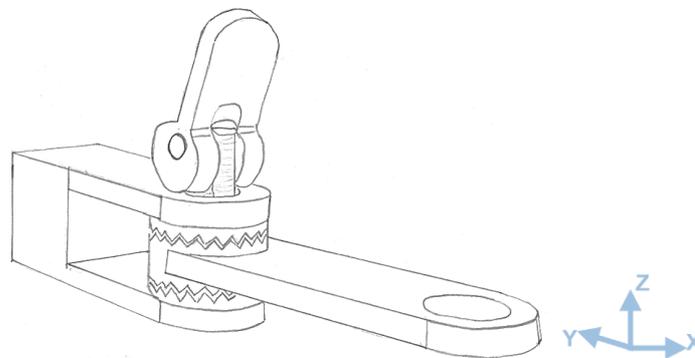


Abbildung 44: manueller Drehmechanismus Vorschlag 2

Um die Modularität zu ermöglichen ist das lineare Positionierungssystem entstanden, siehe Abbildung 45. Wie zuvor festgelegt, wird ein lineares Positionierungssystem definiert, dessen primäre Aufgabe darin besteht, den Punkt 3 des 3-Punkt-Befestigungssystem in X- und Z-Richtung translatorisch zu bewegen, was die Modularität des Rahmens ermöglicht, indem die Längenänderung der Türbreiten berücksichtigt wird. Die Modularität geht hier noch ein Stück weiter, indem das lineare Positionierungssystem in das mechanische System des Rahmens integriert wird, um einen Teil der auf den Ersatzrahmen ausgeübten Last aufzufangen und die mechanische Leistung der Struktur zu stärken.

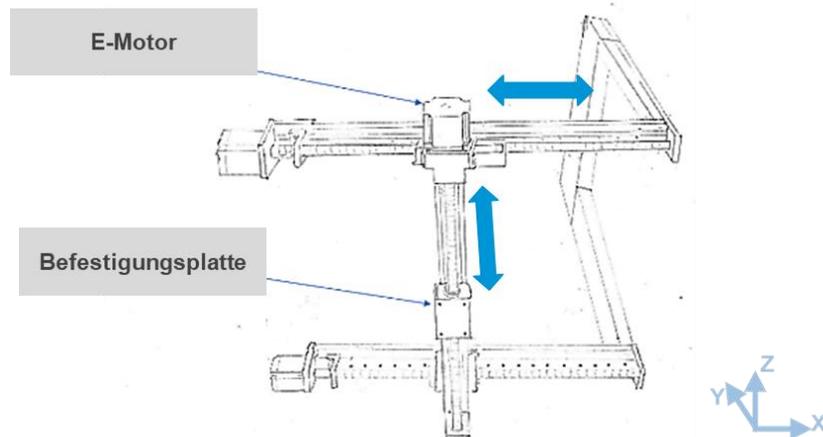


Abbildung 45: lineares Positionierungssystem

Je nach Aufgabenstellung sollte die Struktur in der Lage sein, ihre Steifigkeit zu verändern, insbesondere die Torsionssteifigkeit. Abb.46 stellt eine Idee dafür vor. Die Idee basiert im Wesentlichen darauf, die gesamte Geometrie der Struktur zu verändern, indem eine Strukturkomponente in x-Richtung verschoben wird, wodurch sich die Gesamtlänge verringert, was zu einer Änderung der Steifigkeiten führt. Diese Idee wurde aufgrund der hohen Komplexität, die mit der korrekten Ausführung verbunden ist, nicht weiterverfolgt. Außerdem sind viele bewegliche Teile damit verbunden.

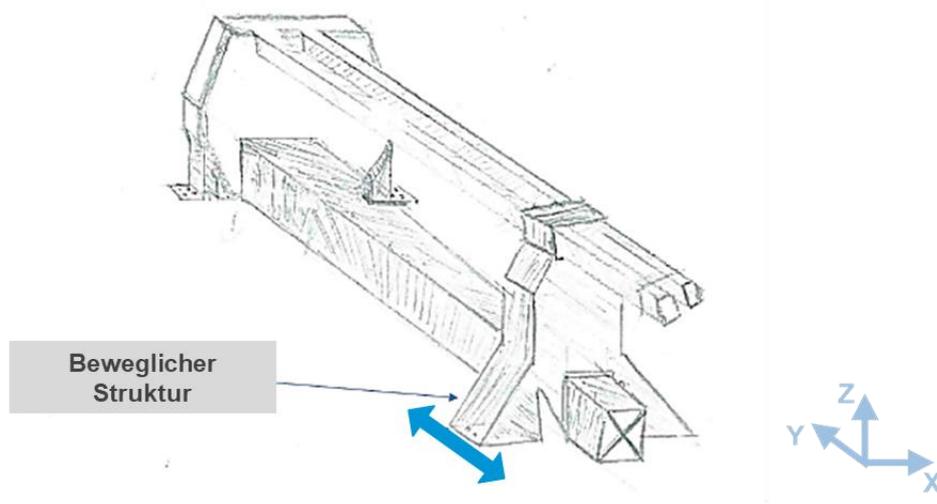


Abbildung 46: Vorschlag für ein Rahmenkonzept mit variabler Steifigkeit durch Umgestaltung der Struktur

Abbildung 47, Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen zwei andere mögliche Lösungen für die Geometrie. Abbildung 47 ist eine Struktur mit einem Innenleben aus diamantförmigen Stäben und Trägern, die zu einer hohen Torsionssteifigkeit beitragen.

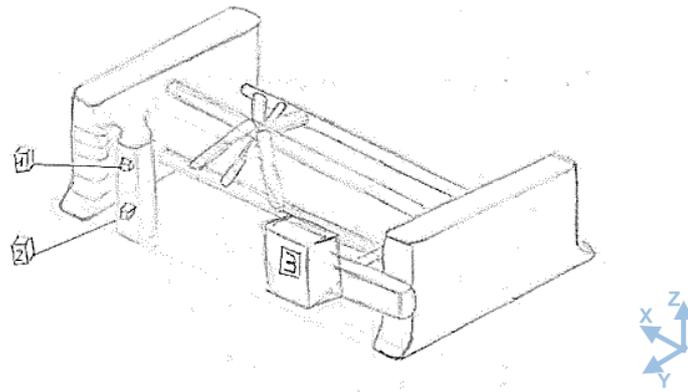


Abbildung 47: Vorschlag für ein Rahmenkonzept

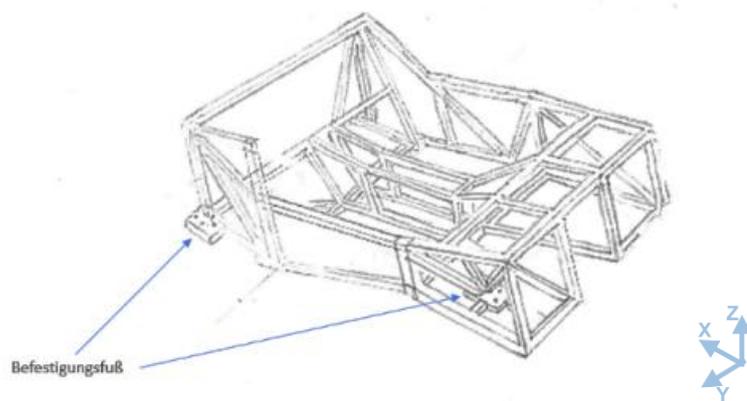


Abbildung 48: Rennwagen inspiriertes Rahmenkonzept

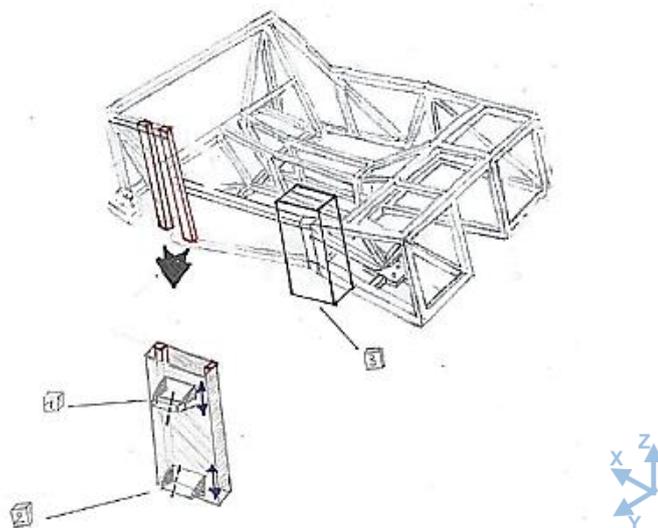


Abbildung 49: Rennwagen inspiriertes Rahmenkonzept mit 3-Punkt-Befestigungssystem

### 4.3 CAD

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der geometrischen Lösungsfindung für das Ersatzrahmen. Beim Entwurf einer Struktur geht es darum, eine möglichst genaue geometrische Lösung zu finden. Der optimale geometrische Entwurf erfüllt die Anforderungen an die Struktur bzw. hält dem Nachweis auf sogenannte Dauerfestigkeit stand.

Ein allgemeiner Lastpfad ist erforderlich, um eine generelle Vorstellung von den für jedes Struktursegment erforderlichen Elementen zu erhalten. Der Lastpfad ermöglicht eine individuelle Konstruktion der Teile, um die gewünschten Steifigkeiten zu erreichen. Zum besseren Verständnis der Struktur und des Lastpfads der Bewegung wurde ein vereinfachtes Aufteilungsdiagramm der Struktur erstellt, das in den folgenden Abbildungen dargestellt ist. Insgesamt sind es sieben vereinfachte Segmente. Die Segmente 1 und 4 stellen die äußersten Bereiche der Struktur dar. Die Segmente 5 und 6 stellen die Füße der Struktur dar, durch die z. B. die Torsionskräfte geleitet werden. Segment 2 stellt den Teil der Struktur dar, der aufgrund einer später erwähnten spezifischen Prüfung einer Biegung ausgesetzt ist. Und Segment 7 stellt den Teil der Struktur dar, auf dem die Tür montiert ist, die dann mit dem Körper der Struktur, der durch Segment 3 gekennzeichnet ist, verbunden ist.

**Lastfall Torsion:** Wie beim vorherigen Lastfall konzentriert sich diese Last auf die geometrischen Kästen 1, 2, 3 und 4, wie in Abb. 50 dargestellt, die als aussteifende Unterkonstruktionen dienen. In den Feldern 5 und 6 werden die Lasten in vertikaler z-Richtung eingeleitet, um das Torsionsmoment zu erzeugen.

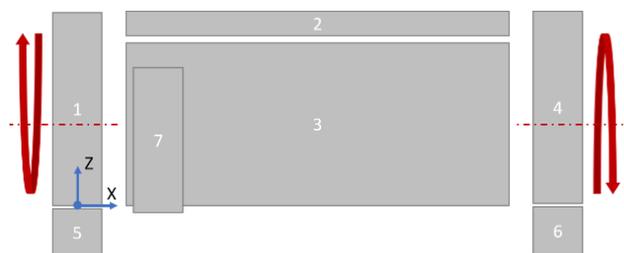


Abbildung 50: Lastfall Torsion Ansicht von der Seite

**Lastfall Türrahmensteifigkeitstest und Türüberdrückung.** Diese Last konzentriert sich auf den geometrischen Kasten 7, wie in Abb. 51 dargestellt, der die Punkte 1 und 2 des 3-Punkt-Befestigungssystems umfasst. Der Lastfall betrifft auch das Segment 3. Siehe Punkt 4 in Abbildung 56.

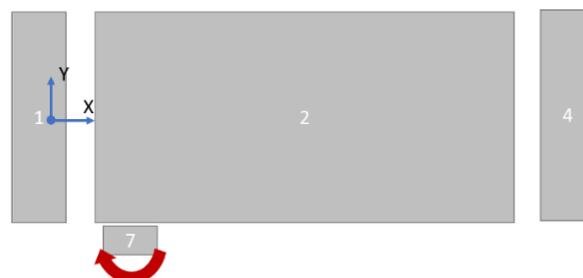


Abbildung 51: Türrahmensteifigkeitstest Ansicht von oben

**Lastfall** Türabsenkung. Wie beim vorherigen Lastfall konzentriert sich diese Last auf den geometrischen Kasten 7, wie in Abb. 52 dargestellt, der die Punkte 1 und 2 des 3-Punkt-Befestigungssystems umfasst. Der Lastfall betrifft auch das Feld 2. Siehe Punkt 4 in Abbildung 56.

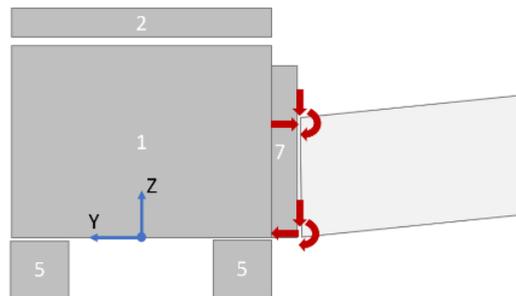


Abbildung 52: Türabsenkung Ansicht von vorne

**Lastfall** Biegung. Wie beim Lastfall Torsion konzentriert sich diese Last auf die geometrischen Felder 2 und 3, wobei die vertikale Kraft auf Feld 2 wirkt, wie in Abb. 53 dargestellt. 5 und 6 sind die Stellen, an denen die Struktur am Boden befestigt ist. Für diesen Lastfall wäre ein Teil mit quadratischem Querschnitt für die Biegebeanspruchung des Segments 2 geeignet, siehe Abbildung 54. Siehe Punkte 1 und 3 in Abbildung 56.

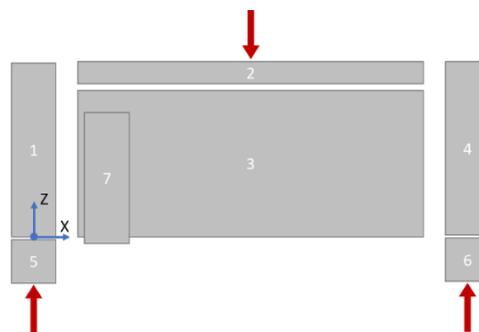


Abbildung 53: Lastfall Biegung Ansicht von der Seite

Als Ergebnis der Analyse der vorangegangenen Lastfälle wird ein CAD-Modell erstellt, wie in Abbildung 54 zu sehen ist. Abbildung 54 zeigt auch die in jedem Segment durchgeführten Querschnitte. Die Variablen der gezeigten Querschnitte können variiert werden, z. B. Längen, Dicken und Höhen. Diese Variation ist die Grundlage für die folgenden Optimierungsprozesse.

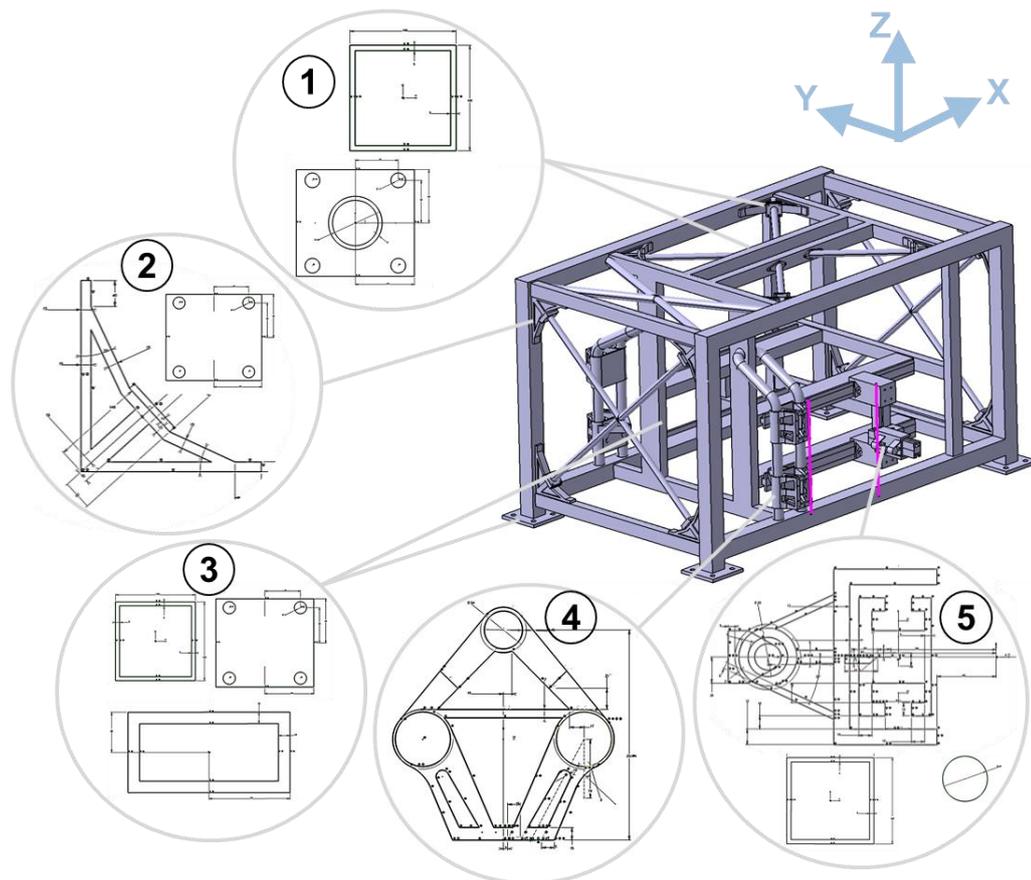


Abbildung 54: Die Querschnitte der Segmente

Es muss ein Optimierungsprozess initiiert werden, um die Torsionssteifigkeit eines Stadtautos und einer Limousine zu erreichen, sowie die anderen Ziele, die zuvor in der Anforderungsliste festgelegt wurden. Um den Prozess effizient zu gestalten, wird die Struktur einschließlich ihrer Verstärkungselemente durch Variation der Parameter in jedem der in Abbildung 54 dargestellten Querschnitte optimiert. Sobald vielversprechende Änderungen an der gesamten Struktur einschließlich der Verstärkungselemente vorgenommen wurden, werden zwei FEM-Analysen durchgeführt, einmal mit und einmal ohne die Verstärkungselemente der Struktur. Die Torsionssteifigkeiten werden dann mit Hilfe der Ergebnisse aus den FEM-Analysen berechnet. Die berechneten Torsionssteifigkeiten werden dann mit den Torsionssteifigkeiten einer Limousine und eines Stadtautos verglichen. Die Torsionssteifigkeit der Struktur mit den Verstärkungselementen sollte ungefähr innerhalb der Torsionssteifigkeitswerte einer Limousine liegen. Ohne die Verstärkungselemente sollte die Torsionssteifigkeit ungefähr im Bereich der Torsionssteifigkeit eines Stadtautos liegen. Angenommen, die berechneten Torsionssteifigkeiten erreichen nicht das Ziel. In diesem Fall wird die Struktur einer weiteren Optimierung unterzogen, die in einigen Fällen auch die Optimierung der Verstärkungselemente einschließt, und die so optimierte Struktur mit den Verstärkungselementen wird erneut einer FEM-Analyse unterzogen, wobei Torsion als Lastfall verwendet wird. Die Verstärkungselemente werden aus der optimierten Struktur entfernt, und sie wird derselben FEM-Analyse unterzogen; anhand der Ergebnisse der beiden FEM-Analysen, d.h. desselben Lastfalls, derselben optimierten Struktur, einer mit und einer ohne Verstärkungselemente, können die Torsionssteifigkeiten berechnet werden. Nach der Berechnung werden sie mit den Torsionssteifigkeiten eines Stadtautos und einer Limousine verglichen. Bei der Optimierung werden auch das Gewicht und einige fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt. Während des Optimierungsprozesses wird die Auswirkung der Änderung der Parameter sowie des Ein- und

Ausbaus der Verstärkungen auf die Strukturleistung ermittelt. Auf diese Weise entsteht eine direkte Beziehung zwischen den Entwurfsvariablen und der Reaktion der Struktur.

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung der Struktur, einschließlich der Parameteränderungen und der für die Steifigkeitsmodularität verantwortlichen strukturellen Verstärkungen, ausgehend vom Startentwurf, in Form von CAD-Bildern dargestellt. Der FEM-Analyseprozess und die Ergebnisse werden im darauffolgenden Abschnitt dargestellt und diskutiert.

### 4.3.1 Modell 1

Das erste Modell legt den zu optimierenden Grundentwurf fest. Mit Hilfe der bereits erwähnten Unterteilungen wurde jedes Strukturelement so ausgelegt, dass es die einwirkenden Kräfte aufnehmen und den vorgesehenen Zweck erfüllen kann. Aus der Aufgabenstellung heraus entstehen 3 Schwerpunkte, die konstruktiv berücksichtigt werden sollen, wie in Abb. 55 dargestellt.

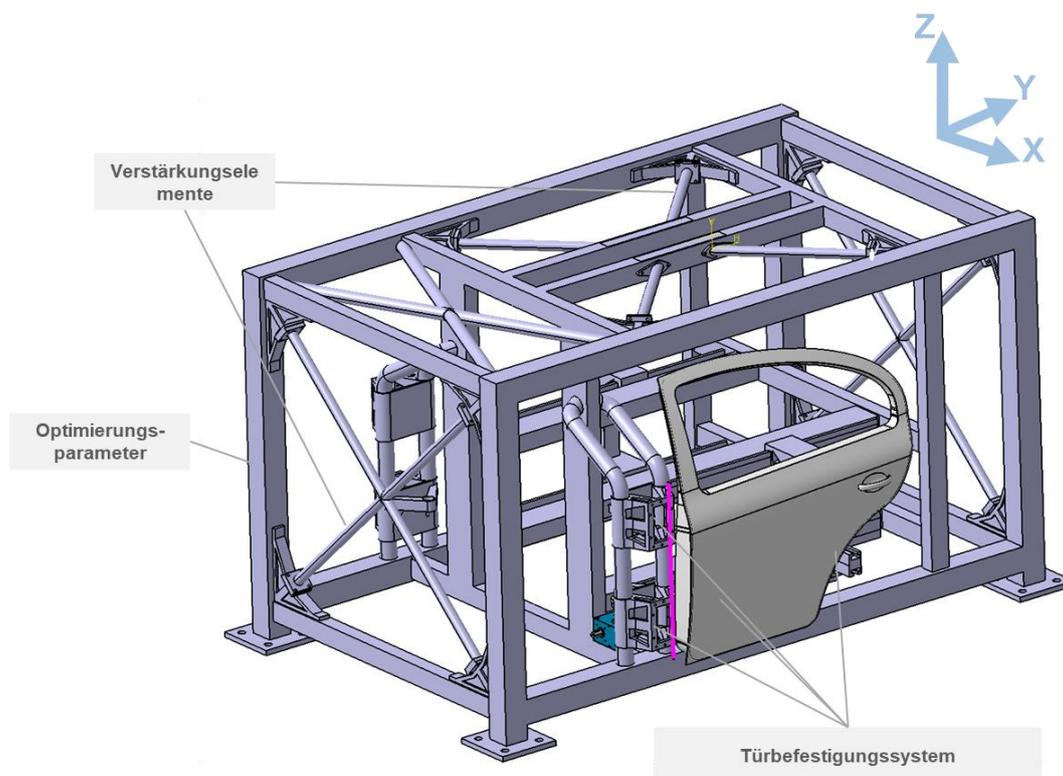


Abbildung 55: Gesamt CAD System

Eines der drei Schwerpunkte ist das Anbauteil Tür oder, wie es früher genannt wurde, das 3-Punkt-Befestigungssystem. Siehe Abb. 56. Das Türbefestigungssystem besteht aus 3 Befestigungspunkte. Die Punkte 1 und 2 bestehen aus einem Gussteil mit Bohrungen an den Kanten, die zur Außenseite der Struktur zeigen, um die Montage verschiedener Platten mit Schrauben zu ermöglichen. Die Modularität der Platten ermöglicht die Montage verschiedener Scharniere, wie in Abb. 57 zu sehen.

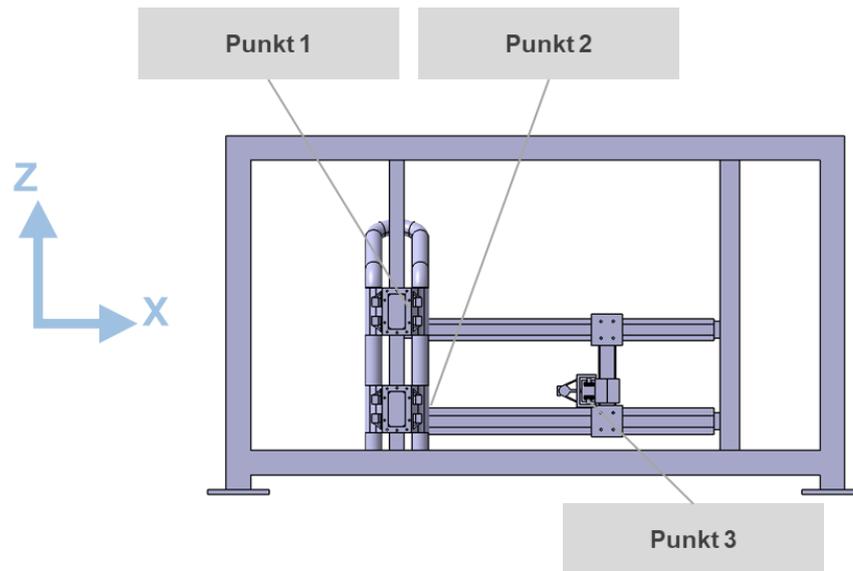


Abbildung 56:3-Punkt Befestigungssystem

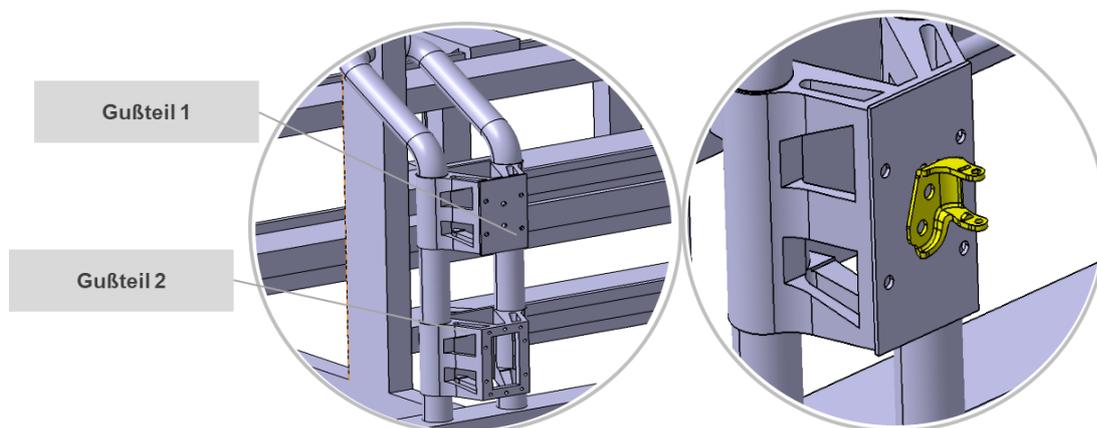


Abbildung 57: Punkt 1 und 2 des 3-Punkt Befestigungssystem

Die beiden Gußteile, Gußteil 1 und Gußteil 2, siehe Abb. 57, werden dann an einem rohrförmigen Teil befestigt, das an zwei verschiedenen Stellen mit der Hauptstruktur verbunden ist. Das Gussteil 2, ist auf einem Kugellager montiert und ermöglicht so eine translatorische Bewegung in Z-Richtung; Gußteil 1 ist fest. Das Rohr verläuft vertikal und winkelt sich dann in die Struktur ein, um eine freie Zone für den Türbogen zu schaffen, wenn er montiert ist, wie in Abbildung 58 dargestellt.

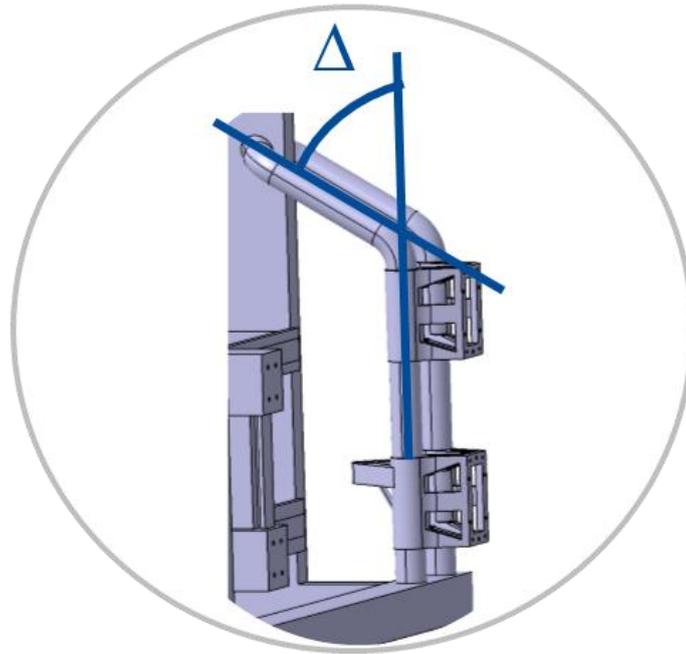


Abbildung 58: Rohrverlauf

Punkt 3 des 3-Punkt-Befestigungssystems hat neben der Befestigung des hinteren Endes der Tür mit einem Schlosssystem, das im Abschnitt über die Anbauteile vorgestellt wurde, hauptsächlich vier Funktionen: Verschiebung in Z-Richtung, Verschiebung in Y-Richtung, Verschiebung in X-Richtung und Drehung des Schlosshakens. Dies würde es ermöglichen, verschiedene Standardtüren mit unterschiedlichen Längen innerhalb der zuvor festgelegten Grenzen und Verriegelungsspalte zu verwenden. Die Lage der Verriegelungsspalte ist von Tür zu Tür unterschiedlich; X, Y, Z und Drehung sind nicht festgelegt, der Winkel zur Z-Richtung beträgt 90 Grad.

Drei Motoren, die so genannten Black Boxes, sind auf Schienen montiert, um die Translationsbewegungen anzutreiben. Die Schienen sind modular aufgebaut; sie dienen nicht nur als Schienen für Translationsbewegungen, sondern haben auch einen mechanischen Leistungswert. Sie haben einen mechanischen Wert, der diese Struktur auszeichnet. In dieser Arbeit wurde der Seitencrashtest bei der Konstruktion der Struktur nicht im Detail berücksichtigt, aber die Verwendung solcher Schienen würde sich bei einer späteren Entwicklung als effizient erweisen, da sie der Struktur die nötige Grundlage bieten, um Seitencrashes an der Tür zu widerstehen. Das heißt, dass sie mehrere Zwecke erfüllen können, siehe Abb. 59 und Abb. 60.

