



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT Master Thesis

Entwicklung und Optimierung eines Monocoques für ein Formula Student Rennfahrzeug (Design and optimization of a formula student monocoque)

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs(Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Grafinger

E307 - Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

Eingereicht an der

Technische Universität Wien -

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Mark Hölzl BSc

1025596 / E066445

14. September 1990 / Wien

Wien, am 03.05.2015

Mark Hölzl

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 03.05.2015

Mark Hölzl

Danksagungen

Einen großen Dank möchte ich meinem Betreuer, Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Grafinger, der am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik tätig ist, zukommen lassen. Er unterstützte mich bei der Umsetzung und Durchführung der gesamten Arbeit.

Des Weiteren bedanke ich mich beim TU-Wien-Racing Team, über welches die Arbeit abgewickelt wurde. Hier möchte ich mich auch bei den Kollegen des Teams bedanken, die vor allem bei der Fertigung tatkräftig mitgeholfen haben. Ohne ihre Mithilfe wäre die praktische Umsetzung der Arbeit nicht möglich gewesen.

Zusätzlich richtet sich auch ein Dank an die Sponsoren des TU-Wien-Racing Teams, die die Lizenzen, Fertigungsmittel, Fertigungsgeräte und anderes bereitgestellt haben. Hervorzuheben sind folgende Sponsoren:

- PEAK Technology GmbH: Unterstützung der Arbeit und Bereitstellung der Fertigungsmittel für die Verarbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen
- Kerbel Modellbau GmbH: Fräsbearbeitung der gesamten Positivform
- Altair: Bereitstellung der FEM-Software

Ein Dankeschön gebührt auch Frau Mag. Renate Leitner, die mir bei der Außengestaltung des Monocoques und der umliegenden Außenteile geholfen hat.

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Produktentwicklung, -entstehung und Validierung eines Monocoques für ein Formula Student Rennfahrzeug. Es wird die Vorgangsweise von der Konzeptentstehung bis hin zur Überprüfung der berechneten FEM-Daten erläutert.

Am Beginn der Arbeit werden die Grundanforderungen definiert. Basierend auf den Zielvorgaben wird ein Konzept ausgearbeitet. Es werden dabei wesentliche Aspekte des Konzeptes genau erläutert. Einer dieser Aspekte ist die Entscheidung ein Monocoque zu gestalten. In der anschließenden Konstruktion wird das ausgearbeitete Konzept detailliert umgesetzt. Im folgenden größeren Teil der Arbeit wird auf die Berechnung des Monocoques und die Optimierung des Lagenaufbaus eingegangen. In diesem Abschnitt steht die Minimierung der Masse im Vordergrund. Die Optimierung erfolgt dabei in mehreren Schritten, sodass am Ende eine optimierte Sandwich-Struktur mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffdecklagen vorhanden ist. Nach der Auslegung des Monocoques wird mit der Fertigungsvorbereitung und der anschließenden Fertigung begonnen. Zuletzt werden die berechneten Daten am realen Objekt mit Hilfe der experimentellen Modalanalyse validiert.

Das Resultat der Arbeit ist ein Fahrzeugrahmen in Leichtbauweise. Das Monocoque mit vorderem Überrollbügel hat eine Masse von 20,5kg. Die an den Fahrzeugrahmen gestellten Anforderung wurden erfüllt und zusätzlich konnten die ausschlaggebenden Berechnungsdaten experimentell nachgewiesen werden.

Abstract

The thesis describes the product development process of a formula student racing car monocoque. The approach to realize the whole monocoque from the first sketches to the validation of FE-analysis will be elucidated.

First the requirements are determined and a concept is defined. One decision during the concept phase is to develop a monocoque as primary structure. In the following chapter the detailed monocoque design is described. After the final design a FE analysis with a topography and size optimization is performed. While mass reduction is the objective, the optimization is restricted by the manufacturing process. The final design is a sandwich structure with carbon fiber reinforced polymer top layers. After finishing the analysis, the manufacturing process starts. Additionally the FE-data are experimentally validated by a modal analysis test on the physical object.

The result was a light weight design chassis with integrated front hoop and a monocoque mass of 20.5 kg. All monocoque requirements were achieved and the torsional stiffness was experimentally validated.

Vorwort

Diese Diplomarbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem TU-Wien-Racing Team. Dabei handelt es sich um das Formula Student Team der Technischen Universität Wien. Die Formula Student ist ein internationaler Konstruktionswettbewerb für Studenten. Das sich jährlich ändernde Reglement unterliegt der Formula SAE. Zusätzlich gibt es zum Teil für unterschiedliche Austragungsorte zusätzliche Regeln.

Da diese Arbeit einen gewissen Leitfaden für das TUW-Racing Team für die Auswahl und die Auslegung des Chassis darstellen soll und die Wettbewerbssprache Englisch ist, werden zusätzlich die wichtigsten Begriffe in Klammer in Englisch geschrieben. Des Weiteren wurde im Zuge der Arbeit intensiv mit anderen Teammitgliedern zusammengearbeitet, sodass umliegende Bauteile immer wieder gezeigt werden, um die Gesamtfunktion darzustellen.

Alle Bilder, die nicht explizit mit einer Quelle beschriftet sind, sind selbstständig erstellt worden.

Im Interesse des Lesers werden in dieser Arbeit nicht beide Geschlechtsformen verwendet. Die Konzentration soll auf die technischen Aspekte gerichtet sein und soll nicht durch Gendering unterbrochen oder abgelenkt werden. Es sollen sich jedoch alle Geschlechter angesprochen fühlen.

Zudem wird vorausgesetzt, dass der Leser ein gewisses Verständnis in der Herstellung und Auslegung von Composite-Strukturen mitbringt.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	ii
Danksagungen	iii
Kurzfassung	iv
Abstract	v
Vorwort	vi
Inhaltsverzeichnis	vii
1. Abkürzungsverzeichnis	1
1.1. Abkürzungen	1
1.2. Griechische Buchstaben	1
1.3. Lateinische Buchstaben	1
2. Zielsetzung	2
3. Einleitung	3
3.1. Allgemeines	3
3.2. Grundanforderungen	3
4. Konzept	5
4.1. Fahrzeugrahmenart	5
4.2. Fahrerposition	8
4.2.1. Anforderung an die Sitzbox	8
4.2.2. Konstruktion der Sitzbox	8
4.2.3. Ergebnisse der Sitzbox	10
4.3. Packaging	11
4.4. Designstudie	13
4.5. Weitere Konzeptentscheidungen	15
4.5.1. Überrollbügel	15
4.5.2. Lagenaufbau	17
4.5.3. Anbindungspunkte	18
5. Konstruktion	20
5.1. Erstentwurf	20
5.2. Fertige Konstruktion	22
5.3. Detailkonstruktion	23
5.3.1. Fahrer	23
5.3.2. Öffnungen	25
5.3.3. Firewall	27
5.3.4. Überrollbügel	27
5.3.5. Anbindungen	27
5.3.6. Motor und Differential	30
5.3.7. Auspuff und Kühlleitungen	31
5.3.8. Versteifungskreuz	31
5.4. Verifizierung der Konstruktion	31
6. Berechnung und Optimierung	32

6.1.	Allgemeines.....	32
6.1.1.	Optimierungsablauf.....	32
6.1.2.	Materialdaten.....	35
6.1.2.1.	Isotrope Materialien	35
6.1.2.2.	Anisotrope Materialien	36
6.2.	Modellvorbereitung	39
6.2.1.	Diskretisierung.....	39
6.2.1.1.	Geometrieaufbereitung	39
6.2.1.2.	Netzgenerierung	41
6.2.1.3.	Elementnormale und Materialorientierung	46
6.2.2.	Randbedingungen und Lastfälle.....	49
6.2.2.1.	Lastfälle für die Steifigkeitsüberprüfung	49
6.2.2.2.	Lastfälle für die Festigkeitsüberprüfung	51
6.3.	Optimierung mit isotropen Material	53
6.3.1.	Modellaufbau	53
6.3.2.	Ergebnisse	54
6.3.3.	Nachbereitung der Daten.....	55
6.4.	Vorauslegung der Grundparameter.....	56
6.4.1.	Modellaufbau	57
6.4.2.	Ergebnisse	57
6.5.	Optimierung der Lagendicken.....	60
6.5.1.	Modellaufbau	60
6.5.1.1.	Laminataufbau	60
6.5.1.2.	Optimierungsparameter	64
6.5.2.	Ergebnisse	65
6.6.	Neuberechnung mit einem fertigbaren Lagenaufbau	67
6.6.1.	Modellaufbau	67
6.6.2.	Ergebnisse	67
6.7.	Modellanpassung.....	68
6.7.1.	Modellaufbau	68
6.7.2.	Ergebnisse	69
6.7.2.1.	Torsionssteifigkeit	70
6.7.2.2.	Festigkeitsüberprüfung	72
6.7.2.3.	Validierungsmodell zum Abgleich mit der experimentellen Messung	73
6.7.2.4.	Massen und Massenmittelpunkte	75
7.	Fertigung	76
7.1.	Fertigungsvorbereitung	76
7.1.1.	Formenbau	76
7.1.2.	Lagenaufbauplan	78
7.2.	Fertigung	78

7.2.1.	Positivform	78
7.2.2.	Negativform.....	79
7.2.3.	Monocoque	80
8.	Validierung	81
8.1.	Information	81
8.1.1.	Funktionsweise.....	81
8.1.2.	Ziel	82
8.2.	Arbeitsgegenstand	82
8.3.	Messaufbau.....	82
8.4.	Messdurchführung.....	83
8.4.1.	Messaufbau	83
8.4.2.	Messung	84
8.5.	Daten und deren Auswertung.....	85
8.5.1.	Geometriedaten	85
8.5.2.	Auswertung	85
8.5.3.	Vergleich mit den FEM-Daten	86
9.	Zusammenfassung und Ausblick.....	87
9.1.	Zusammenfassung	87
9.2.	Ausblick	87
10.	Verzeichnisse.....	90
10.1.	Abbildungsverzeichnis	90
10.2.	Tabellenverzeichnis.....	91
10.3.	Literaturverzeichnis	92
11.	Anhang	92
11.1.	Lagenaufbauplan: Negativform	93
11.2.	Lagenaufbauplan: Monocoque	93

1. Abkürzungsverzeichnis

1.1. Abkürzungen

CFK.....	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
FS	Formula Student
HM	Hypermesh (Preprozessor von Hyperworks)
TU Wien	Technische Universität Wien
RBE.....	Rigid Body Elements
RHC	Rohacell
UD.....	unidirektional

1.2. Griechische Buchstaben

ϑ	Torsionswinkel
ν	Querdehnzahl
ρ	Dichte
σ	Normalspannungen
σ_{ITu}	Zugfestigkeit in Längsrichtung
σ_{ICu}	Druckfestigkeit in Längsrichtung
τ	Schubspannung
τ_{Iq}	Schubfestigkeit in der Laminebene
τ_{ltMin}	min. Schubfestigkeit normal zur Laminebene in l-Richtung

1.3. Lateinische Buchstaben

x, y, z.....	Koordinaten im globalen Koordinatensystem
l, q, t.....	(Faser)Längsrichtung, (Faser)Querrichtung in der Laminebene, (Faser)Querrichtung aus der Laminebene
u, v, w	Verschiebungen
E.....	Elastizitätsmodul
E_l	Elastizitätsmodul unter Zug in Faserrichtung
E_{IC}	Elastizitätsmodul unter Druck in Faserrichtung

E_{zC}	Elastizitätsmodul unter Druck in z-Richtung
G	Schubmodul
G_{1z}	Schubmodul normal zu Laminebene in 1-Richtung
k_T	Torsionssteifigkeit
R_m	Zugfestigkeit

2. Zielsetzung

Das Ziel ist ein Fahrgestell bzw. Fahrzeugrahmen für ein Formula Student Rennfahrzeug zu entwickeln, mit dem an den Wettbewerben der Formula Student (FS) angetreten werden kann. Die Entwicklung umfasst dabei die komplette Produktentstehung und Produktherstellung. Zur Produktentstehung zählt die Produktentwicklung, also die Konzeption, Konstruktion, Auslegung und Optimierung des Fahrgestells, und die Produktherstellung, also die Produktionsvorbereitung und die Fertigung.

Es ist darauf zu achten, dass alle Aspekte des FS-Reglements eingehalten werden müssen. Des Weiteren müssen die Zielvorgaben des FS-Teams, TU-Wien Racing, erfüllt werden.

3. Einleitung

3.1. Allgemeines

Alle relativen Ortsangaben z.B. hinten oder rechts beziehen sich auf die Fahrtrichtung des Fahrzeuges. Zudem wird ein globales Koordinatensystem verwendet, bei dem die x-Achse die Fahrzeuglängsachse, die y-Achse die Fahrzeugquerachse und die z-Achse die Fahrzeughochachse beschreibt.

3.2. Grundanforderungen

Der erste Schritt einer Produktentwicklung ist die Festlegung der Grundanforderungen an das Produkt. Grundsätzlich soll ein Formula Student Rennfahrzeugrahmen entwickelt werden. Dabei soll der Rahmen für ein Fahrwerk mit 10 Zoll Felgendurchmesser ausgelegt werden. Des Weiteren soll ein KTM LC4 Motor als Antriebseinheit dienen und ein gesamtes Aerodynamikpaket angebracht werden können. Weitere Anforderungen sind nach Priorität geordnet:

Anf. 1 Fahrgestell nach den Richtlinien der Formula Student

Die wichtigste Anforderung an den Fahrzeugrahmen ist die Einhaltung des Reglements der Formula Student. Dieser Punkt hat höchste Priorität, da bei nicht einhalten, das Ziel am Bewerb teilnehmen zu können, und somit auch die Funktion nicht erfüllt werden kann. Das Reglement ist zu ausführlich, um alle relevanten Parameter zu erwähnen. Grundsätzlich muss ein einsitziges Formel-Rennfahrzeug, also ein Monoposto mit freistehenden Rädern, gebaut werden. Es sei darauf hingewiesen, dass das Reglement sich über die verschiedensten Bereiche erstreckt. Hierzu zählen sowohl geometrische Vorgaben z.B. die Größe der Fahrerzelle, Anzahl und Position der Überrollbügel, als auch festigkeitstechnische Vorgaben, die durch Nachrechnungen oder äquivalente physikalische Versuche (z.B. Gurtausreißversuch) geprüft und eingehalten werden müssen. Im Laufe der Arbeit wird auf relevante Reglementbestimmungen immer wieder eingegangen.

Anf. 2 Anforderungen durch die Zieldefinition des TU-Wien Racing Teams

Es müssen natürlich auch jene Anforderungen eingehalten werden, die gemeinsam mit dem TUW-Racing Team beschlossen werden. Am Anfang der Saison sind folgende technische Anforderungen definiert worden. Diese sind bereits nach Priorität geordnet.

Anf. 2.1 Gesamtfunktion sicherstellen;

Anf. 2.2 eine gute Fahrersicht;

Anf. 2.3 Torsionssteifigkeit zwischen 1350-1400 Nm/° am Druckpunkt des Reifenlatsches;

Anf. 2.4 Massenverteilung des Gesamtfahrzeuges inklusive dem Fahrer von 52-54% hecklastig;

Anf. 2.5 maximale Variabilität der Fahrwerksanbindungspunkte;

Anf. 2.6 möglichst leichtes Gesamtkonzept mit einer Gesamtfahrzeugmasse von ca. 165kg;

Die **Anforderung Anf. 2.1** geht aus der vorherigen Saison hervor. Einige Fahrer kritisierten die flache Sitzposition und die schlechte Übersicht vom Vorgängermodell. Das Problem bei einer sehr flachen Sitzposition ist, dass die Streckenführung, die eng mit Pylonen abgesteckt ist, nur sehr schwer bzw. sehr spät erkannt werden kann und somit nicht das maximale Fahrertalent ausgenutzt wird. Der Fahrer spielt jedoch in der Formula Student eine wichtige Rolle. In Extremfällen konnte man bei den Wettbewerben einen Unterschied von 10 Sekunden auf einer Rundenzeit von 1,16 Minuten(1:10) zwischen sehr guten und schlechten Fahrern im gleichen Fahrzeug bei gleichen Streckenverhältnissen erkennen. Dieser Vergleich kann angestellt werden, da beim Ausdauerrennen (Endurance) ein Fahrerwechsel durchgeführt werden muss und der zweite Fahrer gleich im Anschluss auf die Strecke muss.

Die **Anforderungen Anf. 2.2** ist aus technischer Sicht unbrauchbar, da diese Forderung keine messbare Größe darstellt. Dieser Punkt wird im Rahmen der Konzeptfindung genauer betrachtet, sodass ein Vergleich angestellt werden kann.

Die **Anforderungen Anf. 2.3 - Anf. 2.5** gehen aus der Grundausslegung der Fahrwerksgeometrie hervor und wurden vom Fahrwerksingenieur gefordert.

4. Konzept

Die Konzepterstellung erfasst alle Grundgedanken, die für die Konstruktion notwendig sind. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die oben genannten Grundanforderungen oberste Priorität haben.

Die Sicherstellung der Gesamtfunktion des Fahrzeuges ist neben dem bindenden Reglement das sekundäre Ziel. Der Rahmen muss mit jeder anderen Fahrzeughauptbaugruppe interagieren. Dazu zählen: Fahrwerk, Triebstrang, Motor und Elektronik. Je nach Rahmenkonzept kommt es zu unterschiedlichen Anbindungs- und Interaktionskonstruktionen zwischen Chassis und Nachbarbauteil.

Grundsätzlich hat das Chassis folgende Funktionen:[1 S. 843]

- *Verbindung der Radaufhängungen*
- *Übertragung der eingeleiteten Betriebskräfte*
- *Gewährleistung des erforderlichen Crashverhaltens*
- *Aufnahme von Motor, Antriebstrang und Hilfskomponenten*
- *Aufnahme des Cockpits bzw. Unterbringung des Fahrers*

Bei der Konzepterstellung geht es um die Einteilung und die Beurteilung der diversen Konzepte, sodass am Ende das konkurrenzfähigste Konzept für das Gesamtfahrzeug vorliegt.

4.1. Fahrzeugrahmenart

Die wichtigste Grundentscheidung die in der Konzeptphase im Bereich Chassis getroffen werden muss, ist die Frage nach der Art des Fahrzeugrahmens. Der Fahrzeugrahmen bzw. das Fahrzeuggestell ist die tragende Struktur des Fahrzeuges. Es gibt unterschiedliche Bauarten um das vom Reglement geforderte Monoposto zu realisieren. Grundsätzlich sind die gebräuchlichsten Rahmen für FS-Rennfahrzeuge folgende:

- Gitterrohrrahmen
- Kastenrahmen
- Monocoque

Aufgrund des Reglements, der Fertigungspartner und der vorhandenen Fachkenntnis im Team sind folgende Rahmenkonzepte möglich:

- Stahlrohrrahmen
- Monocoque
- Fahrgastzellenmonocoque mit zusätzlicher Heckstruktur als
 - Stahlrohrrahmen oder
 - Monocoque

Die Entscheidung ist in einer langen Diskussion im Racing Team zugunsten des Monocoques ausgefallen. Die Entscheidungsgrundlage ist im folgenden nochmals angeführt und tabellarisch zusammengefasst.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Konzepte ist sehr schwer, da eine Vielzahl unterschiedlicher Eigenschaften aufgezählt werden können. Jene Eigenschaften, die zur Erzielung der oben definierten Anforderungen (**3.2 Grundanforderungen**) am stärksten beitragen, müssen eine höhere Priorität aufweisen. Dies ist mit unterschiedlichen Punkten realisiert. Die genannten Konzepte werden in **Tabelle 4-1** verglichen.

	Max. Punkte	Stahlrohr- rahmen	Monocoque (MC)	MC. mit Heckstruktur als	
				Monocoque- bauweise	Stahlrohr- rahmen
Variabilität der Fahrwerkspunkte	(3)	1	3	3	2
Steifigkeits-Masse-Verhältnis (inkl. Masse der Verkleidungen)	(2)	0	2	1	1
Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten	(1)	1	0	0	1
Maßhaltigkeit	(1)	0	1	1	0
Firewall integrierbar	(1)	0	1	1	1
Luftumströmung des Motors	(1)	1	0	0	1
Fertigungsaufwand	(1)	1	0	0	0
Kosten	(1)	1	0	0	0
Gesamtpunkte		5	7	6	6

Tabelle 4-1: Fahrzeugrahmenkonzepte im Vergleich

Unabhängig vom Konzept können die Anforderungen: Einhaltung des Reglements, Gesamtfunktion sicherstellen, eine gute Fahrersicht, eine Torsionssteifigkeit zwischen 1350 und 1400 Nm/° und eine Massenverteilung von 52-54% hecklastig erfüllt werden und werden daher nicht in der Tabelle aufgelistet. Die erste Anforderung, die abhängig vom Konzept ist, ist die maximale Variabilität der Querlenkeranbindungspunkte. Da es eine Grundanforderung ist, wird es mit drei möglichen Punkten definiert. Beide Konzepte, die im Bereich der Anbindungspunkte eine Monocoquebauweise aufweisen, haben 3 Punkte bekommen. Eine Verwendung eines Stahlgitterrohrrahmens am hinteren oder sogar am

kompletten Fahrwerk, birgt Probleme in der Variabilität, da die Anbindungspunkte von Querlenker, Rocker, Dämpfer und Spurstange nicht unabhängig und komplett frei angeordnet werden können. Dies trifft speziell bei einem Fahrwerk mit 10" Felgendurchmesser und daher knapp beieinander liegendem Doppelquerlenker zu.

Eine weitere Anforderung mit einer geringeren Priorität war ein möglichst leichtes Gesamtkonzept. Für ein Fahrgestell ist das Steifigkeits-Masse-Verhältnis ausschlaggebend. Dabei wird hier das Verhältnis auf eine geforderte Steifigkeit von 1400 Nm/° bezogen. Zwar könnte mit einem Gitterrohrrahmen ein sehr gutes Verhältnis erreicht werden, jedoch dürfen laut Reglement minimale Rohrabmessungen nicht unterschritten werden. Zusätzlich muss noch berücksichtigt werden, dass bei einem Monocoque keine zusätzlichen Verkleidungsteile benötigt werden und diese beim Masse-Steifigkeitsverhältnis berücksichtigt werden müssen. Bei einem Konzept, das vorne und hinten geteilt wird, verliert man im Bereich der Trennfuge an Steifigkeit. Ohne zusätzliche Maßnahmen kommt es zu einem großen Steifigkeitssprung.

Alle anderen Eigenschaften sind nicht explizit gefordert und werden daher nur mit einem Punkt bewertet.

Die größten Vorteile des gewählten Konzeptes sind, dass ein sehr hohes Steifigkeits-Masse Verhältnis erzielbar ist, darüber hinaus entsteht kein Steifigkeitssprung durch eine Trennstelle des Rahmens und die geforderte maximale Variabilität der Fahrwerksanbindungspunkte ist realisierbar.

4.2. Fahrerposition

Neben der Sicherstellung der Gesamtfunktion ist ein weiteres wichtiges Ziel eine gute Fahrersicht zu gewährleisten. Um dieses Ziel zu quantifizieren wird eine sogenannte Sitzbox (seat box) entwickelt. Diese soll ermöglichen, dass potenzielle Fahrer ihre ideale Sitzposition finden. Eine Fahrerposition mit guter Übersicht, also eine sehr aufrechte Position, steht jedoch im Konflikt mit einem tiefen Fahrerschwerpunkt, der fahrdynamisch einen großen Einfluss hat, vor allem in Anbetracht der Tatsache, dass der Fahrer die größte Einzelmasse darstellt und ca. ein Drittel der Gesamtmasse ausmacht.

4.2.1. Anforderung an die Sitzbox

Folgende Parameter sollten durch die Sitzbox bestimmt werden.

- Position und Winkel der Fußflächen
- Position und Winkel des Lenkrades
- Position der Gesäßmulde
- Anstellwinkel der Rückenlehne
- Geometrie im Schulterbereich des Fahrers

4.2.2. Konstruktion der Sitzbox

Um die oben angeführten Aspekte zu erfüllen, wurde folgende einfache Konstruktion gewählt (**Abbildung 4-1**).

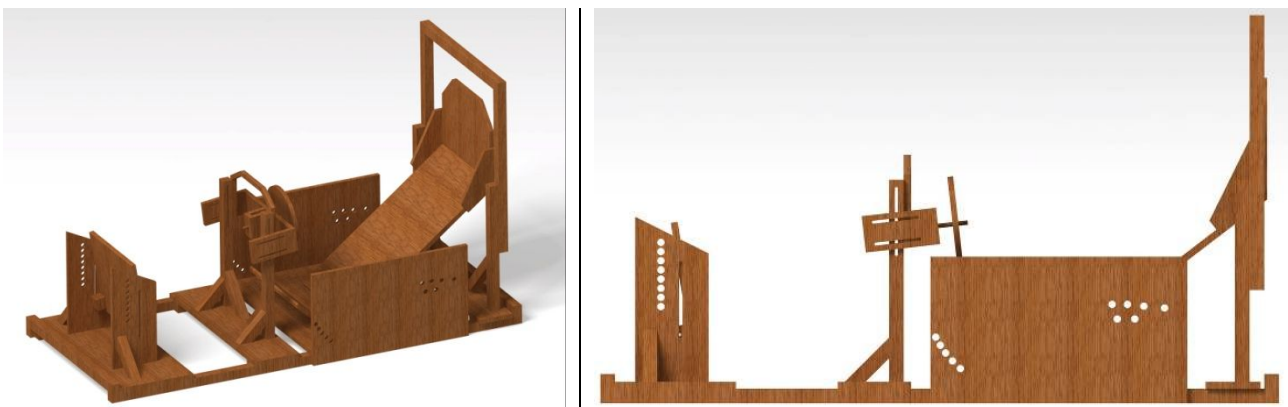


Abbildung 4-1: 3D-Modell der Sitzbox

Die Konstruktion ist aus 19mm Sperrholzplatten und quadratischen 20x20mm bzw. 40x40mm Leisten aufgebaut. Jede der Unterbaugruppen: Pedalsystem, Lenksystem, Sitzschale und hinterer Überrollbügel kann auf dem Grundrahmen in Sitzrichtung verstellt

werden. Der Winkel der hinteren Rückenplatte kann von 30° bis $42,5^\circ$ in $2,5^\circ$ Schritten und der Winkel der Oberschenkelauflage von 35° bis 45° in $2,5^\circ$ Schritten verstellt werden. Ein Rückenwinkel von 30° war der ungünstige Referenzwert vom Vorgängermodell. Die anderen Abmaße können beliebig variiert werden. Um eine exakte Schultergeometrie zu generieren, wurden Platten mit expandiertem Polystyrol (Handelsname: Styropor) verwendet.



Abbildung 4-2: Sitzbox: Rohgestell



Abbildung 4-3: Sitzbox: Vermessungsarbeiten

In **Abbildung 4-2** ist das Rohgestell der Sitzbox abgebildet. Die Vermessung erfolgt mit möglichen Fahrern. Im ersten Schritt der Vermessung werden alle Abmessungen grob eingestellt. Erst danach beginnt die Feinjustierung. Dabei wird mit der Einstellung des Winkels der Rückenlehne begonnen. Dieser wird von 30° in $2,5^\circ$ Schritten gesteigert, bis der Fahrer mit der Sicht und der Rückenposition zufrieden ist. Durch diese Vorgehensweise kann ein möglichst tiefer Schwerpunkt bei ausreichender Sicht garantiert werden. Nachdem der Rückenwinkel fixiert ist, können alle anderen Positionen justiert werden. Nachdem alle Fahrer vermessen sind, wird ein Mittelwert aus den verschiedenen Positionen ermittelt. Diese gemittelten Positionen müssen dann nochmals alle vermessenen Personen beurteilen. Die Ergebnisse des Versuchsaufbaus machten klar, dass verstellbare Pedale von Vorteil wären. Die Körpergröße variierte von 1,70m bis 1,83m. Mit dem Mittelwert aller anderen Positionen waren alle Fahrer zufrieden. Dieser Schritt kann in **Abbildung 4-3** gesehen werden. Erst danach erfolgte die Ausmessung der Schulterbereiche, dabei wurden Polystyrol-Platten links und rechts vom Fahrer eingelegt. Nachdem der minimale vom Reglement vorgeschriebene Fahrerinnenraumbereich (template, **Abbildung 4-4**: rotes

Polygon) ausgeschnitten wurde, konnten die restlichen störende Bereiche weggeschnitten werden, sodass alle Fahrer im Schulterbereich ausreichend Platz hatten. Das Endprodukt war eine Negativgeometrie im Styropor, wie es in **Abbildung 4-4** sichtbar ist. Diese Geometrie wurde dann in ein Raster unterteilt. Im Anschluss darauf konnten die Rasterpunkte vermessen werden. Alle Vermessungsarbeiten wurden von einem Racing-Team Mitarbeiter durchgeführt.

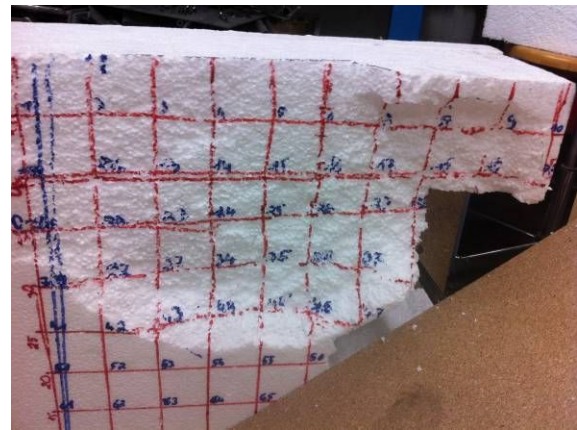
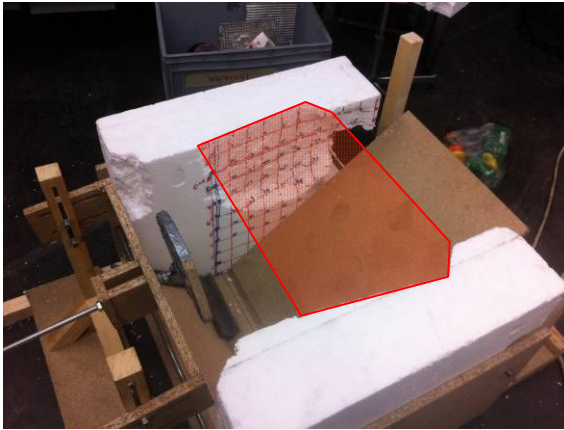


Abbildung 4-4: Sitzbox: Schulterbereichsvermessung

Aus den Koordinaten der Rasterpunkte konnte eine Punktwolke erstellt werden, aus der wiederum eine Fläche generiert werden konnte.

4.2.3. Ergebnisse der Sitzbox

Ein Teil der aus der Sitzbox ermittelten Abmessungen kann in **Abbildung 4-5** gesehen werden. Somit ist die Position der Pedale, der Lenkung und der Sitzmulde bekannt.

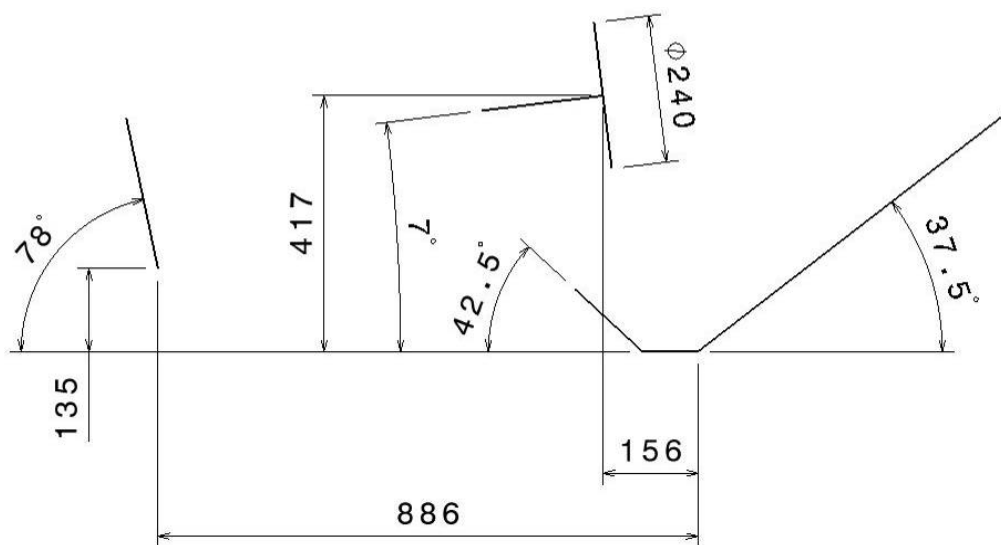


Abbildung 4-5: Sitzbox: Datenoutput: für den größten Fahrer (Abmessungen in mm)

Im nächsten Schritt wird die Geometrie um die Schultern bestimmt. In **Abbildung 4-6** ist die vorläufige Positionierung zu sehen. Die drei linken, schwarzen Kreise sollen die vom Reglement geforderte fiktive Person, genannt: Percy, darstellen. Man erkennt außerdem schon die Positionierung der Überrollbügel. Die blauen Punkte stellen die ermittelten Rasterpunkte dar und die gelbe Fläche ist die aus den Rasterpunkten generierte Schulterfläche.

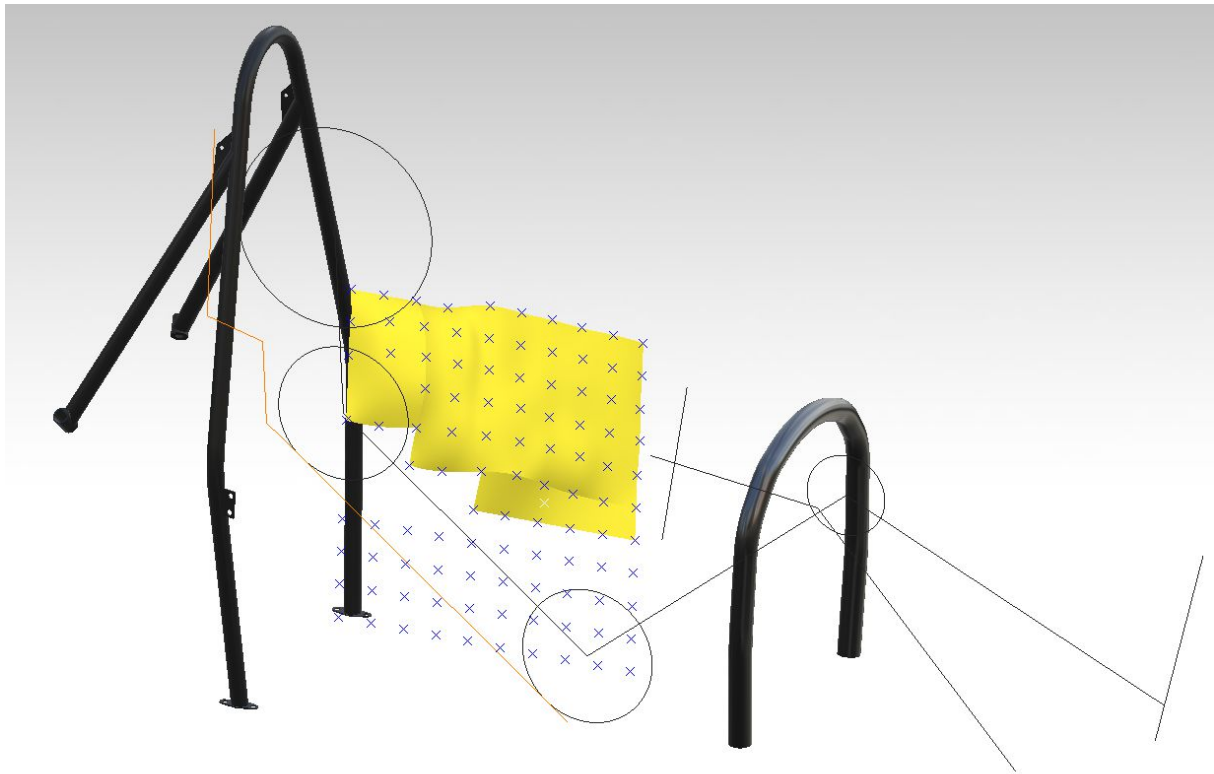


Abbildung 4-6: Sitzkiste: 3D-Daten

4.3. Packaging

Eine weitere Anforderung neben der guten Fahrersicht ist eine Massenverteilung von 52-54% hecklastig. Da nun der benötigte Platz für den Fahrer bekannt ist, kann man sich Gedanken zur Anordnung, also dem Packaging, der einzelnen Baugruppen machen, sodass die gewünschte Massenverteilung erzielt wird. Dazu soll eine Exceltabelle angelegt werden, welche den Schwerpunkt und die Masse der großen Bauteile(>1kg) enthält und laufend aktualisiert werden soll. Des Weiteren soll die Tabelle eine Kalkulation des Gesamtschwerpunktes enthalten.

Durch die Entscheidung ein Monocoque zu konstruieren, kann die gewichtsvorteilbringende Integralbauweise mit der Schalenbauweisen kombiniert werden. Dieses Konzept zeichnet sich dadurch aus, dass möglichst viele technische Funktionen mit nur einem Bauteil erfüllt werden und daher zusätzliche Anbindungen entfallen. Grundsätzlich ist das Konzept jedes Monoposto so aufgebaut, dass das Fahrzeug in zwei Bereiche geteilt ist, nämlich die Fahrerzelle (driver cell) und den Motorraum (engine bay). Diese zwei Bereiche müssen laut Reglement durch eine Feuerschutzwand (firewall) getrennt sein.

Auch bei diesem Monocoque wird das Grundkonzept eines Monopostos realisiert. In der Fahrerzelle ist neben dem Fahrer zusätzlich die Niederspannungselektronik (low voltage electronic) untergebracht. Dies stellt sicher, dass eine leichte Zugänglichkeit gewährleistet ist und keine Verschmutzung durch Fette, Öle oder ähnliches vom Motor bzw. Antriebsstrang auftritt. Im Motorraum sind der Triebstrang und der Motor untergebracht. Die Trennwand zwischen Fahrerzelle und Motorraum soll fix im Monocoque integriert sein, um ein Übertreten von diversen Flüssigkeiten ausschließen zu können. Dies ist auch ein großer Sicherheitsaspekt, da im Falle des Gebrechens eines Bauteils, heißes Öl oder Benzin übertreten und zu Verletzungen des Fahrers führen könnten. Zusätzlich kann im Sinne des Leichtbaus eine integrierte Feuerschutzwand zur Versteifung beitragen.

Als größte Bauteile im Motorraum treten der Motor selbst und das Differential mit den Antriebswellen auf. Kleinere Baugruppen wie der Tank, das Kühlsystem und der Auspuff müssen auch berücksichtigt werden. Motorblock und Differential können auf der Mittelebenen des Fahrzeuges angeordnet werden. Die Positionierung des Differentials und der Antriebswellen sind auf der Hinterachse fixiert. Die Kraftübertragung von Motor auf Differential soll mittels Kette erfolgen. Diese Variante zeichnet sich durch eine sehr leichte Bauweise aus. Damit ist die Positionierung des Motors eingeschränkt. Die Kurbelwellenachse muss parallel zur Differentialachse, also in y-Richtung des Fahrzeuges liegen. Zudem ist durch die fixierte Motordrehrichtung auch die Flächennormale definiert. Der Motor sollte dabei möglichst tief positioniert werden um den Schwerpunkt möglichst tief zu halten.

Der Tank sollte möglichst nahe am Schwerpunkt und symmetrisch um die Fahrzeuglängsachse liegen, da sich die Masse des Tankinhaltes während des Betriebs verändert. Bei ungünstiger Anordnung kann es zu einem stark veränderten Schwerpunkt zwischen vollen und leeren Tank kommen und dies würde bedeuten, dass die fahrdynamischen Eigenschaften stark variieren. Die beste Lage wäre also zwischen Fahrer

und Motor. Der Kühler für das Motorkühlsystem soll mit möglichst kalter Frischluft angeströmt werden. Hier bietet sich eine Positionierung neben dem Fahrer in einem Seitenkasten an. Um eine ausgeglichene Massenverteilung quer zur Fahrzeugrichtung zu erreichen, bietet sich die Positionierung des Endschalldämpfers auf der gegenüberliegenden Seite an. Da der Abgasauslass auf der rechten Seite des Motors ist, wird der Endschalldämpfer rechts und der Kühler links positioniert. Weitere große Massen sind das Fahrwerk und die Aeroeinheit mit Unterboden, Front- und Heckflügel.

Die Grundsätzliche Anordnung ist in **Abbildung 4-7** dargestellt.

