

Gemeinsamer Abschlussbericht CaraSave – Entwicklung eines crashsicheren Leichtbaufahrzeugaufbaus für Reisemobile

ZE: Capron GmbH
Berghausstraße 1
01844 Neustadt in Sachsen

Förderkennzeichen:
19I21017A

Lakowa GmbH
Dresdner Straße 25
02681 Wilthen

Förderkennzeichen:
19I21017B

Lätzsch GmbH
Rathenausstraße 1
04567 Kitzscher OT Thierbach

Förderkennzeichen:
19I21017C

LSE-Lightweight Structures Engineering GmbH
Annaberger Straße 240
09125 Chemnitz

Förderkennzeichen:
19I21017D

Vorhabenbezeichnung: Entwicklung eines crashsicheren
Leichtbaufahrzeugaufbaus für
Reisemobile

Laufzeit des Vorhabens: 06/2021 – 03/2025

Berichtszeitraum: 06/2021 – 03/2025

Erstellt am: 29.09.2025

Projektleiter: Florian Einer (M.Sc.)



Gemeinsamer Schlussbericht Cara Save

AP 1 Entwicklung von Crashesicheren Bauweisenkonzepten für Reisemobile

AP 1.1 Analyse der Crasheszenarien und -lastfälle

In der Realität, bei real vorkommenden Kollisionen im Straßenverkehr lassen sich eine Vielzahl von unterschiedlichsten Crasheszenarien beobachten. Dabei gleicht kein Unfall dem anderen. Bei einem Verkehrsunfall gibt es eine große Anzahl an Parametern wie beispielsweise: Fahrzeugmasse der jeweiligen unfallbeteiligten Fahrzeuge, deren Geschwindigkeit und Richtung sowie der individuellen Schutzeinrichtungen uvm.. Aus diesem Grund wurden standardisierte Tests entwickelt, um Ergebnisse vergleichbar und reproduzierbar zu machen. Dabei wurden in den United Nations (UN) mehrere Regelungen und Vereinbarungen getroffen, die sich auf die Crashesicherheit beziehen und die Sicherheit von Fahrzeugen und Passagieren sicherstellen sollen. Darunter zählen unter anderem folgende UN-ECE-Regelungen:

UN- ECE- Regelung Nr. 29 (Schutz der Insassen in Führerhäusern)

UN- ECE- Regelung Nr. 32 (Verhalten der Fahrzeug- Struktur bei Heckaufprall)

UN- ECE- Regelung Nr. 66 (Festigkeit des Aufbaus von Autobussen)

UN- ECE- Regelung Nr. 94 (Frontalaufprall)

UN- ECE- Regelung Nr. 95 (Seitenaufprall)

UN- ECE- Regelung Nr. 127 (Fußgängersicherheit)

UN- ECE- Regelung Nr. 135 (Seitlicher Pfahlaufprall)

UN- ECE- Regelung Nr. 137 (Frontalaufprall für Rückhaltesysteme)

Diese Auswahl an Regularien gelten in erster Linie für Fahrzeughersteller, die ihre Produkte auf dem nationalen und internationalen Markt vertreiben wollen. Dabei ist deren Konformität die Bedingung, um die Fahrzeuge zulassen zu können. Nicht alle Regularien sind jedoch für alle Klassen von Fahrzeugen vorgeschrieben. So gelten für bestimmte Fahrzeugklassen unterschiedliche Anforderungen nach SPV- Einstufung im Rahmen der EUFEG (EU-Fahrzeug-Einzelgenehmigung). Diese Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung können bei bestimmten Regularien ausgenommen sein. So stellen bspw. Wohnmobile eine solche Ausnahme dar. In Anbetracht der „Vision Zero“ (keine Verkehrstote) des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) werden jedoch immer mehr Anforderungen an alle Fahrzeugklassen gesetzt, um die Fahrzeugsicherheit zu erhöhen und das Unfallrisiko zu senken. Die Anforderungen werden alle 10 Jahre durch eine EU-Kommission für Fahrzeughersteller verpflichtend vorgeschrieben und im Rahmen der GSR (General Safety Regulation) veröffentlicht. Bei den ersten Verhandlungen der letzten Regulation waren für die Klasse der Wohnmobile am Anfang noch die UN R: 32, 66, 95, 135, und

137 vorgesehen. Zum Datum der Verabschiedung wurden jedoch keine der hier Aufgeführten Anforderungen verpflichtend. Stattdessen wurden andere Anforderungen im Bereich der aktiven Sicherheit für Wohnmobile beschlossen, die in erster Linie die Unfallvermeidung in den Vordergrund stellen. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass besonders die Regularien mit der Nummer 32, 95 und 137, die mehr im Bereich der passiven Sicherheit liegen, in Zukunft für die Branche verpflichtend werden könnten. Aus diesem Grund wurde sich dafür entschieden diese Lastfälle als Bewertungskriterium festzulegen und zu analysieren.

- UN- ECE R 32 Verhalten der Fahrzeug- Struktur bei Heckaufprall

Der Test definiert Anforderungen an die Fahrzeugstruktur im Falle eines Heckaufpralls mit einer Geschwindigkeit von 52 km/h. Dabei wird ein Testschlitten mit der o.g. Geschwindigkeit in das in Ruhe befindliche Testfahrzeug gefahren (siehe Abbildung 1.1). Der bewegliche Schlitten ist mit einer starren „nicht verformbaren“ Platte ausgestattet und soll selbst keine Energie durch Verformung dissipieren. Der Versuch dient der Beurteilung der Fahrzeugstruktur im Hinblick auf die Sicherheit der Insassen. Dabei muss die strukturelle Integrität des Heckbereichs eines Fahrzeugs so ausgeführt sein das die, beim Aufprall auftretende, Energie effektiv absorbiert wird und die Fahrgastzelle geschützt ist. Weitere Prüfkriterien sind die Befestigung der Sitze und die dazugehörigen Rückhaltesysteme. Weiterhin darf es nach dem Aufprall zu keiner Kraftstoffleckage oder Gefahr für die Insassen durch elektrisch verbaute Systeme kommen.

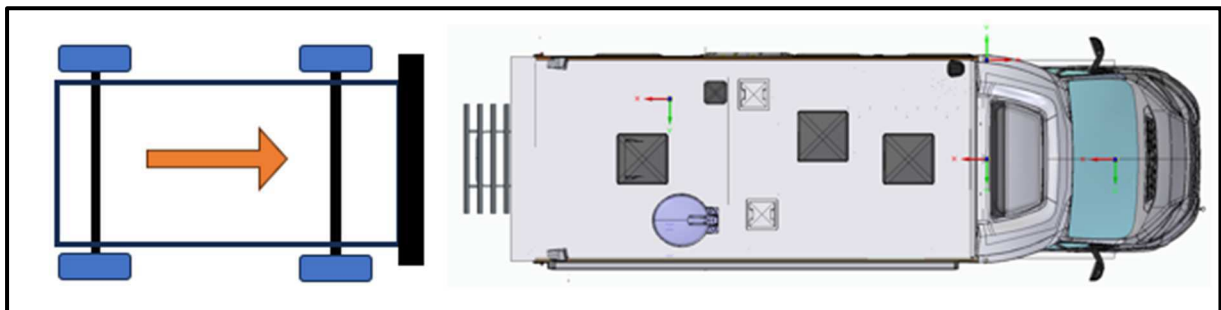


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung (Draufsicht) des Fahrzeugversuchs nach ECE R 32. Dabei wird ein beweglicher Testschlitten mit definierter Masse und Abmaßen in ein in Ruhe befindliches Testfahrzeug gefahren.

Für das Reisemobil gilt bei diesem Test eine besondere Beanspruchung der hinteren Fahrzeugbereiche. Dabei befindet sich, bis zum Fahrzeugrahmen des Ausgangs (OEM)-Chassis, eine Rahmenverlängerung, die Außenwände samt Boden und die, in den meisten Fällen, im Heck des Reisemobils verbaute Bettbaugruppe im direkten Wirkungsbereich des Crashes. Das Dach, welches ebenfalls zu den äußeren Aufbauten gehört, ist aufgrund der Höhe nicht im direkten Kontaktbereich mit dem Prüfkörper. Aufgrund des großen Abstandes bis zur 2. Sitzreihe werden die Passagiere nicht im Eindringbereich des Prüfkörpers erwartet (siehe Abbildung 1.2). Der große Abstand zu den Passagieren in Fahrtrichtung und die großen unterschiedlichen Baugruppen im direkten Wirkungsbereich lassen diesen Crashlastfall für Reisemobile jedoch nicht kritisch erscheinen. Anders als bei konventionellen PKWs besitzen Wohnmobile, durch ihren

Aufbau selbst einen konstruktiv bedingten großen Schutzraum, der den Test für diese Fahrzeugklasse weniger kritisch macht. Zum heutigen Zeitpunkt kann davon ausgegangen werden, dass unsere Fahrzeuge in ihrer jetzigen Ausführung bereits eine ausreichend große Crashesicherheit für diesen Lastfall aufweisen. Aus diesem Grund wurde beschlossen den Fahrzeugtest nicht weiter als Bewertungskriterium zu betrachten.

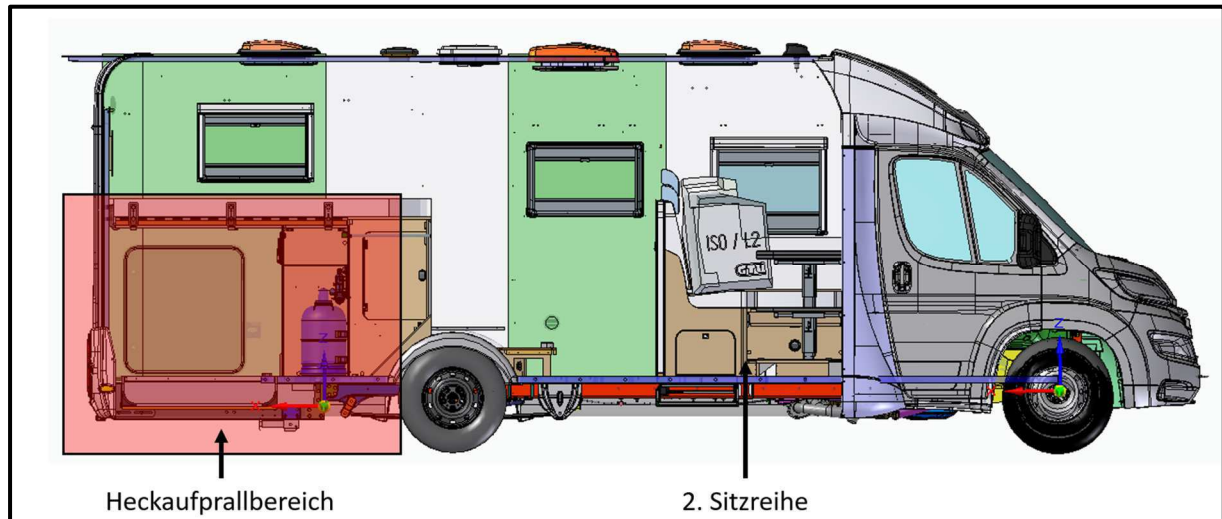


Abbildung 1.2: Schnittdarstellung eines Reisemobils in Blickrichtung von rechts. Es ist die 2. Sitzreihe gekennzeichnet und der direkte Wirkungsbereich des Aufpralls bei einem Heckaufprall rot gekennzeichnet.

- UN- ECE R 95 Seitenaufprall

In dieser Regularie sind die Testbedingungen und Anforderungen an das Fahrzeug im Falle eines Seitenaufpralls definiert. Dabei wird ein beweglicher Testschlitten, an dessen Front ein Verformungselement befestigt ist, mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h in die Mitte der (meist linken) Fahrzeugseite des Testfahrzeugs gefahren (siehe Abbildung 1.3). Der Testschlitten besitzt eine Masse von 950kg und muss im rechten Winkel zur Fahrerseite ausgerichtet sein. Nach dem Test werden die Messwerte der voll- instrumentierten Dummy- Prüfkörper ausgewertet und dürfen dabei vorgegebene Grenzwerte nicht übersteigen. Weitere Anforderungen sind u.a. die Wahrung der Tür-Öffnungsmöglichkeit unter vorgegebener Kraftgrenze von 400N oder eine max. zulässige Leckage- Obergrenze von 30g/min Kraftstoff.

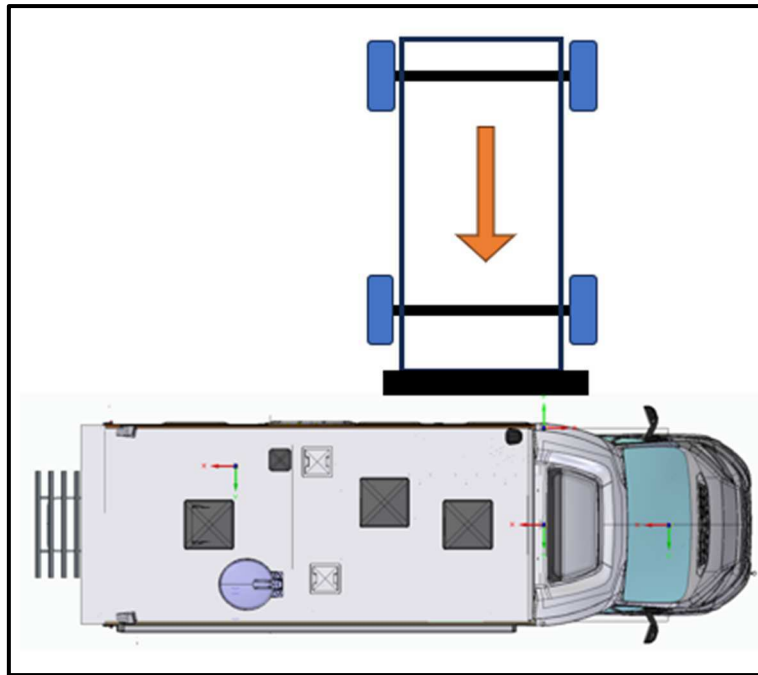


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung (Draufsicht) des Fahrzeugversuchs nach ECE R 95. Dabei wird ein beweglicher Testschlitten mit definierter Masse und Abmaßen seitlich in ein in Ruhe befindliches Testfahrzeug gefahren.

Da der Test üblicherweise an der Fahrerseite des zu untersuchenden Fahrzeugs durchgeführt wird, an der sich bei Wohnmobilen, in den meisten Fällen die 2. Sitzreihe für die Passagiere befindet, sollte dieser Crashfall näher betrachtet werden (siehe Abbildung 1.4). Zum großen Nachteil ist der sehr stabil ausgelegte Fahrzeugrahmen, auf dem auch der Boden des Wohnmobilaufbaus und der Gurtbock befestigt sind, leicht zur Mitte des Fahrzeugs eingerückt. Dadurch bildet er erst ab einem Weg von ca. 450mm von der Außenwand gemessen einen Widerstand gegen eine Intrusion wie sie bei einem Crash auftreten würde. Positiv für den Crashfall ist jedoch die noch in Überdeckung befindliche B- Säule und der horizontal liegende Boden des Aufbaus, der in dieser Einbauposition sein größtes Widerstandsmoment gegen eine Druckbelastung aufweist.

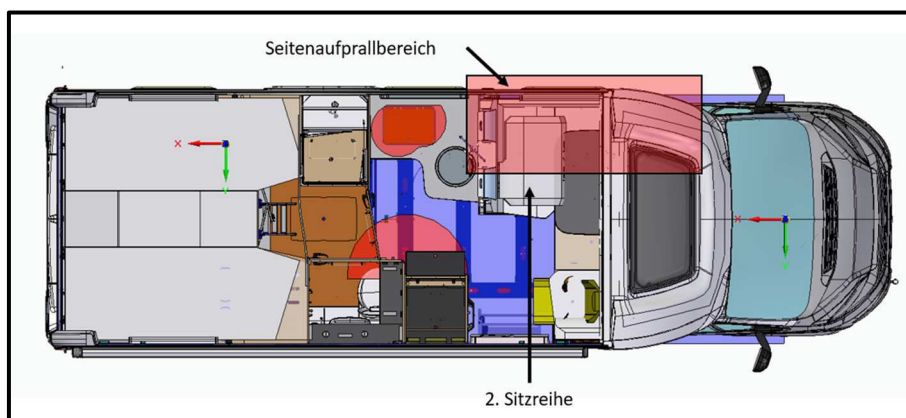


Abbildung 1.4: Schnittdarstellung eines Reisemobils in Blickrichtung von oben. Es ist die 2. Sitzreihe gekennzeichnet und der direkte Wirkungsbereich des Aufpralls bei einem seitlichen Aufprall rot gekennzeichnet.

- UN- ECE R 137 Frontaufprall für Rückhaltesysteme

Ähnlich wie in der vorherig genannten Regularie Nr. 95 werden bei diesem Test die auftretenden Kräfte, Momente und Beschleunigungen der Dummy- Prüfkörper überprüft. Auch die Tür- Öffnungsmöglichkeit und die Vorgabe einer max. zulässigen Leckage, sowie spezielle Anforderungen an die Fahrzeugelektrik sind Bedingungen zum Bestehen des Fahrzeugversuches. Der Unterschied besteht im prinzipiellen Testaufbau. Bei dem Frontalcrash wird das Testfahrzeug selbst auf eine Geschwindigkeit von 50 km/h beschleunigt und trifft anschließend frontal auf eine starre und unbewegliche Wand (siehe Abbildung 1.5).

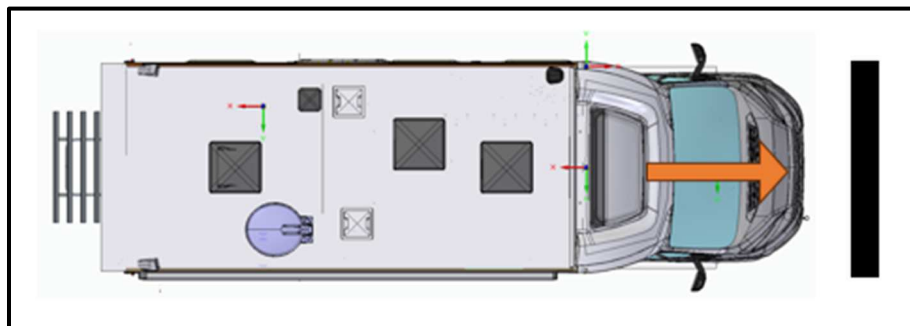


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung (Draufsicht) des Fahrzeugversuchs nach ECE R 137. Dabei wird das Testfahrzeug auf eine definierte Prüfgeschwindigkeit beschleunigt und gegen ein starres und unbewegliches Hindernis gefahren.

Dieser Test stellt einen der anspruchsvollsten Nachweise besonders für Reisemobile dar, die aufgrund ihres meist erheblichen Eigengewichts und der geforderten Geschwindigkeit eine besonders hohe Aufprallenergie erzeugen. Der Wirkungsbereich des Aufpralls und die erste Sitzreihe liegen bei diesem Test besonders nah beieinander (siehe Abbildung 1.6). Die meisten Reisemobile sind mit einem vollständigen Chassis-Triebkopf ausgerüstet (Alle T-, V- und Alkoven-Grundrisse), welches aufgrund der immensen Bemühungen der Fahrzeughersteller einen großen Passagierschutz für die Insassen der vorderen Sitzreihe bietet. Da sich die kinetische Energie eines Fahrzeugs nur bis zu einem gewissen Punkt durch Crashabsorber abbauen lässt und anschließend durch einen Impuls durch das Fahrzeug geleitet wird, muss davon ausgegangen werden, dass die Insassen der 2. Sitzreihe einer immer noch nicht zu vernachlässigenden Belastung ausgesetzt sind. Zum jetzigen Zeitpunkt steht lediglich ein getesteter und zugelassener Gurtbock mit den entsprechenden Rückhaltesystemen dementsgegen.

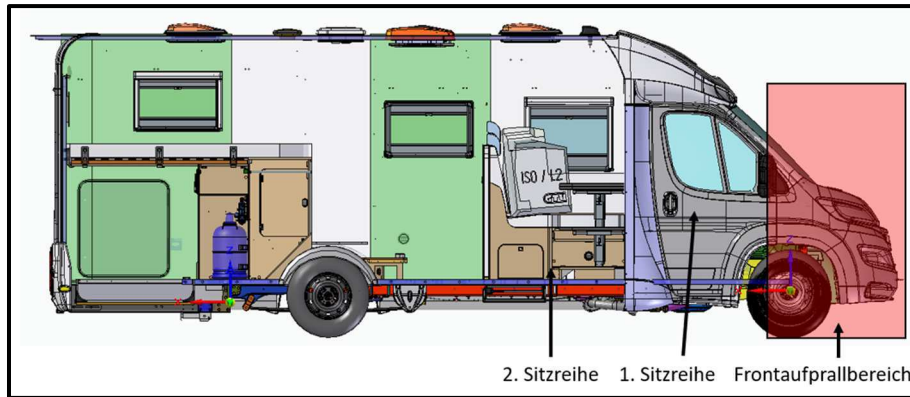


Abbildung 1.6: Schnittdarstellung eines Reisemobils in Blickrichtung von rechts. Es ist die erste und zweite Sitzreihe gekennzeichnet und der direkte Wirkungsbereich des Aufpralls bei einem Frontaufprall rot gekennzeichnet.

AP 1.2 Ermittlung des Standes der Technik anhand vorliegender Crashsimulationen

Für die Ermittlung des Standes der Technik und zur Identifikation der Schwachstellen am Fahrzeug wurden aufwendige Crashsimulationen durchgeführt. Zu Beginn der Untersuchung musste hierzu ein repräsentativer Grundriss gefunden werden. Für das teilintegrierte Reisemobil wurde nach eingängiger Prüfung ein Ford Grundriss ausgewählt. Hintergrund war, dass das Chassis bereits einen überarbeiteten Rahmen besaß und somit den kommenden Auflagen der GSR 2 entsprach. Dies war insbesondere für die geplanten Crashtests und die Verwertbarkeit der Projekterkenntnisse von enormer Wichtigkeit.

- Basissimulation T680 Frontalcrash nach ECE R137

Alle im Rahmen des Projektes durchgeführten Simulationen wurden anhand mehrerer verschiedener Kriterien ausgewertet. Zum einen wurden die Intrusionen (d.h. wie viel Weg ein Fremdkörper oder Teile des Fahrzeugs selbst sich in Richtung des Innenraums bewegen) gemessen oder beurteilt. Außerdem stellten die errechneten Beschleunigungswerte an vordefinierten Positionen im Fahrzeug ein wichtiges Bewertungskriterium dar. Dafür wurden, abhängig von dem untersuchten Crashfall, an folgenden Positionen fiktive Beschleunigungsmesspunkte angebracht. Im Falle des Frontalaufpralls wurden 17 solcher Messpunkte gesetzt (siehe Abbildung 1.7). Der OLC-Wert (der über den Impuls des Fahrzeugs ermittelte Beschleunigungswert eines virtuellen Insassen) bildete darüber hinaus ein weiteres wichtiges Bewertungskriterium bei den durchgeführten Simulationen.

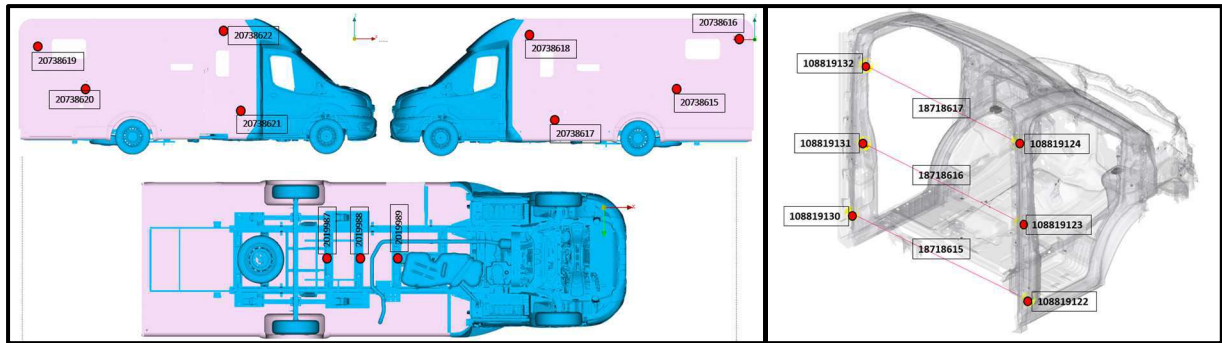


Abbildung 1.7: In den schematischen Abbildungen eines Reisemobils werden die Messpunkte (rot) für die Ermittlung der Beschleunigungswerte gezeigt.

Das Fahrzeug wird dann simulativ, gemäß den Bestimmungen des ECE R137, gecrasht. Die Simulationen zeigen, wie erwartet, eine Deformation der Fahrzeugfront bis zur Vorderachse. Bis hierhin wird im Wesentlichen durch die Knautschzone, Energie abgebaut. Die vom Fahrzeughersteller konzeptionierten Crashabsorber funktionieren in der Simulation wie vorgesehen. Dies lässt sich an der Faltung der in Fahrzeuginnenrichtung ausgerichteten Träger erkennen (Siehe Abbildung 1.8).

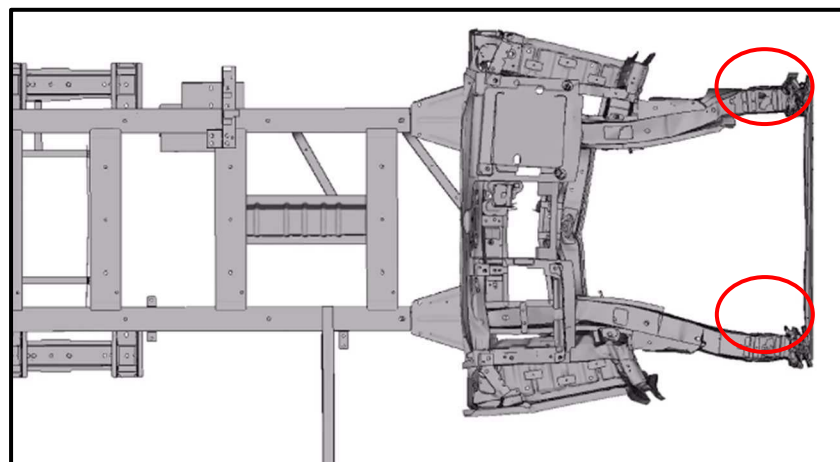


Abbildung 1.8: Darstellung des Fahrzeugrahmens zum Zeitpunkt der größten Deformation bei der Simulation des Frontalaufpralls.

Eine weitere Erkenntnis aus der Simulation ist die hohe Beanspruchung der T-Haube im Crashlastfall. Dabei zeigt sich insbesondere die hohe Belastung im vorderen unteren Bereich der Haube. Die in Abbildung 1.9 nicht grau eingefärbten Bereiche zeigen eine erhöhte Beanspruchung während des Tests. Orange und rot gekennzeichnete Flächen werden lokal mit sehr hohen Spannungen belastet. Die hohe Belastung lässt erstmals erkennen, dass sich das Chassis relativ zur T-Haube bewegt.

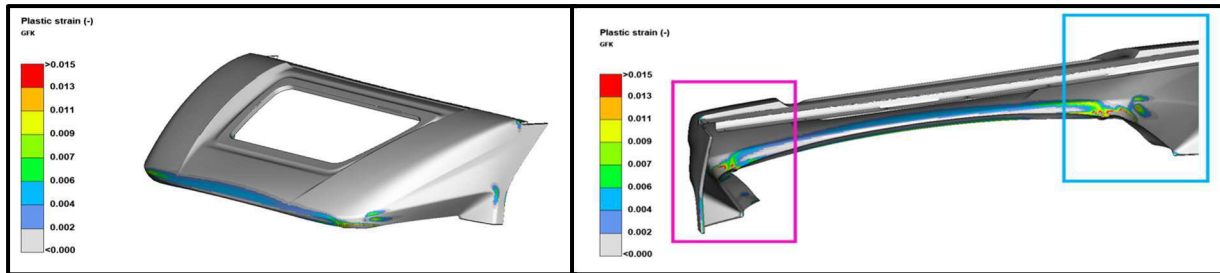


Abbildung 1.9: Darstellung der Belastungen, die während der Simulation in der T-Haube wirken. Farblich hervorgehobene Bereiche kennzeichnen Zonen mit einer erhöhten Beanspruchung.

- Basissimulation Ford T680 Seitenaufprall nach ECE R95

Auch die Simulationen des Seitenaufpralls wurden, wie im ersten Abschnitt beschrieben, nach den Bewertungskriterien analysiert. Dabei wurden lediglich sechs weitere Beschleunigungsmesspunkte in der Simulation ergänzt (Siehe Abbildung 1.10)

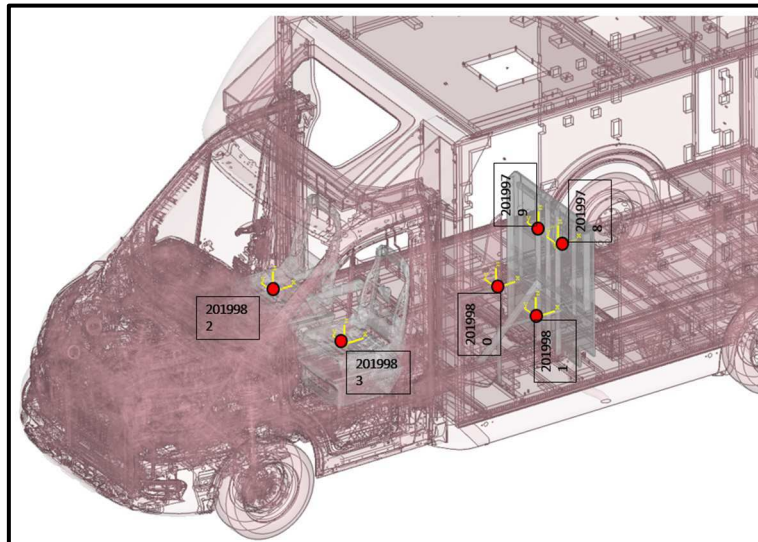


Abbildung 1.10: In der schematischen Abbildung eines durchsichtig eingefärbten Reisemobils werden alle zusätzlichen Messpunkte (rot), die für die Ermittlung der Beschleunigungswerte bei einem Seitenaufprall benötigt werden, gezeigt.

Besonders interessant hierbei war die Erkenntnis, dass sich die auftretenden Intrusionen überraschenderweise deutlich geringer abzeichneten als erwartet. Die gemessenen Intrusionen lagen lediglich im unteren zweistelligen Zentimeterbereich, gemessen an der B-Säule. Begründet werden kann dies mit der sehr stabil ausgelegten B-Säule, die einen Großteil der Energie abfängt.

- Gesamtauswertung der Basissimulationen T680

Das Reisemobil zeigt im Seitenaufprall einen sehr guten Widerstand gegen die Intrusion des Crashelements. Im Falle des Frontalaufpralls lassen sich durch die Beanspruchung der T-Haube einige Verbesserungen in diesem Bereich ableiten.

Im weiteren Projektverlauf zeigte sich jedoch, dass die Auswertbarkeit der Ergebnisse leider angezweifelt werden musste. Der errechnete OLC-Wert erschien mit 18,2g viel zu niedrig. Außerdem verhielt sich die Fahrzeugstruktur des Chassis, besonders im

Bereich des Getriebes nicht plausibel. Die Probleme bei der Erstellung eines rechenfähigen Modells führten dazu, dass das Modell sich zwar simulieren ließ, aber die Verwertbarkeit der Ergebnisse angezweifelt werden musste. Aus diesem Grund wurde sich im Projekt für ein anderes Ausgangsfahrzeug entschieden, bei dem die Untersuchungen und letztendlich auch die Crashversuche durchgeführt werden sollten. Die bisher erlangten Ergebnisse gaben jedoch schon einen groben Überblick über die Verhältnisse, die sich bei einem Crash beobachten lassen. Der Grundriss T68 auf Fiat Basis ist dem T680 auf Ford Basis im Aufbau sehr ähnlich und gehört zu einem sehr beliebten Wohnmobilgrundriss. Aufgrund der besseren Datenausgangslage und dem neu angekündigten Face-Lift-Modell wurde sich dazu entschlossen, die Basissimulationen nochmals an einem Fahrzeug durchzuführen, welches auf einem Fiat Grundriss aufbaut.

- Basissimulation T68 Frontalcrash nach ECE R137

Da sich die Probleme lediglich auf das Basisfahrzeug und dessen CAE-Modell bezogen, konnten die Simulationen mit dem Fiat Modell auf ähnliche Weise durchgeführt werden. Die Anzahl der Beschleunigungsmesspunkte wurde um einen Messpunkt verringert. Dafür ist einer der Sensoren statt am Chassis-Boden, auf dem Dach des Wohnmobilaufbaus platziert worden. Aus den ersten Simulationen des Ford Grundrisses haben wir gelernt, dass es im besonderen Maße auf den Bereich der T-Haube ankommen wird. Insbesondere für den Frontalcrash zeigte sich hierbei die Wichtigkeit dieser Baugruppe. Aus diesem Grund wurde diesem Bereich bereits bei der Basissimulation eine besondere Beachtung zugeschrieben. Für die Simulation des Frontalaufpralls wurde deshalb eine zwei-Wege-Betrachtung durchgeführt. Die erste Basis-Simulationsschleife wurde mit einer verklebten T-Haube und einer ideal ausgeführten Verschraubung gerechnet. Das bedeutet, dass die Verschraubungen in der Simulation nicht versagen können. In der Simulation zeigte sich, dass die Integrität der Fahrzeugstruktur, speziell die des Wohnmobilaufbaus, erhalten blieb und es zu keiner nennenswerten Intrusion in den Aufbau kommt. Bei der weiteren Auswertung der Simulationen fielen jedoch die in den Schraubverbindungen auftretenden Scherkräfte besonders auf. Diese überstiegen den maximal zulässigen Grenzwert um ein Vielfaches (Siehe Abbildung 1.11). Der Grenzwert der Scher-Belastung liegt bei derartig ausgeführten Schrauben bei ca. 1kN.