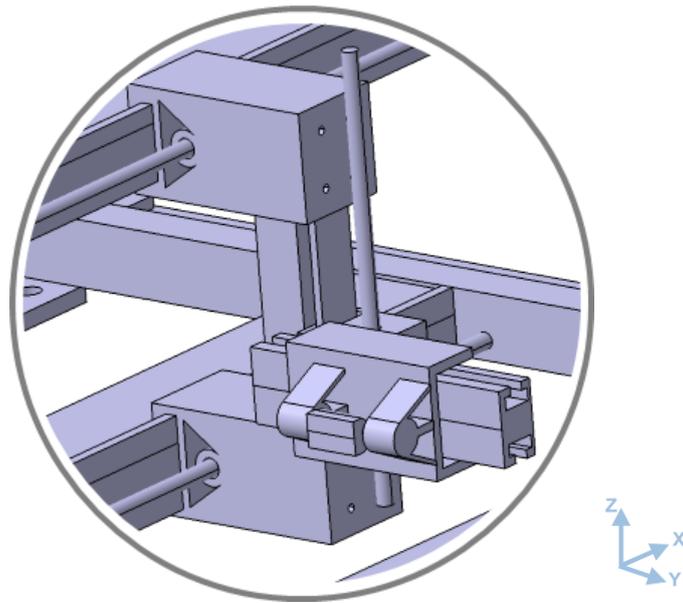


Abbildung 59: Punkt 3 des 3-Punkt Befestigungssystem

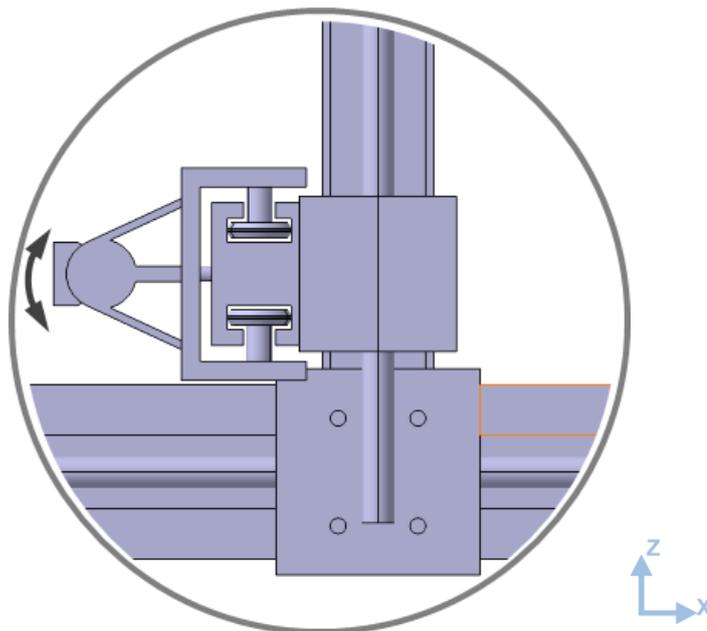


Abbildung 60: Punkt 1 und 2 des 3-Punkt Befestigungssystem XZ-Ansicht

In dem in Abb. 61 dargestellten Schnitt ist das Innenleben der Schiene zu sehen. Es besteht aus inneren Rädern, die helfen, Lasten aufzunehmen und die Translationsbewegung zu stabilisieren.

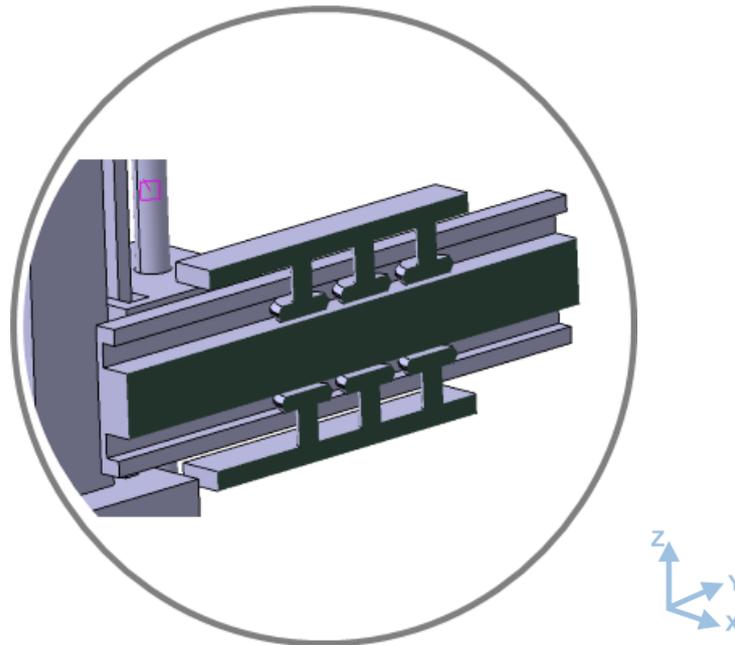


Abbildung 61: Durchschnitt von Punkt 3 des 3-Punkt-Systems

Die Struktur hat einen Hebmechanismus, der an Punkt 2 des 3-Punkt-Befestigungssystems konstruiert ist. Der Hebmechanismus spielt eine Rolle beim Anheben von Punkt 2 des 3-Punkt-Systems und bietet eine mechanische Unterstützung in Z-Richtung. Wie bereits erwähnt, besteht Punkt 2 aus einem Gussteil, das auf einem rohrförmigen Teil montiert ist, zwischen denen sich ein Kugellager befindet. Das Gussteil ist ähnlich, aber nicht identisch mit dem Gussteil von Punkt 1; der Unterschied zwischen ihnen ist das hintere Ende, wo das von Punkt 2 eine zusätzliche Geometrie aufweist. Diese zusätzliche Geometrie dient als Haltepunkt für die Positionierung des Schneckenrads, wie in Abb. 62 dargestellt. Das Getriebe kann entweder elektrisch oder mechanisch betätigt werden; es schiebt Punkt-2 nach oben und nach unten, wenn es eingesetzt wird, um den Abstand zwischen Punkt-2 und -1 zu verkürzen oder zu verlängern; dadurch können Standardtüren unabhängig vom vertikalen Abstand (in Z-Richtung) zwischen ihren Scharnieren montiert werden. Im Falle einer vertikalen Belastung, wie sie durch das Absenken der Tür verursacht wird, ist das Spindelhubelement dazu da, die entgegengesetzte Kraft 'F' in Z-Richtung auszuüben; so hält es das Modell in seiner Position. Der vertikale Abstand zwischen den beiden Endpositionen der Scharniere kann zwischen 200 und 430 mm variiert werden.

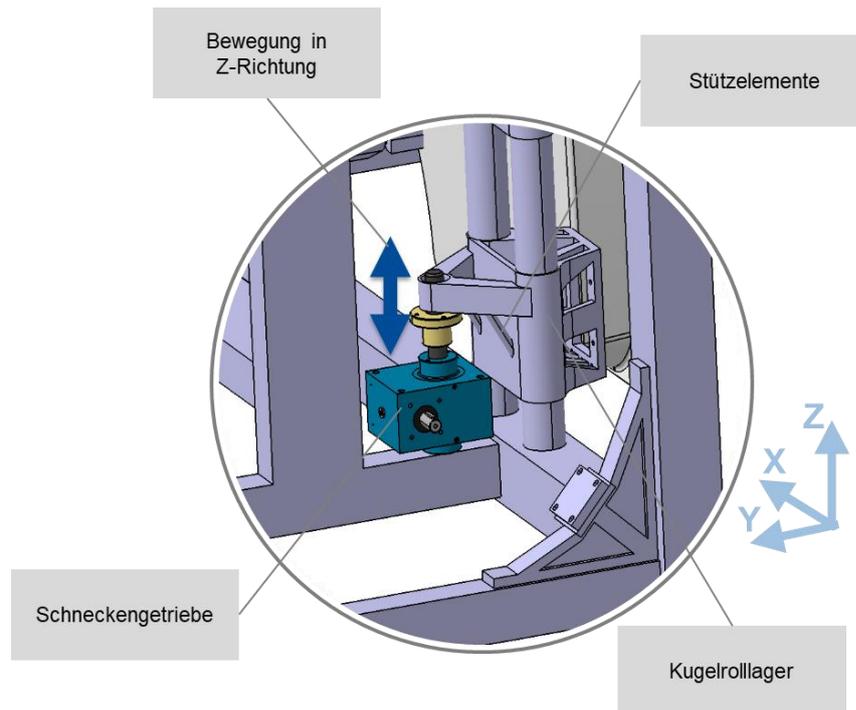


Abbildung 62: Hebmechanismus

Ein weiterer Teil des 3-Punkt-Befestigungssystems ist die Scharnierachse, wie in Abbildung 54 (violett gefärbt) dargestellt. Die Auswertung der durchgeführten Kombinationen ergab, dass die Achse der Scharniere vertikal, parallel zur Z-Richtung verläuft. Obwohl die Achsen an realen Autos normalerweise schräg angebracht sind, wie zuvor beschrieben, macht eine vertikale Achse die Konstruktion der Struktur einfacher und robuster. Und später, während der Testphase der Türen, würden 2 Grad Winkel weniger keinen Unterschied bei den Endergebnissen machen.

Das Dritte Schwerpunkt ist die Verstärkungselemente, wie in Abb. 55 gezeigt. Sie gewährleisten die Modularität der Steifigkeit der Struktur. Sobald der Ersatzrahmen optimiert ist, um die niedrigere Ziel-Torsionssteifigkeit zu erreichen, werden die Verstärkungen hinzugefügt, um die Torsionssteifigkeit zu erhöhen und das höhere Ziel zu erreichen. Der erste Entwurf - Modell 1 – hat mehrere Verstärkungselemente, die individuell optimiert werden können. Der erste Vorschlag ist jedoch nicht der endgültige, da eine genauere Betrachtung mit Hilfe von FEM-Berechnungen erforderlich ist, um die Menge, die Eigenschaften und die Wirkung der einzelnen Verstärkungselemente auf die gesamte Struktur zu bestimmen. Die vorgeschlagenen Verstärkungselemente sind in Abb. 63 zu sehen.

Die Verstärkungen bestehen aus vier Komponenten. Mit später festgelegten Parametern werden die Eckaussteifungen an die Konstruktion geschweißt. Die Versteifungsecken dienen auch als Basis für die anzuschraubenden Diagonalversteifungen. Die diagonalen Aussteifungsstäbe werden auf die Eckaussteifungen geschraubt. Die Eckaussteifungen sind auch auf dem Dach der Konstruktion zu sehen, zusammen mit den Diagonalaussteifungen, die denen an den Seiten des Rahmens ähnlich sind. Die letzte Komponente sind die aussteifenden Wände, die in 3.4 als Rippen bezeichnet werden und neben der Aussteifung noch weitere Funktionen haben. Die Rippen dienen auch als Struktur für die Schienen und die Rohrteile, an die sie geschweißt werden. Siehe Abb.63.

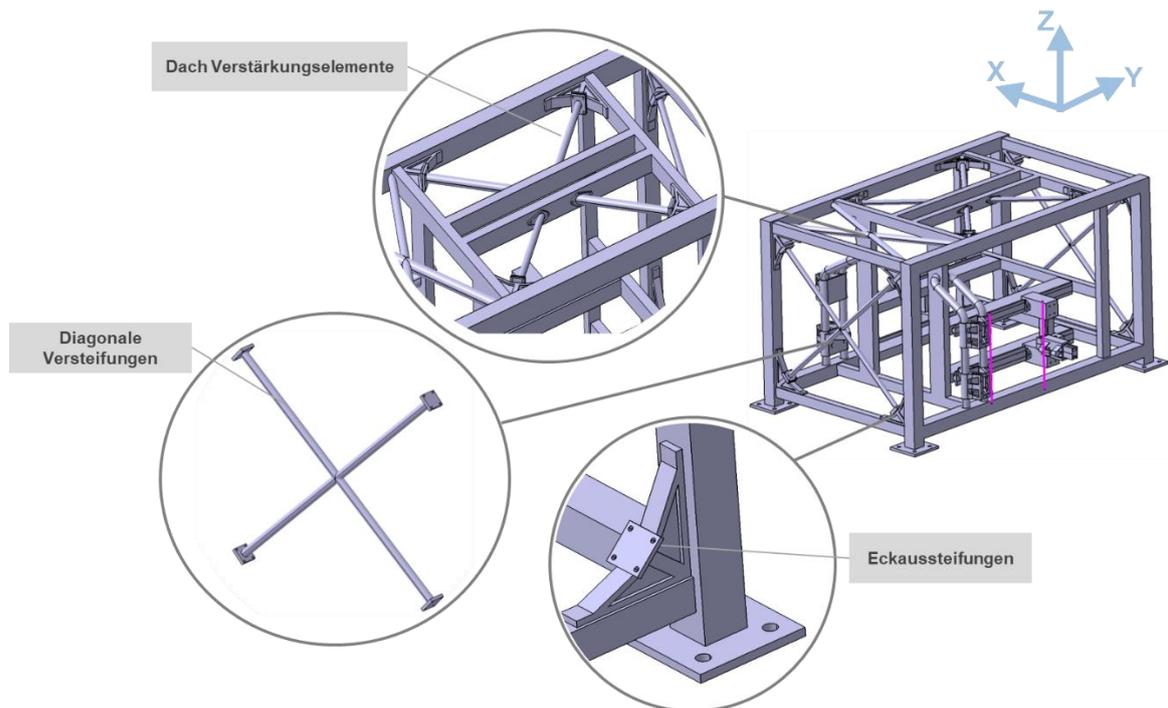


Abbildung 63: Verstärkungselemente

Das letzte Schwerpunkt ist die Optimierungsparameter, siehe Abb. 55, die darüber entscheiden, wie die Geometrie gestaltet wird. Sie stehen in direktem Zusammenhang mit der mechanischen Leistung und können das Verhalten der Struktur unter den verschiedenen Belastungen bestimmen. Aufgrund der großen Anzahl geometrischer Teile in dieser Struktur müssen verständlicherweise viele Parameter bestimmt und optimiert werden. Abbildung 54 vereinfacht diese und unterteilt sie in fünf Bilder. Bild 1 zeigt die zentralen Balken, bei denen Höhe, Breite und Dicke jedes Elements als Variable betrachtet werden, ebenso wie die Basis der Diagonalstäbe, die parallel dazu Länge, Breite, Radius und Dicke als Variablen haben. Bild 2 zeigt die Eckaussteifungen mit ihren Variablen und den Fußpunkten der diagonalen Stäbe, die an der Seite der Struktur angebracht sind. Bild 3 ist ähnlich wie Bild 1 und zeigt die Variablen wie Höhe, Breite und Dicke, die zu den Balken Querschnitt gehören. Bild 4 gehört zum gegossenen Teil von Punkt 2 des 3-Punkt System mit all seinen Variablen; der Guss von Punkt 1 des 3-Punkt System wurde nicht gezeigt, da er fast identisch mit dem von Punkt 2 des 3-Punkt System ist.

Das Gewicht des ersten Modells, einschließlich der Verstärkungen, beträgt 1189 [kg].

Die oben genannten Optimierungsparameter sind mögliche Optimierungsziele, die darauf abzielen, die zuvor festgelegte Zielsteifigkeit zu erreichen. Um dies zu testen, wurden mehrere FEM-Berechnungen durchgeführt, die im Abschnitt FEM Modellbildung und Analysen zu sehen sind, siehe Abb. 54.

#### 4.3.2 Modell 2

Die Schwachstellen des Modells werden anhand der FEM-Analysen von Modell 1-FEM identifiziert. Die erhöhte Torsionssteifigkeit, die den Zielbereich deutlich überschreitet, steht im Mittelpunkt. Als Schlussfolgerung aus der FE-Analyse des Modells 1-FEM vorgenommen. Die wichtigsten Änderungen betreffen die Dicke der Träger, die im Durchschnitt um 0,5 mm abnimmt, während der Längsträger um 0,25 mm an Dicke zunimmt. Darüber hinaus wurden die

Eckaussteifungen um etwa 15-20 % vergrößert. Abb.64 und Abb.65 zeigt das CAD-Modell von Modell 2, einmal mit Verstärkungselemente, Model 2-a und einmal ohne Verstärkungselemente, Model 2-b. Diagonale Stäbe im vorderen oberen Teil der Struktur wurden ebenfalls als Verstärkung eingeführt.

Für den Rest der Arbeit werden Modelle mit Verstärkungselementen, die eine Torsionssteifigkeit einer Limousine haben sollen, mit dem Buchstaben a gekennzeichnet. Und Modelle ohne Verstärkungselemente, die die Torsionssteifigkeit eines Stadtautos haben sollen, werden mit dem Buchstaben b gekennzeichnet, siehe Abb. 64 und Abb. 65.

Das Gewicht des Modells mit den Verstärkungselementen beträgt 1312,98 [kg], während es ohne die Verstärkungen 1276,63 [kg] beträgt.

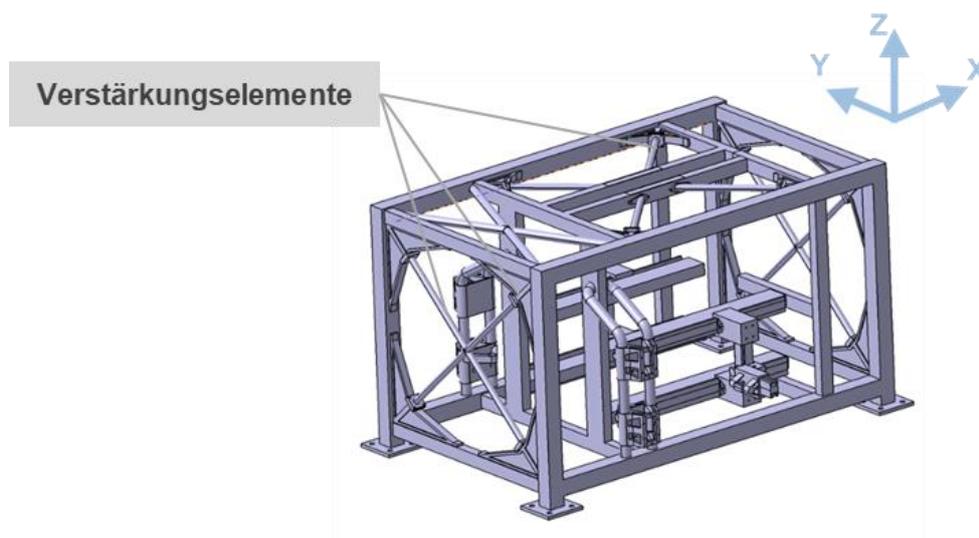


Abbildung 64: Modell 2-a CAD mit Verstärkungselemente, siehe auch Abb. 63

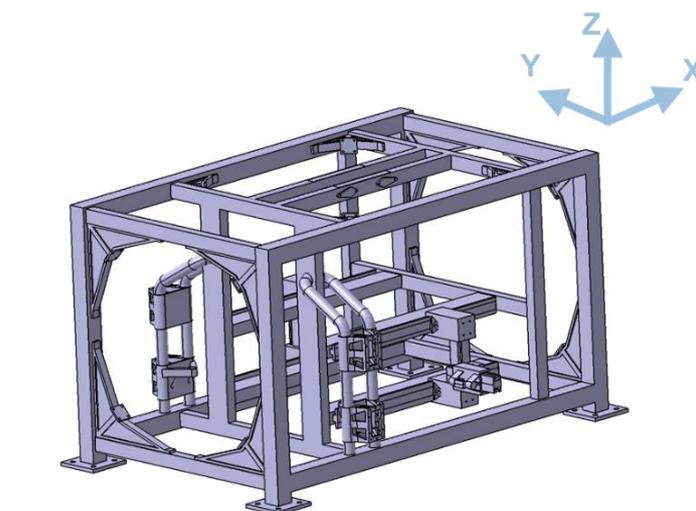


Abbildung 65: Modell 2-b CAD ohne Verstärkungselemente

Das Modell 2 hat in der FEM-Analyse gezeigt, dass die Konstruktiven Veränderungen von Modell 1 zu Modell 2 eine Reduzierung von 560 [Nm/Grad] zum Modell 1 in der Torsionssteifigkeit ergeben hat. Die Torsionssteifigkeit ist noch weit über den Ziel Torsionssteifigkeit. Nachfolgend werden unterschiedliche Konstruktive Veränderungen vorgenommen, mit dem Ziel die Torsionssteifigkeit des Rahmens zu reduzieren.

Für jedes Modell-CAD wird eine FEM-Analyse durchgeführt, siehe Kap. 4.4. Aus den Ergebnissen der FEM werden nächsten konstruktive Maßnahmen für das nächste CAD-Modells des Rahmens abgeleitet.

### 4.3.3 Modell 3

Der Schwerpunkt liegt darauf, festzustellen, ob eine Verkleinerung der Schienen, siehe Abb. 66, in Breite und Höhe einen Unterschied auf die Torsionssteifigkeit machen würde. Die FEM-Analyse des Modell 2 zeigt, dass die Torsionssteifigkeit noch weit über den Ziel Torsionssteifigkeit von 17000-19000 [Nm/Grad] für das Stadt-Auto und 23000-30000 [Nm/Grad] für die Limousine. Außerdem werden die Eckaussteifungen geringfügig verkleinert und die Dicken der angrenzenden Balken erhöht. Das Gewicht des Rahmens mit den Verstärkungselementen beträgt 1361,82 [kg], während der Rahmen ohne Verstärkungselemente 1321,54 [kg] beträgt, siehe Abb. 66 und Abb. 67.

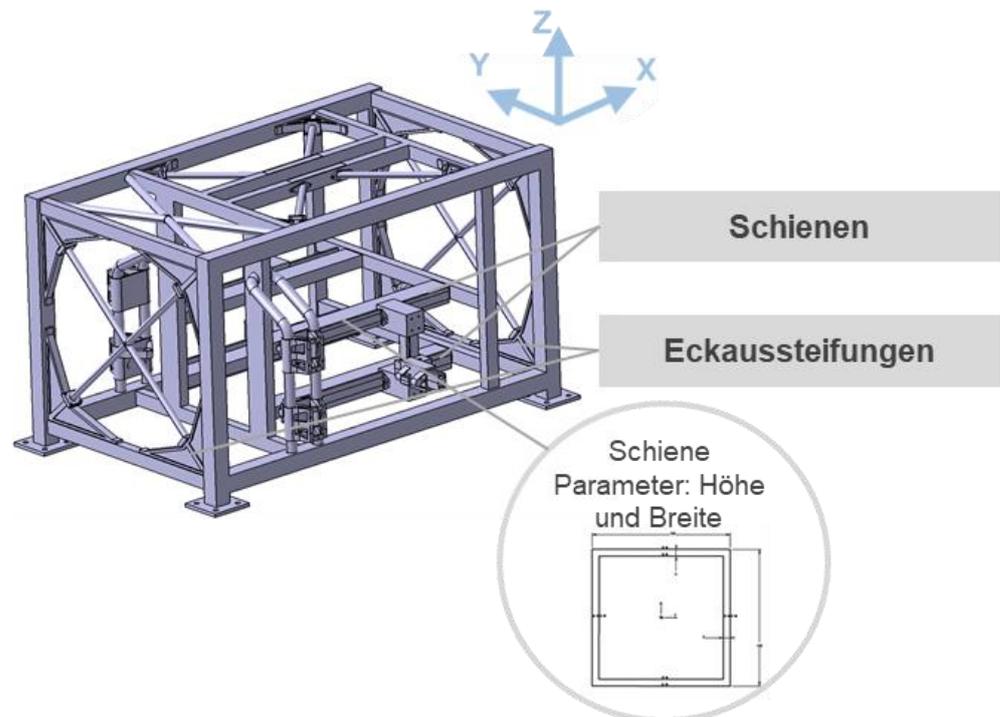


Abbildung 66: Modell 3-a CAD mit Verstärkungselemente

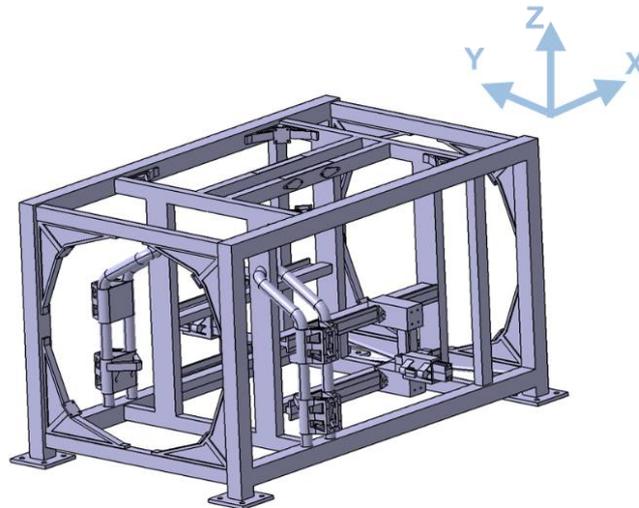


Abbildung 67: Modell 3-b CAD ohne Verstärkungselemente

#### 4.3.4 Modell 4

Im Modell 4 werden nach den Ergebnissen aus den FEM-Berechnungen des Modells 3 erhebliche Änderungen vorgenommen.

Die erste Änderung besteht darin, dass die Geometrie der hinteren Träger, auf die die Schienen aufgeschweißt wurden, nicht mehr horizontal, siehe Abb.66 und Abb. 67, sondern vertikal ausgerichtet ist, siehe Abb.68 und Abb. 69, genau wie bei den vorderen Trägern. Diese Änderung dient nicht nur Steifigkeit, sondern fördert auch die Wiederverwendung identischer Komponenten, was die Kosten senken soll. Die Größe der Eckversteifungen nimmt um 20 % ab, siehe Abb.68 und Abb. 69, und die Dicke jedes Balkens verringert sich um durchschnittlich 15 %. Auch die Abmessungen der Balken, wie Höhe und Breite, nehmen ab. Diese Änderungen garantieren, dass die Struktur maßgeblich geschwächt wird, was dazu beitragen, dass die Torsionssteifigkeit reduziert. In Modell 4 werde ein Längsträger in der Mitte des unteren Teils der Struktur eingeführt, um zu prüfen, ob er eine Wirkung auf die Torsionssteifigkeit hat. In der Mitte des Rahmens werde ein diamantförmiges Fachwerksystem hinzugefügt, um die Steifigkeit zu erhöhen und ein Materialversagen zu vermeiden. Damit werde ein Vorteil erzielt: Die Biegesteifigkeit des Daches kann nun durch Abflexen der aufgeschweißten Stäbe verändert werden. Eine weitere Änderung ist die Hinzufügung von diagonalen Verstärkungen am Boden vorne und hinten. Die Verstärkungselemente werden angepasst, indem nun dünnere Stäbe angebracht werden. Durch die vorgenommenen Änderungen verringert sich das Gewicht der Struktur ohne die Verstärkungselemente auf 874,364 [kg], während sie mit Verstärkungen 904,45 [kg] wiegt, siehe Abb. 69 und 69 und 70. Die Torsionssteifigkeit des Modells 4-a nimmt im Vergleich zu 3-a um 70% ab; beide repräsentieren das Modell mit Verstärkungselementen, siehe Abb. 70. Ihre Torsionssteifigkeit sollte innerhalb des Torsionssteifigkeitsbereichs einer Limousine liegen, der zwischen 23000 und 30000 Nm/Grad liegt. Die Torsionssteifigkeit von 4-b nimmt im Vergleich zu 3-b um 66% ab; beide stellen das Modell ohne Verstärkungselemente dar. Ihre Torsionssteifigkeit sollte innerhalb des Torsionssteifigkeitsbereichs eines Stadtautos liegen, der zwischen 17000 und 19000 Nm/Grad liegt. Die FEM-Analyse zeigt weitere Möglichkeiten die Geometrie des Rahmens zu verändern, siehe Modell 5.