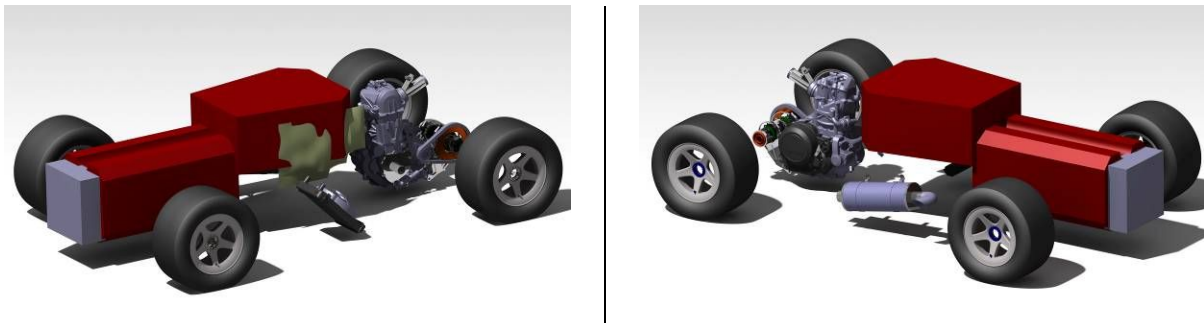


Abbildung 4-7: Packaging

Die roten Blöcke stellen dabei die vom Reglement vorschrieben Fahrerinnenraumschablonen (templates) dar. Der graue Block am vorderen Ende stellt die Position der Pedalbox dar. Des Weiteren ist im linken Bild in Gelb die vermessene Schulterfläche dargestellt.

4.4. Designstudie

Nachdem die grundsätzliche Anordnung fixiert ist, kann mit der Formgebung des Monocoque begonnen werden. Die erste Entscheidung, die getroffen werden muss ist die Frage der Motorintegration und des Motorein- bzw. -ausbaus. Dabei kann der Motor von oben, hinten, unten oder auch von vorne über die Fahrerzelle eingebaut werden. Jedes Konzept hat seine Vor- und Nachteile.

- Wird der Motor von oben eingebaut, so können Wartungsarbeiten einfach durchgeführt werden. Man kann außerdem eine einfache Sichtkontrolle durchführen. Oben liegende Teile können ausgetauscht werden ohne den ganzen Motor ausbauen zu müssen. Der große Nachteil dieses Konzept ist, dass der Motor eine große Öffnung im Monocoque benötigt und dadurch der hintere Bereich des Monocoques torsionsweich wird.

- Wird der Motor von hinten eingebaut, so muss das Monocoque hinten offen sein. Die Torsionssteifigkeit sinkt und Fahrwerksteile wie Stabilisatoren müssen bei einer Pull-Rod Konstruktion, also einem untenliegendem Feder-Dämpfersystem, entweder unten vorbeigeführt werden oder bei jedem Motorein- und -ausbau abmontiert werden.
- Wird der Motor von unten eingebaut, so muss das Fahrzeug immer aufgehoben werden und alle Demontagearbeiten müssen von unten durchgeführt werden. Ein unten liegendes Feder Dämpfersystem ist kaum realisierbar, da eine gewisse Öffnungsbreite für den Motor benötigt wird.
- Wird der Motor von vorne über die Fahrerzelle eingebaut, so muss der Ausschnitt in der Firewall groß genug gestaltet werden. Es muss eine aufwendigere Abdichtung der Firewall erfolgen um die Sicherheit des Fahrers nicht zu gefährden. Darüber hinaus müssen Komponenten, die vor dem Motor liegen z.B. der Tank, beim Ausbau ebenfalls demontiert werden.

In Zusammenarbeit mit dem Racing Team wurde beschlossen, dass der Motorein- und -ausbau von oben erfolgen soll. Dadurch ist eine maximale Sicherheit für den Fahrer gegeben, oben liegende Teile, wie die Airbox, sind leicht zugänglich und beim Motorein- bzw. -ausbau müssen nicht das Fahrwerk und der Unterboden abmontiert werden.

Somit können die ersten Entwürfe für die Außengestaltung gemacht werden. Dabei wird mit einer Absolventin der Universität für angewandte Kunst, Fr. Mag Renate Leitner, zusammengearbeitet. Sie war bereits bei der Formgestaltung vorheriger Rennbolide für das TU-Wien Racing Team dabei. Im Rahmen der Monocoquegestaltung werden die Karosserieteile, also Seitenkasten (sidepod), vordere Crashstruktur (crashbox) und Motordeckel (engine cover), ebenfalls konstruiert um ein harmonisches Gesamtdesign zu erreichen. Die von Mag Renate Leitner gezeichneten Skizzen des endgültigen Entwurfs sind in den folgenden Abbildungen (**Abbildung 4-8**) dargestellt.

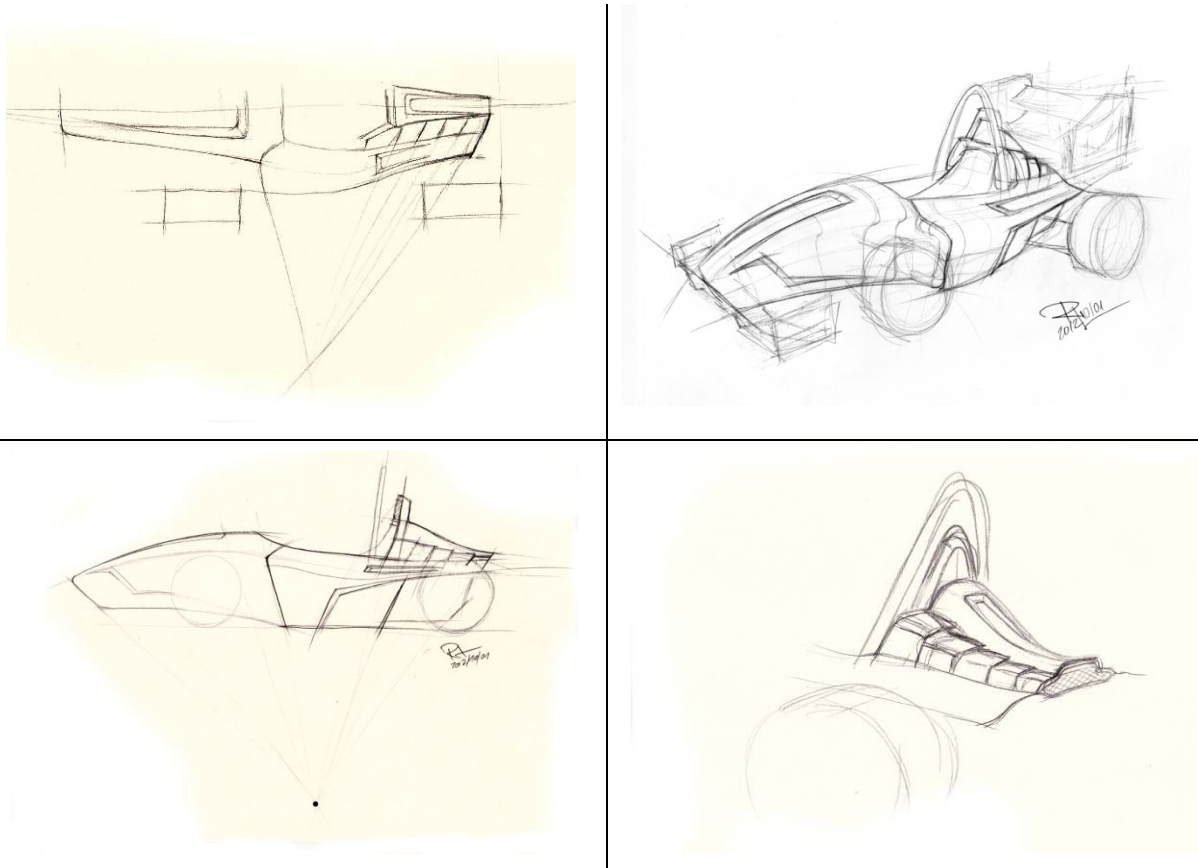


Abbildung 4-8: Entwurfsskizzen von Mag. Renate Leitner

4.5. Weitere Konzeptentscheidungen

4.5.1. Überrollbügel

Ein weiterer Punkt der im Zuge der Konzeptphase geklärt werden muss, ist die Frage der Gestaltung der vom Reglement vorgeschriebenen Überrollbügel. Laut Reglement sind zwei metallene Überrollbügel vorgeschrieben, die im Falle eines Überschlages den Insassen schützen sollen. Der vordere aus Aluminium oder Stahl gefertigte Überrollbügel (front hoop) muss über den Beinen der Person montiert werden. Der hintere aus Stahl gefertigte Überrollbügel (main hoop) muss sich auf Höhe des Brustkorbes befinden.

Vorderer Überrollbügel (front hoop)

Beim vorderen Überrollbügel stellt sich die Frage, ob der Überrollbügel miteinlamiert werden soll oder ob er nach der Fertigung des Monocoques eingeklebt bzw. verschraubt werden soll.

Der Vorteil des miteinlamierten Überrollbügels ist, dass er über den ganzen Umfang integriert ist, sodass keine Verstärkung für Lastenleitungspunkte vorgesehen werden muss

und, dass eine konstante Steifigkeitserhöhung über die gesamte Länge erfolgt. Dabei ersetzt der Überrollbügel lokal den im Monocoque vorhandenen Kern und die Außenabmessungen des Monocoques werden durch den Überrollbügel nicht signifikant erhöht. Jedoch muss beim Fertigungsprozess die unterschiedliche Wärmeausdehnung des Überrollbügels und der Bauteile aus CFK, dazu zählt auch die aus Tooling-Prepreg hergestellte Negativform, beachtet werden.

Ein nachträglich eingebauter Überrollbügel kann mittels Schrauben oder Kleber befestigt werden. Wird dieser mit Kleber verbunden, besteht das Problem, dass es sich bei der Monocoqueinnenfläche um eine sogenannte Innensackfläche handelt und diese keine hohen Toleranzen aufweist und der exakte Klebespalt nicht eingehalten werden kann. Wird der Überrollbügel mit zusätzlichen Schrauben befestigt, müssen die Anbindungspunkte verstärkt werden. Dies führt zu einer Massezunahme. Zusätzlich erhöht sich die Masse durch die Schrauben und die angeschweißten Laschen. Ein nachträglich eingebauter Überrollbügel hat jedoch den Vorteil, dass die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen der Materialien keine Rolle spielen.

Im Sinne des Leichtbaues würde sich ein Aluminiumüberrollbügel mit rundem Querschnitt anbieten. Dies ermöglicht die Konstruktion des leichtesten, vom Reglement zulässigen Überrollbügels.

Die Wahl ist auf die Variante mit dem integrierten Überrollbügel gefallen, da sich ein schlankes und steifes Monocoque realisieren lässt. Eine bestmögliche Integration ergibt sich durch einen Rechteckquerschnitt. Dadurch muss bei der Fertigung für die Hohlräume, die bei einem Kreisquerschnitt entstehen würden, kein zusätzlicher Wabenfüller verwendet werden. Um das Problem mit der unterschiedlichen Wärmeausdehnung zu mildern, wird ein zusammengeschweißter Stahlüberrollbügel anstatt eines leichteren Aluminiumüberrollbügels verwendet. Zwar liegt trotz eines Stahlbauteiles ein Unterschied in den Wärmeausdehnungen vor, jedoch ist der Unterschied um ein Vielfaches geringer als bei der Verwendung von Aluminium.

Hinterer Überrollbügel (main hoop)

Der hintere Überrollbügel muss in Fahrzeuginnenraum auf Höhe des Brustkorbes angebracht werden. Stahl ist das einzig verwendbare Material laut Reglement. Zusätzlich muss der Überrollbügel aus einem Stück sein und muss sich vom Boden bis über den Kopf

erstrecken. Dies führt zu einem sehr langen und schweren Bauteil. Es sollten also jene vom Reglement vorgegeben Abmessungen verwendet werden, die zur minimalen Masse führen. Dies wäre also ein Rohr mit 25,4mm Außendurchmesser und 2,4mm Wandstärke. Steifigkeitstechnisch wäre ein miteinlaminiertes, runder hinterer Überrollbügel ideal. Dieser ist jedoch fertigungstechnisch aufwendig zu realisieren. Daher soll ein vierfach angebundener Überrollbügel verwendet werden. Zusätzlich muss laut Reglement der Überrollbügel oben sowohl links als auch rechts mit zwei weiteren Rohren nach hinten abgestützt werden (main hoop bracing supports).

4.5.2. Lagenaufbau

Das Monocoque wird mit der Prepreg-Technologie hergestellt, dabei ist die Außenfläche die formgebende Fläche. Die Innenfläche entsteht durch den Lagenaufbau auf die definierte Außenfläche. Dabei wird ein Kunststoffsack während dem Autoklavenprozess auf die Innenfläche gepresst. Zur Einhaltung der minimalen Fahrerzellenabmessungen und der genauen Teilepositionierung muss jedoch die Innenfläche bekannt sein. Somit muss in der Konstruktionsphase bereits der ungefähre Lagenaufbau bzw. die genauen Kerndicken der einzelnen Zonen bekannt sein. Als Kernmaterial sollen sowohl Waben als auch Schaumkerne zum Einsatz kommen.

Durch die im Racing Team gesammelte Erfahrung im Umgang mit Faserverbundbauteilen wird folgender Lagenaufbau angenommen (T300: Cycom 970-T300-plain weave-3k-40%RW):

$$[0/90^{T300}, +/-45^{T300}, +/-45^{T300}, 0/90^{T300}, \overline{0/90^{Kern}}]_s$$

Dabei wird das Monocoque in mehrere Zonen aufgeteilt in denen die Dicke der Kerne variieren. Die Zonen sind wie folgt angegeben:

- Zone 1: vor dem vorderen Überrollbügel: Wabendicke: 14mm

Die Zone vor dem Überrollbügel muss sehr Torsionssteif sein, da sich alle Anbindungspunkte für das vordere Fahrwerk in dieser Zone befinden. Während eine gewisse Torsionsweichheit, siehe **3.2 Grundanforderungen**, zwischen vorderem und hinterem Fahrwerk gewünscht ist, ist eine Torsionsweichheit zwischen den Anbindungspunkten des vorderen oder des hinteren Fahrwerks nicht gewünscht.

- Zone 2: zwischen den Überrollbügeln: Wabendicke: 24mm

Diese Zone wird im Reglement als Side Impact Structure (SIS) bezeichnet. Diese Zone muss einem 3-Punktbiegeversuch mit drei Stahlrohren in der Energieaufnahme und

der Biegesteifigkeit äquivalent sein. Diese Zone muss also ein sehr hohes Biegemoment aufnehmen können, daher wird mit sehr Dicken Waben kalkuliert.

- Zone 3: kompletter Boden: Wabendicke: 10mm

Die Wabendicke des Bodens sollte möglichst gering sein um einen niedrig Gesamtfahrzeugschwerpunkt zu erreichen und sich keine unnötige Schwerpunkterhöhung einzuhandeln. Im Bereich des Fahrergesäßes und des Motors werden die Waben zum Teil ausgespart.

- Zone 4: Motorraum: Wabendicke: 14mm

Der Motorraum unterliegt den selben Kriterien wie die Zone 1. Somit werden auch hier 14mm Waben für die Torsionssteifigkeit verwendet.

4.5.3. Anbindungspunkte

Im Zuge der Konzeptphase muss auch noch die Frage der Befestigung der Nachbarbauteile an das Monocoque geklärt werden. Die größten Kräfte die von den umliegenden Bauteilen in das Chassis eingeleitet werden müssen, kommen vom Fahrwerk: Querlenker-, Dämpfer, Lenkungs- und Spurstangenanbindungen, weiters vom Motor und dem Differential, sowie im Falle eines Unfalles von der Crashbox bzw. den Überrollbügel, nicht zu vergessen sind die aerodynamischen Kräfte vom Unterboden sowie den vorderen und hinteren Flügeln.

Fahrwerksanbindung

Die Anbindung des Fahrwerks an das Monocoque soll mittels Aluminiumfrästeilen (brackets) erfolgen. Dabei soll jeder Halter mit zwei durchgängigen M5 Schrauben mit Mutter befestigt werden. Die Befestigung mittels Schrauben und Mutter hat den Vorteil, dass selbstklemmende Sicherungsmuttern verwendet werden können und so die vom Reglement geforderte Schraubensicherung erfüllt ist.

Motor und Differential

Im Zuge eines ausgereifteren Konzepts im Modul: Motor und Triebstrang, will man die Idee eines gemeinsamen Motor und Differentialpackaging verfolgen. Dies bedeutet für das Chassis, dass die hintere Ein- bzw. Ausbauöffnung so groß sein muss, sodass beide Bauteile gemeinsam aus- und eingebaut werden können. Der Hintergedanke der Idee ist, dass die Kette, die das Getriebe mit dem Differential verbindet im ausgebauten Zustand eingestellt und gespannt werden kann. Die Anbindung ist aufgrund der vorhandenen Anbindungsstellen

am Motor stark eingeschränkt. Die unterschiedlichen vom Motorhersteller vorgesehenen Anbindungsstellen können in **Abbildung 4-9** gesehen werden.

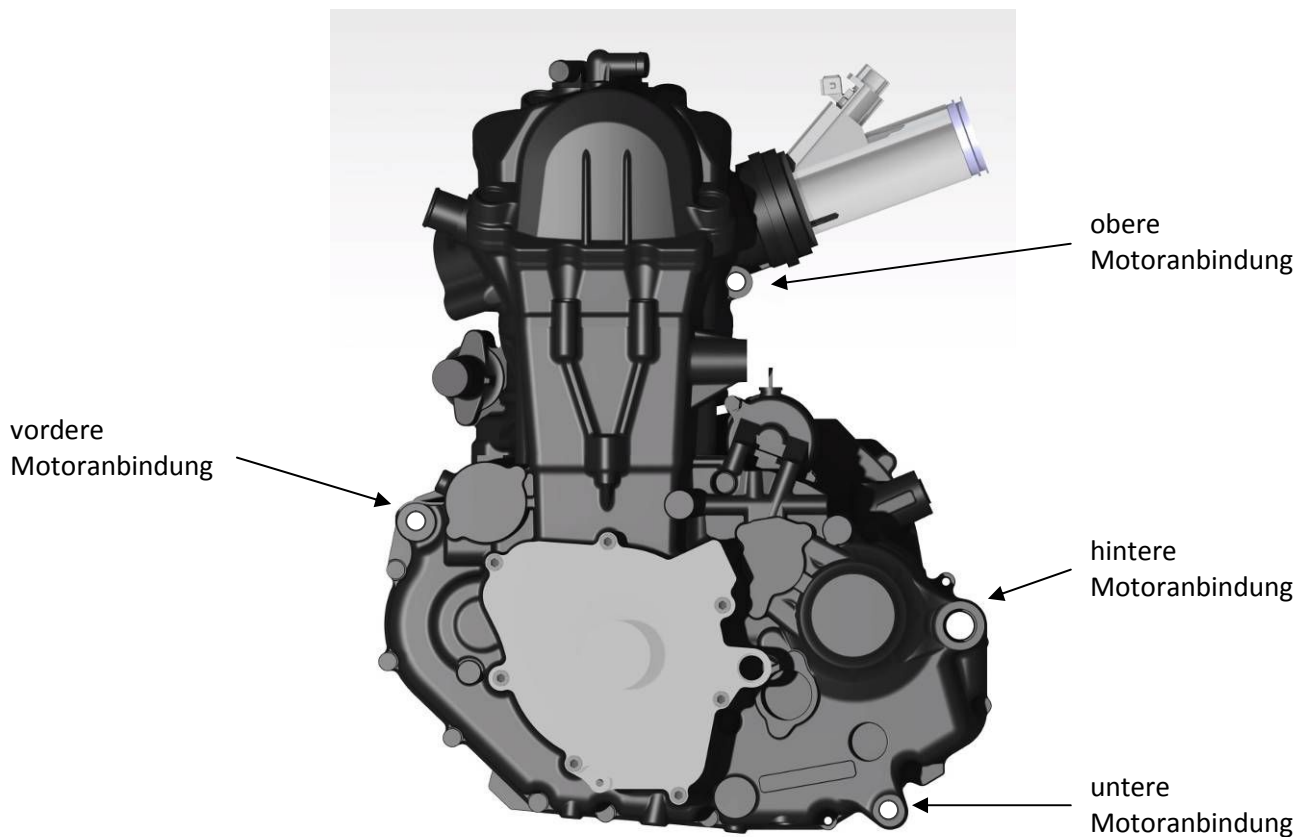


Abbildung 4-9: Seitenriss: Motor - KTM LC4

Der Motor hat auf der Vorderseite eine Anbindungsstelle. Dabei bietet es sich an, eine Anbindungsstrebe zur unteren hinteren Überrollbügelanbindungsstelle vorzusehen. Eine zweite Strebe sollte dann nach vorne oben vorgesehen werden. Dabei müssen umliegende Bauteile wie Abgaskrümmen und Kühlleitungen beachtet werden. Die Verbindung zum Differential kann nur durch die untere und hintere Motoranbindung erfolgen. Somit muss die Differentialhalterung nach unten abgestützt werden.

Crashbox und Aeropackage

Die Anbindungen der Crashbox und des Aeropackage müssen im Rahmen der Konstruktion überlegt werden.

Somit ist die Konzeptionsphase beendet und es kann mit der detaillierten Konstruktion begonnen werden.

5. Konstruktion

Der Grundstein für die Konstruktion ist durch das umfangreiche Konzept gelegt worden. Nun kann mit der Konstruktion begonnen werden. Jetzt müssen alle aus dem Konzept definierten Eigenschaften so umgesetzt werden, dass alle Modulbaugruppen bestmöglich miteinander interagieren. Dabei wird die grundsätzliche Reihenfolge von der Konzeption beibehalten und die Konstruktion kann Schritt für Schritt durchgeführt werden. Zusätzlich sind noch einige Detailkonstruktionen auszuarbeiten.

5.1. Erstentwurf

Aus der Konzeptphase lag bereits eine grundsätzliche Anordnung von den großen Komponenten, also Fahrer, Motor, Differential, Kühler und Auspuff, vor. Diese Anordnung kann nun ausgenutzt werden, um einen funktionierenden Erstentwurf des Monocoques konstruieren zu können. Dabei wird versucht sich an die Entwurfsskizzen von Mag. Renate Leitner (siehe **Abbildung 4-8**, S15) zu halten. Ein erster zufriedenstellender Entwurf kann in **Abbildung 5-1** gesehen werden.

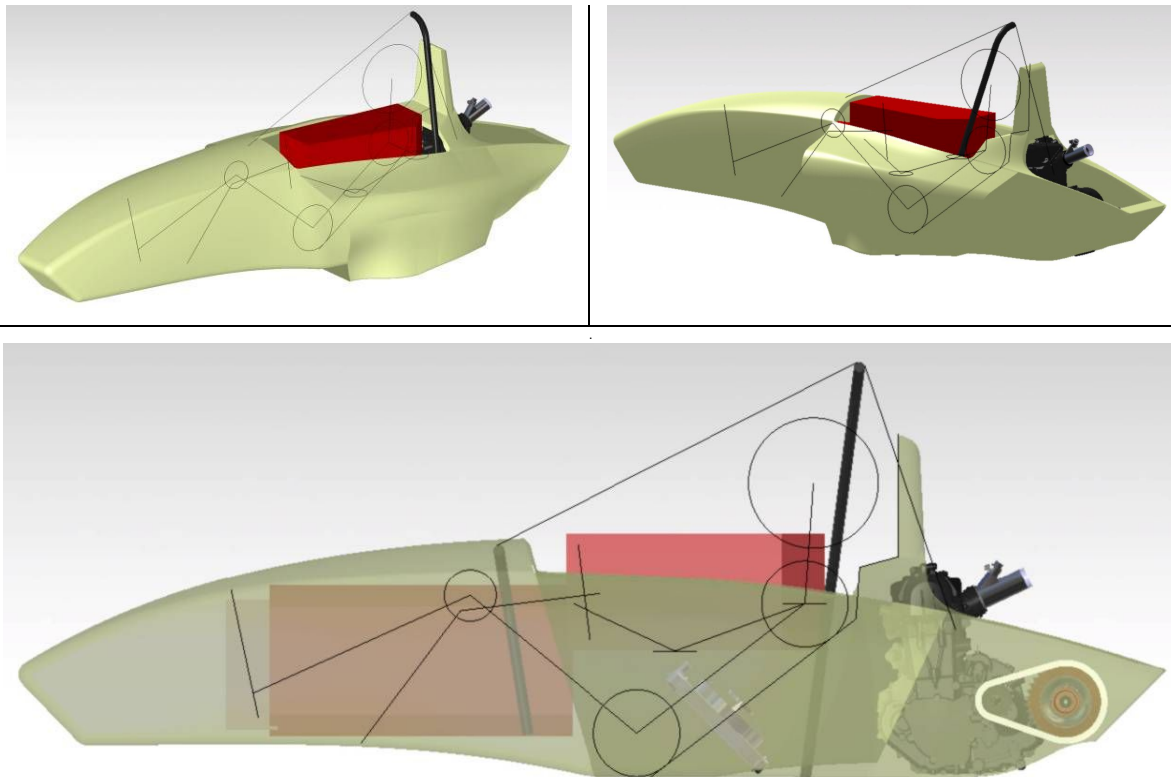


Abbildung 5-1: erster Entwurf

Wie man in der Abbildung sieht, sind die Fahrerinnenraumschablonen vorhanden und eine annähernde Motor-, Kühler und Differentialpositionierung ist getroffen. Weiters sind bereits

beide Überrollbügel so konstruiert und positioniert, dass die vom Reglement geforderten Abmessungen eingehalten werden. Man erkennt aber deutlich, dass das Monocoque hinten und vorne gekürzt werden kann. Diese erste brauchbare Konstruktion ist ein guter Richtwert für die gleichzeitig erfolgende Konstruktion der Fahrwerkskinematik.

Bis zu diesem Zeitpunkt ist bereits eine Vorauslegung der vorderen Fahrwerksgeometrie (**Abbildung 5-2**) fertig. Grundsätzlich besteht das vordere Fahrwerk aus dem oberen und unteren Querlenker(blau), dem Feder-Dämpfersystem(rot), welches am Umlenkhebel(Rocker, weinrot) angebunden ist, dem Pull-Rod(orange) und dem Lenksystem(violett). Wie man sieht wurde das vordere Fahrwerk vom Fahrwerksmodulleiter bereits so konstruiert, dass das Lenksystem, die unteren Querlenker und das Feder-Dämpfersystem als Gesamtpaket unter dem Monocoque Platz haben soll. Im Monocoque soll dabei in der späteren Konstruktion ein Ausschnitt für diese Komponenten entstehen.

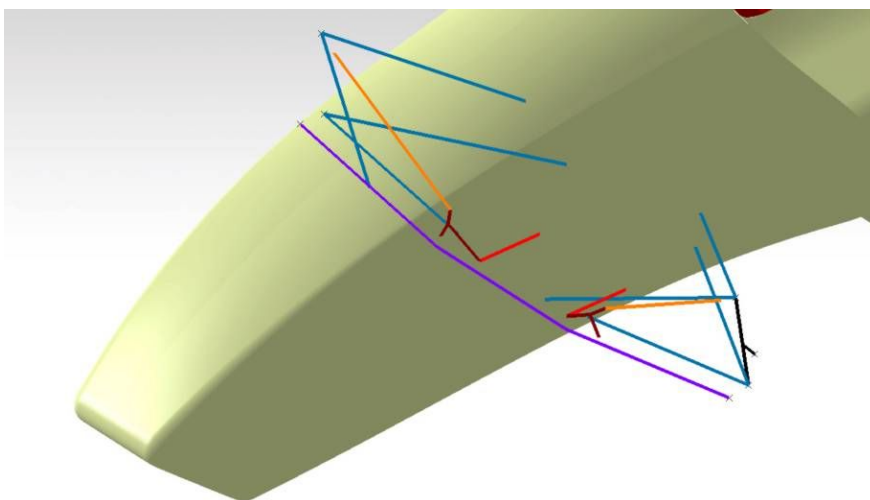


Abbildung 5-2: vorderes Fahrwerk

Das hintere Fahrwerk besteht aus den selben Bauteilen, nur dass statt dem Lenksystem eine Spurstange vorhanden ist. Weiters soll das hintere Feder-Dämpfersystem nicht unter dem Monocoque befestigt werden sondern seitlich davon, da sonst alle schweren Komponenten im Motorraum angehoben werden müssten und dies die Gesamtschwerpunkthöhe heben würde.

Ab diesem Zeitpunkt beginnt hinsichtlich der Konstruktion ein ständiges Zusammenspiel und Austausch zwischen den Modulen: Chassis, Fahrwerk, Motor, Triebstrang und Elektronik.

5.2. Fertige Konstruktion

Am Ende der Konstruktionsphase, die durch eine starke Zusammenarbeit mit den anderen Modulen geprägt war, resultierte folgende Konstruktion (siehe **Abbildung 5-3**).



Abbildung 5-3: fertiges Monocoque

Die detaillierten Konstruktionslösungen sind im nächsten Kapitel genauer behandelt. Zur Beurteilung der gesamten Formgestaltung sind in den weiteren Darstellungen (**Abbildung 5-4, Abbildung 5-5**) umliegende Bauteile mitabgebildet.



Abbildung 5-4: fertiges Monocoque in Zusammenspiel mit den anderen Bauteilen

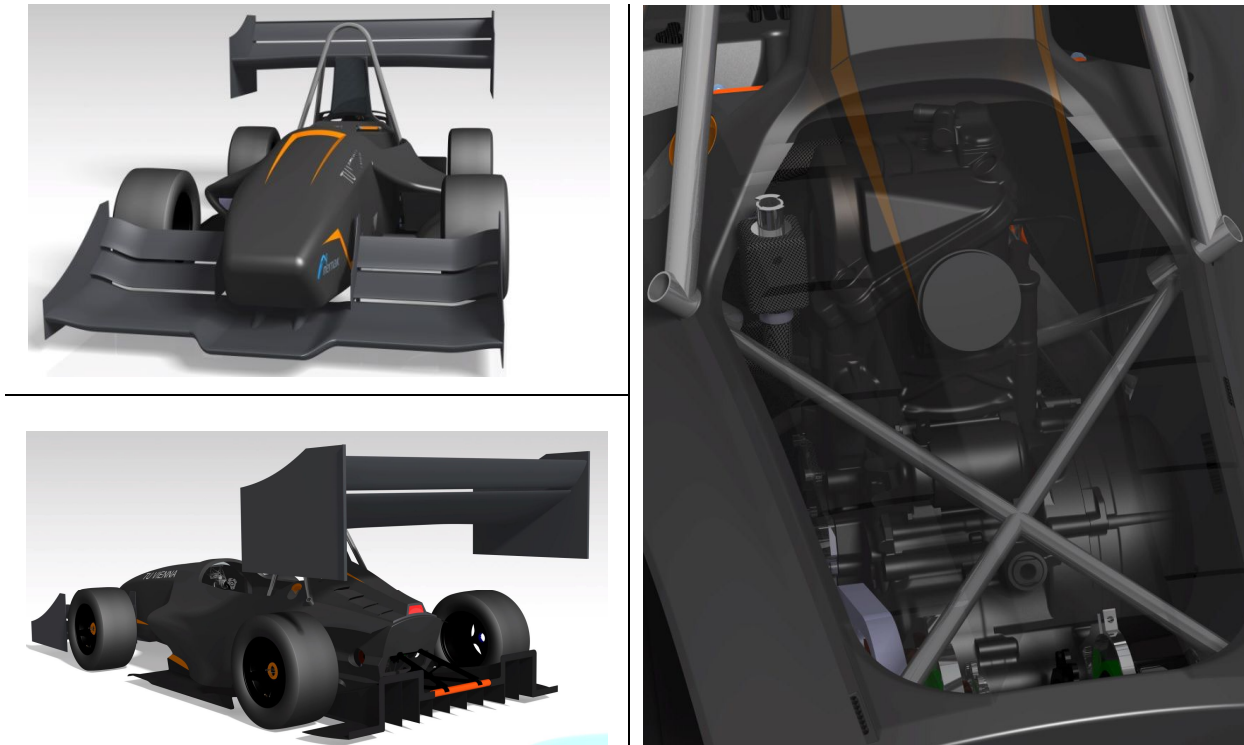


Abbildung 5-5: fertiges Monocoque in Zusammenspiel mit den anderen Bauteilen

5.3. Detailkonstruktion

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Detailkonstruktionen von Anbindungen, Integrationen und der gleichen näher erklärt.

5.3.1. Fahrer

Neben den Daten, die aus der Sitzbox bestimmt werden konnten, wird auch mit dem „Human Builder“ von Catia V5 gearbeitet. Damit kann zusätzlich eine virtuelle Überprüfung der Platzverhältnisse durchgeführt werden. Im untenstehenden Bild (**Abbildung 5-6**) ist eine männliche Person mit 1,70m Körpergröße zu sehen.

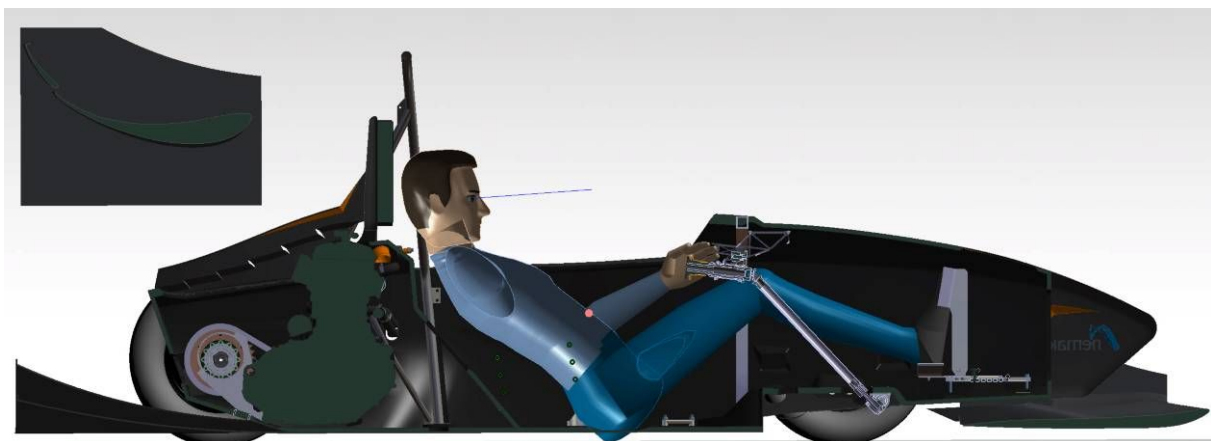


Abbildung 5-6: Schnittmodell mit Fahrer

Dabei steht die verstellbare Pedalbox in hinterster Stellung. Das Gesäß der Person ist im Vergleich zur Realität sehr eckig ausgeführt und steht daher durch den Monocoqueboden. Im Bereich des Gesäßes wird der Kern ausgenommen um den niedrigsten möglichen Fahrerschwerpunkt zu erreichen. Im Rücken der Person ist ein Freiraum für die Steuergeräte der Elektronik vorgesehen. Der Sitz soll mit 2-Komponenten-Polyurethan-Schaum(2K-PU-Schaum) geformt werden um eine bestmögliche Passform zu gewährleisten. Dabei setzt sich die Person im Auto auf einen mit Schaum gefüllten Kunststoffsack und verweilt während der Aushärtephase des Schaumes im Auto. Nachdem der Schaum fest geworden ist, können Überstände weggeschnitten und eventuelle Nachbesserungen vorgenommen werden.

Des Weiteren ergeben sich mit dem „Human Builder“ neue Möglichkeiten, so kann man Sichtanalysen der Piloten durchführen. In einer späteren Konstruktionsphase können außerdem aus optischer und ergonomischer Sicht optimale Positionen für Instrumente, wie Druckknöpfe und Potentiometer, für das Armaturenbrett (dashboard) gefunden werden.

In den folgenden Bildern können die durchgeführten Sichtanalysen gesehen werden.

Abbildung 5-7 zeigt die Fahrersicht bei normaler Sitzposition bei einer Körpergröße von 1,80m. Man erkennt, dass neben der freien Sicht zu den Rädern, eine gute Sicht zum Frontflügel gewährleistet ist. Somit sollte das Anfahren einer Kurve um eine Pylone erleichtert werden. Die Sicht zum Frontflügel ist auch für einen Fahrer mit einer Körpergröße von 1,70m gegeben, jedoch mit kleinen Einschränkungen (**Abbildung 5-9**). Zusätzlich ist in **Abbildung 5-8** noch eine Sichtanalyse bei Drehung des Kopfes zu sehen.

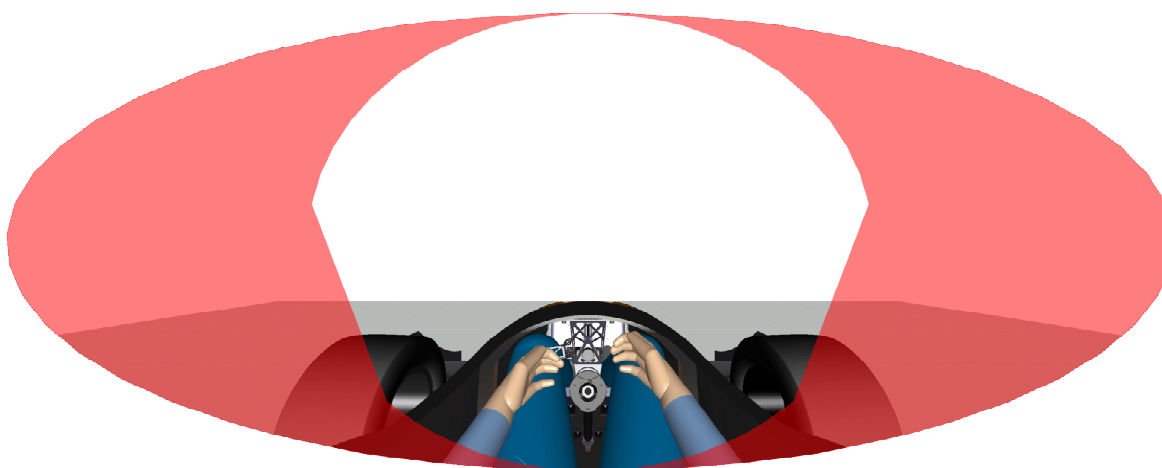


Abbildung 5-7: Fahrersicht bei einer Körpergröße von 1,86m

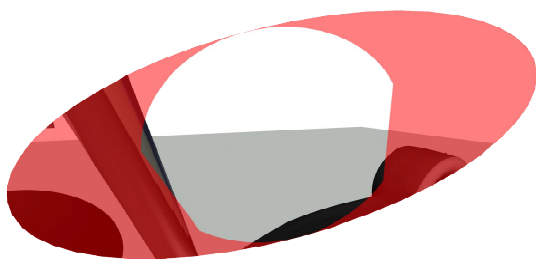


Abbildung 5-8: Seitensicht bei einer Körpergröße von 1,86m



Abbildung 5-9: Fahrersicht bei einer Körpergröße von 1,70m

Wichtig dabei ist, dass alle relevanten Objekte (Fahrbahn, Frontflügel, Reifen) nahe am Sichtzentrum liegen, da durch den Helm die Sicht etwas eingeschränkt wird.

5.3.2. Öffnungen

Für die Torsionssteifigkeit ist die Konstruktion der Fahrerraum- und Motorraumöffnung entscheidend. Damit der Steifigkeitsverlust minimal gehalten werden kann, sollten die Öffnungen so klein wie möglich ausfallen. Außerdem sollten die Radien nicht zu klein gewählt werden.

Die Fahrerzellenöffnung wird so groß gewählt, dass das vorgeschriebene Template, der Fahrer und das Lenkrad Platz haben. Die geometrischen Bedingungen sind in **Abbildung 5-10** dargestellt. Das vorgeschriebene Template ist in rot abgebildet.