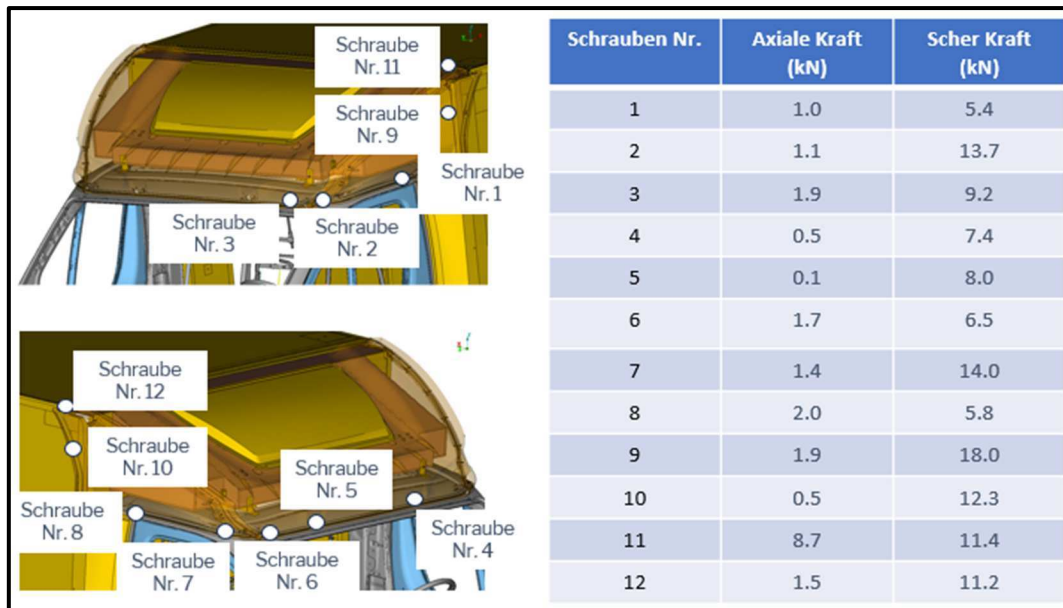


Abbildung 1.11: Bilder und Tabelle mit den axialen- Auszugs- und Scherkräften der Verschraubung zwischen T-Haube und Fahrzeugchassis. Die Abbildungen links zeigen die Verschraub-Punkte und die zugehörige Schraubenziffer.

Somit zeigte sich bereits, dass die Schraubverbindungen im realen Crashfall versagen würden. Darüber hinaus konnte ein Versagen der T-Haube selbst beobachtet werden. Dieses Versagen war an dem Modell selbst kaum zu beobachten, konnte jedoch durch einen sprunghaften Abfall der Schraubenkräfte (Schraube 9 und 10) messbar gemacht werden (Siehe Abbildung 1.12).

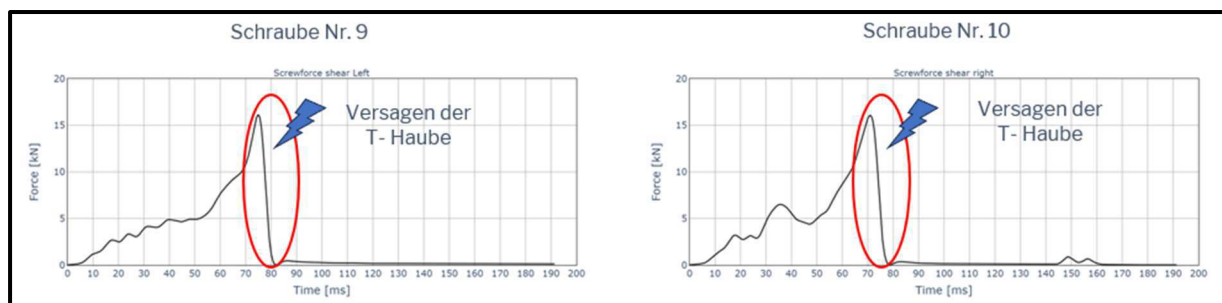


Abbildung 1.12: Kraft-Zeit-Diagramm der beiden Verschraubungen Nr.: 9 und 10 während der Crashsimulation. Der Zeitpunkt des sprunghaften Abfalls der Kraft ist rot hervorgehoben und kennzeichnet den Moment, in dem die T-Haube versagt.

Damit konnte der Ist-Zustand des Fahrzeugs schon sehr gut erfasst werden. Die bis hierhin gesammelten Erkenntnisse reichen jedoch noch nicht aus um darauf aufbauend die richtigen Schlüsse zu ziehen. Aus diesem Grund wurde die Simulation ein weiteres Mal wiederholt. Dieses Mal war das Ziel das Versagen der Struktur zu provozieren, da wir aus der ersten Simulation nur wissen, dass die Struktur in einem Crashfall versagen würde. Um jedoch die richtigen Gegenmaßnahmen zu ergreifen, musste untersucht werden, was im Falle eines Ausfalls mit der T-Haube geschieht. Dafür wurde die Simulation ohne eine relevante Schraubverbindung gerechnet. Lediglich die Verklebung mit dem Dach des Fahrzeugs stellte noch eine Verbindung der Bauteile dar. Bei der Simulation kam es zu einem Ablösen der T-Haube vom Chassis. Dieses Verhalten triggerte eine Reihe von weiteren Beobachtungen. Zum

einen kam es zu einem Einknicken des Chassis am Übergang von Fahrgastzelle zu Wohnkabinenaufbau in Bodennähe. Darüber hinaus konnte beobachtet werden, wie sich die Fahrgastzelle über diesen Drehpunkt in das Innere der Wohnkabine schiebt. Die an dieser Stelle angebrachten Steherwände können die auftretenden Kräfte nicht vollständig aufnehmen und geben nach. Dabei kommt es zu einer Verletzung der Integrität des Reisemobilaufbaus. Der Möbelschrank (Im weiteren Verlauf hier T-Haubenschrank genannt), der sich hinter der T-Haube befindet, kann den auftretenden Belastung ebenfalls nicht standhalten und wird zerstört (Siehe Abbildung 1.13).

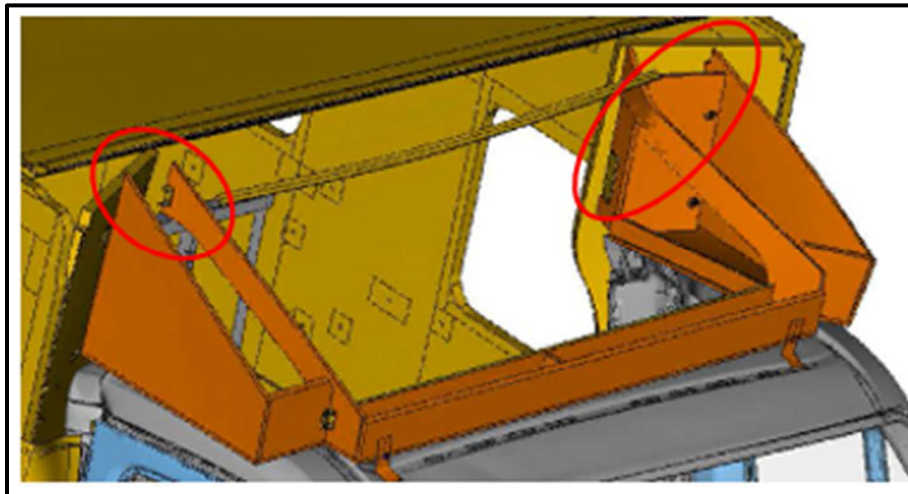


Abbildung 1.13: Gezeigt ist eine Momentaufnahme der Frontsimulation bei ausgeblendeter T-Haube. Das Bild zeigt, wie sich die beiden Steher in den Innenraum des Reisemobils drehen und der T-Hauben-Schrank unter der Last versagt.

Bei dem Test wurde ein OLC-Wert von 24g ermittelt. Dieser Wert stellt für die Beurteilung der Verbesserungen den initialen Ausgangszustand dar.

- Basissimulation T68 Seitenaufprall nach ECE R95

Die Auswertung der Basissimulation des Seitenaufpralls zeigte ein ähnliches Verhalten wie die Basis-Simulation des Ford Grundrisses. Die hierbei maximal auftretende Intrusion konnte bei einer Zeit von 60ms festgestellt werden. Sie befindet sich etwa 20cm über dem Wohnmobilboden und liegt mit ca. 165mm leicht unterhalb des Wertes, der beim T680 beobachtet werden konnte. Ort und Weg-Zeit-Diagramm der Intrusion sind in Abbildung 1.14 abgebildet.

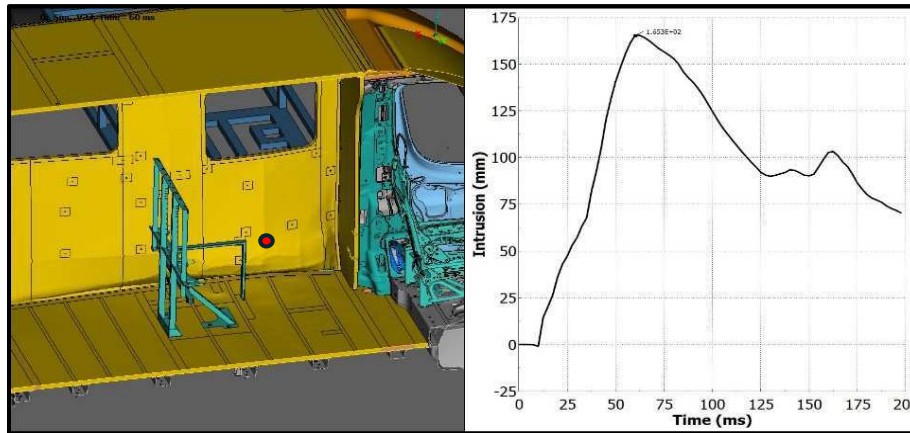


Abbildung 1.14: Im linken Bild wird der Ort (rot) der maximalen Intrusion bei einem Seitenaufprall nach ECE R 95 gezeigt. Das Diagramm rechts zeigt den Intrusionsweg-Verlauf dieses Punktes über den kompletten Zeitraum des Crashes.

- Gesamtauswertung der Basissimulationen T68

Im Gegensatz zu den Simulationen des T680 bestanden die Simulationen des T68 die Plausibilitätsanalyse. Damit konnte sichergestellt werden, dass die gewonnenen Ergebnisse ein gewisses Maß an Verlässlichkeit garantieren. Wie bereits die ersten Simulationen des T680 gezeigt haben, bietet die B-Säule einen großen Schutz im Falle eines Seitenaufpralls. Aufgrund der Position und der Überdeckung des Testschlittens schützt diese im Fall eines Aufpralls sowohl die Insassen der vorderen als auch der hinteren Sitzreihe. Darüber hinaus überraschte auch der Boden, der aufgrund seiner Lage relativ zum Crashelement, einen wirksamen Widerstand gegen eine Verletzung der Aufbauintegrität darstellt. Im Fall eines Frontalaufpralls konnte den Simulationen besonders eine Schwachstelle entnommen werden. Der Bereich des Übergangs zwischen Fahrgastzelle und Wohnmobilaufbau stellt ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar. Für den weiteren Verlauf des Projektes konnte somit festgestellt werden, dass der Seitenaufprall keine großen Anpassungen der Fahrzeugstruktur erforderlich macht.

AP 1.3 Erstellung der Anforderungsliste für Teil- und vollintegrierte Fahrzeuge

Die folgende Tabelle 1.1 zeigt die Anforderungen an Zielkosten, Bauraum, Gewicht, Funktionsintegration.

Tabelle 1.1: Die Tabelle zeigt die grundlegenden Anforderungen an die zu entwickelnde zusätzliche Fahrzeugverbesserung.

	teilintegriertes Reisemobil	integriertes Reisemobil
Zielkosten	ca. 3155€	ca. 3835€
Bauraum	von außen nicht sichtbar keine Beeinträchtigung im Innenraum kein Platz-/ Stauraumverlust	von außen nicht sichtbar keine Beeinträchtigung im Innenraum kein Platz-/ Stauraumverlust
Gewicht	keine Gewichtszunahme durch Integration zusätzlicher Teile	keine Gewichtszunahme durch Integration zusätzlicher Teile
Funktionsintegration	Medienführung für bspw. Warmluft zusätzliche Ablage in Steher Dämmung	Medienführung für bspw. Warmluft zusätzliche Ablage in Steher Dämmung

Die grundlegenden Anforderungen zur Verbindungstechnologie für teil- und vollintegrierte Wohnmobile unterscheiden sich nicht. Jedoch ist zur Erreichung der Ziele ein unterschiedliches Vorgehen notwendig. Wie in Abbildung 1.15 schematisch zu sehen, besitzen die Chassis der teilintegrierten einen großen Vorteil gegenüber den integrierten Reisemobilen. Sie besitzen neben den Crashabsorbern und dem Motor (der ebenfalls Teil der Knautschzone ist) eine stabile Fahrgastzelle. Diese besitzt einen stabilen, vom OEM bereits getesteten Rahmen, bestehend aus einer A- und B-Säule und weiteren Blechelementen. Die Basis eines vollintegrierten Wohnmobils besteht aus einem sogenannten Windlaufchassis und besitzt lediglich die Crashabsorber und den Motor, der im Falle eines Crashes Energie abbauen kann. Damit ist die Struktur eines vollintegrierten Wohnmobils stärker gefährdet als die eines teilintegrierten Wohnmobils.

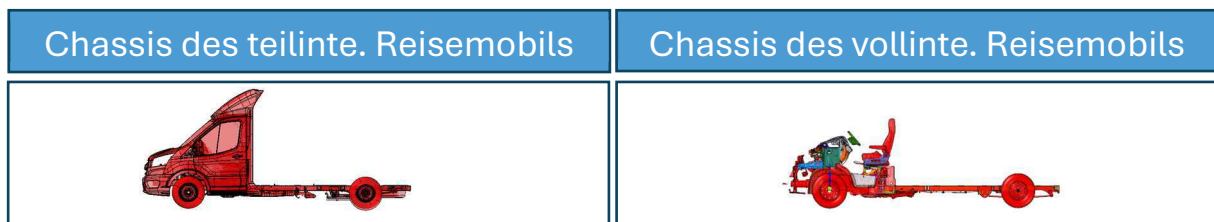


Abbildung 1.15: Schematische Gegenüberstellung der Ausgangschassis für teilintegrierte- und vollintegrierte Reisemobile.

Aus den Erkenntnissen der Basissimulationen zeigte sich, dass für das übergeordnete Ziel der Crashesicherheit bei Reisemobilen für integrierte Reismobile ein komplett anderer Ansatz gefunden werden muss. Anders als zum Start des Projektes gedacht, ist ein identischer Ansatz für beide Fahrzeugtypen weder aus wirtschaftlicher Sicht noch aus Gründen der Crashesicherheit sinnvoll. Daher wurde an dieser Stelle damit begonnen, die beiden Fahrzeugtypen getrennt voneinander zu betrachten und anders als im Antrag vorgesehen, zwei verschiedenen Systeme zu entwickeln. Dem ursprünglichen Ziel der Anwendbarkeit in allen Grundrisstypen kann an dieser Stelle nicht mehr nachgekommen werden.

AP 1.4 Definition der zu verstärkenden Fahrzeugbereiche

Aus den Simulationen des teilintegrierten Fahrzeugs heraus konnten die zu verstärkenden Fahrzeugbereiche identifiziert werden. Für den Seitenaufprall wurde der Bereich am Boden auf Höhe der Sitzbank für die hinteren Insassen definiert (1). Für den Frontalaufprall wurde der Bereich der T-Haube (2) und der Bereich der Seitenwandsteher (3) festgelegt (siehe Abbildung 1.16).

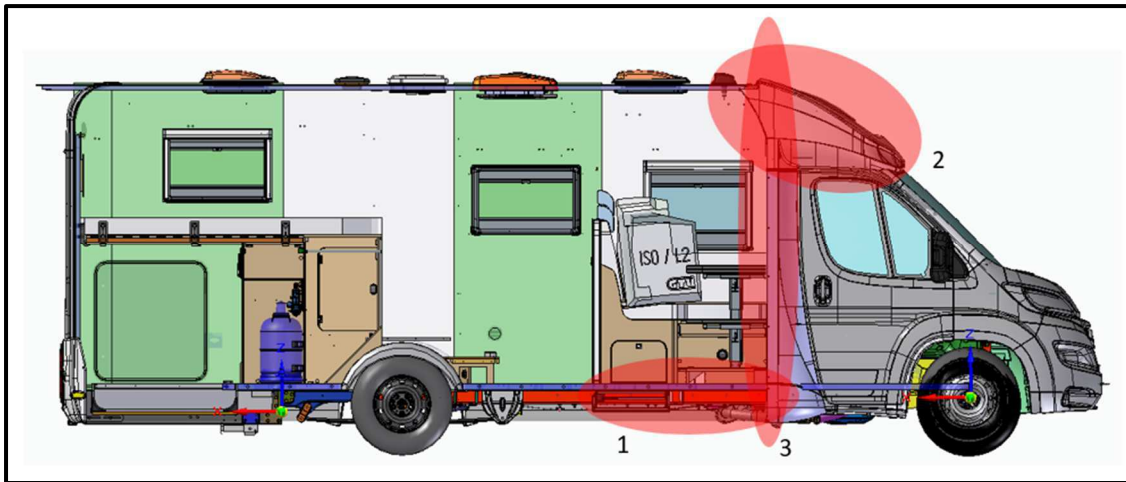


Abbildung 1.16: Es ist die Schnittdarstellung eines teilintegrierten Fahrzeugs gezeigt. Die zu verstärkenden Bereiche wurden aus den Basissimulationen abgeleitet und sind in der Abbildung rot hervorgehoben.

AP 1.5 Konzeptionierung zielführender Crashwirkprinzipien und Auswahl einer Vorzugsvariante

- Konzept: Sicherheitszelle:

Zur Konzeptionierung der Sicherheitszelle wurden die kritischen Schnittstellen durch Analyse des Kraftflusses im Frontalcrash-Lastfall bestimmt (siehe Abbildung 1.17). Darauf aufbauend wurden anfangs konzeptionelle Entwürfe für die Sicherheitszelle abgeleitet, wobei acht Varianten für Verbindungselemente (siehe Tabelle 1.2) und vier Varianten für den Steher (siehe Tabelle 1.3) konzeptioniert wurden. Die erarbeiteten Entwürfe wurden im Rahmen einer Nutzwertanalyse anhand gewichteter Bewertungskriterien miteinander verglichen.

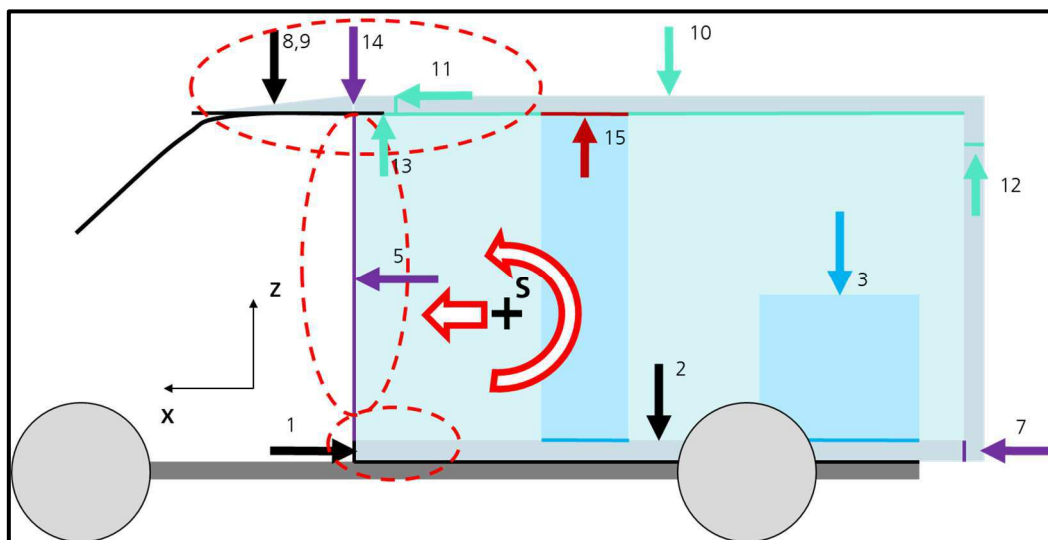


Abbildung 1.17: Schematische Darstellung der Kräfte und Momente, die während eines Frontalcrashes im Fahrzeug auftreten.

Tabelle 1.2: Tabellarische Gegenüberstellung der acht unterschiedlichen Verbindungskonzepte der Sicherheitszelle mit dazugehöriger Nutzwertanalyse.













		Crashperformance	Leichtbaugrad	Wirtschaftlichkeit	Montageaufwand	Optische Auswirkungen	Punktzahl
Durchgangshülsen		-	-	o	-	+	- 2
aufgesetzte Stufenbleche		o	+	+	o	-	- 1
Systemprofil		+	+	+	+	-	+ 2
3D-Knotenelemente		+	+	-	-	-	- 1
Systemhohlprofil geschraubt		-	o	-	o	+	- 1
Systemhohlprofil geschlitzte SW		o	+	o	-	+	+ 1
Stufenbleche geschlitzte SW		-	+	+	-	+	+ 1
2D-Knotenelemente		+	+	o	o	+	+ 3

Tabelle 1.3: Auflistung der vier verschiedenen Steherversionen (Querschnitte) mit dazugehöriger Nutzwertanalyse.

Variante		Crashperformance		Leichtbaugrad	Wirtschaftlichkeit	Montageaufwand	Punktzahl
		Frontalcrash	Seitencrash				
V1: L-Steher mit Seitenwandintegration		+	o	+	+	+	+4
V2: Steher mit Seitenwandintegration inkl. Zusatzanbindung B-Säule „Winkel“		+	+	-	-	o	0
V3: Steher mit Seitenwandintegration inkl. Zusatzanbindung B-Säule „Flügel“		+	o	-	-	o	-1
V4: Z-Steher mit Seitenwandintegration inkl. geänderter Anbindung an B-Säule		o	+	+	o	o	+2

Die Vorzugsvariante der FKV-Sicherheitszelle ist in Abbildung 1.18 dargestellt und besteht aus den folgenden Elementen und Verbindungen:

- Pos. 1: 2x L-Steher (Boden-Chassis-Seitenwand-Systemprofil-L-Profil)
- Pos. 2: 2x Systemprofil (Boden-L-Steher-Seitenwand-Querprofil-Vierkantprofil)
- Pos. 3: 2x L-Profil (Dach-Seitenwand-L-Steher) → optional Systemprofil einsetzen
- Pos. 4: 2x Vertikalprofil (Systemprofil-L-Profil) → bei Bedarf Anzahl erhöhen
- Pos. 5: 1x Querprofil (Systemprofil-Boden-Systemprofil) → bei Bedarf Anzahl erhöhen

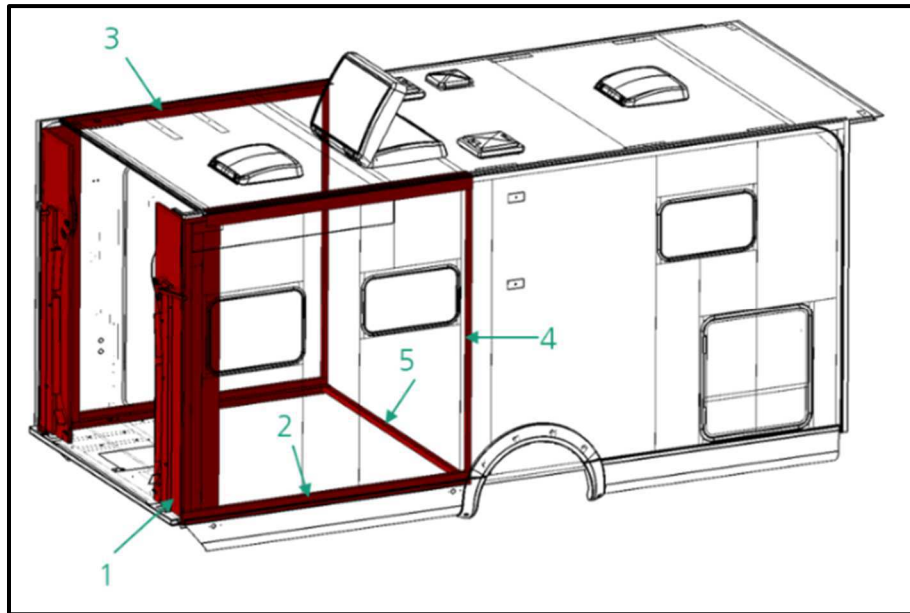


Abbildung 1.18: Darstellung der Vorzugsvariante der Sicherheitszelle für Reisemobile. Zu sehen sind die 5 verschiedenen Profilarten, aus denen die Zelle zusammengesetzt ist (vgl. Auflistung oben).

Da mit der Erstellung der Konzepte schon sehr früh begonnen wurde, war der Einsatz einer Sicherheitszelle zu Beginn des Projektes noch das vorgegebene Ziel für alle Fahrzeugtypen. Mit den Erkenntnissen aus den Basissimulationen erschien diese Lösung, wie bereits in Abschnitt 1.3 beschrieben, für teilintegrierte Reisemobile als nicht sinnvoll und hätte auch den zu verstärkenden Fahrzeugbereichen aus Abschnitt 1.4 nicht entsprochen. Aus diesem Grund wurde sich für das teilintegrierte Reisemobil gegen den Einsatz einer kompletten Sicherheitszelle entschieden. Lediglich der vordere Teil der Sicherheitszelle (Abbildung 1.18 (1)) stimmt mit den zu verstärkenden Fahrzeugbereichen (siehe auch Abschnitt 1.4, Abbildung 1.16 (3)) überein und wurde deshalb als Vorzugsvariante ausgewählt.

- Konzept Steher (für teilintegrierte Reisemobile):

Dieses Konzept stützt sich auf die durchgeführten Basissimulationen des Ford und Fiat Modells und bildet den Teil der Sicherheitszelle ab, der in den Berechnungen als kritischster Bereich identifiziert wurde. Der erste konstruktive Entwurf leitete sich aus der Variante 1 (L-Steher, vgl. Tabelle 1.3) ab und bestand aus einem Mehrschichtverbund von 2 faserverstärkten Organoblechen mit einer optisch ansprechenden ABS-Deckschicht (siehe Abbildung 1.19).

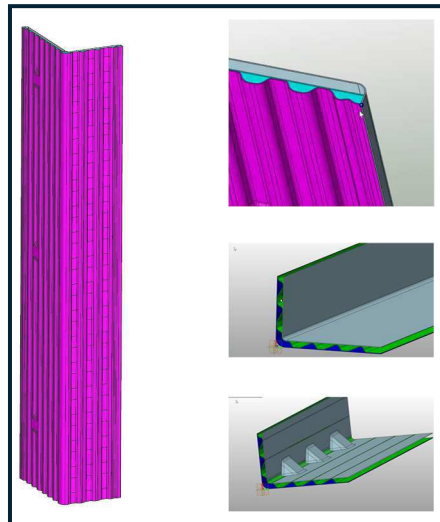


Abbildung 1.19: CAD-Modell des L-Steher, aus einem Mehrschichtverbund mit 2 faserverstärkten Organoblechen und einer ABS-Deckschicht.

Im weiteren Verlauf wurde der L-Steher durch Einbeziehen von immer detaillierteren Kriterien der Projektpartner, welche in Form von Online-Konferenzen kommuniziert wurden, weiterentwickelt. Nachfolgende Darstellungen geben einen Einblick in die 7 aufeinander aufbauenden Entwicklungsstufen des L-Steher.

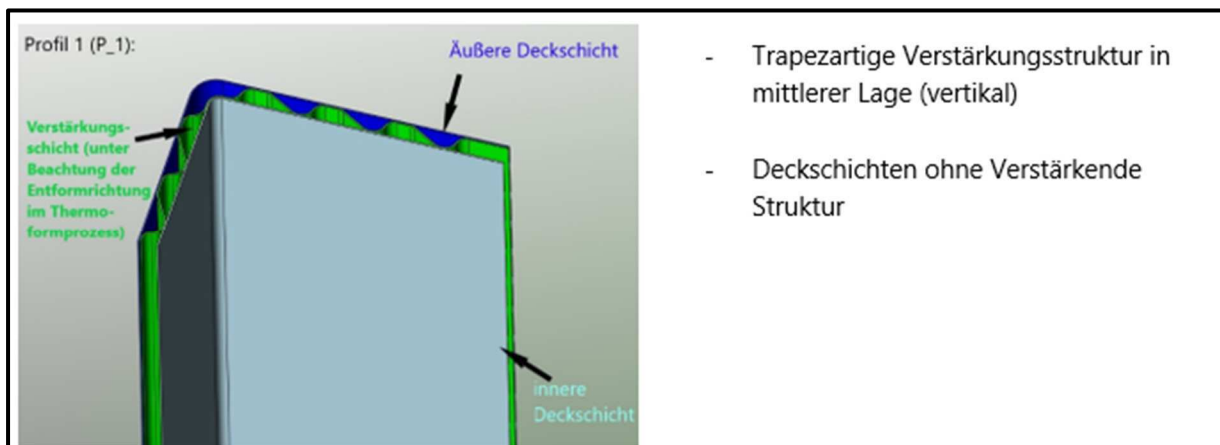


Abbildung 1.20: Entwurf L-Steher - Profil P1 / 07.02.2023 Lakowa intern.

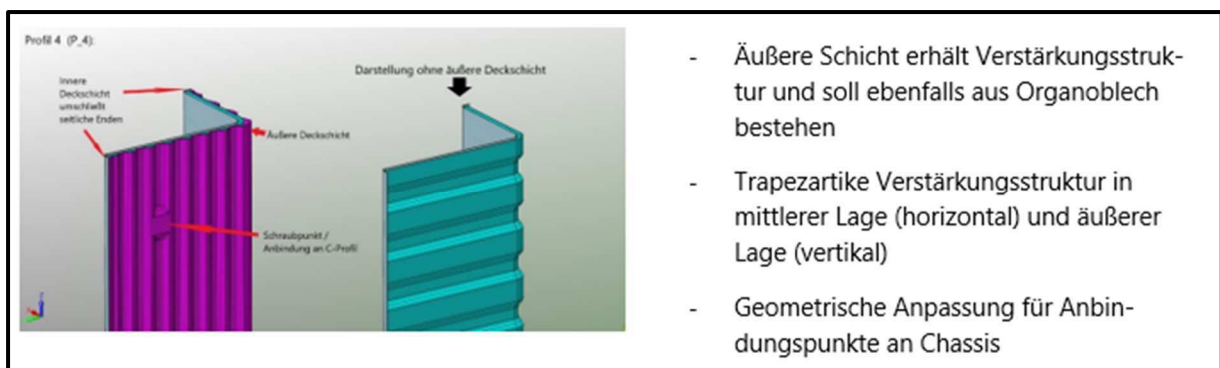


Abbildung 1.21: Entwurf L-Steher - Profil P4 / 07.02.2023 Lakowa intern.

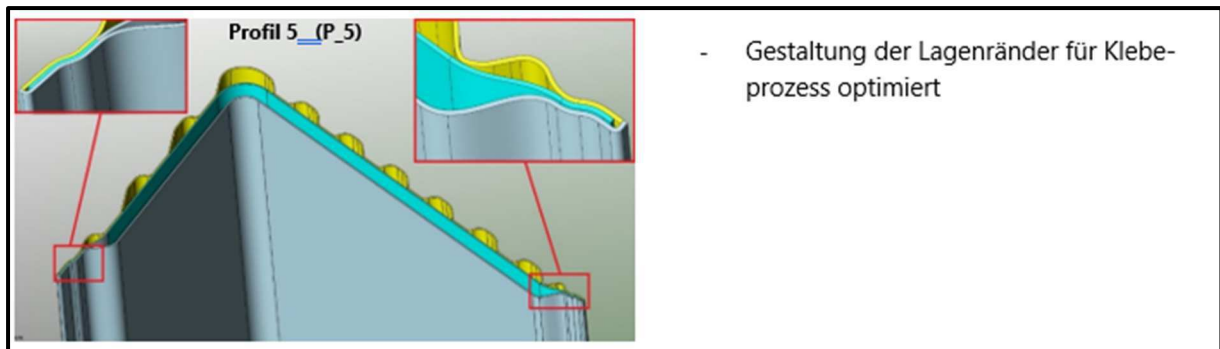


Abbildung 1.22: Entwurf L-Steher - Profil P5 / 07.02.2023 Lakowa intern.