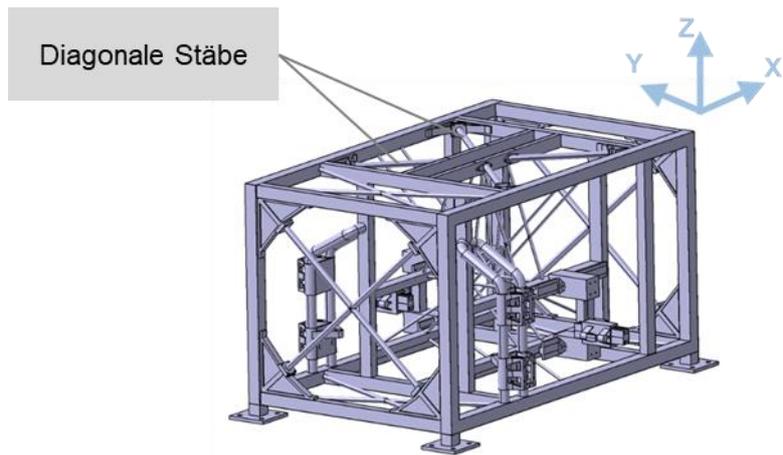


Abbildung 68: Modell 4-a CAD mit Verstärkungselemente

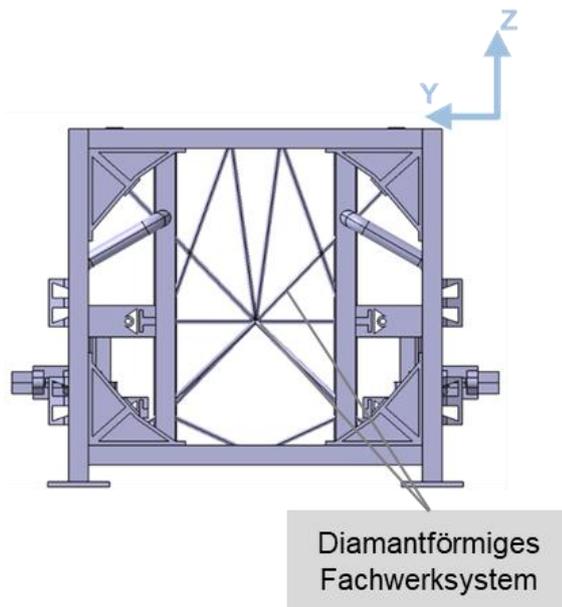


Abbildung 69: Modell 4-b CAD ohne Verstärkungselemente Ansicht YZ

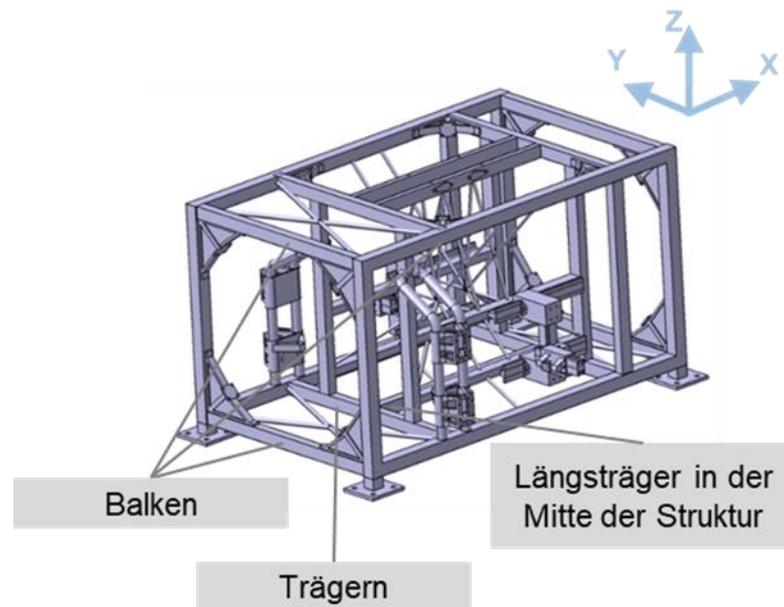


Abbildung 70: Modell 4-b CAD ohne Verstärkungselemente

#### 4.3.5 Modell 5

Dieses Modell wird nach den FEM-Analysen des vorherigen Modells angepasst. Sein Gewicht wurde mit den Verstärkungselementen auf 833.085 [kg] und ohne sie auf 816.554 [kg] gesenkt. Die Gewichtsreduzierung ist auf verschiedene Modifizierungsschritte an der Struktur zurückzuführen. Der mittlere Längsträger wurde herausgenommen. Die Manipulation der Dicken in den Mehrfachelementen, wie bei den vorherigen Modellen, ist eine Standard-Antwort auf die FEM-Berechnungen. Die Abstände zwischen den Balken wurden ebenfalls leicht verändert, ebenso wie die Dicke der Füße der Struktur. Die Eckversteifungen haben eine von der FEM bestätigte Torsionssteifigkeitswirksamkeit, so dass sie um etwa 10 % reduziert wurden, um die Ziel-Torsionssteifigkeit zu erreichen. Außerdem wird an den beiden Zwischenwänden 10 [mm] diagonale Stäbe eingesetzt, um die dort beobachteten hohen Spannungen abzufangen, und an der gleichen Stelle werden ebenfalls 10 mm starke vertikale Stäbe eingefügt, wie in Abb. 71 und 72 dargestellt. Bei diesem Modell 5 werden die diagonalen Stäbe, die als Verstärkung auf dem Dach angebracht sind, nicht verwendet, siehe Abb. 71 und Abb. 70 als Vergleich. Die Torsionssteifigkeit des Modells 5-a mit diesen Maßnahmen sinkt im Vergleich zu 4-a um 19,5%; beide stellen das Modell mit Verstärkungselementen dar. Ihre Torsionssteifigkeit sollte innerhalb des Torsionssteifigkeitsbereichs einer Limousine liegen, der zwischen 23000 und 30000 Nm/Grad liegt. Die Torsionssteifigkeit von 5-b nimmt im Vergleich zu 4-b um 17% ab; beide stellen das Modell ohne Verstärkungselemente dar. Ihre Torsionssteifigkeit sollte innerhalb des Torsionssteifigkeitsbereichs eines Stadtautos liegen, der zwischen 17000 und 19000 Nm/Grad liegt. Die FEM-Analyse zeigt weitere Möglichkeiten, die Geometrie der Struktur zu verändern, siehe Modell 6

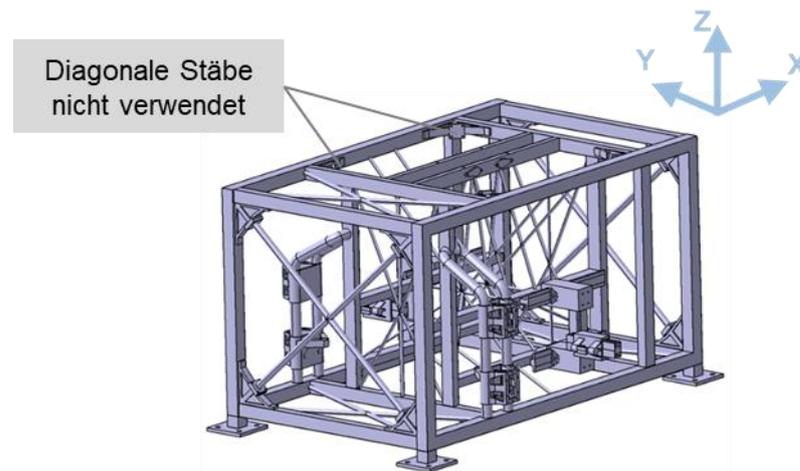


Abbildung 71: Modell 5-a CAD mit Verstärkungselemente

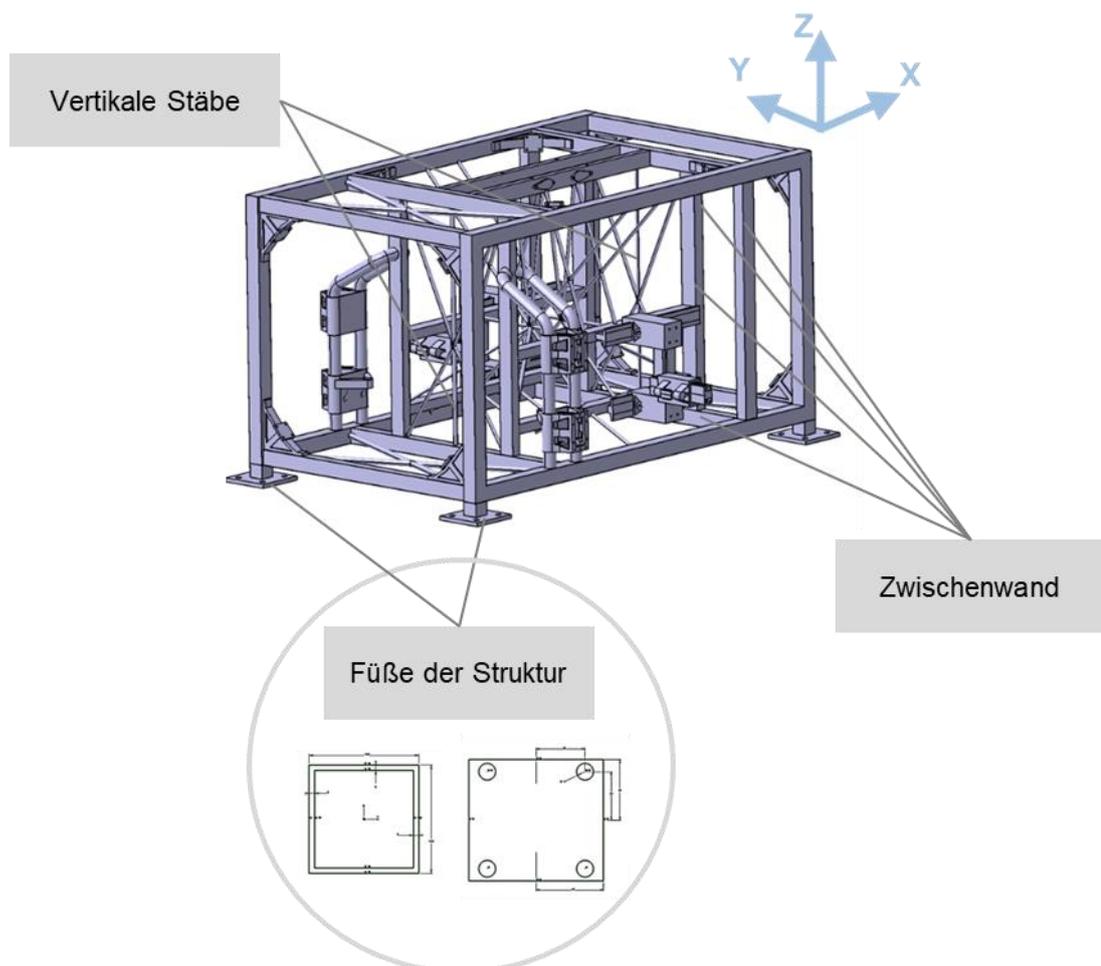


Abbildung 72: Modell 5-b CAD ohne Verstärkungselemente

#### 4.3.6 Modell 6

Da sich die Ergebnisse den angestrebten Torsionssteifigkeiten annähern, nutzt dieses Modell die aus den FEM-Analysen der Vorgängermodelle gewonnenen Erkenntnisse, das Gewicht zu reduzieren und die angestrebten Anforderungen zu erfüllen. Die diagonalen Stäbe werden aus dem

vorderen oberen und unteren Bereich der Struktur entfernt, siehe Abb. 73 und Abb.74. An den Balken, die eine erhöhte Spannung aufweisen, werden die Dicken erhöht. Um die erhöhten Spannungen an den Ecken, wo die Balken aufeinander treffen, einzudämmen, werden zur Verstärkung gegossene Dreiecke hinzugefügt - die beiden vertikalen Stäbe wurden auch aus den sogenannten Zwischenwänden entfernt. Diese Änderungen führten zu einem Gesamtgewicht von 830.684 [kg] mit den Verstärkungselemente und 796.755 [kg] ohne diese, siehe Abb.73 und 74. Die Torsionssteifigkeit von Modell 6-a beträgt 16487 Nm/Grad. Die Torsionssteifigkeit von Modell 6-a beträgt 16487 Nm/Grad und liegt damit außerhalb des Torsionssteifigkeitsbereichs einer Limousine. Die Torsionssteifigkeit des Modells 6-b beträgt 11868 Nm/Grad und liegt damit außerhalb des Torsionssteifigkeitsbereichs eines Stadtautos. Die FEM-Analyse zeigt weitere Möglichkeiten, die Geometrie der Struktur zu verändern, siehe Modell 7.

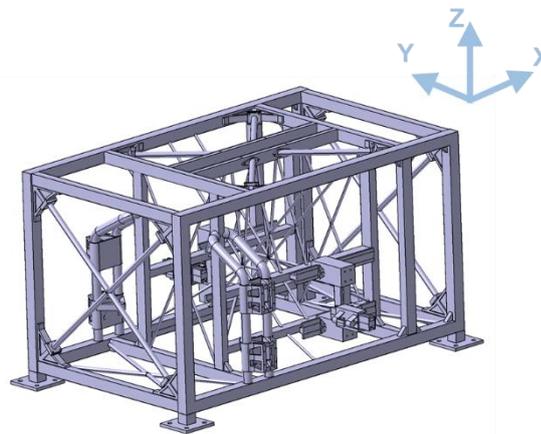


Abbildung 73: Modell 6-a CAD mit Verstärkungselemente

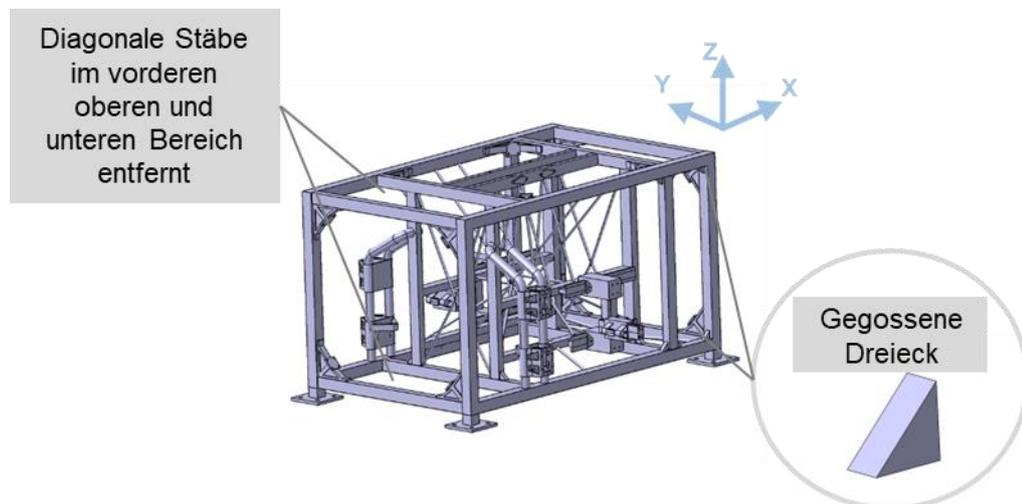


Abbildung 74: Modell 6-b CAD ohne Verstärkungselemente

#### 4.3.7 Modell 7

Der Längsträger wird aufgrund seines Verhältnisses von Torsionssteifigkeitsleistung zu Gewicht wieder in der Mitte der Struktur eingeführt. An dem wieder eingeführten Längsträger werden Stäbe angebracht, während sie an ihrem anderen Ende an die Schienen des 3-Punkt-Systems

geschweißt werden. An der oberen und unteren Vorderseite der Struktur sowie an der unteren Rückseite werden ebenfalls diagonale Stangen angebracht. Der diamantenförmige Fachwerkrahmen des Vorgängermodells wird umgestaltet, und es werden zwei zusätzliche Balken eingebaut, die einen Biegetest des Fahrgestells ermöglichen, wie in Abb. 75 zu sehen ist. Der Abstand zwischen den beiden Balken in X-Richtung wird ebenfalls gezielt vergrößert, und es wird eine Fortsetzung der Diagonalstäbe hinzugefügt, die als Verstärkungselemente auf dem Dach angebracht sind. Siehe Abb. 76 und Abb. 77. Die Gussdreiecke wurden beibehalten, da in der FEM-Analyse gezeigt ist, dass die Gußdreiecke die Spannungen an den Verbindungslinien der Balken verringern. Die Eckverstärkungen werden weiter verkleinert. Im Ergebnis wiegt die unverstärkte Struktur 774.865 [kg] und die verstärkte 808.937 [kg]. Die Torsionssteifigkeit des Modells 7-a erhöht sich mit diesen Maßnahmen auf 27716Nm/Grad. Seine Torsionssteifigkeit liegt im Torsionssteifigkeitsbereich einer Limousine, der zwischen 23000 und 30000 Nm/Grad liegt. Die Torsionssteifigkeit von 7-b nimmt im Vergleich zu 6-b ebenfalls zu und erreicht 19534Nm/Grad; sie stellt das Modell ohne Verstärkungselemente dar. Ihre Torsionssteifigkeit liegt, mit einer kleinen Abweichung, im Torsionssteifigkeitsbereich eines Stadtautos, der zwischen 17000 und 19000 Nm/Grad liegt. Die FEM-Analyse zeigt weitere Möglichkeiten, die Geometrie der Struktur zu verändern, siehe Modell 8.

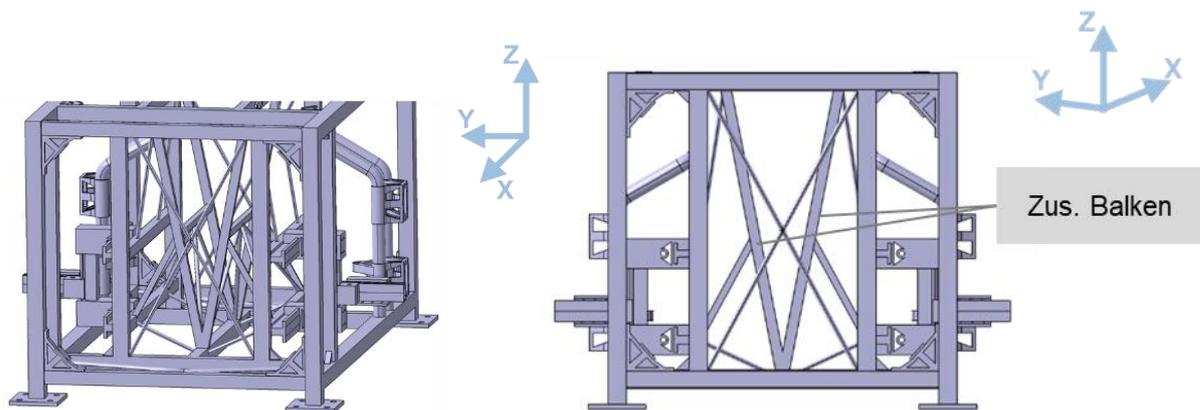


Abbildung 75: Modell 7-a CAD Fachwerk

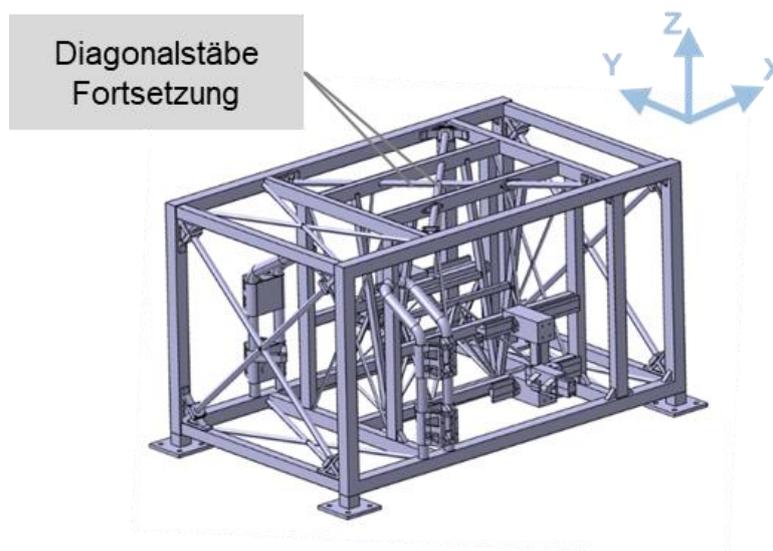


Abbildung 76: Modell 7-a CAD mit Verstärkungselemente

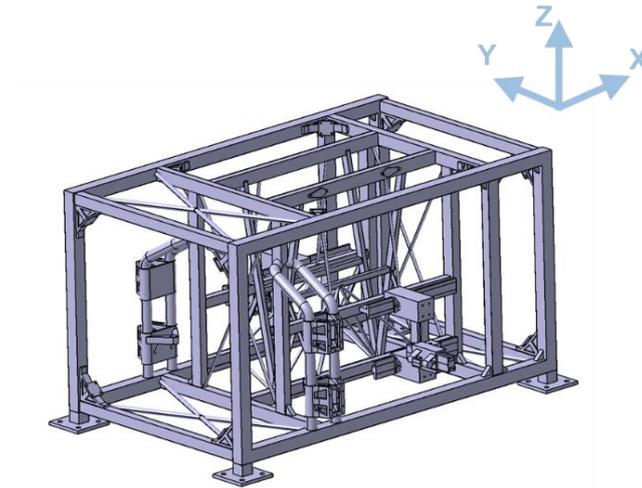


Abbildung 77: Modell 7-b CAD ohne Verstärkungselemente

#### 4.3.8 Modell 8

Modell 8 unterscheidet sich nur noch gering vom vorherigen Modell. Die Änderungen erfolgen auf der Grundlage der FEM-Ergebnisse des Vorgängermodells, wobei das primäre Ziel darin besteht, die ermittelten Spannungsspitzen nun zu verringern, damit der Rahmen die Dauerfestigkeit gemäß den FKM-Richtlinien nachweisen kann. Eine der ersten Maßnahmen, die unter Berücksichtigung der Fertigungstechnik ergriffen wird, ist das Entfernen der mittleren, sich kreuzenden Diagonalstäbe auf dem Dach, um die im Vorgängermodell ermittelte Torsionssteifigkeit zu verringern und Spannungsspitzen zu vermeiden, die durch das Zusammentreffen der beiden Stäbe verursacht werden könnten. Die Abmessungen der Eckaussteifungen werden ebenfalls im Durchschnitt um 10 % verringert. Die Änderungen führen zu einer Gewichtszunahme aufgrund der Vergrößerung der Trägerdicken in bestimmten Bereichen, die mit den Verstärkungselementen 816,374 [kg] und ohne sie 785,7 [kg] beträgt. Die Auswirkungen der ausgeführten Änderungen bezogen auf die Spannung sind in 4.4.8 zu sehen. Die Änderungen, die an der CAD-Geometrie vorgenommen wurden, sind in Abbildung 78 und Abbildung 79 zu sehen. Die Torsionssteifigkeit des Modells 8-a beträgt nach diesen Maßnahmen 25716 Nm/Grad; damit liegt das Modell 8-a im Torsionssteifigkeitsbereich der Limousine, der zwischen 23000 und 30000 Nm/Grad liegt. Die Torsionssteifigkeit des Modells 8-a beträgt 20338, was ungefähr im Torsionssteifigkeitsbereich eines Stadtautos zwischen 17000 und 19000 Nm/Grad liegt; damit ist das Ergebnis als akzeptabel anzusehen und die Torsionssteifigkeitsziele werden erreicht.

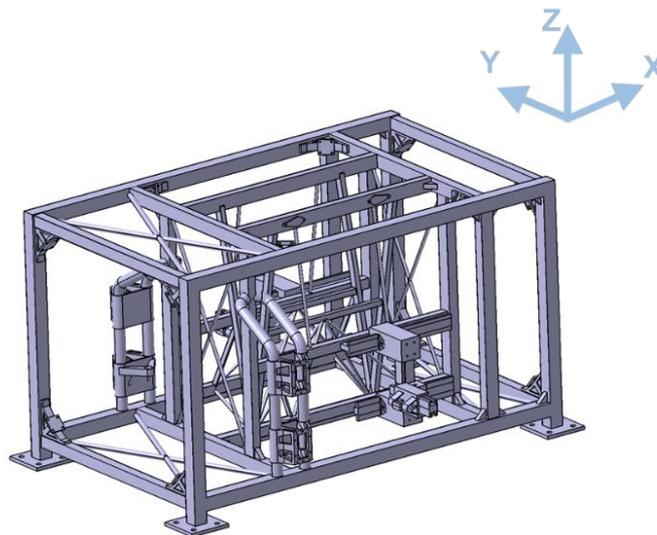


Abbildung 78: Modell 8-b CAD ohne Verstärkungselemente

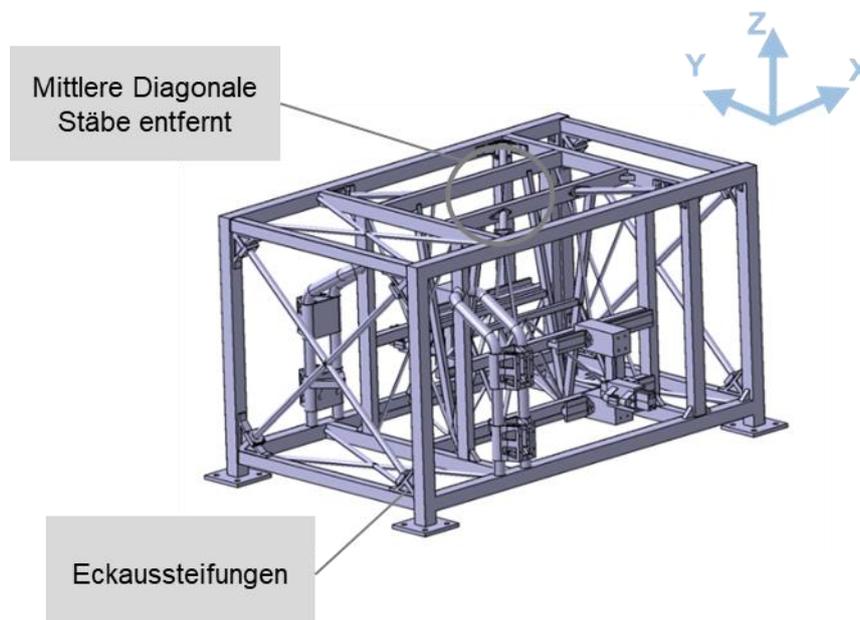


Abbildung 79: Modell 8-a CAD mit Verstärkungselemente

#### 4.4 FEM Modellbildung und Analysen

Nach dem ersten Startmodell wird eine statische FEM-Analyse durchgeführt, um die Torsionssteifigkeit des Ersatzrahmens zu ermitteln. Die FEM-Analyse hilft dabei, die Schwachstellen und die überdimensionierten Elemente der Struktur zu identifizieren, die neu entworfen und modifiziert werden können, um die zuvor festgelegten Ziele zu erreichen. Das erste Ziel ist es, eine Torsionssteifigkeit von ca. 18000Nm/Grad bis 30000Nm/grad zu erreichen, die ungefähren Werte eines Stadtautos bzw. einer Limousine. Das Ziel ist es, eine Torsionssteifigkeit zu erreichen, die in diesem Bereich liegt. Das zweite Ziel ist ein Rahmen, der ein Dachgewicht von 100 kg tragen kann. Der Ersatzrahmen soll eine Plattform für die verschiedenen Türtests bieten und damit seine Türtestfähigkeit unter Beweis stellen. Ein Biegetest demonstriert außerdem die Fähigkeit des Ersatzrahmens, den Biegetest zu bestehen und die Spannungen die zulässigen Spannungen des Werkstoffs nicht überschreiten.

Die Messung der Torsionssteifigkeit erfolgt anhand der erwähnten Gleichung [9]. Um den Fortschritt genau zu verfolgen, werden mehrere ausgewählte Punkte an verschiedenen Positionen der Struktur entlang ihrer Entwicklung aufgrund der vorgenommenen Änderungen verfolgt. An diesen bestimmten Punkten wird die Messung der von Mises-Spannung abgelesen, die, wenn sie mit den Werten desselben Punktes der modifizierten Struktur verglichen wird, es ermöglicht, genau festzustellen, wie sich die Konstruktionsänderungen auf die mechanische Leistung ausgewirkt haben, insbesondere dem Kraftfluss im Rahmen.

Die von-Mises-Spannung wurde gewählt, um die Spannungen in den Modellen zu untersuchen und zu vergleichen. Es handelt sich dabei um Vergleichsspannungen, die nach der Gestaltänderungsenergiehypothese ermittelt werden. Diese Hypothese gilt für duktile (zähe) Werkstoffe, wobei hier die bei der Verformung eines elastischen Körperelements gespeicherte Energie das Kriterium darstellt. Überschreitet diese den werkstoffabhängigen Grenzwert, versagt der Bauteil infolge der plastischen Formänderung. Es empfiehlt sich als Vorauslegung ein Vergleich mit der jeweiligen Streckgrenze des Werkstoffes [24].

Um den Vergleich zu präzisieren, werden Bereiche aus den verschiedenen hochbelasteten Bereichen der Struktur herausgegriffen. Die Punkte stellen Knoten dar, an denen die von-Mises-Spannungen abgelesen wurden. Die Auswahl der Knoten erfolgte durch die Auswahl derjenigen mit der höchsten von Mises-Spannung. Dieses Vorgehen ermöglicht einen direkten Vergleich der gleichen Regionen der verschiedenen Modelle der Vergleich der verschiedenen Regionen ermöglicht ein besseres Verständnis der Auswirkungen, wenn z.B. geometrischen Bauteile hinzugefügt werden. Änderung von Variablen und Hinzufügung von Verstärkungselementen, auf das Spannungsverhalten der Struktur. Im Abschnitt Modell 1-FEM wurde die Auswahl der Knoten und Regionen näher erläutert.

Die FEM-Analysen werden mit CATIA-v5 durchgeführt, wobei ein parabolischer Netztyp, und Volumenelemente gewählt ist. Die Größe des Netzes ist von Test zu Test unterschiedlich. Als Werkstoff wird Metall verwendet.

#### **4.4.1 Modell 1-FEM**

Modell 1-FEM wurde als Startmodell betrachtet. Das Modell ist als Einzelteil gebaut. Modell 1 wird diversen FEM-Analysen unterzogen, einschließlich der bereits erwähnten Türtests, mit denen die Eignung der Struktur als Rahmen für Türtests nachgewiesen werden sollte. Der erste Test ist der Torsionstest. Jeweils 10000 [N] werden zwei entgegengesetzte, verteilte Lasten auf die beiden unteren vorderen Füße der Struktur, siehe Abb. 80, in Z-Richtung aufgebracht, wodurch ein Torsionsmoment erzeugt wird, wie in Abb. 80 dargestellt. Im Gegensatz dazu werden die beiden hinteren Füße in ihrer Position fixiert in 3 FHG über, indem ein bewegliches virtuelles Teil, oder auch als Kraftspinne bekannt, die Innenfläche der acht Bohrungen der hinteren Füße die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade (außer der Rotation in Z-Richtung) gesperrt werden. Für die Torsionsprüfung von Modell 1-FEM wird ein parabolisches Netz mit einer Größe von 28 mm verwendet, siehe Abb. 80.

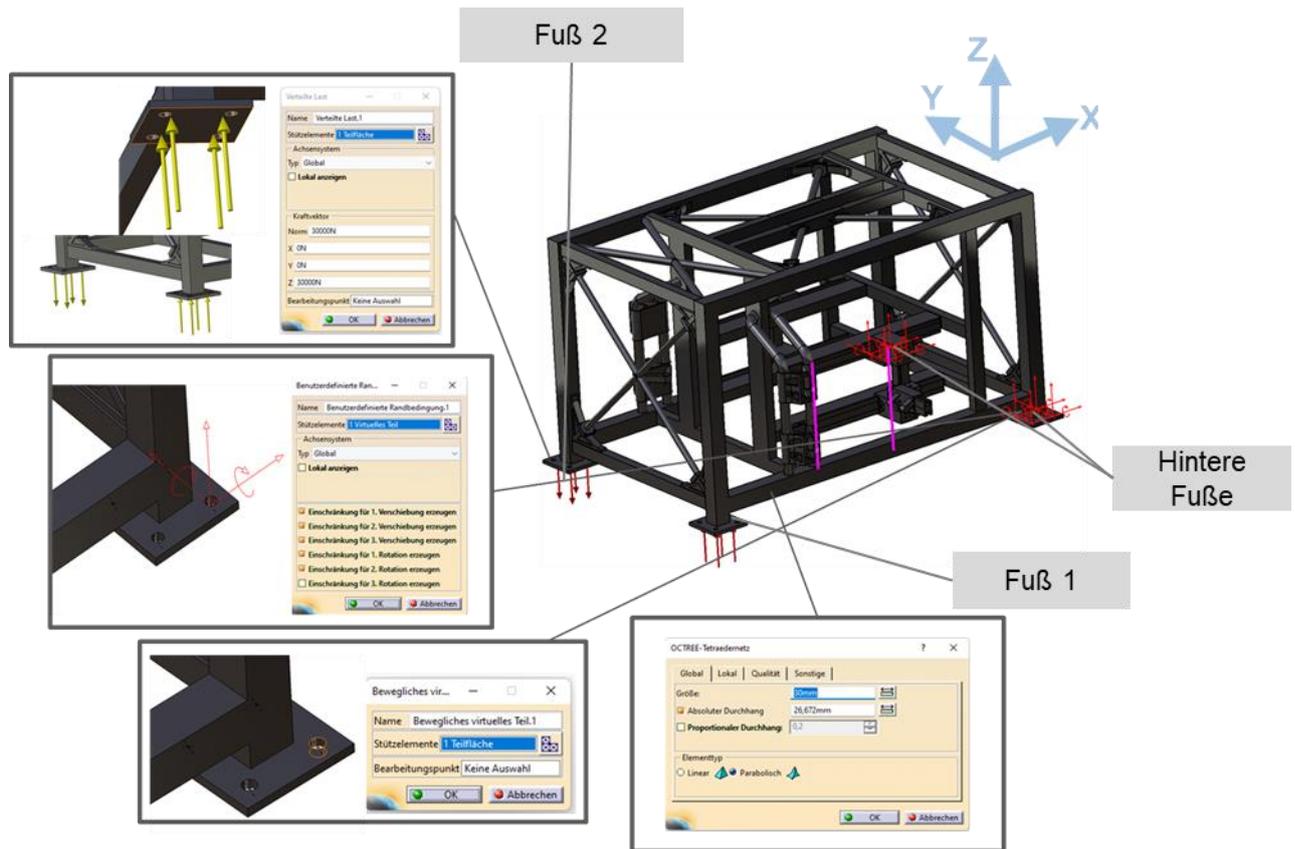


Abbildung 80: Modell 1 Randbedingungen für Lastfall Torsion

Der Torsionstest am Modell 1-FEM wird durchgeführt mit dem Ziel einen allgemeinen Überblick und ein Verständnis für den Kraftfluss der Struktur zu erhalten und abzuschätzen, in welchem Bereich die Torsionssteifigkeit liegt.