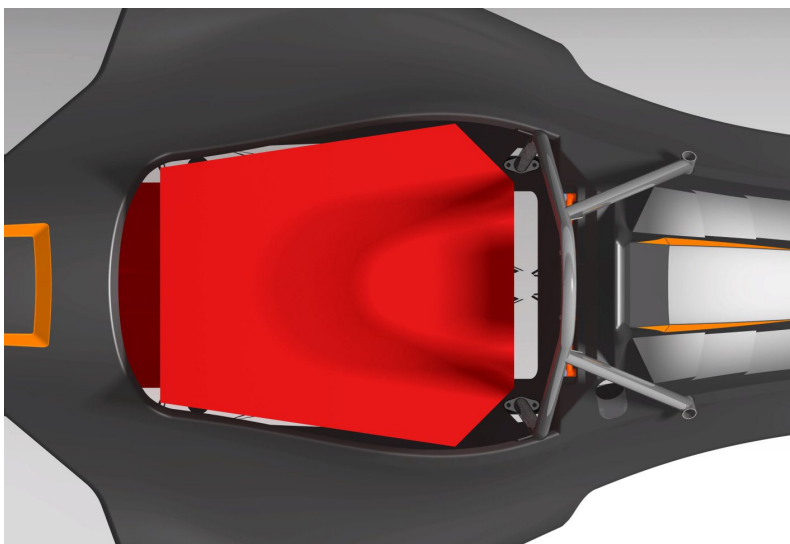


Abbildung 5-10: Fahrerzellenöffnung

Neben der Fahrerzellenöffnung musste auch noch die Größe der Motorraumöffnung definiert werden. Diese muss so gestaltet sein, dass der gesamte Antriebsstrang, also Motor inklusive Getriebe und Differential, eingebaut werden kann. Je größer die Öffnung ist, desto

torsionsweicher wird das Monocoque, aber desto einfacher wird der Motoreinbau. Es wird eine möglichst kleine Öffnung angestrebt. Dazu kann mit den Tools „DMU Fitting“ und „DMU Space Analysis“ von CATIA gearbeitet werden. Diese Tools bieten die Möglichkeit den Ein- und Ausbau zu simulieren. Aus der Simulation extrahierte Bilder sind in **Abbildung 5-11** dargestellt.

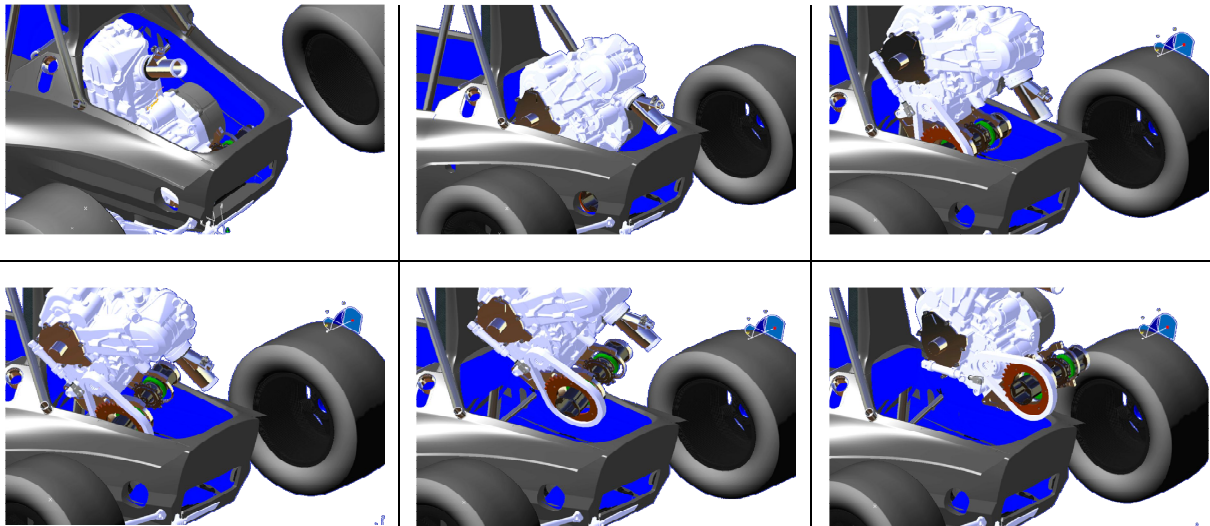


Abbildung 5-11: Motorausbau

Der Antriebsstrang kann wie folgt in drei Schritten ausgebaut werden.

1. Drehen des gesamten Antriebsstranges um die Differentialachse, sodass der Motorblock oben ist und aus dem Monocoque herausgehoben werden kann. (**Abbildung 5-11**, obere Reihe: mittlere Abbildung)
2. Herausheben der Baugruppe so weit, dass der gesamte Motor aus dem Monocoque entfernt ist. (**Abbildung 5-11**, obere Reihe: rechte Abbildung)
3. Seitliches Kippen der Baugruppe, damit das Differential mit den angeschraubten Tripodensternen durch die Öffnung ausgebaut werden kann. (**Abbildung 5-11**, untere Reihe: linke und mittlere Abbildung)

Eine weitere Öffnung ist im vorderen Bereich des Monocoques integriert und dient der Durchführung von Anpassungsarbeiten an der Pedalbox und außerdem der Montage der Crashbox. Die Öffnung ist in **Abbildung 5-12** dargestellt.



Abbildung 5-12: Wartungslücke

5.3.3. Firewall

Für einen optimalen Fahrerschutz wird die vom Reglement geforderte Brandschutzwand (firewall) bei der Monocoquefertigung integriert. Der Plan ist, dass die Firewall vor der Monocoquefertigung vorproduziert wird. Dabei soll nur der Kern und jeweils eine Carbonecklage je Seite vorgefertigt werden. Während der Fertigung des Monocoques soll dieser Rohling dann beim Zusammenbau der Formhälften nach der ersten Skin bzw. vor dem Einlegen des gesamten Kernmaterials eingesetzt werden. Somit ist die Firewall sowohl mit der Innen- als auch mit der Außenskin verbunden. Zusätzlich wird eine kleine Lucke in die Firewall integriert um an alle Bauteile vor dem eingebauten Motor, zu gelangen. Des Weiteren muss man über die Lucke die vordere Motorbefestigung anziehen.

5.3.4. Überrollbügel

Die Konstruktion der Überrollbügel(gelb) ist in **Abbildung 5-13** zu sehen.

Der vordere Stahlüberrollbügel wird während des Laminierprozesses integriert. Dieser hat einen quadratischen Querschnitt. Die Außenabmessungen betragen 25x25mm und die Wandstärke ist 2mm. Mit diesen Abmessungen entspricht der vordere Überrollbügel dem Reglement. Der hintere Stahlüberrollbügel besitzt einen runden

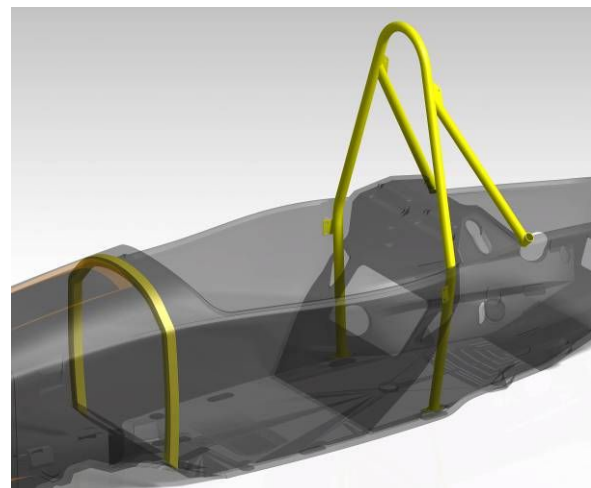


Abbildung 5-13: Überrollbügelintegration

Querschnitt mit einem Außendurchmesser von 25mm und einer Wandstärke von 2,5mm. Der hintere Überrollbügel geht dabei durch die Firewall um eine möglichst kurzen und daher leichten Überrollbügel zu haben. Der Überrollbügel ist an vier Stellen über jeweils zwei M8 Schrauben mit dem Monocoque verbunden. Darüber hinaus gibt es noch eine Verbindung durch die Überrollbügelabstützung (main hoop bracing supports). Diese ist mit einer M10 Schraube am Monocoque fixiert.

5.3.5. Anbindungen

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Bauteile, die mit dem Monocoque verbunden werden müssen. Dabei wurden hauptsächlich drei verschiedene Verbindungsarten verwendet.

Die ersten zwei Anbindungsmöglichkeiten, die im Folgenden erläutert werden, brauchen bei Verwendung von Kernen, die unter Druckbelastung kollabieren können, in der Monocoquestruktur im Bereich der Verbindungsstelle spezielle Einlegeteile, besser bekannt unter Inserts. Einen Überblick aller im Monocoque verwendeten Inserts gibt folgende Abbildung.



Abbildung 5-14: Inserts

Dabei handelt es sich um gefräste CFK-Platten. Zur besseren Orientierung wurden ein paar Anbauteile miteingeblendet. Die erste Verbindungsart ist eine Schrauben-Klemmmutter-Verbindung. Diese wird bei Bauteilen verwendet, die während dem Betrieb oder im Crashfall hoch beansprucht werden. Bei Verwendung von Klemmmuttern ist ein unbeabsichtigtes Lösen der Verbindung unmöglich. Mit dieser Technik soll das gesamte Fahrwerk, die Crashbox, der hintere Überrollbügel, die Differentialhalterung und das Versteifungskreuz an das Monocoque angebunden werden.

Ein Spezialfall dieser Methode soll für die Gurtbefestigung und die unteren Befestigungen für den hinteren Überrollbügel verwendet werden. Problem dieser Anbindungspunkte ist, dass jene Stellen eine hohe Kraft aushalten müssen, eine reglementgerechte Verdrehsicherung vorgesehen werden muss und an der Unterseite des Monocoques kein Platz für Schraubenköpfe ist, da ein glatter Unterboden anschließen soll. Daher ist eine Bolzen-Platten-Schweißkonstruktion geplant. Die geschweißte Bolzenkonstruktion besteht aus drei Teilen: zwei Bolzen und einer Verbindungsplatte und ist in **Abbildung 5-15** dargestellt. Die Sicherheit gegen Bruch der Schweißnaht ist nach einer überschlägigen Berechnung laut

Roloff/Matek - Maschinenelemente[2] ca. 1,5. Da für alle Gurtanbindungen ein Ausreißversuch durchgeführt werden muss, ist diese Verbindungsart bei Bestehen des Versuches reglementgerecht. Auf der Unterseite des Monocoques ist eine Aussparung für die Verbindungsplatte, sodass eine ebene Monocoqueunterfläche vorhanden ist. Der Zusammenbau der Gurtanbindung des Oberschenkelgurt ist in **Abbildung 5-16** abgebildet.

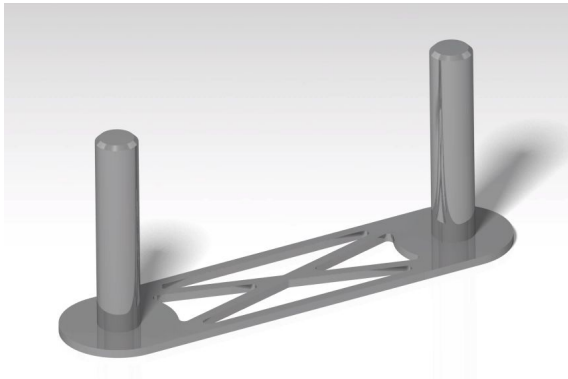


Abbildung 5-15: geschweißte Gurtanbindung

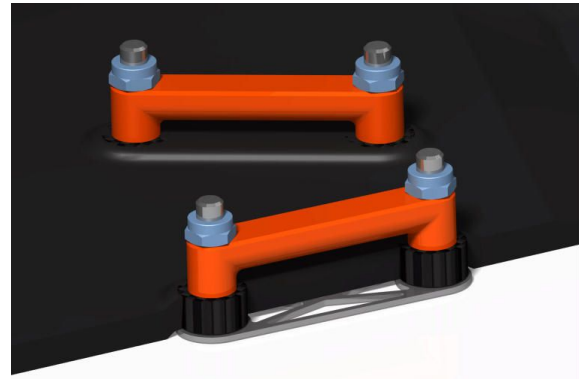


Abbildung 5-16: gesamte Oberschenkel-Gurtanbindung

Als zweite Variante kommt eine Befestigung mittels Keensert [3] zum Einsatz. Dabei wird ein Feingewinde in die Inserts des Monocoques geschnitten. Danach wird ein Keensert (**Abbildung 5-17**), also eine Stahlhülse mit Innen- und Außengewinde, eingeschraubt, zusätzlich müssen die angebrachten Sperrstifte in das Außengewinde formschlüssig eingeschlagen werden, sodass eine Verdrehssicherung



Abbildung 5-17: Keensert [3]

zwischen Insert und Keensert entsteht. Nun steht ein Stahlgewinde, in denen verschiedene Anbauteile befestigt werden können, zur Verfügung. Nachteil dieser Verbindungsart ist, dass die Schraube nicht verdrehgesichert ist. Nur mit Hilfe eines Sicherungsloches im Kopf der Schraube, mittels Sicherungsdraht und der richtigen Sicherungstechnik kann eine reglementgerechte Verdrehssicherung erreicht werden. Die Pedalbox, der Frontflügel, die gesamte Lenkung und die hintere Stabilisatorbefestigung wird mittels Keenserts realisiert.

Darüber hinaus kann die Befestigung durch Kleben erfolgen. Dabei können Halter, spezielle Gewindebolzen mit Klebeteller oder ähnliches direkt angeklebt werden. Diese Technik wird für den Kühlerhalter, den Auspuff, die Elektronik, das Dashboard und andere Kleinteile verwendet.

5.3.6. Motor und Differential

Wie schon im Konzept beschlossen, wird der Motor und das Differential gemeinsam als ein Bauteil in das Monocoque eingebaut. Die detaillierte Konstruktion sieht vor, dass der Motor vorne sowohl rechts als auch links mit zwei Streben (**Abbildung 5-18**: gelb) befestigt wird. In **Abbildung 5-18** werden die Platzverhältnisse von oben durch den Fahrerraum blickend dargestellt. Die Firewall ist in dem Bild transparent dargestellt. Die unteren Streben nutzen die unteren Verschraubungspunkte des hinteren Überrollbügels. Die oberen Streben sind so gelegt, dass umliegende Bauteile, wie Abgaskrümmter (**Abbildung 5-18**, linkes Rohr) und Kühlleitungen (**Abbildung 5-18**: zwei Rohre rechts außen), ohne Probleme vorbeigeführt werden können.

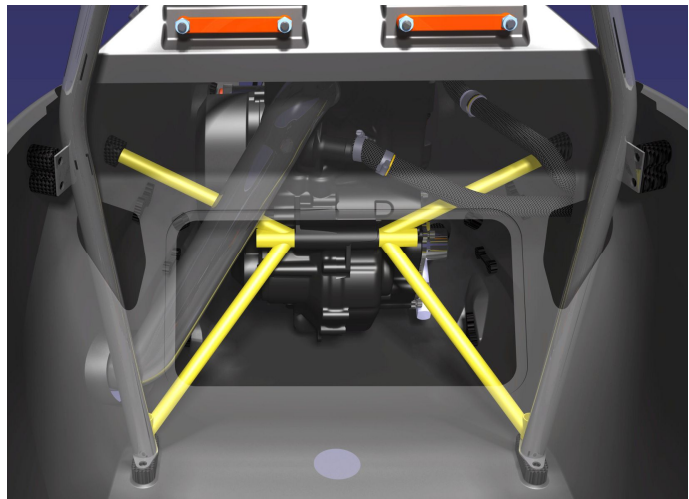


Abbildung 5-18: vordere Motoranbindung, Abgaskrümm- und Kühlerdurchführung

Das Differential wird dabei mit zwei Halterungen (Diffmount) an jeweils zwei Stellen des Motors angeschraubt. Zusätzlich werden beide Halter jeweils mit zwei M8 Schrauben am Boden mit dem Monocoque verbunden. Die Halterungen sind in **Abbildung 5-19** in Gelb zu sehen. Dabei ist der Blickwinkel von links-hinten auf das transparente Monocoque gerichtet. Zusätzlich sind alle umliegenden Inserts eingeblendet. Man erkennt, dass das Insert für die Motor-



Abbildung 5-19: hintere Differentialhalterungsanbindung

Differentialanbindung über den ganzen Monocoqueboden geht um eine möglichst große Lasteinleitungsfläche zu erreichen.

5.3.7. Auspuff und Kühlleitungen

Zwei Komponenten, nämlich Auspuff und Wasserkühler, liegen außerhalb des Monocoques in den Seitenkästen. Diese zwei Komponenten benötigen jeweils Leitungen in den Motorraum. Dafür sind jeweils links und rechts Öffnungen vorgesehen worden. Diese werden bereits in der Negativform mitberücksichtigt.

5.3.8. Versteifungskreuz

Die Öffnung für den Motorein- und -ausbau macht den Motorraum sehr torsionsweich, daher soll ein Versteifungskreuz(spider) im Motorraum verwendet werden. Dabei bietet es sich an, die Anbindungspunkte der Überrollbügelabstützung und die hinteren Heckflügelanbindungspunkte zu verwenden. Dazu muss die Innenfläche, also der Lagenaufbau und die Kerengeometrie, bekannt sein. Das Versteifungskreuz kann in der oberen Gesamtabbildung(**Abbildung 5-5**: rechts, Seite 23) erkannt werden.

5.4. Verifizierung der Konstruktion

Während und speziell am Ende der Konstruktion wurde die Konstruktion auf Erfüllung der Ziele überprüft.

Die reglementseitigen Bestimmungen sind laufend kontrolliert worden. Nachdem alle Bauteile im Fahrzeug modelliert wurden, konnte auch eine Endüberprüfung des Reglements vorgenommen werden. Dazu wurde das gesamte Reglement Punkt für Punkt anhand des CAD-Modells abgearbeitet.

6. Berechnung und Optimierung

6.1. Allgemeines

Aus zeitlichen Gründen wurde die Optimierung erst für das zweite Monocoque durchgeführt. Das erste Monocoque wurde nur berechnet aber nicht optimiert. Dies geschah nicht im Zuge der Diplomarbeit. Für Vergleichszwecke wird der Lagenaufbau und die Masse kurz erwähnt.

globaler Lagenaufbau: $[0/90^{T300}, +/-45^{T300}, +/-45^{T300}, 0/90^{T300}, \overline{0/90^{Kern}}]_s$

Als T300 wurde folgendes Material verwendet: Cycom 970-T300-plain weave-3k-40%RW. Zusätzlich sind im Bereich der vorderen und hinteren Fahrwerkspunkte M46J UD-Verstärkungslagen von oben nach unten hinzugefügt worden und im Bereich der Lasteinleitungspunkte wurden Verstärkungsgewebelagen verwendet. Die endgültige Masse mit dem vorderen Überrollbügel beträgt 23kg.

Beim zweiten Monocoque, das für einen Elektroantrieb geplant ist, wird eine Optimierung durchgeführt. Im Vergleich zur beschriebenen Konstruktion ändert sich die Form der Firewall, außerdem ist ein Ausschnitt für den Batteriecontainer in den Seitenflächen vorgesehen.

Für die Optimierung des Lagenaufbaues sollen T800 Gewebefasern (Cytec: MTM49-3/CF1218-40%RW) und M46J UD-Fasern (Cytec: MTM49-3/M46J(12K)-150-35%) verwendet werden. Angestrebt wird ein Sandwichaufbau mit zwei oder drei globalen Gewebedeckschichtlagen mit lokalen UD-Verstärkungslagen, die eine gitterrohrrahmenartige Ausrichtung aufweisen sollen. Mit globalen Lagen sind Schichten gemeint, die sich über die ganze Monocoqueoberfläche und die Firewall erstrecken.

6.1.1. Optimierungsablauf

Im Sinne der Optimierung versucht man das Optimum, also das Beste, bei vorgegebenen Bedingungen (Zielfunktion und Randbedingungen) zu finden. Dies ist im Falle von faserverstärkten Kunststoffen eine schwierige, wenn nicht unmögliche, Aufgabe. Faserverstärkte Kunststoffe bieten eine Vielzahl verschiedener Optimierungsparameter an. Grundsätzlich kann im Zuge der Arbeit die Form, das Material bzw. Faser-Matrix-Kombination, und der Lagenaufbau optimiert werden.

- Die Form wurde in der Konzept- und Konstruktionsphase faserverbundgerecht konstruiert. Eventuelle Verbesserungen werden erst nach den ersten Berechnungen ersichtlich. Verbesserungen in der Form können aber aufgrund des straffen Zeitplanes des TUW-Racing Teams nicht realisiert werden. Es wird jedoch im letzten Abschnitt der Arbeit (**9.2 Ausblick**) auf Verbesserungsvorschläge eingegangen.
- Die verwendbaren Materialien sind durch den Herstellungsprozess im Autoklaven auf Duromere-Matrixsystem begrenzt. Die in Frage kommenden Faser-Matrix-Kombinationen sind aufgrund des Prototypencharakters des Projektes und der Kosten ebenso begrenzt. Eine Optimierung der Grundmaterialien würde in das Fachgebiet der Materialforschung fallen und soll in dieser Arbeit nicht behandelt werden.
- Als dritte Optimierungsmöglichkeit bietet sich der Lagenaufbau an. Dies ist jener Punkt, der genauer betrachtet werden soll.

Im Zuge einer Optimierung muss mit mathematischen Algorithmen gearbeitet werden. Das zur Verfügung stehende Programm, Hyperworks (Altair Engineering, Inc.; Troy-MI-United States), bietet mit dem Solver Optistruct ein sehr effizientes Optimierungstool an. Man kann dabei die Lagenrichtung, Lagendicke und Lagenschichtung optimieren. Die Herangehensweise, wie optimiert werden soll, kann unterschiedlich erfolgen. Eine Möglichkeit, die das Manual von Hyperworks vorschlägt, wäre vereinfacht beschrieben Folgende.

1. Das gesamte Bauteil wird für jedes verwendete Material mit
 - a. x UD Lagen mit einer Materialorientierung von 0° , $(180/x)^\circ$,... und
 - b. y Gewebelagen mit einer Materialorientierung von 0° , $(90/y)^\circ$,... aufgebaut.
2. Optimierung der Lamineinzelschichtdicken;
3. Optimierung der Reihenfolge der einzelnen Lamineinzelschichten;
4. Fertigungstechnische Aufbereitung der Daten;
5. Neuberechnung des geänderten Laminataufbaus;

Das Problem dieser Möglichkeit ist, dass der Optimieralgorithmus bei einem großen Bauteil viele Optimierungsschritte benötigt um alle Möglichkeiten abzudecken. Insbesondere dann wenn der Materialorientierungswinkel sehr fein unterteilt wird. Des Weiteren muss die

Anfangsmaterialdicke für jede Lamineinzelschicht sehr dick gewählt werden, da der Optimieralgorithmus nur Material entfernen, aber nicht hinzufügen kann und örtliche Verstärkungslagen relativ dick ausfallen können. Ein weiteres Problem besteht in der Nachbereitung der Daten. Bei einer sehr feinen Abstufung des Winkels kann es vorkommen, dass hoch beanspruchte Bauteilabschnitte („Lastpfade“) sich über mehrere Lamineinzelschichten mit ähnlichem Lagenwinkel erstrecken und dadurch den Aufwand der Nachverarbeitung enorm erhöht, da diese Zonen händisch rekonstruiert werden müssen und ein gebogenes UD-Laminat nur schwer herstellbar ist.

Aufgrund der oben angeführten Nachteile wird eine andere Vorgangsweise gewählt. Diese ist wie folgt beschrieben.

1. Optimierung der Dicke eines Schalenmodells mit isotropen Materialparametern
Dieser Schritt dient zum Abschätzen von Abschnitten erhöhter Beanspruchung, umgangssprachlich als Lastpfade bezeichnet. Das Ziel ist eine gitterrohrrahmenartige Struktur auf Basis eines Schalenmodells. Dieser Rahmen kann im weiteren Schritt als Ausgangsbasis von UD-Verstärkungen verwendet werden.
2. Erstellung eines Composite-Modells, sodass globale Änderungen (Gewebeorientierung, Wabenausrichtung,...) analysiert werden können.
3. Optimierung der Lagendicken eines Composite-Modells mit den aus Punkt 1 definierten UD-Verstärkungsschichten und den aus Punkt 2 analysierten, idealen globalen Materialparametern.
4. Aufbereitung der Daten und Neuberechnung, sodass ein herstellungsgerechtes Bauteil vorliegt.

Der Vorteil dieser Variante ist, dass die Anzahl der Optimierungsparameter drastisch reduziert wird. Dies wirkt sich in der Optimierungszeit aus. Zudem wird für den Berechnungsingenieur ein tieferes Verständnis geschaffen, welches diesem bei der Optimierung hilft. Etwaige Fehler können leichter erkannt und verstanden werden. Darüber hinaus ist die Aufbereitung der Daten nach der Lagendickenoptimierung um ein Vielfaches geringer. Gleichzeitig steigt jedoch der Vorbereitungsaufwand(Pre-Processing) des Modells.

Um die Optimierung zu vereinfachen, wird des Weiteren die Annahme getroffen, dass die Steifigkeit ausschlaggebender ist als die Festigkeit. Während die Steifigkeit ein globales

Problem darstellt, ist die Festigkeit meist nur ein lokales Problem und kann oft durch gezielte Verstärkungslagen beseitigt werden. In diesem Fall erfolgt die Optimierung nur auf Basis der Torsionsbelastung. Die Festigkeit wird erst am fertig optimierten Laminataufbau überprüft. Wie sich später herausstellt, ist die Annahme gerechtfertigt.

6.1.2. Materialdaten

Die verwendeten Materialdaten für die Berechnung sind hier aufgelistet.

6.1.2.1. Isotrope Materialien

Stahl

Für beide Überrollbügel und das Versteifungskreuz werden verschiedene Stahlsorten verwendet. Der vordere Überrollbügel wird aus nichtrostenden Edelstahl X5CrNi18-10 (1.4301) gefertigt. Der hintere Überrollbügel und das Versteifungskreuz werden aus Rohrhalszeugen aus S235JR(1.0038) gefertigt.

	E	ν	ρ
	MPa	-	g/cm ³
S235JR	211000	0,3	7,85

Tabelle 6-1: Materialdaten: S235JR[4]

	E	ν	ρ
	MPa	-	g/cm ³
X5CrNi18-10	196000	0,3	7,85

Tabelle 6-2: Materialdaten: X5CrNi18-10 [4]

Aluminium

Die vordere Schutzplatte(Anti-Intrusion-Plate) wird als versteifendes Bauteil in die Simulation mitaufgenommen und besteht aus Aluminium: EN-AW-7075 T6.

	E	ν	ρ
	MPa	-	g/cm ³
EN-AW-7075 T6	72000	0,33	2,81

Tabelle 6-3: Materialdaten: EN-AW-7075 T6[4]

Epoxidharz

An zwei Stellen werden zwei Finite-Elemente-Netze mit Hilfe von Klebeverbindungen zusammengeführt. Diese Klebeverbindungen stellen in der Realität einen Klebefilm aus dem Matrixmaterial dar. Dabei wird der Klebefilm von UMESCO verwendet. Die genaue Bezeichnung lautet MTA 240/PR13-188gsm. Für diesen Klebefilm werden folgende Materialdaten verwendet.

	E	ν	ρ	R_m
	MPa	-	g/cm ³	MPa
MTA 240	3400	0,35	1,23	90

Tabelle 6-4: Materialdaten: Epoxidharz [5]

6.1.2.2. Anisotrope Materialien

Gewebe: MTM49-3/CF1218-40%RW (T800) (200gsm)

Als Gewebematerial für das Monocoque wird ein MTM49-3/CF1218-40%RW Gewebe von Cytec verwendet. Es handelt sich dabei um ein Gewebe mit T800 Faser(CF1218) mit einem Epoxidharz aus MTM49-3. Der Massenanteil des Harzes beträgt 40%. Die Dichte des Materials beträgt 1,52g/cm³ mit einer Materialstärke von 0,22mm im ausgehärteten Zustand.

Aus einem Datenblatt [6] gehen folgende Werte hervor.

	$E_l = E_q$	$E_{lc} = E_{qc}$	G_{lq}	ν_{lq}	$\sigma_{ltu} = \sigma_{qtu}$	$\sigma_{lcu} = \sigma_{qcu}$	τ_{lqu}
	GPa	GPa	GPa	-	MPa	MPa	MPa
T800 200gsm -MTM49-3	75	67,6	4,39	0,04	956	722	123

Tabelle 6-5: Materialdaten: T800-Gewebe [6]

Bei der Berechnung wird nicht zwischen Zug- und Druckelastizitätsmodul unterschieden, da dies zu einer materiellen Nichtlinearität der Analyse führen würde. Der Aufwand einer nichtlinearen Analyse steht in keinem Verhältnis zum Nutzen. Es wird das arithmetische Mittel aus Zug- und Druckmodul verwendet.

	$E_l = E_q$	G_{lq}	ν_{lq}	$\sigma_{ltu} = \sigma_{qtu}$	$\sigma_{lcu} = \sigma_{qcu}$	τ_{lqu}	ρ
	GPa	GPa	-	MPa	MPa	MPa	g/cm ³
T800 200gsm -MTM49-3	71,3	4,39	0,04	956	722	123	1,52

Tabelle 6-6: verwendete Materialdaten: T800-Gewebe

Zu Festigkeitsanalyse wird noch der Interaktionsparameter nach Tsai-Wu benötigt. Es wird mit folgendem Interaktionsparameter F_{12} [7] gerechnet.

$$F_{12} = \frac{-0,5}{\sqrt{\sigma_{UT/0^\circ} \cdot \sigma_{UT/90^\circ} \cdot \sigma_{UC/0^\circ} \cdot \sigma_{UC/90^\circ}}} = -7,24 \cdot 10^{-7} \frac{1}{(\text{MPa})^2} \quad (6.1)$$

UD: MTM49-3/M46J(12K)-150-35% (150gsm)

Als Unidirektionales(UD)-Verstärkungsmaterial für das Monocoque wird ein MTM49-3/M46J(12K)-150-35% verwendet. Beim UD-Material kommt eine Hochmodulfaser: M46J zum Einsatz. Die Matrix besteht aus demselben Material wie das Gewebe nämlich MTM49-3. Der Massenanteil der Matrix beträgt 35%. Die Laminatdicke beträgt im ausgehärteten Zustand 0,148mm mit einer Dichte von 1,56g/cm³

	E_l	E_q	E_{lc}	E_{qc}	G_{lq}	ν_{lq}	σ_{lTu}	σ_{qTu}	σ_{lCu}	σ_{qCu}	τ_{lqu}	ρ
	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	-	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	g/cm ³
M46J UD - MTM49- 3/35%	235	6,87	201	7,59	4,09	0,27	1709	25,8	875	189	69	1,56

Tabelle 6-7: Materialdaten: M46J UD, MTM49-3/M46J(12K)-150-35% [8]

Auch für das UD-Material wird ein arithmetisches Mittel aus Zug- und Druckelastizitätsmodul verwendet. Die gemittelten Werte die für die Berechnung verwendet werden, sind folgende.

	E_l	E_q	G_{lq}	ν_{lq}	σ_{lTu}	σ_{qTu}	σ_{lCu}	σ_{qCu}	τ_{lqu}	ρ
	GPa	GPa	GPa	-	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	g/cm ³
M46J UD - MTM49- 3/35%	213	7,23	4,09	0,27	1709	25,8	875	189	69	1,56

Tabelle 6-8: verwendete Materialdaten: M46J-UD

Auch hier wird der Interaktionsparameter F_{12} [7] benötigt.

$$F_{12} = \frac{-0,5}{\sqrt{\sigma_{UT/0^\circ} \cdot \sigma_{UT/90^\circ} \cdot \sigma_{UC/0^\circ} \cdot \sigma_{UC/90^\circ}}} = -5,8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{(\text{MPa})^2} \quad (6.2)$$

Kernmaterialien

Aluminiumwaben

Es werden drei verschiedene Dicken bzw. Arten von Aluminiumwaben verwendet.

- Als 10mm dicke Aluminiumwaben kommt der Wabentyp 5052/F40 - .0019 | 3.1 der Firma Hexcel zum Einsatz. Dabei handelt es sich um die sogenannte Flexcore Bauweise, die sich durch eine hohe Flexibilität auszeichnet. Sie bestehen aus Aluminium 5052.

	E_{tc}	G_{lt}	G_{qt}	σ_{tCu}	τ_{ltMin}	τ_{qtMin}	ρ
	ksi	ksi	ksi	psi	psi	psi	lb/ft ³
AH10	125	32	13	420	182	115	3,1
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	g/cm ³
AH10	861,84	220,63	89,63	2,895	1,2548	0,7929	0,0497

Tabelle 6-9: Materialdaten: Aluminium-Flexcore, Hexcel 5052/F40 - .0019 | 3.1 [9]

- Für die 14mm dicken Aluminiumwaben wird ein herkömmlicher sechseckiger Wabenkern (honeycomb) verwendet. Da die 14mm dicken Waben in Bereichen eingesetzt werden, in denen eine erhöhte Steifigkeit gefordert ist, z.B. bei den Fahrwerksanbindungspunkten, wird eine Wabe mit kleinerer Zellgröße verwendet. Es wird ein Kern von Axson mit der Produktbezeichnung: AAA-4.5-1/8-10N-5052 14mm verwendet.

	E_{tC}	G_{lt}	G_{qt}	σ_{tCu}	τ_{ltMin}	τ_{qtMin}	ρ
	ksi	ksi	ksi	psi	psi	psi	lb/ft ³
AH14	150	70	31	405	285	168	4,5
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	g/cm ³
AH14	1034,2	482	213,74	2,792	1,965	1,158	0,0721

Tabelle 6-10: Materialdaten: Aluminiumhoneycomb, Axson AAA-4.5-1/8-10N-5052[10]

- Als dritte Aluminiumwabe kommt wieder ein sechseckiger Wabenkern von der Firma TRIPAN Leichtbauteile mit einer Dicke von 24mm zum Einsatz.

	G_{lt}	G_{qt}	σ_{tCu}	τ_{ltMin}	τ_{qtMin}	ρ
	Ksi	ksi	psi	psi	psi	lb/ft ³
AH24	40	20	365	225	125	3,7
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	g/cm ³
AH24	275,8	137,9	2,52	1,55	0,862	0,0593

Tabelle 6-11: Materialdaten: Aluminiumhoneycomb, AAC-3.7-3/8-25N-3003[11]

Es sind keine Elastizitätsmoduli in l und q-Richtung angegeben. Da die E-Moduli der Kerne im Vergleich zu den Deckschichten sehr klein sind ($E_C \ll E_D$), werden Werte in der Größenordnung $\frac{1}{1000}$ von den Deckschichtmaterialwerten verwendet. Als Deckschichtmaterial wird von T800 ausgegangen. Die Werte in q-Richtung sind bei Aluminiumwaben im Vergleich zur l-Richtung aufgrund des Herstellungsprozesses signifikant kleiner. Es wird dabei mit einem Verhältnis von 2,25:1 gerechnet. Dies ergibt sich aus den Verhältnissen der Schubmoduli.

$$E_l^{AH} = \frac{E_l^{T800}}{1000} = 71,3 \text{ MPa} \quad (6.3)$$

$$E_q^{AH} = \frac{E_l^{AH}}{2,25} = 31,7 \text{ MPa} \quad (6.4)$$

Ein Vergleichsmodell zeigt keine signifikanten Unterschiede bei starker Veränderung der E-Moduli.

Rohacellkerne

Als Schaumkern wird ein Kern der Firma EVONIK Industries, Namens ROHACELL, verwendet. Die genaue Bezeichnung lautet ROHACELL 71 IG-F.

	E	G	ρ
	MPa	MPa	g/cm ³
Rohacell 71 IG-F	92	29	0,075

Tabelle 6-12: Materialdaten: Rohacell 71 IG-F[12]

Bei Rohacell handelt es sich um ein poröses Material, dass eine Querdehnzahl größer als 0,5 aufweist. Bei Verwendung von isotropen Materialien würde dies in Hyperworks zu Problemen führen. Um dies zu umgehen wird mit gleichem Schubmodul, aber kleinerer Querdehnzahl von 0,499 gerechnet. Dies führt zu einem kleineren E-Modul, der jedoch beim Kernmaterial keinen großen Einfluss darstellt.

	G	ν	ρ
	MPa	-	g/cm ³
Rohacell 71 IG-F	29	0,499	0,075

Tabelle 6-13: verwendete Materialdaten: Rohacell 71 IG-F

6.2. Modellvorbereitung

6.2.1. Diskretisierung

Die Diskretisierung des Problems umfasste folgende Punkte:

- Geometrieaufbereitung
- Vernetzung
- Materialausrichtung
- Lagenaufbau

Der Lagenaufbau wird bei den einzelnen Modellbeschreibungen erklärt.

6.2.1.1. Geometrieaufbereitung

Als erster Schritt muss die zu vernetzende Geometrie geladen und aufbereitet werden. Da die Außengeometrie durch die Konstruktion schon bekannt ist, wird der Lagenaufbau von der Außengeometrie aufgebaut. Alle Anbauteile, die zur Erhöhung der Steifigkeit beitragen, sollten auch in der Berechnung mitsimuliert werden. Dies ermöglicht ein möglichst treues Abbild der Realität und senkt die Masse, die Kosten und die Fertigungszeit. Zu diesen Bauteilen gehören die zwischen der Crashbox und dem Monocoque liegende Schutzplatte(anti intrusion plate), vorderer und hinterer Überrollbügel und das bereits in der Konstruktion erwähnte Versteifungskreuz(spider) im Motorraum.

Nach der Auswahl der beteiligten Bauteile werden die CAD Daten in das FEM Programm geladen und es kann mit der Geometrieaufbereitung und -bereinigung begonnen werden. Die Aufbereitung und die spätere Vernetzung werden mit Hypermesh(HM), dem Pre-

Prozessor von Altair, durchgeführt. Die bereits aufbereitete Geometrie kann in **Abbildung 6-1** gesehen werden.

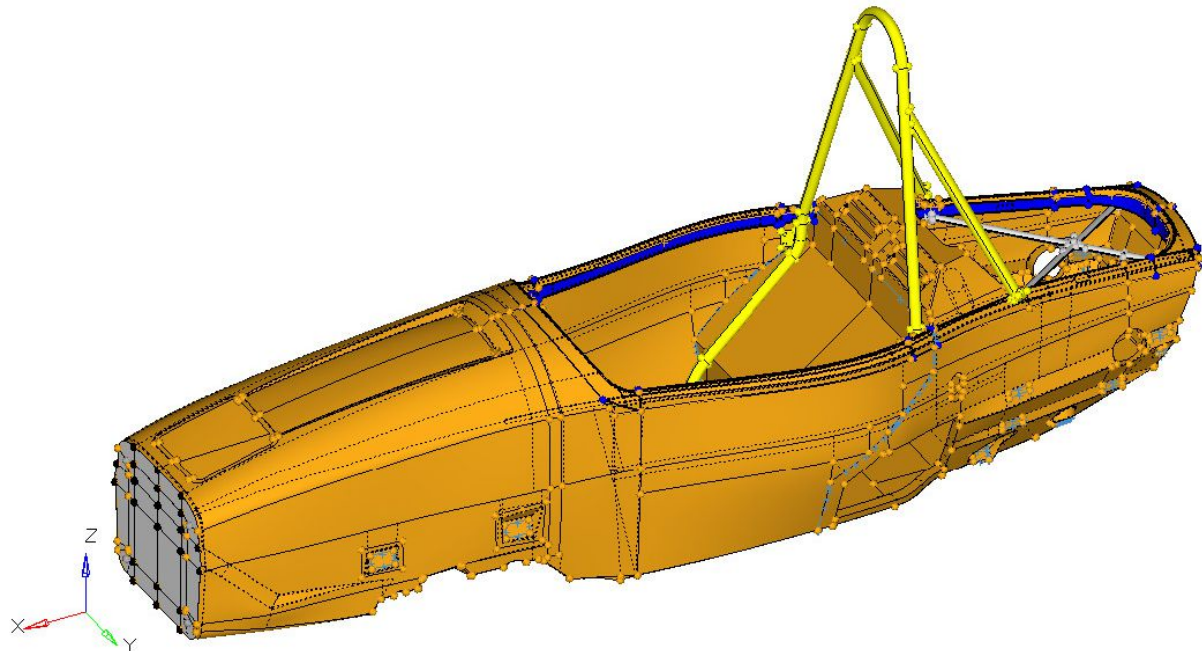


Abbildung 6-1: Aufbereitete Geometrie vor dem Vernetzen

Die Geometrie der umliegenden Bauteile ist ebenso ersichtlich. Die vordere Schutzplatte(anti intrusion plate) ist in Grau dargestellt, der hintere Überrollbügel in Gelb und das hintere Versteifungskreuz in Weiß.

Die Beschneidung der Flächen ist mit schwarzen durchgezogenen Linien dargestellt. An diesen wird das spätere Netz ausgerichtet, da die Elementkanten entlang dieser Linien verlaufen. Die punktierten schwarzen Linien sind unterdrückte Kanten. Diese werden bei der Netzgeneration nicht berücksichtigt. Die Trennung der Flächen ist bereits so vorgenommen worden, dass folgende Kriterien erfüllt werden.