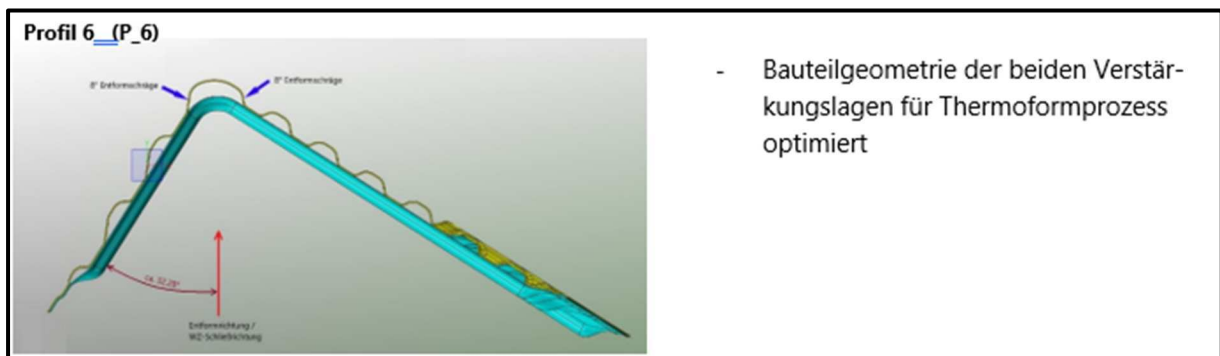


Abbildung 1.23: Entwurf L-Steher - Profil P6 / 07.02.2023 Lakowa intern.

Daraus resultiert ein neuer Bauteilbeschnitt und eine geänderte Geometrie an den Lagenenden. Nachfolgende Darstellungen zeigen den Entwicklungsstand von Profil 7 (P_7) des L-Steher:

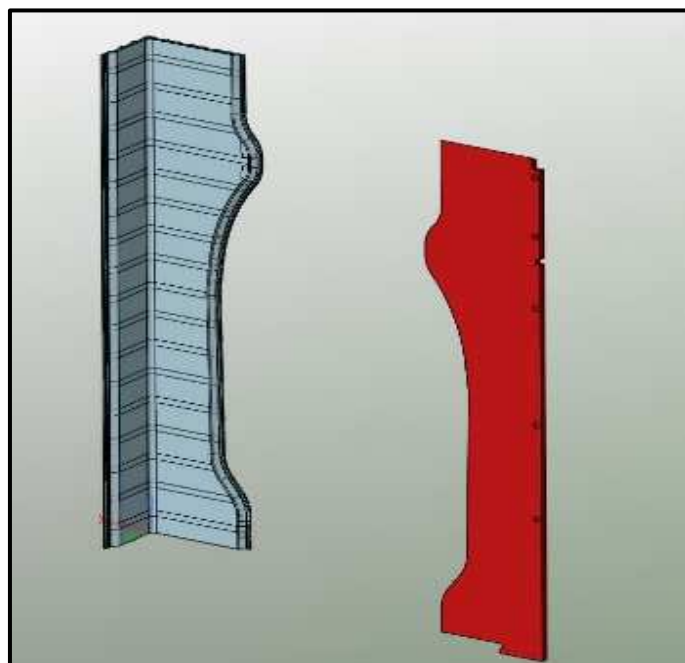


Abbildung 1.24: Entwurf L-Steher - Profil P7 / 17.02.2023 Lakowa intern.

Auf Grundlage der Entwurfsphase P_7 wurde in Kooperation mit LSE-Chemnitz der Entwurf eines modularen Thermo-Presswerkzeuges für die beiden Verstärkungslagen erstellt. Hierbei können Werkzeugstempel und Werkzeugmatrize mit unterschiedlichen

Modulen bestückt werden, wodurch beide Verstärkungslagen des L-Stehers hergestellt werden können. Siehe Anhang A „Entwurf Werkzeugkonzept LSE“.

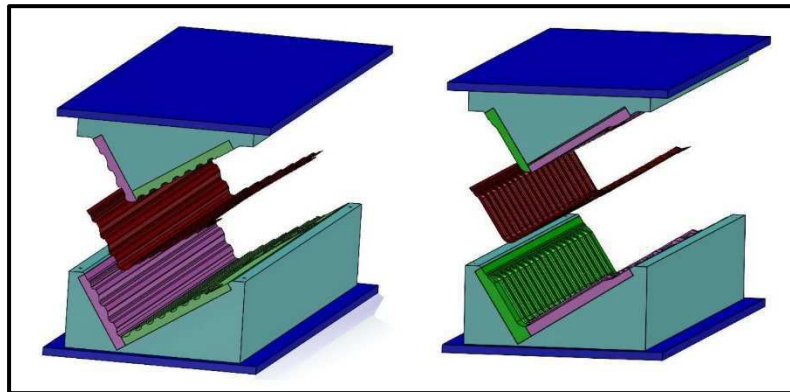


Abbildung 1.25: Entwurf eines modularen Thermo-Presswerkzeuges / 30.08.2023 aus CaraSave Projektmeeting von LSE-Chemnitz.

Die innere Decklage soll im Vakuum-Tiefziehverfahren hergestellt werden. Hierbei soll ein einteiliges EP-Harzwerkzeug von der Lakowa GmbH zum Einsatz kommen.

Dieses Konzept konnte nach einer internen Überprüfung leider nicht verfolgt werden, da es konstruktive Schwachstellen aufwies. Das Konzept wurde daher komplett überarbeitet und neu konstruiert. Der neu entwickelte Steher bestand aus einem fünf-lagigen Faserkunststoffverbund mit UD-Schichten in einer 0°/-45°/90°/45°/0° Anordnung. Das Konzept wurde in mehreren Iterationsschleifen immer weiter verbessert und weiterentwickelt (siehe Abbildung 1.26).

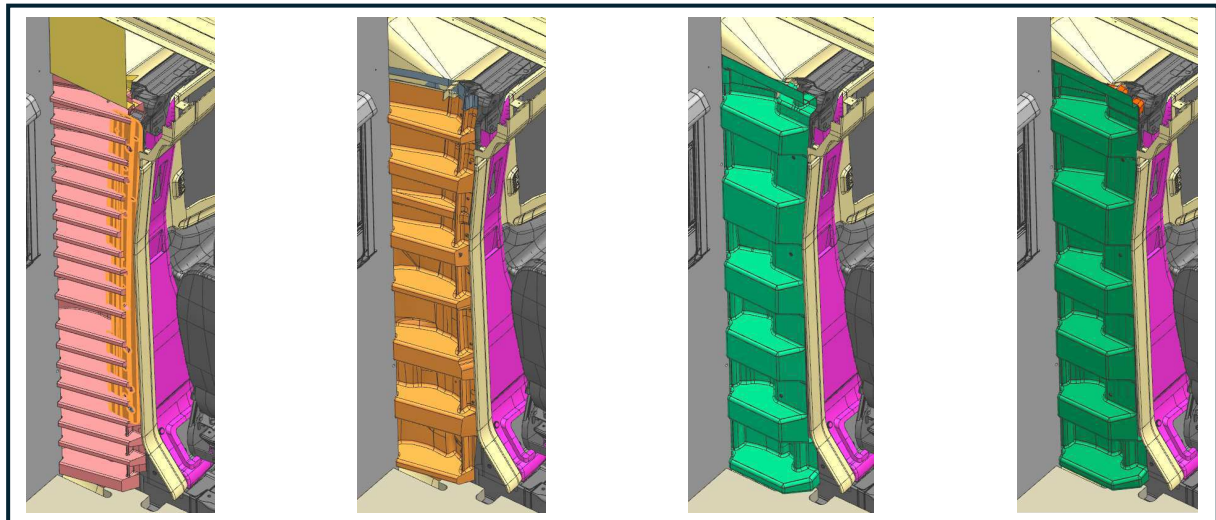


Abbildung 1.26: Gezeigt ist eine Auswahl von vier wesentlichen, iterativ verbesserten Steherkonzepten. Das Bild links zeigt die erste Version und das Bild rechts die finale Lösung, dazwischen befinden sich die Bilder zweier Zwischenkonzepte die aufgrund der Produzierbarkeit weiter verbessert werden mussten.

Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht sichergestellt werden konnte, dass dieser Teil der Sicherheitszelle allein die Belastungen im Crashfall aufnehmen kann, wurde ein zusätzlicher Maßnahmenkatalog (siehe Anhang 1) erstellt. Dieser Maßnahmenkatalog betrachtet die speziellen Anforderungen spezifisch für das teilintegrierte Reisemobil. Das Konzept dieses Mehrschichtverbundes wurde simulativ erprobt und wies noch

Schwachstellen im Bereich der T-Haube auf. Zu diesem Zeitpunkt hätten die Lösungen des Maßnahmenkatalogs Anwendung finden können. Wie jedoch noch später im gemeinsamen Abschlussbericht zu lesen sein wird, war das Konzept des Stehers für die teilintegrierten Reisemobile technologisch nicht umsetzbar und konnte ebenfalls nicht weiterverfolgt werden.

- Konzept Verstärkungswinkel (für teilintegrierte Reisemobile):

Da sowohl die Sicherheitszelle als auch die verschiedenen Steher-varianten kein angemessenes und umsetzbares Konzept hervorbrachten, musste ein neues komplett anderes Konzept gefunden werden. Die bis hierhin gewonnenen Erkenntnisse erlaubten uns eine sehr gute Abschätzung der Verhältnismäßigkeit, die ein Sicherheitskonzept für teilintegrierte Reisemobile erfordert. Aus den Untersuchungen der Crashwirkprinzipien (siehe Abbildung 1.17) und den Betrachtungen der zu verstärkenden Fahrzeugbereiche (siehe Abbildung 1.16) konnte ein weiterer Lösungsansatz gefunden werden. Das Konzept des Verstärkungswinkels sollte dabei grundlegend eine ähnliche Wirkweise wie das Steherkonzept aufweisen. Der Unterschied bestand lediglich in der verbauten Position am Fahrzeug. Die Idee bestand darin, einen zusätzlichen Lastabtrag parallel zur T-Haube zu definieren. Das Konzept nutzt dafür bestehende Wohnaufbau- und Fahrzeugkomponenten. In Kombination mit einem für den Frontalcrash optimierten T-Haubenschrank und einer überarbeiteten Anbindung zur Wohnkabine, bietet die Lösungsvariante einen völlig neuen Lösungsansatz zum Erreichen einer stabilen Fahrzeuggesamtstruktur. Das System besteht aus 2 spiegelsymmetrischen Faserkunststoffverbund-Bauteilen, die jeweils aus 2 einzeln herzustellenden Teilen bestehen und mittels einer Verklebung miteinander gefügt sind. In Abbildung 1.27 ist das Bauteil in der Ausführung „rechte Fahrzeugseite“ zu sehen. Der blau eingefärbte Teil kennzeichnet den einfach verstärkten und mit einer ABS-Deckschicht ausgeführten Teil. Der lila eingefärbte Bereich zeigt die dreifach verstärkte Abstützung, die im Wesentlichen für die Kraftübertragung zuständig ist. Dieser Teil besteht aus drei Schichten des Faserkunststoffverbundes mit jeweils fünf UD-Schichten in einer $0^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$ Anordnung (es wurde das gleiche Ausgangsmaterial verwendet, welches bereits für den Steher vorgesehen war).

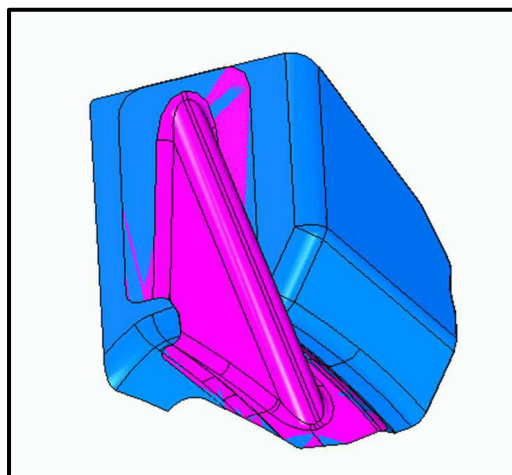


Abbildung 1.27: CAD-Darstellung des Verstärkungswinkels in der Ausführung für die rechte Fahrzeugseite.

AP 1.6 Konzeptionelle Modularisierung zur Verwendung in unterschiedlichen Fahrzeugen

- Konzept: Sicherheitszelle:

Bei der Auswertung der entwickelten Konzepte der FKV-Sicherheitszelle wurden neben der Crashperformance, dem Leichtbaugrad, der Wirtschaftlichkeit und den optischen Auswirkungen das Bewertungskriterium „Montageaufwand“ berücksichtigt. Dieses schließt die Überprüfung der Integrierbarkeit in unterschiedliche teilintegrierte und integrierte Fahrzeuge ein und ist somit ein starker Indikator für die Modularisierbarkeit des jeweiligen Konzeptes. Die ausgewählte Vorzugsvariante (siehe Abbildung 1.18) gewährleistet die Modularisierung durch die individuelle Anpassung der Verstärkungsprofilängen, was aus fertigungstechnischer und somit aus wirtschaftlicher Sicht sehr effizient zu realisieren ist. Die Schnittstellen zwischen den Verstärkungsstrukturen sind so auszulegen, dass eine in allen Fahrzeugen identische Ausführung möglich ist. Für den Seitenaufprall wurde ein modularisierter Leichtbauschweller konzipiert (siehe Abbildung 1.28). Variante I stellt den initialen Entwurf dar, dessen Bauweise im Folgenden optimiert wurde. Die Leichtbau- und Kostenoptimierung zielt darauf ab, das Gewicht der Konstruktion zu reduzieren und gleichzeitig die Kosten zu verringern. Dies kann durch den Einsatz geeigneter Materialien und intelligenter Konstruktionsmethoden erreicht werden. Hierzu wurden zunächst gezielte Aussparungen in der Metallstruktur, den Querstreben, vorgenommen (Variante II). Diese Aussparungen ermöglichen es zudem, Rohrleitungen hindurchzuführen, was eine flexible Anordnung der technischen Komponenten und eine verbesserte Zugänglichkeit zur Folge hat. Ein weiteres Element der Optimierung stellen die lokalen Pufferelemente dar, die lediglich im Bereich des Crashelements platziert werden (Variante III). Diese Maßnahme bietet Schutz bei Kollisionen, ohne die gesamte Struktur unnötig zu belasten. Schließlich ist auch eine gezielte Gestalt- und Wandstärkenoptimierung von Bedeutung (Variante IV). Durch die Analyse der Belastungen können die Formen und Wandstärken der Konstruktion so angepasst werden, dass sowohl das Gewicht reduziert als auch die Stabilität verbessert wird. Überflüssige Materialteile können dabei entfernt werden, was zu einer insgesamt effizienten und leistungsfähigen Konstruktion führt.

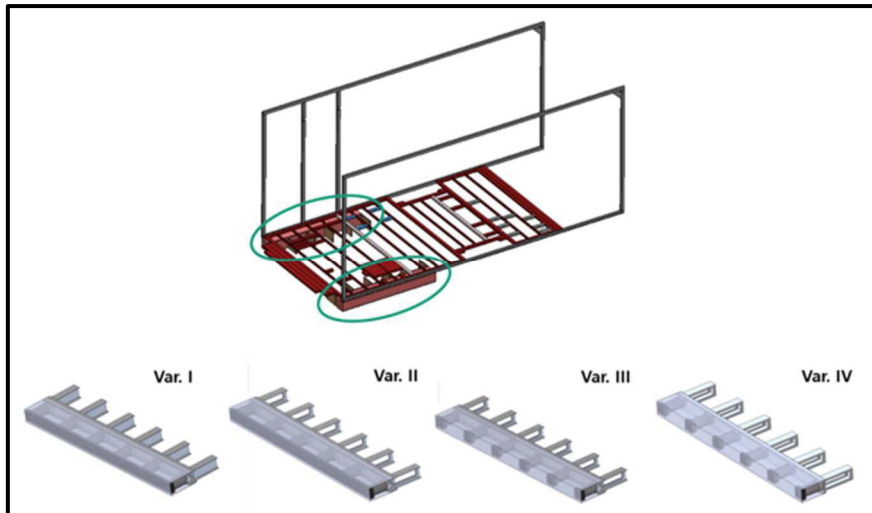


Abbildung 1.28: Darstellung der Sicherheitszelle mit den vier Versionen (Var. I- Var. IV) des verstärkten Schwellers.

- Konzept Steher (für teilintegrierte Reisemobile):

Das Konzept des Stehers ist aus der Idee der Sicherheitszelle entwickelt worden und bietet somit dasselbe Potential in mehreren Grundrissen Verwendung zu finden.

- Konzept Verstärkungswinkel (für teilintegrierte Reisemobile):

Aufgrund der kompletten Neuentwicklung dieser Verstärkungslösung musste auch die Überprüfung der Modularisierbarkeit neu bewertet werden. Aufgrund der neuen Einbauposition besitzt der Verstärkungswinkel andere Schnittstellen zu bestehenden Reisemobilkomponenten. Diese sind im Wesentlichen das Dach der Fahrgastzelle und der T-Haubenschrank. In allen Fahrzeugen, die mit diesen Komponenten ausgestattet sind, kann das Konzept angewendet werden. Dies schließt zum heutigen Stand lediglich die Gruppe der Alkoven-Wohnmobile gänzlich aus. Insofern konnte dem Projektziel der Modularisierbarkeit für alle Grundrisse nicht vollständig nachgekommen werden. Der Anteil der bei Capron hergestellten Fahrzeuge, der mit einem Verstärkungswinkel ausgestattet werden kann, beläuft sich im Modelljahr 2025 auf ca. 82% (die Gruppe der integrierten Reisemobile wurden nicht in die Berechnung einbezogen).

AP 1.7 Iterative Ermittlung zielführender Maßnahmen zur Realisierung der erforderlichen strukturellen Steifigkeit und Festigkeit anhand reduzierter Simulationsmodelle

Für die Überprüfung des Verstärkungskonzeptes der T-Haube wurde der entwickelte Verstärkungswinkel in einer statistischen FEM-Simulation überprüft (siehe Abbildung 1.29). Als Last wurden Ergebnisse aus der hochdynamischen Simulation der Firma Teccon herangezogen. Hierbei wurden die auftretenden Verschiebungen an zwei Stellen des Triebkopfes (siehe Abbildung 1.30) gemessen und als Eingangsgrößen für die statische FEM gewählt.

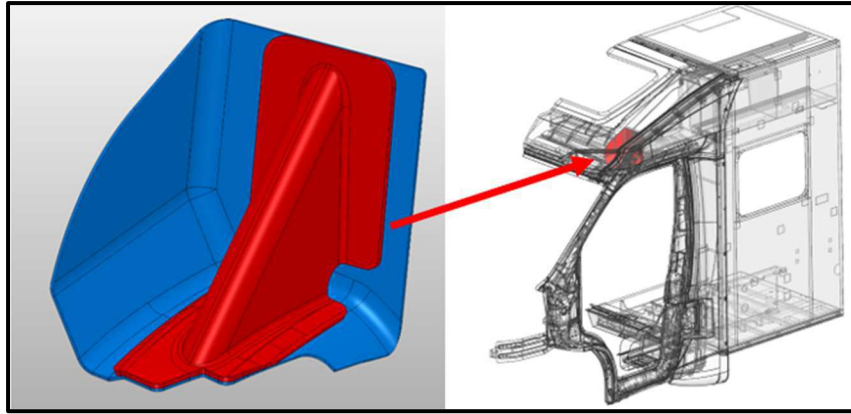


Abbildung 1.29: Verstärkungswinkel (links) und dessen Einbausituation (rechts) im Viertelmodell.

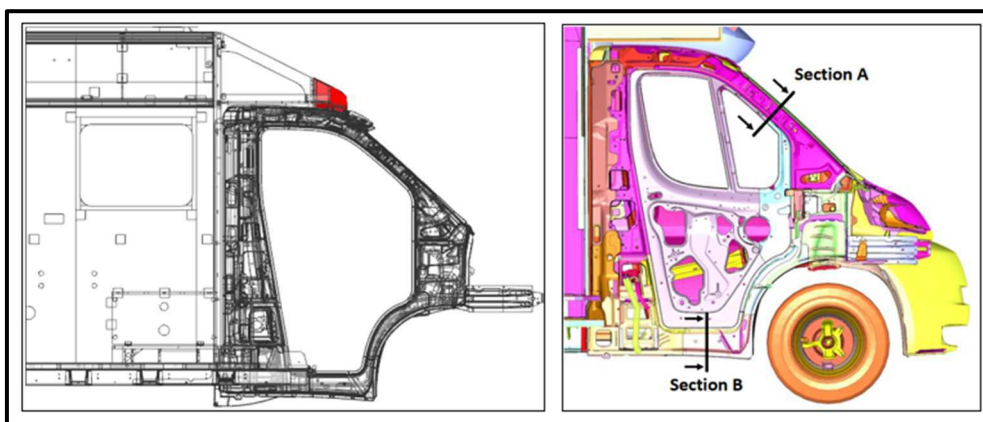


Abbildung 1.30: Seitenansicht des Viertelmodells und Position der Schnittstellen der aufgenommenen Verschiebung aus der Teccon Simulation.

In der simulativen Betrachtung wurde das Modell des Gesamtfahrzeugs auf den relevanten Teil heruntergebrochen und nur ein Viertelmodell verwendet, um die Rechenzeit zu reduzieren. Die Verschiebungswerte wurden bei 85 ms der dynamischen Simulation von Teccon gewählt, da zu dieser Zeit die höchste Belastung auf die T-Haube und damit den Verstärkungswinkel wirken. Die Verschiebungskurven sind in Abbildung 1.31 und Abbildung 1.32 dargestellt.

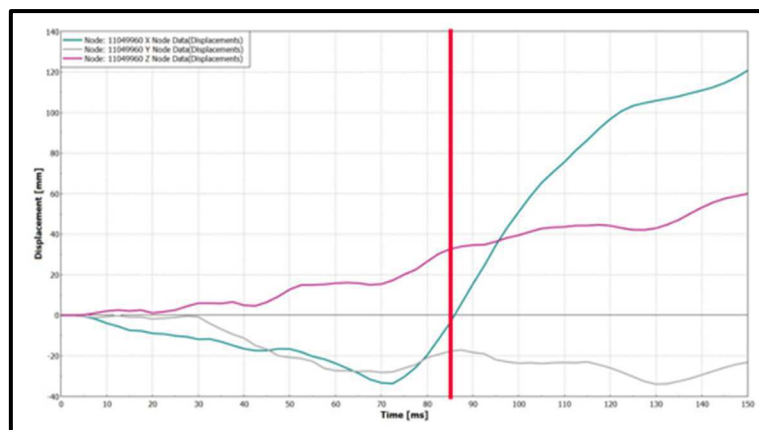


Abbildung 1.31: X-Y-Z-Verschiebung bei Schnittstelle A aus der Gesamtfahrzeugsimulation.

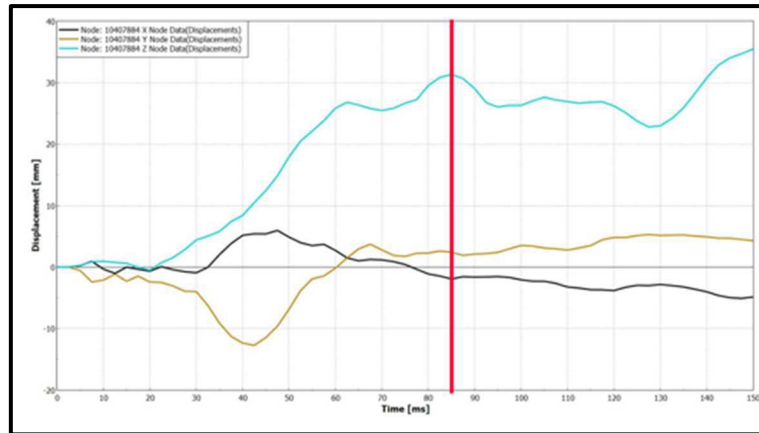


Abbildung 1.32: X-Y-Z-Verschiebung bei Schnittstelle B aus der Gesamtfahrzeugsimulation.

Die Anbindung des Verstärkungswinkels wurde in der Simulation als perfekte Verbindung angenommen, d.h. eine Verklebung wurde in der statischen Simulation nicht berücksichtigt und erst in der dynamischen Simulation betrachtet. Die Ergebnisse der statischen Simulation zeigen keine Auffälligkeiten (siehe Abbildung 1.33) für den Verstärkungswinkel. Auch die maximalen Vergleichsspannungen lagen deutlich unter der Festigkeit des eingesetzten ABS und ABS-GF.

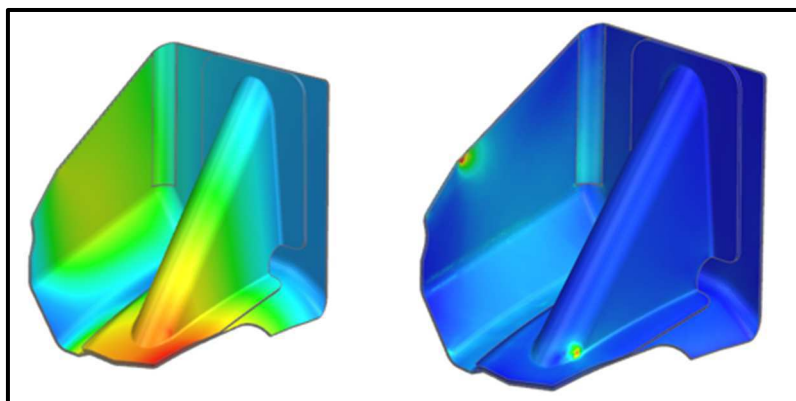


Abbildung 1.33: Verschiebung (links) und Spannungsbild (rechts) aus der statischen Simulation.

AP 1.8 Modularisierung und Integrationsstrategie der Crashstruktur

- Konzept: Sicherheitszelle:

Die FKV-Sicherheitszelle ist durch die Profilformen ihrer einzelnen Elemente (vergleiche Abschnitt 1.5) vorgegeben. Die Modularisierbarkeit wird durch die Anpassung der Länge gewährleistet. Da unterschiedliche Grundrisse sich nicht nur in ihrer Gesamtlänge, sondern auch in der Länge ihrer einzelnen Möbelbaugruppen unterscheiden, muss somit die Länge der Systemprofile (Boden-L-Steher-Seitenwand-Querprofil-Vierkantprofil, vgl. Abschnitt 1.5) ebenfalls variabel herstellbar sein. Auch die Breite der Sicherheitszelle wurde anpassbar designt, da sich z.B. die Gruppe der teilintegrierten Wohnmobile nochmals in die beiden Unterkategorien T-Modell und V-Modell unterteilen und als wesentliches Unterscheidungsmerkmal durch

ihre Aufbaubreite zu erkennen sind. Über eine Anpassung des Querprofil (Systemprofil-Boden-Systemprofil, vgl. Abschnitt 1.5) können somit verschiedene Breiten realisiert werden. Die modellspezifischen Profile müssen somit für den Einbau zunächst einmal in der richtigen Länge vorliegen. Ob dies durch den internen Zuschnitt oder durch den Zulieferer realisiert werden kann, ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht geklärt. Aufgrund der unterschiedlichen Ausführungen der Profile ist eine differenzierte Integrationsstrategie notwendig. Diese ist auch durch den Aufbauprozess der Wohnmobile in der Firma Capron in großen Teilen vorgegeben. Für die Pos. 4 (Vierkantprofil) und Pos. 5 (Querprofil), siehe Abschnitt 1.5, bedeutet dies eine Integration sehr weit am Anfang des Herstellungsprozesses. Sie müssen in die Seitenwände, Dächer bzw. Böden integriert werden. Der L-Steher Pos. 1 (Boden-Chassis-Seitenwand-Systemprofil-L-Profil) dient als zentrales Verbindungselement der Sicherheitszelle und soll die Anbindung des Aufbaus mit der Fahrgastzelle übernehmen. Er muss lediglich die Form und Kontur des Chassis, für eine optimale Anbindung widerspiegeln. Alle anderen benachbarten Baugruppen können an ihn angepasst werden z.B. Boden. Die Systemprofile Pos. 2 Systemprofil (Boden-L-Steher-Seitenwand-Querprofil-Vierkantprofil und Pos. 3 L-Profil (Dach-Seitenwand-L-Steher) werden von außen auf die Seitenwand bzw. von innen in den Aufbau integriert.

- Konzept Steher (für teilintegrierte Reisemobile):

Die finale Version dieses Konzeptes besteht aus einem durch Thermoforming, hergestellten Bauteil. Da es Schnittstellen zum Chassis und zum Aufbau besitzt, ist es für gewisse Grundrisstypen und Basisfahrzeuge designt. Es muss darüber hinaus eine besonders hohe Steifigkeit gegenüber einer Normalspannung zur Bauteilquerachse besitzen. Die Kombination dieser Eigenschaften schloss eine modulare Konstruktion aus. Dennoch kann das System durch Anpassungen der Konstruktion auf eine Vielzahl von Grundrissen übertragen werden. Dabei sollte es den Möbelsteher ersetzen, der in allen teilintegrierten- und integrierten Reisemobilen existiert. Aufgrund des Verbau-Ortes (direkt hinter der Fahrgastzelle) muss das Bauteil während der Produktion als eines der ersten Elemente an das Fahrzeug montiert werden.

- Konzept Verstärkungswinkel (für teilintegrierte Reisemobile):

Für den Verstärkungswinkel wurde ein modulares Konzept gewählt. Es besteht aus einer äußeren Schale, die an das jeweilige Chassis Dach angepasst werden kann und einem Winkel, der für die eigentliche Kraftübertragung zuständig ist. Das dazugehörige Zusammenbaukonzept des verstärkten T-Hauben-Schranks kann ebenfalls als modular bezeichnet werden. Der Winkel wird an diesem befestigt und ist unter der T-Haube im Fahrzeug integriert. Daraus folgt, dass der Schrank bereits am Fahrzeug eingebaut sein muss, doch die T-Haube noch nicht montiert sein darf. Für das generelle Aufbauprinzip der Firma Capron stellt dies jedoch keine Herausforderung dar, da die T-Haube erst spät am Fahrzeug montiert wird. Wohingegen der T-Hauben-Schrank schon recht früh in das Fahrzeug kommt.

AP 1.9 Erarbeitung von Verbindungs- und Montagekonzepten der Crashprofile und Verbindungselemente

- Konzept: Sicherheitszelle:

Für die Verbindung der einzelnen Profile ergeben sich aus produktionstechnischer Sicht lediglich 2 verschiedene Verbindungsprinzipien. Dies umfasst die Verklebung oder eine Schraubverbindung mit einer geeigneten konstruktiven Ausführung. Je nach Art des Profils und dessen örtlichen Verbaus musste ein geeignetes Konzept gefunden werden. Der Steher sollte sowohl durch Verschraubungen, drei je Seite, zur B-Säule gesichert werden. Aufgrund der hohen Belastungen im Crashfall muss dieser zusätzlich durch eine Verklebung mit dem Chassis verbunden werden. Dabei sieht das Montagekonzept vor, die Kleberaube zuerst auf den Steher zu applizieren und anschließend durch die Verschraubung den definierten Klebspalt sicherzustellen. Für die Profilverbindungen in den Seitenwänden eignet sich eine Schraubverbindung wie unter Abbildung 1.34 gezeigt.

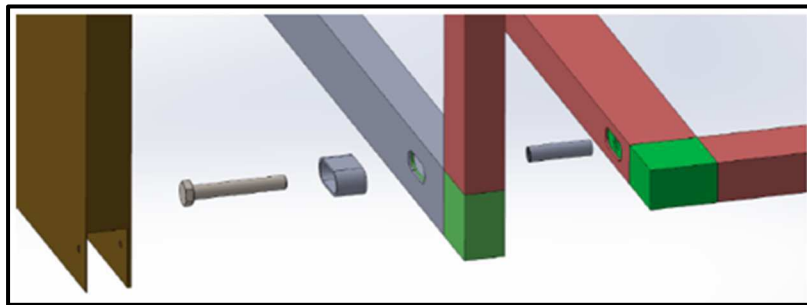


Abbildung 1.34: Explosionsansicht der Profilschnittstelle (Boden- Seitenwand) mit dazugehörigem Fügekonzept.

- Konzept Steher (für teilintegrierte Reisemobile):

Da das Steherkonzept im Wesentlichen einen Teilbereich der Sicherheitszelle darstellt, besteht auch das Verbindungskonzept aus Teilen der Sicherheitszelle. Die Integrationsstrategie sah eine Verklebung mit zusätzlicher Verschraubung zum Chassis vor. Boden und Seitenwände sollten durch eine Verschraubung gefügt und durch einen Dichtstoff abgedichtet werden. Für den Innenraum war eine Blende geplant, die zahlreiche Möglichkeiten zur Funktionsintegration bot.

- Konzept Verstärkungswinkel (für teilintegrierte Reisemobile):

Wie bereits im Abschnitt 1.8 erwähnt, wird der Verstärkungswinkel unter der T-Haube platziert. Dafür wurde ein spezielles Montagekonzept entwickelt. Demnach der Winkel durch eine Verklebung mit dem Dach des Chassis gefügt werden muss und anschließend mit dem dahinter liegenden T-Hauben-Schrank verschraubt wird. Aus der Analyse des Aufbaukonzeptes und unter Berücksichtigung von Toleranzen sollte der Einbau des Bauteils somit erst erfolgen, sobald der Schrank am Fahrzeug vormontiert ist. Die Montage des Verstärkungswinkels stellt dabei den Abschluss der Schrankmontage dar. Nachdem beide Verbindungen sichergestellt sind, erfolgt die Montage der T-Haube.