Die Ergebnisse der von-Mises-Spannung sind in Abb. 81 dargestellt. Die Spannungen werden an acht Bereiche abgelesen, die sich an verschiedenen Stellen des Ersatzrahmens befinden. Die Verschiebung ist in Abb. 82 dargestellt. Informationen wie die Verschiebung in Z-Richtung und die Berechnung der Torsionssteifigkeit gemäß Gleichung Abschnitt 3.3.2, die Durchführbarkeit des Biegeversuchs und die maximale Dachlast sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Tabelle 11 zeigt die von-Mises-Spannungen des Torsionsversuchs an acht festgelegten Bereichen. In den folgenden Modellen werden dieselben Bereiche aus identischen Strukturbereichen ausgewählt, um die von Mises-Spannung abzulesen. Die genaue Lage der Bereiche kann sich geringfügig unterscheiden, aber die Zonen bleiben gleich.

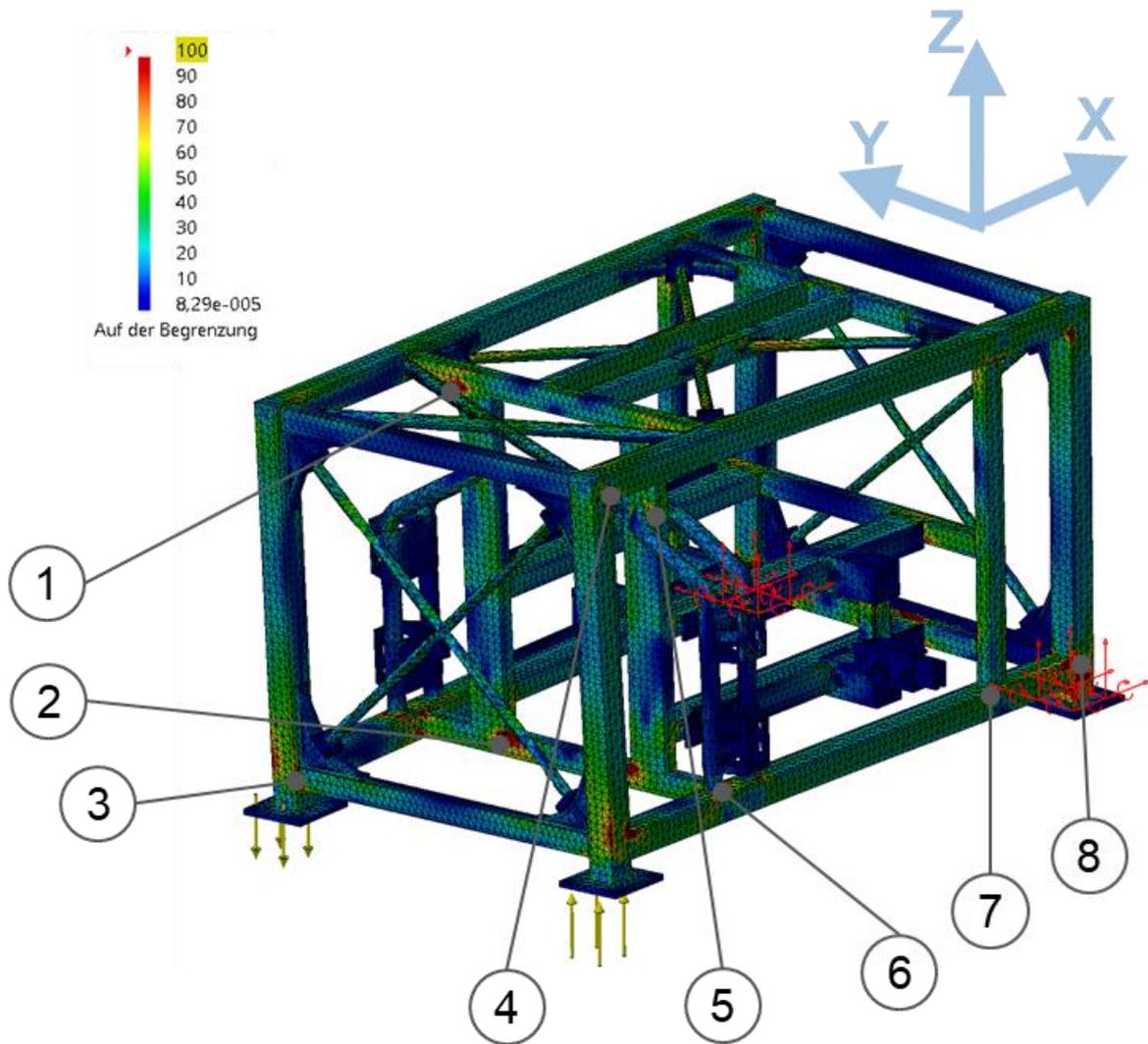


Abbildung 81: Modell 1-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises Spannung Lastfall Torsion

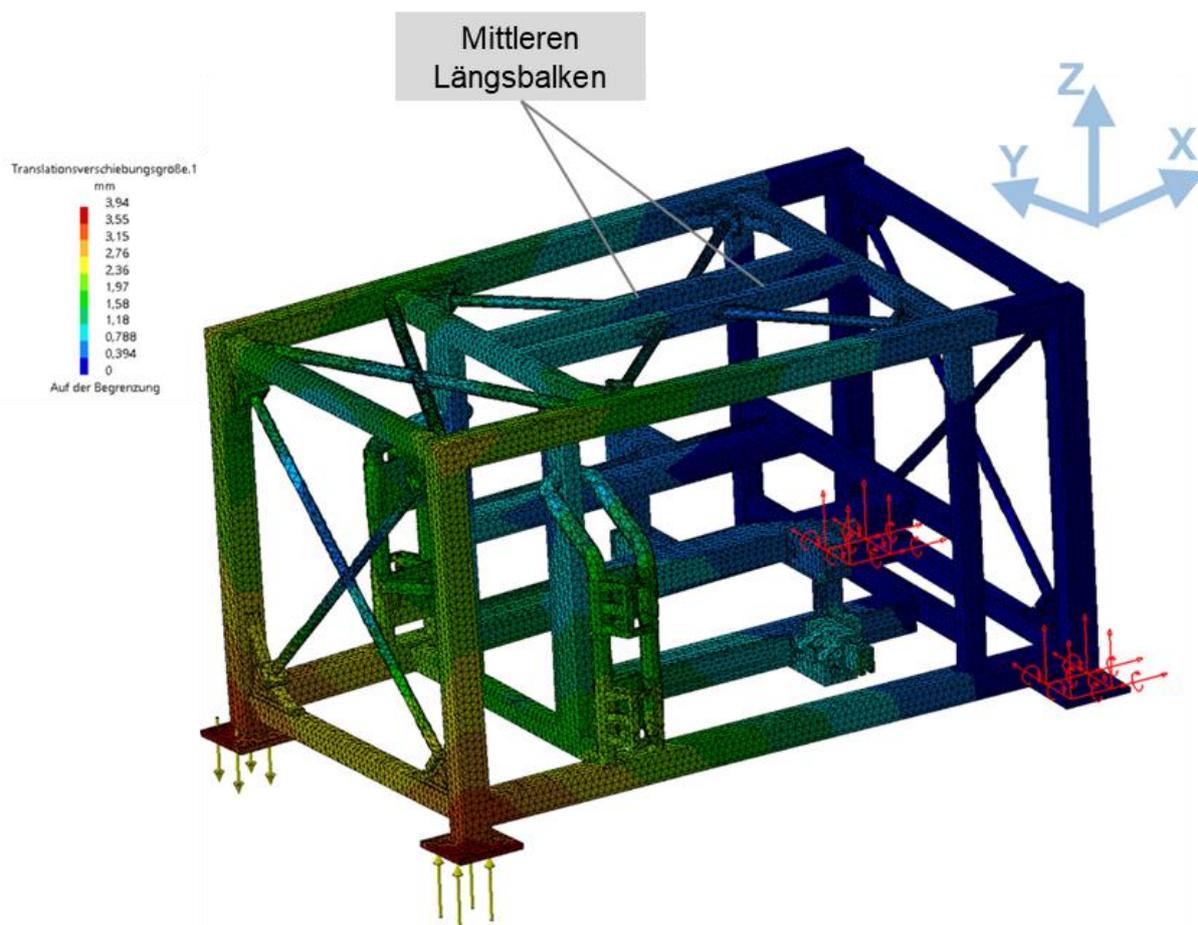


Abbildung 82: Modell 1-a-FEM mit Verstärkungselemente Verformung Lastfall Torsion

Tabelle 11: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche Modell 1-a-FEM

	Bereich							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Von Mises Spannungswert [MPa]	49	67	129	80	35	65	41	90

Der Dachbiegeversuch wird durch Aufbringen einer Last auf die beiden mittleren Längsbalken, über ein Virtuelle Teil, des Rahmens durchgeführt. Um den Versuch so realistisch wie möglich zu gestalten, werden zwei Stützelemente mit einer lokalen Netzgröße von 5 mm erstellt und auf die beiden Träger aufgenäht, wie in Abb. 83 dargestellt. Die verteilte Last wurde dann auf diese Elemente aufgebracht. Die 4 Füße der Struktur wurden dann mit einer festen Einspannung an ihren Unterseiten befestigt. Der Test wurde mit einer Netzgröße von 30 mm durchgeführt, und die daraus resultierenden von-Mises-Spannungen sind in Abbildung 84 dargestellt.

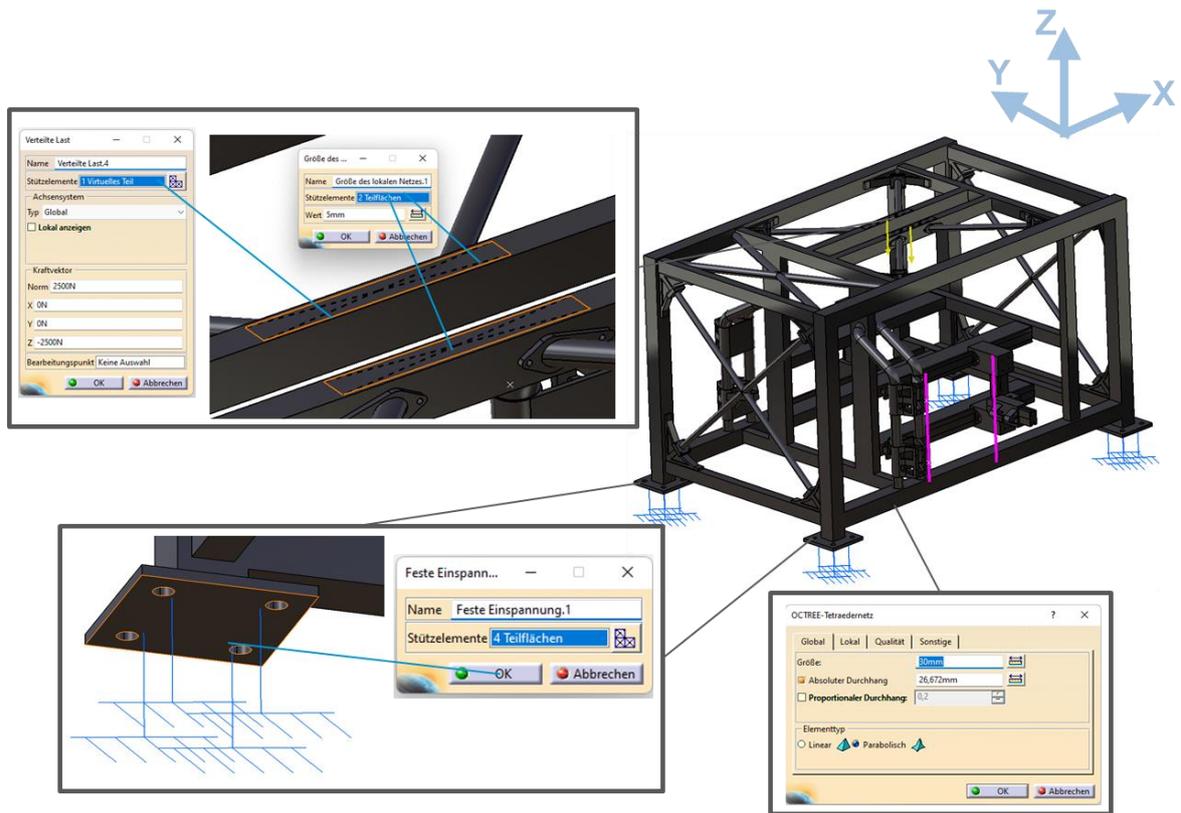


Abbildung 83: Modell 1 Randbedingungen für Lastfall Dachbiegung

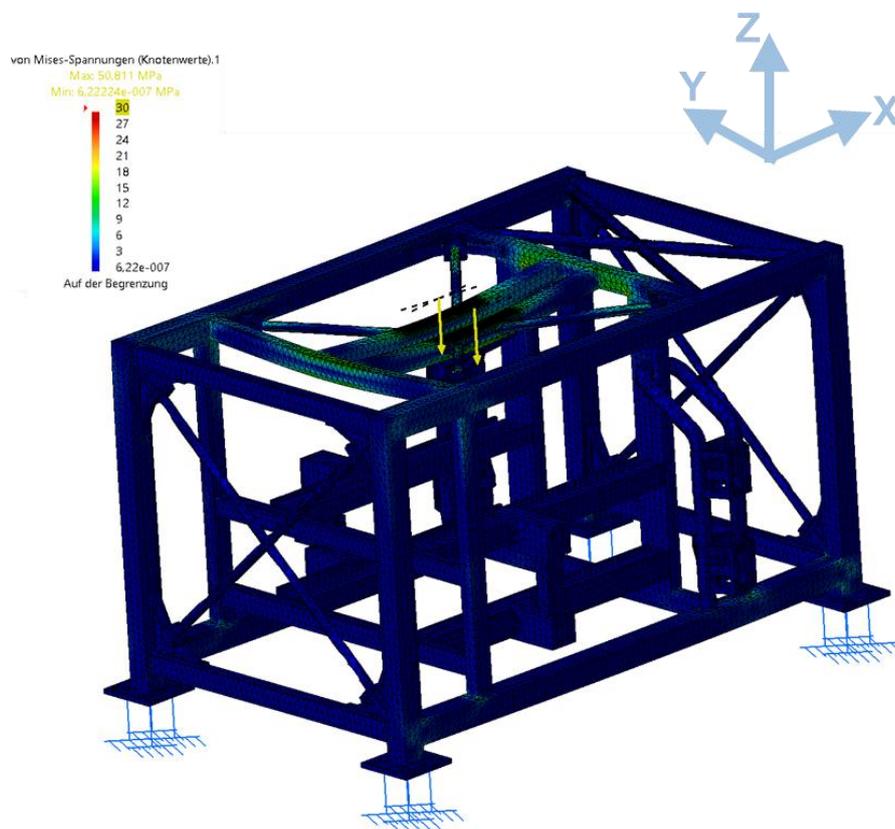


Abbildung 84: aus dem Dachbiegeversuch resultierende von-Mises-Spannungen

Die Ergebnisse zeigen keine hochbelasteten Stellen bei einer Last von 100 [Kg] auf dem Dach; die Anforderung ist erfüllt. In einer Verauslagung wird die Annahme getroffen das der Rahmen aus S235 gefertigt wird. Da in der FEM-Analyse für den Lastfall Dachbiegung die Spannung im Modell bei ca. 30 MPa liegen, ist deswegen davon auszugehen, dass der Lastfall unkritisch ist.

Die Türtests zeigen, dass der Ersatzrahmen für die Prüfung von Standardtüren geeignet ist. Die Modellbildung für die Prüfung von Standardtüren wurde mit der Erstellung eines beweglichen virtuellen Teils an der Innenseite jedes Bohrungsloches begonnen, an dem die modulare Platte aus oberen und unteren Gusselementen verschraubt wird (Punkt eins und zwei des 3-Punkt-Befestigungssystems). Es werden zwei Punkte in der ungefähren Höhe der vorgesehenen Scharniere erstellt. Jedes bewegliche virtuelle Teil wird dann an einem der beiden Punkte befestigt, der als Bearbeitungspunkt dient. Vom oberen Punkt aus wird eine horizontale Linie mit einer Gesamtlänge konstruiert, die der durchschnittlichen Standardtürlänge entspricht, dann wird eine weitere Linie vom unteren Punkt aus mit dem Endpunkt der horizontalen Linie verbunden. Zwischen der Linie und dem Punkt gibt es eine starre Verbindung. Auf jeder Linie wird ein dickes Element mit kreisförmigem Querschnitt hinzugefügt, dass die Tür darstellt. Dieses Element stellt die Türgeometrie dar, die im Falle eines Türlastfalls, siehe 86 und Abb. 88, einen Pfad für die Last vom Lasteingangspunkt in die Struktur bildet. Siehe Abb. 85. Diese Modellierungsmethode ermöglicht es, die Auswirkungen verschiedener Autotürlängen auf die Struktur, die durch die verschiedenen Tests verursacht werden, einfach durch Änderung der Länge der horizontalen Linie zu testen. Der Endpunkt der horizontalen Linie ist der Ort, an dem die Kräfte aufgebracht wurden.

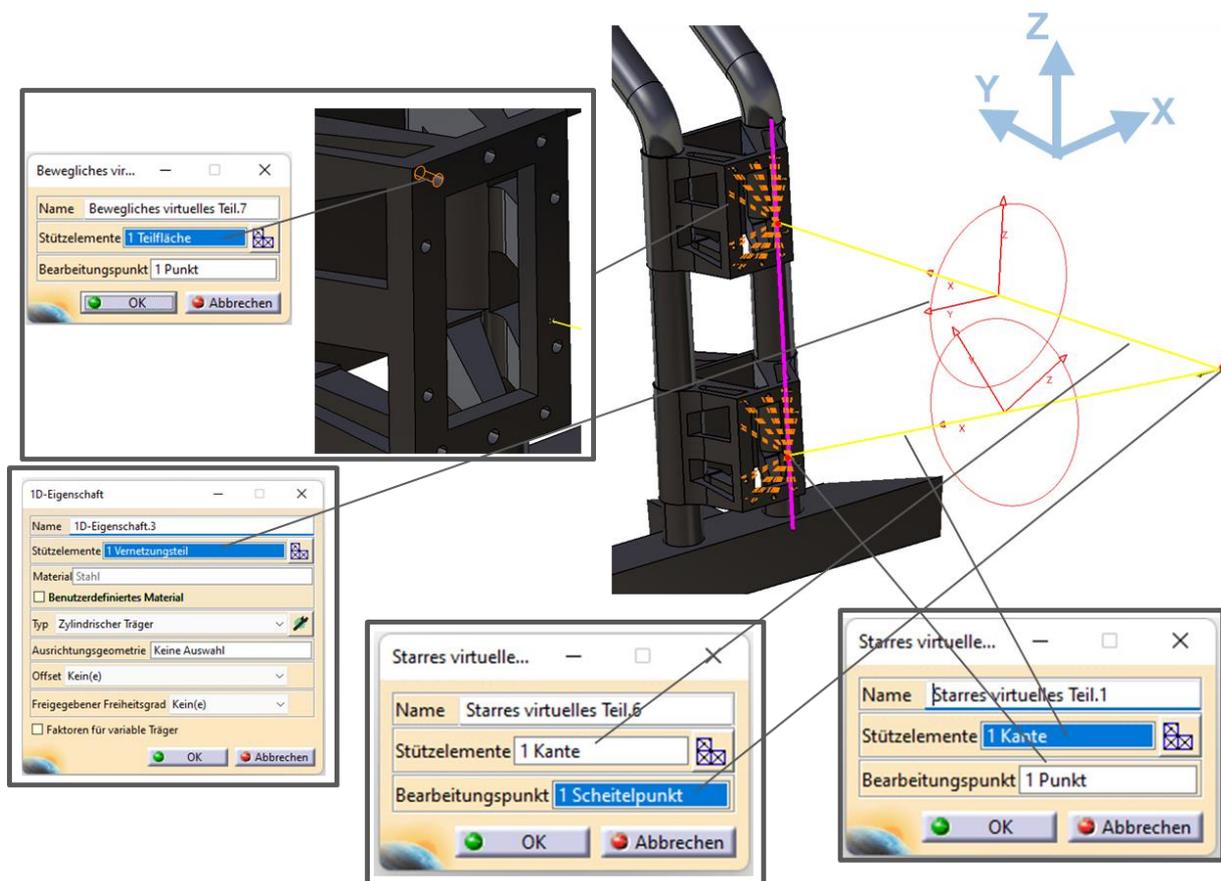


Abbildung 85: Modell 1 Randbedingungen für Türtests

Der erste von zwei Tests ist die Türüberdrückung, bei der eine Kraft von 2000N in X-Richtung auf den Endpunkt ausgeübt wurde (siehe Abb. 86). Die daraus resultierende von-Mises-Spannung ist in Abb. 87 dargestellt.

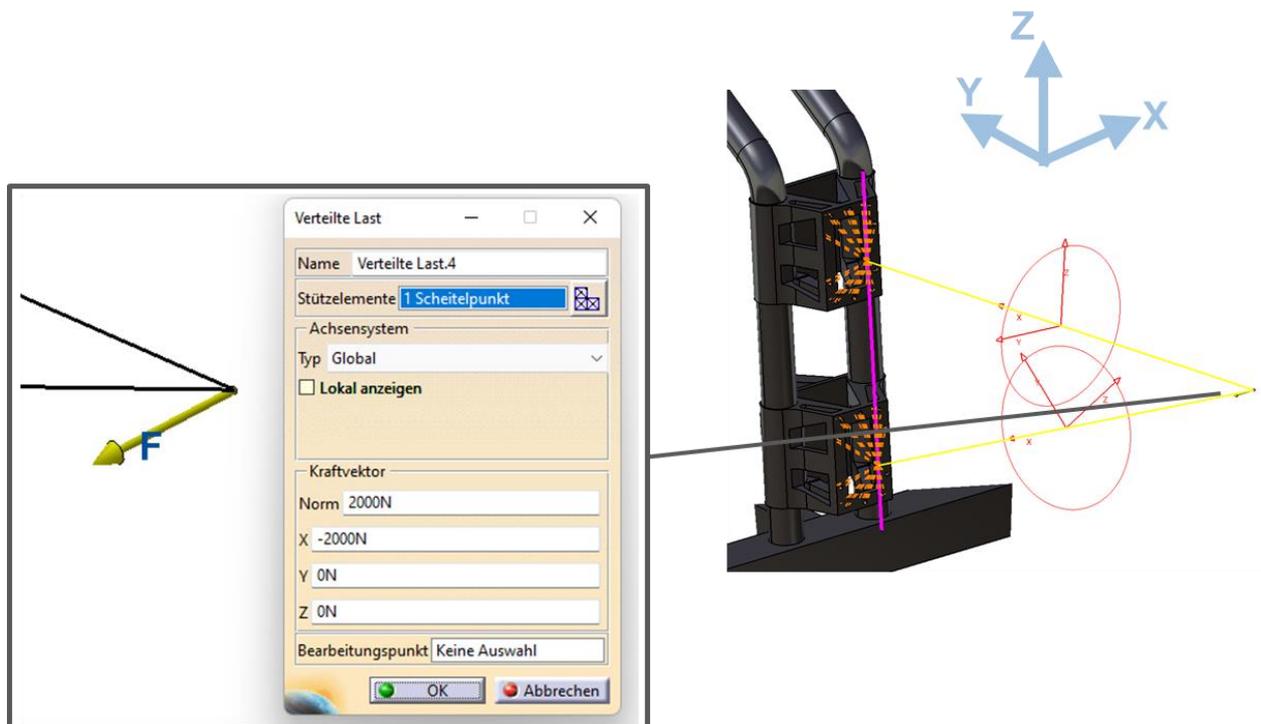


Abbildung 86: Modell 1 Randbedingungen für Lastfall Türüberdrückung

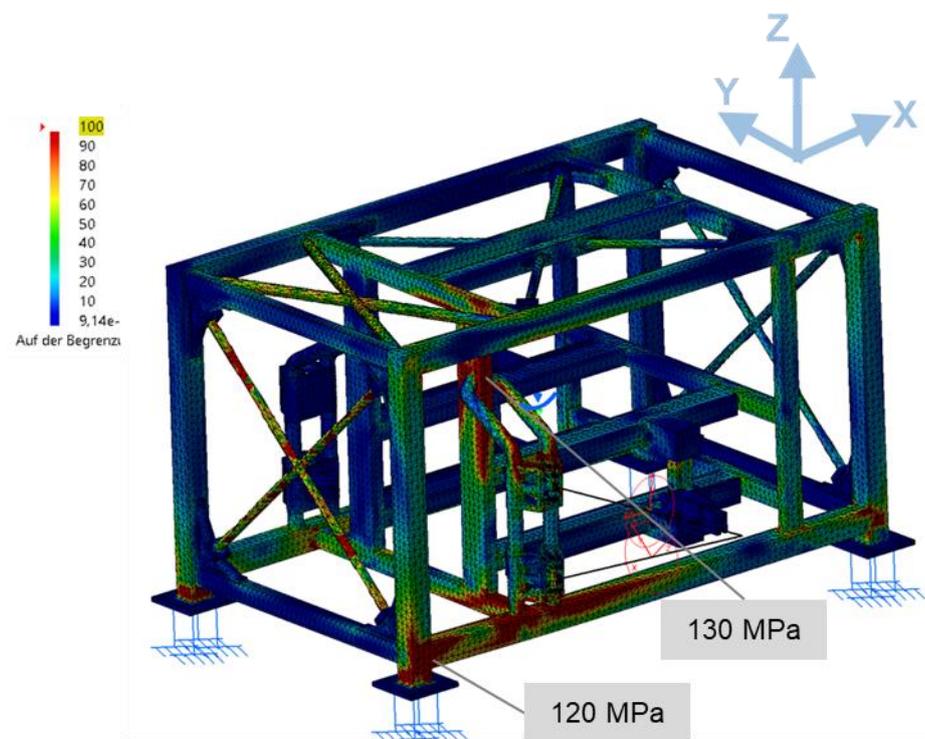


Abbildung 87: Modell 1-a mit Verstärkungselemente von-Mises Spannung Lastfall Türüberdrückung

Der zweite von zwei Tests ist die Türabsenkung, bei der eine Kraft von 2000N in Z-Richtung auf den Endpunkt ausgeübt wurde (siehe Abb. 88). Die daraus resultierende von-Mises-Spannung ist in Abb.89 dargestellt.

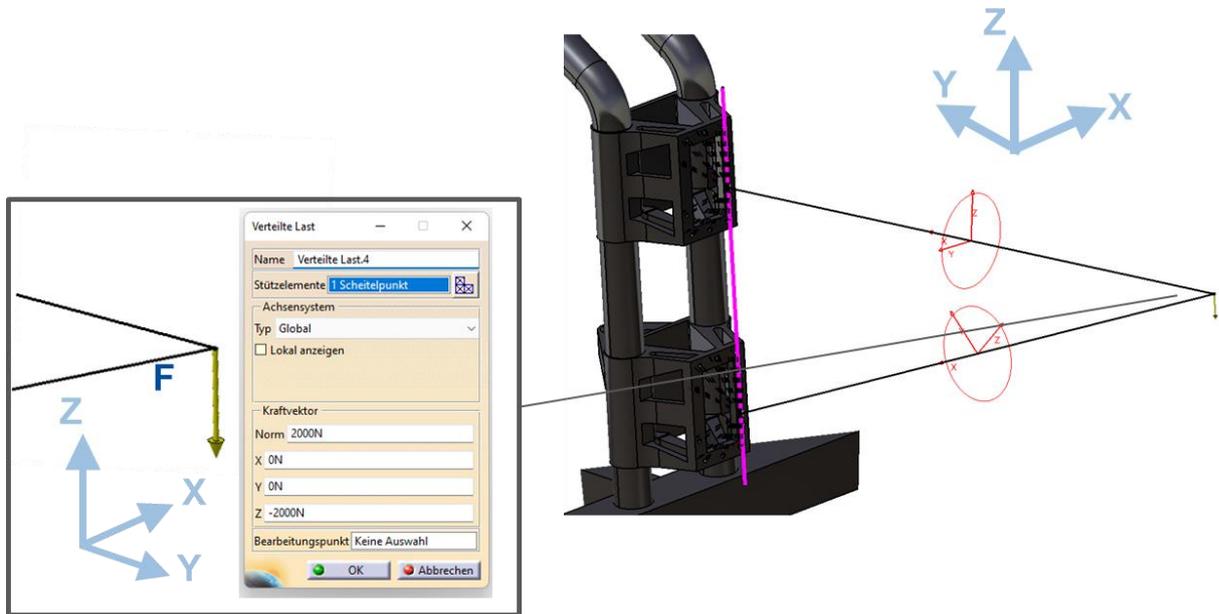


Abbildung 88: Modell 1 Randbedingungen für Lastfall Türüberdrückung

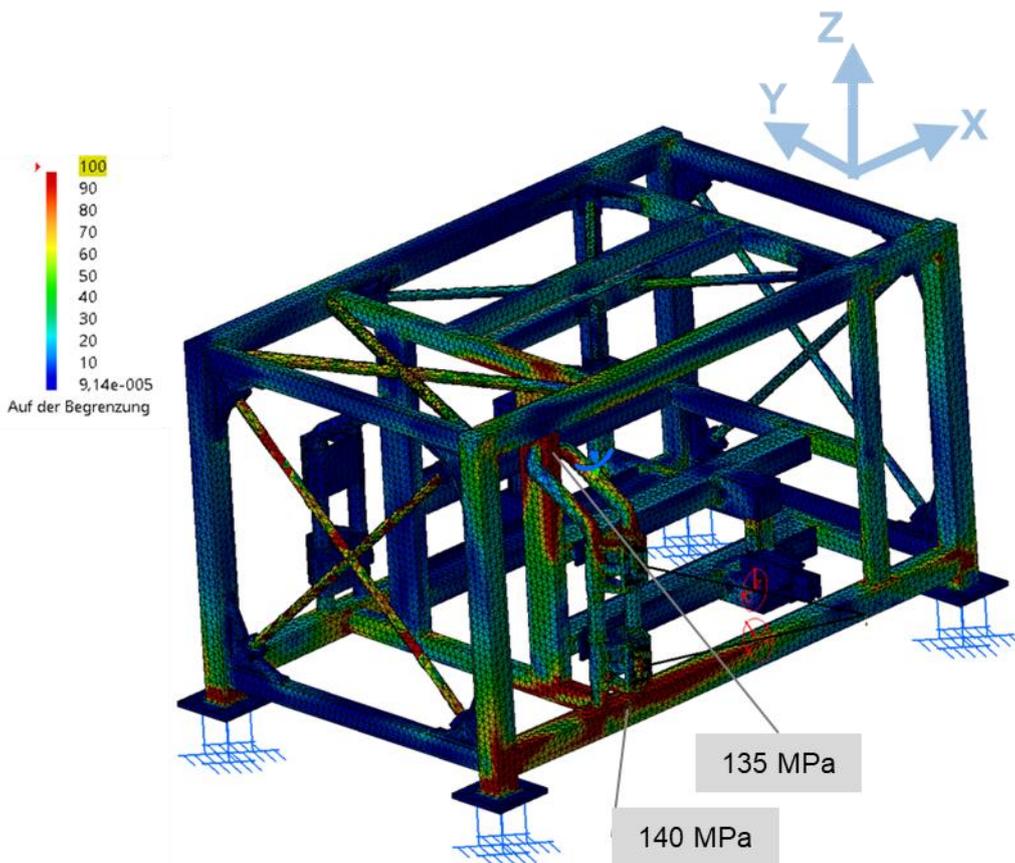


Abbildung 89: Modell 1-a mit Verstärkungselemente von-Mises Spannung Lastfall Türabsenkung

Tabelle 12 fasst, wie bereits erwähnt, die technischen Daten des Modells eins, die Testdaten und die Ergebnisse unter Torsionslastfall zusammen.