- Flächenteilstücke an denen hochbelastete Rigid Body Elements (RBEs) angreifen, z.B. Fahrwerkanbindungen, werden rechteckig ausgeführt um ein gleichmäßiges Netz generieren zu können und dadurch eine gleichmäßige Verschiebungsübertragung zu gewährleisten.
- Zonen an denen Klebestellen vorgesehen sind, also die Verbindung des vorderen Überrollbügels und des Rohacell-Kernes im Bereich der Fahreröffnung und des Motorraumes, werden bereits beschnitten.

- Flächenteilstücke mit relevanten Radien werden so getrennt, dass eine möglichst leichte Vernetzung vorgenommen werden kann.
- Zusätzlich wird eine vordefinierte Knotenpfadlinie in x-Richtung entlang des Monocoques auf beiden Seiten vorgesehen damit der Torsionswinkel über die Monocoquelänge analysiert werden kann. Dies lässt Rückschlüsse auf etwaige torsionsweiche Querschnitte zu.

Zusätzlich wird ein Skelettmodell des Fahrwerks importiert.

6.2.1.2. Netzgenerierung

Nach dem Geometrieimport und der Bereinigung kann mit der Netzerstellung begonnen werden. Für die ersten Berechnungen und die spätere Optimierung wird mit einer globalen Netzgröße von 7mm gerechnet. Für die spätere Nachberechnung wird mit einer verfeinerten Netzgröße von 5mm gearbeitet. Der Modellaufbau wird mit dem in der Nachberechnung verwendeten Netz erklärt. Das Gesamtmodell kann in **Abbildung 6-2** gesehen werden.

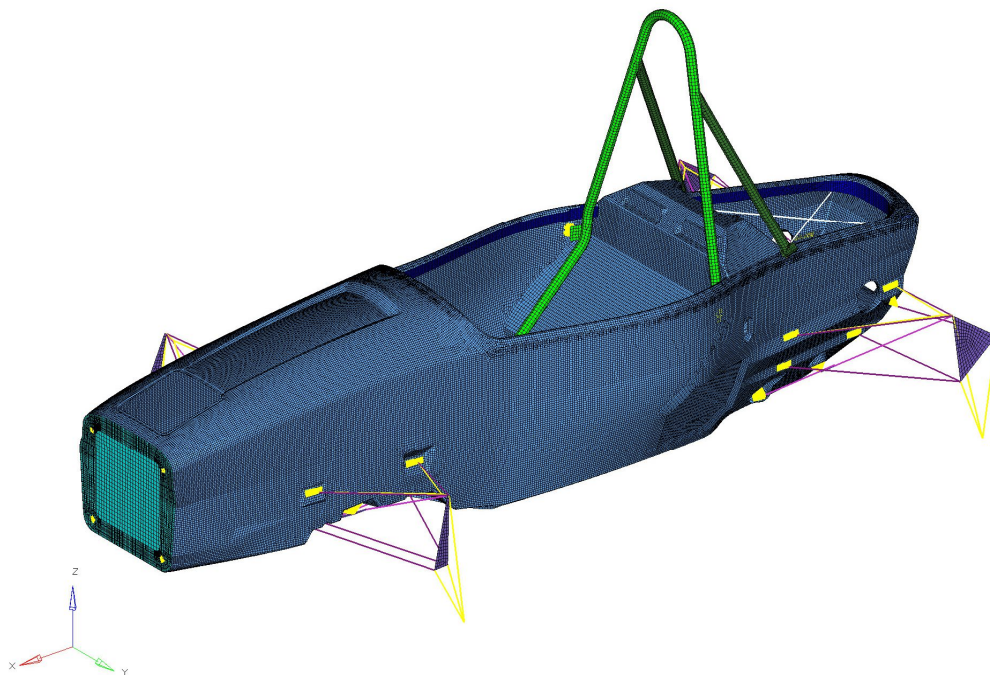


Abbildung 6-2: FE-Gesamtmodell

Das Monocoque ist in einem dunkleren Blau eingefärbt, die vordere Schutzplatte in Cyan, der Überrollbügel in Grün, das Fahrwerk in Violett und Pink und alle RBE2 und RBE3 in Gelb. Der Unterschied zwischen RBE2 und RBE3 ist, dass RBE2(rigids) starre Elemente sind. D.h. ein Referenzpunkt gibt die Verschiebung der anderen Knoten vor, somit können sich alle Punkte

nur gemeinsam verschieben und drehen. Bei Auswahl von mehr als zwei Knotenpunkten entsteht eine lokale Versteifung der Struktur.

Hingegen wird bei einem RBE3 Element die Verschiebung eines Referenzknotens aus den Verschiebungen aller anderen Knoten berechnet. Dabei entsteht keine Versteifung zwischen diesen Knoten. Für Krafteinleitungspunkte sollte man im Normalfall RBE3-Elemente bevorzugen, da sie keine künstliche Versteifung hervorrufen.

Monocoque

Das Monocoque wird mittels Strukturelementen, genauer gesagt mittels Schalenelementen, aufgebaut. Dieser Modellaufbau bietet sich an, da es sich um eine Struktur handelt, die in Dickenrichtung signifikant kleinere Abmessungen aufweist als in Längsrichtung. Die Verwendung von Schalenelementen ist auch unerlässlich, da sonst mit dem Tool keine konventionelle Composite-Optimierung durchgeführt werden kann. Dabei werden Schalenelemente mit 2. Ordnung verwendet. Die Integrationsordnung ist dabei in Schalenrichtung und Dickenrichtung ident. Es wird dabei eine Gauß-Integration durchgeführt. Jeder Knotenpunkt verfügt über 5 Freiheitsgrade bei dem der 6te FHG, nämlich die Verdrehung normal zur Schalenebene, nicht vorhanden ist. Die Schalenelemente basieren auf der Mindlin-Reissner Theorie. Zusätzlich wird bei Composite Elementen die klassische Laminattheorie zur Berechnung verwendet. In der untenstehenden Abbildung (**Abbildung 6-3**) ist das Monocoque-Schalenmodell zu sehen.

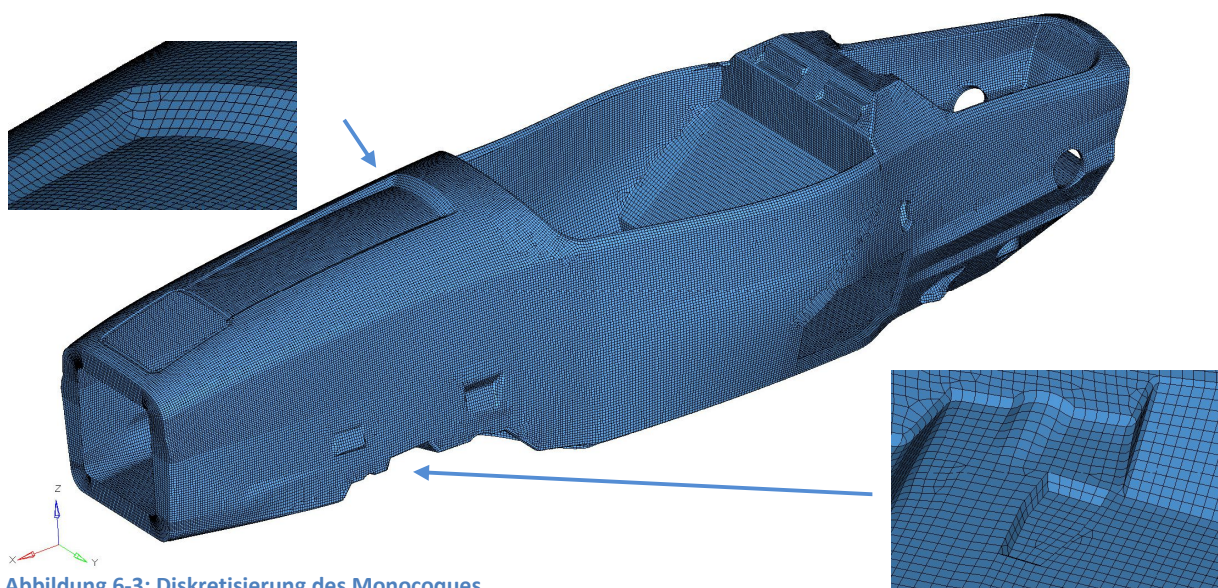


Abbildung 6-3: Diskretisierung des Monocoques

Für Validierungszwecke wird der in dem Falz bei der Fahrer- und Motoröffnung untergebrachte Rohacell-Kern zusätzlich mit 3D-Kontinuumselementen diskretisiert. Dies

wird gemacht, da die Form bei der Öffnung sehr kleine Radien aufweist und eine Schalensimulation nicht die geometrische Realität abbilden kann. Weiters kann die Umwicklung des Schaumkernes mit unidirektionalen Streifen mit einem reinen Schalenmodell nur unzureichend modelliert werden. In der untenstehenden Abbildung (**Abbildung 6-4, Abbildung 6-5**) kann das 3D-Volumennetz erkannt werden. Für das Volumennetz werden Hexaederelemente (hexahedral elements) verwendet. Auch diese werden mit quadratischen Ansatzfunktionen definiert und auch hier wird eine Gauß-Integration durchgeführt. Zusätzlich wird auf dem 3D-Netz ein Oberflächennetz mit Schalenelementen generiert. Dies bietet die Möglichkeit den Laminationsprozess direkt abzubilden, da das unidirektionale Material direkt auf den Rohacell-Kern modelliert werden kann.

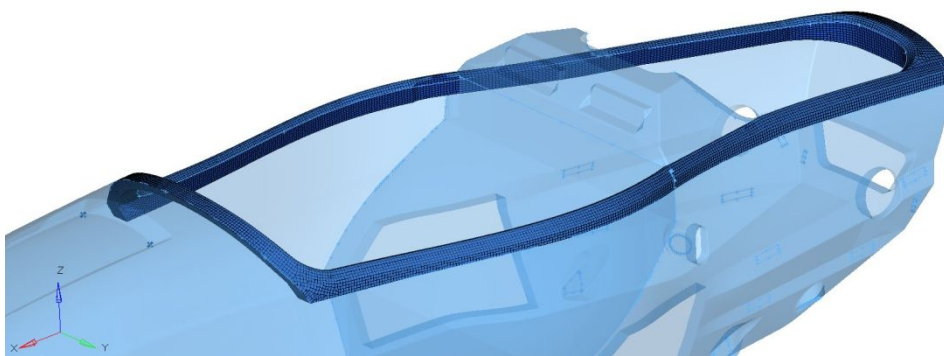


Abbildung 6-4: Diskretisierung des Rohacellkerns, Gesamtansicht



Abbildung 6-5: Diskretisierung des RHCKerns, Detailansicht

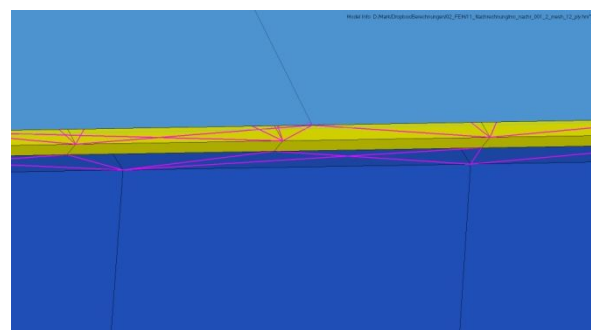


Abbildung 6-6: Modellierung der Klebeverbindung

Die Verbindung des RHC-Kerns mit dem Monocoque erfolgt mittels eines vordefinierten Verbindungstyps für Klebestellen (HM: Connectors/adhesive film). Die Modellierung der Verbindung ist in **Abbildung 6-6** dargestellt. Dabei wird zwischen den zu verbindenden Schalennetzen (Monocoque: hellblau; RHC-Kern: dunkelblau) eine 3D-modellierte Klebeschicht (gelb) hinzugefügt, welche an der jeweiligen Seite mit RBE3-Elementen(violett)

an das jeweilige Schalennetz angebunden ist. Die 3D-Kontinuumsэлеmente sind 0,2mm dick, dies entspricht der verwendeten Klebefilmdicke. Die Position des Klebefilms entspricht im Modell nicht der realen Gegebenheit, da sich der Klebefilm zwischen RHC-Kern und UD-Streifen befindet. Im Rahmen der Modellbildung wird dieser Fehler jedoch in Kauf genommen.

Fahrwerk

Das Fahrwerk wird aus RBE, Stabelemente und Schalenelementen aufgebaut. Die einzelnen Elemente sind in den folgenden zwei Bildern dargestellt.

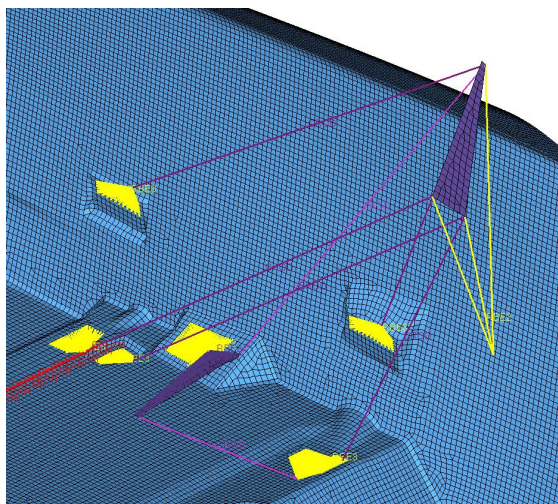


Abbildung 6-7: Modellierung des vorderen Fahrwerks

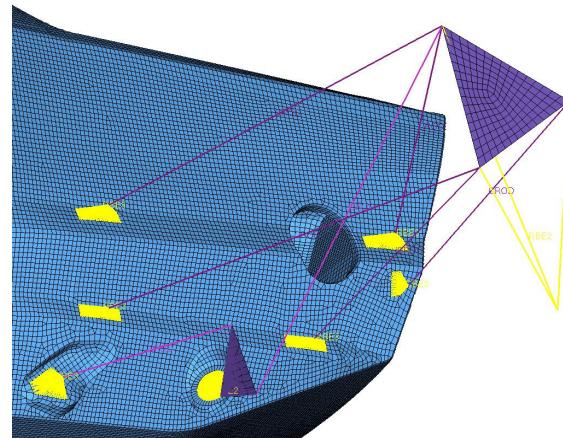


Abbildung 6-8: Modellierung des hinteren Fahrwerks

Der Radträger und der Umlenkhebel, an dem der Pullrod und der Dämpfer befestigt sind, werden mittels Schalenelemente(violett) aufgebaut. Die Querlenker(violette Stabelemente), die Spurstange (violette Stabelemente), der Pullrod (rosa) und auch der Dämpfer(rosa) werden mittels Zug-/Druckstabelementen(rods) diskretisiert. Die Lenkstange, die in **Abbildung 6-7** in Rot dargestellt ist, wird als Balkenelement modelliert.

Das Fahrwerk wird einerseits quasi starr simuliert, andererseits mit realistischen Rohrquerschnitten, also real-elastisch. Die verwendeten Abmessungen können der **Tabelle 6-14** entnommen werden.

	real-elastisches Fahrwerk	Quasi starr Fahrwerk
Querlenker und Spurstange	Stahlrohr D _A : 14mm, D _I : 12mm	Stahlstange D: 20mm
Pullrod und Dämpfer	Stahlrohr D _A : 14mm, D _I : 12,5mm	Stahlstange D: 20mm

Tabelle 6-14: Elementeigenschaften des Fahrwerks

Die Anbindung des Fahrwerks an das Monocoque erfolgt mittels RBEs (**Abbildung 6-7**, **Abbildung 6-8**: gelb). Dabei wird auch der Unterschied zwischen den Ergebnissen von RBE2 und RBE3 Elementen aufgezeigt.

Überrollbügel

Die Überrollbügel werden ebenfalls als Schalenelement modelliert. Bei beiden Überrollbügeln wird die Außengeometrie als Vernetzungsgrundlage herangezogen. Die zwei Überrollbügel können in **Abbildung 6-9** in grün gesehen werden.

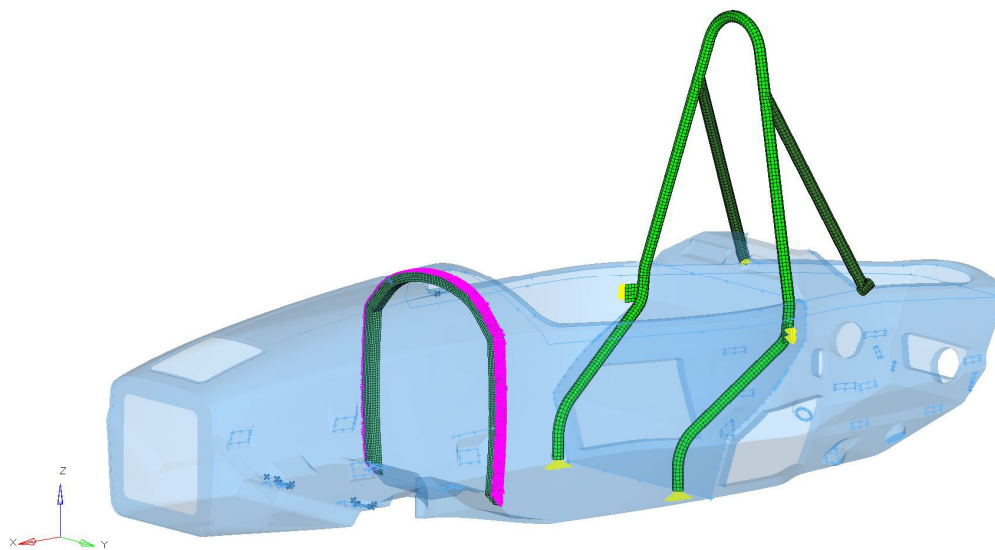


Abbildung 6-9: Diskretisierung der Überrollbügel

Der vordere Überrollbügel hat einen quadratisch Querschnitt mit den Außenabmessungen 25x25mm und ist 2mm dick. Er wird während des Laminationsprozesses miteinlaminert, dabei wird ein Klebefilm um den Bauteil gewickelt und anschließend gemeinsam mit dem Kernmaterial miteingebunden. Die Verbindung im FE-Model erfolgt wieder über den vordefinierten Verbindungstyp für Klebestellen.

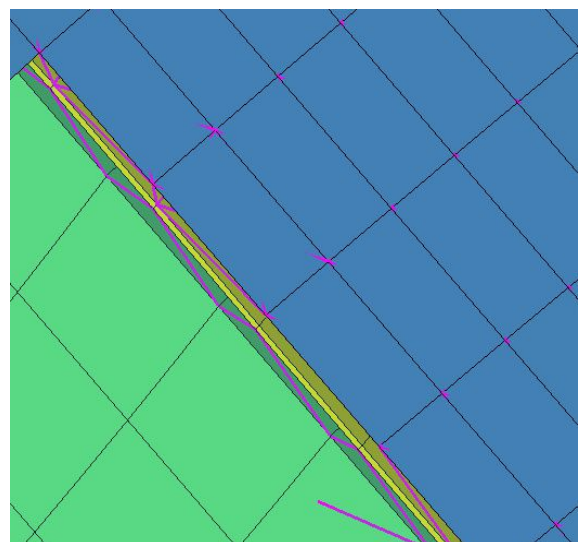


Abbildung 6-10: Modellierung der Klebeverbindung

Die Modellierung der Verbindung ist in **Abbildung 6-10** dargestellt. Das Monocoque ist in Blau, der Überrollbügel ist in Grün und die 3D-Elemente der Klebestelle sind in Gelb eingefärbt. Der Klebefilm ist auch hier 0,2mm dick.

Der hintere Überrollbügel besteht aus dem eigentlichen Überrollbügel(main hoop, **Abbildung 6-9**: hellgrün) und der Überrollbügelabstützung (main hoop bracing supports; **Abbildung 6-9**: dunkelgrün). Der eigentliche Überrollbügel besitzt eine Wandstärke von 2,5mm und ist viermal mittels zwei M8-Schrauben, die als RBE3-Elementen modelliert sind, angebunden. Die Überrollbügelabstützung mit einer Wandstärke von 1,75mm ist links und rechts jeweils mit einer M10 Schraube am Monocoque befestigt. Auch diese Anbindungsstelle wird mittels RBE3-Elementen diskretisiert.

Andere Anbauteile

Die Schutzplatte an der Monocoquevorderseite (Anti-Intrusion-Plate) wird mit Schalenelementen modelliert. Den Schalenelementen wird eine Dicke von 4mm und Aluminium als Material zugewiesen. Die Anbindung erfolgt durch vier Schrauben, die durch RBE3-Elemente diskretisiert sind. Die Vernetzung ist in **Abbildung 6-11** zu erkennen.

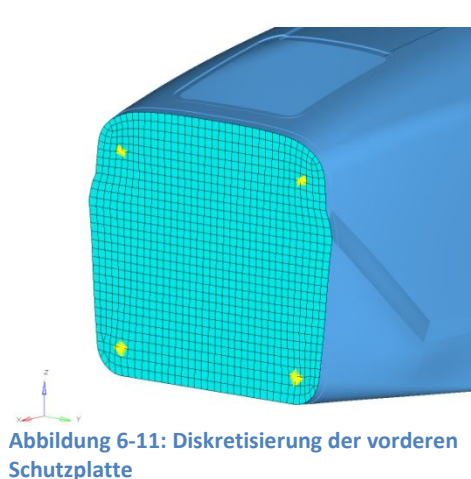


Abbildung 6-11: Diskretisierung der vorderen Schutzplatte

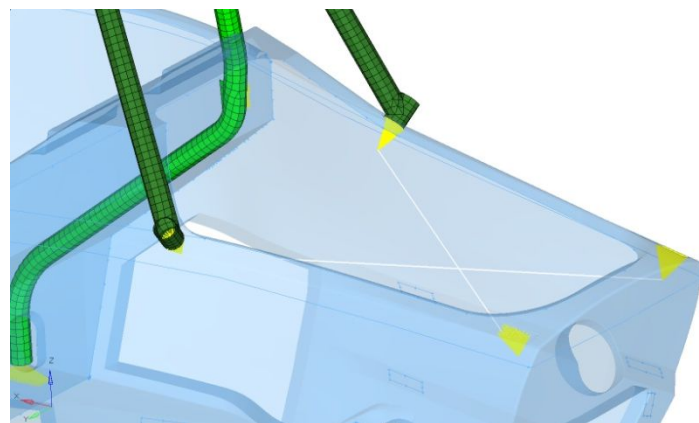


Abbildung 6-12: Diskretisierung des Versteifungskreuzes

Abbildung 6-12 stellt das Versteifungskreuz(spider, weiß) für den Motorraum ausgeführt als Balkenelement dar. Dieses besteht aus einem Stahlrohr mit einem Außendurchmesser von 15mm und einem Innendurchmesser von 13mm. Die vorderen Anbindungspunkte sind gleichzeitig die Anbindungspunkte für die Überrollbügelabstützung. Die hinteren Anbindungspunkte sind zugleich Anbindungspunkte für die Heckflügelbefestigung.

6.2.1.3. Elementnormale und Materialorientierung

Für die vollständige Definition von Schalenelementen müssen weitere Elementparameter definiert werden. Für alle Schalenelemente muss eine Elementnormale festgelegt werden und zusätzlich muss für Composite Schalenelemente eine Materialorientierung definiert werden.

Elementnormale

Für das Monocoque und beide Überrollbügel werden die Elementnormalen nach innen gerichtet. Die Elementnormalen der Firewall zeigen in konsistenter Weise zum übrigen Monocoquenetz nach hinten. Für die Anti Intrusion Plate und dem Oberflächennetz des 3D modellierten RHC-Kernes wird die Normalenrichtung nach außen definiert. Dies ist farblich in den untenstehenden Abbildungen (**Abbildung 6-13**) zu erkennen.

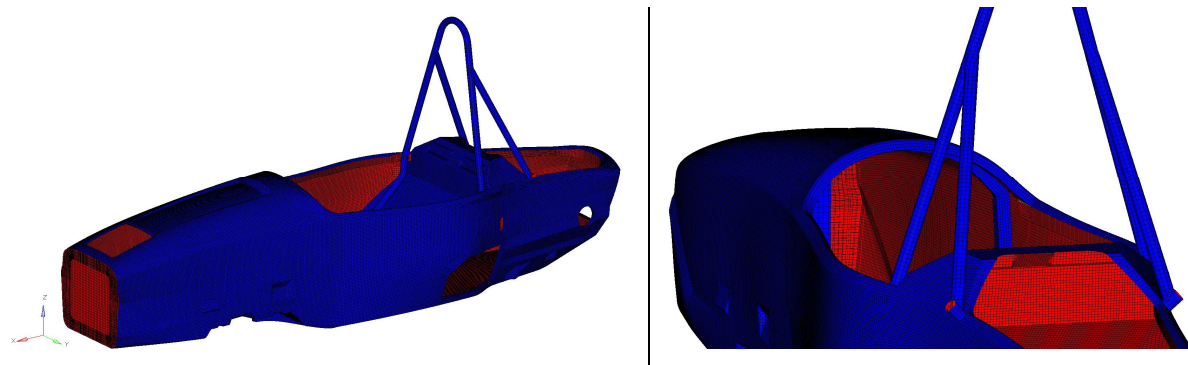


Abbildung 6-13: Elementnormale

Rot bedeutet, dass der Normalvektor aus Sicht des Betrachters aus der Fläche herauszeigt und blau bedeutet, dass der Vektor in die Fläche hineinzeigt.

Materialorientierung

Desweiteren muss eine Materialorientierung definiert werden. Diese wird für die vollständige Festlegung des Winkels jeder Lamineinzelschicht benötigt. Die Materialorientierung wird also nur bei einem transversal isotropen, orthotropen oder allgemein anisotropen Material benötigt. Diese Definition ist also nur für die Monocoquestruktur und das Oberflächennetz des Rohacellkernes nötig.

Die Materialorientierung erfolgt für die Schalenelemente des Monocoques als Projektion in globaler x-Richtung. Flächen, die in der yz-Ebene liegen, also die Anti Intrusion Plate, die Firewall und die hintere Fläche des Motorraums, werden als Projektion in die globale y-Richtung ausgerichtet.

Die Materialorientierung wird in diesem Fall für die Orientierung der Gewebeschicht und der Kernausrichtung benötigt. Die späteren unidirektionalen Streifen werden mit Hilfe von zusätzlichen Koordinatensystemen ausgerichtet. Die Ausrichtung des Monocoques ist in **Abbildung 6-14** dargestellt.

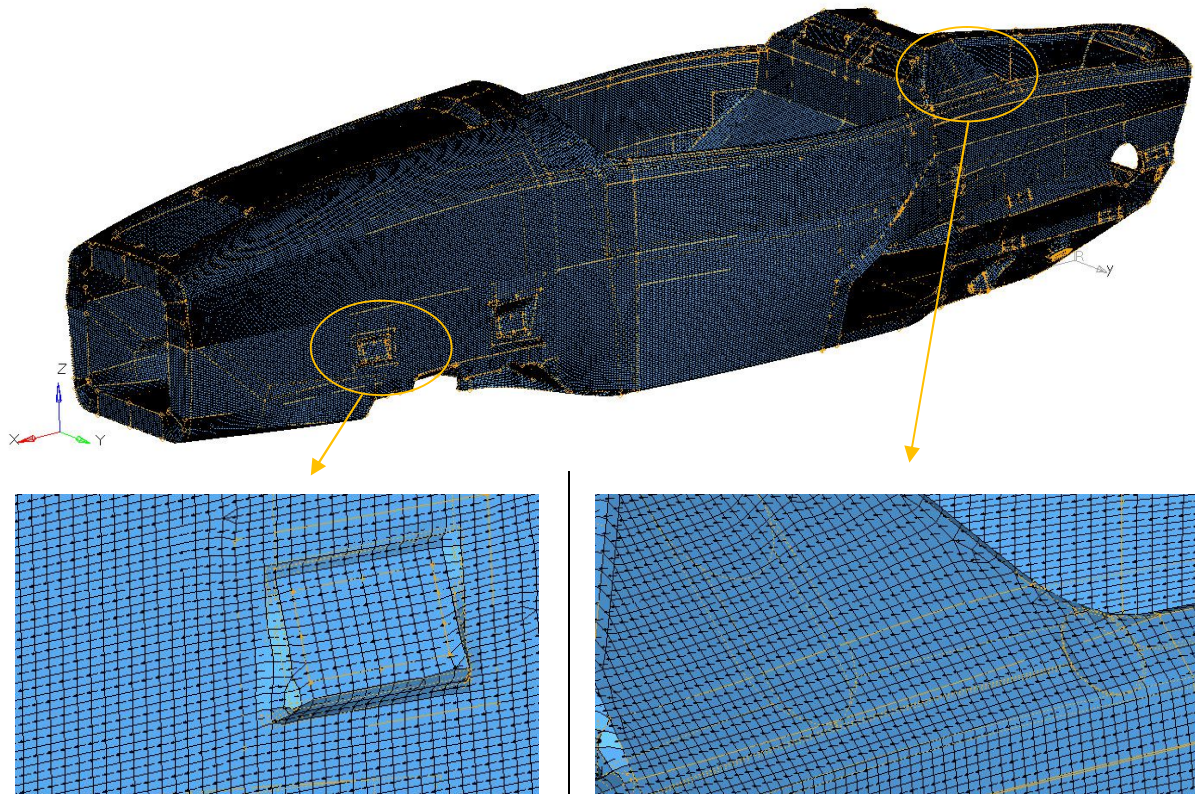


Abbildung 6-14: Materialorientierung des Monocoques

Zudem muss das Oberflächennetz des 3D modellierten Kernes ausgerichtet werden. Dies erfolgt entlang einer fiktiven, neutralen Faser, zu sehen in **Abbildung 6-15**.

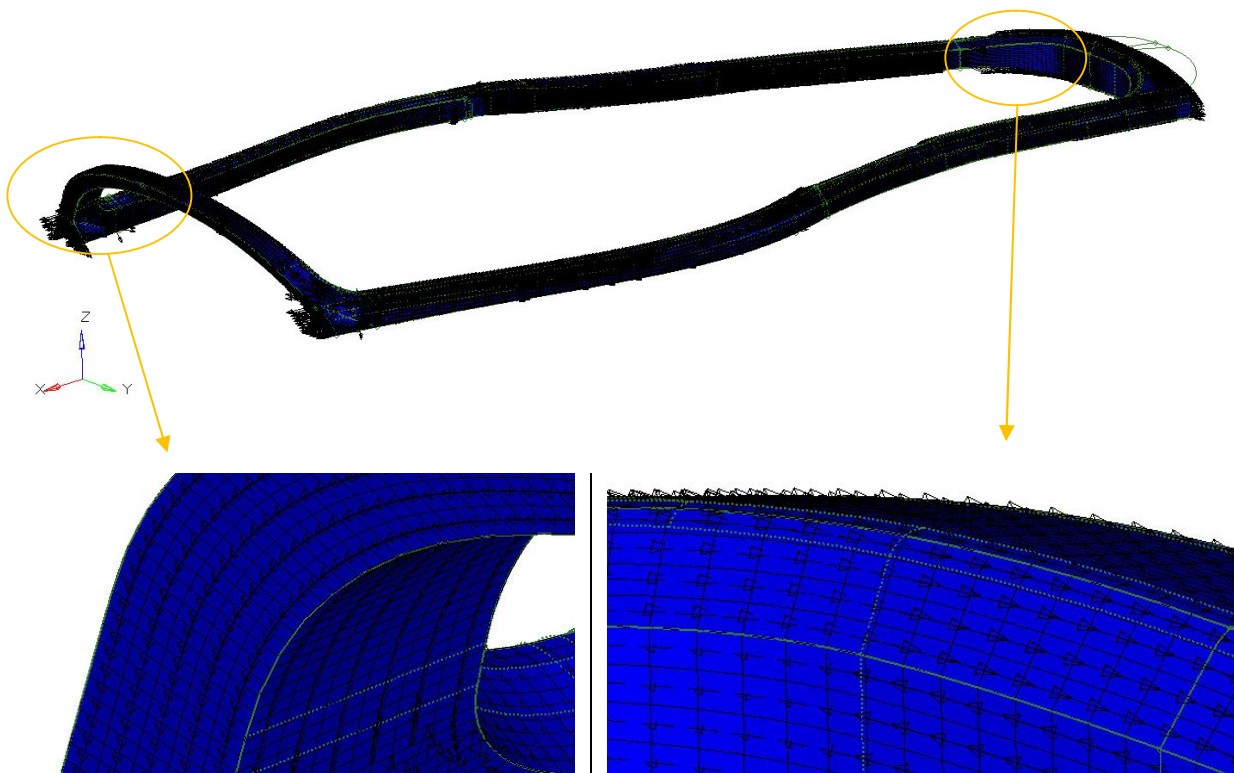


Abbildung 6-15: Materialorientierung des Oberflächennetzes des RHC-Kernes

6.2.2. Randbedingungen und Lastfälle

Die verwendeten Lastfälle mit ihren dazugehörigen Randbedingungen werden in diesem Abschnitt erläutert. Abhängig vom Modell werden alle bzw. nur bestimmte Lastfälle verwendet. Grundsätzlich kann zwischen steifigkeitsüberprüfenden und festigkeitsüberprüfenden Lastfällen unterschieden werden.

6.2.2.1. Lastfälle für die Steifigkeitsüberprüfung

Belastung

Die steifigkeitsüberprüfenden Lastfälle dienen, wie der Name bereits verrät, ausschließlich zur Überprüfung der Steifigkeit, genauer gesagt, dienen sie in unserem Fall zur Berechnung und Überprüfung der angestrebten Torsionssteifigkeit. Diese wurde im Zuge der Kinematikauslegung des Fahrwerkes bestimmt. Sie ist zugleich die Optimierungsrandbedingung. Das angestrebte Ziel sind dabei 1350-1400Nm/° am Druckpunkt des Reifenlatsches. Dabei wird das Monocoque an diesen Punkten mit einem definierten Torsionsmoment beaufschlagt und durch die Verschiebung kann auf den Torsionswinkel und daher auch auf die Torsionssteifigkeit rückgeschlossen werden. Dieser Belastungsfall stellt eine reine rechnerische Größe dar, die während dem Betrieb nicht auftritt. Die Größe des Torsionsmomentes ist aufgrund der linearen Analyse variabel. Da also ein beliebig kleines Torsionsmoment verwendet werden kann, ist für diesen fiktiven Belastungsfall keine Festigkeitsüberprüfung notwendig. In diesem Fall wird mit einem Torsionsmoment M_T von 1000Nm gerechnet. Dies ergibt in Verbindung mit der vorderen(l_V) und hinteren(l_H) Spurweite folgende Kräfte.

$$F_V = \frac{M_T}{l_V} = \frac{1000\text{Nm}}{1,19\text{m}} = 840,336\text{N} \quad (6.5)$$

$$F_H = \frac{M_T}{l_H} = \frac{1000\text{Nm}}{1,16\text{m}} = 862,070\text{N} \quad (6.6)$$

Diese müssen an der Vorder- und an der Hinterachse gegengleich wirken. Die detaillierten Kraftkomponenten können aus **Tabelle 6-15** entnommen werden.

Torsionssteifigkeit torsional stiffness (Kraftangriffspunkt am Reifenlatsch)						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=\text{N}$	$[F_y]=\text{N}$	$[F_z]=\text{N}$	$[F_x]=\text{N}$	$[F_y]=\text{N}$	$[F_z]=\text{N}$
VORNE FRONT	0	0	840,336	0	0	-840,336
HINTEN REAR	0	0	-852,070	0	0	852,070

Tabelle 6-15: Lastfall für die Steifigkeitsüberprüfung (Reifenlatsch)

Zusätzlich muss zur experimentellen Validierung der Berechnung ein weiterer Lastfall berücksichtigt werden. Die Kraftaufbringung beim physikalischen Testaufbau erfolgt an den vier Lagerpunkten des Umlenkhebels(Rockers) für das Fahrwerk. Dies ergibt folgende Kräfte.

$$F_V = \frac{M_T}{l_V} = \frac{1000\text{Nm}}{0,388\text{m}} = 2577,32\text{N} \quad (6.7)$$

$$F_H = \frac{M_T}{l_H} = \frac{1000\text{Nm}}{0,332\text{m}} = 3012,05\text{N} \quad (6.8)$$

Torsionssteifigkeit torsional stiffness (Kraftangriffspunkt an den Rockers)						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=\text{N}$	$[F_y]=\text{N}$	$[F_z]=\text{N}$	$[F_x]=\text{N}$	$[F_y]=\text{N}$	$[F_z]=\text{N}$
VORNE FRONT	0	0	2577,32	0	0	-2577,32
HINTEN REAR	0	0	-3012,05	0	0	3012,05

Tabelle 6-16: Lastfall für die Steifigkeitsüberprüfung (Rocker)

Randbedingungen

Für eine vollständige Definition des Modells müssen Randbedingungen bestimmt werden. Dabei lassen sich zwei Betrachtungsweisen aufzeigen. Entweder wird das Modell mit Hilfe von Randbedingungen auf der hinteren oder vorderen Achse eingespannt, so fällt die Kraftaufbringung auf jener Achse weg und die entsprechenden Reaktionskräfte treten in den Lagerstellen auf. Zusätzlich muss die Drehung um die gesperrte Vorder- oder Hinterachse unterbunden werden, sodass ein zusätzlicher Punkt auf der Fahrzeuglängsebene in z-Richtung gesperrt werden muss.

Als zweite Möglichkeit bietet sich die Möglichkeit an, mit einer Massenträgheitsentlastung (inertia relief) zu arbeiten. Inertia Relief bietet sich speziell bei Problemen an, bei denen der Körper nicht im Kräftegleichgewicht ist, also Körper, die in beschleunigter Bewegung sind z.B. ein Fahrzeug in Kurvenfahrt. Dabei wird das Bauteil durch automatisch berechnete Körperlasten am gesamten Bauteil in statisches Gleichgewicht gebracht.

Im Fall der Torsionsbelastung, ist der Körper im Kräftegleichgewicht und beide Möglichkeiten sollten idente Lösungen ergeben. Unterschiede können durch unsymmetrische Vernetzung und numerische Fehler entstehen. Im Zuge eines Vergleichsmodells sollen beide Varianten

getestet werden. In **Abbildung 6-16** ist das Modell mit den Lasten und den Randbedingungen zu erkennen.

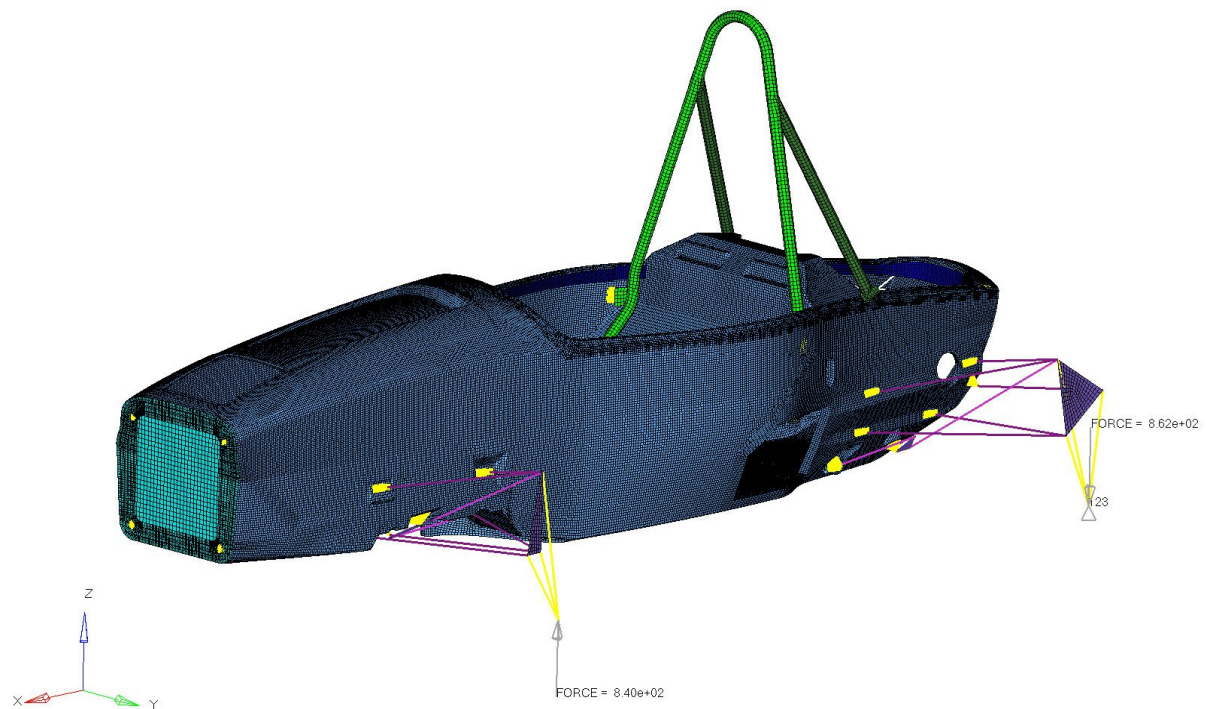


Abbildung 6-16: Modell mit Kraftaufbringung unter Inertial Relief

6.2.2.2. Lastfälle für die Festigkeitsüberprüfung

Zur Überprüfung der Festigkeit während dem Betrieb wurden 7 Fahrzustände getestet. Es handelt sich dabei um folgende Fahrsituationen.