AP 1.10 Detailierung und Bewertung von Crashstruktur-Varianten hinsichtlich Leichtbau

Es wurden diverse Verbindungs- und Montagekonzepte (diverse Knotenelemente an verschiedenen Positionen der Sicherheitszelle, Winkel- und Systemprofil) entwickelt

und hinsichtlich ihres Leichtbaus bewertet (siehe AP 1.5). Die GFK-Profile wurden mittels eines steifigkeitsäquivalenten Ansatzes vordimensioniert und das Leichtbaupotential im Vergleich zu konventionellen Fichte-Leisten aufgezeigt (siehe Abbildung 1.35). Zudem wurde die Schweller-Anbindung an den Leiterraum mit Leichtbauprofilen entworfen und Funktionsintegrationsstrategien untersucht (Leitungen, Schläuche etc., siehe auch AP 1.6). Bei den Konzepten der Stehervariante und dem Verstärkungswinkel wurde auf dieselbe Materialauswahl gesetzt. Die Bewertung des Steherkonzeptes konnte aufgrund der Probleme in der Herstellung jedoch nicht abgeschlossen werden. Auf theoretischer Ebene besitzt dieses Konzept jedoch ebenfalls Gewichteinsparpotential, da der aktuell verbaute Steher mit einer Dicke von 26mm Sperrholz eine hohe Masse besitzt. Für den Verstärkungswinkel ist eine vergleichende Betrachtung dahingehend nicht sinnvoll. Da es sich bei dem Bauteil um ein zusätzliches Teil handelt, für dessen Einsatz kein anderes entfallen kann. Der Anforderung im Sinne des Leichtbaus kann an dieser Stelle nur durch den verwendeten Werkstoff nachgekommen werden. Zu diesem Thema soll im Abschnitt AP 2.1 näher eingegangen werden.

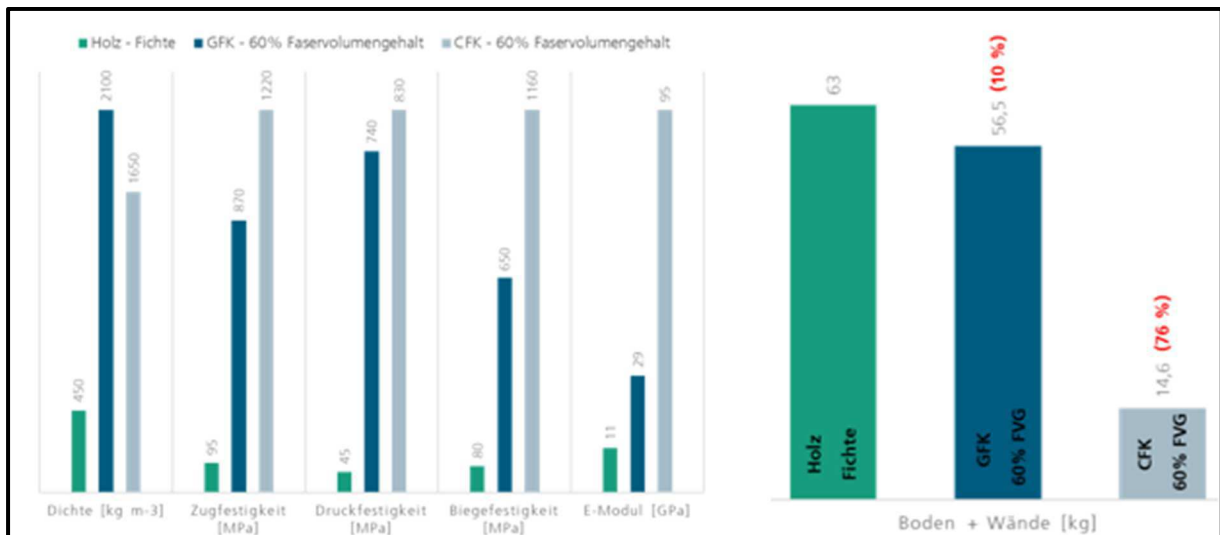


Abbildung 1.35: Vergleich der mechanischen Eigenschaften FKV – Holz (li.) und Masseinsparung bei Substitution Vollholz- durch FKV-Hohlprofile (biegesteifigkeitsäquivalent).

AP 1.11 Ausarbeitung der Crashstrategie

Zu Beginn des Projektes wurden drei Crashtests (ECE R 32, 95 und 137) als potenziell wichtige Testszenarien eingestuft. Wie bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben, bietet der Aufbau von Reisemobilen bereits ein hohes Maß an Sicherheit im Bezug auf einen Heckaufprall, weshalb dieser Crashtest nicht weiter betrachtet werden musste. Auch der Crashtest nach ECE R 95 konnte über die durchgeführten Simulationen als wesentlich weniger kritisch eingestuft werden als anfangs angenommen. Zusätzlich dazu führten Änderungen der Anforderungen (gemeint sind hierbei die potenziellen gesetzlichen Vorgaben der EU- Kommission an die Crashsicherheit von Reisemobilen) dazu, dass eine Überprüfung dieses Lastfalls durch einen Crashtest nicht notwendig ist und voraussichtlich, in naher Zukunft, auch nicht notwendig wird. Aus diesem Grund

wurden die zu erfüllenden Anforderungen an die Crashstruktur auf den Lastfall des Frontalaufpralls reduziert.

Die Crashstrategie, für das im Projekt CaraSave verfolgte Ziel des crashtestensicheren Reisemobils, wurde somit auf den Frontalaufprall nach ECE R 137 ausgelegt. Das bedeutet, dass dieser Test als maßgebliches Bewertungskriterium für das Erreichen des Projektziels gesetzt wurde. Dies hatte im wesentlichen zwei Vorteile: Zum einen bietet die Durchführung eines standardisierten Tests die Möglichkeit einer Vergleichbarkeit und einer Reproduzierbarkeit der Versuche. Außerdem besteht die hohe Wahrscheinlichkeit, dass dieser Test eines Tages für die Branche verpflichtend wird. Sowohl die gewonnenen Erfahrungen mit dem Test selbst als auch die Verwertbarkeit der gewonnenen Projekterkenntnisse lassen die Durchführung dieses Crashtests als sinnvoll erscheinen.

In der Projekt-Vorhabensbeschreibung waren ursprünglich 4 Tests geplant. Dabei sollten jeweils zwei integrierte und teilintegrierte Reisemobile einem Crash unterzogen werden. Mit der nicht vollständig genehmigten Verlängerung war es leider nicht möglich, den Prototyp eines crashtestensicheren integrierten Wohnmobils zu bauen. Auch die Durchführung eines Seitenaufpralls nach ECE R 95 wurde im Verlauf des Projektes für teilintegrierte Fahrzeuge als nicht sinnvoll erachtet und aus diesem Grund nicht durchgeführt. Lediglich der Test nach ECE R 137, an einem teilintegrierten Reisemobil, sollte wie geplant durchgeführt werden.

AP 1.12 Ausarbeitung der Zulassungsstrategie

Für die im Projekt CaraSave entwickelten genehmigungsrelevanten technischen Änderungen wurde eine prinzipielle Homologationsstrategie erarbeitet. Diese ist als Empfehlung für uns selbst (Hersteller) zu verstehen und ist auf die im Projekt entwickelten Neuerungen ausgelegt. Sie stellt dabei keine allgemeingültige Homologationsstrategie der Firma Capron dar.

Grundlage für die Gesamtfahrzeuggenehmigung ist ein freigegebenes Pflichtenheft, welches auf Basis des Lastenheftes entsteht und inhaltlich die Möglichkeiten zur Umsetzung der technischen Änderungen beschreibt. Hierbei fließen die Anforderungen der Regularien, die im Zusammenhang mit der Crashtestsicherheit zu erfüllen sind, ein.

Da zum heutigen Zeitpunkt noch keine Gewissheit über den Umfang der zu erfüllenden Regularien herrscht, soll das Verfahren anhand der UN-Regelung Nr. 137 verdeutlicht werden, für die im Rahmen des Projektes eine Umsetzungsstrategie erarbeitet wurde. In dem frei erfundenen Beispiel wird die Erfüllung dieser UN-Regelung für Fahrzeuge der Klasse M1-SA zum 1.11.2029 beschlossen und soll bis zum 1.11.2031 umgesetzt werden. Spätestens nach Bekanntgabe dieser neuen Anforderung sollte dabei entschieden werden, wie die erforderlichen Nachweise für das Genehmigungsverfahren zu erbringen sind.

Denkbar wären zwei Lösungsansätze, welche sich in einer Systemgenehmigung oder einem Systemprüfbericht unterscheiden. Die Entscheidung welches Verfahren angewandt werden soll, ist von verschiedenen technischen Faktoren abhängig und wird in Zusammenarbeit mit dem technischen Dienst definiert.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Einsetzbarkeit der „Verstärkungslösung“ auf Teilintegrierte (V-Modelle inbegriffen) begrenzt. Für vollintegrierte Reisemobile konnte

lediglich ein nicht validiertes Konzept erarbeitet werden. Aus diesem Grund wird die vorläufige Strategie und das hier genannte Beispiel anhand dieser Methode weiter beschrieben. Als unterschiedliche Typen sind dabei folgende Fahrzeuge zu verstehen:

- Teilintegrierte Fahrzeuge auf Stellantis- Basisfahrzeug (einschl. V-Modelle und Alkoven-Modelle)
- Teilintegrierte Fahrzeuge auf Ford- Basisfahrzeug
- Vollintegrierte Fahrzeuge auf Stellantis-Basisfahrzeug

Da sich die Alkoven Fahrzeuge, genau wie die vollintegrierten Fahrzeuge, nicht mit den entwickelten Verstärkungswinkeln ausstatten lassen (vgl. Abschnitt 1.6), muss für diese Fahrzeuge ein anderes Konzept gefunden und separat geprüft werden. Nachdem die Anforderungen, vorgegeben durch die UN-Regelung Nr. 137 und die Nachweisführung definiert sind, sollte der technische Dienst möglichst frühzeitig in die Entwicklung eingebunden werden, z.B. unmittelbar nach der Bekanntgabe im November 2029. Dabei muss für jeden Fahrzeugtyp die ungünstigste Version (Worst-Case) definiert werden. Der prinzipielle Aufbau, die Fahrzeugmassen und die Ausführung der Möbelbaugruppen werden dabei ein wesentliches Bewertungskriterium darstellen. Für das Projekt CaraSave wurde der Ford T680 bzw. Fiat T68 als Mustergrundriss definiert. Ob dieser als Prüfling geeignet ist, muss zu gegebener Zeit mit dem technischen Dienst geklärt werden. Die Bereitstellung der notwendigen Zusatzinformationen sollte somit im ersten Quartal 2030 erfolgen. Parallel dazu werden weitere Komponententests geplant und bis Ende 2030 im Beisein des technischen Dienstes durchgeführt. Mögliche Komponententests können dabei durch dynamische Versuche von Einzelkomponenten oder einer Gesamtstruktur erfolgen. Bis zum 01.05.2031 sollte für jeden Fahrzeugtyp ein Prüfling entwickelt sein. Die abschließenden Fahrzeugtests werden dann beim technischen Dienst durchgeführt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass neben der Worst-Case-Prüfung durchaus weitere Tests als Nachweis der Konformität erbracht werden müssen. Dies sollte unbedingt bei der Planung berücksichtigt werden. Nachdem die Tests mit den Vorgaben aus der UN-Regelung Nr. 137 bestanden wurden, wird der dazugehörige Nachweis erstellt. Dieser bildet abschließend den notwendigen Nachweis im Teil III der EG-Typengenehmigung zur Konformität gegenüber der genehmigenden Behörde.

AP 2 Kennwertermittlung und Auslegung der Crashmodule

AP 2.1 Materialauswahl (Verstärkungsfasern, Textilien, Matrix)

Faserverbundkunststoffe (FKV) bieten im Vergleich zu Holz zahlreiche Vorteile. Zunächst zeichnen sie sich durch eine hohe Langlebigkeit aus, da sie wiederverwendbar und recycelbar sind. Zudem besitzen sie eine hervorragende Medienbeständigkeit und sind resistent gegen Feuchtigkeit, was ihre Einsatzmöglichkeiten erweitert. Ein weiterer Vorteil ist, dass FKV direkt eingesetzt werden können, ohne dass eine Vorbehandlung erforderlich ist. Dies führt zu einer Einsparung von Prozessschritten in der Verarbeitung. Des Weiteren bieten FKV eine deutlich höhere spezifische Energieabsorption, sodass sie in dieser Hinsicht Metalle

übertreffen. Schließlich ermöglichen sie die Realisierung hochfester Verbindungen, die beispielsweise für die Möbelbefestigung von Bedeutung sind.

Im Rahmen des AP erfolgte unter Beachtung der in AP 1 erstellten Anforderungsliste eine entsprechende Materialauswahl. Hierzu wurden Vorstudien des Fraunhofer IWU und Literaturrecherchen herangezogen, um Materialien mit entsprechend hoher spezifischer Energieabsorption ausfindig zu machen.

Für pultrudierte faserverstärkte Kunststoffe werden oft fertigungsbedingt duroplastische Matrixsysteme bevorzugt. Ausgewählt wurde ein ungesättigtes Polyester-(UP)-Harz, da es im Vergleich zu Epoxidharzen wirtschaftlicher ist. Als Verstärkungsfasern dienen Endlosfasern in Form von unidirektionalen Faserbündeln. Für vakuumtiefgezogene bzw. thermisch geformte Bauteile kommen thermoplastische Matrixwerkstoffe zu Einsatz. Hierfür wurde ein PMMA-beschichtetes ABS-Material für die unverstärkten Decklagen und ABS für die faserverstärkten Strukturen ausgewählt. Es kommen unidirektional verstärkte, mit ABS vorimprägnierte (sog. Organobleche) zum Einsatz.

Bei allen verwendeten Technologien wurde durch das Konsortium festgelegt, dass aufgrund wirtschaftlicher Aspekte Glasfasern zum Einsatz kommen. Diese bieten zwar im Vergleich zu Carbon-, Aramid-, und Basaltfasern eine niedrigere mechanische Performance, zeigen jedoch trotzdem eine ausreichend hohe steifigkeits- bzw. festigkeitssteigernde Wirkung, um die Projektziele zu realisieren. Ein Vergleich der gängigsten Fasermaterialien ist der Abbildung 2.1 zu entnehmen.

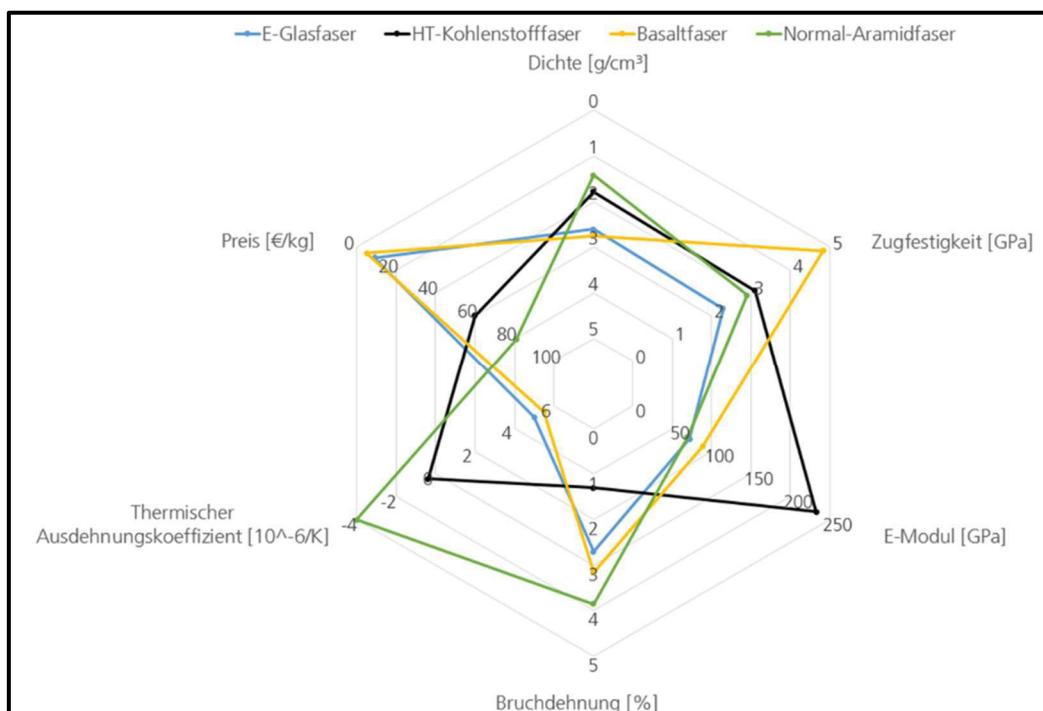


Abbildung 2.1: Vergleich der physikalischen Eigenschaften und Bewertung der Wirtschaftlichkeit gegenwärtiger Verstärkungsfasern basierend auf Literatur- und Marktrecherchen.

AP 2.2 Materialcharakterisierung unter Berücksichtigung von richtungs- und dehnratenabhängigen Werkstoffverhalten für ausgewählte FKV-Materialien (Profil, Knoten, Schweller)

Die Arbeitsumfänge dieses Arbeitspaketes wurden parallel zu den Arbeitsumfängen des AP 2.3 bearbeitet und werden aus diesem Grund an dieser Stelle mit genannt.

Auf Grund der Verarbeitbarkeit und klebetechnischer Eigenschaften wurde ein Materialverbund aus 3 separaten Materialschichten ausgewählt. Die innere Deckschicht, welche für den Fahrgast sichtbar ist, besteht aus UV-, & Reinigungsmittelbeständigen hochschlagzähen ABS-PMMA (Coextrudiert). Hinter die Deckschicht werden 2 Verstärkungsschichten aus ABS-GF (lagenweise unterschiedlich ausgerichtete endlosglasfaserverstärkten Organobleche 0°/-45°/90°/+45°/0) in unterschiedlicher Geometrie geklebt.

Die folgende Darstellung zeigt den Aufbau eines Organoblechs mit den 5 unterschiedlich ausgerichteten unidirektionalen Faserlagen.

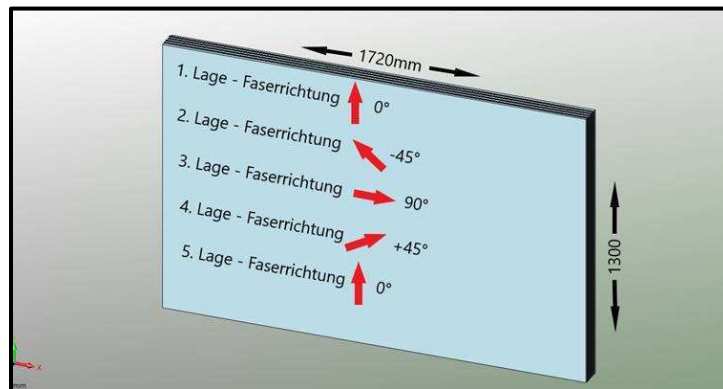


Abbildung 2.2: Materialaufbau / 07.02.24 Konversation zwischen Lakowa & Fa. Steinbeis-Automation

Die angegebene Plattenabmessung ist bedingt durch die derzeit verfügbaren maximalen Fertigungsmöglichkeiten der Heißpressen, in der das Organoblech hergestellt wird. Bezugnehmend zu AP 2.2 („Materialcharakterisierung unter Berücksichtigung von richtungsabhängigem Werkstoffverhalten“) entsprechen 0° Faserausrichtung gleich der Querrichtung des Stehers, da hier die größten Belastungen angenommen werden. Das Verstärkungsmaterial wurde bei der Firma Steinbeis-Automation in Leichtbauprozessen (ALP) beauftragt.

Die Ermittlung mechanischer Kennwerte und die folgende Erstellung von Materialkarten beider verwendeter Plattenmaterialien (siehe AP 2.3) wurde in Kooperation mit dem Fraunhofer-IWU als Unterauftragnehmer realisiert. Hierzu wurden umfangreiche Materialprüfungen des endlosfaserverstärkten Materials (ABS-GF) in 0° und 90° sowie des unverstärkten ABS in 0° und 90° Extrusionsrichtung durchgeführt:

siehe Anhang B „IWU_Materialprüfungen_faserverstärkt“ & Anhang C „IWU_Materialprüfungen_Thermoplaste“

- Bestimmung der Zugeigenschaften nach DIN EN ISO 527-1, 2: 2009

- Bestimmung der Druckeigenschaften nach EN ISO 604: 2002
- Bestimmung der Biegeeigenschaften nach DIN EN ISO 178: 2019
- Bestimmung der Schubeigenschaften mittels Schubrahmen nach DIN EN ISO 20337: 2020-1

Für die Herstellung der Prüfkörper war es notwendig besondere Vakuum-Spannvorrichtungen zu erstellen. Diese wurden auskonstruiert und gefertigt. Für die unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien wurden CNC-Programme erstellt, welche unterschiedliche Fräsparameter ermöglichten. Diese waren erforderlich um auf die Materialspezifischen Eigenschaften von FKV, wie erhöhte Abrassivität sowie saubere und faserfreie Schnittkanten, unterschiedliche Einstellungen vornehmen zu können. In den folgenden Darstellungen sind 2 Spannvorrichtungen abgebildet, mit welchen die benötigten Prüfkörper als Flachteile für die oben aufgeführten Materialprüfungen hergestellt werden konnten:

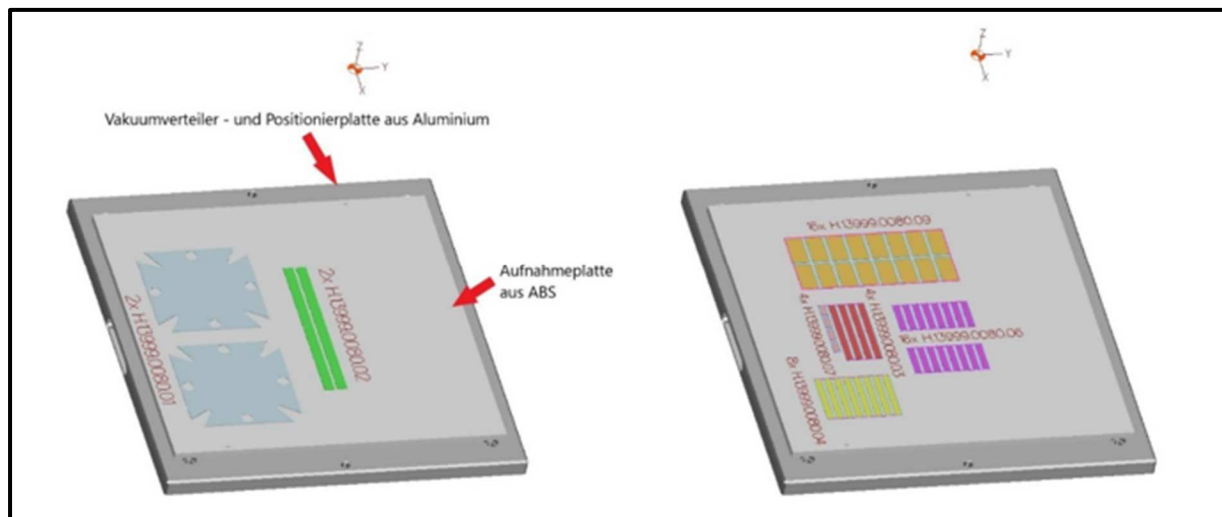


Abbildung 2.3: Flachteilaufnahmen für Fräsbeschnitt von Prüfkörper / 29.06.23 Lakowa intern

Anhand der Prüfergebnisse konnten erfolgreich Materialkarten für die Bauteilmaterialien erstellt werden, welche für die Berechnung der Crashsimulation dienen. Siehe Anhang D „Schlussbericht CaraSave Fraunhofer IWU“

AP 2.3 Erstellung und Validierung von Materialkarten für FE-Simulation auf Prüfkörperebene

Bitte um Beachtung des AP 2.2.

AP 2.4 Entwicklung von Hilfsvorrichtungen und Adaptern zur Durchführung von Komponententests sowie Triggersetzung an Crashelementen

Die LSE war in enger Abstimmung mit dem IWU (F&E-Unterauftrag) an der Entwicklung von Hilfsvorrichtungen und Adaptern zur Durchführung von Komponententests mit skalierten und ausgewählten Crashprofilen sowie

Knotenelementen am IWU beteiligt. Diese Komponenten wurde durch die LSE konstruiert und gefertigt. Zusätzlich erfolgte eine entsprechende Triggersetzung (Einbringen einer Sollbruchstelle) an den skalierten Crashelementen durch das gezielte Befräsen der Proben. Folgende Arbeitspunkte wurden im Detail bearbeitet:

- Materialauswahl (Verstärkungsfasern, Textilien, Matrix)
- Entwicklung von Hilfsvorrichtungen und Adaptern zur Durchführung von Komponententests sowie Triggersetzung an Crashelementen
- Rechentechnische Dimensionierung und experimentelle Validierung skaliertes Crashprofile auf Komponentenebene
- Rechentechnische Dimensionierung und experimentelle Validierung von skalierten Knoten- und Verbindungselementen auf Komponentenebene

AP 2.5 Rechentechnische Dimensionierung und experimentelle Validierung skaliertes Crashprofile

Das Ziel des Arbeitspakets ist die Bestimmung validierter Bruchparameter für die rechentechnische Dimensionierung des Crashkonzeptes im Rahmen der Gesamtaufbauanalyse in AP 2.7. Hierfür wurde basierend auf den initial erstellten LS-DYNA-Materialkarten aus AP 2.3 (siehe Bericht Lätzsch) eine Bruchmodellkalibrierung auf Probekörpererebene durchgeführt. Dieses Verfahren basiert auf instrumentalisierten Schlagversuchen.

Die experimentellen Schlagversuche (siehe Abbildung 2.4) erfolgten mit einem Schlagpendel Zwick/Roell HIT25P. Die Prüfbedingungen waren in Anlehnung an die Prüfnorm DIN EN ISO 179-2 (instrumentalisierte Prüfung, ohne Kerbe) und bei einem Prüfklima von 23°C sowie 48% rH. Die Stützweite betrug 40mm. Die Probegeometrie wurde in Form von beige gestellten Prüfkörpern des Auftragnehmers definiert.

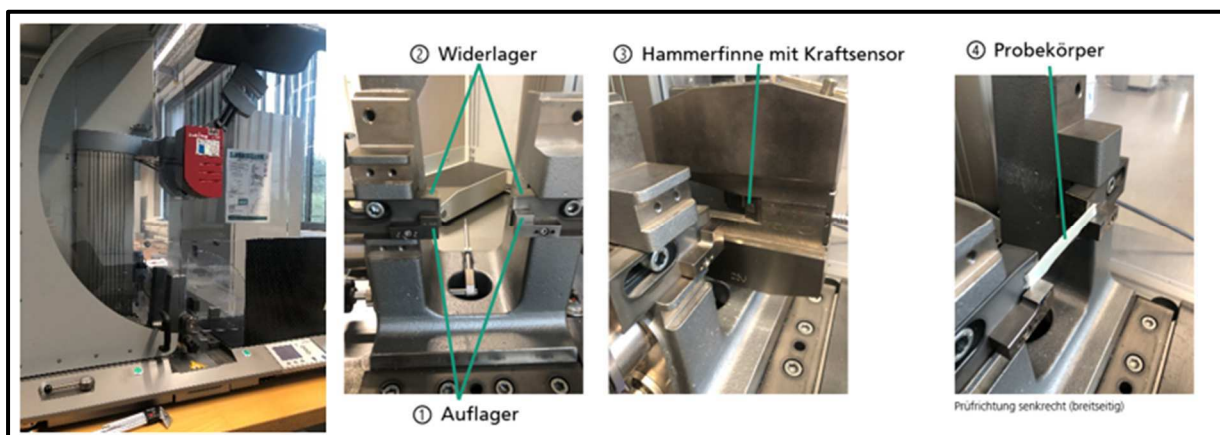


Abbildung 2.4: Prüfaufbau der Versuche: Gesamtansicht Schlagpendel (li.); Detailansicht mit Einzelkomponenten (re.).

Für die Bruchmodellkalibrierung wurde ein numerisches Modell mit LS-DYNA erstellt (siehe Abbildung 2.5). Das Ziel ist die Nachbildung der Kraft-Weg-Kurven des hochdynamischen Biegeversuchs in der Simulation. Die Randbedingungen für das Experiment umfassen starre Auf- und Widerlager mit fester Einspannung. Die

Hammerfinne bewegt sich in x-Richtung mit einer konstanten Geschwindigkeit. Der Probekörper ist frei und weist Reibung zu den restlichen Komponenten auf. Die Modellparameter umfassen die folgenden Aspekte: Auflager (1) und Widerlager (2) sowie die Hammerfinne (3) sind als ideal steif (rigid) modelliert. Die Geschwindigkeit der Hammerfinne beträgt 3,8 m/s. Für die Kontaktdefinition werden als Automatic_Surface_To_Surface (4 - > 2+3) und Automatic_Nodes_To_Surface (4 - > 1) definiert. Die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten sind mit 0,3 bzw. 0,5 angegeben. Die Elementgröße des Probekörpers beträgt 0,5mm und die Elementform ist Typ 16. Die Kraft-Weg-Kurve wird an der Spitze der Hammerfinne sowie am Probekörper erfasst. Die Vorzugsrichtung des Verbundes ist A. Beim Probekörper aus GF-UP handelt es sich um einen mehrschaligen Aufbau mit 4 Schalen, die jeweils 0,5625mm dick sind.

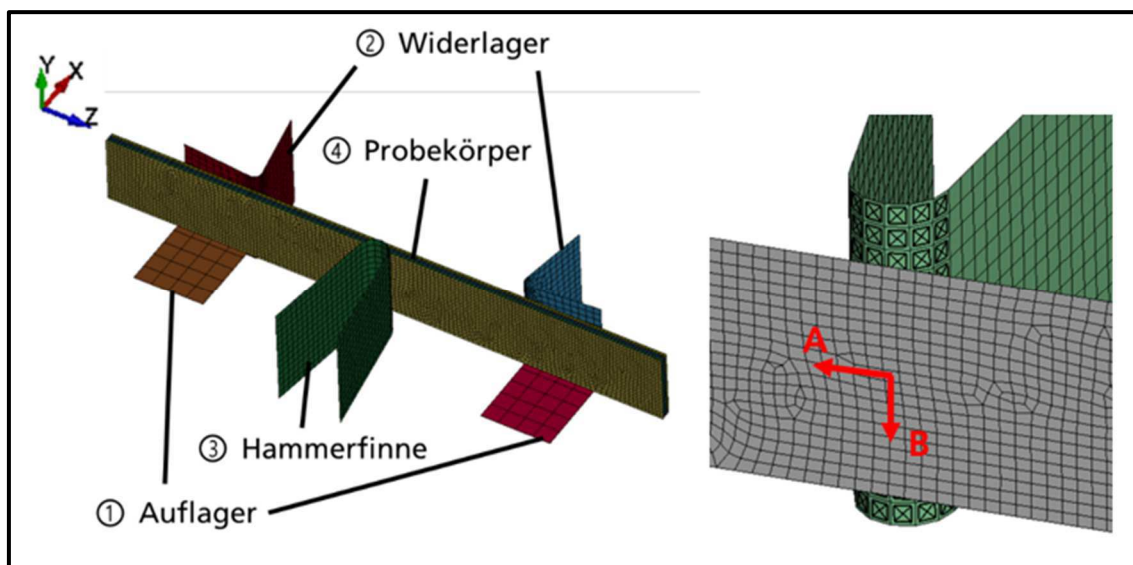


Abbildung 2.5: Simulationsmodell in LS-DYNA zur Bruchmodellkalibrierung. Gesamtansicht (li.) und Detailansicht der Kontaktfläche an Hammerfinne zur Aufnahme der Kraft-Weg-Kurve und Darstellung der Orientierung des Verbundes in rot (re.).

Das iterativ ermittelte Ergebnis der Bruchmodellkalibrierung für GF-UP ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Der Vergleich zwischen den experimentell ermittelten Verläufen mit dem Berechnungsergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung. Folglich sind die Bruchparameter gut geeignet zur Auslegung des Crashkonzeptes.

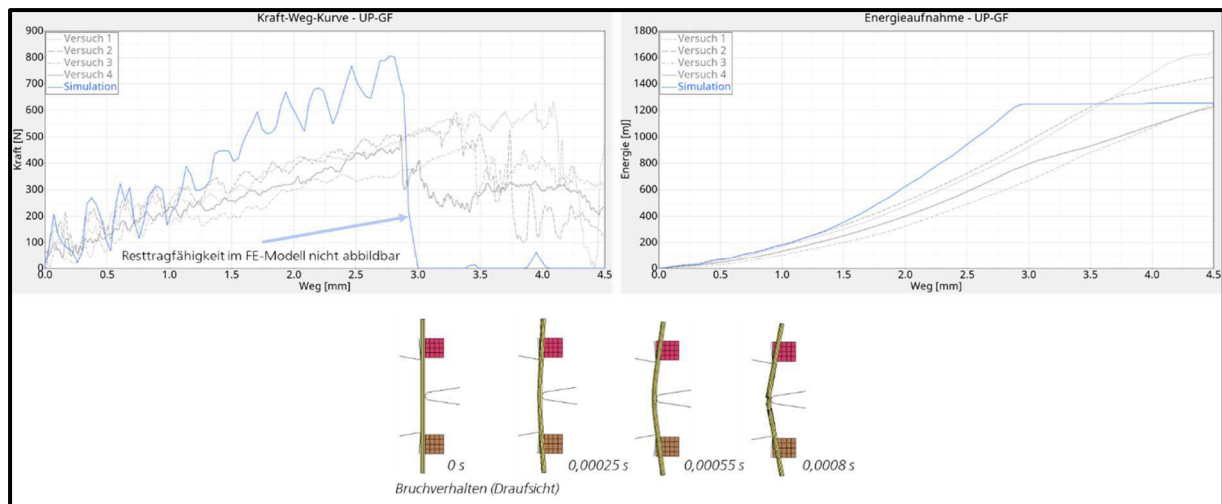


Abbildung 2.6: Vergleich der experimentell ermittelten Kraft-Weg-Verläufe (li.) bzw. der kumulierten Energieabsorption (re.) mit den Simulationsergebnissen für GF-UP; Visuelle Darstellung des simulierten Bruchverlaufs (unten).