Tabelle 12: technische Merkmale von Modell 1

Verstärkungselemente	Modell	
	1	
	a	b
Netzgröße [mm]	28	/
Gewicht [Kg]	1189	/
Verschiebung in Z-Richtung [mm]	2,51	/
Ziel Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	23100-30200	17600-19800
Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	70897,65	/
Biegesteifigkeitstest Ausführbarkeit	Nein	/
Dachlast	100	/

#### 4.4.2 Modell 2-FEM

Die in Tabelle 14 zusammengefassten Torsionssteifigkeiten überschreiten den Zielbereich. Der nächste Schritt besteht also darin, die Torsionssteifigkeit durch Optimierung der Parameter zu verringern. Die ermittelte von-Mises-Spannung und die Verformung sind in Abb. 90 und Abb. 91 zu sehen.

Tabelle 15 zeigt die aus den aktuellen Analysen erhaltenen von-Mises-Spannungen an bestimmten Punkten (Knoten) aus verschiedenen hochbelasteten Strukturzonen, wie in Modell 1 diskutiert. Tabelle 16 fasst die technischen Merkmale zusammen

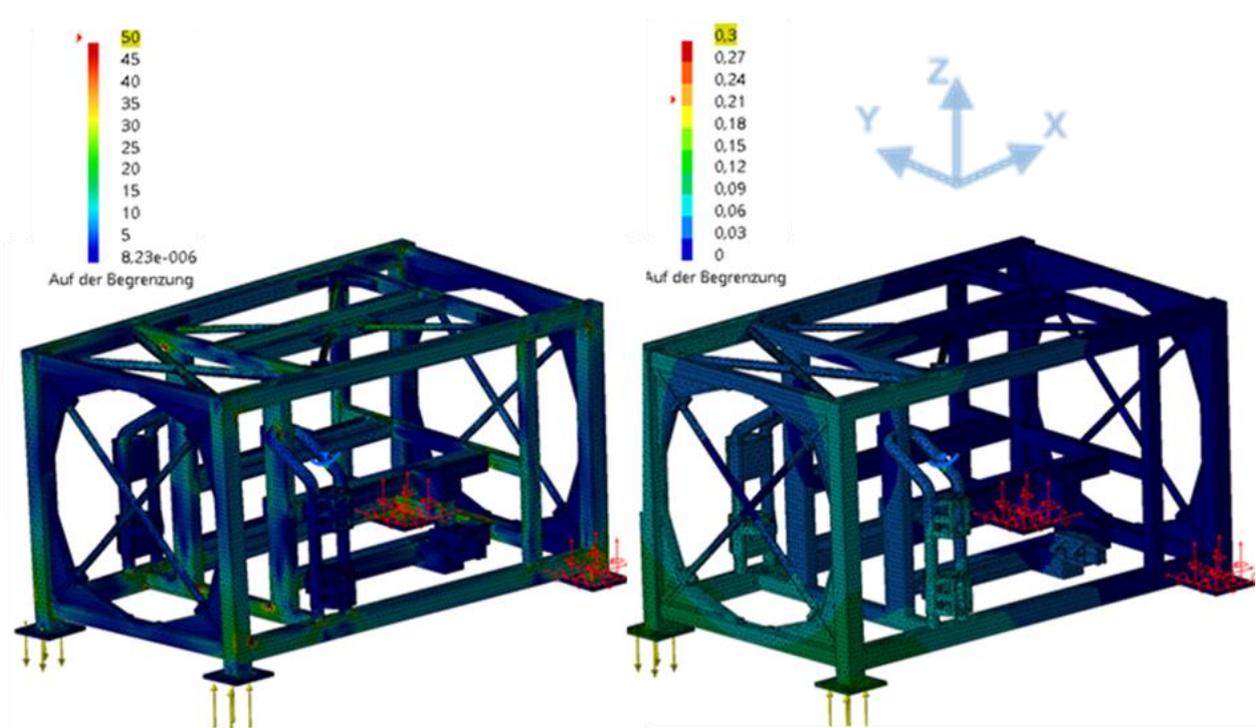


Abbildung 90: Modell 2-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

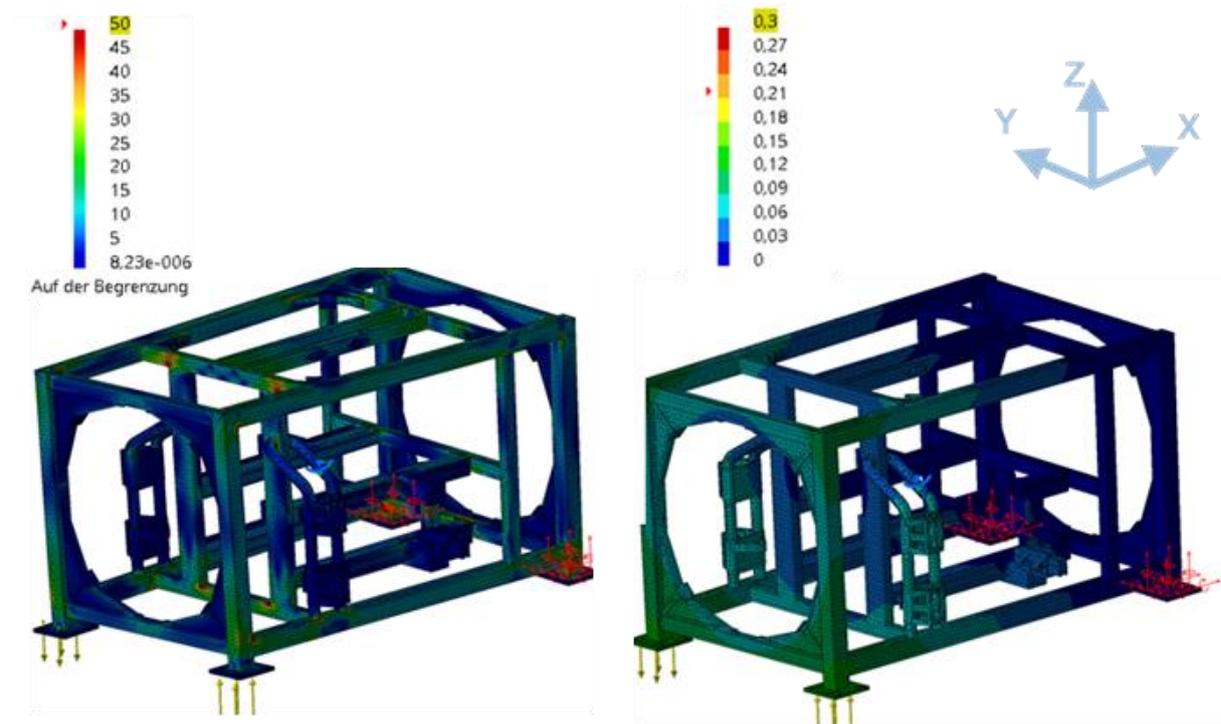


Abbildung 91: Modell 2-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Tabelle 13: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche

		Bereich							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Von Mises Spannungswert [MPa]	Mit Verstärkungselemente	45	63	113	97	44	50	44	78
	Ohne Verstärkungselemente	54	80	120	100	38	55	42	50

Tabelle 14: technische Merkmale von Modell 2

	Modell	
	2	
Verstärkungselemente	a	b
Netzgröße [mm]	28	25
Gewicht [Kg]	1312,98	1276,636
Verschiebung in Z-Richtung [mm]	2,53	3,05
Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	70337,2	58345,39

Ziel Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	23100-30200	17600-19800
Biegesteifigkeitstest Ausführbarkeit	Nicht möglich	Nicht möglich
Dachlast [Kg]	100	100

### 4.4.3 Modell 3-FEM

Die am Vorgängermodell vorgenommenen Änderungen erweisen sich als wirksam, da sie zu einer Verringerung der Torsionssteifigkeit führen, wie in Tabelle 15 gezeigt. Sie zeigt auch die Gewichtsreduzierung und die für die Analysen verwendete Netzgröße. Die Abbildungen 92 und 93 zeigen die Verformung und die von-Mises-Spannung am Modell 3-a/b. Die Torsionssteifigkeit liegt außerhalb des Zielbereichs. Es sind also weitere Parameteränderungen erforderlich.

Tabelle 16 zeigt die von-Mises-Spannungen an den zuvor ermittelten Punkten.

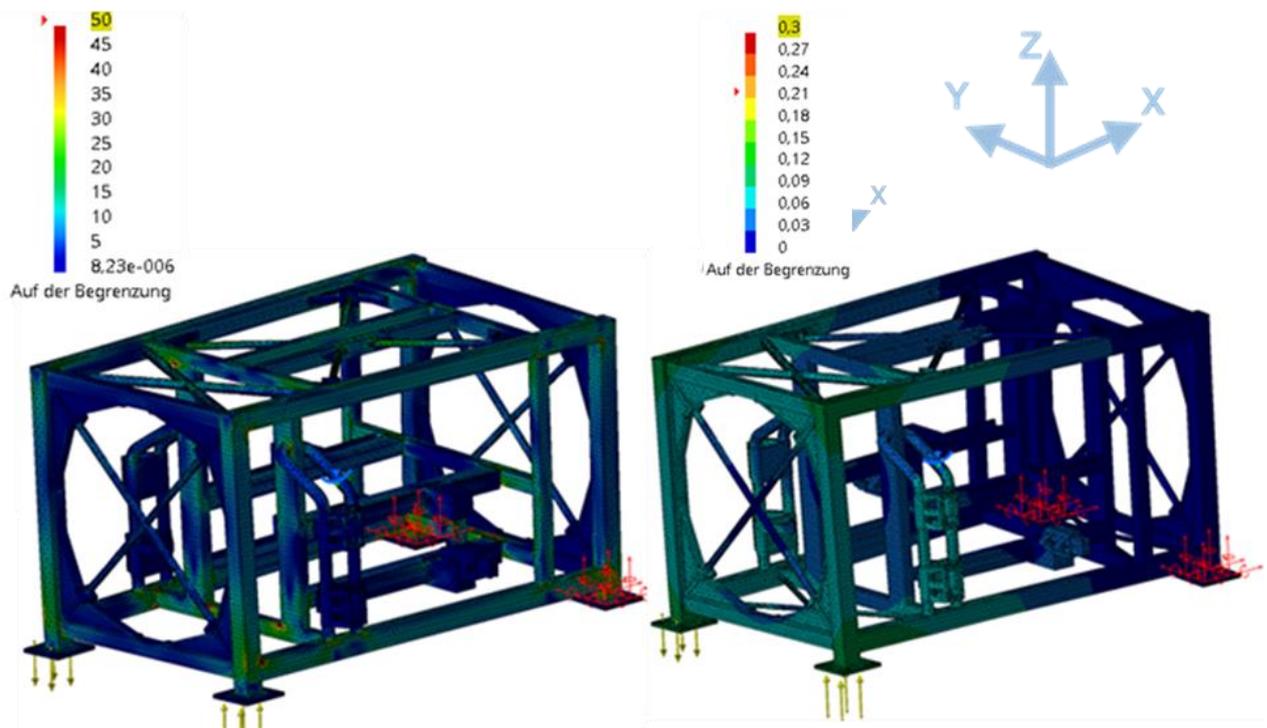


Abbildung 92: Modell 3-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

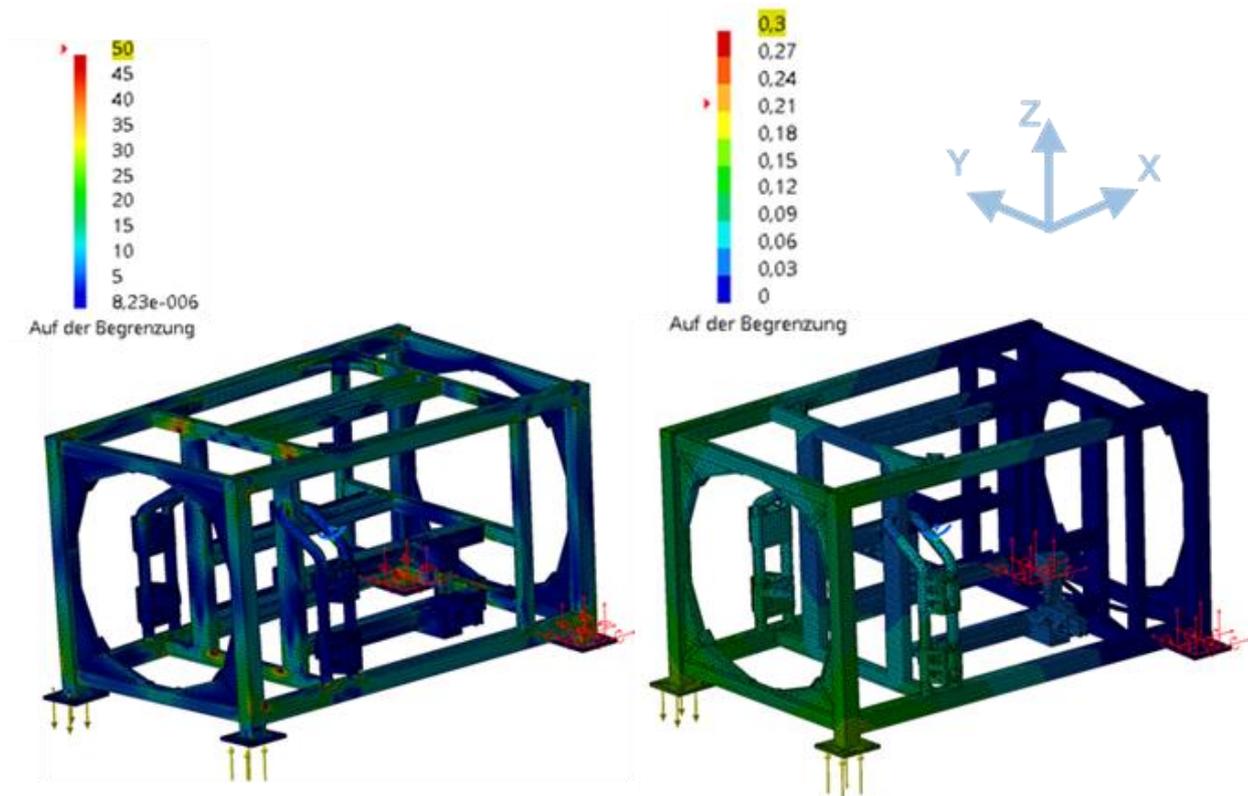


Abbildung 93: Modell 3-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Tabelle 15: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche

		Bereich							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Von Mises Spannungswert [MPa]	Mit Verstärkungselemente	40	20	91	95	39	66	50	78
	Ohne Verstärkungselemente	58	58	98	135	43	81	56	65

Tabelle 16: technische Merkmale von Modell 3

	Modell	
	3	
Verstärkungselemente	a	b
Netzgröße [mm]	25	25
Gewicht [Kg]	1361,82	1321,542
Verschiebung in Z-Richtung [mm]	2,61	3,71

Ziel Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	23100-30200	17600-19800
Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	68181,290	47966,031
Biegesteifigkeitstest Ausführbarkeit	Nicht möglich	Nicht möglich
Dachlast [Kg]	100	100

#### 4.4.4 Modell 4-FEM

Die wesentlichen Änderungen, die an diesem Modell 4-FEM vorgenommen werden, führen zu einer Verringerung der Torsionssteifigkeit und einer Gewichtsreduzierung. Obwohl diese Werte nahe am angestrebten Werte liegen, sind sie immer noch leicht außerhalb des Zielbereichs der Torsionssteifigkeit des Modells ohne die Verstärkungselemente. Die von-Mises-Spannung, und die Verformung sind in Abb. 94, Abb. 95 und Tabelle 17 und Tabelle 18 dargestellt.

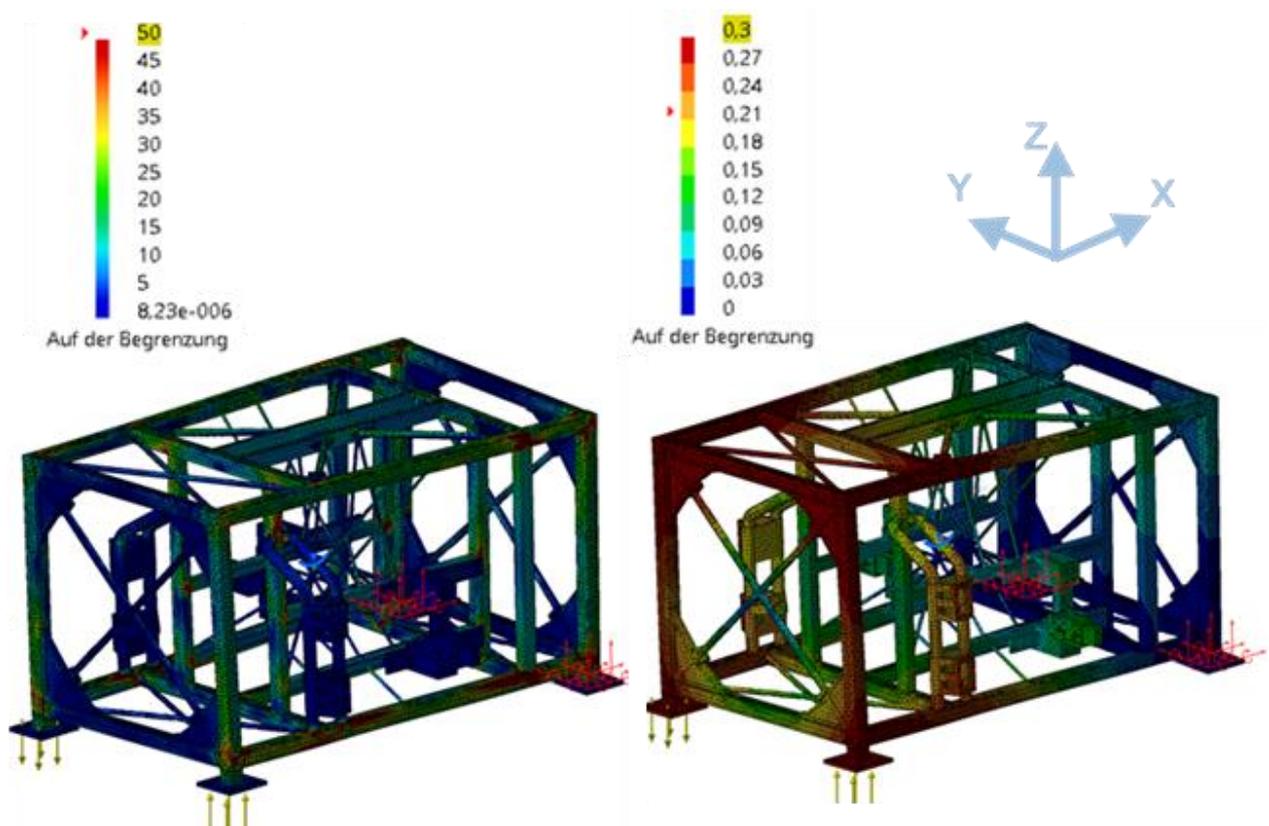


Abbildung 94: Modell 4-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

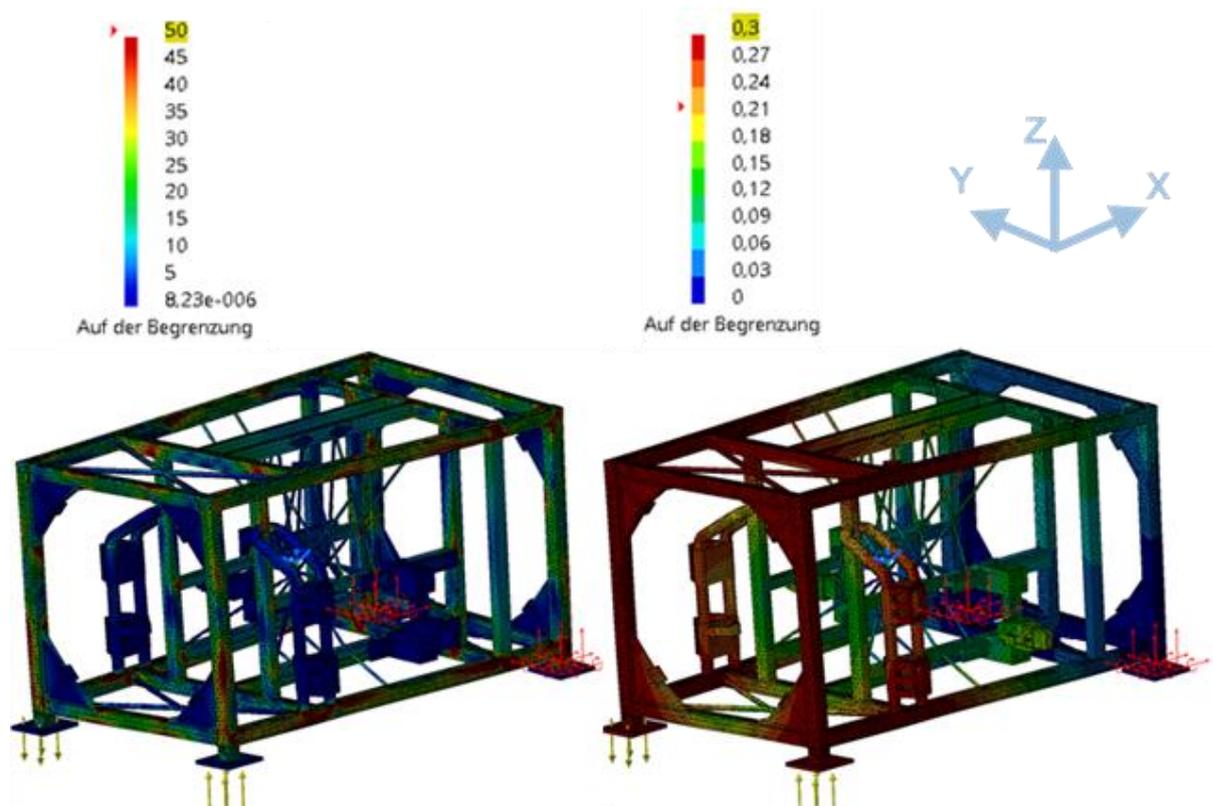


Abbildung 95: Modell 4-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Tabelle 17: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche

		Bereich							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Von Mises Spannungswert [MPa]	Mit Verstärkungselemente	92	180	160	130	130	120	250	250
	Ohne Verstärkungselemente	110	100	130	155	140	140	190	290

Tabelle 18: technische Merkmale von Modell 4

	Modell	
	4	
Verstärkungselemente	a	b
Netzgröße [mm]	25	25
Gewicht [Kg]	904,459	874,364
Verschiebung in Z-Richtung [mm]	8,85	11,1

Ziel Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	23100-30200	17600-19800
Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	20108,64	16033,03
Biegesteifigkeitstest Ausführbarkeit	Nicht möglich	Nicht möglich
Dachlast [Kg]	100	100

### 4.4.5 Modell 5-FEM

Die an diesem Modell vorgenommenen Änderungen zielen vor allem darauf ab. Die Auswirkungen der Änderungen und die Rolle der einzelnen Elemente, wie z. B. der Längsträger auf dem Dach der Struktur, wurden nachgewiesen. Die Verringerung des Abstands zwischen den beiden Längsträgern auf dem Dach und die Änderung der Dicke (weitere Einzelheiten finden Sie in der entsprechenden Passage im Abschnitt CAD) haben die Torsionssteifigkeit verringert.

Die konstruktiven Änderungen im Modell-5-FEM führen dazu, dass die Torsionssteifigkeit zu niedrig ist. Daraus folgt, dass die nächsten konstruktiven Änderungen den rahmen wieder mehr versteifen sollten. Die Torsionssteifigkeiten der Konstruktionen mit und ohne Verstärkung sind aus dem Zielbereich der Torsionssteifigkeit, wie in Tabelle 19 ersichtlich. Die resultierenden von-Mises-Spannungen, Verformungen und Punktspannungen sind in Abb. 96, Abb. 97 und Tabelle 20 dargestellt.

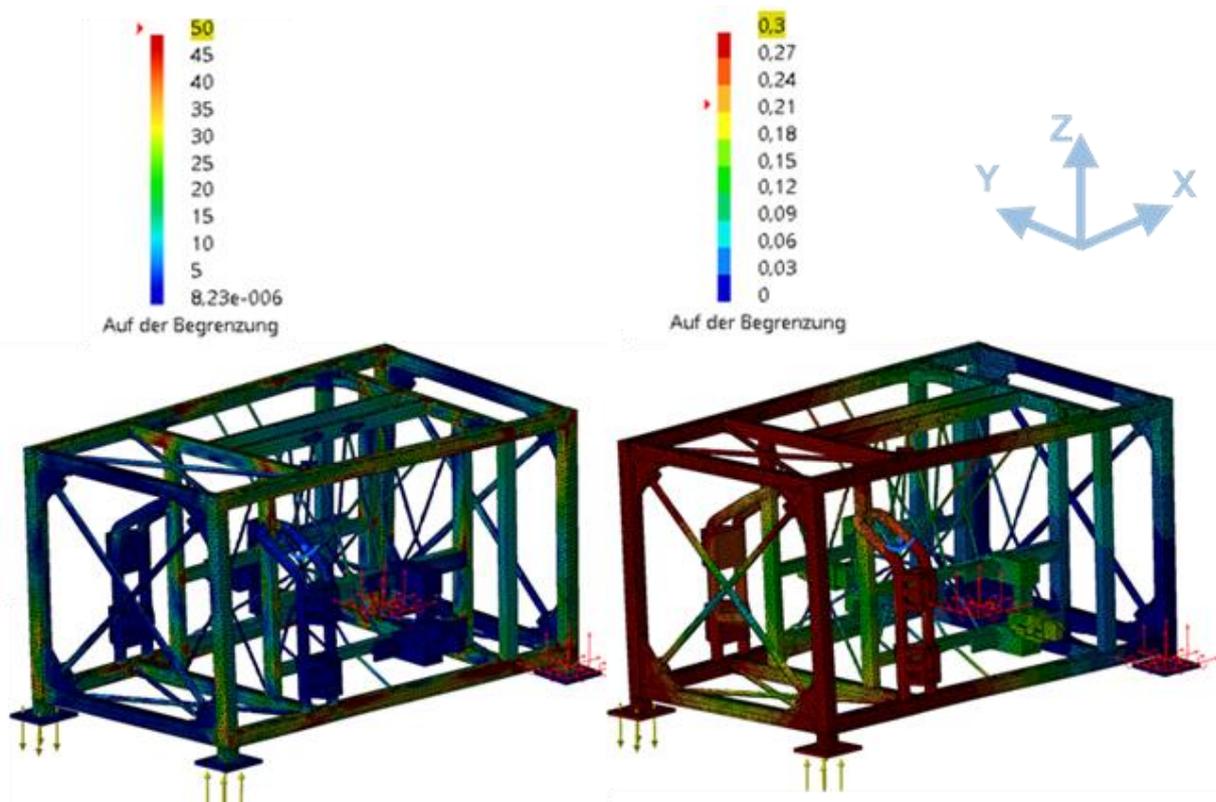


Abbildung 96: Modell 5-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

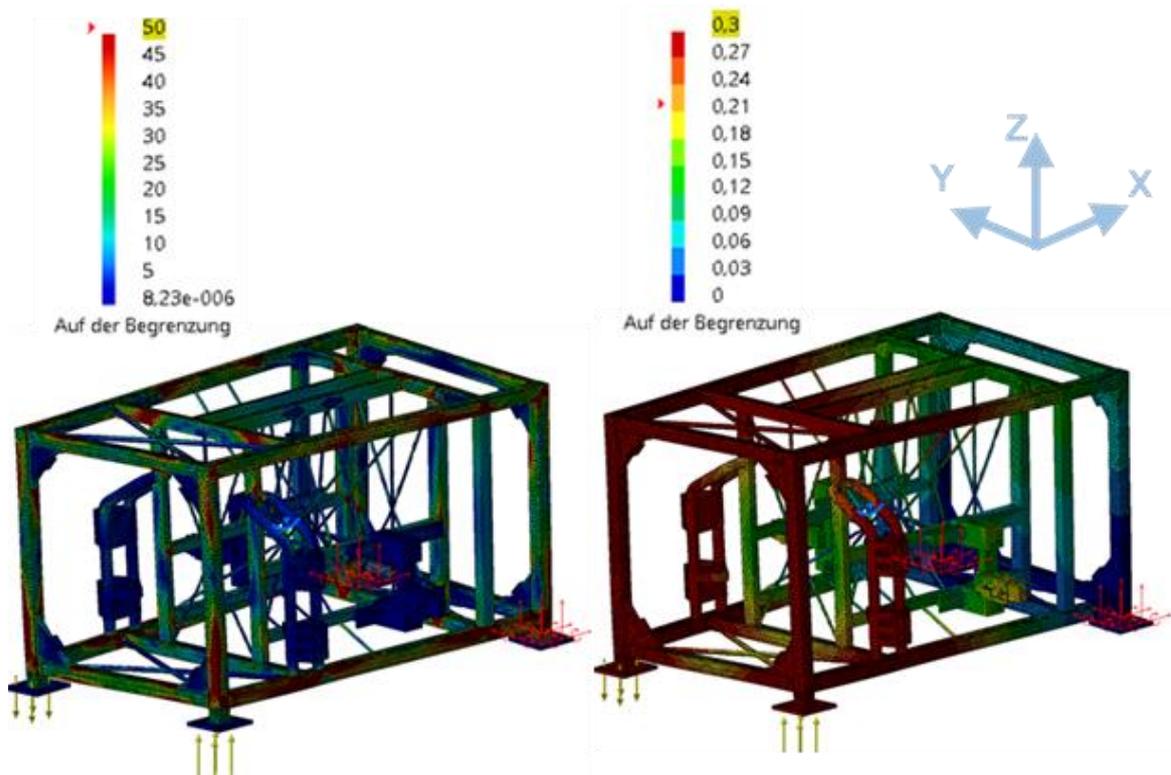


Abbildung 97:Modell 5-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Tabelle 19: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche

		Bereich							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Von Mises Spannungswert [MPa]	Mit Verstärkungselemente	120	140	150	161	130	200	300	250
	Ohne Verstärkungselemente	125	190	130	155	190	170	400	250

Tabelle 20: technische Merkmale von Modell 5

	Modell	
	5	
Verstärkungselemente	a	b
Netzgröße [mm]	25	25
Gewicht [Kg]	833,085	816,554

Verschiebung in Z-Richtung [mm]	11	13,4
Ziel Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	23100-30200	17600-19800
Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	16178,768	13281,5
Biegesteifigkeitstest Ausführbarkeit	Nicht möglich	Nicht möglich
Dachlast [Kg]	100	100

#### 4.4.6 Modell 6-FEM

Um die hohen Spannungen an den Ecken, die im vorherigen Modell zu sehen waren, zu reduzieren, wurden einige Änderungen und Ergänzungen vorgenommen (siehe den CAD-Abschnitt dieses Modells, um sie im Detail zu sehen). Durch die Hinzufügung von Elementen, insbesondere der Eckverstärkungen, werden die von-Mises-Spannungen reduziert, während sich das Gewicht der beiden Strukturen mit und ohne Verstärkungen nur unwesentlich erhöht. Die Ergebnisse sind in Abb. 98, Abb. 99 und den Tabellen 23 und 24 zu sehen.