1. Vollbremsung
2. Kurveneingang, links
3. Kurvenmitte, links
4. Kurvenausgang, links
5. maximales Beschleunigen
6. Schlagloch während einer Linkskurve
7. Bremsung nach einer 180° Drehung („verkehrtes Bremsen“)

Dabei handelt es sich um Fahrzustände, die i.a. kein Kräftegleichgewicht aufweisen. Hier muss also mit Massenträgheitsentlastung (Inertia Relief) gerechnet werden. Die

Kraftkomponenten wurden vom Fahrwerksingenieur berechnet. Diese können aus **Tabelle 6-17** entnommen werden.

1. Vollbremsung hard braking						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$
VORNE FRONT	-1401,7	107,4	1073,6	-1401,7	107,4	1073,6
HINTEN REAR	-600	-44,4	443,6	-600	-44,4	443,6

2. Kurveneingang, links left turn entry						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$
VORNE FRONT	-621,5	583,4	391,6	-621,5	2041,1	1460,3
HINTEN REAR	-440,4	411,9	275,2	-440,4	780,2	554,6

3. Kurvenmitte, links left turn center						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$
VORNE FRONT	-33,9	339,2	199,5	-202,2	2022	1225,4
HINTEN REAR	37,2	409,8	241	198,9	2128,4	1289,9

4. Kurvenausgang, links left turn exit						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$
VORNE FRONT	-38,9	389,8	243,6	-211,9	1412,1	974,1
HINTEN REAR	328,2	437,7	273,5	1212,9	1954,3	1347,8

5. maximales Beschleunigen max acceleration						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$
VORNE FRONT	-5,5	49,7	510,7	-5,5	-49,7	510,7
HINTEN REAR	1085,7	-84,2	832,5	1085,7	84,2	832,5

6. Schlagloch während einer Linkskurve bump in the left turn						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$
VORNE FRONT	-132,7	334,9	813,6	-132,7	587,3	1791,5
HINTEN REAR	575,2	392,4	753,2	575,2	721,5	1579,6

7. Bremsung nach einer 180° Drehung („verkehrtes Bremsen“) reverse braking						
	LINKS LEFT			RECHTS RIGHT		
	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$	$[F_x]=N$	$[F_y]=N$	$[F_z]=N$
VORNE FRONT	250,5	196,74	178,9	620	488,8	442,7
HINTEN REAR	602,5	472,5	430	1278	1172,8	1066,5

Tabelle 6-17: Lastfälle für die Festigkeitsüberprüfung

6.3. Optimierung mit isotropen Material

Im ersten Schritt der Optimierung sollen die Zonen der UD-Verstärkungslagen bestimmt werden. Dabei wird eine Optimierung des Monocoques als Schalenmodell mit isotropen Materialparametern unter Torsionsbelastung durchgeführt. Als Ergebnis wird eine gitterrohrrahmenartige Struktur erwartet. Diese Struktur soll die Lage und die Richtung der UD-Verstärkungslagen abschätzen lassen.

6.3.1. Modellaufbau

Das Schalenmodell wird mit einer Dicke von 10mm definiert. Als Monocoquematerial wird Aluminium verwendet.

Optimierungsparameter

Es wird eine Topologie-Optimierung für Schalen durchgeführt. Der Optimierer versucht dabei die Wandstärke entweder auf 0mm oder der maximalen möglichen Wandstärke $T_{\max}$ zu optimieren. Die Wandstärke kann aber auch Werte dazwischen annehmen. Je nach eingestelltem Parameter(HM: „Discrete“) drängt der Optimierer stärker oder schwächer auf die Extremwerte 0 oder $T_{\max}$. Somit ist sichergestellt, dass eine durchgehende, gitterrohrrahmenartige Struktur berechnet wird. Würde eine Size-Optimierung durchgeführt werden, würde der Optimierer versuchen die optimale Wandstärke zwischen 0 und $T_{\max}$ zu finden. Dies würde bedeuten, dass unterschiedlich dicke Bereiche und keine eindeutige Rohrrahmenstruktur entstehen würde. Die Zielfunktion(HM: optimization response) der Optimierung ist von der Form „Masse mal Nachgiebigkeit“. Das Ziel(HW: objective) ist die Minimierung der Zielfunktion, also die Minimierung des Produktes der Masse und der Nachgiebigkeit. Als Lastfälle werde zwei symmetrische Torsionsbelastungen um die Fahrzeuglängsebene am Reifenlatsch vorgegeben. Dies führt zu einer schnelleren Konvergenz bei gleichzeitig symmetrischer Geometrie zur Fahrzeuglängsebene (xz-Ebene). Als Optimierungsnebenbedingungen (HM: optimization constraint) werden eine betragsmäßige maximale Gesamtverschiebung von 8mm am Reifenlatsch und eine Massereduktion auf 32% der Ausgangsmasse vorgegeben. Eine z-Verschiebung von 8mm auf beiden Seiten in verschiedenen Richtungen entspricht ca. einer Torsionssteifigkeit von 1400Nm/°. Die Massereduktion wird auf 32% beschränkt um eine aussagekräftige Rohrstruktur zu erreichen.

Als Optimierungsvolumen wird die Dicke der Schalenelemente des Monocoques definiert.

6.3.2. Ergebnisse

Das Ergebnis dieser Optimierung, nämlich die Wandstärkenverteilung, kann in **Abbildung 6-17** betrachtet werden. Das Ergebnis ist sehr zufriedenstellend. Man erkennt deutlich die erwartete gitterrohrrahmenartige Materialverteilung. Zonen mit erhöhter Wandstärke, also erhöhter Beanspruchung, sind in rot eingefärbt. Problematisch sind die zum Teil sehr feine Materialanhäufungen. Hier muss eine geeignete Auswahl der benötigten Verstärkungen getroffen werden.

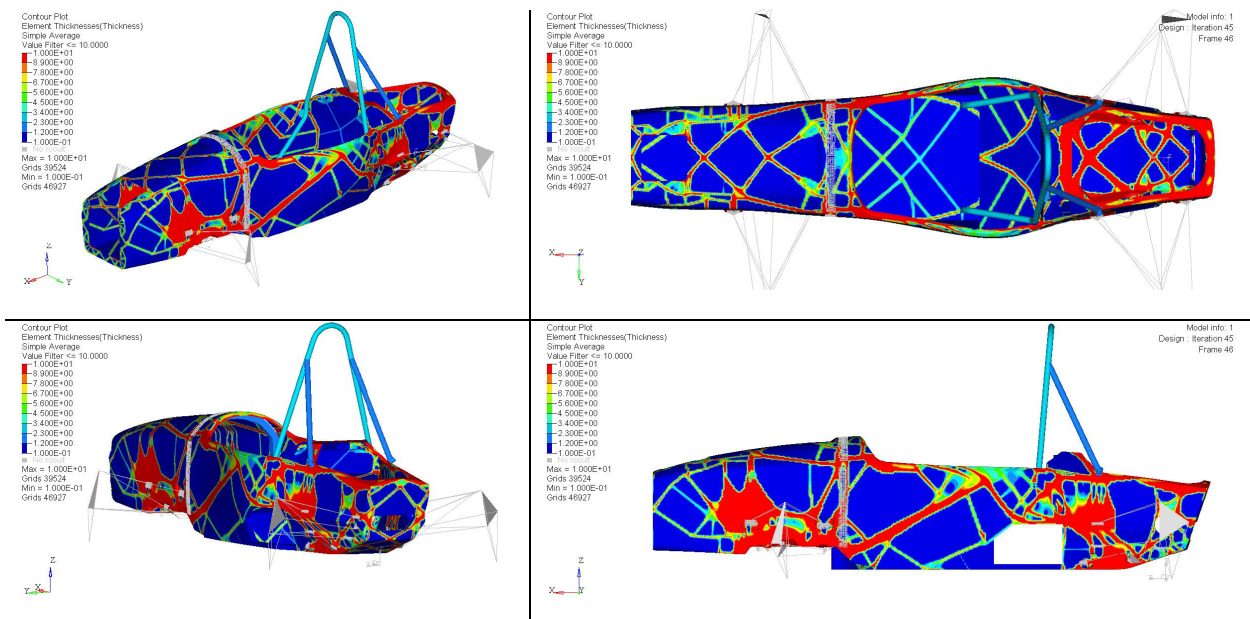


Abbildung 6-17: Wandstärkenverteilung nach der Optimierung des isotropen Schalenmodells

Zusätzlich ist das Histogramm der Optimierung in **Abbildung 6-18** zu sehen. Man erkennt das gewünschte, monoton fallende Konvergenzverhalten. Weiters ist am Anfang eine sehr rasche Konvergenz zu beobachten, die aber nach bereits 3 Iterationen sehr stark abflacht.

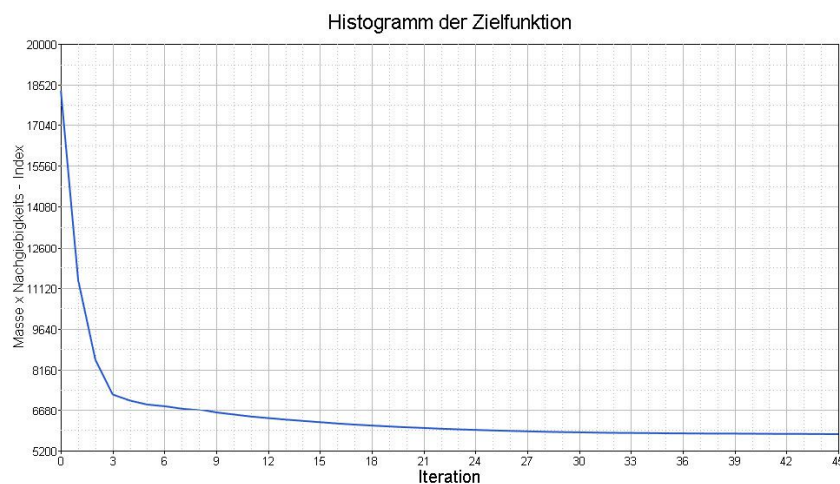


Abbildung 6-18: Histogramm: Optimierung des isotropen Schalenmodells

6.3.3. Nachbereitung der Daten

Basierend auf den Ergebnissen kann ein CAD-Modell mit den geplanten Verstärkungslagen modelliert werden. Diese Verstärkungszonen können in einer weiteren Berechnung dickenoptimiert werden. Die verschiedenen Verstärkungszonen sind in **Abbildung 6-19** in Rot abgebildet.

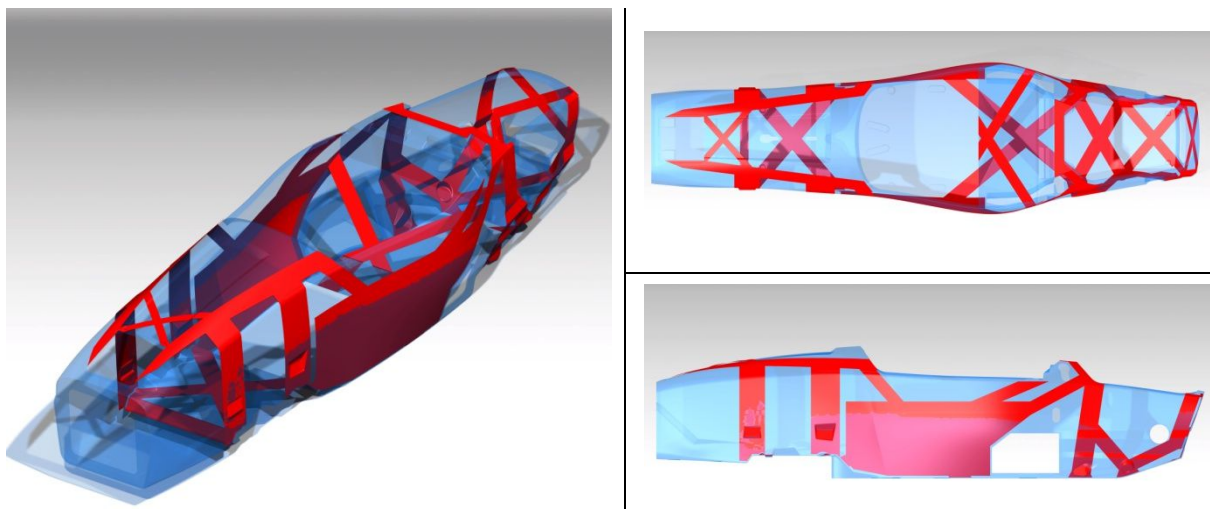


Abbildung 6-19: CAD-Modell der UD-Verstärkungszonen

Zusätzlich sind lokale Verstärkungslagen in Form von Rechtecken um alle Lasteinleitungspunkte vorgesehen. Diese sind einerseits zur Lastverteilung und andererseits zur Insertintegration gedacht. Die Lagen werden als Gewebelagen ausgeführt. Außerdem wird der gefräste RHC-Kern im Bereich der Öffnungen mit UD-Streifen verstärkt. Alle übrigen Flanschflächen werden ebenso verstärkt. Diese erwähnten Verstärkungen sollen ebenso dickenoptimiert werden.

Des Weiteren kommen am vorderen Ende des Monocoques(Anti Intrusion plate) und im Schulterbereich der Firewall aufgrund des vom Reglement geforderten Sicherheitsdokumentes(SES) Gewebeverstärkungslagen hinzu. Die Dicke dieser Lagen ist abhängig von den physikalischen Versuchen. Die Lagendicke ist zu dem Zeitpunkt der Optimierung noch nicht bekannt.

Die große UD-Verstärkungslage in der Mitte an den beiden Seitenflächen, ist bereits eine vom Reglement geforderte Verstärkungszone, die von Anfang an in die Simulation miteinfließt.

6.4. Vorauslegung der Grundparameter

Bevor mit der eigentlichen Optimierung der Verstärkungslagen begonnen wird, wird eine Vorauslegung der Grundparameter durchgeführt. Es gibt eine Reihe von verschiedenen Parameter die im Zuge der Dickenoptimierung nicht, nur schwer oder ineffizient festgestellt werden können. Daher werden diese Parameter einzeln analysiert. Dazu wird ein Composite-Grundmodell aufgebaut und die gewünschten Parameter einzeln geändert und verglichen. Es wird bereits vorweggenommen, dass das Ausgangsmodell das weiterberechnete Modell darstellt, um die realen Versteifungseffekte aufzeigen zu können.

Zu den analysierten Parametern gehören folgende.

Block 1: Einfluss des Modellaufbaus

1. Massenträgheitsentlastung: Inertial Relief gegen feste Einspannung(SPC)
2. RBE2 gegen RBE3 Elemente für die Fahrwerksanbindung
3. real-elastisches gegen quasi starres Fahrwerk

Block 2: Einfluss der globalen Ausrichtungen:

4. Änderung der globalen Gewebelagen(Anzahl und Ausrichtung)
5. Änderung der Wabenausrichtung

Block 3: Einfluss der umliegenden Bauteile:

6. vorderer und hinterer Überrollbügel
7. Versteifungskreuz
8. Anti Intrusion Plate

Block 4: Einfluss der Gewebematerialdaten:

9. M46J statt T800-Fasern
10. T300 statt T800-Fasern

6.4.1. Modellaufbau

In diesem Abschnitt wird erstmals ein Composite-Modell benötigt. Dazu wird das Modell mit isotropen Materialparametern abgeändert. Beim Vergleichsmodell erfolgt die Torsionsbelastung an allen vier Radaufstandspunkten und es wird mit Massenträgheitsentlastung (Inertial Relief) gerechnet. Die Fahrwerksanbindung wird mit den nicht versteifenden RBE3 Elementen modelliert und es werden alle versteifenden, umliegenden Bauteile mitsimuliert.

Laminataufbau

Der Laminataufbau erfolgt von außen nach innen. Die Ausgangsbasis ist dabei ein Laminataufbau mit zwei globalen Schichten pro Deckschicht. Diese sind dabei $\pm 45^\circ$ orientiert. Um lokale Steifigkeitseffekte zu berücksichtigen, sind bereits Verstärkungslagen im Bereich des RHC-Kernes und der Fahrwerkspunkte mitmodelliert. Der genaue Laminataufbau steht dabei nicht im Vordergrund, sondern die relative Veränderung auf Parametervariation. Beim Ausgangsmodell sind die Aluminiumwaben mit der Stärke 10mm und 14mm 90° zur x-Richtung ausgerichtet während die 24mm dicken Waben in x-Richtung (0°) ausgerichtet sind.

6.4.2. Ergebnisse

In **Tabelle 6-18** sind die Ergebnisse der Vorauslegung zu sehen. Es sind sowohl die Steifigkeitswerte als auch die dazugehörigen Massen aufgelistet. In der letzten Spalte ist das Verhältnis von relativer Steifigkeitssteigerung zu relativer Massensteigerung angegeben. Je höher dieser Wert ist, desto besser ist diese Maßnahme im Sinne des Leichtbaus. Ein Wert größer eins lässt darauf schließen, dass diese Maßnahme prozentual mehr Steifigkeit bringt als es Massenzuwachs gibt.

Im ersten Block (Punkte 1-3) sind reine Unterschiede in der Modellierungsstrategie aufgezeigt. Diese tragen nicht zur Veränderung der realen Steifigkeit bei. Sie geben aber Auskunft über die Sensibilität von verschiedenen Modellannahmen.

Bei Punkt 1 wird lediglich die Kraftaufbringung und die Randbedingung verändert. Im Vergleich zum Ausgangsmodell werden die hinteren Fahrwerkspunkte eingespannt und die Massenträgheitsentlastung wird ausgeschaltet. Interessanterweise kommt es bei einer

vordefinierten Einspannung zu einer größeren Nachgiebigkeit. Dies entspricht nicht der Erwartung. Der Unterschied ist mit 0,5% jedoch sehr gering.

Als zweiter Punkt wird das Fahrwerk mit RBE2(rigid)-Elementen an das Monocoque angebunden. Dadurch kommt es zu einer örtlichen Versteifung im Bereich dieser Elemente. Die Torsionssteifigkeit erhöht sich dabei um 1,74%.

Als dritter Punkt wird die Fahrwerkskomponentenmodellierung verändert. Dabei werden die Querlenker, die Pull-Rods, die Spurstange und die Lenkstange von real elastischen Körpern auf praktisch starre Körper(Stahlstangen mit $D=20\text{mm}$) geändert. Dabei ändert sich die Torsionssteifigkeit signifikant. Es ergibt einen Steifigkeitsunterschied von +26%.

Der zweite Block (Punkte 4-5) befasst sich mit dem globalen Laminataufbau.

Beim vierten Punkt wird die globale Gewebeorientierung von $\pm 45^\circ$ auf $0/90^\circ$ verändert. Diese Maßnahme führt zu einem Steifigkeitsverlust von mehr als 23%.

Mit Hilfe einer zusätzlichen Gewebelage kann die Steifigkeit um 20% erhöht werden. Dabei wird die Masse jedoch ebenfalls um 10% erhöht.

In Punkt 5 wird die Wabenausrichtung verändert. Es zeigt sich, dass die Ausrichtung des Ausgangsmodells das Optimum darstellt. So sollten die 10 und 14mm dicken Waben 90° und die 24mm dicken Waben 0° ausgerichtet werden.

Im dritten Block (Punkte 6-8) sind die umliegenden Bauteile analysiert worden.

Dabei stellte sich heraus, dass die vom Reglement geforderten sicherheitstechnischen Bauteile, also Anti-Intrusion-Plate, vorderer und hinterer Überrollbügel zwar einen Steifigkeitsgewinn darstellen, aber im Vergleich zu ihrer Masse keine Bauteile sind, die im Sinne des Leichtbaus eingesetzt werden sollten. Da diese Bauteile jedoch verpflichtend sind, bleiben diese bestehen.

Das Versteifungskreuz, das im Punkt 7 analysiert wurde, stellt sich im Sinne des Leichtbaus als äußerst hilfreich dar. Umgerechnet auf die Ausgangsmasse und Ausgangssteifigkeit ohne Versteifungskreuz gewinnt man 17% an Steifigkeit mit nur 2,69% Zusatzmasse.

Im letzten Block (Punkte 9-10) wurde eine Materialsubstitution des Gewebematerials durchgeführt. Es zeigt auf, dass mit einem Gewebe aus M46J-Fasern fast 9% an Steifigkeit

gewonnen werden könnte. Wird ein schlechteres Material mit T300-Faser verwendet, so verliert man ca. 6,6% Steifigkeit.

Beschreibung	T_{RAP}	Steifigkeits- steigerung	Masse	Massen- steigerung	Gütemaß- stab
	Nm/°	%	kg	%	%/%
Vergleichsmodell: inertial relief; FWK mit RBE3 und realen Fahrwerksabmessungen; AH 10, 14: 90°, AH24: 0°; inkl.: AIP, hoops, spider;	1048,357	0,00	19,58	0,00	0,00
1. Einspannung mit SPCs	1042,893	-0,51	19,58	0,00	
2. RBE2(Rigids) statt RBE3	1066,975	1,74	19,58	0,00	
3. steife Fahrwerkskomponenten	1322,775	25,67	19,58	0,00	
4.1. globaler Aufbau: (0/90,0/90,core)s	798,455	-23,37	19,58	0,00	
4.2. globaler Aufbau: (+/-45,0/90,+/-45,core)s	1262,180	20,00	21,70	9,77	2,05
4.3. globaler Aufbau: (+/-45,+/-45,+/-45,core)s	1207,524	14,89	21,70	9,77	1,52
5.1. Wabenausrichtung AH10: 90° -> 0°	1016,614	-2,97	19,58	0,00	
5.2. Wabenausrichtung AH14: 90° -> 0°	1014,825	-3,14	19,58	0,00	
5.3. Wabenausrichtung AH24: 0° -> 90°	1043,721	-0,43	19,58	0,00	
6.1. vorderer Überrollbügel	915,396	-12,44	17,31	-13,11	0,95
6.2. hinterer Überrollbügel	1026,614	-2,03	15,08	-29,82	0,07
7. Versteifungskreuz	892,732	-14,56	19,08	-2,62	5,55
8. Anti-Intrusion Plate	1048,024	-0,03	17,63	-11,06	0,00
9. Gewebematerial: M46J statt T800 - Faser	1143,281	8,88	19,58	0,00	
10. Gewebematerial: T300 statt T800- Fasern	977,706	-6,61	19,58	0,00	

Tabelle 6-18: Ergebnisse der Vorauslegung

Für die weiteren Berechnungen wird mit dem Ausgangsmodell gearbeitet. D.h. es wird mit Massenträgheitsentlastung (Inertial Relief), nicht versteifenden RBE3 Elementen als Fahrwerksanbindung und real-elastischem Fahrwerk berechnet. Dieses Modell wird gewählt, da es der Realität am nächsten kommt.

6.5. Optimierung der Lagendicken

Die aus den **Punkten 6.3** und **6.4** gewonnen Ergebnisse können nun genutzt werden, um einen endgültigen Laminataufbau zu berechnen. Das Ziel dieser Optimierung ist es, alle Lagendicken der UD- und Gewebeverstärkungslagen zu ermitteln, um schlussendlich einen finalen Laminataufbau festlegen zu können. Anzumerken ist, dass in diesem Modell alle Lagen, Inserts und alle versteifend wirkenden, umliegenden Bauteile berücksichtigt werden müssen.

6.5.1. Modellaufbau

Das Composite-Modell aus **Punkt 6.4** wird als Basis verwendet und adaptiert. Neben der vollständigen Definition des Laminates müssen alle umliegenden Bauteile korrekt mitmodelliert werden.

6.5.1.1. Laminataufbau

Das Laminat wird als sogenanntes „ply based model“ aufgebaut. Dabei wird jede Lage einzeln definiert und anschließend eine Schichtungsreihenfolge festgelegt. Das Pendant zu dieser Art ist das „zone based model“, bei dem der Lagenaufbau für jeden Flächenabschnitt(Zone) einzeln definiert werden muss.

Der Laminataufbau besteht aus folgenden Punkten:

- globale Gewebelagen
- UD-Verstärkungslagen
 - der gitterrohrrahmenartigen Struktur
 - der Seitenaufprallstruktur (Side Impact Structure, SIS)
 - des RHC-Kernes
 - der Flanschflächen
- Gewebeverstärkungslagen für das vom Reglement geforderte Sicherheitsdokument
 - Anti Intrusion Plate
 - Gurtanbindung im Schulterbereich
- Gewebeverstärkungslagen bei den Krafteinleitungspunkten
- CFK-Inserts
- Waben

Da jede Deckschicht separat im Autoklaven ausgehärtet wird, wird darauf geachtet, dass jede Deckschicht zu sich selbst symmetrisch und gleichzeitig das Gesamtlaminat symmetrisch ist.

Globale Gewebelagen

Die globalen T800-Gewebelagen werden $\pm 45^\circ$ orientiert. Dabei werden zwei Gewebelagen pro Deckschicht verwendet. Diese zwei Lagen sind die äußersten Lagen jeder Deckschicht. Besonders sorgfältig muss bei der Definition des Laminates der Firewall vorgegangen werden. Die Firewall wird in zwei Schritten integriert. Im ersten Schritt wird der Kern mit jeweils einer Gewebedeckschicht vorausgehärtet. Erst im Anschluss wird im zweiten Schritt die vorausgehärtete Firewall zusammen mit den anderen Kernen im Monocoque integriert. Dieser Umstand muss in der Laminatdefinition berücksichtigt werden.

UD Verstärkungslagen

- gitterrohrrahmenartige Struktur

Mit dem CAD-Modell aus **Punkt 6.3.3 (Abbildung 6-20)** kann das Laminat aufgebaut werden.

Abbildung 6-21 zeigt die Umsetzung der Verstärkungszonen im FE-Programm.

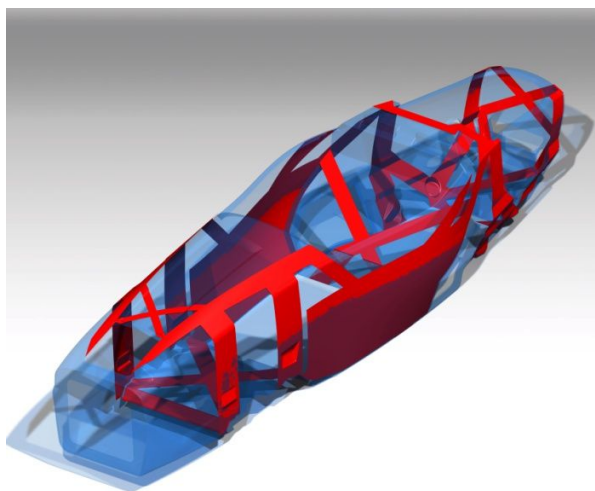


Abbildung 6-20: CAD-Modell

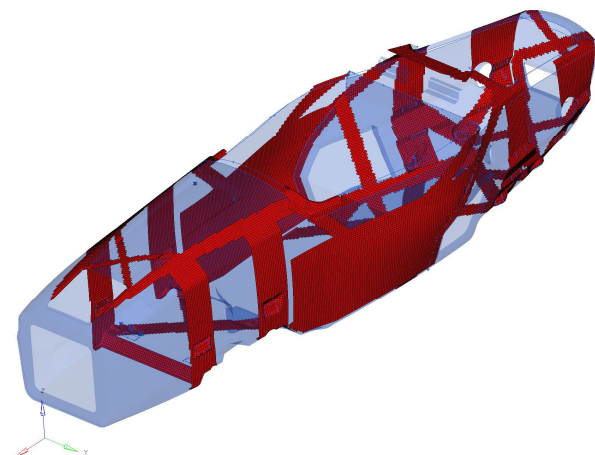


Abbildung 6-21: FEM-Modell

Zu den UD-Verstärkungslagen gehört auch die Zone des Seitenaufprallschutzes(SIS). Diese befindet sich zwischen vorderem und hinterem Überrollbügel und soll den Fahrer im Falle eines seitlichen Aufpralles schützen. Diese Zone muss laut Reglement in der Energieaufnahme einer aus Stahl gefertigten Seitenaufprallzone äquivalent sein. Die

Äquivalenz muss in einem Dreipunktbiegeversuch nachgewiesen werden. Um den Test zu bestehen, müssen UD-Verstärkungslagen integriert werden.

Jeder UD-Streifen weist eine unterschiedliche 0° -Richtung auf, daher muss jeder Verstärkungsstreifen einzeln definiert werden. Für die Definition der 0° -Orientierung wird mit Hilfskoordinatensystemen gearbeitet. Die Verstärkungsbereiche und deren Hilfskoordinatensysteme können in **Abbildung 6-22** erkannt werden. Angemerkt sei, dass die Zonen an Kreuzungspunkten überlappen. Alle UD-Streifen werden Dickenoptimiert und mit einer Ausgangsmaterialstärke von 2mm definiert.

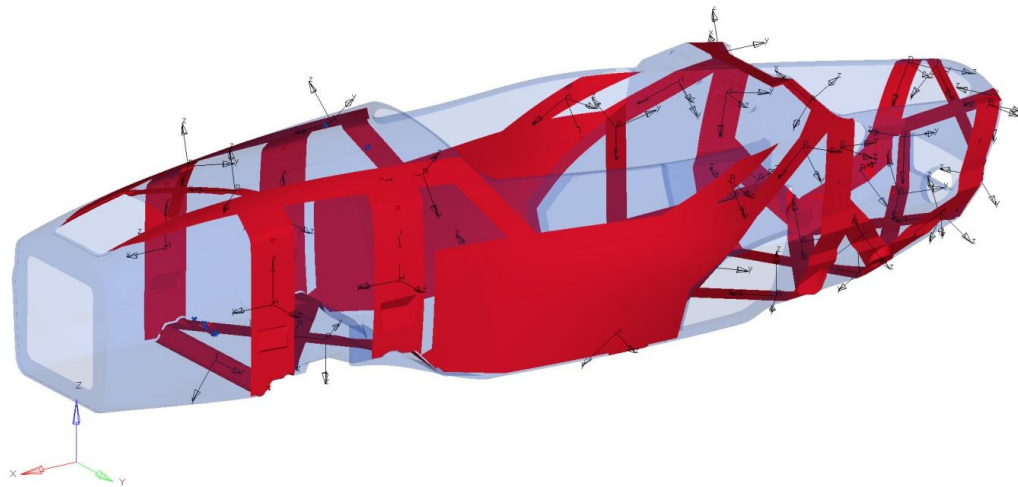


Abbildung 6-22: Orientierung der Hilfskoordinatensysteme

- RHC-Kern und Flanschflächen

Eine ähnliche Vorgangsweise, wie oben beschrieben, wird auch bei der Verstärkung des Rohacell-Kernes und der Flanschflächen angewendet. Auch diese Lagen werden optimiert und mit einer Ausgangsdicke von 2mm modelliert. Die Zonen sind in **Abbildung 6-23** dargestellt.

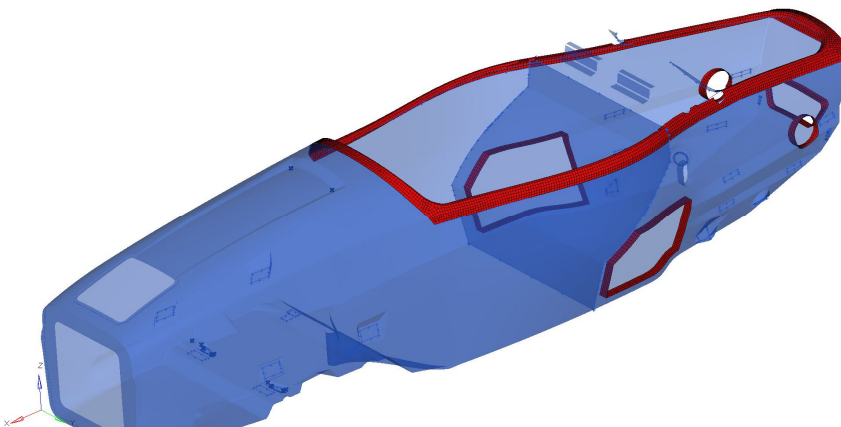


Abbildung 6-23: Verstärkungslagen des RHC-Kernes und der Flanschflächen

Gewebeverstärkungslagen

Die Gewebeverstärkungslagen (**Abbildung 6-24**) werden im Bereich der Krafteinleitungspunkte verwendet. Auch diese Verstärkungslagen werden mit einer Ausgangsdicke von 2mm definiert und sollen dickenoptimiert werden.

Weitere Verstärkungslagen (**Abbildung 6-25**) werden bei der Anti Intrusion Plate und bei der Schultergurtanbindung benötigt. Die Lagendicke ist von den vom Reglement vorgeschriebenen, physikalischen Tests abhängig. Im Bereich der Anti Intrusion Plate werden 6 Zusatzschichten pro Deckschicht und im Bereich der Gurtanbindung 4 Zusatzschichten pro Deckschicht benötigt. Beide Zonen müssen einen quasiisotropen Aufbau ($\pm 45^\circ$ und $0/90^\circ$ alternierend; symmetrisch) vorweisen.

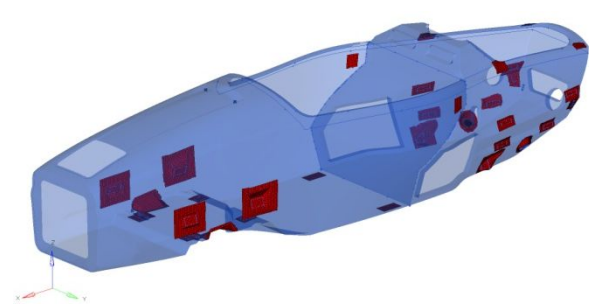


Abbildung 6-24: Insert-Gewebeverstärkungslagen

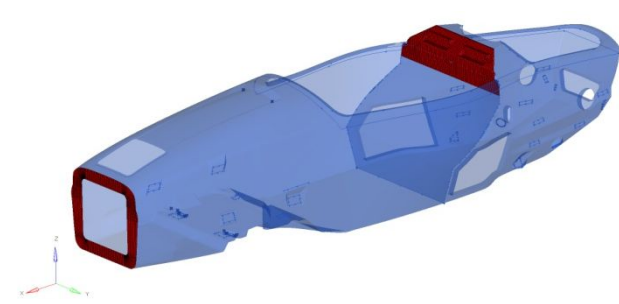


Abbildung 6-25: SES-Verstärkungslagen

CFK-Inserts

Im Bereich der Lastenleitungspunkte werden CFK-Inserts verwendet. Diese werden lokal statt dem Kern eingelegt. Sie besitzen die selbe Dicke wie der dort vorhandene Kern. Die Inserts verhindern das Kollabieren der Kerne bei Druckbelastung des Laminates. Die genaue Geometrie in Schalenrichtung kann nicht erfasst werden, da die Inserts aus Massengründen knochenförmig (**Abbildung 6-26**) ausgeführt werden. Die Lage und FE-Form der Inserts kann in **Abbildung 6-27** erkannt werden.



Abbildung 6-26: knochenförmiges Insert

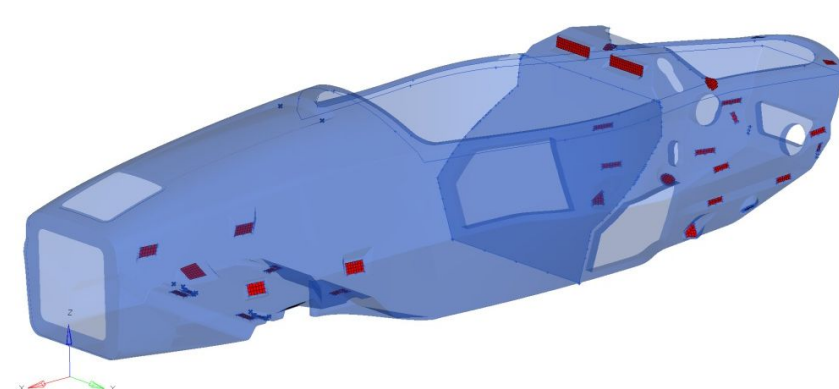


Abbildung 6-27: FE-Modell: CFK-Inserts

Kernmaterial

Als Kernmaterial werden vier verschiedene Arten bzw. Dicken verwendet. Die unterschiedlichen Bereiche in denen sich die Kerne befinden, sind in den folgenden Abbildungen aufgezeigt.

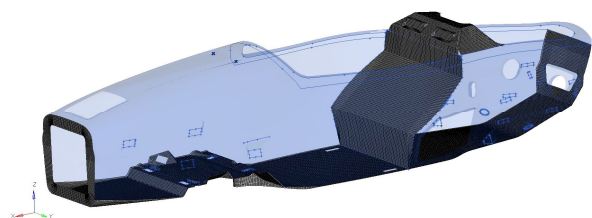


Abbildung 6-28: Aluminiumwabe, Dicke: 10mm

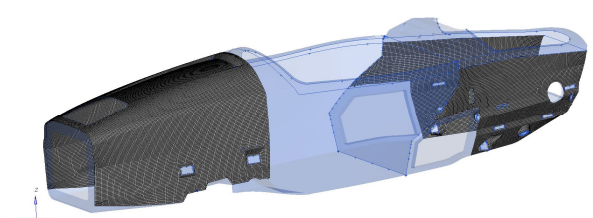


Abbildung 6-29: Aluminiumwabe, Dicke: 14mm

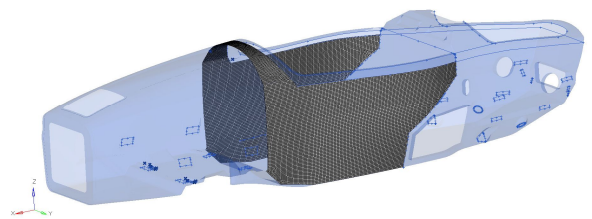


Abbildung 6-30: Aluminiumwabe, Dicke: 24mm

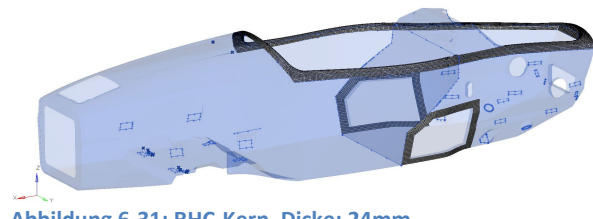


Abbildung 6-31: RHC-Kern, Dicke: 24mm

Die 10 und 14mm dicken Waben werden dabei 90° zur globalen Materialorientierung ausgerichtet und die 24mm dicken Waben werden in 0° -Richtung ausgerichtet.

6.5.1.2. Optimierungsparameter

Bei dieser Optimierung ist die Topologie vordefiniert und die Materialdicke soll optimiert werden. Hier bietet sich also eine Free-Size-Optimierung für Composite-Bauteil an. Das Optimierungsvolumen ist dabei das gesamte Laminat. Zusätzlich muss die Dicke von insgesamt 29 Lagen als konstant gesetzt werden, dies umfasst z.B. die Kerne, die globalen Gewebelagen oder auch die von der SES vorgeschriebenen Lagen.

Die Zielfunktion(HM: optimization response) der Optimierung ist die Laminatmasse. Das Ziel (HW: objective) ist die Minimierung der Zielfunktion, also die Minimierung der Laminatmasse. Als Lastfall wird wie bei der isotropen Schalenoptimierung eine Torsionsbelastung am Reifenlatsch vorgegeben. Es werden wieder zwei symmetrische Torsionsbelastungen definiert um eine schnelle Konvergenz bei gleichzeitig symmetrischer Geometrie zur Fahrzeuglängsebene (xz-Ebene) zu erreichen. Als Optimierungsnebenbedingung (HM: optimization constraint) wird eine betragsmäßige maximale Gesamtverschiebung von 7,6mm am Reifenlatsch vorgegeben. Zusammen mit dem aufgetragenen Torsionsmoment ergibt dies eine Torsionssteifigkeit von $1360\text{Nm}/^\circ$.