AP 2.6 Rechentechnische Dimensionierung und experimentelle Validierung von skalierten Knoten- und Verbindungselementen auf Komponentenebene

Die Vorgehensweise ist analog zu AP 2.5. Die Geschwindigkeit der Hammerfinne beträgt 2,9 m/s. Für den Probekörperaufbau aus ABS-PMMA wird ein einschaliger Aufbau mit einer Dicke von 2,1 mm verwendet. Beim Probekörperaufbau aus ABS-GF handelt es sich um einen mehrschaligen Aufbau mit 4 Schalen, die jeweils 0,425 mm dick sind. Die Evaluierung der Materialkarten für ABS-PMMA und ABS-GF ist dem Bericht der Lakowa GmbH zu entnehmen.

Das iterativ ermittelte Ergebnis der Bruchmodellkalibrierung für unverstärktes ABS-PMMA ist in Abbildung 2.7 und für GF-ABS in Abbildung 2.8 dargestellt. Der Vergleich zwischen den experimentell ermittelten Verläufen mit dem Berechnungsergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung. Folglich sind die Bruchparameter gut geeignet zur Auslegung des Crashkonzeptes.

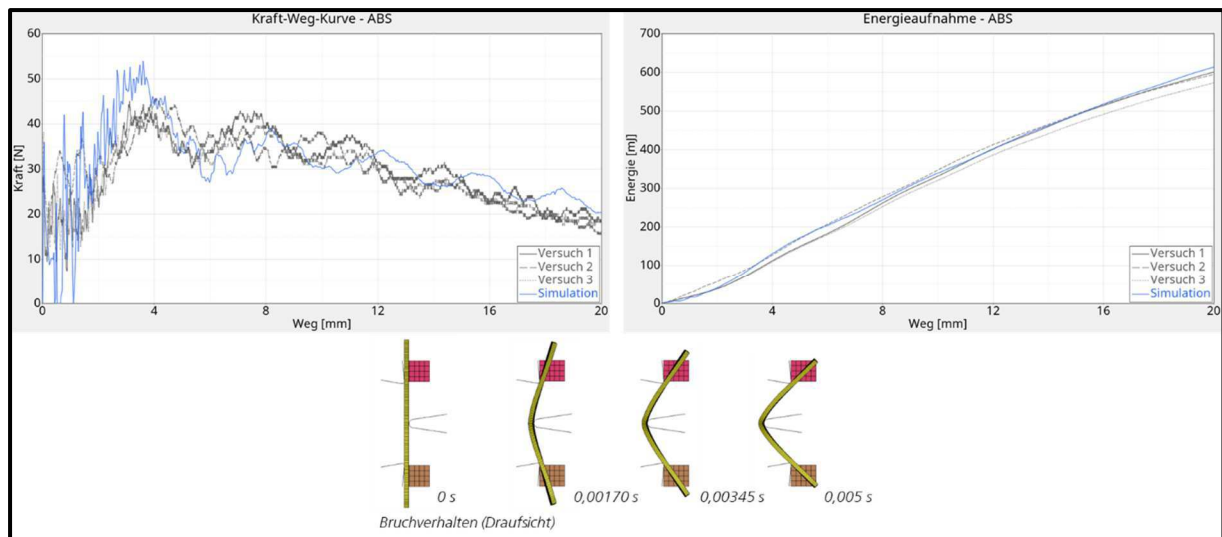


Abbildung 2.7: Vergleich der experimentell ermittelten Kraft-Weg-Verläufe (li.) bzw. der kumulierten Energieabsorption (re.) mit den Simulationsergebnissen für unverstärktes ABS; visuelle Darstellung des simulierten Bruchverlaufs (unten).

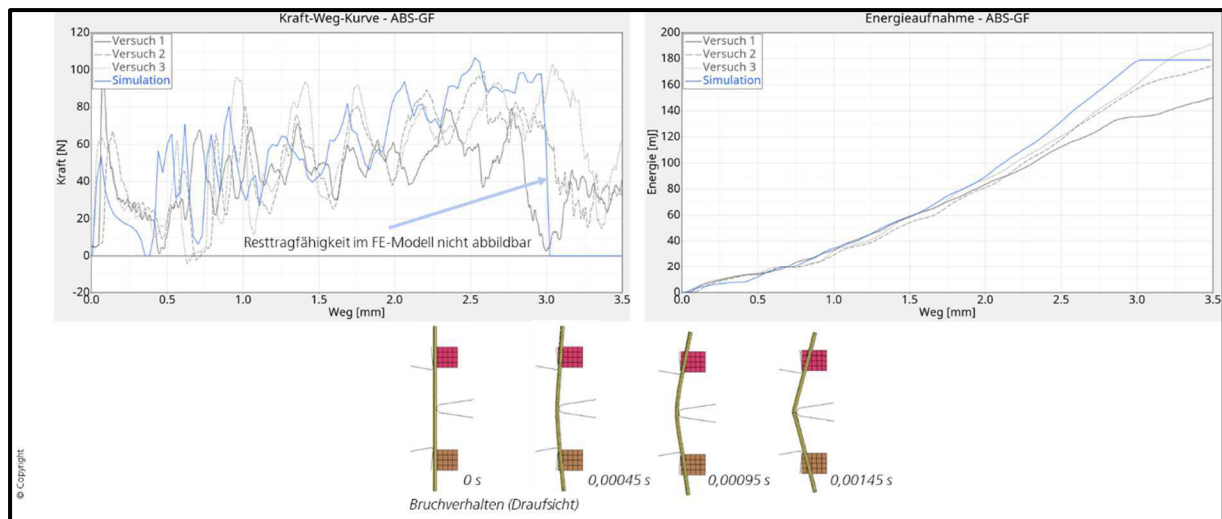


Abbildung 2.8: Vergleich der experimentell ermittelten Kraft-Weg-Verläufe (li.) bzw. der kumulierten Energieabsorption (re.) mit den Simulationsergebnissen für verstärktes ABS-GF; visuelle Darstellung des simulierten Bruchverlaufs (unten).

Die LSE war bei der Auswertung der Ergebnisse und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen bezüglich der Serieneinführung der Werkzeugtechnik für FKV-Crashelemente in der Reisemobilherstellung beteiligt. Dies umfasst die Erstellung eines Instandhaltungsplanes sowie die Entwicklung einer Automatisierungsstrategie. Folgende Arbeitspunkte wurden im Detail bearbeitet:

- Auswertung der Ergebnisse und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen
- Erarbeitung technischer Maßnahmen für eine Serieneinführung
- Zusammenfassung und Veröffentlichung der Ergebnisse

Zur Validierung des Crashkonzeptes wurde neben den eigentlichen Crashtests und dem Vergleich mit den Simulationsergebnisse auf Gesamtfahrzeugniveau eine

Simulationsvalidierung für den Verstärkungswinkel durchgeführt. Dadurch können die Veränderungen der Faserorientierung durch den Herstellprozess mit der Drapiersimulation validiert werden. Hierfür wurde ein vereinfachter, statischer Ersatzlastfall abgeleitet und ein Prüfaufbau konzipiert sowie aufgebaut und die Demonstratorbauteile erfolgreich getestet (siehe Abbildung 2.9). Die Deformation des Bauteils während der Prüfung wurde mittels optischen 3D-Messsystem ARAMIS überwacht und zeigt im Vergleich zur Simulation eine gute Übereinstimmung.

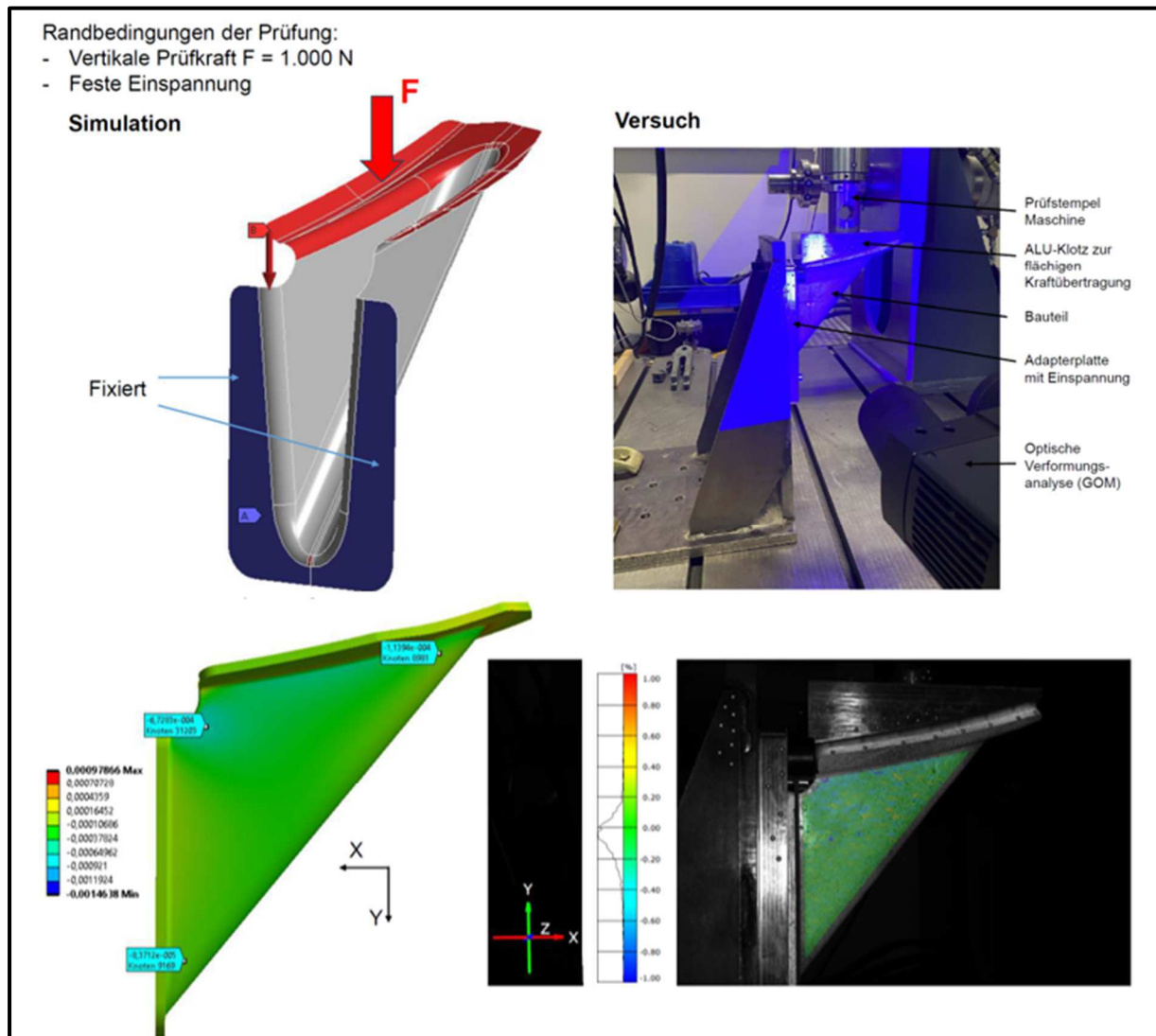


Abbildung 2.9: Prüfaufbau und Ergebnisse für Simulationsvalidierung am Verstärkungswinkel

AP 2.7 Gesamtaufbauanalyse mit Gestaltoptimierung

Für die verschiedenen Konzepte wurde eine Aufbauanalyse durchgeführt. In Abbildung 2.10 sind die relevanten Schnittstellen im Gesamtfahrzeug dargestellt. Die rot eingekreisten Baugruppen stellen jene Schnittstellen dar, die als kritisch und unveränderlich zu bewerten sind. Das bedeutet, dass sich das Sicherheitskonzept hier in der Form anpassen muss. Die restlichen Baugruppen stellen weniger kritische Schnittstellen dar und können an das Sicherheitskonzept angepasst werden. Die Konstruktionen wurden in ihrer Gestalt an die kritischen Schnittstellen angepasst.

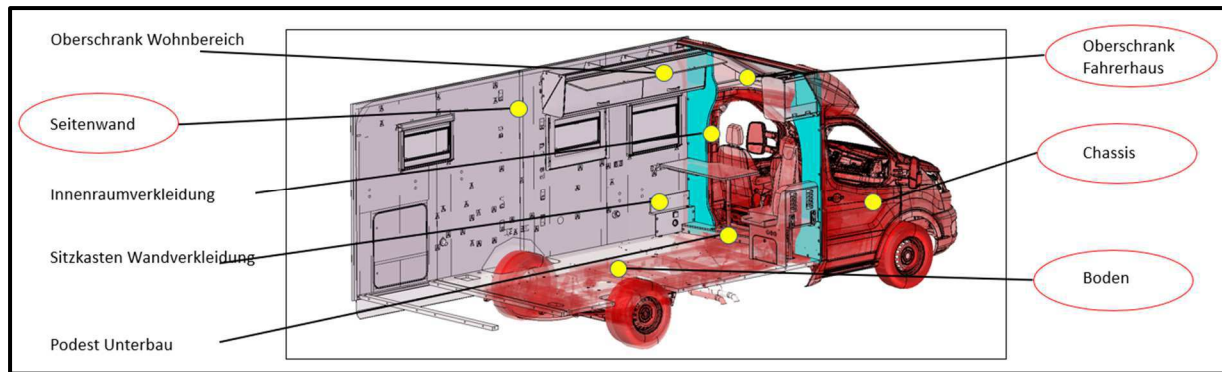


Abbildung 2.10: Schnittdarstellung eines teilintegrierten Reisemobils mit den relevanten Schnittstellen für die Gesamtaufbauanalyse. Die rot eingekreisten Baugruppen stellen die kritischen Schnittstellen dar.

AP 2.8 Erstellung einer detaillierten 3D-CAD-Konstruktion des Crashmoduls

Für den Seitenaufprall wurde ein modularisierter Leichtbauschweller konstruiert, ausgelegt und dimensioniert (siehe AP 1.6). Es erfolgte eine iterative Gestaltoptimierung sowie die Konstruktion der Anbindung zum Leiterraum. Für den Frontalaufprall wurde eine modularisierte FKV-Sicherheitszelle konstruiert und ausgelegt (siehe AP 1.5). Wie bereits beschrieben, wurden für das teilintegrierte Reisemobil zwei weitere Konzepte erarbeitet. Diese wurden ebenfalls detailliert auskonstruiert (siehe AP 1.5).

AP 2.9 Einbindung des detaillierten Crashmoduls in das 3D-CAD-Modell des Gesamtfahrzeuges

Die detaillierten CAD-Modelle wurden in das Gesamtmodell des Fahrzeuges integriert. In Abbildung 2.11 ist das Konzept des Stehers für teilintegrierte Reisemobile zu sehen. Abbildung 2.12 zeigt den Verstärkungswinkel in einem teilintegrierten Reisemobil.

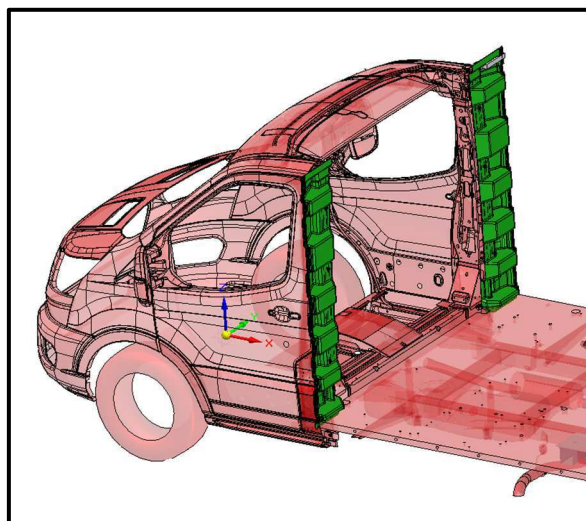


Abbildung 2.11: Schnittdarstellung eines teilintegrierten Reisemobils mit eingebautem CAD-Modell des Stehers (grün hervorgehoben).

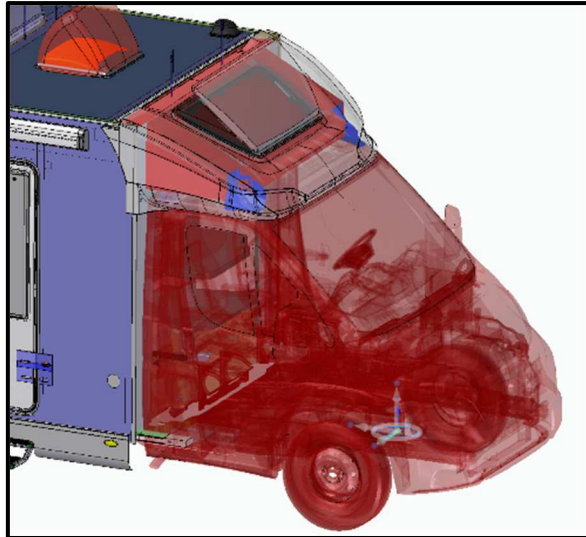


Abbildung 2.12: Die Darstellung zeigt ein teilintegriertes Reisemobil mit dem verbauten CAD-Modell des crashsicheren Verstärkungswinkel (blau hervorgehoben) und dem darauf angepassten T-Hauben-Schrank.

AP 2.10 Finale Validierung des Gesamtmodells unter Durchführung von Crashsimulationen

Nachdem sich schlussendlich für den Verstärkungswinkel als wirksames Sicherheitsbauteil entschieden wurde, sollte das Bauteil simulativ getestet und ggf. validiert werden. Die Form der Konstruktion, sowie das Material waren dabei als konstante Eingangsgrößen definiert worden. Lediglich die Materialstärke blieb veränderlich und bot damit Handlungsspielraum das Bauteil weiter zu verstärken. Ähnlich wie bei den Statussimulationen, wurden für die Post-Optimierungssimulationen eine zwei-Wege-Betrachtung angewendet. Dabei besteht der wesentliche Unterschied in der Verschraubung der T-Haube zum Dach der Fahrgastzelle.

- Post-Optimierungssimulation (1) T68 Frontalcrash nach ECE R137 mit Verschraubung

In dieser Simulation wurde die T-Haube mit dem Chassis verklebt und verschraubt. Der verstärkte T-Hauben-Schrank ist im CAE-Modell enthalten und der Verstärkungswinkel ebenfalls verbaut. Dieser wurde bei der ersten Optimierungsschleife mit einer einfachen Schicht des ABS+GF-Materials gerechnet. Die Verklebung (siehe Abbildung 2.13 rot markierte Fläche) wurde mit einem Strukturklebstoff ausgeführt, auf den im späteren Verlauf noch näher eingegangen werden soll. Der Verstärkungswinkel wurde mit 10 Verschraubungen (siehe Abbildung 2.13) am T-Hauben-Schrank befestigt.

In dieser Simulation konnte weder ein Lösen der T-Haube noch ein Versagen der Verstärkungswinkel beobachtet werden. Die allgemeine Fahrzeugintegrität wurde nicht verletzt und eine Blockade der Türen war somit nicht zu erwarten. Die visuelle Begutachtung der Simulation zeigte somit ein positives Ergebnis im Sinne der Crashsicherheit.

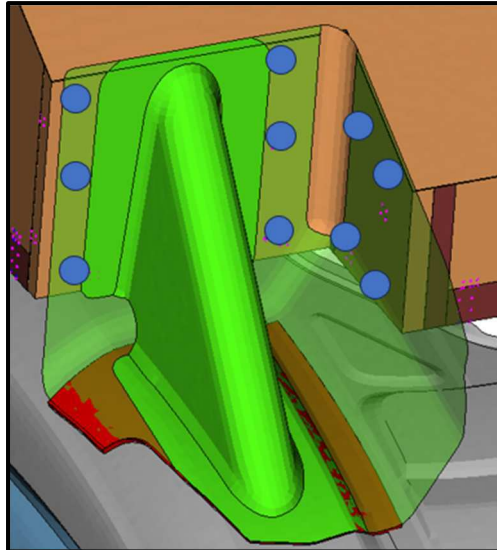


Abbildung 2.14: Es ist der verbaute Verstärkungswinkel (grün) auf der Beifahrerseite abgebildet. Die Verklebung ist auf der Unterseite rot eingefärbt und die Positionen der Schrauben für die Verbindung mit dem T-Hauben-Schrank sind mittels blauer Punkte markiert.

An dieser Stelle wurden, wie in der Basissimulation, die Schraubenkräfte ermittelt. In Abbildung 2.14 sind die Schraubenkräfte mit den jeweiligen Positionen dargestellt. Sie wurden durch die Maßnahmen ebenfalls positiv beeinflusst (vgl. Abschnitt 1.2). Dennoch überstiegen die Kräfte nach wie vor die maximal zulässigen Werte, weshalb mit einem Versagen der Verbindung gerechnet werden muss und die Simulation ohne die Verschraubungen gleichermaßen durchzuführen ist.

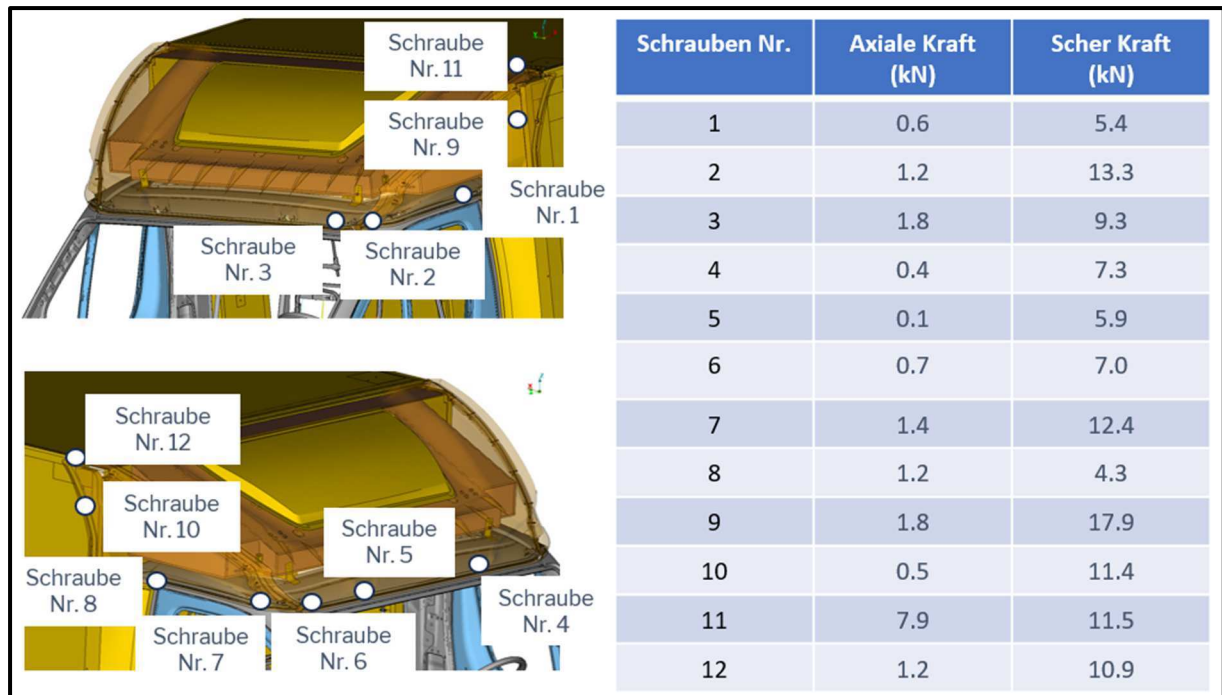


Abbildung 2.14: Bilder und Tabelle mit den Axialen- Auszugs- und Scherkräften der Verschraubung zwischen T-Haube und Fahrzeugchassis. Die Abbildungen links zeigen die Verschraub-Punkte und die zugehörige Schraubenziffer.

- Post-Optimierungssimulation (1) T68 Frontalcrash nach ECE R137 ohne Verschraubung

Obwohl sich auch bei der Simulation ohne eine Verschraubung zwischen T-Haube und Chassis aus der Simulation schon eine Verbesserung gegenüber der Basissimulation erkennen lässt, ist es im Verlauf des Crashes zu einem Lösen der T-Haube vom Chassis gekommen. Infolgedessen lassen sich die gleichen Wirkmechanismen wie in der Ausgangssimulation beobachten. Es kommt zu einem, wenn auch nicht so starkem, Einknicken des Fahrzeugs. Wie bereits erwähnt, lässt dies eine Blockade der Fahrer- und Beifahrertür vorhersagen, was zu einem negativen Testergebnis führen würde. Darüber hinaus ist es in der Simulation zu einem Bruch der Verstärkungswinkel selbst gekommen. Diese geben aufgrund der hohen Belastungen ab 65 ms (auf der Beifahrer Seite) und bei 70 ms (auf der Fahrerseite) nach. In Abbildung 2.15 sind die gebrochenen Verstärkungswinkel mit den gekennzeichneten Bruchstellen zu sehen. Mit dem negativen Ausgang der Simulation kann auch das Sicherheitsbauteil in dieser Ausführung als unzureichend eingestuft werden.

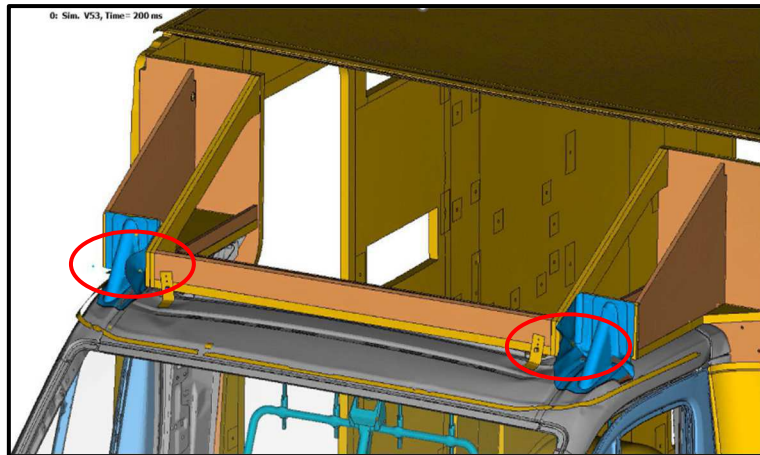


Abbildung 2.15: Ergebnis der ersten Post-Optimierungssimulation bei nicht verschraubter T-Haube. Diese wurde aufgrund der Sichtbarkeit ausgeblendet. Es sind die gebrochenen Verstärkungswinkel rot eingekreist.

Im Sinne der zu erfüllenden Testanforderungen aus der ECE R137 genügte der Verstärkungswinkel in der hier gezeigten Ausführung nicht. Gleichwohl er zu einer Verbesserung der Crashesicherheit beigetragen hat, musste an dieser Stelle weiter optimiert werden.

- Post-Optimierungssimulation (2) T68 Frontalcrash nach ECE R137 mit Verschraubung

In der zweiten optimierten Version wurde auf die Materialstärke des Verstärkungswinkels Einfluss genommen. Dabei wurde das dreifache der Materialstärke, im Vergleich zur ersten Optimierung, gewählt. Alle anderen Parameter wurden unverändert beibehalten. Wie zu erwarten, zeigte diese Simulation ebenfalls ein gutes Ergebnis. Es ist zu keinem Einknicken des Chassis gekommen, weshalb die Integrität des Fahrzeugs erhalten blieb. Auch die Auswertung der Chassisdeformationen ergab, dass keine Blockaden der vorderen Türen zu erwarten sind. Äquivalent zu den vorherigen Simulationen mit Verschraubungen wurden auch hier die auftretenden Schraubenkräfte ausgewertet (siehe Abbildung 2.16). Dabei konnte eine weitere Verbesserung festgestellt werden. Die berechneten Scherkräfte lagen jedoch nach wie vor über den maximal ertragbaren Kräften, weshalb auch hier eine Simulation ohne Verschraubung empfohlen wurde.

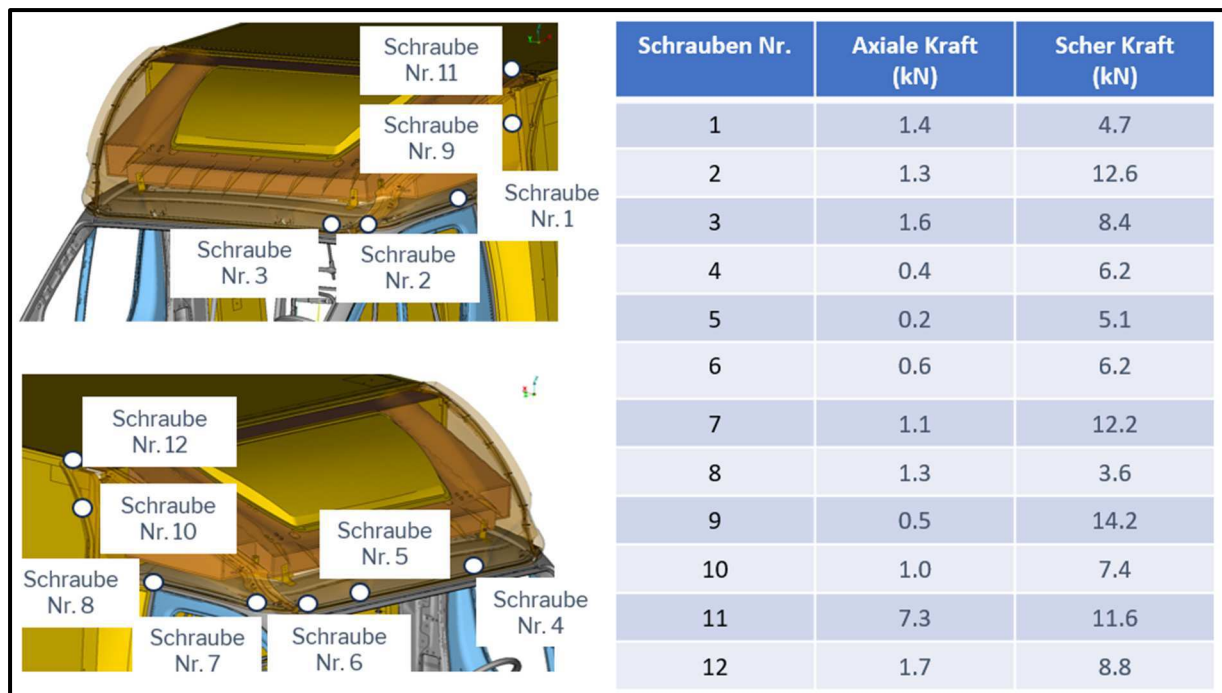


Abbildung 2.16: Bilder und Tabelle mit den axialen- Auszugs- und Scherkräften der Verschraubung zwischen T-Haube und Fahrzeugchassis. Die Abbildungen links zeigen die Verschraub-Punkte und die zugehörige Schraubenziffer.

- Post- Optimierungssimulation (2) T68 Frontalcrash nach ECE R137 ohne Verschraubung

In der Simulation ist es wie bereits in der ersten Optimierungssimulation zu einer Beschädigung an den Verstärkungswinkeln gekommen. Jedoch ist der Gesamtausgang des simulierten Crashes sehr positiv zu bewerten. Dies zeigt sich bei der Simulation durch ein geringes und fast vollständig reversibles Einknicken des Fahrzeugs. Darüber hinaus wurde der T-Hauben-Schrank in der Crashsimulation nicht beschädigt und die gemessenen Intrusionswege in den Innenraum (x-Intrusion) des Wohnmobilaufbaus betragen nach dem Rebound nur wenige Millimeter und in den Außenanbindungen zur Seitenwand null (siehe Abbildung 2.17, rot umrandete Werte). In Abbildung 2.17 sind auch die maximalen Intrusionswerte angegeben. Der größte Weg wurde dabei an der inneren oberen Ecke des linken Stehers gemessen und betrug 39 mm. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Verstärkungswinkel die Energie vollständig dissipieren. Obwohl durch ihr Versagen noch von einer wirkenden Restkraft ausgegangen werden muss, reicht diese nicht mehr aus, um die kritischen Fahrzeugbereiche zu beschädigen, da diese den abgeschwächten Impulsen standhalten können.

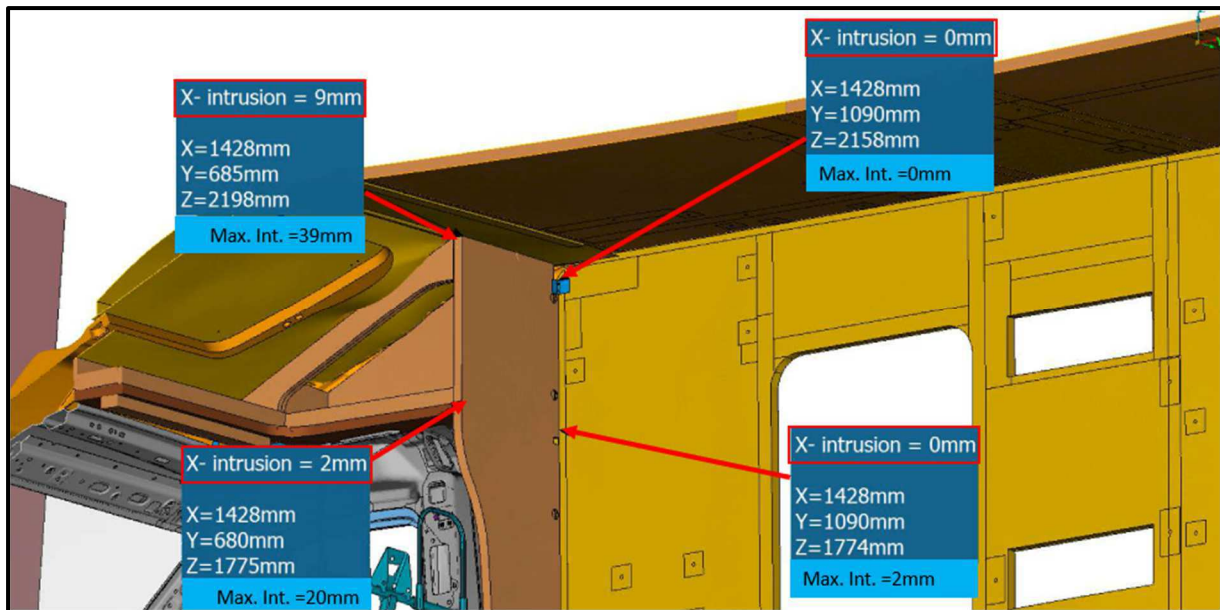


Abbildung 2.17: Zu sehen ist das Modell mit ausgeblendeter Seitenwand links. Die roten Pfeile deuten auf die Messpunkte hin, an denen während der Simulation die Verschiebewege gemessen wurden. Die ermittelten Intrusionswerte sind in den dazugehörigen Kästen zu sehen, rot umrandet sind die verbliebenden Verschiebungen nach dem Crash (im Vergleich zum Ausgangszustand). Die Maximalwerte sind hellblau hervorgehoben.