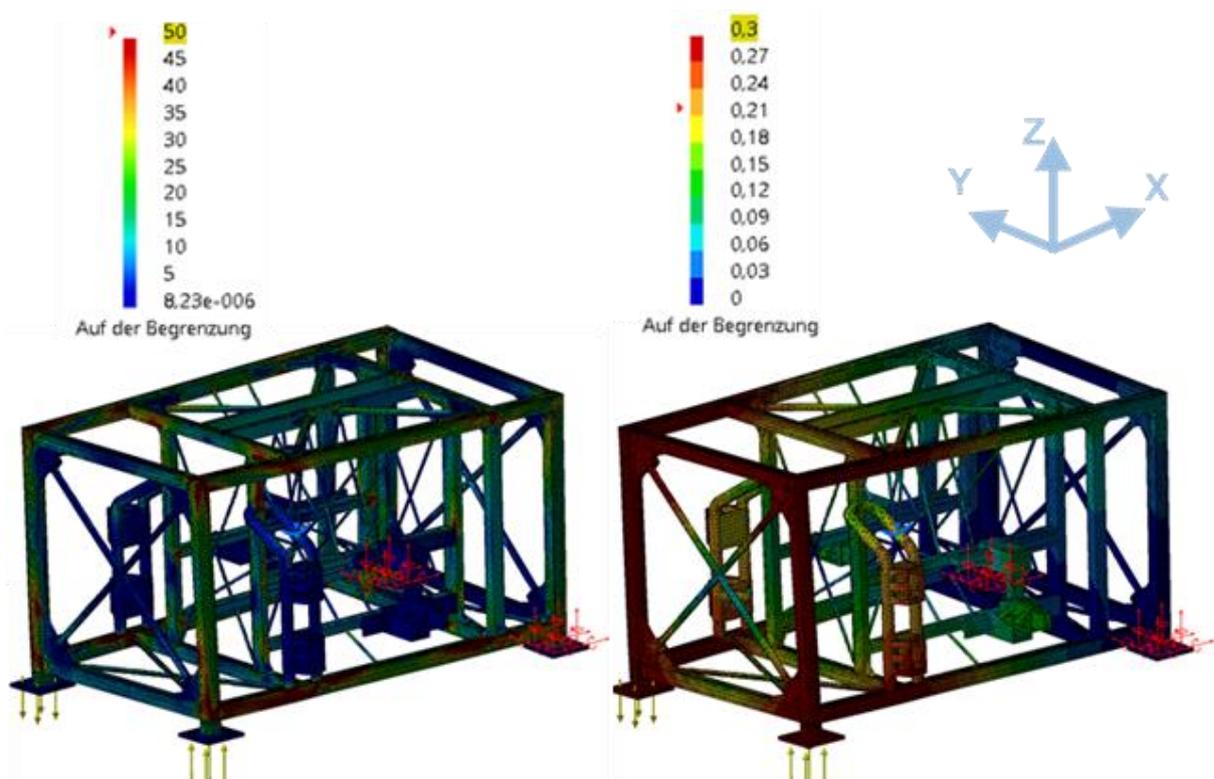


Abbildung 98: Modell 6-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

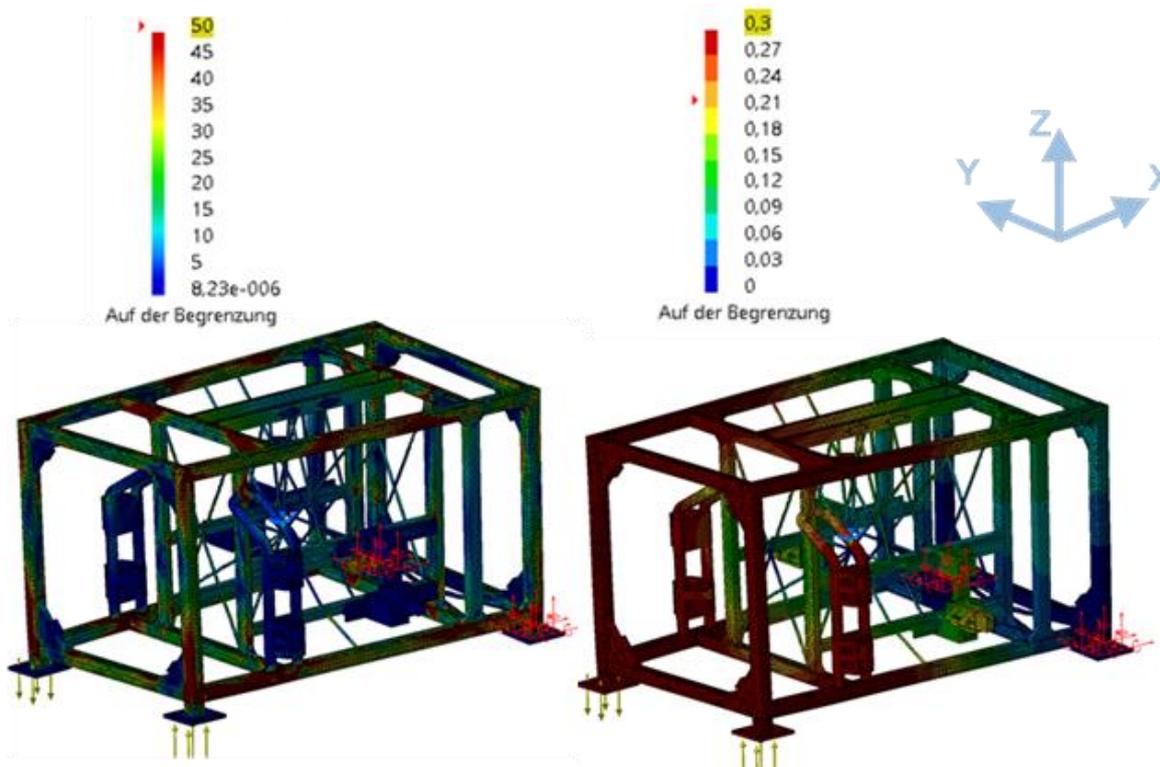


Abbildung 99: Modell 6-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Tabelle 21: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche

		Bereich							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Von Mises Spannungswert [MPa]	Mit Verstärkungselemente	150	100	200	200	150	200	200	120
	Ohne Verstärkungselemente	150	200	350	330	170	200	240	105

Tabelle 22: technische Merkmale von Modell 6

	Modell	
	6	
Verstärkungselemente	a	b
Netzgröße [mm]	28	/
Gewicht [Kg]	830,684	796,755

Verschiebung in Z-Richtung [mm]	10,8	15
Ziel Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	23100-30200	17600-19800
Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	16478,32	11868,236
Biegesteifigkeitstest Ausführbarkeit	Nicht möglich	Nicht möglich
Dachlast [Kg]	100	100

#### 4.4.7 Modell 7-FEM

Nach der Einführung eines neuen Innenlebens, das durch eine Mischung aus Fachwerk- und Balken gekennzeichnet ist, ist dieses Modell in mehr Aspekten modular als alle vorherigen Modelle. Dank der Balken in der Mitte kann dieses Modell verschiedenen Biegeversuchen unterzogen werden, indem die Lasten an verschiedenen Positionen entlang der Längsbalken platziert werden, um so die verschiedenen Belastungen zu simulieren, die z. B. durch Fahrgäste, Kraftstoff, das Gewicht der Struktur usw. entstehen.

Aufgrund ihres im Vergleich zu anderen Trägern geringen Querschnitts können die Stäbe und Balken abgeschnitten werden, wodurch die Struktur noch mehr Modularität in der Steifigkeit erhält, einschließlich der Modularität der Dach- und Strukturbiegung. Die Änderungen wirken sich direkt auf die Torsionssteifigkeit und das Gewicht sowohl der verstärkten als auch der nicht verstärkten Struktur aus. Die Randbedingungen und Ergebnisse des Torsionstests sind in den Tabellen 25 und 26 sowie in den beiden Abbildungen 100 und 101 zusammengefasst.

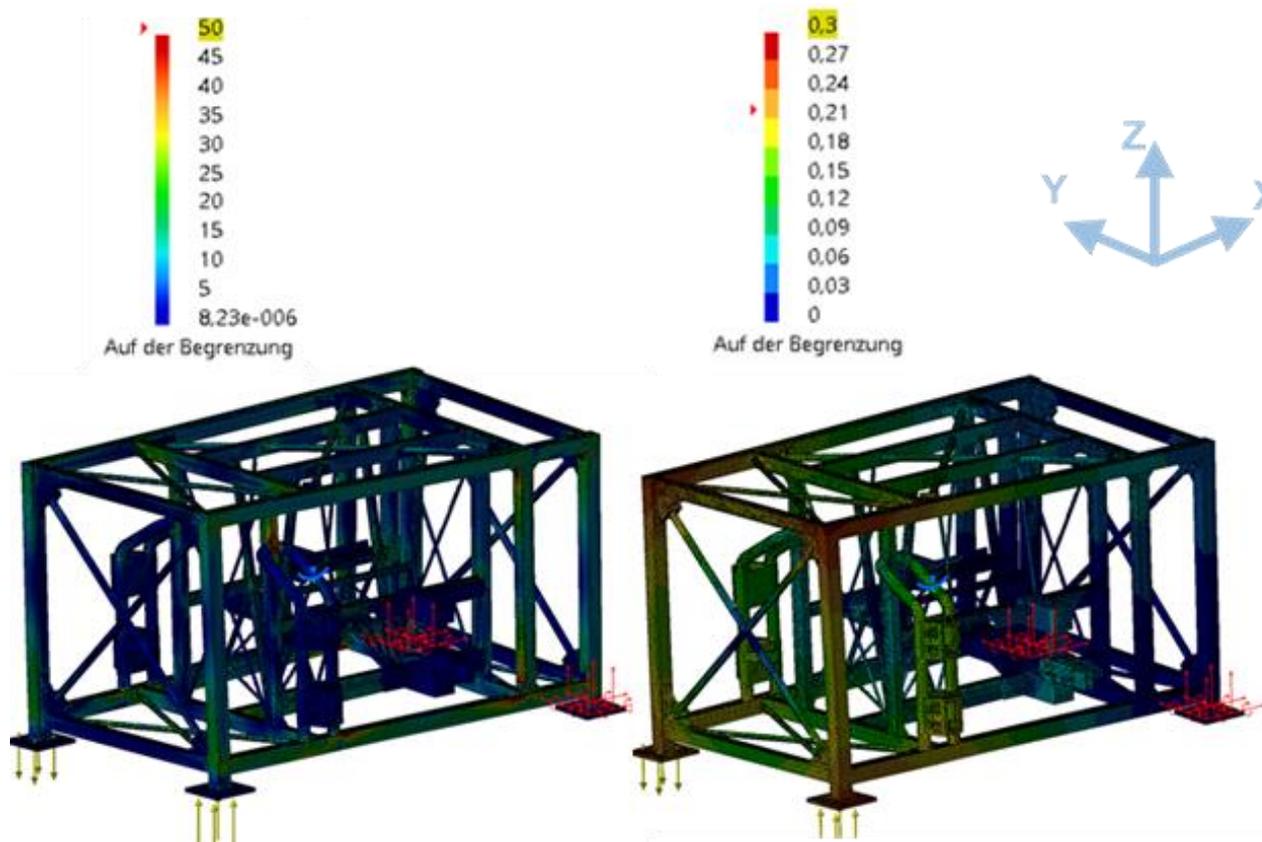


Abbildung 100: Modell 7-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

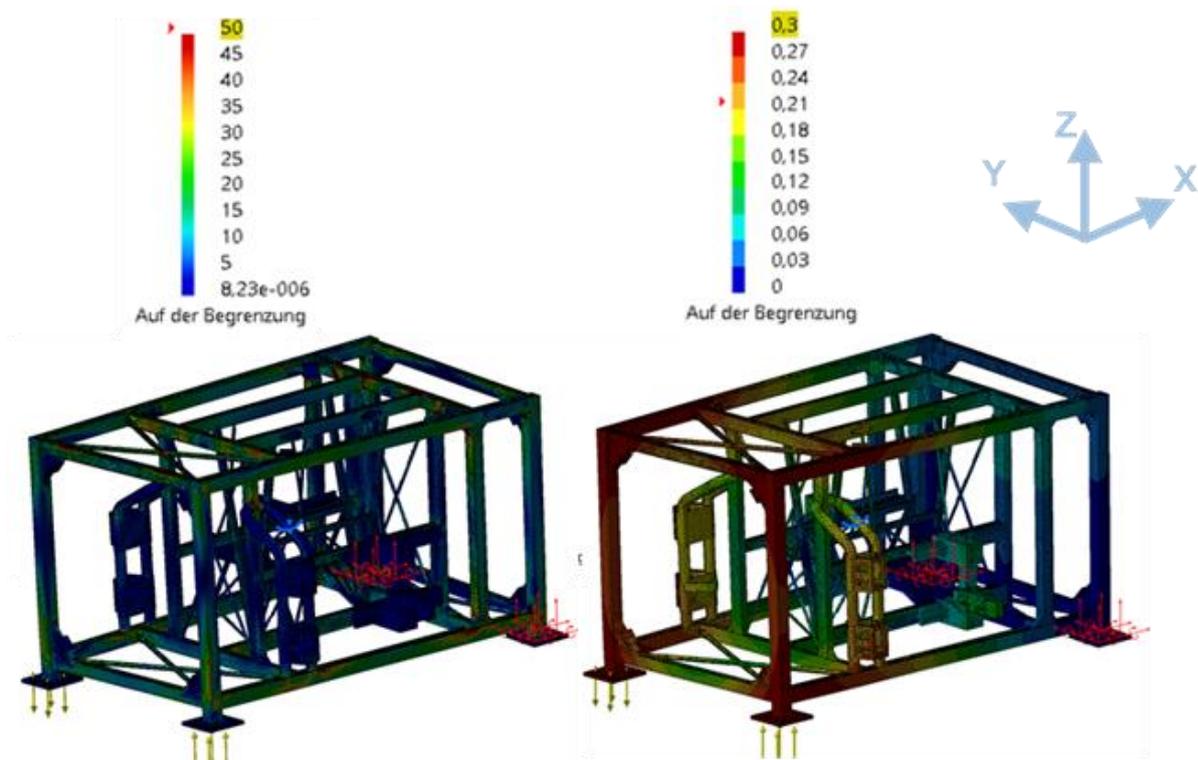


Abbildung 101:Modell 7-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Tabelle 23: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche

		Bereich							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Von Mises Spannungswert [MPa]	Mit Verstärkungselemente	100	110	200	250	150	250	120	180
	Ohne Verstärkungselemente	110	140	200	233	150	110	115	125

Tabelle 24: technische Merkmale von Modell 7

	Modell	
	7	
Verstärkungselemente	a	b
Netzgröße [mm]	20	20
Gewicht [Kg]	808,937	774,865

Verschiebung in Z-Richtung [mm]	6,42	9,11
Ziel Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	23100-30200	17600-19800
Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	27719	19534,8
Biegesteifigkeitstest Ausführbarkeit	Möglich	Möglich
Dachlast [Kg]	100	100

### 4.4.8 Modell 8-FEM

Die Optimierung dieses Modells zeigt, dass es die zuvor festgelegten Anforderungen erfüllt. Es hat eine modulare Torsionssteifigkeit, die zwischen den beiden Werten des Stadtautos und der Limousine liegt, was durch das Hinzufügen von Verstärkungselementen erreicht wird. Er verfügt auch über eine modulare Tragfähigkeit des Daches und eine modulare Biegesteifigkeit, die beide durch das Ausschneiden einiger Stäbe im aktualisierten Innenleben erreicht werden. Durch die Hinzufügung der Verstärkungselemente erhöht sich das Gewicht um 3,9 %, wie in Tabelle 28 dargestellt. Dieses optimierte Modell weist ein verbessertes Spannungs- und Verformungsverhalten auf, wie in Abb. 102 und Abb. 103 zu sehen ist, die beide aus dem Torsionstest abgeleitet wurden. In Tabelle 27 sind auch die aus dem Torsionstest ermittelten Von-Mises-Spannungen in den 8 zuvor bestimmten Bereiche zusammengefasst.

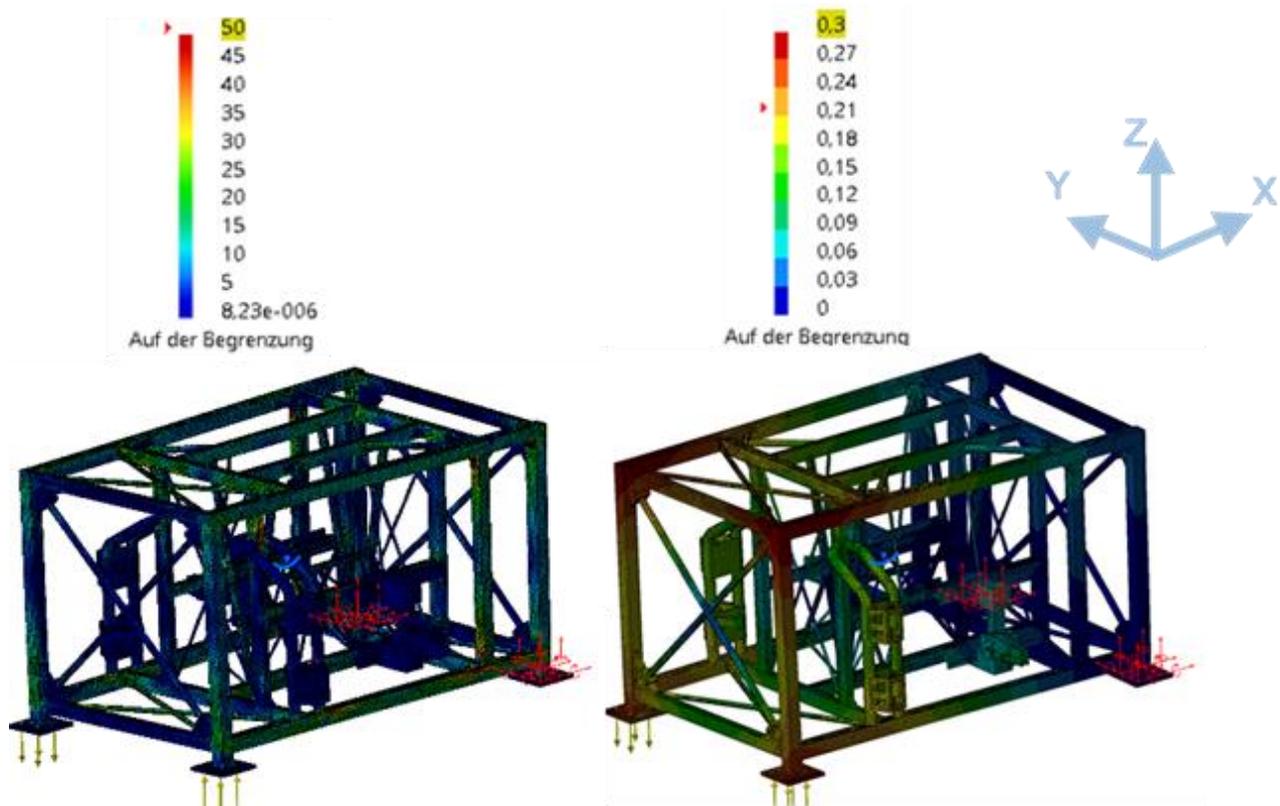


Abbildung 102: Modell 8-a-FEM mit Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

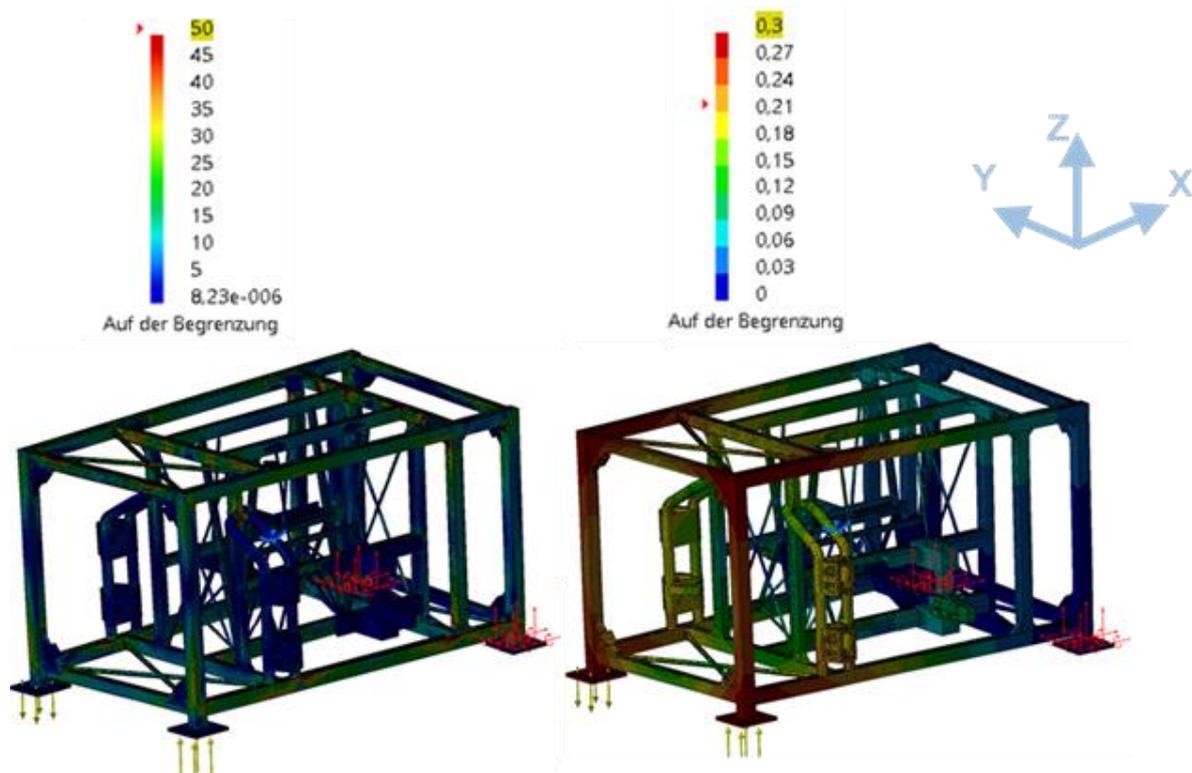


Abbildung 103: Modell 8-b-FEM Ohne Verstärkungselemente von-Mises (Links) Verformung (Rechts) Lastfall Torsion

Tabelle 25: Von-Mises-Spannungen in 8 Bereiche

		Punkt							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Von Mises Spannungswert [MPa]	Mit Verstärkungselemente	120	105	205	250	170	240	140	130
	Ohne Verstärkungselemente	130	140	200	233	150	140	140	100

Tabelle 26: technische Merkmale von Modell 8

	Modell	
	8	
Verstärkungselemente	a	b
Netzgröße [mm]	12	12
Gewicht [Kg]	816,374	785,7
Verschiebung in Z-Richtung [mm]	7,2	8,75
Ziel Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	23100-30200	17600-19800

Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	24716,44	20338,432
Biegesteifigkeitstest Ausführbarkeit	12931,03 (Möglich)	1500 (Möglich)
Dachlast [Kg]	100	100

Das Modells zeigt nun ausreichend, um in der nächsten Phase eingesetzt zu werden, in der die Ermüdungsfestigkeit getestet, die Eigenfrequenz bestimmt und einige fertigungstechnische Herausforderungen genauer untersucht werden.

### 4.5 Vergleich der Ergebnisse

Der Ersatzrahmen wird im Hinblick auf verschiedene Ziele entworfen. Mit der Entwicklung der Struktur, beginnend mit dem Modell 1, werden die Ziele nach und nach erreicht, wobei ein Optimierungsprozess verfolgt wurde. Tabelle 29 zeigt die Entwicklung der einzelnen Modelle mit Werten wie Torsionssteifigkeit und Gewicht. Sie fasst die Wirksamkeit des Optimierungsprozesses zusammen, der zu einem Ersatzrahmen führte, der die zuvor genannten Anforderungen erfüllt.

Tabelle 27: Modellvergleichstabelle

Modell	Konstruktive Parameter	Netzgröße [mm]	Gewicht [kg]	Verschiebung in Z-Richtung [mm]	Torsionssteifigkeit [Nm/Grad]	Biegesteifigkeit [N/mm]	Erlaubte Dachlast [kg]
Zieltorsionssteifigkeit					23100-30100		
					17600-19800		
1	a	28	1189	2,5	70898	\	100
	b	\	\	\	\	\	100
2	a	25	1313	2,5	70337	\	100
	b	25	1277	3,0	58345	\	100
3	a	25	1361	2,6	68181	\	100
	b	25	1321	3,7	47966	\	100
4	a	25	904	8,8	20109	\	100
	b	25	874	11,1	16033	\	100
5	a	25	833	11	16179	\	100
	b	25	816	13,4	13281	\	100
6	a	25	831	10,8	16478	\	100
	b	25	797	15	11868	\	100
7	a	20	809	6,4	27719	\	100
	b	20	775	9,1	19535	\	100
8	a	12	816	7,2	24716	12931,03 (Modular)	100 (Modular)
	b	12	786	8,7	20338	1500 (Variierend)	100 (Variierend)

### 4.6 FKM Nachweis

Für die FKM-Analyse ist eine realistischere Belastung des Rahmens erforderlich. Die FKM-Nachweis kann abschätzen, wie lange der Rahmen in Betrieb bleiben kann. Dazu muss eine Belastung

aufgebracht werden, die sich an den beiden Fahrzeugtypen orientiert, für die der Ersatzrahmen konstruiert wurde.

Bei der Konstruktion des Rahmens wird davon ausgegangen, dass ein Torsionsmoment auf die gesamte Struktur einwirkt, durch 2 entgegengesetzte Kräfte (vertikal in Z-Richtung) auf die unteren Füße der Vorderseite des Rahmens einwirken. Während beiden hinteren Füße sind fixiert. Die Optimierung der Torsionssteifigkeit wurde mit einer vertikalen Kraft  $F$  von 10000N auf jeden Fuß durchgeführt, aber da in der FKM-Nachweisführung eine genauere Belastung benötigt wird, ist eine genaue Analyse der Belastungssituation erforderlich.

Das Karosserie des Fahrzeugs wird in der Regel in verschiedenen Lastfällen verdreht, z. B. beim Durchfahren einer Kurve oder wenn ein Rad, in der Regel eines der Vorderräder, auf einen Bordstein auffährt. Das Gewicht des Fahrzeugs verursacht eine Torsion, deren Wert in erster Linie durch das Gesamtgewicht und die Verteilung auf die vier Räder bestimmt wird. Die Oberklasse-Limousine wiegt mehr als das Stadtauto. Es wird ein Fahrzeuggewicht von 1860 [kg] angenommen. Die Verteilung dieses Gewichts auf die vier Räder ist nicht gleichmäßig, aber bei dieser Baureihe ist der Motor vorne platziert, was die Gewichtsverteilung direkt beeinflusst. Es wird 55% des Gewichts auf die Vorderräder und 45% auf die Hinterräder verteilt. Als weitere Differenzierung zu den bisherigen Randbedingungen des optimierten Startmodells wird in der FEM-Berechnung ein Loslager anstelle eines festen hinteren rechten Fußes gesetzt, um ein realistischeres Ergebnis zu erhalten. Es wurde ein parabolisches Netz der Größe 12 mm verwendet.

Das berechnete Gewicht auf den Vorderrädern beträgt 510 [kg], was 5100 N entspricht. Mit einem Sicherheitsfaktor von 1,2 multipliziert, beträgt die vertikale Kraft auf jedem Rad 6120 N. In der Berechnung wurde also eine vertikale Kraft von 6100 N eingesetzt.

Diese Gewichtsverteilung und die Randbedingungen sind in Abb. 104 zu sehen.

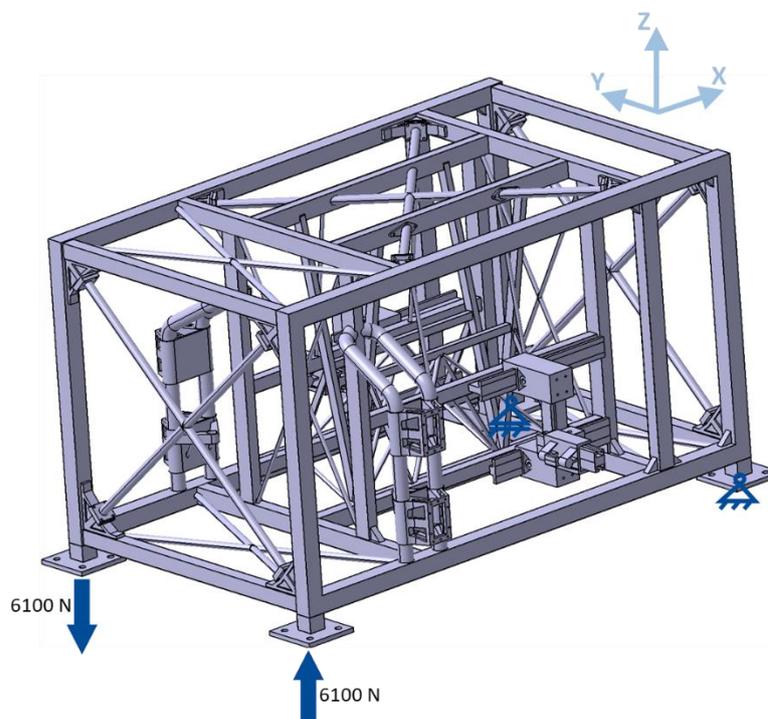


Abbildung 104: Randbedingungen mit einer Beispieldarstellung

Die an den Randbedingungen vorgenommenen Änderungen haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Torsionssteifigkeiten des Rahmens im Vergleich zu denjenigen aus dem abschließenden Modell des Optimierungsprozesses. Im Vergleich zu den Torsionssteifigkeiten verhalten sich die Spannungskonzentrationen etwas anders, wie in Abb. 105 und Abb. 106 zu sehen ist.