6.5.2. Ergebnisse

Das Endergebnis lieferte eine Gesamtmonocoquemasse von 18,16 kg bei einer Torsionssteifigkeit von 1366Nm/°. Man muss jedoch anmerken, dass dieser Laminataufbau nicht bzw. nur sehr schwer fertigbar ist. Zum Teil reduziert der Optimierer die Zonen soweit, dass nur noch kleine Zonen von 15x15mm bestehen bleiben. Diese Zonengröße macht jedoch in der Praxis wenig Sinn. Daher muss der Lagenaufbau adaptiert werden, wodurch jedoch wiederum eine Masse- und Steifigkeitsänderung resultiert. Das Ergebnis zweier Verstärkungslagen kann in **Abbildung 6-32** und **Abbildung 6-33** gesehen werden. Die dunkelroten Bereiche haben dabei eine Wandstärke von 1,05mm, die dunkelblauen Bereiche annähernd 0mm.

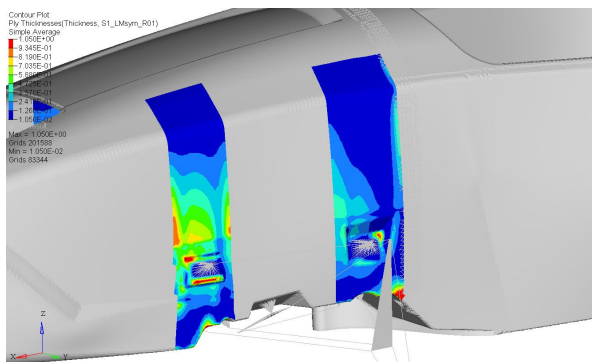


Abbildung 6-32: Optimierte Lagendicke der vorderen UD-Verstärkungslagen

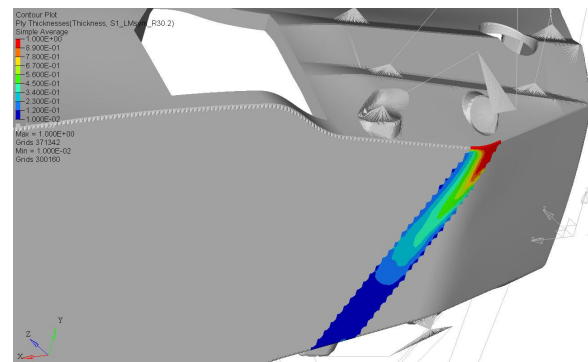


Abbildung 6-33: Optimierte Lagendicke der hinteren unteren UD-Verstärkungslagen

Allgemein ist ersichtlich, dass der Optimierer großflächig Wandstärken zwischen 0 - 0,5mm berechnet. Dies würde einer Anzahl zwischen null und vier Lagen entsprechen. Des Weiteren ist aus den Ergebnissen erkennbar, dass einzelne Verstärkungszonen keinen oder nur wenig Einfluss auf die Steifigkeit haben und der Optimierer die Dicke auf nahezu 0mm setzt. In **Abbildung 6-34** sind die verbleibenden Verstärkungslagen dargestellt.



Abbildung 6-34: notwendige Verstärkungslagen

Es fällt also das Kreuz vorne oben am Monocoque weg, außerdem noch die Verstärkungslagen der Firewall und einige Lagen im Motorraum.

Das Histogramm der Optimierung ist in **Abbildung 6-35** dargestellt. Für diese Optimierung sind lediglich 19 Iterationsschritte benötigt worden.



Abbildung 6-35: Histogramm der Free-Size-Optimierung

Zwar könnte ein kleineres Abbruchkriterium verwendet werden, sodass mehr Iterationsschritte ausgeführt werden. Jedoch wären die optimierten Feinheiten so gering, dass diese in der fertigungstechnischen Aufbereitung nicht erfasst werden würden. Die Ordinate in **Abbildung 6-35** stellt die Monocoquemasse ohne vorderen Überrollbügel und andere umliegenden Bauteile dar. Diese beträgt nach der 19ten Iteration 10,03kg.

Die Gesamtmasse von 18,16 kg setzt sich aus 1,15 kg für die Anti Intrusion Plate, 1,73kg für den vorderen Überrollbügel, 4,5kg für den Hinteren, 0,5 kg für das Versteifungskreuz und ca. 0,25kg für die Verbindungsmittel aller umliegenden Bauteile zusammen. Dies stellt aber nicht die endgültige physikalische Masse des Monocoques dar, da in der Massenberechnung diverse Positionen fehlen. Zu diesen gehören Wabenfüller, Klebefilm, Überlappungszonen oder ähnliches.

Beschreibung	T_{RAP}	Masse
	Nm/°	kg
Optimiertes Modell (nicht fertigungsgerecht)	1366	18,16

Tabelle 6-19: Zusammenfassung nach der Free-Size-Optimierung

6.6. Neuberechnung mit einem fertigbaren Lagenaufbau

Im Anschluss nach der Optimierung erfolgt die fertigungsgerechte Aufbereitung der idealen Lagedicken. Das Ziel ist eine möglichst geringe Massenzunahme des Monocoques bei gleichzeitig einfachem Laminataufbau. Nachdem die Lagenaufbereitung fertiggestellt ist, kann die Torsionssteifigkeit neu berechnet werden.

6.6.1. Modellaufbau

Der Lagenaufbau wird hier nicht näher beschrieben, da aufgrund der Reglementanforderungen der Lagenaufbau nochmals verändert wurde.

6.6.2. Ergebnisse

Die Zusammenfassung der Ergebnisse mit dem hier definierten Laminataufbau kann in **Tabelle 6-20** gesehen werden.

Beschreibung	T_{RAP}	Steifigkeits- steigerung	Masse	Massen- steigerung
	Nm/°	%	kg	%
Optimiertes Modell (nicht fertigungsgerecht)	1366	0	18,16	0
Fertigungstechnisch aufbereitetes Modell	1397	2,3	20,54	13,10

Tabelle 6-20: Vergleich nach der Neuberechnung

Im Vergleich zum optimierten Modell ergibt sich ein relativ großer Massenzuwachs von 13,1% bei einem Steifigkeitsgewinn von 2,3%. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Optimierer Teilbereiche sehr klein ausführt, die jedoch in der Praxis nicht realisierbar, aber für die geforderte Steifigkeit notwendig sind. Des Weiteren hat der Optimierer Überlappungszonen weggeschnitten, welche in der Praxis von großer Bedeutung sind. Werden diese Überlappungszonen nicht ausgeführt, können sich große Steifigkeitssprünge in der Struktur ergeben, die im Falle einer Belastung zu Rissbildung und in Folge dessen zum Versagen der Struktur führen können. Erwähnenswert ist, dass zur angeführten Belastung auch die thermische Belastung beim Fertigungsprozess im Autoklaven zählt.

6.7. Modellanpassung

Aufgrund des Reglements mussten vor der Fertigung noch Anpassungen am Lagenaufbau durchgeführt werden. Dabei benötigt die Fahrgastzelle und der Motorraum zusätzliche Verstärkungslagen um alle reglementseitigen Sicherheitsanforderungen erfüllen zu können, die mit einem physikalischen Versuch zu prüfen sind.

Das Modell musste wieder adaptiert werden. Dieses endgültige Modell kann nun auch zur Berechnung aller relevanten Daten herangezogen werden. D.h. es kann nun neben der Steifigkeit auch die Festigkeit der auftretenden Lastfälle geprüft werden. In diesem Abschnitt wird sich also herausstellen, ob die Annahme, dass der Steifigkeit eine größere Beachtung geschenkt werden sollte als der Festigkeit, gerechtfertigt ist. Treten lokale Festigkeitsprobleme auf, so kann mit lokalen Verstärkungslagen gearbeitet werden. Desweiteren wird die Torsionssteifigkeit anhand des festgelegten Torsionspfades beurteilt. Außerdem ist dieses Modell Ausgangsbasis für die Validierung der Berechnung. Für die Validierung mit dem Versuchsaufbau müssen zusätzliche Parameter berechnet werden, dazu gehören die erste Torsionseigenfrequenz und die Torsionssteifigkeit am Monocoque bei Belastung am Rocker.

Zudem wird noch ein zusätzliches Modell mit feinerer Netzgröße und mit einem aus Volumenelementen diskretisierten RHC-Kern um die Fahrer- und Motorraumöffnung erstellt.

6.7.1. Modellaufbau

Laminataufbau

Zusätzlich zu den optimierten Lagen müssen noch vor dem vorderen Überrollbügel eine Gewebeschicht pro Deckschicht und im Motorraum eine UD-Schicht in 0° Richtung pro Deckschicht hinzugefügt werden. Um keine signifikante Steifigkeitserhöhung zu bekommen, werden die anderen UD-Verstärkungslagen angepasst. Der detaillierte Laminataufbau ist aus dem im Anhang befindlichen Lagenaufbauplan(plybook) zu entnehmen.

Lasten und Randbedingungen

Beim endgültigen Modell werden alle Lastfälle überprüft.

Für die Steifigkeitsüberprüfung wird nun auch die Auswertung am Torsionspfad aufgezeigt. Für die spätere Analyse wird ein MatLab-Programm geschrieben, welches die Daten eines symmetrischen Punktepades links und rechts einliest und aus den Verschiebungen den Torsionswinkel über die Fahrzeuglänge berechnet. Der Torsionswinkel berechnet sich durch den Arkustangens der Differenz der beiden z-Verschiebungswerte(w) dividiert durch den y-Abstand der Knotenpunkte.

$$\vartheta = \tan^{-1} \left(\frac{w_{\text{links}} - w_{\text{rechts}}}{|y_{\text{links}} - y_{\text{rechts}}|} \right) \quad (6.9)$$

Bei den Festigkeitsüberprüfenden Lastfällen wird untersucht ob First-Ply-Failure auftritt. Dabei wird das Kriterium nach Tsai-Wu verwendet. Die Auswertung der Spannungen erfolgt an drei z-Werten pro Lamineinzelschicht. Diese sind an der Ober-, Unterseite und in der Mitte (HM: CSTRESS: NDIV=3; CFAILURE: NDIV=3). Lokale und globale Instabilitäten wie Knicken oder Beulen werden nicht überprüft. Des Weiteren findet auch keine Überprüfung auf Delamination statt.

Neben der Validierung der Torsionssteifigkeit mit Lastaufbringung auf den Rockerpunkten durch die experimentelle Modalanalyse, kann auch die erste Torsionseigenfrequenz experimentell bestimmt werden. Daher wird noch eine Eigenwertanalyse durchgeführt um einen zweiten Validierungswert zu haben. Da hier nur eine geringe Anzahl an Eigenwerten und Eigenfrequenzen benötigt wird, wird die exakte Lanczos-Methode in Hyperworks verwendet.

6.7.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in vier Punkte gegliedert. Im ersten Punkt wird die Auswertung der Torsionssteifigkeit erläutert. Diese ist für die Zielüberprüfung notwendig. Im zweiten Punkt werden die Festigkeitsanforderungen überprüft. Dabei wird die Frage geklärt, ob der Fahrzeugrahmen den Betrieb standhält. Im dritten Punkt werden jene Werte berechnet, die zur Validierung des FE-Modells mit dem physikalischen Versuch benötigt werden. Zusätzlich wird im letzten Punkt eine Auflistung der genauen Massen vorgenommen. Dieser Punkt dient zur Feststellung von Einsparungsmaßnahmen für zukünftige Fahrzeugrahmen.

6.7.2.1. Torsionssteifigkeit

Wie man aus **Tabelle 6-21** erkennt, führten die vom Reglement geforderten Änderungen des Lagenaufbaus zu einer erhöhten Masse. Durch eine Anpassung der restlichen Zusatzschichten konnte jedoch die Steifigkeit der Modelle mit der globalen Netzgröße von 7mm annähernd gleich gehalten werden.

Zusätzlich wurde ein Modell mit einer globalen Netzgröße von 5mm und einem 3D-modellierten RHC-Kern im Bereich der Öffnungen simuliert. Zu erkennen ist, dass die Torsionssteifigkeit abnimmt. Dies bedeutet, dass durch die reine Schalensimulation die Steifigkeit des RHC-Kernes überschätzt wird. Des Weiteren ist die Masse der beiden Modelle leicht unterschiedlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Modellaufbau beim feineren Netz etwas exakter durchgeführt wurde. So wurden auch die Inserts für den hinteren Überrollbügel und für die Flügelanbindung berücksichtigt.

Hier muss erwähnt werden, dass sich die Berechnungszeiten der beiden Modelle signifikant unterscheiden. Während das reine Schalenmodell (1,551 Mio. DOFs) eine Berechnungszeit von ca. 6,5 Minuten aufweist, benötigt das hybride Modell mit 3D-modelliertem RHC-Kern und feinerer Vernetzung (2,939 Mio. DOFs) 28 Minuten. Die Entscheidung, das Optimierungsmodell als reines Schalenmodell auszuführen, war in Anbetracht der vielen Berechnungsdurchführungen richtig.

Des Weiteren wurde das feinere Modell noch mit einem quasi starren statt einem real-elastischem Fahrwerk berechnet. Dabei steigt die Torsionssteifigkeit auf 1751Nm/° an.

Beschreibung	T_{RAP}	Steifigkeits- steigerung	Masse	Massen- steigerung
	Nm/°	%	kg	%
Optimiertes Modell (nicht fertigungsgerecht, globale Netzgr.: 7mm)	1366	0	18,16	0
Fertigungstechnisch aufbereitetes Modell (globale Netzgröße: 7mm)	1397	2,3	20,54	13,10
Gefertigtes Modell (globale Netzgröße: 7mm)	1390	1,75	22,13	21,86
Gefertigtes Modell (globale Netzgröße: 5mm, 3D-RHC)	1301	-4,75	22,52	24,00
Gefertigtes Modell (globale Netzgröße: 5mm, 3D-RHC, quasi starres Fahrwerk)	1751	-	22,52	-

Tabelle 6-21: Zusammenfassung der verschiedenen Modelle

Die Torsionssteifigkeit des endgültigen Lagenaufbaus des Modells mit einer globalen Elementgröße von 5mm und einem 3D-diskretisierten RHC-Kern und real-elastischem Fahrwerk beträgt rund 1301 Nm/° am Druckpunkt des Reifenlatsches. Die Gesamtmasse inklusiver Anbauteile und Verbindungsmittel beläuft sich dabei auf 22,52kg.

In **Abbildung 6-36** ist der Torsionswinkel (blaue Linie) entlang des vordefinierten Punktpfades (grau) am Monocoque dargestellt. Der Torsionswinkel beginnt nicht bei 0°, da die Modellreferenzpunkte an den Radaufstandspunkten liegen. Zur Veranschaulichung ist das Monocoque mit abgebildet. Zusätzlich ist eine lineare Interpolation eingeblendet (rot Linie), die das Referenzmaß für eine gleichmäßige Torsionssteifigkeit entlang der x-Koordinate darstellt.

Man erkennt eine annähernd gleichmäßige Verdrehung entlang der x-Koordinate. Dies lässt darauf schließen, dass keine Querschnittsbereiche mit deutlich schlechterer Torsionssteifigkeit vorliegen. Eine geringe Unregelmäßigkeit liegt zwischen 500 und 1100 mm vor.

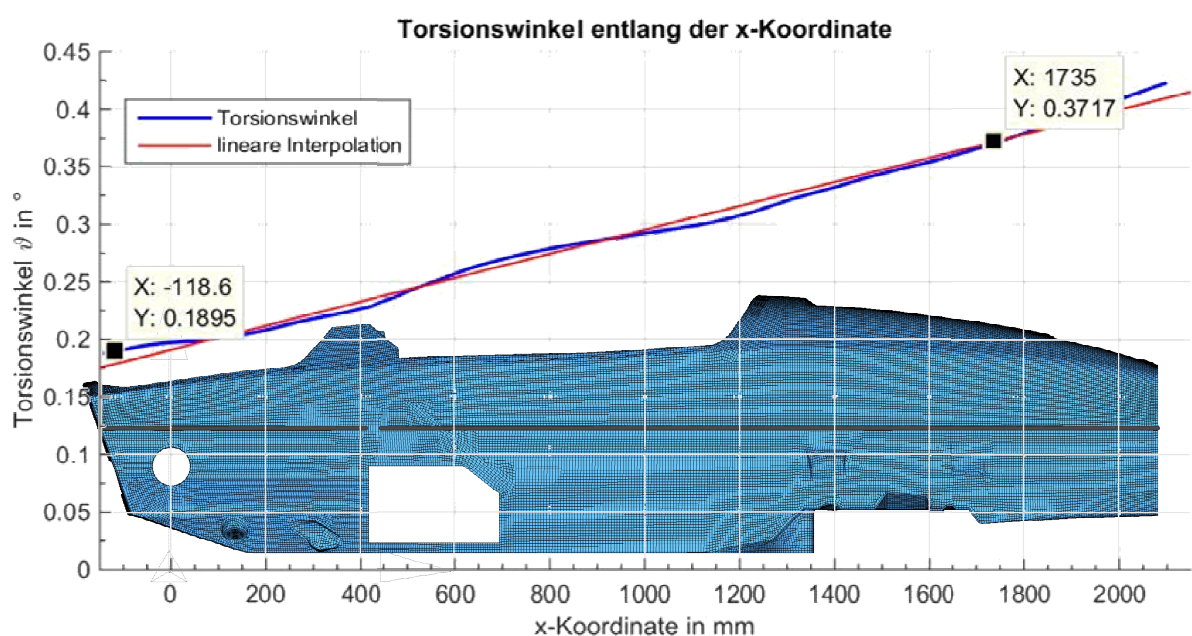


Abbildung 6-36: Torsionswinkel entlang des Monocoques

Die Torsionssteifigkeit am Monocoque ohne Radaufhängung beträgt zwischen dem vorderen Anbindungspunkt des vorderen Fahrwerks und dem hinteren Anbindungspunkt des hinteren Fahrwerks 5488 Nm/° (6.10).

$$k_T = \frac{M_T}{\Delta\vartheta} = \frac{1000 \text{ Nm}}{0,3717^\circ - 0,1895^\circ} = 5488 \text{ Nm/}^\circ \quad (6.10)$$

Zusätzlich sind in **Abbildung 6-37** die z-Verschiebungen bei Torsionsbelastungen dargestellt. Die Abbildungen lassen einen annähernd konstanten Verlauf über die Höhe erkennen. Zu beachten ist, dass das Monocoque nach vorne hin schmaler wird und daher der y-Abstand für den Torsionswinkel geringer wird. Daher ist drei viertel der Seite rot eingefärbt.

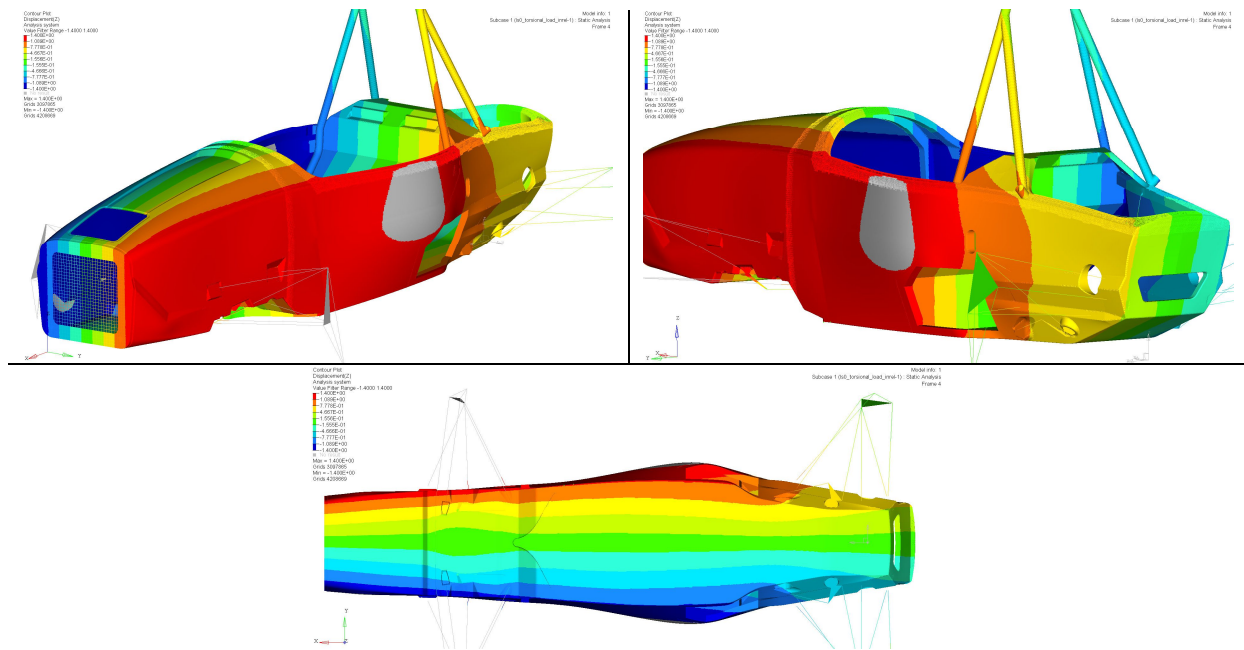


Abbildung 6-37: z-Verschiebungsanalyse

6.7.2.2. Festigkeitsüberprüfung

Die Auswertung der Festigkeitsanalyse wird am Modell mit der feineren Vernetzung durchgeführt. Dabei wird analysiert ob und wann First-Ply-Failure, also Versagen der ersten Schicht, auftritt. Zur Analyse wird das quadratische Interaktionskriterium nach Tsai-Wu verwendet. Dieses umfasst sowohl lineare als auch quadratische Spannungsterme. Dies bedeutet, dass der Kehrwert des Versagensindex(composite failure) nicht den Sicherheitsfaktor bzw. Lasterhöhungsfaktor darstellt. Man kann also durch den Versagensindex nicht direkt auf den Lasterhöhungsfaktor schließen. Jedoch kann der Lasterhöhungsfaktor ebenfalls in Hyperworks berechnet werden. Dieser Faktor gibt den Wert an, um den die Last gesteigert werden muss, damit First-Ply-Failure nach Tsai-Wu auftritt. Die Spannungswerte werden dabei an drei Stellen (Oberseite, Mitte, Unterseite) über die Höhe jeder Lamineinzelschicht ausgewertet. In **Tabelle 6-22** sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Lastfall	max. Versagensindex	min. Lasterhöhungsfaktor
1. Vollbremsung	0,5849	1,609
2. Kurveneingang, links	0,3553	2,549
3. Kurvenmitte, links	0,3186	2,829
4. Kurvenausgang, links	0,4935	1,886
5. maximales Beschleunigen	0,5747	1,633
6. Schlagloch während einer Linkskurve	0,6037	1,564
7. Bremsung nach einer 180° Drehung („verkehrtes Bremsen“)	0,5538	1,696

Tabelle 6-22: Ergebnisse des Fehlerindexes und des Lasterhöhungsfaktors gegen First Ply Failure nach Tsai-Wu

Der ungünstigste Lastfall ist ein Schlagloch während einer Linkskurve. Dabei wird ein Versagensindex von 0,6037 erreicht. Dies bedeutet, dass die Last um das 1,56-fache gesteigert werden darf bevor First-Ply-Failure nach Tsai-Wu auftritt. Die betroffene Zone ist in **Abbildung 6-38** und **Abbildung 6-39** dargestellt. Jene Bereiche, die einen großen Sicherheitsfaktor aufweisen, sind in grau eingefärbt (**Abbildung 6-38**: Versagensindex $< 0,1$, **Abbildung 6-39**: Laststeigerungsfaktor > 10).

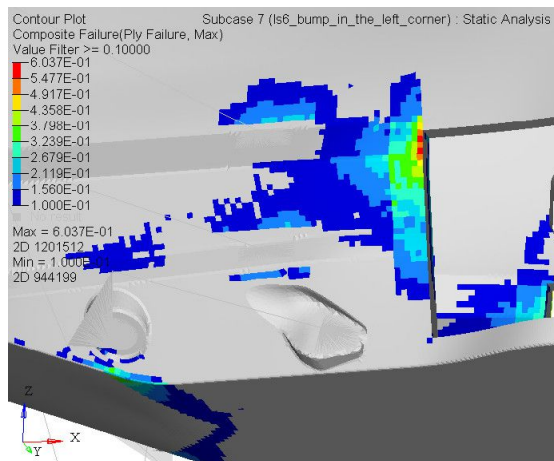


Abbildung 6-38: Versagensindex des kritischen Lastfalles

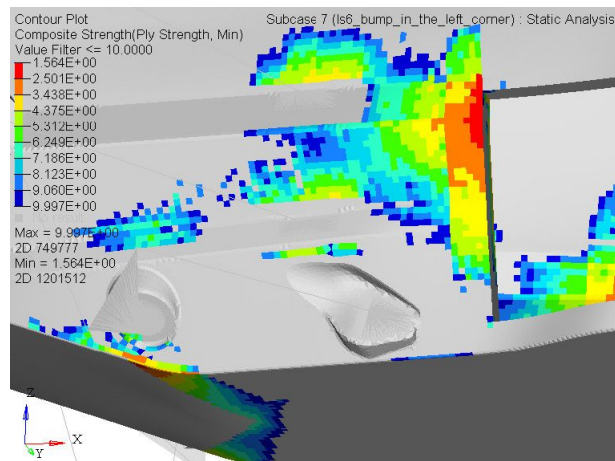


Abbildung 6-39: Laststeigerungsfaktor des kritischen Lastfalles

Die Ergebnisse einer symmetrischen Belastung beim Durchfahren einer Rechtskurve anstatt der berechneten Linkskurve können als spiegelverkehrt angenommen werden, da die Geometrie annähernd symmetrisch und die Belastung und daher auch die Beanspruchung der gefährdeten Bereiche spiegelverkehrt sind.

Mit dem Modell kann nun bestätigt werden, dass die getroffene Annahme, wonach die Steifigkeit einen höheren Stellenwert hat als die Festigkeit, gerechtfertigt war.

6.7.2.3. Validierungsmodell zum Abgleich mit der experimentellen Messung

In diesem Punkt werden jene Werte berechnet, die zur Validierung des FE-Modells mit dem physikalischen Versuch benötigt werden.

statische Torsionssteifigkeit

Für die Ermittlung der statischen Torsionssteifigkeit für das Vergleichsmodell erfolgt die Belastung am Rocker. Dabei wird der Steifigkeitswert am Punktepfad des Monocoques ausgewertet. Die Auswertung erfolgt am Punktepfad und nicht an den

Lastaufbringungspunkten, da lokale Effekte durch die Kraftaufbringung nicht mitanalysiert werden sollen. Es soll die globale Torsionssteifigkeit ermittelt werden. Der Torsionswinkel über die x-Koordinate am Punktepfad ist in **Abbildung 6-40** ersichtlich.

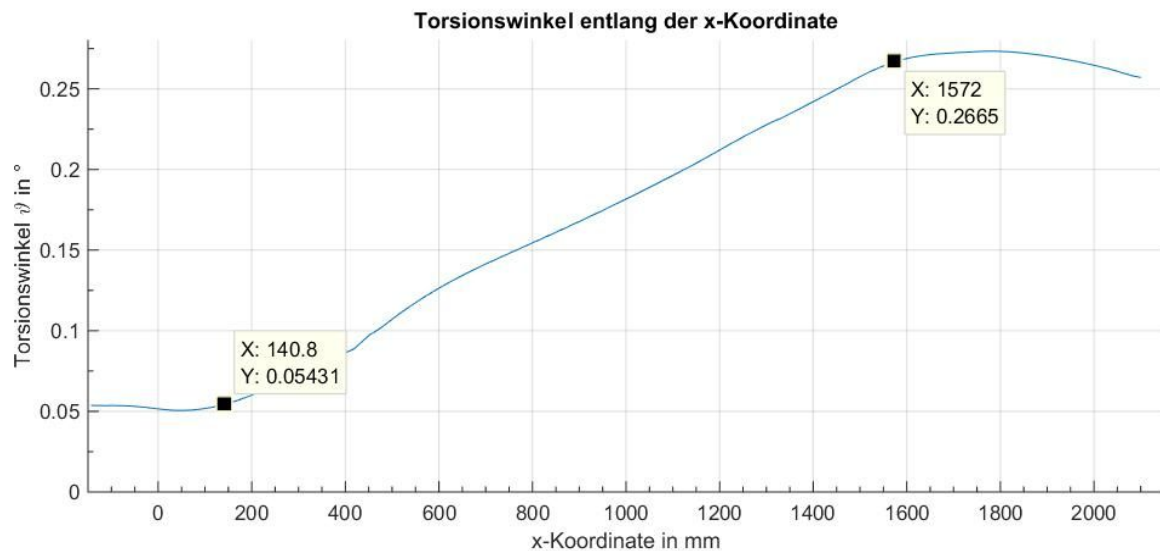


Abbildung 6-40: Torsionspfad

Die Torsionssteifigkeit des Monocoques inklusive aller Anbauteile bei Belastung an den Rockerpunkte beträgt 4712Nm/° am Punktepfad.

$$k_T = \frac{M_T}{\Delta\vartheta} = \frac{1000\text{Nm}}{0,2665^\circ - 0,05431^\circ} = 4712\text{Nm/}^\circ \quad (6.11)$$

Wird die Torsionssteifigkeit nicht am Punktepfad ermittelt, sondern entlang der gesamten Monocoquesseitenfläche als Mittelung von 3 verschieden hohen Punktpaaren, ergibt sich eine Differenz von 0,3%.

Eigenwertberechnung

Als zweite Vergleichsgröße werden die kleinste Eigenfrequenzen ohne den Starrkörpermodes benötigt. Die Ergebnisse sind aus **Tabelle 6-23** zu entnehmen.

Mode	Eigenfrequenz	Eigenwert	Schwingungsart
1	99,957 Hz	394450	Torsionseigenschwingung
2	144,988 Hz	829895	Biegeeigenschwingung

Tabelle 6-23: Eigenfrequenzen

6.7.2.4. Massen und Massenmittelpunkte

Aus dem Berechnungsmodell können auch gleich die Massen und die exakten Massenmittelpunktskoordinaten(COG) extrahiert werden. Die berechneten Werte sind in **Tabelle 6-24** zusammengefasst.

	Masse	X	Y	Z
	kg	mm	mm	mm
Monocoque inkl. Anbauteile	22,515	934,98	0,00	331,82
Monocoque ohne vorderen Überrollbügel	14,395	975,98	0,00	253,59
Flexcore 10mm	0,713	919,60	0,00	157,00
Aluminiumwabe 14mm	1,187	1201,00	0,00	330,80
Aluminiumwabe 24mm	0,842	1005,00	0,00	277,10
RHC-Kern	0,3	525,80	0,00	349,40
UD-M46J	2,825	833,30	0,00	266,90
Gewebe-T800	7,904	1031,00	0,00	247,00
Inserts	0,624	738,60	0,00	162,60
Anti Intrusion Plate	1,15	2101,00	0,00	277,72
vorderer Überrollbügel	1,73	1322,00	0,00	386,32
hinterer Überrollbügel	4,49	474,72	0,00	568,98
main hoop	3,47			
main hoop bracing support	1,02			
Versteifungskreuz	0,5	96,95	0,00	381,13
Verbindungsmitel	0,25(*)	475,00(*)	0,00(*)	350,00(*)

Tabelle 6-24: Massen und Massenmittelpunktskoordinaten des Berechnungsmodells

(*)... geschätzte Werte

Auch hier soll nochmal darauf hingewiesen werden, dass die exakte Monocoquemasse höher ausfallen wird, da folgende Positionen fehlen oder nicht die exakte Masse darstellen.

- Wabenfüller
- Klebefilm, mind. 2 globale, 188gsm(Gramm pro Quadratmeter) Lagen: ~1,5kg
- Überlappungen der Lagen
- exakte Kontur der Inserts, laut exakten Geometriedaten aus Catia: 0,9kg,
 $\Delta m = +0,276\text{kg}$

7. Fertigung

7.1. Fertigungsvorbereitung

Die Fertigungsvorbereitung besteht aus zwei großen Teilbereichen, nämlich dem Formenbau und dem Lagenaufbauplan(plybook).

7.1.1. Formenbau

Der Formenbau umfasst die komplette Vorbereitung zur Fertigung der Formen. Es wurde entschieden, dass die Fertigung des Monocoques in zwei Schritten erfolgt. Im ersten Schritt soll durch eine Ureol Positivform eine Negativform aus Werkzeug-Prepreg gefertigt werden und erst im zweiten Schritt soll aus der Carbon-Negativform das Monocoque entstehen. Diese Vorgangsweise zeichnet sich durch eine hohe Maßgenauigkeit aus. Dies ist der Fall, da bei der Herstellung der Prepreg-Negativform aufgrund des speziellen Harzes nur geringe Aushärtetemperaturen (40-60°C) benötigt werden und dadurch die Wärmeausdehnung, welche den größten Einfluss auf die Maßhaltigkeit hat, bei der Werkzeugherstellung nur sehr gering ist. Bei der späteren Monocoqueherstellung ist der Wärmeausdehnungskoeffizient der Form und des Bauteils fast ident. Durch die spezielle Eigenschaft der Kohlenstofffaser einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu haben, ist dieser im Verbund sehr nahe bei 0.

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Herstellung des Monocoques mit einer CFK-Negativform ist, dass nach dem Aushärteprozess beim Abkühlvorgang keine inneren Spannungen durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung zwischen Form und Bauteil resultieren.

Ein weiterer Nebeneffekt ist, dass während der echten Monocoquefertigung nicht mit schweren Ureol oder Aluminiumwerkzeugen hantiert werden muss.

Positivform

Die spätere Negativform soll aus vier Hauptformen bestehen. Daher benötigt man ebenso vier Positivformen. Diese sind in **Abbildung 7-1** bis **Abbildung 7-3** dargestellt.

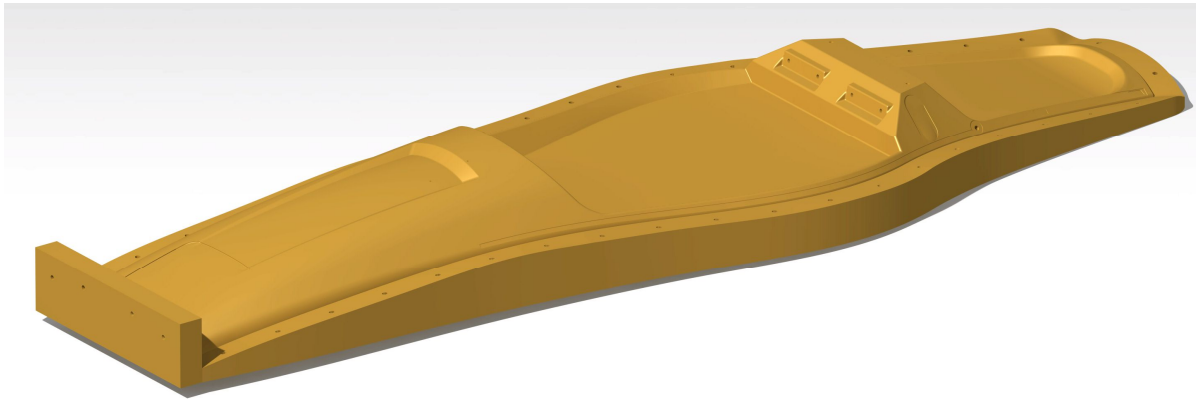


Abbildung 7-1: obere Positivform

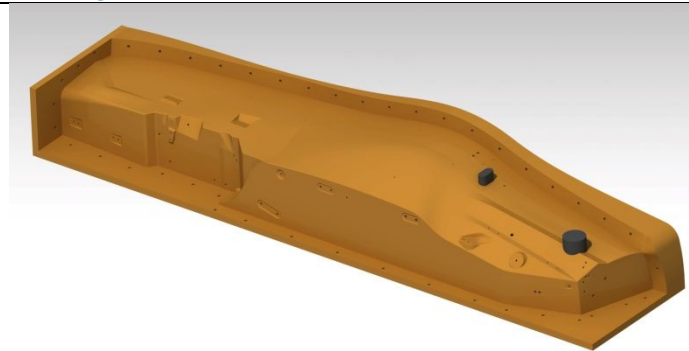


Abbildung 7-2: linke untere Positivform (Losteile in Grau)

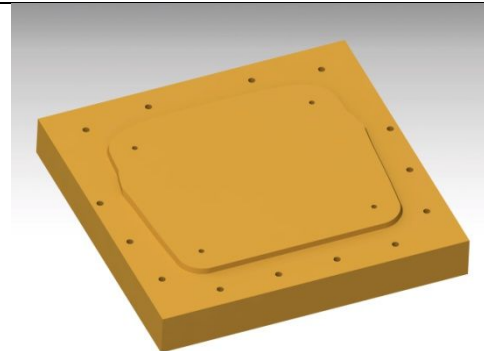


Abbildung 7-3: vordere Positivform

Die vierte Form ist eine Spiegelung der linken unteren Positivform. Bei allen Formen muss auf die Entformbarkeit geachtet werden. Daher muss bei den inneren Flanschflächen mit Losteilen (**Abbildung 7-2**: dunkelgrau) gearbeitet werden. Diese Losteile werden sowohl in der Positiv- als auch in der Negativform benötigt. Die endgültige Endformbarkeit kann mittels Reflexionslinien in Catia geprüft werden.

Zudem muss die Positivform so skaliert werden, dass das Monocoque das entsprechende Endmaß erreicht. Die Positivform soll aus Blockmaterial (MB0720) der Firma Rampf hergestellt werden. Dabei handelt es sich um Polyurethan bzw. Ureol. Als Material für die Negativform soll Werkzeugprepreg von Amber Composites, nämlich Multipreg HX50, verwendet werden. Dieses Werkzeugmaterial besitzt ein Harzsystem, das bei Temperaturen ab 40°C aushärtet. Dies hat den Vorteil, dass die Wärmeausdehnung beim Aushärteprozess nur sehr gering ist. Unter Berücksichtigung aller Faktoren wird die Positivform mit einem Skalierungsfaktor von 0,9995 beaufschlagt.

Des Weiteren muss die Positivform bereits alle Bohrungen, die im Monocoque nach der Herstellung vorhanden sein sollen, aufweisen. Dies umfasst sämtliche Bohrungen für das Fahrwerk und Anbindungen versteifender Bauteile. Es wurde entschieden, dass die Bohrungen bereits in die Form integriert werden, da eine spätere Nachbearbeitung mit

spanabhebenden Verfahren zu Delamination, Splitterungen, Ausfransungen oder anderen Laminatschädigungen führen kann und durch die Integration der Bohrungen in die Form eine hohe Maßhaltigkeit gewährleistet wird.

7.1.2. Lagenaufbauplan

Negativform

Der Lagenaufbauplan(plybook) für die Negativform ist im Anhang zu finden.

Monocoque

Der Lagenaufbau wurde bereits in der Berechnung erklärt. Der detaillierte Aufbau(Plybook) ist ebenfalls im Anhang zu finden. Zusätzlich zum Lagenaufbauplan müssen Zuschnitte der Lagen angefertigt werden. Dies wird in Catia mit Abwicklungen realisiert und kann in AutoCAD nachbearbeitet werden. Es wird darauf geachtet, dass die maximalen Verzerrungen bei den Abwicklungen nicht größer als 7% sind. Die Überlappungen der ersten Schicht werden mit 20mm ausgeführt, in allen anderen Schichten mit 10mm. Ein Beispiel eines Zuschnittes kann in **Abbildung 7-4** gesehen werden. Diese Geometrie kann an eine automatische Prepreg-Schneidemaschine(Cutter) übergeben werden, sodass diese Lagenzuschnitte für den Laminierprozess herstellen kann.

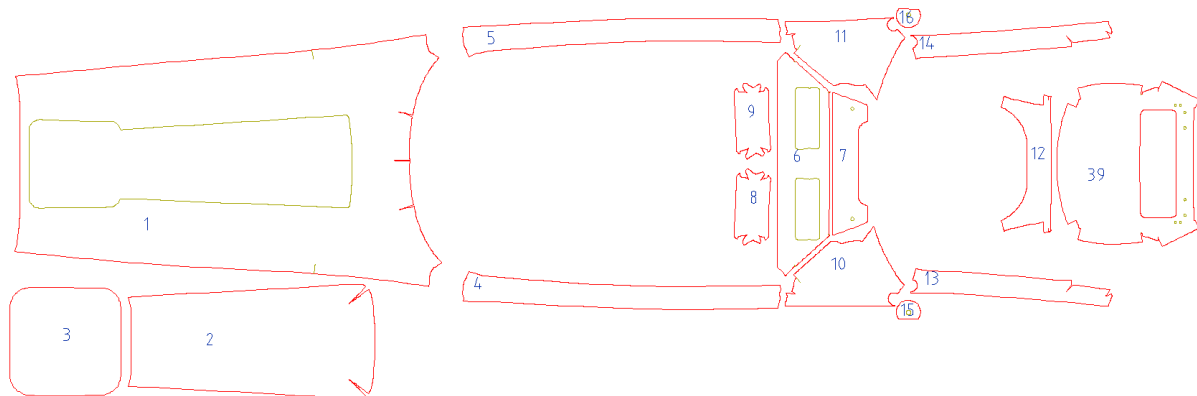


Abbildung 7-4: Lagenzuschnitt für die obere Form

7.2. Fertigung

Die Fertigung aller Carbonteile erfolgte bei Peak Technology GmbH.