Auch die Möglichkeit, die Fahrer- und Beifahrertür nach dem Crash weiterhin öffnen zu können, scheint nach einer Sichtprüfung der Crash-Einflusszonen weiterhin gegeben. Obwohl es im Bereich der Türeinfassung im Chassis zu Deformationen gekommen ist, erscheint eine Blockade der Tür als nicht wahrscheinlich. Die Verformungen der Fahrer- und Beifahrertür sind in Abbildung 2.18 gezeigt.

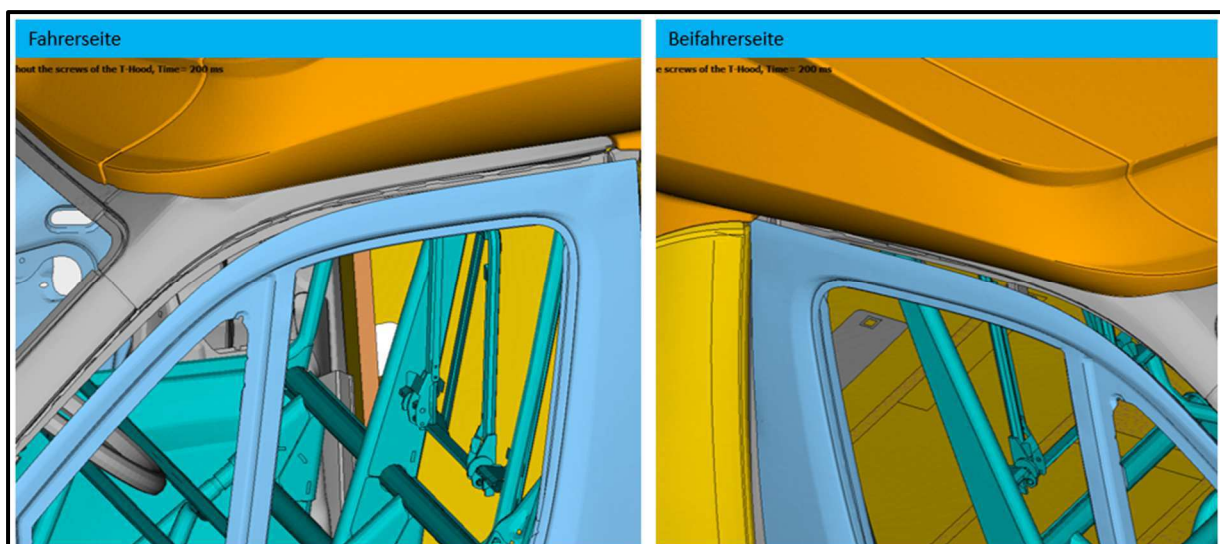


Abbildung 2.18: Die Ausschnitte zeigen den oberen Türbereich der Fahrerseite (li.) und der Beifahrerseite (re.) nach dem Crash in der Simulation.

Damit lässt sich der Ausgang der Simulation mit dem verbesserten und optimierten Verstärkungswinkel sowohl quantitativ als auch qualitativ positiv bewerten.

Wie bereits zu Anfang erwähnt, wurden bei allen Simulationen die entsprechenden OLC-Werte errechnet. In Tabelle 2.1 sind die OLC-Werte der Ausgangssimulation und der Post-Optimierungssimulation (2) gezeigt. Die Unterschiede zwischen den Berechnungen, vergleichend zwischen denen mit Verschraubung und ohne Verschraubung, sind nur sehr gering. Obwohl geringere OLC-Werte für eine höhere Überlebenswahrscheinlichkeit der Insassen sprechen, werden die Differenzen bzw. Verbesserungen als zu gering eingestuft um sie als nennenswerte Crashesicherheitsverbesserung anzuführen. Dennoch zeigen die ermittelten Werte, dass es durch die Verbesserungsmaßnahmen zu keinen negativen Auswirkungen auf die Insassen gekommen ist. Es wird angenommen, dass lediglich passive Sicherheitssysteme wie Crashabsorber und zusätzliche Knautschzonen einen relevanten Beitrag zur Verringerung des OLC-Wertes beitragen können.

Tabelle 2.1: Die Tabelle zeigt die rechnerisch ermittelten OLC-Werte der Crashsimulationen, jeweils bei einer Simulation mit oder ohne Verschraubung

Simulation	OLC (g)
Basis mit Schrauben	24.1
Basis ohne Schrauben	24.4
Post- Optimierung mit Schrauben	24.0
Post- Optimierung mit Schrauben	24.1

AP 3 Technologieentwicklung für crashoptimierte Profilstrukturen aus Faserverbundstrukturen

AP 3.1 Technologiekonzepte zur wirtschaftlichen Herstellung der crashoptimierten Profilstrukturen im Pultrusionsverfahren

Aufbau der Pultrusionsanlage Lätzsch GmbH

Die Pultrusionsanlage der Lätzsch GmbH ist grundsätzlich in sieben Elemente unterteilt. Dazu gehören das Rollenlager (1), die Faserführung (2), das Harzbad (3), der Abstreifer (4), das Pultrusionswerkzeug mit Heizung (5), die Pull-Einheiten (6) sowie die Sägeeinheit (7) (siehe Aufbau Pultrusionsanlage).

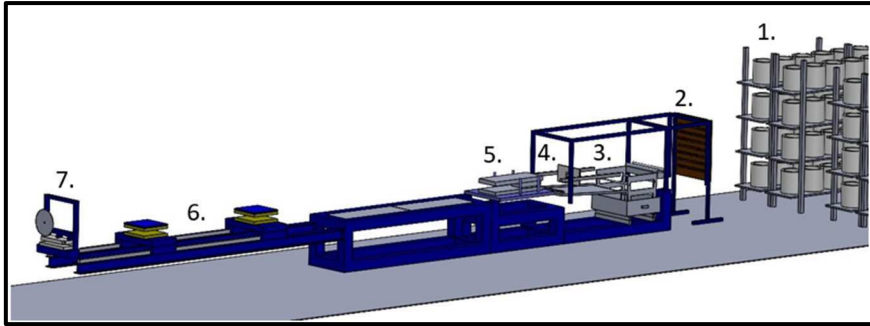


Abbildung 3.1: Aufbau Pultrusionsanlage

In dem Rollenlager können bis zu 256 Glasfaserrollen für die Fertigung bereitgestellt werden. Vom Rollenlager werden die Rovings durch die Faserführung geleitet. Die Faserführung befindet sich zwischen dem Rollenlager und dem Harzbad und sorgt für einen parallelen Einzug der Rovings in das Harzbad.



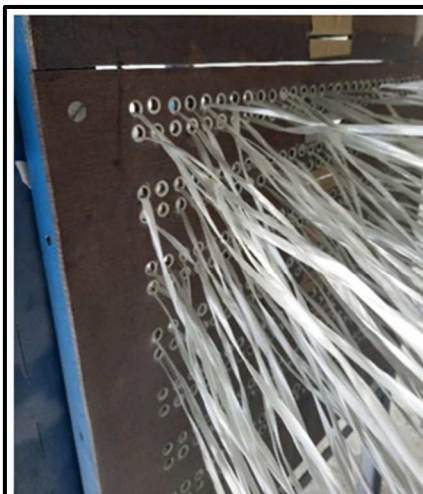
(1) Rollenlager 1



(1) Rollenlager 2 /parallele Rovingführung

Abbildung 3.2

Ohne die Faserführung würden sich die Rovings untereinander verknoten, was bspw. zum Reißen der Rovings und somit zum Unterbrechen der Produktion führen kann.



(2) Faserführung von außen



(2) Faserführung von innen

Abbildung 3.3

Von der Faserführung gelangt die Rovings in das Harzbad. Im Harzbad befindet sich das Matrixsystem, mit dem die Rovings vollständig benetzt werden.



Abbildung 3.4

Im Anschluss an das Harzbad werden die Rovings durch einen Abstreifer geführt. Abstreifer haben typischerweise eine gleiche bzw. ähnliche Geometrie wie das herzustellende Profil. Die Abstreifer formen die benetzten Rovings bereits grob vor und entfernen überschüssiges Matrixsystem, bevor die Rovings in das Pultrusionswerkzeug geleitet werden.

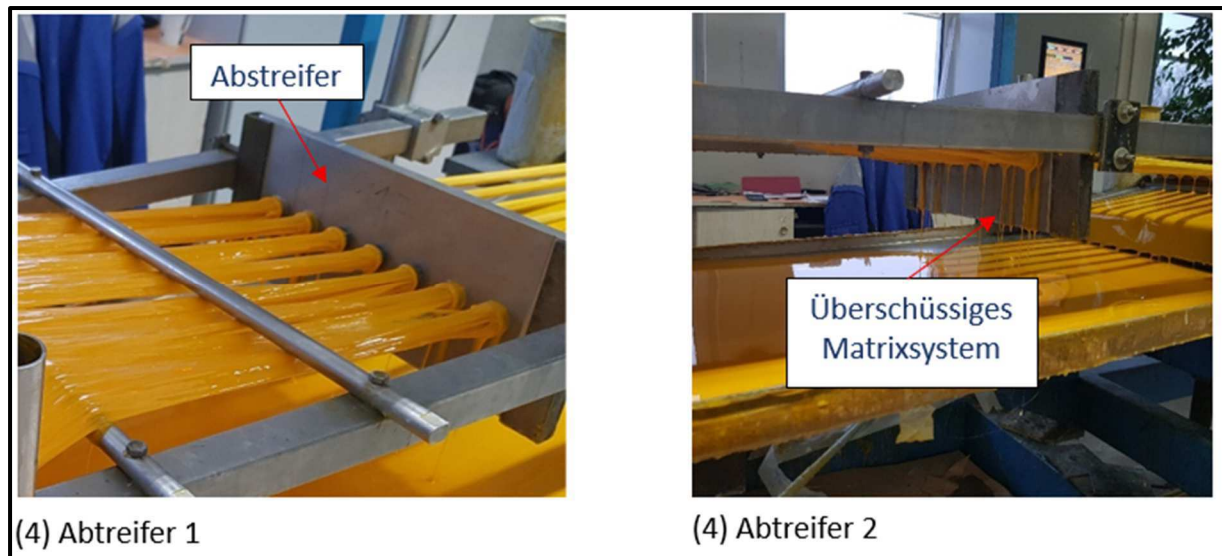


Abbildung 3.5

Nachdem die Rovings den Abstreifer durchlaufen haben, werden sie in ein oder mehrere Pultrusionswerkzeuge transferiert. Die Pultrusionswerkzeuge sind typischerweise aus Stahl oder Aluminium und werden durch Heizplatten auf eine Temperatur von ca. 130 °C aufgeheizt. Während des Transfers wird das Matrixsystem zwischen den Rovings erhitzt und härtet innerhalb weniger Sekunden aus.

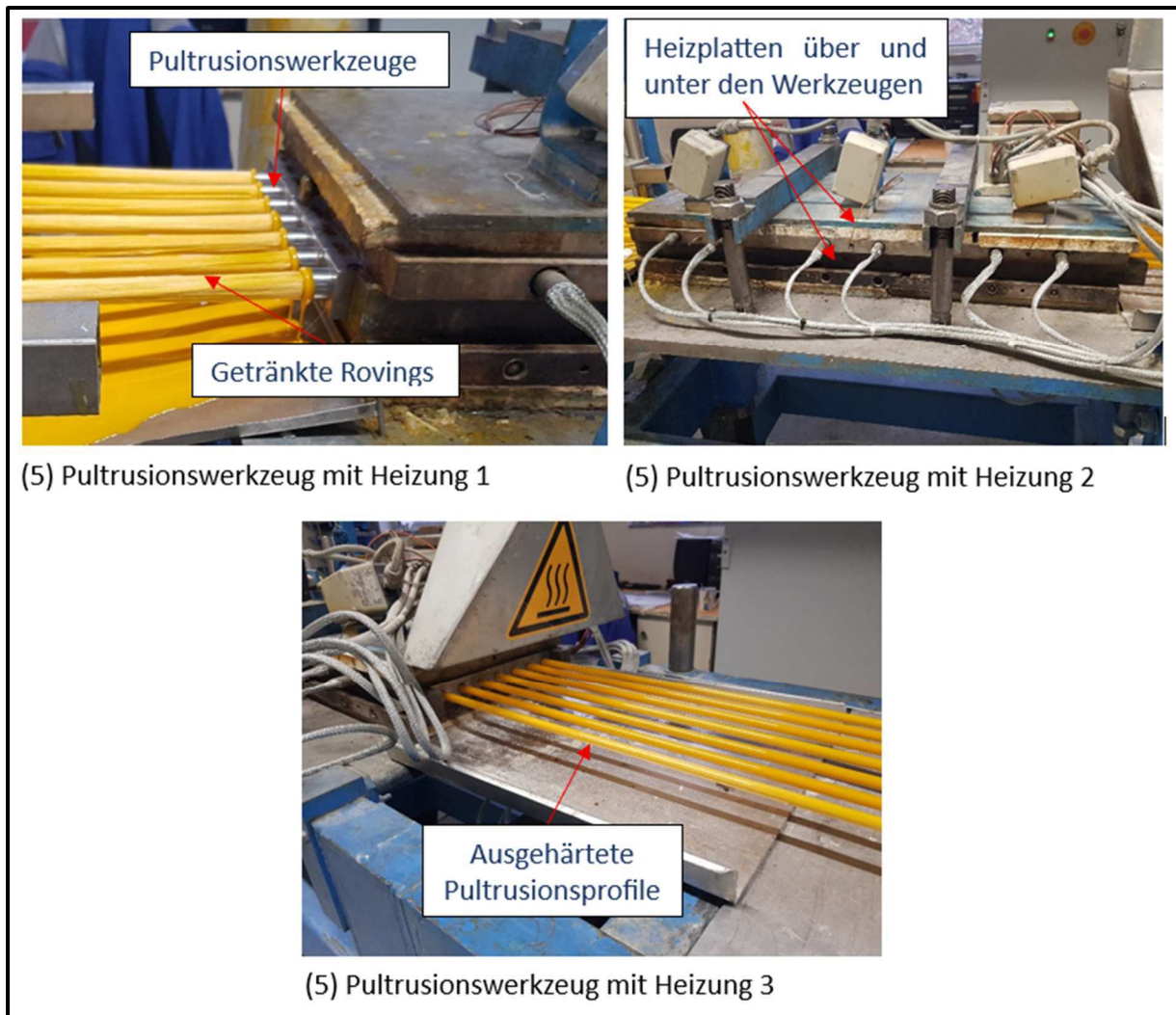


Abbildung 3.6

Die Pultrusion ist ein kontinuierlich ablaufender Prozess, bei dem die Pultrusionsprofile mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit durch das Pultrusionswerkzeug „gezogen“ werden. Für den konstanten Vorschub sind die so genannten Puleinheiten zuständig. Die Funktionsweise der Puleinheiten ist folgende. Die Rovings werden vor Beginn der Fertigung zwischen die Backen der Puleinheiten gelegt. Sobald der Prozess gestartet wird, fährt die Puleinheit 1 zusammen und zieht die Rovingstränge mit einer vordefinierten Vorschubgeschwindigkeit. Kurz bevor die Puleinheit 1 ihre Endposition erreicht hat, fährt die Puleinheit 2 zusammen und übernimmt das Ziehen der Rovingstränge. Die Puleinheit 1 öffnet sich und fährt wieder in ihre Ausgangsposition. Sobald sich die Puleinheit 2 ihrer Endposition nähert, übernimmt wiederum die Puleinheit 1 erneut das Ziehen und die Puleinheit 2 öffnet sich und fährt wieder in ihre Ausgangsposition. So erfolgt eine ständige Übergabe des Rovingstrangs bzw. des Pultrusionsprofils von der Puleinheit 1 zur Puleinheit 2 und wieder zurück. Auf diese Weise kann ein kontinuierlicher Vorschub garantiert werden, der für den Pultrusionsprozess Voraussetzung ist.

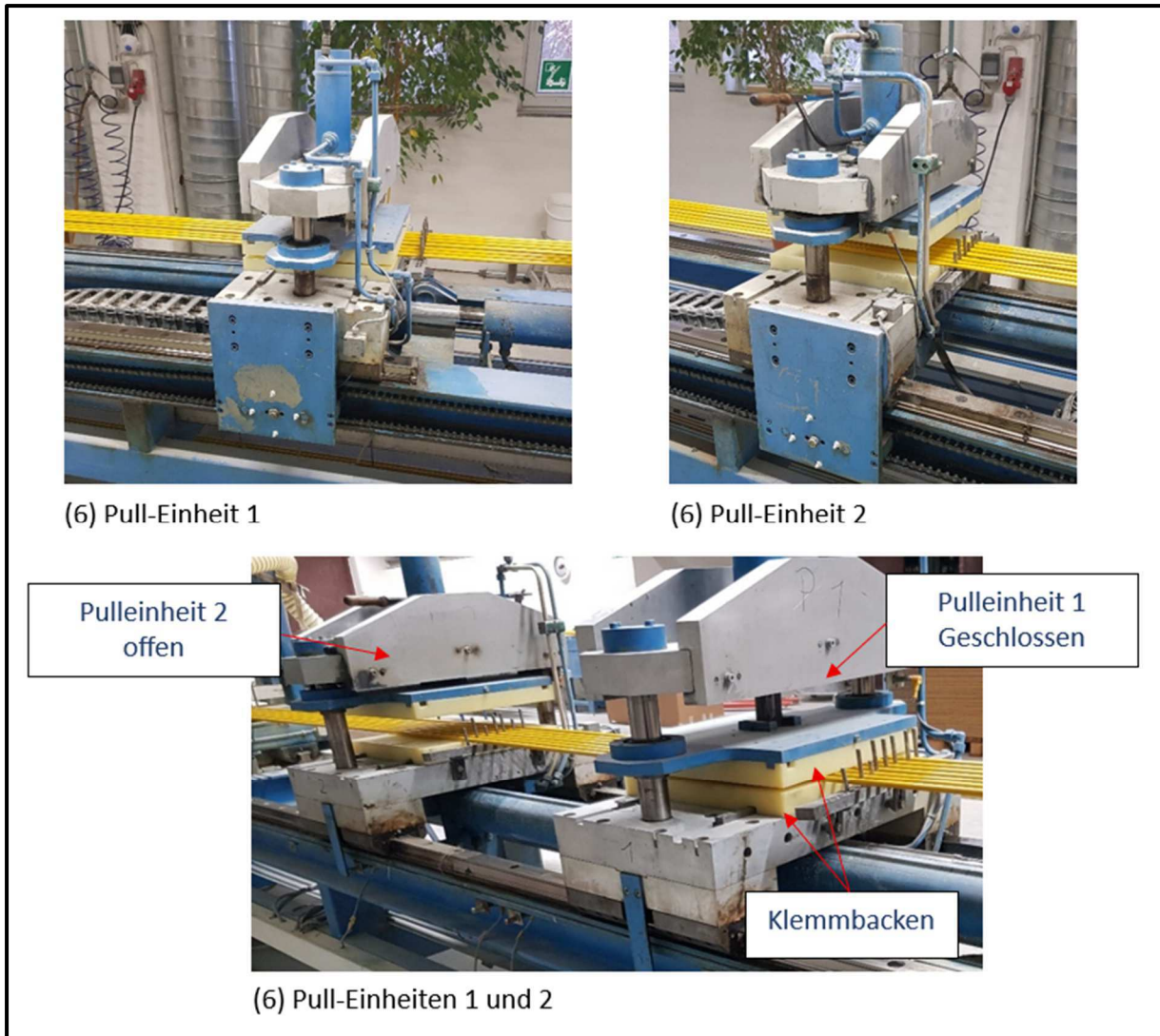


Abbildung 3.7

Das letzte Element einer Pultrusionsanlage ist die Sägeeinheit. Diese besteht aus den Klemmbacken, die die Pultrusionsstränge beim Zuschneiden fixiert und der Säge, die die Profile auf eine vordefinierte Größe ablängt.

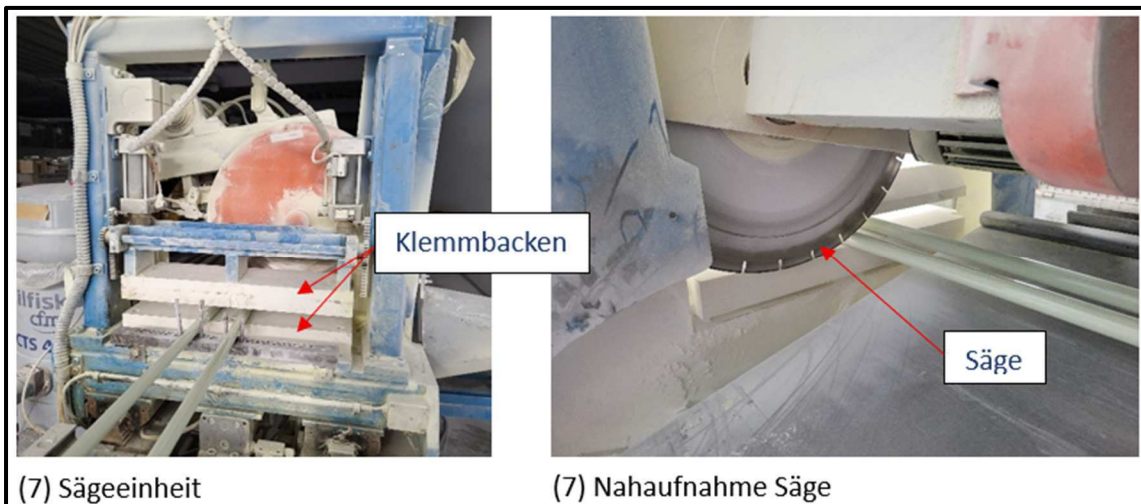


Abbildung 3.8

Prozessbedingte Fertigungsgrenzen 1 – maximale Querschnittsfläche der Crashprofile

Die maximale Querschnittsfläche der Crashprofile, die die Lätzsch GmbH fertigen kann, ergibt sich über die maximale Anzahl an Rovings, die in das Profil eingebracht werden, sowie den Faservolumengehalt (FVG). Wie im Abschnitt „Aufbau der Pultrusionsanlage Lätzsch GmbH“ beschrieben, kann Das Rollenlager maximal 256 Glasfaserrollen aufnehmen, was gleichzeitig die maximale Anzahl an Rovings im Profil darstellt.

Die von der Lätzsch GmbH hauptsächlich eingesetzten Rovings haben ein Gewicht von 4800 Gramm je Kilometer (4800 tex). Mit einer Dichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ für Glasfasern ergibt sich eine Querschnittsfläche von ca. $1,92 \text{ mm}^2$ je Roving. Auf das Rollenlager der Lätzsch GmbH mit 256 Rollen bezogen, ergibt sich eine Querschnittsfläche der Glasfaserrovings von ca. $491,5 \text{ mm}^2$. Die Glasfaserroving stellen in der Regel 55 bis 70 % des Gesamtprofils dar. Daraus ergibt sich wiederum einen maximalen Profilquerschnitt von $893,7 \text{ mm}^2$ bis $702,1 \text{ mm}^2$.

Tabelle 3.1

FVG	100% (nur Glasfaser)	55%	60%	65%	70%
	$491,5 \text{ mm}^2$	$893,7 \text{ mm}^2$	$819,2 \text{ mm}^2$	$756,2 \text{ mm}^2$	$702,1 \text{ mm}^2$

Profilquerschnittsfläche in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt (FVG)

Prozessbedingte Fertigungsgrenzen 2 – geometrische Grenzen der Pultrusionswerkzeuge und Crashprofile

Neben der maximalen Querschnittsfläche wird die Geometrie des Crashprofils auch durch die maximalen Öffnungshöhen der Pulleinheiten limitiert. Im vollständig geöffneten Zustand betragen die Klemmbakenabstände der Pulleinheiten 60 mm bzw. 65 mm. Daraus lässt sich eine maximale Crashprofilhöhe von ca. 55 mm ableiten, da ein Mindestabstand von 5 mm zwischen dem Profil und der geöffneten Klemmbacke angenommen wird.

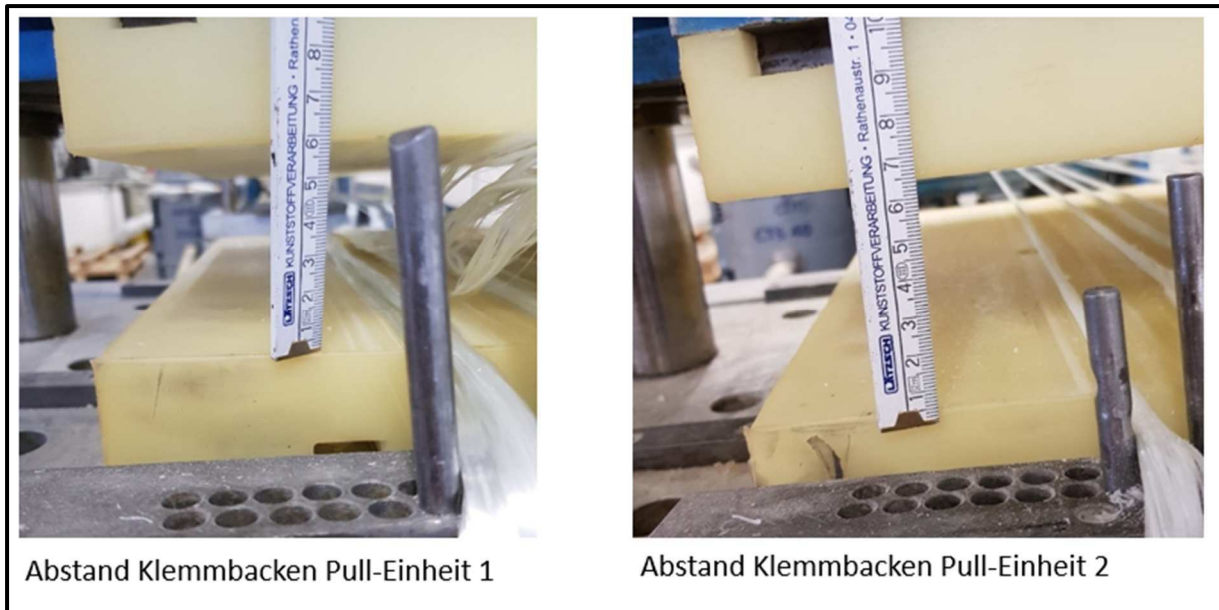


Abbildung 3.9

Konzepterarbeitung für beschädigungsfreies Führen der Crashprofile durch Pulleinheiten

Der Prozess zur Herstellung von crashoptimierten Profilen stellt die Lätzsch GmbH vor weitere Herausforderungen. Die Pulleinheiten erzeugen während des „Ziehens“ der Profile sehr hohe Klemmkraft. Diese Klemmkraft wirken senkrecht zur Auszugsrichtung auf die Pultrusionsprofile. Insbesondere bei Hohlprofilen oder Schenkelprofilen wie L-, U-Profilen, etc. besteht die Gefahr einer Vorbeschädigung bzw. Zerstörung dieser während des Zusammenfahrens der Pulleinheiten.

Um dieser Problematik entgegenzuwirken wurden Schnellversuche durchgeführt, mit dem Ziel serientaugliche Konzepte für das beschädigungsfreie Führen von pultrudierten Glasfaserprofilen zu entwickeln.

Zunächst wurde geprüft, inwieweit die Klemmkraft der Pulleinheiten eine Beschädigung von Profilen verursacht. Hierfür wurde ein Glasfaserwinkel mit unidirektionaler Faseranordnung zwischen eine Pulleinheit gelegt (Siehe Profil vor dem Zusammenfahren). Anschließend wurde die Pulleinheit zusammengefahren.

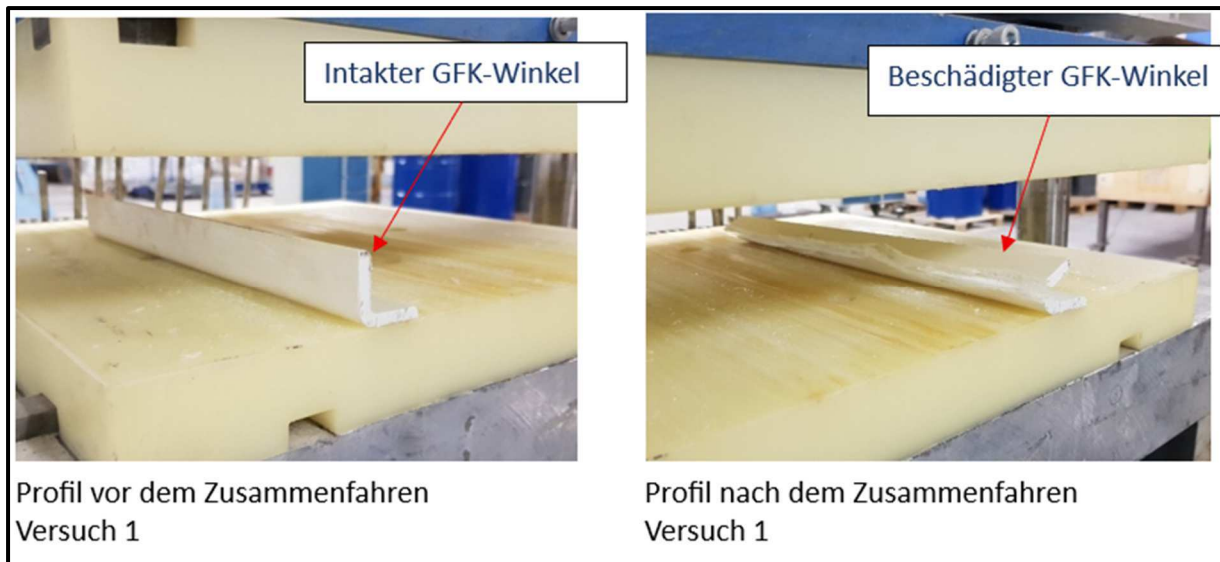


Abbildung 3.10

Ergebnis dieses Schnellversuches war die vollständige Zerstörung des Profils (Profil nach dem Zusammenfahren). Gut zu erkennen ist ein Zwischenfaserbruch an der Linie, an der die Schenkel zusammentreffen.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse entwickelte die Lätzsch GmbH ein Konzept, mit dem auch fragile, komplexere Profile zerstörungsfrei transferiert werden können. Das entwickelte Konzept sieht vor, dass eine Art Stempel an der oberen Backe der Pulleinheit befestigt wird, der in die Profile „eintaucht“ und ausschließlich eine Seite des Profils belastet, die plan auf der unteren Backe der Pulleinheit aufliegt (siehe Schematische Darstellung: Profiltransfer mit Stempel). Hierbei wird die planafliegende Fläche (grüne Profilfläche) ausschließlich auf Druck belastet und insbesondere die vertikalen Schenkel (blaue Profilfläche) bleiben belastungsfrei.

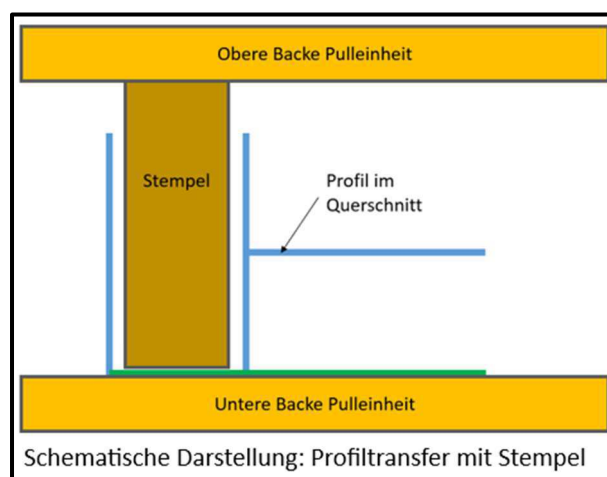


Abbildung 3.11

Um die Funktionalität der Fertigung mit Stempel zu prüfen, wurde ein weiterer Schnellversuch durchgeführt. Erneut wurde ein Glasfaserwinkel zwischen eine Pulleinheit gelegt. Dieses Mal wurde ein Holzstempel so an das Profil angelegt, dass ausschließlich der horizontale Schenkel des Winkels belastet wird. Anschließend wurde die Pulleinheit erneut zusammengefahren. Im Gegensatz zum Versuch ohne

Holzstempel konnte im Nachhinein keine Beschädigung des Winkels festgestellt werden.