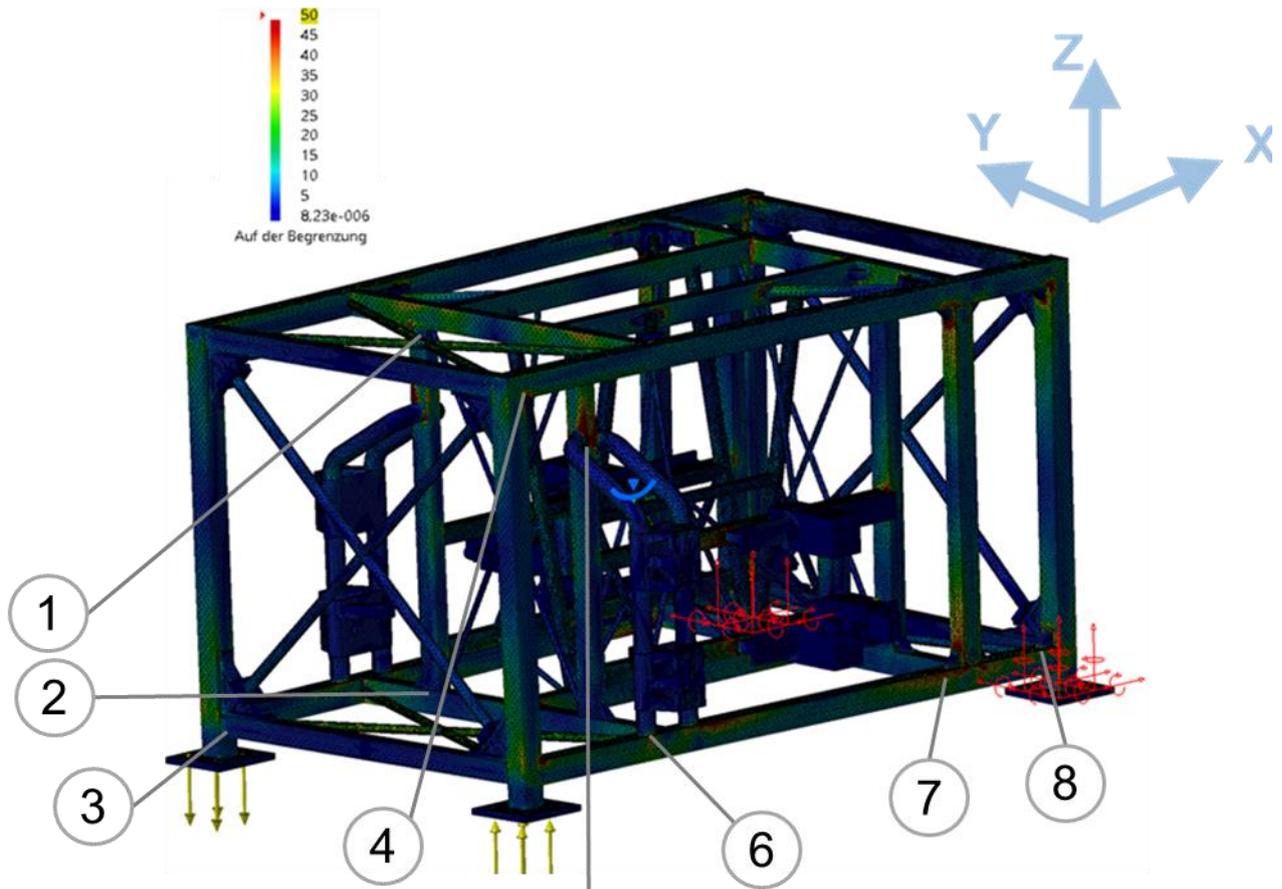


Abbildung 105: Hauptspannungen des Torsionslastfalls für FKM-Nachweis (mit Verstärkungselemente) am Modell 8-FEM

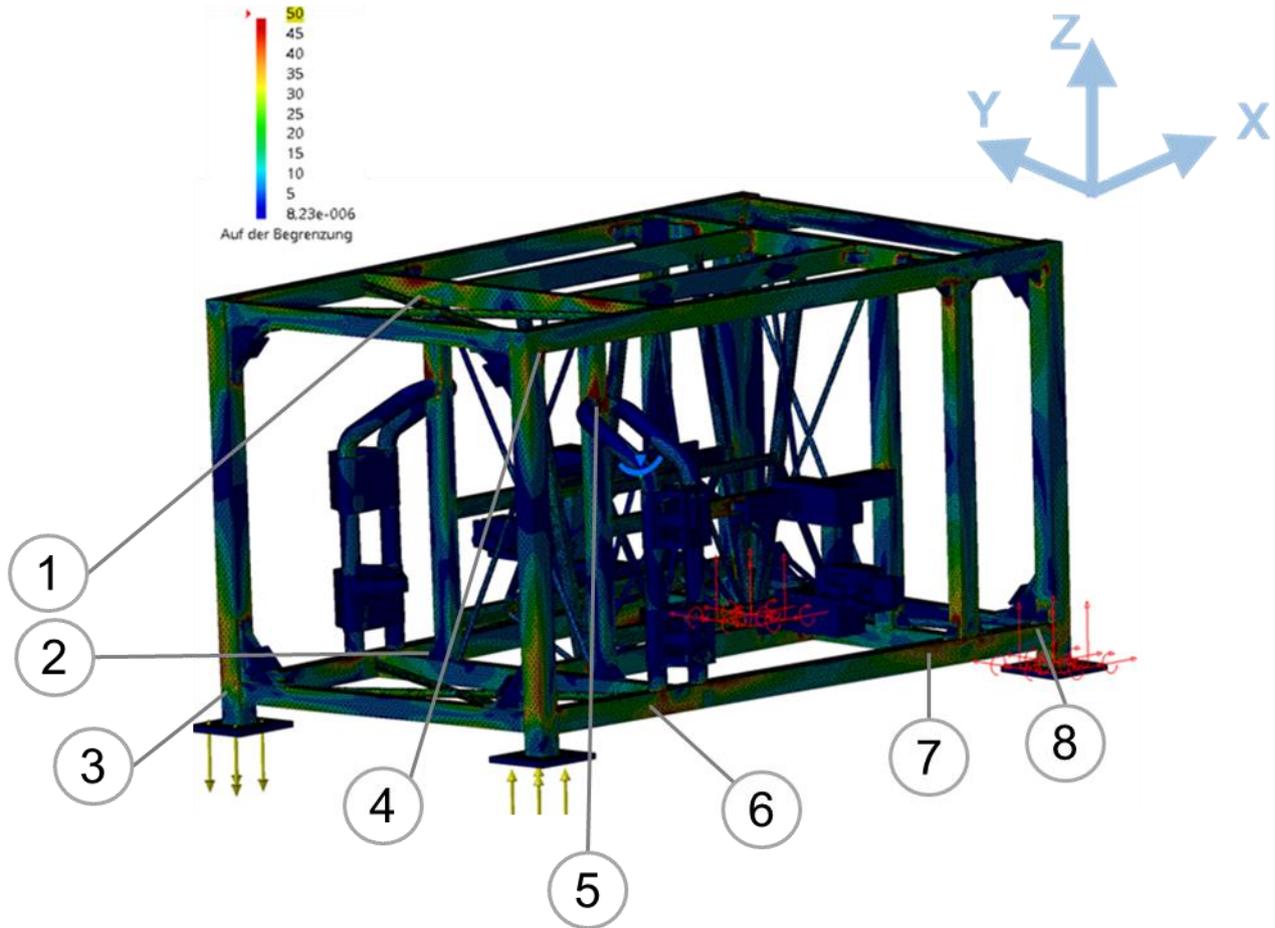


Abbildung 106: Hauptspannungen des Torsionslastfalls für FKM-Nachweis (Ohne Verstärkungselemente) am Modell 8-FEM

Tabelle 30 fasst die absoluten Hauptspannungen aus den acht zuvor definierten Bereich zusammen. Die angegebenen Spannungen sind eher eine Darstellung der Bereich mit der höchsten Spannung. Die genaue Zahl ist also nicht der Wert der höchsten Spannung an einem bestimmten Knoten, sondern ein Spiegel für die ihn umgebenden Knotenpunkte.

Tabelle 28: Absolute Hauptspannungen in den 8 Bereichen

Bereich	Absolute Hauptspannungswert [MPa]	
	Mit Verstärkungselemente (a)	Ohne Verstärkungselemente (b)
1	59,8	110
2	79,5	109
3	90,5	97,1
4	122 (Fügestelle)	138 (Fügestelle)
5	96,7	99,6
6	108(Material)	113(Material)
7	86 (Material)	101 (Material)
8	78,5	105 (Material)

In Bereich 6 der unverstärkten Struktur wurde die höchste Materialspannung in einem definierten Bereich ermittelt. Es wird eine Dauerfestigkeitsnachweis mit dem Programm "WIAM fatigue Rifest" Version 3.0.4 durchgeführt. Bevor mit der Nachweisführung begonnen werden kann, wird erneut eine Torsionssteifigkeitsanalyse mit Catia V5 FEM durchgeführt. Dieses Mal besteht der

Unterschied in einem lokalen Netz von 10 mm Größe in Bereich 6, wo die hohe Spannung aufgezeichnet wird, um adäquate Ergebnisse zu erzielen. Anschließend werden die Struktur mit der gleichen Gesamt- und lokalen (Bereich 6) Netzgröße einer FEM-Eigengewichtsanalyse unterzogen um eine genauere Resultat zu haben.

Für die Nachweisführung nach FKM werden sowohl Spannungen an einem Knoten als auch einem Nachbarknoten benötigt. Der gewählte Nachbarknoten steht senkrecht zu dem Knoten, von dem die Spannung abgelesen wird, also in die Materialdicke hinein. Derselbe Knoten und der Nachbarknoten werden dann im Lastfall Schwerkraft (Eigengewicht) identifiziert, und ihre Spannungen werden in der folgenden Tabelle 29 notiert. Als Ergebnis der Werte aus Tabelle 29 können der Mittelwert und die Amplitude berechnet werden. Der Mittelwert wird berechnet, indem die Spannungen des Knotens aus dem Torsionslastfall und die Spannungen des gleichen Knotens aus dem Schwerkraftlastfall addiert und die Summe durch zwei geteilt wird. Die Amplitude wird berechnet, indem der Mittelwert vom Wert der Spannungen des primären Knotens (Knoten mit hoher Spannung) abgezogen wird.

Es ist hervorzuheben, dass die Spannungen der (gleichen) Knoten, sobald eine Netzgröße von 10 mm verwendet wurde, aufgrund des feineren Netzes leicht gesunken sind. Die Nachweisführung wird mit den Standardeinstellungen durchgeführt, mit einigen Ausnahmen, wie der effektiven Wanddicke, die auf 3 mm festgelegt wird. Außerdem wird S355J0 als Material verwendet, da es eine höhere Streckgrenze als Baustahl aufweist. Außerdem wird ein Sicherheitsfaktor nach FKM verwendet, wie in Abb.107 zu sehen ist. Die Ergebnisse der Nachweisführung sind in Tabelle 30 zu sehen.

Tabelle 29: Absolute Hauptspannungswerte (Bereich 4)

Position		Lastfall Torsion [Mpa]	Lastfall Eigengewicht [Mpa]	Lastfall Torsion Nachbarknoten [Mpa]	Lastfall Eigengewicht Nachbarknoten [Mpa]	Knoten Abstand
6	$\sigma_1$	97,7	4,14	32,2	0	6,6mm
	$\sigma_2$	43,3	-0,54	1,17	-2,14	
	$\sigma_3$	-1,49	-5,12	-44,6	-5,95	
	<b>Amplitude</b>		<b>Mittelwert</b>	<b>Amplitude Nachbarknoten [Mpa]</b>	<b>Mittelwert Nachbarknoten [Mpa]</b>	
6	$\sigma_1$	46,78	50,92	16,1	16,1	
	$\sigma_2$	21,92	21,38	-1,655	-0,485	
	$\sigma_3$	-1,815	-3,305	-19,325	-25,275	

Abbildung 107: FKM Sicherheitsfaktor (Bereich 6)

Tabelle 30: Ergebnis der FKM-Analyse (Bereich 6)

Material	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Statische Auslastungsgrad		Zyklische Auslastungsgrad
			Lastfall 1	Lastfall 2	
S355J0	355 [MPa]	510 [MPa]	54,7 %	16 %	58,1 %

Für eine detailliertere Erläuterung der nach der FKM-Richtlinie durchgeführten Nachweisführung siehe Anhang A.

Als Teil der FKM-Nachweisführung sollten Bereiche mit hohen Spannungen analysiert werden, um die Dauerfestigkeit der Struktur zu gewährleisten. Die zuvor durchgeführte Nachweisführung zeigt ein positives Ergebnis für das Material. Damit ist gezeigt, dass die Struktur die zuvor gestellte Anforderung an die Dauerfestigkeit des Materials erfüllt.

Um die vollständige Dauerfestigkeit einer komplexen Struktur wie dieser zu gewährleisten, ist eine separate fertigungstechnische Studie erforderlich. Die separate Studie kann die erforderlichen Schweißarten und -größen bestimmen. Die Ermüdungsfestigkeit der Schweißstellen ist für die Überprüfung der Ermüdungsfestigkeit nach FKM-Richtlinien notwendig. Da ist eine unabhängige detaillierte Nachweisführung der Schweißnähte erforderlich. Einige der produktionstechnischen Aspekte wurden im Abschnitt ‚fertigungstechnische Bearbeitung‘ betrachtet.

Die Untersuchung der Schweißnaht beginnt mit der Bestimmung der höchstbelasteten Schweißnaht Spannungen gemäß der zuvor durchgeführten FEM-Torsionslastfallstudie. Laut Tabelle 30 befindet sich diese an Bereich 4, der im Querschnitt in Abbildung 108 zu sehen ist, wo auch die modellierte Kehlnaht identifiziert werden kann. Um genauere Ergebnisse zu erhalten, wird ein feineres Netz an der Stelle der zu untersuchenden Schweißnaht benötigt. Daher wird ein lokales Netz mit einer Größe von 2 mm erstellt, und die resultierenden Hauptspannungen in Bereich 4 sind in Abbildung 109 zu sehen.

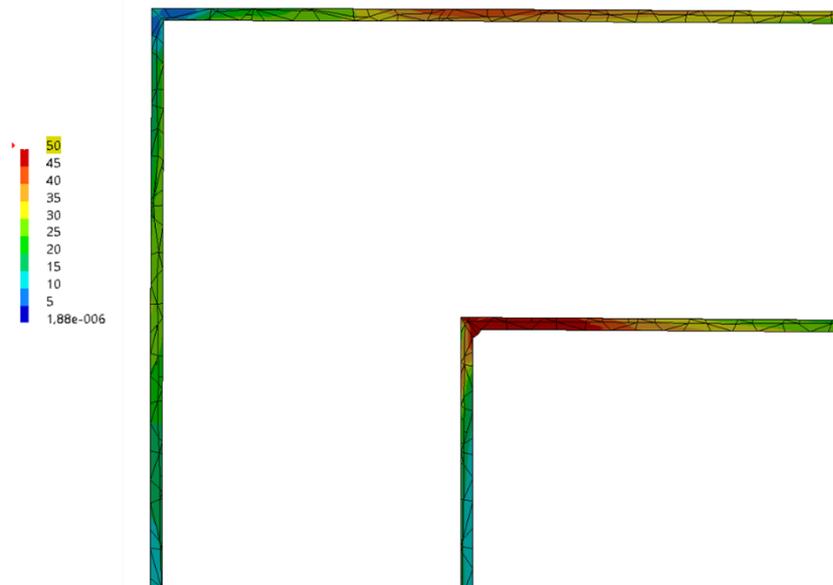


Abbildung 108: Bereich 4 Querschnitt

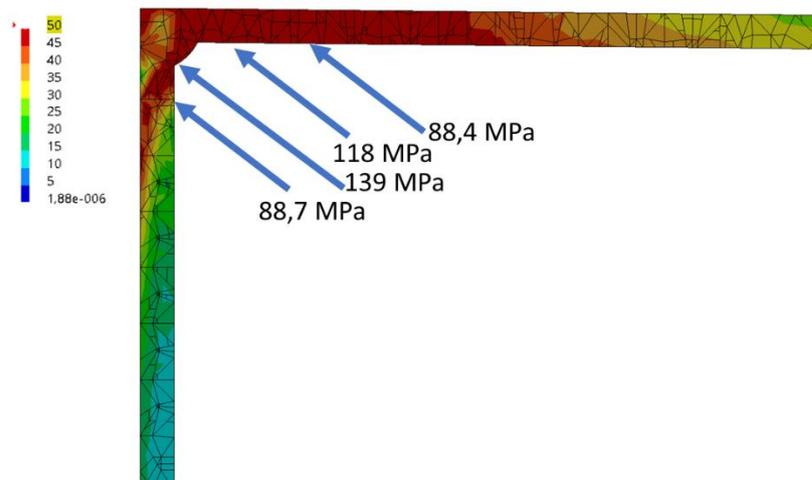


Abbildung 109: Bereich 4 Querschnitt mit 2mm lokales Netz

139 MPa ist der Spannungswert, der für den Nachweis verwendet wird. Die Spannungen werden in Tabelle 31 zusammengefasst, und die Ergebnisse sind in Tabelle 32 zu sehen. Für weitere detaillierte Informationen über die Nachweisführung siehe Anhang B.

Tabelle 31: Absolute Hauptspannungswerte (Bereich 6)

Position		Lastfall Torsion [Mpa]	Lastfall Eigengewicht [Mpa]	Lastfall Torsion Nachbarknoten [Mpa]	Lastfall Eigengewicht Nachbarknoten [Mpa]	Abstand
6	$\sigma_1$	-76,1	-17,4	-58,8	-12,2	1,256mm
	$\sigma_2$	-7,52	-5,77	-7,51	-6,89	
	$\sigma_3$	-136	-35,8	-99,6	-25,3	

		Amplitude	Mittelwert	Amplitude Nachbarknoten [Mpa]	Mittelwert Nachbarknoten [Mpa]	
<b>6</b>	$\sigma_1$	-29,35	-46,75	-94,3	35,5	
	$\sigma_2$	-0,875	-6,645	-0,31	-7,2	
	$\sigma_3$	-50,1	-85,9	-37,15	-62,45	

Tabelle 32: Ergebnis der FKM-Analyse (Bereich 6)

Material	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Statische Auslastungs- grad		Zyklische Auslastungs- grad
			Lastfall 1	Lastfall 2	
S355J0	355 [MPa]	510 [MPa]	74,5 %	17,6 %	82,2 %

### 4.7 Frequenzanalyse

Das Endergebnis des Ersatzrahmens wurde einer Frequenzanalyse unterzogen, um seine Eigenfrequenzen zu bestimmen. Die Ergebniswerte der drei niedrigsten Frequenzen sind in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33: Eigenfrequenzen

Frequenz	Frequenzwert
1	25,041Hz
2	28,132Hz
3	29,279Hz

### 4.8 Fertigungstechnische Bearbeitung

Der Ersatzrahmen, der aus dieser Arbeit entstanden ist, hat die funktionelle Aufgabe, die Prüfung von Standardtüren zu ermöglichen und gleichzeitig modular zu sein. Der Konstruktionsprozess ist durch verschiedene Phasen gekennzeichnet, von der Ideenfindung und den Kombinationen bis hin zur Prüfung und Sicherstellung der Dauerhaftigkeit. Die letzte Phase, die bereits zuvor teilweise berücksichtigt wurde, ist die Fertigungstechnik. Die Ersatzstruktur wurde aufgrund der vorherigen Auswertung der mit der VDI 2221 erhaltenen Kombinationen aus einfachen Balken Querschnitte entworfen. Die vereinfachte Struktur wurde mit Catia V5 erstellt, wobei einige Fertigungsrichtlinien nicht beachtet wurden, von denen einige an dieser Stelle besprochen werden.

Die Träger und alle Elemente werden mit Kehlnähten zusammengeschweißt. Die Schweißnähte können unterschiedlich sein, je nachdem, wie die Elemente aneinanderstoßen, in welcher Position und in welchem Winkel sie aneinanderstoßen, und je nach Belastungsform. Ein Beispiel ist die Fußnaht und die Schweißnaht der Dreiecksecksteife, wie in Abb. 110 dargestellt. Der Abstand zwischen der Dreiecksaussteifung und der Außenfläche des Trägers beträgt 7 mm, so dass eine Kehlnaht möglich ist. Ein weiteres Beispiel für einen Schweißfall ist in Abbildung 111 dargestellt, wo ein Hochspannungsbereich aufgezeichnet wurde. Die geometrische Lösung besteht darin, die beiden rechtwinkligen Balken diagonal zu teilen und eine Kehlnaht anzubringen. Diese Lösung ist nicht ideal und erklärt die in diesem Bereich aufgetretenen Spannungen, so dass in einer späteren Studie die Schweißnähte in den Mittelpunkt der Untersuchung gerückt werden sollten.

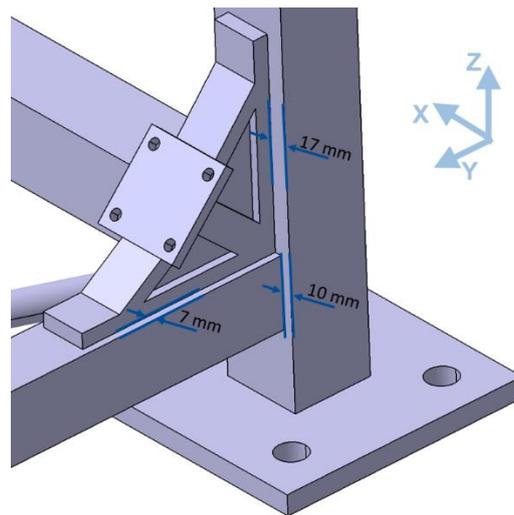


Abbildung 110: Schweißnaht der Dreiecksecksteife und Fuß

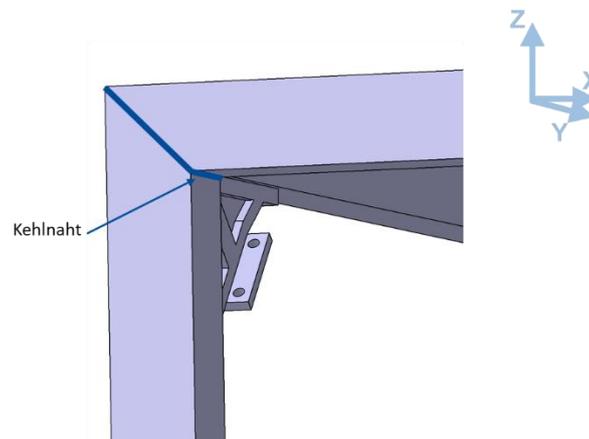


Abbildung 111: Balken Schweißfall

Die Verstärkungselemente, insbesondere die diagonalen Balken, die an der Vorder- und Rückseite der Struktur angebracht wurden, haben die Aufgabe, das Torsionssystem zu erhöhen. Im Prinzip funktionieren sie, indem sie auf die dreieckigen Eckverstärkungen geschraubt werden. Die Verarbeitung der derzeitigen Konstruktion der diagonalen Elemente stellt eine Herausforderung dar, da es bei der derzeitigen Konstruktion, abgesehen von den unerwünschten Spannungen, die durch die entstandene Verbindung verursacht wurden, schwierig ist, die vier Elemente adäquat miteinander zu verschweißen. Aus diesem Grund ist eine Lösung für das in Abb.112 dargestellte Problem erforderlich.

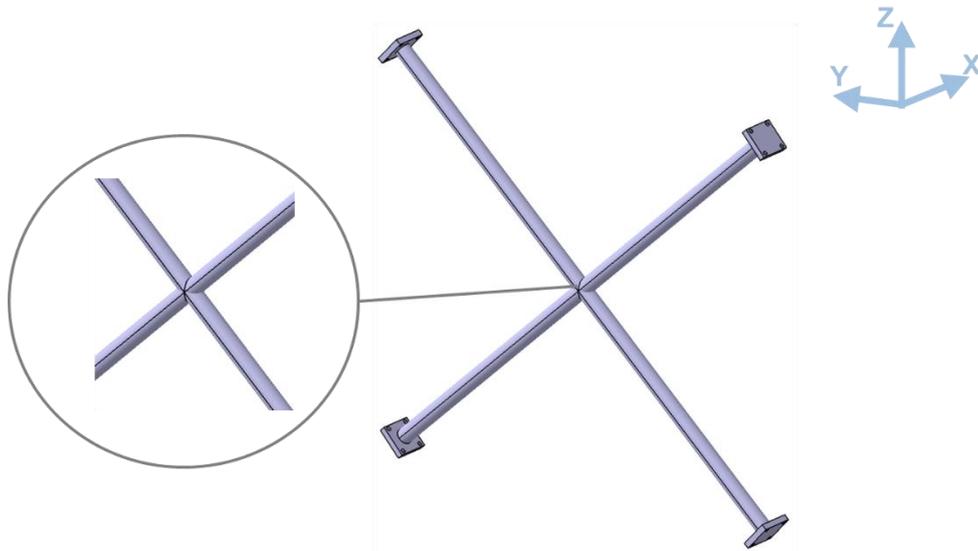


Abbildung 112: Verstärkungselemente technisches Problem

Eine der möglichen Lösungen ist die Überlappung der beiden Stäbe, so dass in der Mitte kein Knoten entsteht. Auf diese Weise können die hohen Spannungen und die Verarbeitungsprobleme vermieden werden. Siehe Abb. 113 und Abb. 114. Die Gefahr bei dieser Lösung ist eine erhöhte Knickgefahr in dem Bereich, in dem der Durchmesser geschrumpft wurde. Der fertigungstechnische Vorteil dieser Lösung liegt in der Modularität dieses Elements. Das identische Element kann für die vier Positionen an der Vorder- und Rückseite der Struktur hergestellt und verwendet werden.

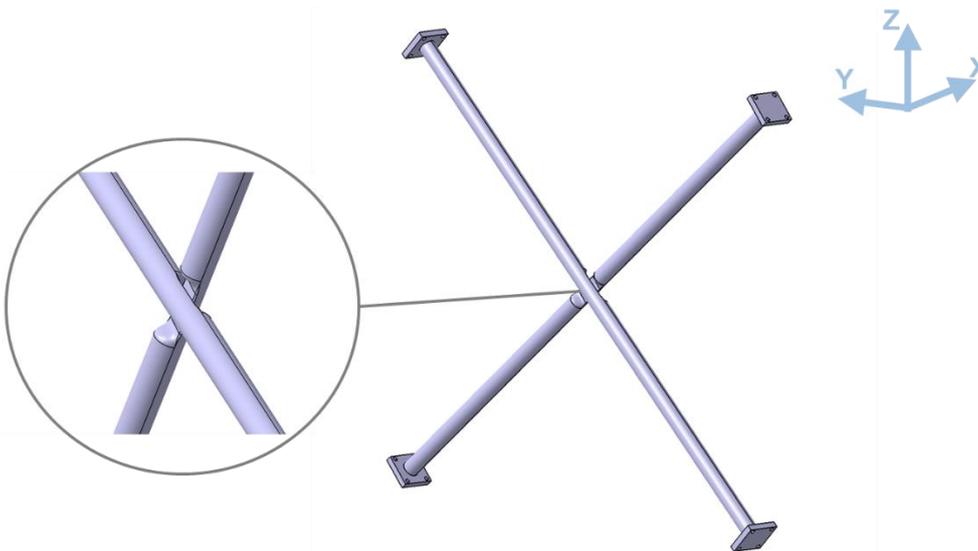


Abbildung 113: Verstärkungskomponente - Vorschlag für eine technische Lösung

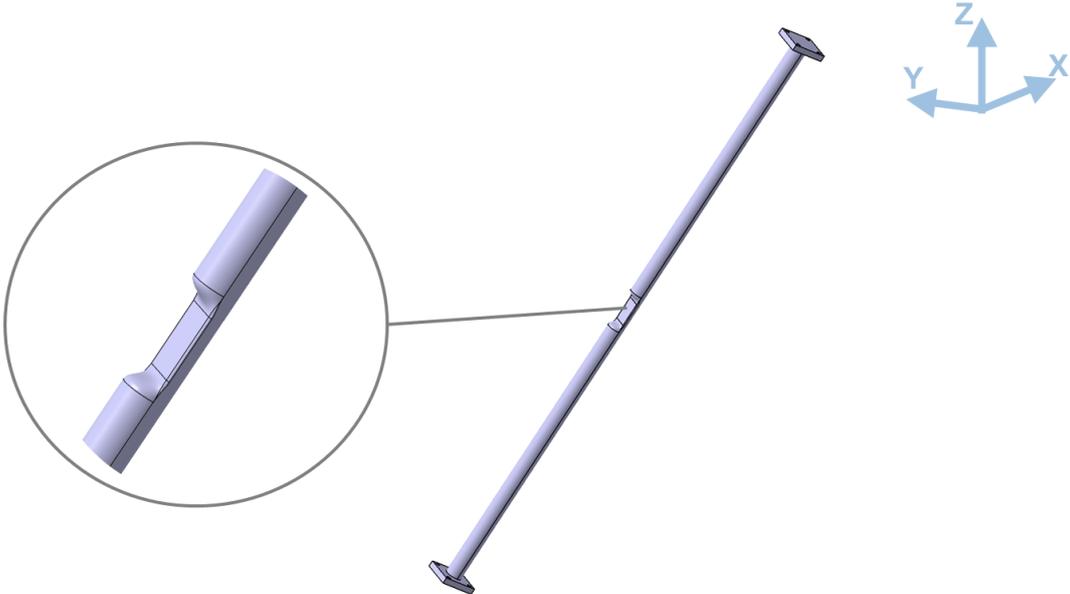


Abbildung 114: Verstärkungskomponente - Vorschlag für eine technische Lösung (einzelne Stange)

## 5 Zusammenfassung

In einer sich entwickelnden Branche, die sich im Laufe der Jahre mit der Einführung von CAE-Methoden stark verändert hat, werden nach wie vor physische Tests an den Fahrzeugrahmen und ihren Anbauteilen durchgeführt. Fahrzeugrahmen werden verschiedenen Tests unterzogen, z. B. Torsionstests. Auch die Anbauteile, insbesondere die Türen, werden verschiedenen Tests unterzogen, wie z. B. Biegetests, die ihre Funktion unter verschiedenen Bedingungen, einschließlich Überbeanspruchung, sicherstellen sollen.

Für diese Tests ist in der Regel eine Struktur erforderlich, was das Hauptziel dieser Arbeit ist. Ziel dieser Arbeit ist es, einen modularen Ersatzrahmen für die Prüfung zu entwickeln. Der Rahmen beweist seine Modularität durch seine veränderliche Torsionssteifigkeit, die diejenige eines Kleinwagens und einer Limousine simulieren soll. An dem Rahmen können Standardtüren montiert und getestet werden. Der Rahmen hat außerdem verschiedene geometrische und mechanische Anforderungen. In dieser Arbeit wurde ein tiefer Einblick in die an Fahrzeugrahmen und -türen durchgeführten Tests gegeben, um eine Lösung zu finden. Die Geometrie der Standardtüren, die Montagepositionen und die erforderlichen Teile wurden untersucht. Damit war der Arbeitsrahmen festgelegt, so dass anschließend eine Ideenwerkstatt nach VDI 2221 entwickelt wurde. Mit Hilfe der Ideenwerkstatt wurden systematisch Kombinationen gefunden und nach einem akribischen, speziell für diese Arbeit zugeschnittenen Bewertungssystem geeignete Kombinationen ermittelt. Mit Hilfe von CATIA V5 wurde ein vereinfachtes CAD-Teil erstellt, das ein 3-Punkt-Befestigungssystem für die Türen und demontierbare Verstärkungselemente beinhaltet, die elektrisch gesteuerte Schienen enthalten, die die Montage verschiedener Türgrößen und -formen ermöglichen. Die Verstärkungselemente können auf die Struktur auf- und abgeschraubt werden, wodurch sich die Steifigkeit der Struktur ändert.