7.2.1. Positivform

Zwei der vier Positivformen können in den unteren Abbildungen gesehen werden. In **Abbildung 7-5** ist die obere Positivform direkt nach dem Fräsprozess zu erkennen. In

Abbildung 7-6 ist die bereits nachgearbeitete, untere linke Positivform kurz vor dem Laminationsprozess dargestellt. Diese wurde bereits geschliffen und mit einer Oberflächenversiegelung behandelt. Zusätzlich sind bereits die Passstifte assembliert worden.



Abbildung 7-5: obere Positivform nach dem Fräsprozess



Abbildung 7-6: linke, untere Positivform kurz vorm Laminationsprozess

7.2.2. Negativform

Die aus den Positivformen hergestellten CFK-Negativformen sind in **Abbildung 7-7** dargestellt.



Abbildung 7-7: CFK-Negativform

7.2.3. Monocoque

Das Endprodukt nach dem Fertigungsprozesses ist in **Abbildung 7-8** dargestellt. Diverse Nacharbeiten, wie die Entfernung von überstehenden Rändern, müssen anschließend durchgeführt werden.



Abbildung 7-8: Endprodukt: Monocoque

Die gemessene Gesamtmasse des Monocoques inklusive vorderem Überrollbügel beträgt 20,5kg.

8. Validierung

Die Validierung erfolgt durch eine experimentelle Modalanalyse mit Hilfe eines Sponsors. Aufgrund der Verschwiegenheitspflicht können nicht alle Details der Messung bekannt gegeben werden. Daher sind genaue Daten der Geräte, Auswertungsalgorithmen und ähnliches nicht genauer erklärt bzw. behandelt.

8.1. Information

8.1.1. Funktionsweise

Bei dieser Messmethode handelt es sich um eine Versuchsdurchführung, bei der die statische und dynamische Torsionssteifigkeit eines Chassis durch experimentelle Modalanalysen bestimmt werden kann.

Die dynamische Torsionssteifigkeit wird dabei so ermittelt, dass das zu vermessende Objekt elastisch aufgehängt wird. Danach müssen an den vier auszuwertenden Punkten(Rockerpunkte) Beschleunigungssensoren angebracht werden. Wird nun einer der vier Punkte in Schwingung versetzt, kann durch Auswertung der Daten der Sensoren die Übertragungsfunktion zwischen den Messpunkten bestimmt werden. Wird an jedem der vier Punkte nacheinander eine Schwingungsanalyse mit Berechnung der Übertragungsfunktion durchgeführt, so können 16 Übertragungsfunktionen bestimmt werden, mit denen die dynamische Torsionssteifigkeit berechnet werden kann. Dabei wird die dynamische Torsionssteifigkeit des Chassis in einem niedrigen Frequenzbereich ermittelt. Je nach Qualität und Randbedingungen der Messung kann der Frequenzbereich leicht variieren, in diesem Fall geht der Bereich von 30 - 150Hz. Die statische Torsionssteifigkeit (bei 0Hz) kann durch Extrapolation der dynamischen Steifigkeit ermittelt werden. Die Extrapolation ist notwendig, da bei niedrigen Frequenzen die Starrkörpermodes auftreten und außerdem die Sensoren für diesen Frequenzbereich eine geringere Genauigkeit aufweisen.(siehe [13])

Hervorzuheben ist, dass bei diesem Versuchsaufbau keine fiktive neutrale Faser durch Randbedingungen vorgegeben wird.

8.1.2. Ziel

Ziel der Messung ist, die statische und dynamische Torsionssteifigkeit sowie die Eigenfrequenzen des Monocoques zu bestimmen.

8.2. Arbeitsgegenstand

Das Monocoque(**Abbildung 8-1**) wurde mit folgenden Anbauteilen gemessen:

- vorderer Überrollbügel
- hinterer Überrollbügel
- Crashbox mit Anti-Intrusion-Plate

Zusätzlich wurden zwei verschiedene Messungen durchgeführt einmal mit und einmal ohne Versteifungskreuz (Spider) im Motorraum.

Die Gesamtmasse bei der Versuchsdurchführung betrug 27,70 kg mit Versteifungskreuz(**Abbildung 8-1**) und 27,20kg ohne Versteifungskreuz.



Abbildung 8-1: Monocoque inklusiver Anbauteile

8.3. Messaufbau

In **Abbildung 8-2** ist der Messaufbau zu erkennen. Dieser besteht aus einem Rahmen an dem das Messobjekt elastisch aufgehängt ist. Die Schwingungserzeuger(Shaker) sind mittels eines sehr steifen und gleichzeitig spröden Klebers mit dem Messobjekt verbunden. Dabei wird durch die dazwischenliegenden Sensoren die Beschleunigung gemessen. Zusätzlich befinden

sich noch separate, präzisere Beschleunigungssensoren neben den Shaker-Anbindungspunkten. Die Shaker und Sensoren sind mit der Messelektronik verbunden um die Signale digital aufzeichnen und auswerten zu können.

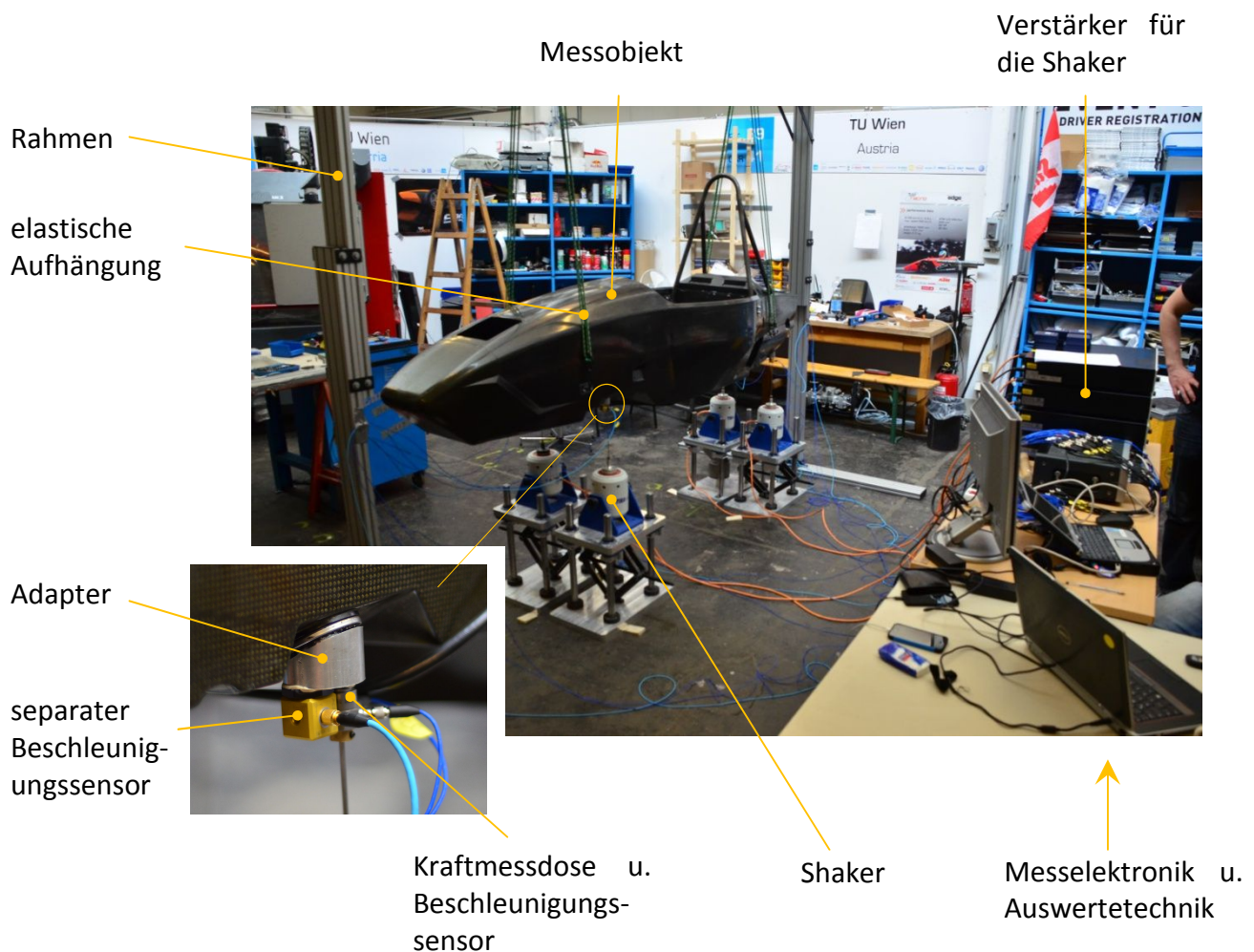


Abbildung 8-2: Messaufbau

8.4. Messdurchführung

8.4.1. Messaufbau

- Montieren folgender, für die Messung benötigter Anbauteile:
 - Anschlagmittel für die elastische Aufhängung
 - Adapter zur Befestigung der Shaker
- Aufhängen des Messobjektes mittels elastischer Gummibänder an den Rahmen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Gummibänder im elastischen Bereich bleiben.

- Die elastischen Bänder so anpassen, dass das Chassis sowohl in Fahrzeuglängsachse als auch in Fahrzeugquerachse waagrecht hängt.
- Shakerhöhe so anpassen, dass zwischen Adapterstück am Monocoque und Shaker inklusive Adapterspitze und Kraftmessdose bzw. Beschleunigungsaufnehmer ein Spalt von 1-2mm verbleibt.
- Shaker direkt unter die Monocoqueadapter platzieren, sodass die Krafteinleitung mittig in den Monocoqueadapter in Fahrzeugquerrichtung eingeleitet wird und dass vor der Kraftmessdose ein zusätzlicher, genauerer Beschleunigungssensor angebracht werden kann.
- 2-Komponentenkleber mischen
- Während der Topfzeit des Klebers Monocoque und Shaker verkleben, hierbei jeweils die beiden vorderen und hinteren Verbindungsstellen gleichzeitig verkleben.
- Verkleben der zusätzlichen Beschleunigungssensoren auf den Monocoqueadapter fluchtend mit der Kraftmessdose in Fahrzeugquerrichtung und in Fahrzeuglängsrichtung vor den jeweiligen Kraftmessdosen.
- Anschließen aller Sensoren und Shaker an die Aufzeichen- bzw. Auswerteelektronik.
- Vermessung der Abstände zwischen den Krafteinleitungspunkten der Shaker in Fahrzeugquerrichtung von Vorder- und Hinterachse.

8.4.2. Messung

Die Messdurchführung der Eigenfrequenzen kann nach dem Messaufbau gestartet werden. Für die Umrechnung der Frequenzen auf die Torsionssteifigkeit muss noch der Abstand zwischen den Krafteinleitungspunkten in Fahrzeugquerrichtung in Matlab eingegeben werden.

Es wurden zwei verschiedene Messkonfigurationen durchgeführt. Im ersten Schritt wurde das Chassis mit Versteifungskreuz(Spider) getestet im zweiten Schritt ohne Versteifungskreuz.

8.5. Daten und deren Auswertung

Die Auswertung der Daten wurde vom Sponsor durchgeführt.

8.5.1. Geometriedaten

Shaker-Abstand:

- y-Abstand vorne: 371mm
- y-Abstand hinten: 315mm

8.5.2. Auswertung

In **Abbildung 8-3** sind die Messkurven (grün, blau) dargestellt. Des Weiteren sind die aus den Daten extrapolierten Verläufe (schwarz, rot) dargestellt. Diese dienen zur Ermittlung der statischen Torsionssteifigkeit (Steifigkeit bei 0 Hz).

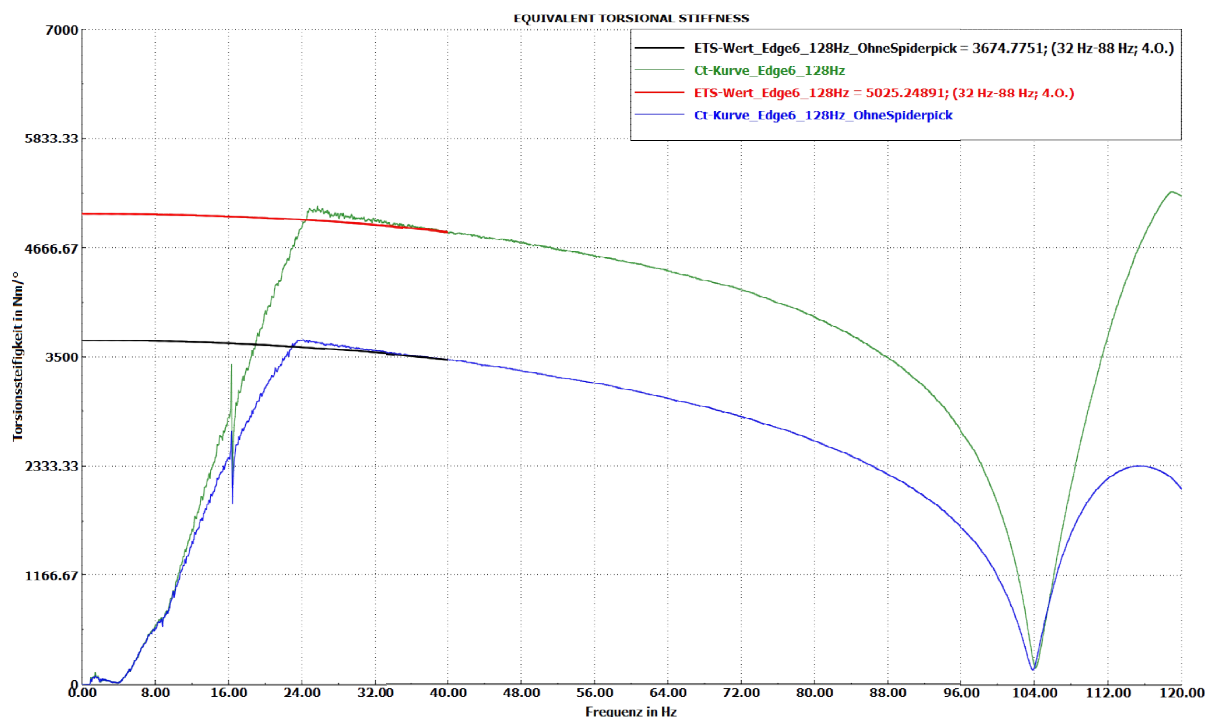


Abbildung 8-3: Extrapolation der Torsionssteifigkeit am Monocoque (Edge 6) ohne und mit Versteifungskreuz

Die für die Validierung wichtigen Daten sind in **Tabelle 8-1** zusammengefasst.

	1. Torsionseigenfrequenz	Statische Torsionssteifigkeit Messtoleranz: ca. +/- 50 Nm/°
	Hz	Nm/°
MC mit Versteifungskreuz	104,2	5025
MC ohne Versteifungskreuz	103,8	3675

Tabelle 8-1: gemessene Torsionseigenfrequenz und Torsionssteifigkeit

8.5.3. Vergleich mit den FEM-Daten

Ein Vergleich der Daten ist in **Tabelle 8-2** zu sehen. Die Werte beziehen sich dabei auf die Torsionssteifigkeit am Monocoque bei Belastung der Rockerpunkte. Es wurden dabei alle versteifende Anbauteile, also Anti Intrusion Plate, vorderer und hinterer Überrollbügel und das Versteifungskreuz, mitsimuliert.

	1. Torsionseigenfrequenz		Diff.	Statische Torsionssteifigkeit		Diff.
	Hz		%	Nm/°		%
	Versuch	FEM-Modell		Versuch	FEM-Modell	
Monocoque	104,2	99,957	-4,07	5025	4712	-6,23

Tabelle 8-2: Vergleich: Versuch und FE-Modell

Man erkennt, dass in der FE-Berechnung sowohl die Torsionseigenfrequenz als auch die statische Torsionssteifigkeit unter den Versuchsmesswerten liegen. Die maximale Abweichung liegt bei ca. 6%.

9. Zusammenfassung und Ausblick

9.1. Zusammenfassung

In der Arbeit wurde der komplette Ablauf von der Konzeption bis zur Validierung am fertigen Objekt aufgezeigt. In den ersten Abschnitten konnten die wichtigsten Punkte der Konzeption und Konstruktion dargelegt werden. Ein großer Teil der Arbeit befasste sich mit der Berechnung und speziell mit der Optimierung des Lagenaufbaus um eine Massereduktion zu erreichen. Im Anschluss an die Fertigung wurden die Berechnungsergebnisse mit Hilfe einer experimentellen Modalanalyse validiert.

Die wichtigsten Anforderungen konnten erfüllt werden. Die Gesamtfunktion ist durch das Monocoque nicht beeinträchtigt. Die Fahrer sind mit der Sitzposition und speziell mit der Sicht äußerst zufrieden. Das Rennfahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine besitzt eine Gesamtmassenverteilung von 52,77%(Ziel: 52-54%) hecklastig. Einziges Manko ist, dass die Gesamtfahrzeugmasse von max. 165kg nicht ganz erreicht wurde.

Das Monocoque mit optimierten Laminataufbau inklusive vorderem Überrollbügel wiegt gemessene 20,5kg. Die berechneten Torsionssteifigkeiten betragen an den Radaufstandspunkten mit real-elastischem Fahrwerk 1301 Nm/°, mit steifem Fahrwerk 1751Nm/° und am Knotenpfad am Monocoque 4712 Nm/°. Die Messergebnisse der experimentellen Modalanalyse zeigen auf, dass die berechnete Torsionssteifigkeit am Knotenpfad am Monocoque rund 6% unter den realen Werten liegen. Dies lässt darauf schließen, dass die reale Torsionssteifigkeit am Fahrwerk etwas höher als 1301Nm/° ist. Die reale Torsionssteifigkeit liegt also knapp unter der geforderten Steifigkeit von 1350-1400 Nm/°.

9.2. Ausblick

Im Rahmen der Diplomarbeit konnten viele Erfahrungen gesammelt werden, die bei einer Neukonstruktion Beachtung finden sollten. In diesem Abschnitt werden Verbesserungsmöglichkeiten erläutert. Oberstes Ziel einer Neukonstruktion ist die Verbesserung des Bestehenden.

Eine Verbesserung kann durch Massereduktion bei gleichen Anforderungen erreicht werden. Die Konstruktionsdaten des vorhandenen Rennfahrzeuges in Monocoquebauweise können dazu genutzt werden, kompaktere Lösungen auszuarbeiten. So kann das Monocoque am vorderen Ende gekürzt werden, ohne das Probleme mit der Pedalbox oder ähnlichem resultieren. Gleichzeitig kann durch die vorhandenen Abmessungen der Pedalbox die Fläche der Anti Intrusion Plate verkleinert werden. Dies bedeutet eine Masseneinsparung sowohl am Monocoque als auch an der 4mm dicken, aus Aluminium gefertigten, Anti Intrusion Plate.

Des Weiteren resultiert aus der Torsionssteifigkeitsberechnung, dass die vordere Rundung der Fahreröffnung stark beansprucht ist. Dies führte in der Optimierung in diesem Bereich zu einer, in der Zukunft vermeidbaren, erhöhten UD-Lagenanzahl. Hier sollte darauf Acht gegeben werden, dass die Rundung größtmöglich ausgeführt wird. Die maximale Größe ist dabei durch den benötigten Platz für die Hände des Fahrers und das Template begrenzt.

Beide Überrollbügel stellen ein großes Einsparungspotential dar, da sie eine relativ große Masse besitzen, ohne dass sie einen signifikanten Beitrag zur Steifigkeit liefern. Die Masse des vorderen Überrollbügels kann durch Materialsubstitution auf Aluminium reduziert werden. Hier müssen jedoch besondere Maßnahmen aufgrund des großen Unterschiedes im Wärmeausdehnungskoeffizienten ergriffen werden. Der hintere Überrollbügel sollte, wie auch in der Ursprungs konstruktion realisiert, so kurz und schmal wie möglich ausgeführt werden.

Fertigungstechnisch ist zu erwähnen, dass die steilen Fahrwerkspunkterhebungen gepaart mit kleinen Radien nicht ideal sind. Es wird ein Mindestradius von 5mm mit einem möglichst flachen Übergang empfohlen. Hier sollte darauf aufgepasst werden, dass auf der Innenseite ausreichend Platz für die hintere Verstärkungsplatte und die Muttern bleibt. Hier kann für einen idealen Übergang zum restlichen Kern mit dem Gedanken gespielt werden, einen gefrästen Schaumkern um die Inserts zu verwenden.

Die Modellannahmen und Lastfälle des Fahrwerks, insbesondere die Ausführung eines real-elastischen oder eines steifen Fahrwerks, sollten mit dem Fahrwerksingenieur genau diskutiert und umgesetzt werden.

Die grundsätzliche Optimierungsstrategie kann beibehalten werden. Es sollte jedoch darauf Acht gegeben werden, dass für die Optimierung keine 3D-modellierten Kerne verwendet werden, da diese Modellierungsstrategie die Berechnungszeit enorm erhöhen würde. Ein reines Schalenmodell wird empfohlen. Geforderte physikalische Tests sollten möglichst früh durchgeführt werden um zeitaufwändige Anpassungsarbeiten bzw. neue Optimierungen zu vermeiden.

Ergibt sich in Zukunft nochmals die Möglichkeit mit Hilfe der experimentellen Modalanalyse die Torsionssteifigkeit zu ermitteln, so sollten vier zusätzliche Beschleunigungssensoren über den Rockerpunkten am simulierten Torsionspfad angebracht werden. Dadurch kann eine exaktere Vergleichsberechnung realisiert werden.

10. Verzeichnisse

10.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: 3D-Modell der Sitzbox	8
Abbildung 4-2: Sitzbox: Rohgestell.....	9
Abbildung 4-3: Sitzbox: Vermessungsarbeiten	9
Abbildung 4-4: Sitzbox: Schulterbereichsvermessung	10
Abbildung 4-5: Sitzbox: Datenoutput: für den größten Fahrer (Abmessungen in mm)	10
Abbildung 4-6: Sitzkiste: 3D-Daten	11
Abbildung 4-7: Packaging	13
Abbildung 4-8: Entwurfsskizzen von Mag. Renate Leitner.....	15
Abbildung 4-9: Seitenriss: Motor - KTM LC4	19
Abbildung 5-1: erster Entwurf.....	20
Abbildung 5-2: vorderes Fahrwerk.....	21
Abbildung 5-3: fertiges Monocoque	22
Abbildung 5-4: fertiges Monocoque in Zusammenspiel mit den anderen Bauteilen	22
Abbildung 5-5: fertiges Monocoque in Zusammenspiel mit den anderen Bauteilen	23
Abbildung 5-6: Schnittmodell mit Fahrer	23
Abbildung 5-7: Fahrersicht bei einer Körpergröße von 1,86m	24
Abbildung 5-8: Seitensicht bei einer Körpergröße von 1,86m	25
Abbildung 5-9: Fahrersicht bei einer Körpergröße von 1,70m	25
Abbildung 5-10: Fahrerzellenöffnung	25
Abbildung 5-11: Motorausbau	26
Abbildung 5-12: Wartungslücke.....	26
Abbildung 5-13: Überrollbügelintegration	27
Abbildung 5-14: Inserts	28
Abbildung 5-15: geschweißte Gurtanbindung	29
Abbildung 5-16: gesamte Oberschenkel-Gurtanbindung	29
Abbildung 5-17: Keensert [3]	29
Abbildung 5-18: vordere Motoranbindung, Abgaskrümm- und Kühlerdurchführung	30
Abbildung 5-19: hintere Differentialhalterungsanbindung.....	30
Abbildung 6-1: Aufbereitete Geometrie vor dem Vernetzen	40
Abbildung 6-2: FE-Gesamtmodell	41
Abbildung 6-3: Diskretisierung des Monocoques	42
Abbildung 6-4: Diskretisierung des Rohacellkern, Gesamtansicht.....	43
Abbildung 6-5: Diskretisierung des RHCKerns, Detailansicht	43
Abbildung 6-6: Modellierung der Klebeverbindung.....	43
Abbildung 6-7: Modellierung des vorderen Fahrwerks	44
Abbildung 6-8: Modellierung des hinteren Fahrwerks	44
Abbildung 6-9: Diskretisierung der Überrollbügel	45
Abbildung 6-10: Modellierung der Klebeverbindung.....	45
Abbildung 6-11: Diskretisierung der vorderen Schutzplatte.....	46
Abbildung 6-12: Diskretisierung des Versteifungskreuzes	46
Abbildung 6-13: Elementnormalen	47
Abbildung 6-14: Materialorientierung des Monocoques.....	48
Abbildung 6-15: Materialorientierung des Oberflächennetzes des RHC-Kernes.....	48
Abbildung 6-16: Modell mit Kraftaufbringung unter Inertial Relief.....	51
Abbildung 6-17: Wandstärkenverteilung nach der Optimierung des isotropen Schalenmodells.....	54
Abbildung 6-18: Histogramm: Optimierung des isotropen Schalenmodells.....	54
Abbildung 6-19: CAD-Modell der UD-Verstärkungszonen	55
Abbildung 6-20: CAD-Modell	61
Abbildung 6-21: FEM-Modell	61
Abbildung 6-22: Orientierung der Hilfskoordinatensysteme	62
Abbildung 6-23: Verstärkungslagen des RHC-Kernes und der Flanschflächen	62
Abbildung 6-24: Insert-Gewebeverstärkungslagen.....	63

Abbildung 6-25: SES-Verstärkungslagen	63
Abbildung 6-26: knochenförmiges Insert.....	63
Abbildung 6-27: FE-Modell: CFK-Inserts	63
Abbildung 6-28: Aluminiumwabe, Dicke: 10mm	64
Abbildung 6-29: Aluminiumwabe, Dicke: 14mm	64
Abbildung 6-30: Aluminiumwabe, Dicke: 24mm	64
Abbildung 6-31: RHC-Kern, Dicke: 24mm	64
Abbildung 6-32: Optimierte Lagendicke der vorderen UD-Verstärkungslagen	65
Abbildung 6-33: Optimierte Lagendicke der hinteren unteren UD-Verstärkungslagen	65
Abbildung 6-34: notwendige Verstärkungslagen	65
Abbildung 6-35: Histogramm der Free-Size-Optimierung.....	66
Abbildung 6-36: Torsionswinkel entlang des Monocoques	71
Abbildung 6-37: z-Verschiebungsanalyse.....	72
Abbildung 6-38: Versagensindex des kritischen Lastfalles.....	73
Abbildung 6-39: Laststeigerungsfaktor des kritischen Lastfalles	73
Abbildung 6-40: Torsionspfad	74
Abbildung 7-1: obere Positivform	77
Abbildung 7-2: linke untere Positivform (Losteile in Grau).....	77
Abbildung 7-3: vordere Positivform	77
Abbildung 7-4: Lagenzuschnitt für die oberer Form	78
Abbildung 7-5: obere Positivform nach dem Fräsprozess	79
Abbildung 7-6: linke, untere Positivform kurz vorm Laminationsprozess	79
Abbildung 7-7: CFK-Negativform	79
Abbildung 7-8: Endprodukt: Monocoque	80
Abbildung 8-1: Monocoque inklusiver Anbauteile.....	82
Abbildung 8-2: Messaufbau	83
Abbildung 8-3: Extrapolation der Torsionssteifigkeit am Monocoque(Edge 6) ohne und mit Versteifungskreuz	85

10.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Fahrzeugrahmenkonzepte im Vergleich.....	6
Tabelle 6-1: Materialdaten: S235JR[4].....	35
Tabelle 6-2: Materialdaten: X5CrNi18-10 [4]	35
Tabelle 6-3: Materialdaten: EN-AW-7075 T6[4].....	35
Tabelle 6-4: Materialdaten: Epoxidharz [5]	35
Tabelle 6-5: Materialdaten: T800-Gewebe [6].....	36
Tabelle 6-6: verwendete Materialdaten: T800-Gewebe.....	36
Tabelle 6-7: Materialdaten: M46J UD, MTM49-3/M46J(12K)-150-35% [8]	37
Tabelle 6-8: verwendete Materialdaten: M46J-UD	37
Tabelle 6-9: Materialdaten: Aluminium-Flexcore, Hexcel 5052/F40 - .0019 3.1 [9]	37
Tabelle 6-10: Materialdaten: Aluminiumhoneycomb, Axson AAA-4.5-1/8-10N-5052[10]	38
Tabelle 6-11: Materialdaten: Aluminiumhoneycomb, AAC-3.7-3/8-25N-3003[11].....	38
Tabelle 6-12: Materialdaten: Rohacell 71 IG-F[12]	38
Tabelle 6-13: verwendete Materialdaten: Rohacell 71 IG-F	39
Tabelle 6-14: Elementeigenschaften des Fahrwerks	44
Tabelle 6-15: Lastfall für die Steifigkeitsüberprüfung (Reifenlatsch)	49
Tabelle 6-16: Lastfall für die Steifigkeitsüberprüfung (Rocker).....	50
Tabelle 6-17: Lastfälle für die Festigkeitsüberprüfung.....	52
Tabelle 6-18: Ergebnisse der Vorauslegung	59
Tabelle 6-19: Zusammenfassung nach der Free-Size-Optimierung	66
Tabelle 6-20: Vergleich nach der Neuberechnung.....	67
Tabelle 6-21: Zusammenfassung der verschiedenen Modelle.....	70
Tabelle 6-22: Ergebnisse des Fehlerindexes und des Lasterhöhungsfaktors gegen First Ply Failure nach Tsai-Wu	72
Tabelle 6-23: Eigenfrequenzen	74
Tabelle 6-24: Massen und Massenmittelpunktkoordinaten des Berechnungsmodells	75

Tabelle 8-1: gemessene Torsionseigenfrequenz und Torsionssteifigkeit	85
Tabelle 8-2: Vergleich: Versuch und FE-Modell	86

10.3. Literaturverzeichnis

- [1]. **Trzesniowski, Michael.** *Rennwagentechnik*. Graz : Springer Vieweg, 2012. S. 843. Bd. 3. . ISBN: 978-3-8348-1779-2.
- [2]. **Roloff/Matek.** *Maschinenelemente*. Wiesbaden : Viewegs Fachbücher der Technik, 2005. Bd. 17. ISBN: 3-528-17028-X.
- [3]. **KVT-fastening.** [Online] 07. Feb 2015. <http://www.kvt-fastening.at/produkte/marken/keenserts/>.
- [4]. **Feldhusen, K.-H. Grote und J. DUBBEL.** Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. Bd. 22., Anh. E1 Tab.1, E3 Tab.18c. ISBN: 978-3-540-49714-1.
- [5]. **Schürmann, Helmut.** *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. Tabelle 4.7. ISBN 978-3-540-72190-1.
- [6]. **Advanced Composite Group.** *MTM49-3/CF1218 Fabric/ T800*. 24. Jänner 2000. Datenblatt.
- [7]. **Skrna-Jakl, I.C.** Auslegung von Composite-Strukturen. *Übungsbehef*. Wien : TU-Wien/ILSB, Mär 2014.
- [8]. **Cytec Industrial Materials.** MTM® 49-3, PDS1258_07.13_Issue2c. [Online] 2012.
- [9]. **Hexcel - Composite Materials.** [Online] Okt 2014. [Zitat vom: 15. Mär 2015.] Datenblatt. <http://www.hexcel.com/Resources/honeycomb-data-sheets>.
- [10]. **AmberComposites.** *ALUMINIUM HONEYCOMB - AEROSPACE GRADE*. Mai 2013. Datenblatt. Issue Ref: PDS/AAA/07.
- [11]. **TRIPAN - Leichtbauteile.** *Honeycomb 3000 Alloy Series*. Wien : s.n., 24. Mär 2015. Datenblatt laut Hersteller.
- [12]. **Evonik Industries - Rohacell.** [Online] [Zitat vom: 23. Mär 2015.] <http://www.rohacell.com/product/rohacell/en/products-services/rohacell-ig-ig-f>.
- [13]. **J. Helsen, L. Cremers, P. Mas, P. Sas.** *Global static and dynamic car body stiffness based on a single experimental modal analysis test*. 2010. Veröffentlichung von der ISMA2010 und USD2010.
- [14]. **Skrna-Jakl, I.C.** Leichtbau mit faserverstärkten Kunststoffen. *Vorlesungsunterlagen*. Wien : TU-Wien/ILSB, 2013.

11. Anhang

11.1. Lagenaufbauplan: Negativform

11.2. Lagenaufbauplan: Monocoque



Plybook

Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_001_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	Negativform Monocoque	Datum: <i>Created on:</i>	31.12.2012

Step:	1	2	3	DEBULK			4	5	6	7	8	10
Winkel:	+/-45°	0/90°	0°				+/-45°	0/90°	+/-45°	Assemble: Bundbohr- buchsen (BBB)	-	0/90°
Material:	C200	C200	Roving				2x C650	2x C650	C200		3xC200	2x C650
Bemerkung:	entlang allen Kanten; Breite: 20mm		In allen Kanten						Verstärkungs- ring um Pins		Verstärkungs- ring um BBB	
Page:		3					3	3	4	4	4	3

Step:	11	12	13
Winkel:	+/-45°	0/90°	CURE
Material:	2x C650	C200	
Bemerkung:			
Page:	3	3	

Material	Art Nr.:	descripten
C200	T153010014	Amber Composites - PREPREG HX50C; 200gsm
C650	T153010018	Amber Composites - PREPREG HX50C; 650gsm 12K

moulds	Art Nr.:	descripten preparation
Formen moulds		Ureol MC-Formen (4 Stück) Reinigen + Freecote
Losteile attached parts		Aluminium-Losteile (5 Stück) Reinigen + Freecote

Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_001_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	Negativform Monocoque	Datum: <i>Created on:</i>	31.12.2012

Formen moulds

001

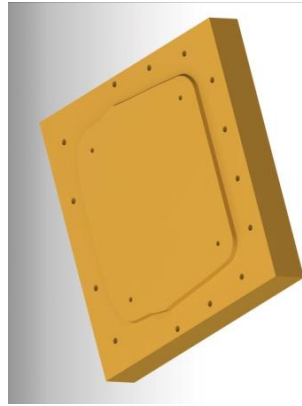


002

(003, Symmetrie vom 002)



004



Losteile attached parts

- 5 Losteile:
- 2x Losteil_Dif-achse
 - 1x Losteil_Wasserrohre
 - 1x Losteil_Auspuffrohr
 - 1x Losteil_Diff-öffnung



Überblick über die Formen Overview: moulds

Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_001_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	Negativform Monocoque	Datum: <i>Created on:</i>	31.12.2012

Achtung:

- Lagen mittels Quadrate (ca. 310x310mm, Größe richtet sich nach dem kleinsten Verschnitt) laminieren
- Flächen: gesamte Monocoquefläche+Flanschflächen (Beispielbild siehe unten, Passtifte und Lasteile davor zusammenbauen)
- stoßversetzt laminieren, keine Überlappungen



12	C200	0,23	0/90°	
11	C650	0,62	+/-45°	
10	C650	0,62	0/90°	
5	C650	0,62	0/90°	
4	C650	0,62	+/-45°	
2	C200	0,23	0/90°	
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark

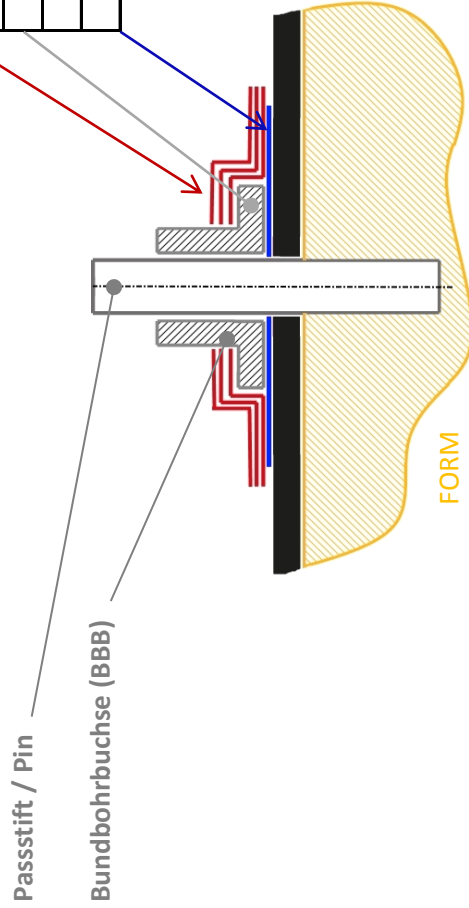


Produktionsanweisung - Laminate Manual

Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_001_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	Negativform Monocoque	Datum: <i>Created on:</i>	31.12.2012

8.3	+/-45°	C200
8.2	0/90°	C200
8.1	0/90°	C200
7	Assemble BBB	
6	+/-45°	C200
Schritt	Richtung	Material

+z
↕
-z



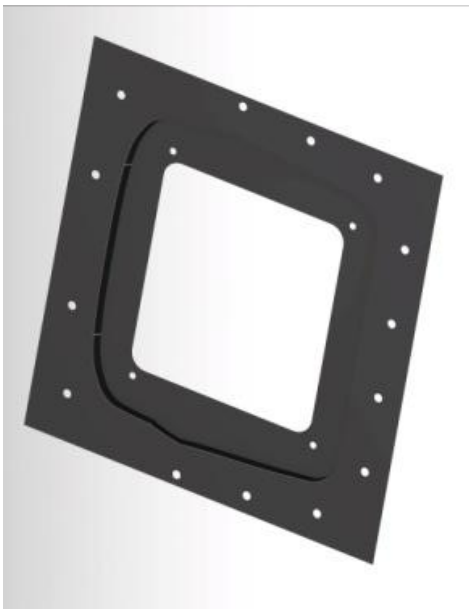
8	3xC200	0,23	-	Verstärkungsring um BBB
7	Assemble Bundbohrbuchse			Verstärkungsring um Pins
6	C200	0,23	+/-45°	Verstärkungsring um Pins
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

Plybook											
TUW RACING VIENNA FORMULA TEAM				Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i> 02_01_002_PLB			Ersteller: <i>Author:</i> Mark Hölzl				
Bauteilbezeichnung: <i>partname:</i> TUW-Monocoque 2014				Datum: <i>Created on:</i> 10.01.2014							
Step:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Angle:	Assemble mould_MC_bottom	+/-45°	0°	0°	0/90°	quasi	quasi	0/90°	0°	0/90°	
Material:	T800	T800	Roving	M46J	T800	4xT800	6xT800	T800	M46J	4xT800	
Note:	Layer 1 global	Layer 1 global	edges	UD-reinf	Pickup Points	belt reinf.	SES-AIP	SES-drivercell	SES-enginebay	Pickup Points	
Page:	6	7	-	8	9	10	11	12	13	9	
Step:	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Angle:	0°	+/-45°	Assemble moulds	CURE @6bar (PTX001)	Assemble firewall	quasi	quasi	-	0°	0°	
Material:	M46J	T800				2xT800	2xT800	FA	4xM46J	6xM46J	
Note:	UD-reinf	Layer 2 global				firewall integ.	firewall	RHC bulkhead	RHC bulkhead	RHC reinf.	
Page:	8	7	14	15	15	15	15	16	16	16	
Step:	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Angle:	Assemble RHC core	-	Assemble CFRP Inserts	quasi	-	Assemble front hoop	quasi	-	Assemble core	CURE @2bar (PTX005)	
Material:		FA		3xT800	FA		2xT800	FA			
Note:		CFRP inserts		CFRP inserts	front hoop		front hoop	global			
Page:	16	17	17	17	18	18	18	19	20, 21		
Step:	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Angle:	-	+/-45°	0°	quasi	quasi	0°	0/90°	quasi	quasi	0°	
Material:	FA	T800	M46J	T800	4xT800	M46J	T800	6xT800	T800	M46J	
Note:	global	Layer 3 global	UD-reinf	Pickup Points	belt reinf.	SES-enginebay	SES-drivercell	SES-AIP	Pickup Points	UD-reinf	
Page:	19	19	8	9	10	13	12	11	9	8	
Step:	DEBULK			42							
Angle:				CURE @2bar (PTX005)							
Material:											
Note:											
Page:											