Abbildung 3.12

AP 3.2 Methodenentwicklung zur Integration von Kraffteinleitungselementen in Profile zur Anbindung von Interieurbauteilen

Wie bereits bei der Ermittlung der Materialeigenschaften der UP-GF-Platten aus AP 2.2 bzw. AP 2.3 zu erkennen war, weisen die Pultrusionsplatten 90° zur Abzugsrichtung deutlich schlechtere mechanische Eigenschaften auf als in 0° Richtung. So sind beispielsweise die Zug- und Druckkräfte in Abzugsrichtung 75 bzw. 15 Mal höher als senkrecht dazu bis die Proben versagen. Grund hierfür ist die Anordnung der Glasfasern, die bei Pultrusionsprofilen typischerweise unidirektional verlaufen. Das wiederum bedeutet, dass senkrecht zur Abzugsrichtung keine Fasern verlaufen und somit ausschließlich das Matrixsystem die Kräfte aufnehmen kann, was sich wiederum negativ auf die Querstabilität und Torsionssteifigkeit auswirkt. Insbesondere Crashprofile, wie sie perspektivisch in den Reisemobilen der Capron GmbH Anwendung finden sollen, unterliegen im Falle eines Unfalls einer Überlagerung verschiedener Belastungsarten wie Druck, Biegung, Torsion, etc.

Daher gilt es eine Lösung zu finden, mit der die Lätzsch GmbH in der Lage ist Pultrusionsprofile mit einer Faseranordnung quer zur Abzugsrichtung herzustellen.

Eine Variante stellt die Verwendung von Glasfasergewebebandern dar. Diese bestehen aus senkrecht zueinander angeordneten und mit einander verbundenen Endlosfasern.

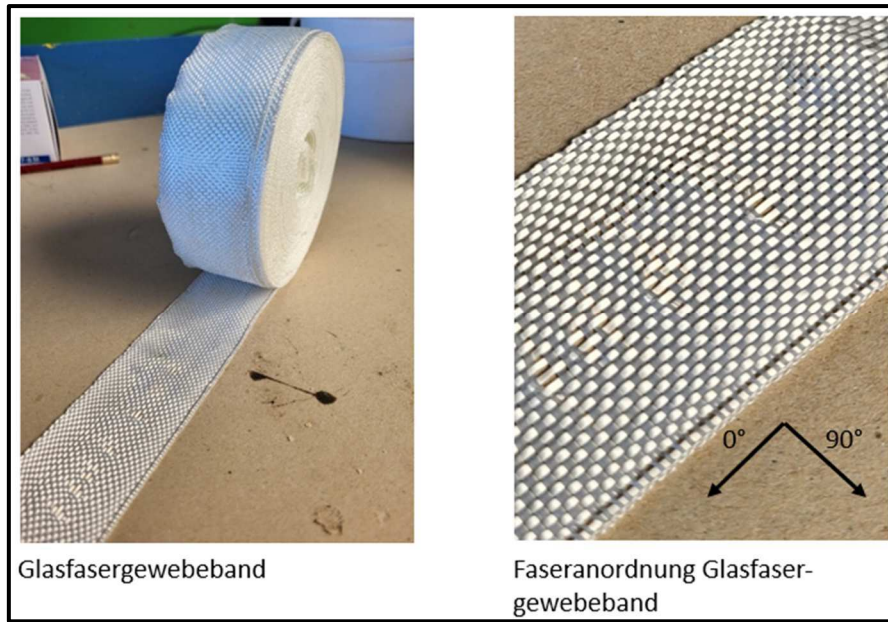


Abbildung 3.13

Die Gewebebänder werden gemeinsam mit den unidirektionalen Rovings in einem definierten Lagenaufbau in den Prozess eingebracht. Dabei kann der Lagenaufbau theoretisch an jeden beliebigen Lastfall angepasst werden.

Für die Versuche zur Herstellung von pultrudierten Profilen mit Querverfaser hat sich die Lätzsch GmbH für einen Lagenaufbau mit sich abwechselnden sechs Lagen Gewebeband und fünf Lagen UD-Rovings entschieden.

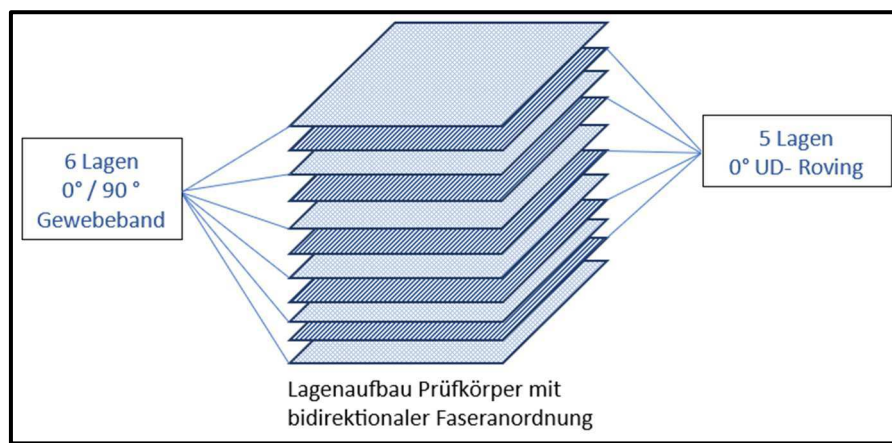


Abbildung 3.14

Dieser Lagenaufbau stellt zum Einen ein typisches Laminat dar und ist zum Anderen auf das Pultrusionswerkzeug, wie es im Ap 3.4 bzw. Ap 3.5 beschrieben ist, abgestimmt.

AP 3.3 Erstellung der Arbeitspläne, Materialbeschaffung

Grundsätzlich bestehen pultrudierte Kunststoffprofile aus zwei Komponenten - einem Matrixsystem und Verstärkungsfasern, wobei sich letztere, wie im Ap 3.2 beschrieben,

aus UD-Rovings und Gewebebändern zusammensetzen. Für die Versuchsreihe zur Herstellung von Profilen mit Querfaser wird zunächst mit der Fertigung von ca. 100 Metern Pultrusionsstrang kalkuliert.

Matrixsystem

Das eingesetzte Matrixsystem ist ein warmhärtendes und ungesättigtes Polyester der Firma Polynt Composites.



Matrixsystem in Gebinde

Matrixsystem in Harzwanne

Abbildung 3.15

Bei einem Faservolumengehalt von ca. 60 % und einer Profillänge von ca. 100 m wird eine Harzmenge von ca. 10 Kg benötigt.

Verstärkungsfasern Glasfaserrovings

Der Lagenaufbau sieht fünf Lagen mit jeweils sechs – also insgesamt 30 unidirektional angeordneten Glasfaserrovings mit 4800 tex vor. Daraus ergibt sich ein Bedarf von ca. 14,5 Kg Glasfaserroving.

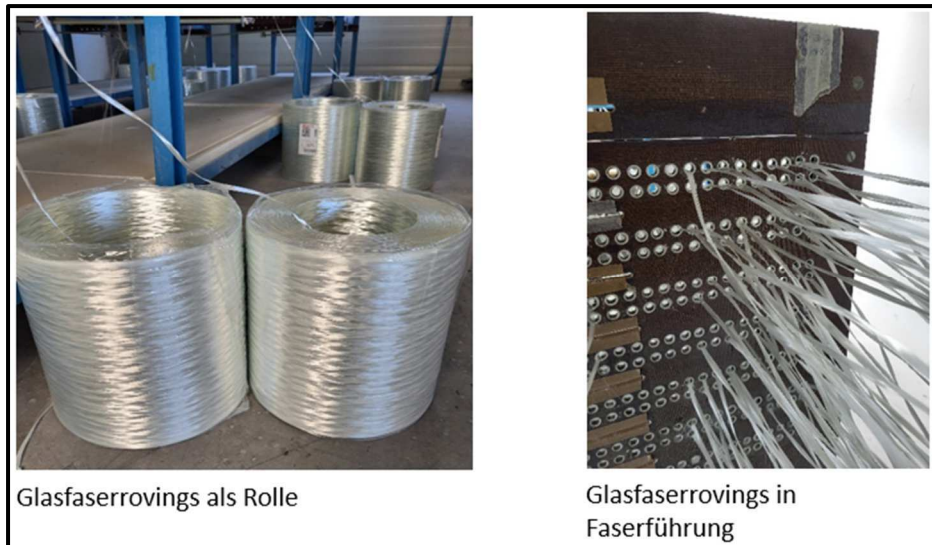


Abbildung 3.16

Verstärkungsfasern 0°/90° Gewebeband

Das eingesetzte Gewebeband wird auf Rollen mit einer Länge von 50 m geliefert. Die Breite der Gewebebänder wurde mit 40 mm an die Geometrie des Pultrusionswerkzeugs angepasst. Mit einem Flächengewicht von 225 g/m² und sechs Lagen ergibt sich bei einer Profillänge von 100 m ein Bedarf von 12 Rollen bzw. 5,4 Kg.



Abbildung 3.17

AP 3.4 Konzeptionierung, Detailkonstruktion und Auslegung der Pultrusionswerkzeuge

Typischerweise werden Pultrusionswerkzeuge aus Aluminium oder Stahl gefertigt, und bestehen, je nach Komplexität des Profilquerschnitts, aus einer Ober- und Unterhälfte. Die Profilgeometrie wird in das Werkzeug via CNC-Fräse eingebracht. Anschließend werden die gefrästen Flächen geschliffen und poliert. Der Herstellungsprozess der Pultrusionswerkzeuge ist sehr aufwendig und entsprechend kostenintensiv.

Um einerseits eine Vielfalt an verschiedenen Profilgeometrien anwenden zu können und andererseits die Anschaffungskosten der Werkzeuge zu begrenzen, hat die Lätzsch GmbH ein Konzept zur Anwendung von modularen Pultrusionswerkzeugen entwickelt. Der Grundgedanke ist, dass möglichst viele bzw. kostenintensive Elemente des Pultrusionswerkzeugs für alle Anwendungen verwendet werden können und lediglich die formgebenden Elemente variieren. Ein konkretes Beispiel für ein modulares Plattenwerkzeug ist in den folgenden Grafiken dargestellt. Die grau dargestellten Elemente „obere Platte“ und „untere Platte“ sind in allen drei Varianten identisch. Über die farbig markierten „Seitenelemente“ wird die Geometrie des Plattenprofils festgelegt.

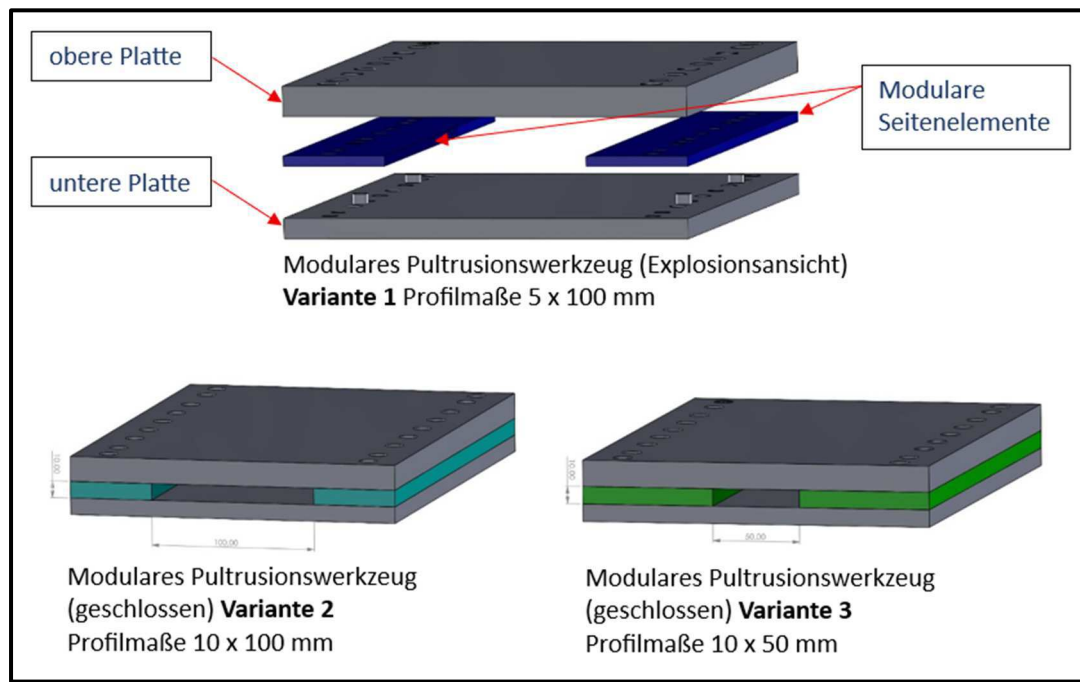


Abbildung 3.18

Der modulare Aufbau kann auch bei komplexeren Profilgeometrien angewendet werden. In diesem Fall werden die Seitenelemente (grün) ebenfalls für die mehrfache Anwendung ausgelegt und lediglich ein Element (gelb für U-Profil bzw. rot für L-Profil), das die konkrete Profilform vorgibt, wird ausgetauscht.

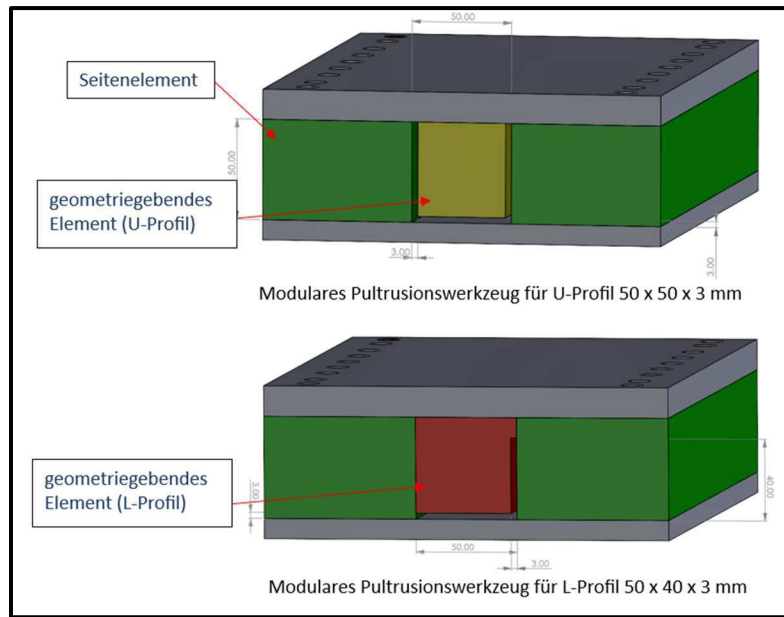


Abbildung 3.19

In engster Abstimmung mit der Lätzsch GmbH erfolgte die Konzeptionierung, Detailkonstruktion, Auslegung, Herstellung und Montage mit Inbetriebnahme der Pultrusionswerkzeuge. Wobei es sich um Werkzeuge für die Herstellung von GFK-Profilen handelt, die für die Komponententests genutzt werden sollen. Folgende Arbeitspunkte wurden im Detail bearbeitet:

- Technologiekonzepte zur wirtschaftlichen Herstellung der crashoptimierten Profilstrukturen im Pultrusionsverfahren
- Methodenentwicklung zur Integration von Krafteinleitungselementen in Profile zur Anbindung von Interieurbauteilen
- Erstellung der Arbeitspläne, Materialbeschaffung
- Konzeptionierung, Detailkonstruktion und Auslegung der Pultrusionswerkzeuge (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..20**)
- Herstellung, Montage und Inbetriebnahme der Pultrusionswerkzeuge (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..21**)
- Prozessentwicklung zur Pultrusion von belastungsangepassten Profilstrukturen

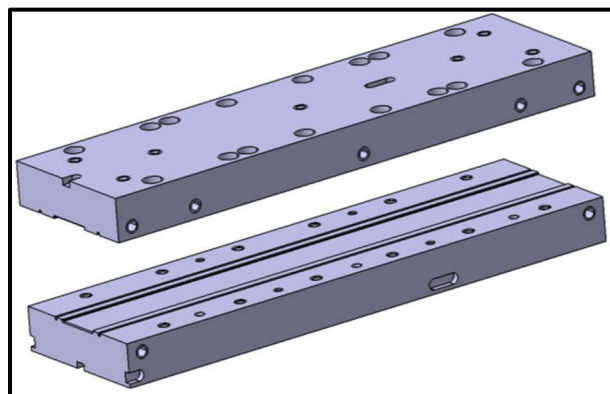


Abbildung 3.20: 3D- CAD- Detailkonstruktion der Pultrusionswerkzeuge

AP 3.5 Herstellung, Montage und Inbetriebnahme der Pultrusionswerkzeuge

Auf Grund des zeitlichen Verzugs im Forschungsprojekt hat die Lätzsch GmbH gemeinsam mit der LSE GmbH die Entscheidung getroffen, kein neues Formwerkzeug von Grund auf herzustellen. Stattdessen wird ein Pultrusionswerkzeug geliehen und durch die LSE GmbH an die Bedürfnisse der Lätzsch GmbH angepasst.

Für die Fertigung der im Arbeitspaket 3.2 beschriebenen pultrudierten Profilen mit Querschnittsform wurde ein Pultrusionswerkzeug mit einer Vierkantgeometrie und den Maßen 43 x 3 mm vom Fraunhofer IWU ausgeliehen. Lediglich das Mundstück des Werkzeugs wurde durch die LSE GmbH hergestellt, da dieses beim ursprünglichen Werkzeug nicht vorhanden war.

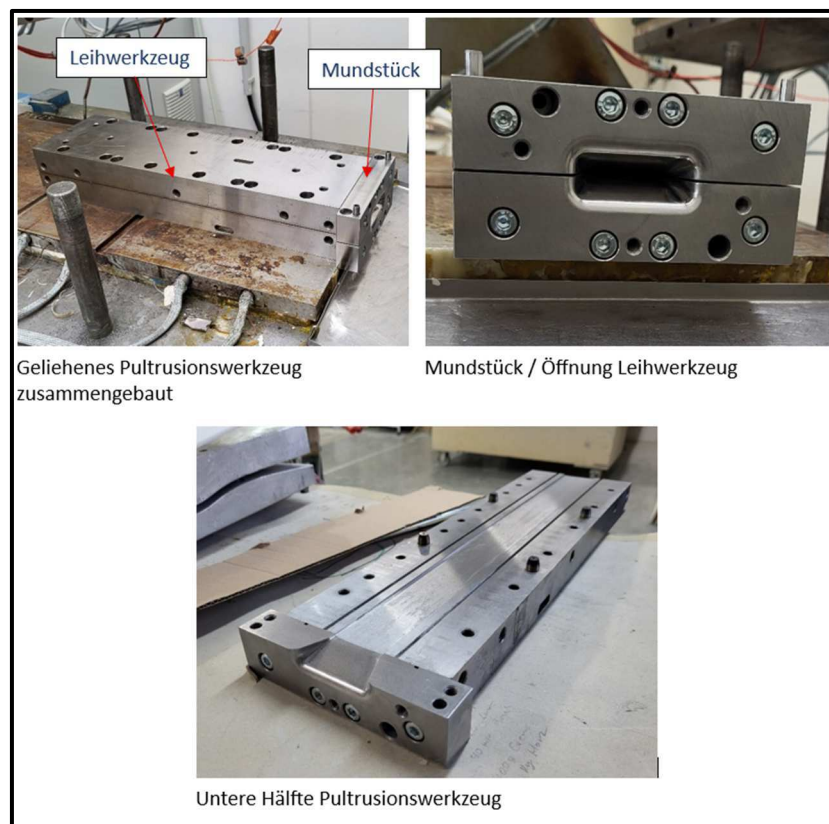


Abbildung 3.21

AP 3.6 Prozessentwicklung zur Pultrusion von belastungsangepassten Profilstrukturen

Für die geplanten Versuche zur Herstellung von Vierkantprofilen mit multidirektionaler Faseranordnung müssen zunächst Anpassungen am Herstellungsprozess vorgenommen werden.

Als erstes muss eine Möglichkeit gefunden werden die Gewebebänder in den Prozess zu integrieren. Hierfür wurde ein Rollenlager konstruiert und verschweißt. Das Rollenlager ist so aufgebaut, dass die Rollen mit Hilfe von Glasfaserstäben eingehängt

werden können. Die Rollen sind dabei freibeweglich, so dass sich die Gewebebänder durch den Vorschub selbstständig abrollen.

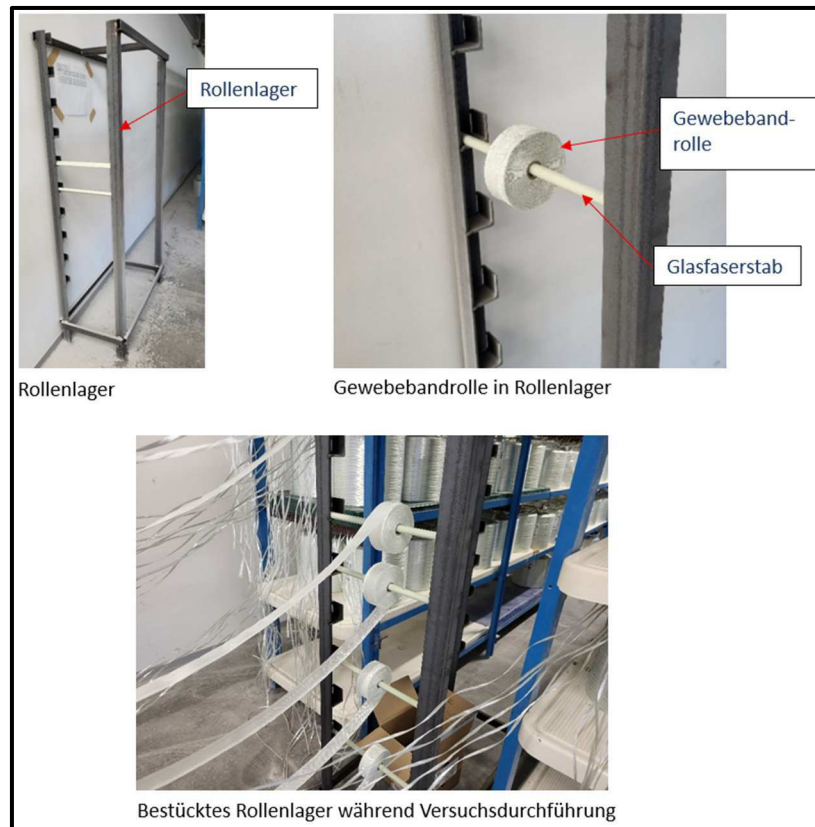


Abbildung 3.22

In die Faserführungen wurden Nuten eingebracht, durch die die Gewebebänder durchgeführt werden. Bereits in der Faserführung wird der Lagenaufbau vorgegeben. Das bedeutet, dass sowohl die Gewebebänder als auch die Rovings so angeordnet werden wie sie im fertigen Bauteil angeordnet sein sollen.

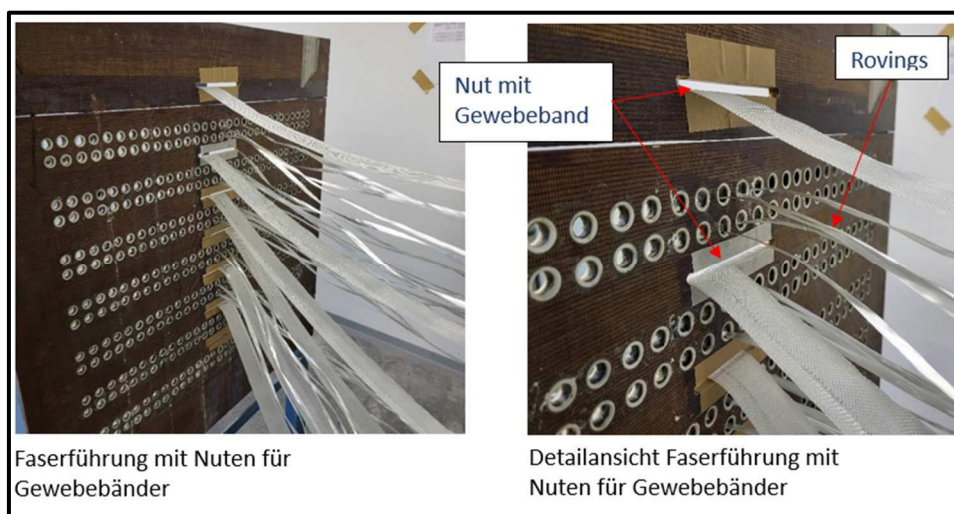


Abbildung 3.23

Als Abstreifer wurde eine Polyoxymethylenplatte (POM-Platte) verwendet, die bereits als Abstreifer für Rundstäbe diente. Wie im Arbeitspaket 3.1 beschrieben, hat

die Öffnung im Abstreifer bereits die Geometrie des zu fertigenden Profils. Die rechteckigen Prüfkörper sollten die Maße von 43 x 3 mm aufweisen, weshalb in den Abstreifer eine leicht größere Tasche mit den Maßen 45 x 5 mm eingebracht wurde.



Abbildung 3.24

Das Pultrusionswerkzeug wird auf der Heizung positioniert und vermittelt. Damit sich das Werkzeug während des Herstellungsprozesses auf Grund der hohen Zugkräfte der Pulleinheiten nicht verschiebt, wird ein Nutenstein hinter dem Werkzeug angebracht.

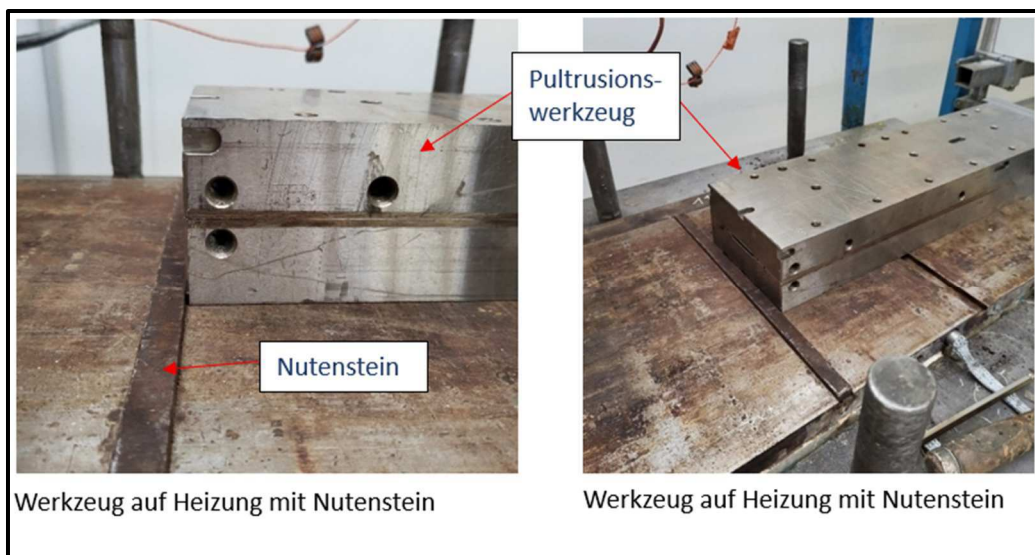


Abbildung 3.25

AP 3.7 Herstellung skalierter Profilstrukturen für Komponententests

Versuchsaufbau

Die Herstellung von skalierten Profilstrukturen mit multidirektionaler Faseranordnung soll in zwei Versuchen stattfinden. In den jeweiligen Versuchen werden ca. 45 m Vierkantprofil mit den Maßen 43 x 3 mm hergestellt. Während der Versuchsdurchführung wird die Vorschubgeschwindigkeit von 0,45 m/min bis 1 m/min in fünf Teilversuchen gesteigert.

Tabelle 3.2

Teilversuch	1	2	3	4	5
Vorschubgeschw. in m/min	0,45	0,55	0,6	0,65	1

Übersicht Teilversuch / Vorschubgeschwindigkeit

Zielstellung

Die Versuche sollen primär dazu dienen einen Nachweis zu erbringen, dass die Herstellung von Profilen mit multidirektionaler Faseranordnung entsprechend der konzeptionellen Ausarbeitung prinzipiell möglich ist. Das Hauptaugenmerk liegt dementsprechend auf den in den Prozess neuintegrierten bzw. modifizierten Komponenten Rollenlager, Abstreifer und Pultrusionswerkzeug. Weiterhin soll geprüft werden, wie sich die Faserbänder im Prozess verhalten bzw. welche Problemstellungen sich während des Prozesses ergeben. Die Aufteilung in zwei Versuche erlaubt es der Lätzsch GmbH die Erkenntnisse aus dem ersten Versuch bereits in den Zweiten zu übertragen, um mögliche notwendige Anpassungen an den Prozess vorzunehmen.

Sekundär sollen mit Hilfe des Versuches Erkenntnisse über die optimalen Vorschubgeschwindigkeiten zur Herstellung dieses Profiltyps gewonnen werden. Die wirtschaftliche Herstellung von Pultrusionsprofilen hängt im hohen Maße von der Fertigungszeit ab, die sich unter anderem über die Vorschubgeschwindigkeit ergibt. Dem steht die Annahme entgegen, dass sich die Oberflächenqualität mit steigender Vorschubgeschwindigkeit verschlechtert. Darüber hinaus erhöhen sich mit steigender Vorschubgeschwindigkeit die Zugkräfte mit der die Rovings und Faserbänder durch das Werkzeug, den Abstreifer, das Harzbad etc. gezogen werden. Bei zu hohen Zugkräften kann es entsprechend zu Faserrissen kommen. So ergibt sich als optimale Vorschubgeschwindigkeit die maximale Geschwindigkeit, mit der die Prozesssicherheit und Qualitätsansprüche noch gewährleistet werden können. Die im Versuch untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten 1 bis 4 (siehe Tabelle *Übersicht Teilversuch / Vorschubgeschwindigkeit*) sind Erfahrungswerte aus der Herstellung von Profilen mit ähnlicher Querschnittsflächengröße. Der fünfte Wert mit 1 m/min ist deutlich höher gewählt und soll aufzeigen, wie sich eine zu hohe Vorschubgeschwindigkeit auf den Prozess und die Oberflächenqualität des Profils auswirkt.

Versuch 1

Im ersten Versuch wurden Prüfkörper mit 0,45 m/min und 0,55 m/min gefertigt. Schnell zeigte sich, dass die entwickelten Konzepte prinzipiell sehr gut aufgingen. Die

Gewebebänderrollen wickelten sich auf Grund der Vorschubgeschwindigkeit, wie vorgesehen, selbstständig ab. Auch die Benetzung der Faserbänder im Harzbad sowie der Transfer durch den Abstreifer in das Pultrusionswerkzeug erfolgte problemlos.

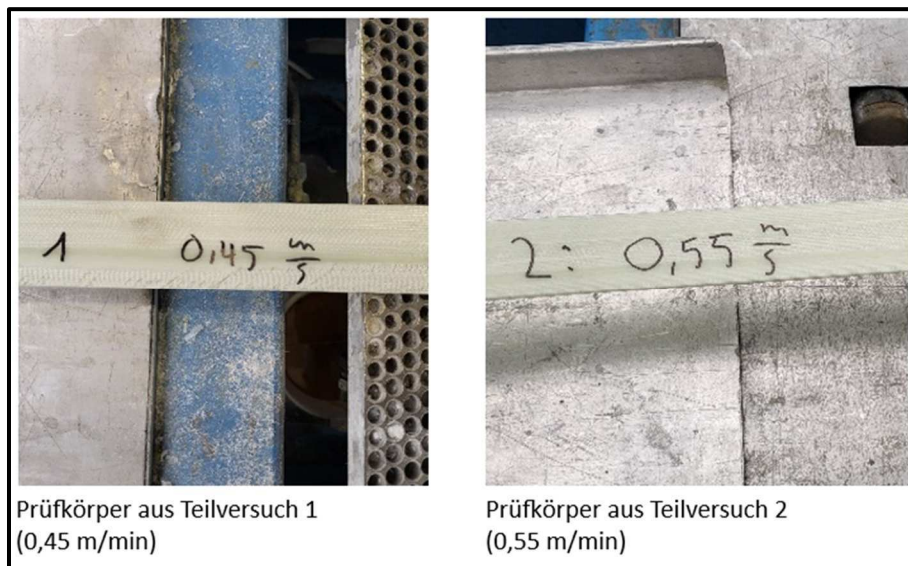


Abbildung 3.26

So entstanden im ersten Versuch diverse Prüfkörper mit einer Gesamtlänge von ca. 45 m. Die Oberflächenqualität der Prüfkörper war sowohl bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,45 m/min und 0,55 m/min gleichbleibend sehr gut.



Abbildung 3.27

Der erste Versuch machte jedoch deutlich, dass die Faserbänder und Rovings in diesem Prozessaufbau nicht im vordefinierten Lagenaufbau verbleiben. Stattdessen verschoben sich die Faserbänder bereits während des Eintauchens ins Harzbad, so dass die Faserbänder unkontrolliert in das Werkzeug eingezogen wurden.