Die FEM-Analysen haben dazu beigetragen, die Steifigkeit der Struktur zu bewerten und die Erfüllung der Anforderungen nachzuweisen. Der Rahmen wurde einem umfangreichen Optimierungsprozess unterzogen, bei dem jedes Mal, wenn gezielte Änderungen vorgenommen wurden, anschließend eine neue FEM-Analyse durchgeführt wurde, um die Änderungen zu bewerten und festzustellen, ob die angestrebten Ziele erreicht wurden. Das Ergebnis des Optimierungsprozesses ist ein modulares System Modell 8, das die Anforderungen erfüllt.

Nach der Bestimmung der hochbelasteten Knoten in 8 Bereichen wurde die Dauerfestigkeitsnachweis mit 'WIAM fatigue Rifest` Version 3.0.4 durchgeführt. Als Werkstoff wurde S355J0 gewählt. Die für das Material durchgeführten Dauerfestigkeitsberechnungen zeigen die Dauerfestigkeit der Struktur. Gemäß den FKM-Richtlinien wurde ein weiterer Nachweis an einer Kehlnaht als Beispiel dafür durchgeführt, was in einer umfassenden Nachweisführung getan werden sollte. Es wurden einige produktionstechnische Aspekte untersucht und Lösungen angeboten. Alles in allem erfüllt der in dieser Arbeit konstruierte Rahmen die gestellten Anforderungen. Es sollten einige zusätzliche Aspekte berücksichtigt und weiter untersucht werden, damit er voll funktionsfähig ist und möglicherweise von der Industrie übernommen werden kann.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Seiffert, Ulrich; Rainer, Gitthard: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. 1. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2008.
- [2] Braess, Hans-Hermann; Seiffert, Ulrich (Herausgeber): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 7 Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden 2016.
- [3] Małczuk, Adrianm; Pawlak, Maciej; Podkowski, Krzysytof; Stasiak, Andrzej: Testing of the torsional stiffness of the passenger car frame and its validation by means of finite element analysis. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji 85(3):83–101, Warsaw 2019.
- [4] Chen, Sichao: Car body Torsional Rigidity -A Comprehensive List (Updated 05/26/22). 2016. In: <http://youwheel.com/home/2016/06/20/car-body-torsional-rigidity-a-comprehensive-list/> am 04.06.22.
- [5] GermanCarForum: The List: Torsional Rigidity. 2007. In: <https://germancarforum.com/threads/the-list-torsional-rigidity.12334/> am 22.05.22.
- [6] Trzesniowski, Michael: Rennwagentechnik Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme. 1 Aufl. Vieweg+Teubner, Tschechien 2008.
- [7] Gänsicke, Thomas; Klein, Bernd: Leichtbau-Konstruktion Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung. 11 Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden 2019.
- [8] Hauger, Werner; Gross, Dietmar; Schröder, Jörg; A.Wall, Wolfgang: Technische Mechanik 2. 14 Aufl. Springer Vieweg, Berlin 2021.
- [9] Gawande, S.H.; Muley, A.A.; Yerrawar, R.N: Optimization of Torsional Stiffness for Heavy Commercial Vehicle Chassis Frame. Automotive Innovation 1:352–361, Pune 2018.
- [10] Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH: Overview Test Facilities Tests and Analyses. 2016. In: [https://www.iabg.de/fileadmin/media/Geschaeftsfelder/Presse/Mediathek/PDF/Englisch/IABG\\_TA\\_Test-facilities-overview\\_us.pdf](https://www.iabg.de/fileadmin/media/Geschaeftsfelder/Presse/Mediathek/PDF/Englisch/IABG_TA_Test-facilities-overview_us.pdf) am 05.05.22.
- [11] Benhayoun, I., de Faverges, A., Bonin, F. et al. Simulationsgetriebener Designansatz für weniger Geräusche und Vibrationen. ATZ Automobiltech Z 119, 38–43 (2017).
- [12] Esderts, Alfons; Müller Christian; Wächter Michael: Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie Kurz und bündig. 2 Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden 2021.
- [13] Schönfeld, Markus: Alle Türtypen auf einen Blick. 2019. In: <https://www.autozeitung.de/autotueren-alle-arten-196165.html> am 15.06.22.
- [14] Volkswagen: Fahrzeugabmessungen Up!. 2021. In: [https://cdn.volkswagen.at/media/Kwc\\_Basic\\_DownloadTag\\_Component/35590-paragraphs-416797-text-l5-child/default/42afe17d/1636014924/up-zubehoer-katalog.pdf](https://cdn.volkswagen.at/media/Kwc_Basic_DownloadTag_Component/35590-paragraphs-416797-text-l5-child/default/42afe17d/1636014924/up-zubehoer-katalog.pdf) am 05.05.22.
- [15] Mercedes Benz: Die Maße der neuen Mercedes-Benz S-Klasse. 2020. In: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/picture/Mercedes-Benz-S-Klasse-V-223-2020.xhtml?oid=47190240> am 04.05.22.

- [16] Grabner, Jörg; Nothhaft, Richard: Konstruieren von Pkw-Karosserien Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5. 3 Aufl. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2006.
- [17] Biermann, Philipp: Entwicklung eines Türöffnungskonzeptes für einen Oberklassewagen mit konstruktiver Untersuchung. Zwickau 2012.
- [18] Schadenbauer, Peter: Die Konzeptphase in der Türenentwicklung. Graz 2010.
- [19] HIROTEC Group: Automotive Doors. 2017. In: <https://www.hirotec.co.jp/eng/product/door.html> am: 04.04.22.
- [20] Freialdenhoven, Arndt; Olschewski, Ingo; Wallentowitz, Henning: Strategien in der Automobilindustrie Technologietrends und Marktentwicklungen. 1 Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2009.
- [21] Linke, Markus; Nast, Eckart: Festigkeit für den Leichtbau Ein Lehrbuch zur Technischen Mechanik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2015.
- [22] Fuyoautomation: Multi-axis Motion Table Linear Gantry System Vertical XYZ Stage. 2021. <https://www.fuyumotion.com/multi-axis-motion-table-linear-gantry-system-vertical-xyz-stage-product/> am 20.05.22.
- [23] Leantechnik: Gesamtkatalog lifgo® & lean SL® 5. 2022. In: [https://leantechnik.com/wp-content/uploads/2018/06/Gesamtkatalog\\_DE.pdf](https://leantechnik.com/wp-content/uploads/2018/06/Gesamtkatalog_DE.pdf) am 01.06.22.
- [24] Koehldorfer, Werner: Finite-Elemente-Methoden mit CATIA V5 / Simulia Berechnung von Bauteilen und Baugruppen in der Konstruktion. 3 Aufl. Carl Hanser Verlag, München 2010.

# Anhang A

WIAM® fatigue RIFEST Education



## Festigkeitsnachweis

nach der FKM-Richtlinie "Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile", 7. Ausgabe, 2020 mit örtlichen elastischen Spannungen

## Zusammenfassung der Ergebnisse

Bereich	Stelle	LC	Schnittebene	jstat	jD	a_maxSK	a_maxBK
1	Name	0	0	1.35	1.35	54.7%	58.1%

## WIAM® fatigue RIFEST Education



### Festigkeitsnachweis

nach der FKM-Richtlinie "Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile", 7. Ausgabe, 2020 mit örtlichen elastischen Spannungen

### Eingabewerte

#### Allgemeine Eingaben

Bezeichnung	Name
Bauteilart	Grundmaterial
Beanspruchungsvorgabe	Spannungskollektiv

#### Spannungskennwerte

Spannungszustand	ebener Spannungszustand oder Hauptspannungszustand
Wirken der Spannung	wie eingegeben/ proportional
Überlastungsfall	F2 (konstantes Spannungsverhältnis)
Berechnung des Spannungsgefälles	Spannung am Nachbarknoten

#### Werkstoff

Bezeichnung		1.0553 (S355J0)
Gruppe		unlegierter Baustahl
Anisotropiefaktor	$K_A$	1.0
Normwert der Zugfestigkeit	$R_{m,N}$	510.0 MPa
Normwert der Fließgrenze	$R_{p,N}$	355.0 MPa
Bruchdehnung	$A_N$	20.0 %
effektiver Durchmesser	$d_{eff}$	40.0 mm

#### Wöhlerlinienkennwerte

	$k_t$	$k_n$	$N_{D,I}$	$N_{D,II}$
Normalspannung - Typ I	5.0	-	1.0e+06	-
Schubspannung - Typ I	8.0	-	1.0e+06	-

#### Umgebungseinflüsse

Betriebstemperatur	T	20.0°C
Betriebsdauer	t	100000.0 h

#### Konstruktion

Oberflächenbehandlung		keine
Randschichtfaktor	$K_r$	1.0
Faktor	$K_{NLE}$	1.0
Oberflächenrauheit	$R_z$	200.0 $\mu\text{m}$
Schutzschichtfaktor	$K_s$	1.0

#### Sicherheitsfaktoren

bezüglich der Zugfestigkeit	$j_m$	1.80
bezüglich der Streckgrenze	$j_F$	1.35
bezüglich der Zeitstandfestigkeit	$j_{mt}$	1.35
bezüglich der Zeitdehngrenze	$j_{Ft}$	1.00
bezüglich der Ermüdungsfestigkeit	$j_F$	1.35
Lastsicherheitsfaktor	$j_s$	1.00

#### Kommentar

Rifest-Version: 3.0.4

## Liste statischer Zustände

	$\sigma_{xx}$ [MPa]	$\sigma_{yy}$ [MPa]	$\sigma_{zz}$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{zx}$ [MPa]
Lastfall 1	148.6	64.8	-4.8	0.0	0.0	0.0
Lastfall 2	-46.8	-22.0	-1.8	0.0	0.0	0.0

## Liste Beanspruchungszyklen

## Region 1 - Nachweispunkt 1 - Lastfallkombination 0 - Schnittebene 0

$\sigma_{xx}$			$\sigma_{yy}$			$\sigma_{zz}$			$\tau_{xy}$		
$s_m$ [MPa]	$s_a$ [MPa]	N	$s_m$ [MPa]	$s_a$ [MPa]	N	$s_m$ [MPa]	$s_a$ [MPa]	N	$s_m$ [MPa]	$s_a$ [MPa]	N
50.9	97.7	2.2e+33	21.4	43.4	2.2e+33	-3.3	1.5	2.2e+33			

### Statischer Festigkeitsnachweis Lastfall 1

#### Spannungskennwerte - Input

Spannungskennwerte [MPa]	$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{zz}$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
	148.6	64.8	-4.8	0.0	0.0	0.0

#### Spannungskennwerte

		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
Hauptspannung (nicht nach Definition der FKM) [MPa]	$\sigma_i$	148.6	64.8	-4.8
Zug-/Druckfestigkeitsfaktor	$f_\sigma$	1.0	1.0	1.0
Wichtungsfaktor	q	0.000		
Mehrachsigkeitsgrad	h	0.523		
Vergleichsspannung [MPa]	$\sigma_v$	133.1		

#### Festigkeitskennwerte

Normwert der Zugfestigkeit [MPa]	$R_{m,N}$	510.0
Normwert der Fließgrenze [MPa]	$R_{p,N}$	355.0
Technologische Größenfaktoren	$K_{d,m}$	0.932
	$K_{d,p}$	0.925
	$K_{d,A}$	1.000
Anisotropiefaktor	$K_A$	1.000
Bauteilfestigkeitswerte [MPa]	$R_m$	476
	$R_p$	328
Bruchdehnung [%]	A	20.0

#### Konstruktionskennwerte

Plastische Formzahl (nach Eingabe)	$K_p$	1.000
Ertragbare Gesamtdehnung	$\epsilon_{acr}$	0.1529
Plastische Stützzahl, aus ertragbarer Dehnung		9.885
Plastische Stützzahl, angewendet	$\eta_{pi}$	1.000

#### Bauteilfestigkeit

Statische Bauteilfestigkeit [MPa]	$\sigma_{SK}$	328
-----------------------------------	---------------	-----

#### Sicherheitsfaktoren

Temperaturfaktoren	$K_{T,m}$	1.000
	$K_{T,p}$	1.000
	$K_{T,m}$	1.000
	$K_{T,p}$	1.000
Teilsicherheitsfaktoren	$j_G$	1.000
	$\Delta j$	0.000
Gesamtsicherheitsfaktor	$j_{SW}$	1.350

#### Nachweis

Gesamtauslastungsgrad	$a_{SK}$	0.547
-----------------------	----------	-------

Der statische Auslastungsgrad beträgt 54.7 %

### Statischer Festigkeitsnachweis Lastfall 2

#### Spannungskennwerte - Input

Spannungskennwerte [MPa]	$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{zz}$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
	-46.8	-22.0	-1.8	0.0	0.0	0.0

#### Spannungskennwerte

Hauptspannung (nicht nach Definition der FKM) [MPa]	$\sigma_i$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
Zug-/Druckfestigkeitsfaktor	$f_\sigma$	1.0	1.0	1.0
Wichtungsfaktor	q	0.000		
Mehrachsigkeitsgrad	h	-0.603		
Vergleichsspannung [MPa]	$\sigma_v$	39.0		

#### Festigkeitskennwerte

Normwert der Zugfestigkeit [MPa]	$R_{m,N}$	510.0
Normwert der Fließgrenze [MPa]	$R_{p,N}$	355.0
Technologische Größenfaktoren	$K_{Am}$	0.932
	$K_{Ap}$	0.925
	$K_{dA}$	1.000
Anisotropiefaktor	$K_A$	1.000
Bauteilfestigkeitswerte [MPa]	$R_m$	476
	$R_p$	328
Bruchdehnung [%]	A	20.0

#### Konstruktionskennwerte

Plastische Formzahl (nach Eingabe)	$K_p$	1.000
Ertragbare Gesamtdehnung	$\epsilon_{acr}$	0.2016
Plastische Stützzahl, aus ertragbarer Dehnung		11.352
Plastische Stützzahl, angewendet	$\eta_{pl}$	1.000

#### Bauteilfestigkeit

Statische Bauteilfestigkeit [MPa]	$\sigma_{St}$	328
-----------------------------------	---------------	-----

#### Sicherheitsfaktoren

Temperaturfaktoren	$K_{T,m}$	1.000
	$K_{T,p}$	1.000
	$K_{T,m}$	1.000
	$K_{T,p}$	1.000
Teilsicherheitsfaktoren	$j_G$	1.000
	$\Delta j$	0.000
Gesamtsicherheitsfaktor	$j_{St}$	1.350

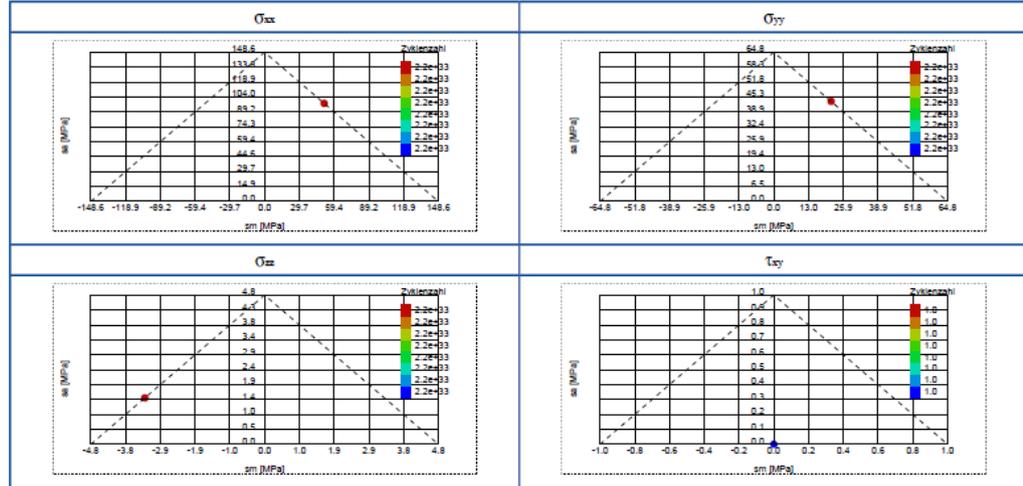
#### Nachweis

Gesamtauslastungsgrad	$a_{St}$	0.160
-----------------------	----------	-------

Der statische Auslastungsgrad beträgt 16.0 %

Ermüdungsfestigkeitsnachweis - Schnittebene 0

Spannungskennwerte - Input



$\sigma_{xx}$     $\sigma_{yy}$     $\sigma_{zz}$     $\tau_{xy}$

Spannungskennwerte

Spannung am Nachbarknoten [MPa], $\Delta s = 1.000$ mm	16.1	-1.7	0.0	-19.3
Bezogenes Spannungsgefälle [mm <sup>-1</sup> ]	0.835	1.038	0	0.000

Festigkeitskennwerte

Wechselfestigkeit [MPa]	$\sigma_w$	214	214	214	123
-------------------------	------------	-----	-----	-----	-----

Konstruktionskennwerte

Stützzahl nach Siebel und Stieler	$n_s$	1.193	1.213	1.000	1.000
Statistische Stützzahl	$n_{st}$	1.000			
Verformungsmechanische Stützzahl	$n_{vm}$	1.094			
Bruchmechanische Stützzahl	$n_{bm}$	1.000	1.000	1.000	1.000
Stützzahl	$n_o$	1.193	1.213	1.000	1.094
Schätzwert der Kerbwirkungszahl	$K_f$	2.689	2.860	1.000	1.000
Rauheitsfaktor	$K_R$	0.810	0.810	0.810	0.890
Konstruktionsfaktor	$K_{WK}$	0.912	0.892	1.000	1.027

Bauteilfestigkeit

Berechnungsverfahren: Dauerfestigkeitsnachweis					
Bauteilwechselfestigkeit [MPa]	$\sigma_{WK}$	235	240	214	120
Mittelspannungsempfindlichkeit	$M_s$	0.066	0.066	0.066	0.038
Größtwert des Wechselfestigkeitskollektiv [MPa]	$\sigma_{w,1}$	101.1	44.8	1.4	0.0
Äquivalentamplitude [MPa]	$\sigma_{aq}$	101.1	44.8	1.4	0.0

## WIAM® fatigue RIFEST Education



### Sicherheitsfaktoren

Temperaturfaktor	$K_{T,D}$	1.000
Materialsicherheitsfaktor	$j_F$	1.350
Gussfaktor	$j_G$	1.000
Gesamtsicherheitsfaktor	$j_D$	1.350

### Nachweis

Zyklischer Auslastungsgrad [MPa]	$a_{BK}$	0.581	0.252	0.009	0.000
Wichtungsfaktor	$q$	0.000			
Vergleichsauslastungsgrad	$a_{BK,v}$	0.581			

Der zyklische Auslastungsgrad beträgt 58.1 %

# Anhang B

WIAM® fatigue RIFEST Education



## Festigkeitsnachweis

nach der FKM-Richtlinie "Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile", 7. Ausgabe, 2020 mit örtlichen elastischen Spannungen

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Bereich	Stelle	LC	Schnittebene	jstat	jD	a_maxSK	a_maxBK
1	Name	0	0	1.35	1.35	74.0%	82.2%

## WIAM® fatigue RIFEST Education



### Festigkeitsnachweis

nach der FKM-Richtlinie "Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile", 7. Ausgabe, 2020 mit örtlichen elastischen Spannungen

### Eingabewerte

#### Allgemeine Eingaben

Bezeichnung	Name
Bauteilart	Grundmaterial
Beanspruchungsvorgabe	Spannungskollektiv

#### Spannungskennwerte

Spannungszustand	ebener Spannungszustand oder Hauptspannungszustand
Wirken der Spannung	wie eingegeben/ proportional
Überlastungsfall	F2 (konstantes Spannungsverhältnis)
Berechnung des Spannungsgefälles	Spannung am Nachbarknoten

#### Werkstoff

Bezeichnung		1.0553 (S355J0)
Gruppe		unlegierter Baustahl
Anisotropiefaktor	$K_A$	1.0
Normwert der Zugfestigkeit	$R_{m,N}$	510.0 MPa
Normwert der Fließgrenze	$R_{p,N}$	355.0 MPa
Bruchdehnung	$A_N$	20.0 %
effektiver Durchmesser	$d_{eff}$	40.0 mm

#### Wöhlerlinienkennwerte

	$k_I$	$k_{II}$	$N_{D,I}$	$N_{D,II}$
Normalspannung - Typ I	5.0	-	1.0e+06	-
Schubspannung - Typ I	8.0	-	1.0e+06	-

#### Umgebungseinflüsse

Betriebstemperatur	T	20.0°C
Betriebsdauer	t	100000.0 h

#### Konstruktion

Oberflächenbehandlung		keine
Randschichtfaktor	$K_r$	1.0
Faktor	$K_{NLE}$	1.0
Oberflächenrauheit	$R_a$	200.0 $\mu\text{m}$
Schutzschichtfaktor	$K_s$	1.0

#### Sicherheitsfaktoren

bezüglich der Zugfestigkeit	$j_m$	1.80
bezüglich der Streckgrenze	$j_F$	1.35
bezüglich der Zeitstandfestigkeit	$j_{mz}$	1.35
bezüglich der Zeitdehngrenze	$j_{Fz}$	1.00
bezüglich der Ermüdungsfestigkeit	$j_F$	1.35
Lastsicherheitsfaktor	$j_s$	1.00

#### Kommentar

Rifest-Version: 3.0.4
-----------------------

## WIAM® fatigue RIFEST Education



### Liste statischer Zustände

	$\sigma_{xx}$ [MPa]	$\sigma_{yy}$ [MPa]	$\sigma_{zz}$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]	$\tau_{yz}$ [MPa]	$\tau_{zx}$ [MPa]
Lastfall 1	-122.8	-14.2	-221.9	0.0	0.0	0.0
Lastfall 2	29.3	0.9	50.1	0.0	0.0	0.0

### Liste Beanspruchungszyklen

#### Region 1 - Nachweispunkt 1 - Lastfallkombination 0 - Schnittebene 0

$\sigma_{xx}$			$\sigma_{yy}$			$\sigma_{zz}$			$\tau_{xy}$		
$s_m$ [MPa]	$s_s$ [MPa]	N	$s_m$ [MPa]	$s_s$ [MPa]	N	$s_m$ [MPa]	$s_s$ [MPa]	N	$s_m$ [MPa]	$s_s$ [MPa]	N
-46.8	76.1	2.2e+33	-6.6	7.5	2.2e+33	-85.9	136.0	2.2e+33			

### Statischer Festigkeitsnachweis Lastfall 1

#### Spannungskennwerte - Input

	$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{zz}$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
Spannungskennwerte [MPa]	-122.8	-14.2	-221.9	0.0	0.0	0.0

#### Spannungskennwerte

		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
Hauptspannung (nicht nach Definition der FKM) [MPa]	$\sigma_i$	-122.8	-14.2	-221.9
Zug-/Druckfestigkeitsfaktor	$f_\sigma$	1.0	1.0	1.0
Wichtungsfaktor	q	0.000		
Mehrachsigenigkeitsgrad	h	-0.665		
Vergleichsspannung [MPa]	$\sigma_v$	180.0		

#### Festigkeitskennwerte

Normwert der Zugfestigkeit [MPa]	$R_{m,N}$	510.0
Normwert der Fließgrenze [MPa]	$R_{p,N}$	355.0
Technologische Größenfaktoren	$K_{d,m}$	0.932
	$K_{d,p}$	0.925
	$K_{d,A}$	1.000
Anisotropiefaktor	$K_A$	1.000
Bauteilfestigkeitswerte [MPa]	$R_m$	476
	$R_p$	328
Bruchdehnung [%]	A	20.0

#### Konstruktionskennwerte

Plastische Formzahl (nach Eingabe)	$K_p$	1.000
Ertragbare Gesamtdehnung	$\epsilon_{err}$	0.2016
Plastische Stützzahl, aus ertragbarer Dehnung		11.352
Plastische Stützzahl, angewendet	$\eta_{pl}$	1.000

#### Bauteilfestigkeit

Statische Bauteilfestigkeit [MPa]	$\sigma_{Stk}$	328
-----------------------------------	----------------	-----

#### Sicherheitsfaktoren

Temperaturfaktoren	$K_{T,m}$	1.000
	$K_{T,p}$	1.000
	$K_{T,m}$	1.000
	$K_{T,p}$	1.000
Teilsicherheitsfaktoren	$j_G$	1.000
	$\Delta j$	0.000
Gesamtsicherheitsfaktor	$j_{Stk}$	1.350

#### Nachweis

Gesamtauslastungsgrad	$as_k$	0.740
-----------------------	--------	-------

Der statische Auslastungsgrad beträgt 74.0 %

### Statischer Festigkeitsnachweis Lastfall 2

#### Spannungskennwerte - Input

Spannungskennwerte [MPa]	$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{zz}$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
	29.3	0.9	50.1	0.0	0.0	0.0

#### Spannungskennwerte

Hauptspannung (nicht nach Definition der FKM) [MPa]	$\sigma_i$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
Zug-/Druckfestigkeitsfaktor	$f_\sigma$	1.0	1.0	1.0
Wichtungsfaktor	q	0.000		
Mehrachsigkeitsgrad	h	0.626		
Vergleichsspannung [MPa]	$\sigma_v$	42.8		

#### Festigkeitskennwerte

Normwert der Zugfestigkeit [MPa]	$R_{m,N}$	510.0
Normwert der Fließgrenze [MPa]	$R_{p,N}$	355.0
Technologische Größenfaktoren	$K_{d,m}$	0.932
	$K_{d,p}$	0.925
	$K_{d,A}$	1.000
Anisotropiefaktor	$K_A$	1.000
Bauteilfestigkeitswerte [MPa]	$R_m$	476
	$R_p$	328
Bruchdehnung [%]	A	20.0

#### Konstruktionskennwerte

Plastische Formzahl (nach Eingabe)	$K_p$	1.000
Ertragbare Gesamtdehnung	$\epsilon_{erz}$	0.1333
Plastische Stützzahl, aus ertragbarer Dehnung		9.232
Plastische Stützzahl, angewendet	$n_{pl}$	1.000

#### Bauteilfestigkeit

Statische Bauteilfestigkeit [MPa]	$\sigma_{Stk}$	328
-----------------------------------	----------------	-----

#### Sicherheitsfaktoren

Temperaturfaktoren	$K_{T,m}$	1.000
	$K_{T,p}$	1.000
	$K_{T,m}$	1.000
	$K_{T,p}$	1.000
Teilsicherheitsfaktoren	$j_G$	1.000
	$\Delta_j$	0.000
Gesamtsicherheitsfaktor	$j_{Stk}$	1.350

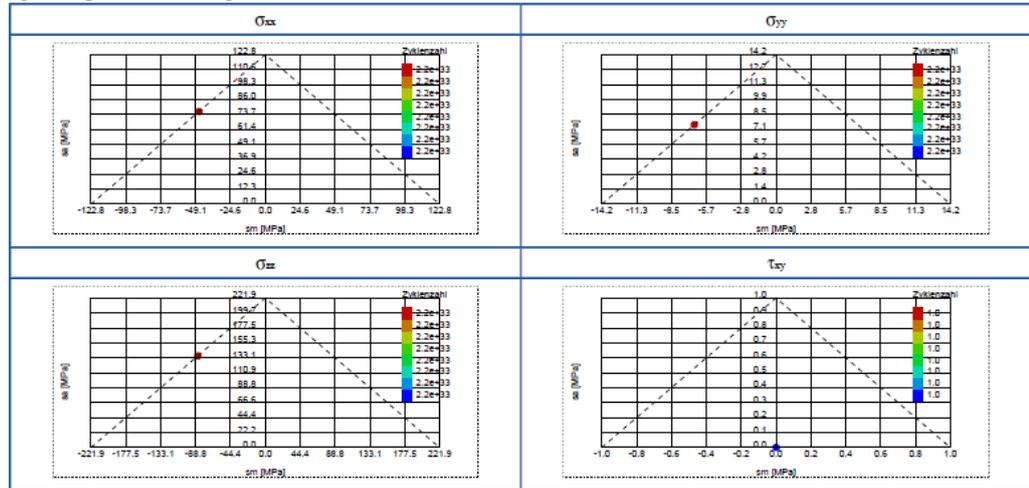
#### Nachweis

Gesamtauslastungsgrad	$a_{Stk}$	0.176
-----------------------	-----------	-------

Der statische Auslastungsgrad beträgt 17.6 %

**Ermüdungsfestigkeitsnachweis - Schnittebene 0**

Spannungskennwerte - Input



	$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{zz}$	$\tau_{xy}$
<b>Spannungskennwerte</b>				
Spannung am Nachbarknoten [MPa], $\Delta s = 1.000$ mm	-94.3	-0.3	0.0	-37.1
Bezogenes Spannungsgefälle [mm <sup>-1</sup> ]	0.000	0.959	0	0.000

<b>Festigkeitskennwerte</b>		$\sigma_w$	214	214	214	123
Wechselspannung [MPa]						

<b>Konstruktionskennwerte</b>						
Stützzahl nach Siebel und Stieler	$n_s$	1.000	1.206	1.000	1.000	
Statistische Stützzahl	$n_{st}$	1.000				
Verformungsmechanische Stützzahl	$n_{vm}$	1.094				
Bruchmechanische Stützzahl	$n_{bm}$	1.000	1.000	1.000	1.000	
Stützzahl	$n_o$	1.094	1.206	1.000	1.094	
Schätzwert der Kerbwirkungszahl	$\tilde{K}_f$	1.000	2.794	1.000	1.000	
Rauheitsfaktor	$K_R$	0.810	0.810	0.810	0.890	
Konstruktionsfaktor	$K_{WK}$	1.129	0.899	1.000	1.027	

<b>Bauteilfestigkeit</b>					
Berechnungsverfahren: Dauerfestigkeitsnachweis					
Bauteilwechselspannung [MPa]	$\sigma_{wK}$	189	238	214	120
Mittelspannungsempfindlichkeit	$M_\sigma$	0.066	0.066	0.066	0.038
Größtwert des Wechselspannungskollektiv [MPa]	$\sigma_{w,1}$	73.0	7.1	130.3	0.0
Äquivalentamplitude [MPa]	$\sigma_{\text{äq}}$	73.0	7.1	130.3	0.0

## WIAM® fatigue RIFEST Education



### Sicherheitsfaktoren

Temperaturfaktor	$K_{T,D}$	1.000
Materialsicherheitsfaktor	$j_F$	1.350
Gussfaktor	$j_G$	1.000
Gesamtsicherheitsfaktor	$j_D$	1.350

### Nachweis

Zyklischer Auslastungsgrad [MPa]	$a_{SK}$	0.520	0.040	0.822	0.000
Wichtungsfaktor	$q$	0.000			
Vergleichsauslastungsgrad	$a_{SK,v}$	0.822			

Der zyklische Auslastungsgrad beträgt 82.2 %

# Anhang C