Produktionsanweisung - Laminate Manual			
	Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>
	Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>
			Mark Hölzl 10.01.2014
material	Art Nr.:	descripten	
T800		T800 200gsm -MTM49-3/40% (fabric)	
M46J		MTM49-3 / M46J(12K)-150-35% (Unidirectional fibers)	
FA		UMESCO - MTA 240/PR13-188gsm (film adhesive)	
AH 10		AMBER - CR III - 5052 / F40.0013 - 3.1 10mm (flexcore aluminium honeycomb)	
AH 14		AXSON - AAA-4.5-1/8-10N-5052 14mm 8.1	
AH 24		Tripan 57kg/m², 9mm Zellgröße, 3083	
RHC		EVONIK - ROHACELL 71 IG/IG-F (foam)	
Roving		3 zusammengedrehte Faserbündel(3k)	
insert	Art Nr.:	descripten preparation	
CFRP-Inserts		CFK-Inserts (75 Stück, siehe Seite 4, 5) Sandstrahlen + Reinigen	
firewall		vorgefertigte firewall (1 Stück) AH10 + jeweils eine Deckschicht T800, +/-45°	
RHC-Kern		gefräster RHC-Kern (14 Stück) RHC trocknen lassen; 1 stunde bei 70-80°	
front hoop		geschweißter front hoop (1 Stück) Sandstrahlen + Reinigen	
moulds	Art Nr.:	descripten preparation	
MC moulds		Tooling CFK (4 Stück) Reinigen + Freecote	
attached parts		Aluminium-Lostteile (6 Stück) Reinigen + Freecote	

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

Produktionsanweisung - Laminate Manual				
	Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
	Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>	10.01.2014
Formen (4 Stück) mould_MC_top 		mould_MC_bottom_left (mould_MC_bottom_right gespiegelte Form) 		
mould_MC_front 		attached parts (6 Stück, gelb) 		
Überblick über die Formen und Losteile Overview: moulds and attached parts				

Produktionsanweisung - Laminate Manual				
	Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
	Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>	10.01.2014
Inserts (75 Stück, alle Inserts sind auf Seite 5 aufgelistet) 				
RHC-Kerne (Öffnung oben: 6 Stück + Batterie Öffnung: 2x4 Stück) 				
Front hoop (1 Stück) 				
001 				
002/003 				
004/005 				
006 				
Überblick über die Inserts, front hoop und gefrästen Kernen Overview: inserts, front hoop and cores				

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

TUV

RACING

VIENNA FORMULA TEAM

Produktionsanweisung - Laminate Manual

Zeichnungsnummer:
Drawing No.: 02_01_002_PLB

Ersteller:
Author: Mark Hölzl

Bauteilbezeichnung:
Partname: TUV-Monocoque 2014

Datum:
Created on: 10.01.2014

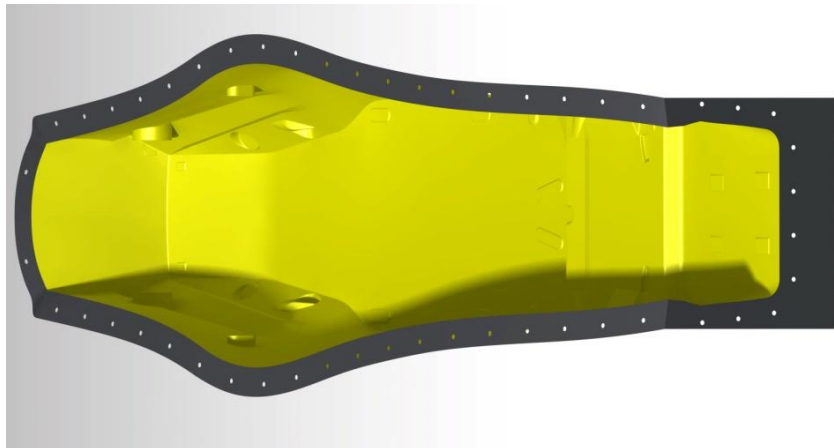
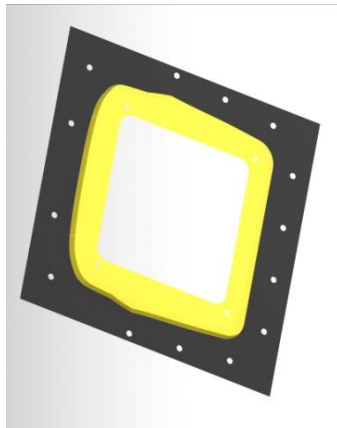
Ort	Durchgangsbohrung	Keensert	BBB	Form	3D Kontur	Anzahl	Innendurchmesser f. d.	Außendurchmesser	Dicke	Inseart-Gewinde	Bracket-gewinde	Gewicht
crash_box	JA		1	rund	eben	4	8	22	8			0.0039
dampfer_rear	JA		2	dreieckig	eben	2	3x5	12	8			0.0090
front_WB_rear_lower	JA		2		eben	2	2x5 und 8	16	8			0.0110
head_restraint	JA		1	rund	eben	2	8	16	8			0.0020
rear_WB_lower	JA		2	Langloch-förmig	eben	4	2x5	16	8			0.0060
tie-rod_rear	JA		2	Parallelogramm	eben	2	4x5	12	8			0.0060
undertray_front	JA		1	rund	eben	4	6	15	8			0.0020
undertray_rear		JA	1	rechteckig	eben	2	6	14x19	8 M5		M8x1,25 I:8	0.0030
WB_upper	JA		2		eben	8	4x5	16	8			0.0140
anti_submarine_belt	JA		1	rund	eben	4	8	24	10			0.0040
ARB_rear_left		JA	2	Viereck	JA annähernd eben	1	6		10 2xM5		M8 I:8	0.0060
ARB_rear_right		JA	2	Viereck	JA annähernd eben	1	6		10 2xM5		M8 I:8	0.0060
front_WB_front_lower	JA		2	Langloch-förmig	eben	2	2x5		10			0.0120
lap_belt	JA		2	Langloch-förmig	eben	2	8	20	10			0.0100
shoulder_belt	JA		2	Langloch-förmig	eben	2	6	20	10			0.0110
Steering_lower		JA	1	rund	eben	4	8	18	10 M6		M10x1,25 I:10	0.0040
ARB_front		JA	1	Langloch-förmig	eben	4	6	16	15 M5		M8 I:8	0.0100
brake_line	JA		1	rund	eben	2	10	20	15			0.0030
main_hoop_bracing	JA		1	rund	eben	2	10	25	15			0.0090
main_hoop_lower	JA		2	Langloch-förmig	eben	2	10	24	15			0.0300
Pedalbox_front		JA	2	eckig	eben	2	6		15 2xM8		M12 I:12	0.0300
Pedalbox_rear		JA	2	eckig	eben	2	6		15 2xM8		M12 I:12	0.0216
rear_wing		JA	0	Viereck	eben	4		12x30	15			0.0080
Rockers	JA		1	rund	eben	4	6	50	20			0.0310
main_hoop_upper_left	JA		2	Langloch-förmig	JA gekrümmt	1	9	22	25			0.0250
main_hoop_upper_right	JA		2	Langloch-förmig	JA gekrümmt	1	9	22	25			0.0250
Steering_strut_left		JA	2	rechteckig	JA gekrümmt	1	4		35 2xM6		M10 I:10	0.0340
Steering_strut_right		JA	2	rechteckig	JA gekrümmt	1	4		35 2xM6		M10 I:10	0.0340
engine_strut_upper_left	JA		1	rund	JA gekrümmt	1	8	26 ca. 15				0.0120
engine_strut_upper_right	JA		1	rund	JA gekrümmt	1	8	26 ca. 15				0.0120
Diffmount	JA		2	Spinne	JA annähernd eben	1						0.0740

Überblick über Inserts Overview: inserts

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

Produktionsanweisung - Laminate Manual			
	Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>
	Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>
			Mark Hölzl 10.01.2014
			
1	Assemble - mould_MC_bottom + attached parts		
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction
			Anmerkung Remark

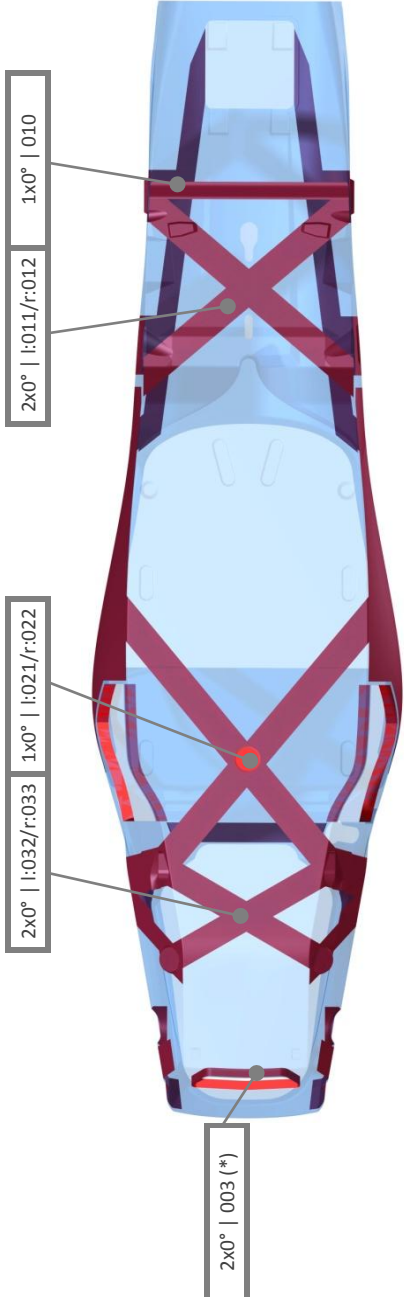
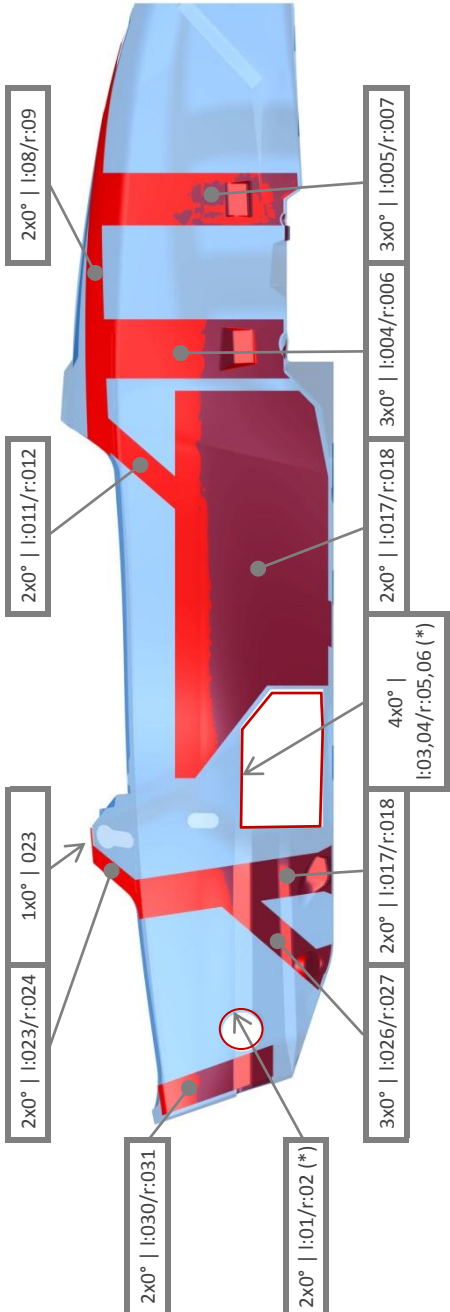
11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

TUW racing VIENNA FORMULA TEAM				Produktionsanweisung - Laminate Manual			
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB		Ersteller: <i>Author:</i>		Mark Hölzl	
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014		Datum: <i>Created on:</i>		10.01.2014	
							
							
12	T800	0,22	+/-45°	Layer 2 global - Laminieren bei getrennten Formen - stoßveretzt			
2	T800	0,22	+/-45°	Layer 1 global - Laminieren bei getrennten Formen - 20mm Überlappung			
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark			



Produktionsanweisung - Laminate Manual

Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>	10.01.2014



Info:

1x0° | l:101/r:102 (*)

AnzahlRichtung | links/rechts: Beschriftungsnummer (*)

(*)...nur für Schritt 4 und 11

Ausrichtung 0° bedeutet in Richtung der längeren Seite

40	M46J	0,148	0°	UD-reinforcement
33	M46J	0,148	0°	UD-reinforcement
11	M46J	0,148	0°	UD-reinforcement
4	M46J	0,148	0°	UD-reinforcement
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark



Produktionsanweisung - Laminate Manual

Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>	10.01.2014



0/90°	T800
+/-45°	T800
+/-45°	T800
0/90°	T800
Pickup Points	
Schritt: 5, 10, 34, 39	

+z
-z



0/90°	T800
+/-45°	T800
0/90°	T800
+/-45°	T800
0/90°	T800
+/-45°	T800
0/90°	T800
Rocker	
Schritt: 5, 10, 34, 39	

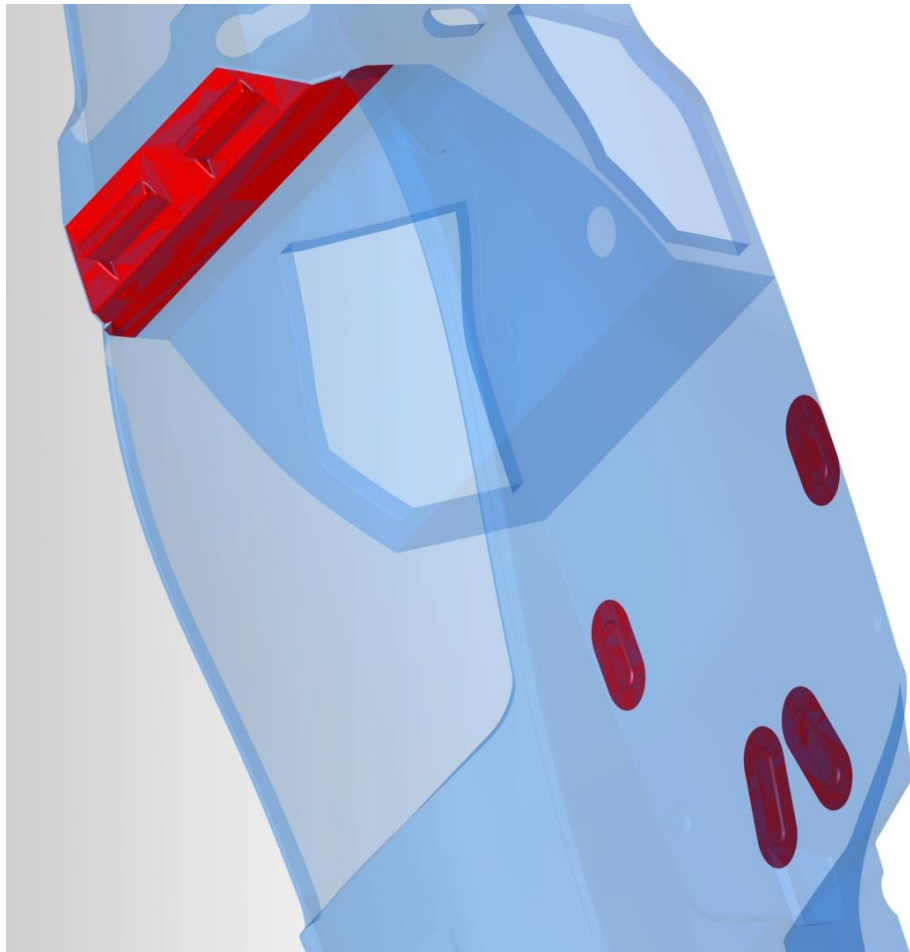
+z
-z

0/90°	T800
+/-45°	T800
0/90°	T800
+/-45°	T800
+/-45°	T800
0/90°	T800
+/-45°	T800
0/90°	T800
upper main hoop bracing	
Schritt: 5, 10, 34, 39	

+z
-z

39	T800	0,22	-	Pickup Points	
34	T800	0,22	-	Pickup Points	
10	T800	0,22	-	Pickup Points	
5	T800	0,22	-	Pickup Points	
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark	

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

Produktionsanweisung - Laminate Manual				
TUW RACING VIENNA FORMULA TEAM	Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
	Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>	10.01.2014
	 0/90° T800 +/-45° T800 +/-45° T800 0/90° T800 Schritt: 6, 35 +z ↕ -z			
35	4xT800	0,22	quasiisotrop/sym	belt reinforcement
6	4xT800	0,22	quasiisotrop/sym	belt reinforcement
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark

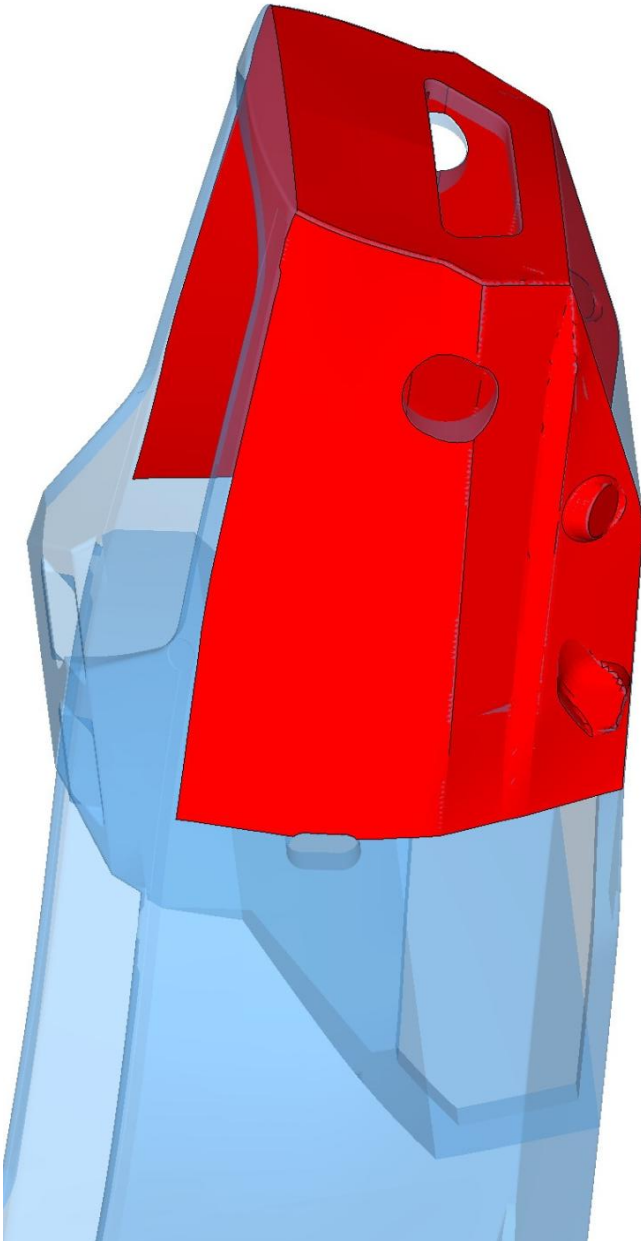
11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

Produktionsanweisung - Laminate Manual				
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>	10.01.2014

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

TUW RACING VIENNA FORMULA TEAM		Produktionsanweisung - Laminate Manual					
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB		Ersteller: <i>Author:</i>		Mark Hölzl	
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014		Datum: <i>Created on:</i>		10.01.2014	
							
37	T800	0,22	0/90°	SES - drivercell			
8	T800	0,22	0/90°	SES - drivercell			
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark			

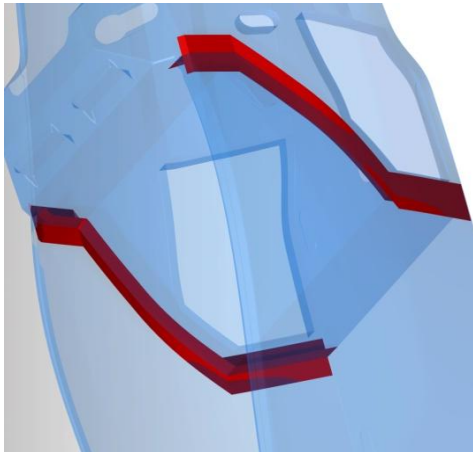
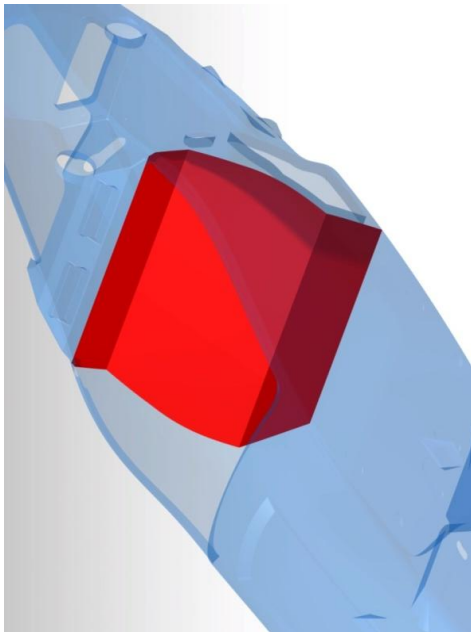
11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

TUW RACING VIENNA FORMULA TEAM		Produktionsanweisung - Laminate Manual					
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB		Ersteller: <i>Author:</i>		Mark Hölzl	
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014		Datum: <i>Created on:</i>		10.01.2014	
							
36	M46J	0,148	0°	SES - engine bay			
9	M46J	0,148	0°	SES - engine bay			
Schritt <i>Step</i>	Material <i>Material</i>	Dicke <i>Thickness</i>	Richtung <i>Direction</i>	Anmerkung <i>Remark</i>			

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

Produktionsanweisung - Laminate Manual			
TUW RACING VIENNA FORMULA TEAM	Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>	02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>
	Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>	TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>
			Mark Hölzl 10.01.2014
			
13	Assemble - moulds		
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction
			Anmerkung Remark

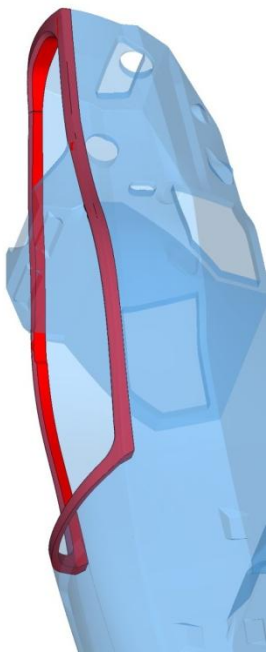
11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

TUW RACING VIENNA FORMULA TEAM				Produktionsanweisung - Laminate Manual			
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB		Ersteller: <i>Author:</i>		Mark Hölzl	
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014		Datum: <i>Created on:</i>		10.01.2014	
16.2 16.1 Schritt +/-45° 0/90° Richtung T800 T800 Material 17.2 17.1 15 Schritt +/-45° 0/90° Assemble firewall Richtung Material				 			
17		2xT800	0,22	qasu	firewall		
16		2xT800	0,22	quasi	firewall integration		
15		Assemble firewall					
Schritt <i>Step</i>		Material <i>Material</i>	Dicke <i>Thickness</i>	Richtung <i>Direction</i>	Anmerkung <i>Remark</i>		

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

		Produktionsanweisung - Laminate Manual							
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB		Ersteller: <i>Author:</i>		Mark Hölzl			
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>				TUW-Monocoque 2014		Datum: <i>Created on:</i>		10.01.2014	

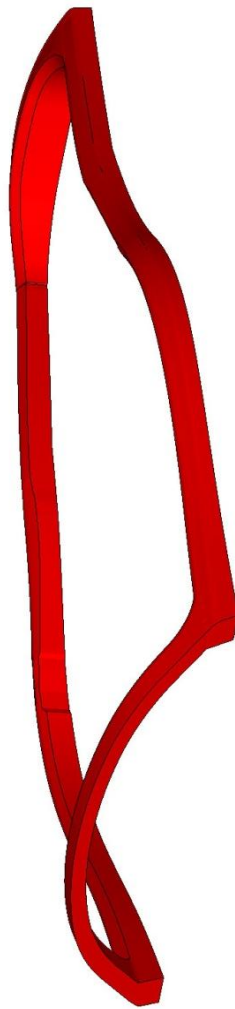
21	Assemble - RHC core	
Schritt	Richtung	Material



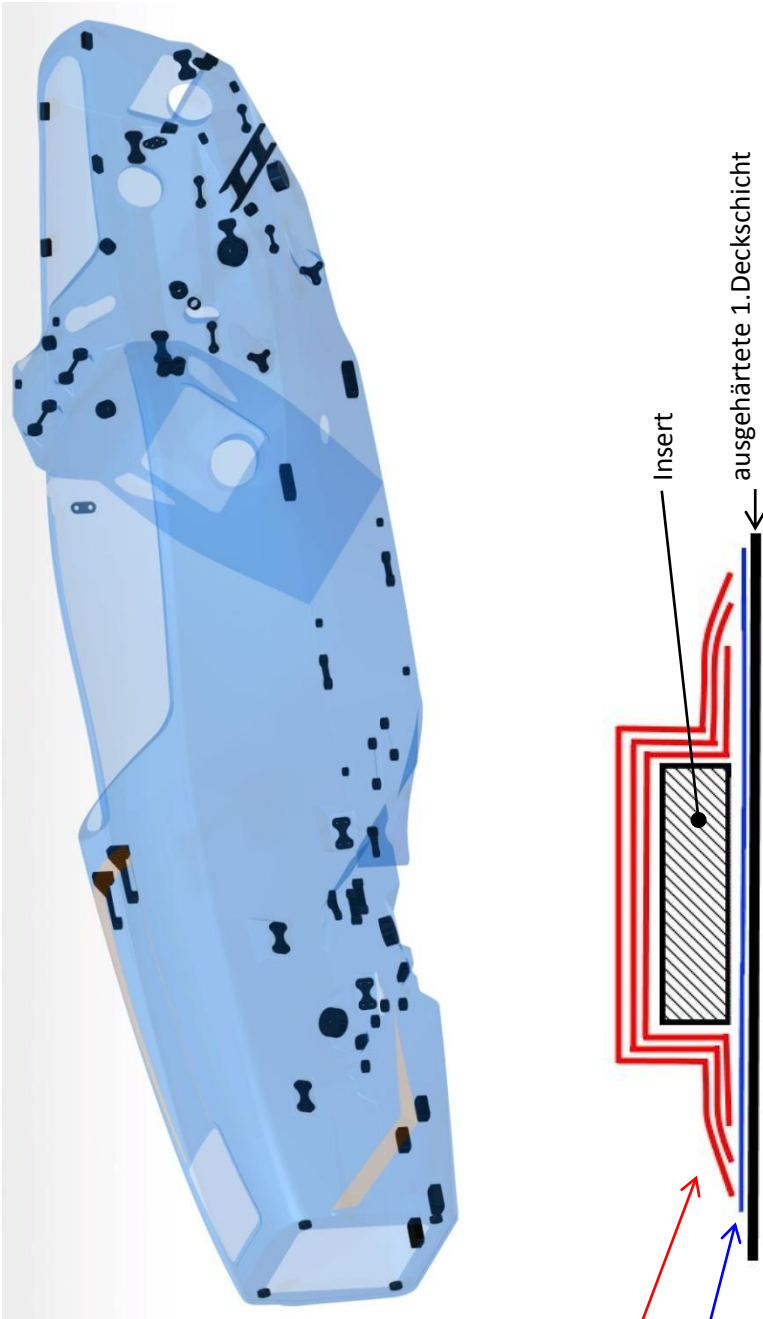
20	6x0°	6xM46J
Schritt	Richtung	Material



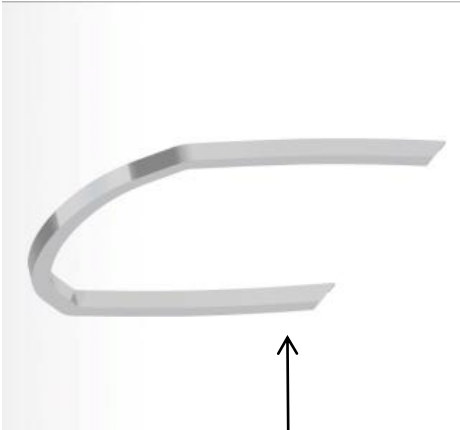
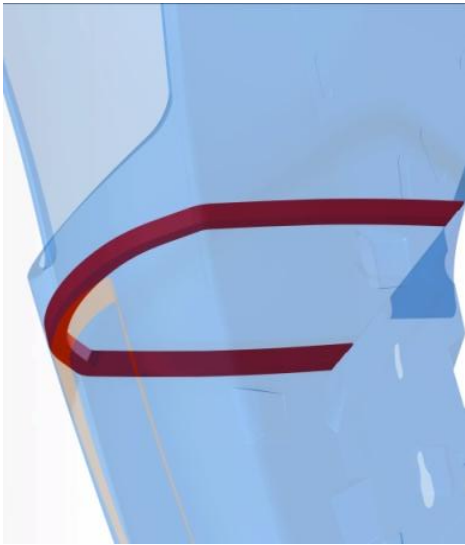
19	4x0°	4xM46J
18	-	FA
Schritt	Richtung	Material



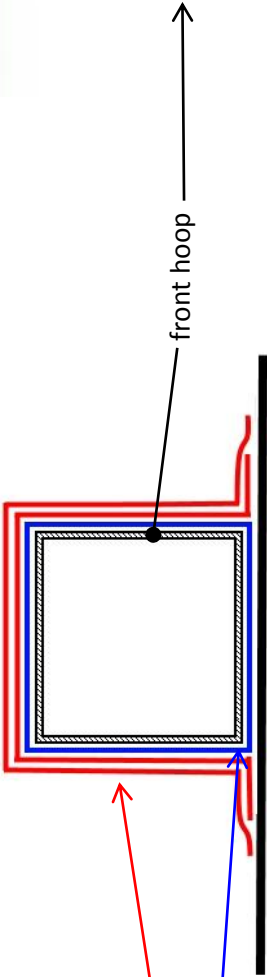
21	Assemble - RHC core			
20	6xM46J	0,148	0°	RHC - bulkhead reinforcement
19	4xM46J	0,148	0°	RHC - bulkhead
18	FA	0,15	-	RHC - bulkhead
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark

TUW racing VIENNA FORMULA TEAM		Produktionsanweisung - Laminate Manual																															
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB		Ersteller: <i>Author:</i>		Mark Hölzl																											
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014		Datum: <i>Created on:</i>		10.01.2014																											
		23 Assemble CFRP inserts <table><tr><th>Schritt</th><th>Richtung</th><th>Material</th></tr></table> +z -z 24.3 0/90° T800 24.2 +/-45° T800 24.1 0/90° T800 22 - FA <table><tr><th>Schritt</th><th>Richtung</th><th>Material</th></tr></table>  <table><tr><td>24</td><td>3xT800</td><td>0,22</td><td>quasiisotrop</td><td>CFRP Inserts</td></tr><tr><td>23</td><td colspan="3">Assemble CFRP Inserts</td><td></td></tr><tr><td>22</td><td>FA</td><td>0,15</td><td>-</td><td>CFRP Inserts</td></tr><tr><td>Schritt Step</td><td>Material Material</td><td>Dicke Thickness</td><td>Richtung Direction</td><td>Anmerkung Remark</td></tr></table>						Schritt	Richtung	Material	Schritt	Richtung	Material	24	3xT800	0,22	quasiisotrop	CFRP Inserts	23	Assemble CFRP Inserts				22	FA	0,15	-	CFRP Inserts	Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark
Schritt	Richtung	Material																															
Schritt	Richtung	Material																															
24	3xT800	0,22	quasiisotrop	CFRP Inserts																													
23	Assemble CFRP Inserts																																
22	FA	0,15	-	CFRP Inserts																													
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark																													

Produktionsanweisung - Laminate Manual			
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>
			10.01.2014



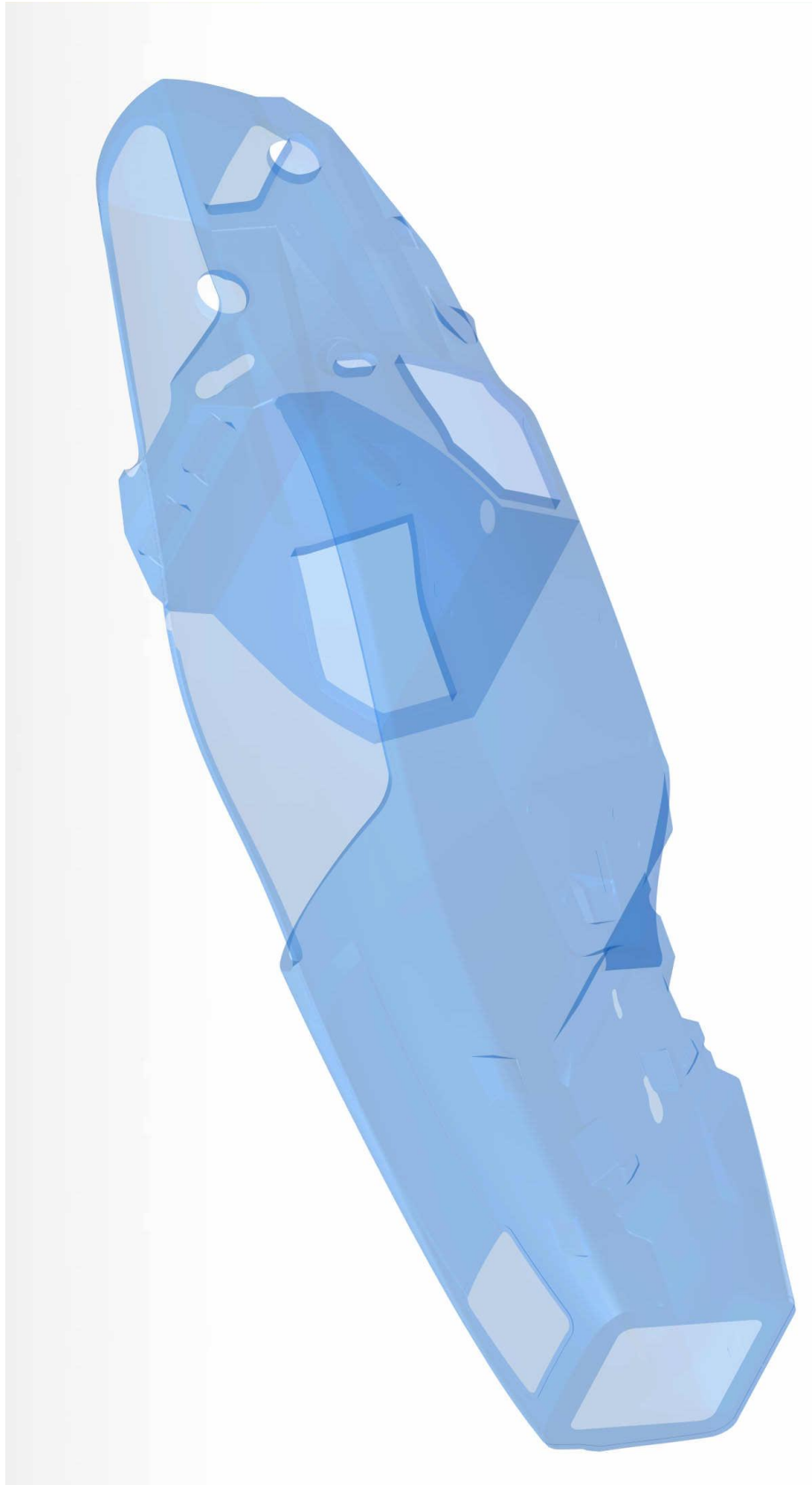
26	Assemble front hoop		
Schritt	Richtung	Material	



27.2	+/-45°	T800	
27.1	0/90°	T800	
25	-	FA	
Schritt	Richtung	Material	

27	2xT800	0,22	quasiisotrop	front hoop integration
26	Assemble front hoop			
25	FA	0,15	-	front hoop
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

TUW RACING VIENNA FORMULA TEAM			Produktionsanweisung - Laminate Manual			
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB		Ersteller: <i>Author:</i>	Mark Hölzl	
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014		Datum: <i>Created on:</i>	10.01.2014	
						
41	T800	0,22	+/-45°	Layer 4 global - stoßversetzt		
32	T800	0,22	+/-45°	Layer 3 global - 20mm Überlappung		
31	FA	0,15	-	global		
28	FA	0,15	-	global		
Schritt	Material	Dicke	Richtung	Anmerkung		
Step	Material	Thickness	Direction	Remark		

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

 Produktionsanweisung - Laminate Manual					
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB		Ersteller: <i>Author:</i> Mark Hölzl	
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014		Datum: <i>Created on:</i> 10.01.2014	

Schritt Step	Richtung Direction	Materiale Material
29.2	90°	AH10
Schritt	Richtung	Materiale

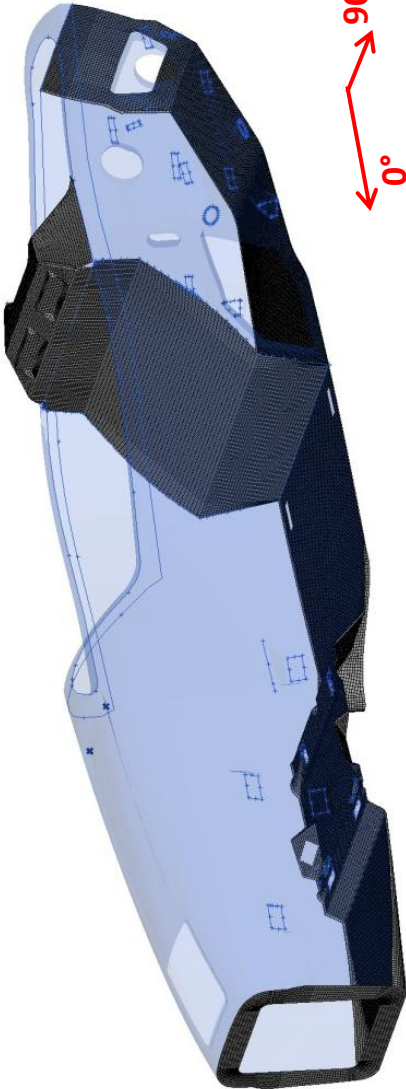


Diagramm zur Anbringung des Laminats (AH10) auf der Unterseite des Monocoques.

Die rote Linie markiert die Richtung des Faserverlaufs (90°).

Schritt Step	Richtung Direction	Materiale Material
29.1	-	RHC
Schritt	Richtung	Materiale

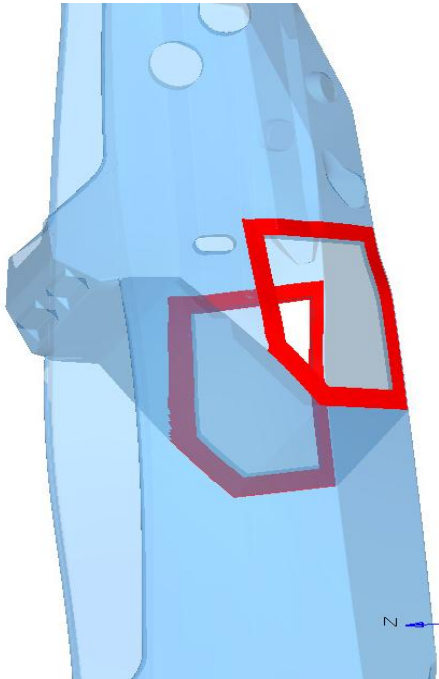


Diagramm zur Anbringung des Laminats (RHC) auf der Unterseite des Monocoques.

Die rote Linie markiert die Richtung des Faserverlaufs (0°).

Assemble Core			Anmerkung Remark
Schritt Step	Dicke Thickness	Richtung Direction	Anmerkung Remark
29			

11.2 Lagenaufbauplan: Monocoque

TUW RACING VIENNA FORMULA TEAM			Produktionsanweisung - Laminate Manual			
Zeichnungsnummer: <i>Drawing No.:</i>		02_01_002_PLB	Ersteller: <i>Author:</i>		Mark Hölzl	
Bauteilbezeichnung: <i>Partname:</i>		TUW-Monocoque 2014	Datum: <i>Created on:</i>		10.01.2014	

29.4

Schritt

0°

Richtung

AH24

Material



29.3

Schritt

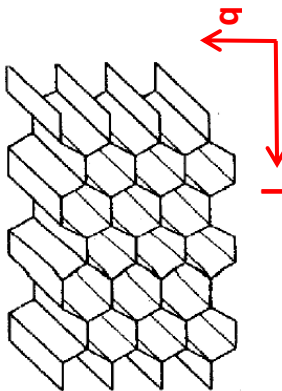
90°

Richtung

AH14

Material





Assemble Core			
Schritt Step	Material Material	Dicke Thickness	Richtung Direction
29			

Anmerkung Remark