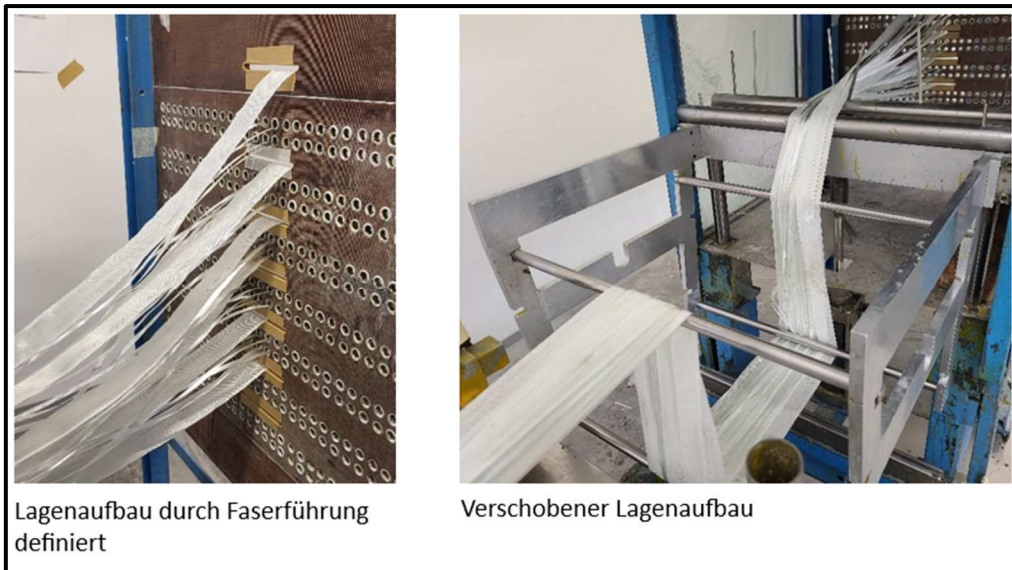


Abbildung 3.28

Dieser Effekt verstärkte sich im Laufe des Versuches. Teilweise haben sich die Faserbänder in sich gefaltet und umeinander geschlungen.



Abbildung 3.29

Das Resultat ist, dass die im ersten Versuch gefertigten Vierkantprofile keinen definierten Lagenaufbau aufweisen.

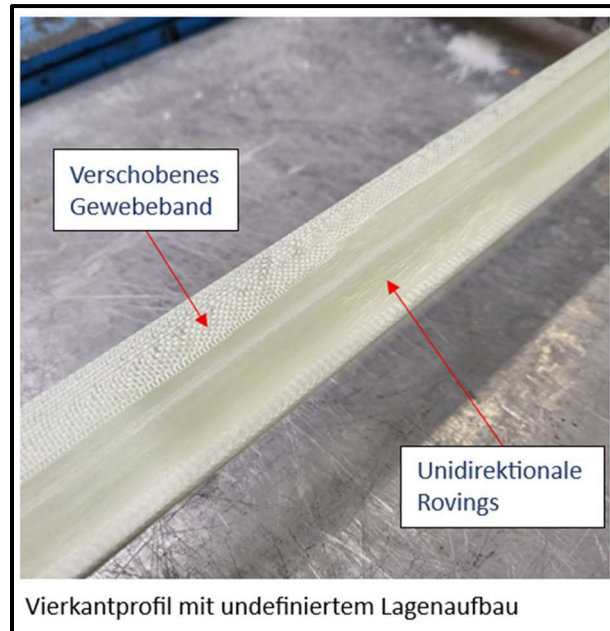


Abbildung 3.30

Versuch 2

Die Erkenntnisse aus dem ersten Versuch wurden ausgewertet und genutzt, um den Prozess für den zweiten Versuch zu optimieren. Um den Lagenaufbau der Vierkantprofile auch während des Prozesses zu erhalten, wurde eine weitere Faserführung unmittelbar vor dem Abstreifer integriert.

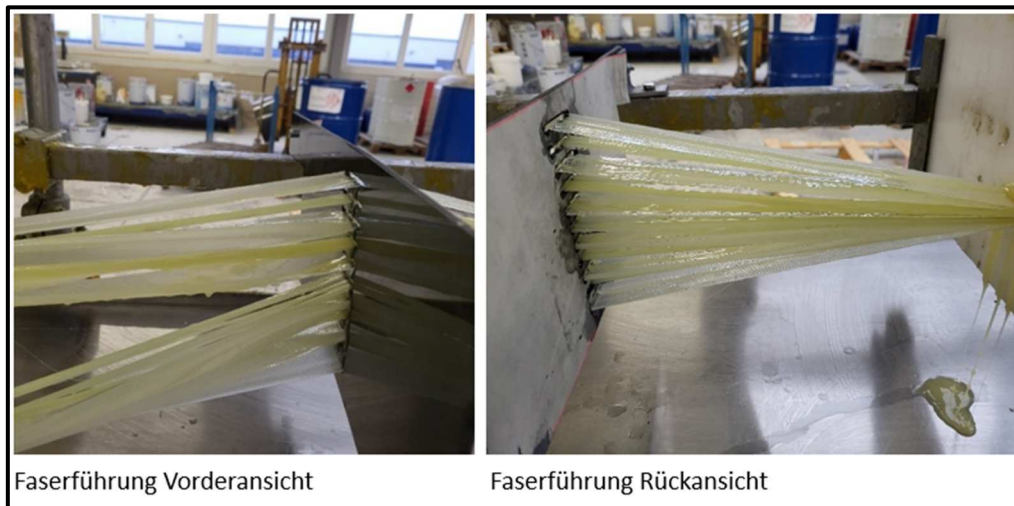


Abbildung 3.31

Anschließend wurden erneut ca. 45 m Vierkantprofil pultrudiert, wobei dieses Mal die Vorschubgeschwindigkeiten 0,6 m/min, 0,65 m/min und 1 m/min untersucht wurden.

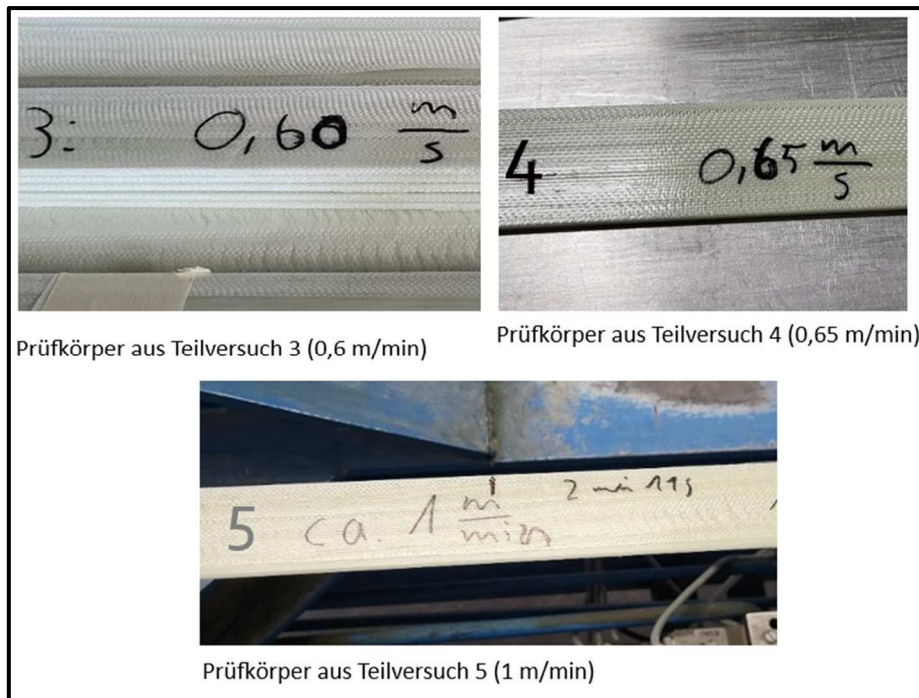


Abbildung 3.32

Der positive Effekt der weiteren Faserführung war im zweiten Versuch deutlich zu erkennen. Die Gewebebänder und Rovings behielten ihre definierte Position im Laminat bei und wurden, wie vorgesehen, in das Pultrusionswerkzeug eingezogen. Auch optisch war eine deutliche Verbesserung des Lagenaufbaus bei den im zweiten Versuch entstandenen Vierkantprofilen zu erkennen (siehe Bilder *Vergleich oberste Lage von Profilen ohne und mit 2. Faserführung vor Abstreifer*).



Abbildung 3.33

Auswertung Versuch 1 und Versuch 2

Im Rahmen der Versuchsreihe zur Fertigung pultrudierter Vierkantprofile mit multidirektionaler Faseranordnung ist es der Lätzsch GmbH gelungen den Nachweis zur erfolgreichen Herstellung dieser Profile zu erbringen. Die Integration neuer Prozesskomponenten wie das Rollenlager funktionierte auf Anhieb. Die Erkenntnisse aus dem ersten Versuch wurden von der Lätzsch GmbH ausgewertet und bereits im zweiten Versuch eingebracht.

Die Versuchsreihe diente zusätzlich dazu Aussagen über die optimale Vorschubgeschwindigkeit zu treffen. Hierfür wurden die Oberflächen der Profile optisch und haptisch nach den Kriterien Oberflächengüte und Faserverschiebung bewertet. Die Teilversuche 1 und 2 mit den Vorschubgeschwindigkeiten 0,45 m/min und 0,55 m/min werden bei der Auswertung außen vorgelassen, da sich die Faserbänder ohne zweite Faserführung bereits während des Transfers zum Pultrusionswerkzeug stark verschoben hatten und somit kein Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Faserverschiebung hergestellt werden kann.

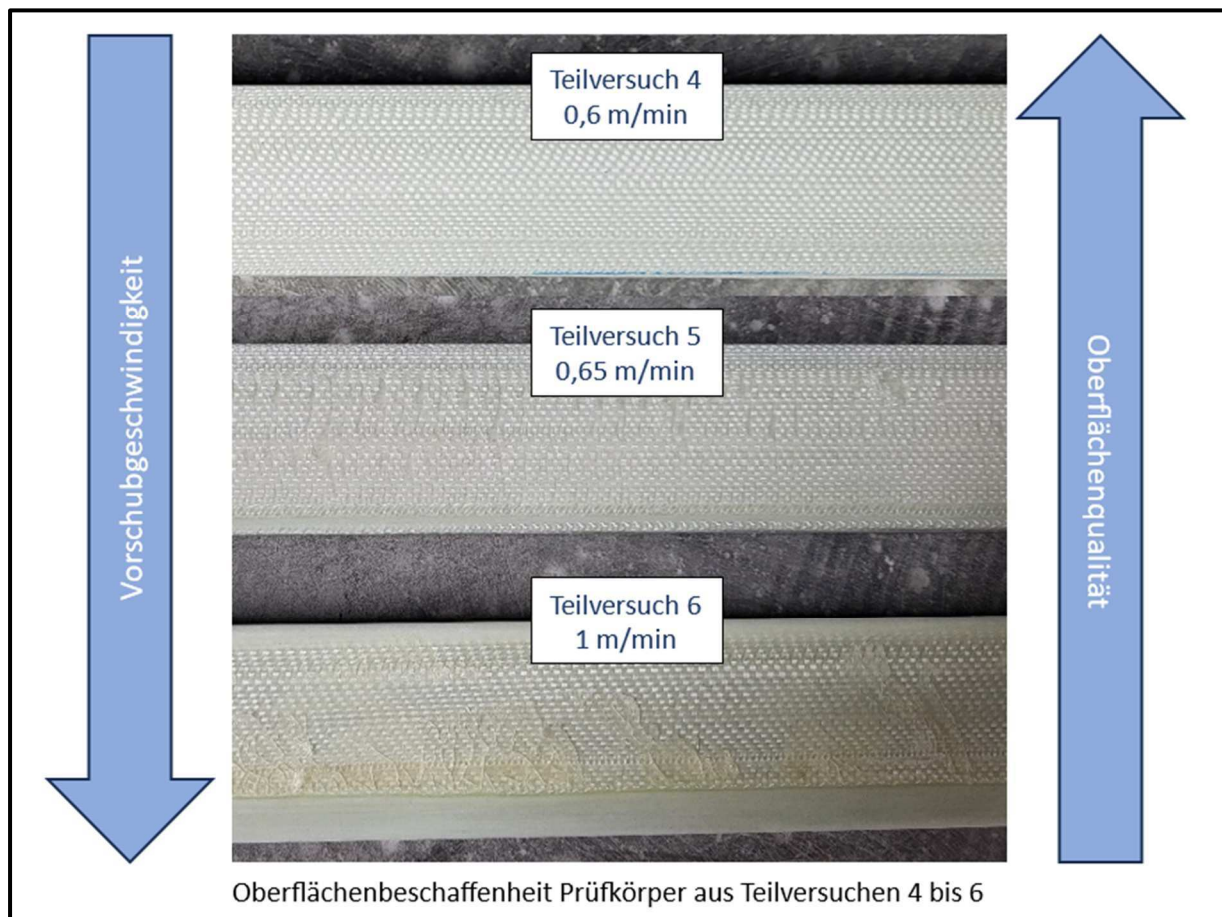


Abbildung 3.34

Die Prüfkörper der Teilversuche 4 bis 6 (siehe Bild *Oberflächenbeschaffenheit Prüfkörper aus Teilversuchen 4 bis 6*) zeigen deutlich den Zusammenhang aus Vorschubgeschwindigkeit und Qualität auf. Die Prüfkörper, die mit 0,6 m/min gefertigt wurden (Teilversuch 4), ergeben ein homogenes Erscheinungsbild, in dem die Fasern der obersten Gewebeschicht kaum bis keine Verschiebungen erkennbar sind. Die Oberfläche fühlt sich durchgängig sehr glatt und eben an.

Bei den Prüfkörpern mit 0,65 m/min Vorschubgeschwindigkeit (Teilversuch 5) bildeten sich bereits erste Faserverschiebungen aus. Gut zu erkennen sind Spaltbildungen senkrecht zur Abzugsrichtung und das Erscheinungsbild wirkt sehr unruhig. Die Oberfläche ist weiterhin durchgehend glatt und eben. Grund für die Faserverschiebungen ist die aus der Vorschubgeschwindigkeit resultierende Zugkraft, mit der die Faserbänder und Rovings durch das Pultrusionswerkzeug transferiert

werden. Sind die Zugkräfte zu groß werden die Faserbänder im Pultrusionswerkzeug gedehnt und härten in dieser Position aus.

Anhand der Prüfkörper, die mit einer Vorschubgeschwindigkeit mit 1 m/min gefertigt wurden, wird der Einfluss auf die Qualität noch deutlicher. An der Oberfläche bildeten sich Reinharzstellen, die während des Transfers durch das Pultrusionswerkzeug zunächst aushärteten und auf Grund der hohen Kräfte Risse ausbildeten. Entsprechend rau und uneben war die Beschaffenheit der Oberfläche dieser Profile. Des Weiteren kam es, ähnlich wie bei den Teilversuchen 1 und 2 ohne zweite Faserführung, zum Verschiebungen und Falten der Faserbänder.

AP 4 Technologieentwicklung für crashoptimierte Knotenelemente

Für die Dokumentation dieses Berichtsabschnittes (AP4) wurde eine abweichende Gliederung gewählt. Die Projektinhalte und generellen Aufgaben haben sich jedoch nicht verändert. Im Wesentlichen wurden Knotenelemente durch die bereits gezeigten Verstärkungswinkel ersetzt. Die jeweiligen Arbeitspakete wurden jedoch Zusammengefasst bzw. in anderer Reihenfolge bearbeitet und ließen sich aus diesem Grund nicht sinnvoll nach der Arbeitsplangliederung beschreiben. Für eine logisch nachvollziehbare Aufschlüsselung wurde eine chronologische Gliederung gewählt. Die inhaltlich zugehörigen Kapitel des Arbeitsplanes wurden in Klammern hinter den Überschriften der Berichtsabschnitte geschrieben.

Entwicklung L- Steher (AP4.1)

Durch die Berücksichtigung der fahrzeugspezifischen Gegebenheiten (Fahrerraum-Trennwand / Anbindung / Aufbau der Sicherheitszelle) wurde die Geometrie des Stehers grundlegend durch die Fa. Capron geändert und somit das Stützwandkonzept mit direkter Anbindung zur B-Säule angepasst. Durch die grundlegende Geometrieänderung wird diese Entwicklungsstufe als Phase 2 bezeichnet. Das 3D-Modell des Neuentwurfes des Stehers von Fa. Capron ist in folgender Darstellung zu sehen:

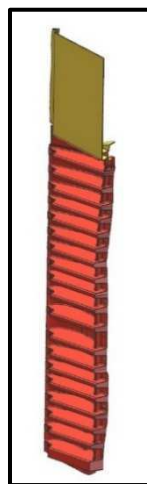


Abbildung 4.1: Neu-Entwurf des L-Steher mit Seitenwandintegration / 04.09.23 aus Projektmeeting mit CAPRON.

Um die Herstellbarkeit des Stehers zu ermöglichen, wurde bezugnehmend zu AP 4.1 („Technologiekonzept zur wirtschaftlichen Herstellung eines Crashelementes“), die Bauteilgeometrie analysiert und für den Thermopress-Prozess von glasfaserverstärkten ABS optimiert. Die hohe Anzahl an Versteifungsrippen und die wechselseitigen Übergänge von horizontaler- und vertikaler Verrippung nehmen negativen Einfluss auf das Umformverhalten. Anhand von vorangegangenen Pressversuchen und bisher gewonnenen Kenntnissen aus Thermopressversuchen wurde deutlich, dass das glasfaserverstärkte ABS im Gegensatz zu unverstärkten ABS eine eingeschränkte Drapierfähigkeit und ein generell nachteiliges Verhalten im Thermopress-Prozess aufweist. Eine Verringerung der Anzahl der Verrippungen, Erhöhung der Entformschrägen, Vergrößerung der Radien und weichere Konturübergänge wurden in das 3D-Modell eingearbeitet. Um die Prozesssicherheit des Umformens im Hinblick auf die Serienfertigung abzusichern, soll der Steher als 2-teiliges Modul gestaltet werden. Diese beiden Module werden anschließend durch Kleben zusammengefügt.

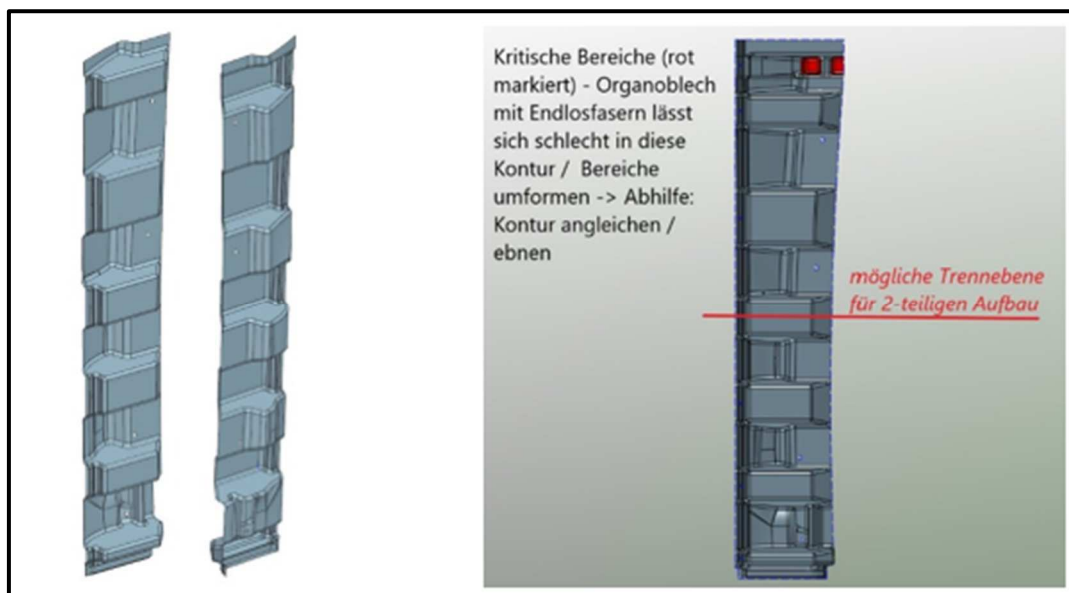


Abbildung 4.2: Anpassung des L-Steher mit Seitenwandintegration / 21.09.23 aus Projektmeeting mit CAPRON.

Weiterhin wurde eine Engstelle am Ende des Stehers identifiziert, an welcher das glasfaserverstärkte ABS einen zu hohen Umformungsgrad erfährt, und die Gefahr besteht, dass die Fasern im Umformprozess an die Matrix-Oberfläche gedrückt werden. In direkter Abstimmung mit dem Projektpartner Capron konnten die kritischen Stellen der Bauteilkontur durch geometrische Vereinfachungen und Angleichung an eine flachere Bauteiloberfläche optimiert werden.

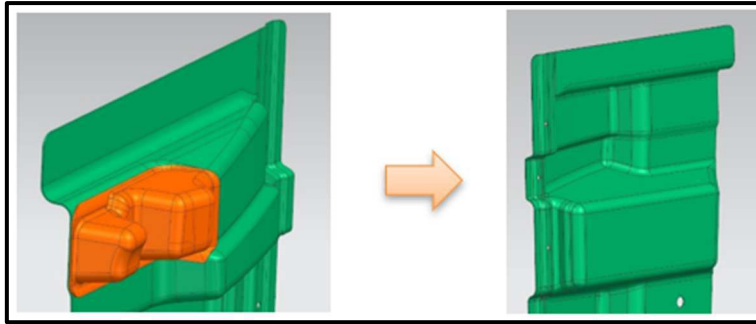


Abbildung 4.3: Anpassung der kritischen Stelle / 14.12.23 aus Projektmeeting mit CAPRON.

Die Umformung des Organoblech-Zuschnittes in die gewünschte Stehergeometrie ist bezogen auf die Querrichtung des Stehers (geringe Bauteilbreite) und die geringen Konturübergänge unproblematisch. In Längsrichtung des Stehers verlängert sich jedoch beim Umformprozess die projizierte Länge (ca. 2600mm) zur Ausgangslänge (ca. 1660mm) auf das ca. 1,6-fache. Dieser Wert verdeutlicht beim Umformprozess das Nachziehen des Materials in die Werkzeugkavität, was bei der zukünftigen Werkzeuggestaltung berücksichtigt werden muss.

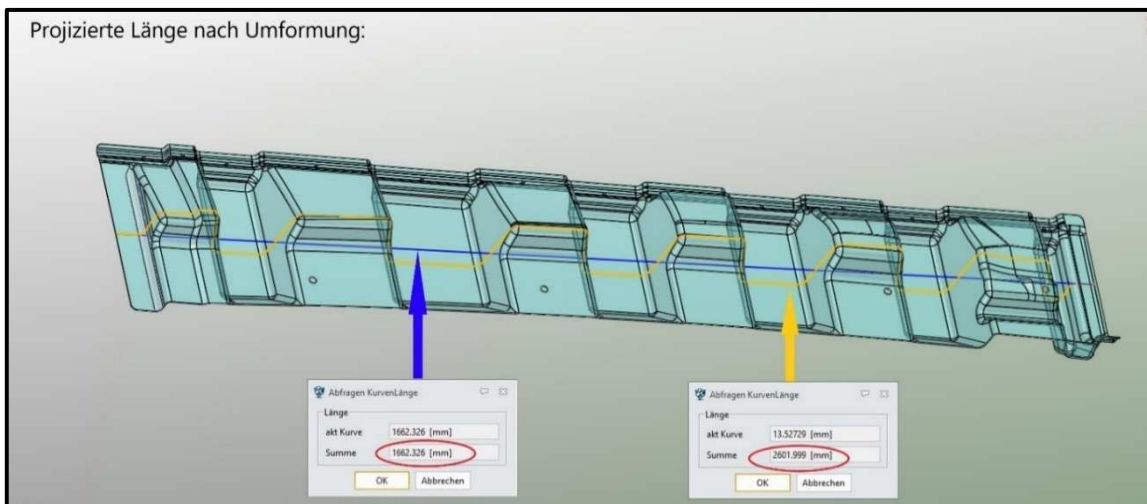


Abbildung 4.4: Projizierte Länge nach Umformung / 03.11.23 Lakowa intern.

Um das Umformverhalten des glasfaserverstärkten ABS-Materials in Bezug auf die aktuelle Bauteilgeometrie testen zu können, soll ein Versuchswerkzeug mit dem folgend dargestellten Ausschnitt des Stehers erstellt werden. Hierbei können neue Erkenntnisse zum Umformprozess und Serientauglichkeit gewonnen werden.



Abbildung 4.5: Versuchswerkzeug - Bereich / 04.12.23 Lakowa intern.

In der folgenden Darstellung wird die Lage und Ausrichtung des Werkzeuges anhand der liegenden Stehergeometrie abgebildet.

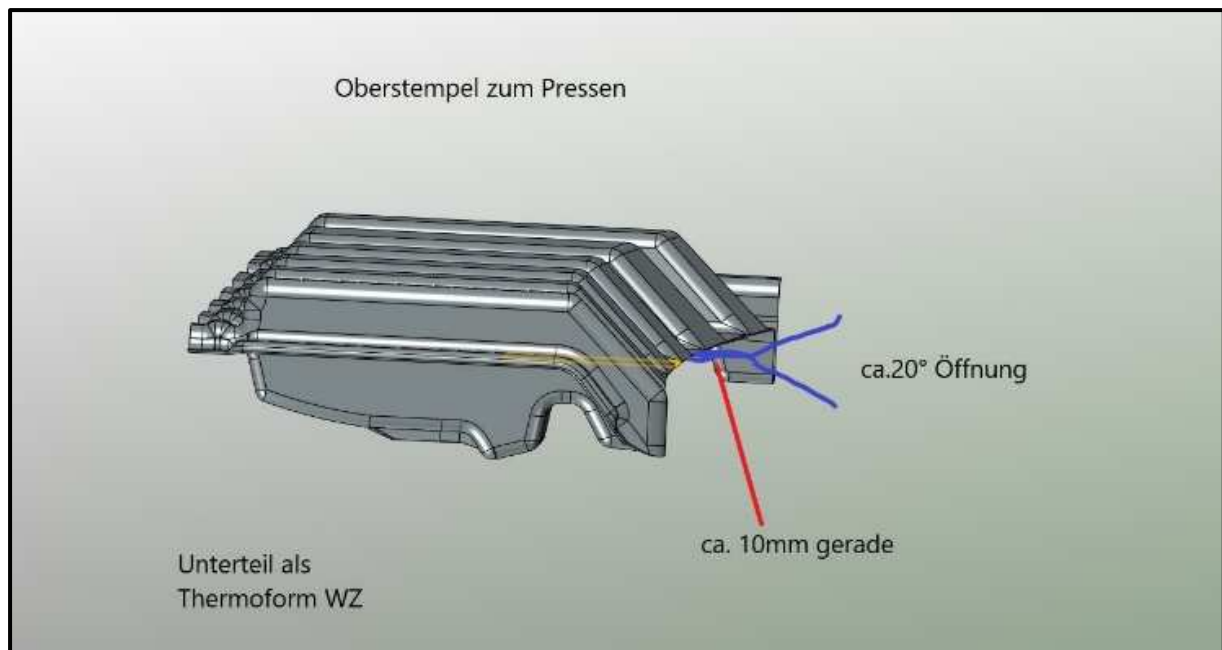


Abbildung 4.6: Versuchswerkzeug - Bauteillage / 04.12.23 Lakowa intern.

Um das Testwerkzeug im Vakuum-Thermoformverfahren als auch im Thermopressverfahren anwenden zu können, soll dieses als 2-teiliges hybrides Formwerkzeug ausgeführt werden. Es besteht aus einem Oberstempel und einem Unterteil, welches bei der Lakowa GmbH in einer Thermo-Pressmaschine T10/2 zum Einsatz kommen soll. Hierbei soll der Vorteil der Serientauglichkeit für die Vakuum-Thermoformmaschinen der Lakowa GmbH im Bereich der endlos-glasfaserverstärkten ABS- Materialien, mit den vorgegebenen Geometrien erprobt werden. Die nachfolgenden Bilder zeigen das von Lakowa konstruierte und hergestellte Testwerkzeug. Das Werkzeugunterteil ist auf dem Maschinentisch positioniert und verankert. Die beiden Führungsbolzen dienen lediglich der Ausrichtung der beiden Werkzeughälften in der Thermoformmaschine und werden vor dem Thermoformprozess ausgebaut. Die obere Werkzeughälfte ist durch eine Adapterplatte am sogenannten Oberstempel der GEISS-Tiefziehmaschine befestigt.

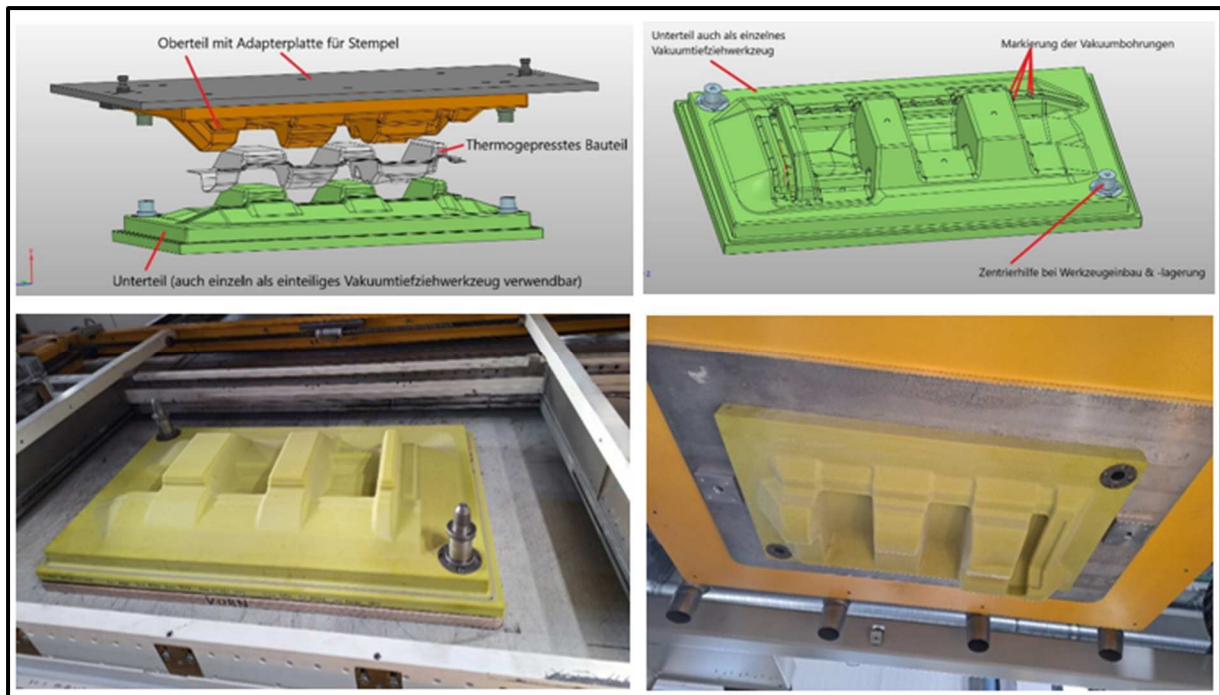


Abbildung 4.7: Aufbau Testwerkzeug / 25.01.24 Lakowa intern.

Um die geformten bzw. gepressten Rohlinge anschließend noch befräsen zu können, wurde die folgend dargestellte Fräsaufnahme für den Testbereich des L-Stehers hergestellt. Das Formteil wird für den Beschnitt mittels Vakuumtechnik auf der Fräsaufnahme gehalten.

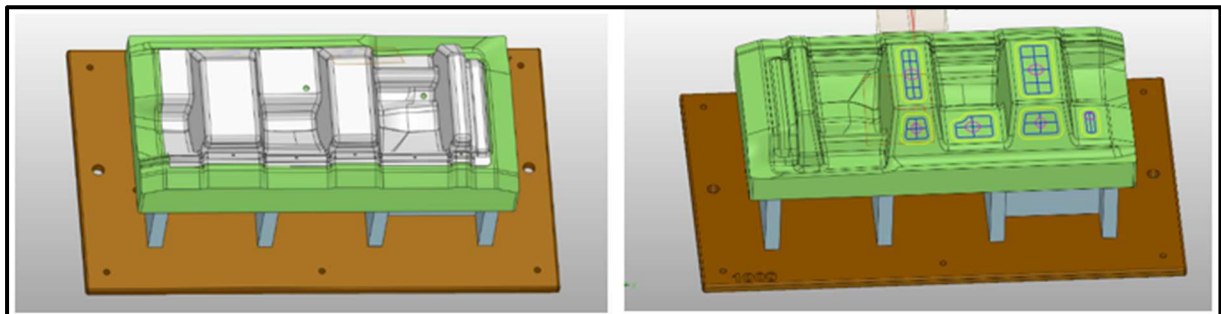


Abbildung 4.8: Fräsaufnahme zu Testwerkzeug / 28.02.24 Lakowa intern.

Materialaufbau

Erste Versuche mit den für das Testwerkzeug bestimmten Zuschnitt von ca. 1200mm x 600mm zeigten, dass das ABS-GF Material beim Umformprozess stark strapaziert wird. Durch die Verrippung der Bauteilkontur muss sich das Material beim Umformprozess in alle Kontur-Täler ziehen. Dies führt zu einem starken „Nachziehen“ des Materials im Randbereich und zeigt gleichzeitig die Problemstellen in Form von Falten oder an die Oberfläche gedrückter Glasfasern bei 3-dimensionaler Umformung des Materials.



Abbildung 4.9: Thermopressen ABS-GF größerer Zuschnitt / 07.03.24 Lakowa intern.

Das nur bedingt zufriedenstellende Umformergebniss hat zu weiteren Optimierungen des Materialaufbaus angeregt. Zum einen wurde der im folgenden Bild dargestellte unidirektionale GF-Materialaufbau ($0^\circ/+30^\circ/-30^\circ/0^\circ$) diskutiert. Dieser wurde auf Grund der knappen Zeitschiene jedoch nicht bestellt. Die Materialkarten dienen als Grundlage für die rechnerische Simulation des Crashfahrzeuges.

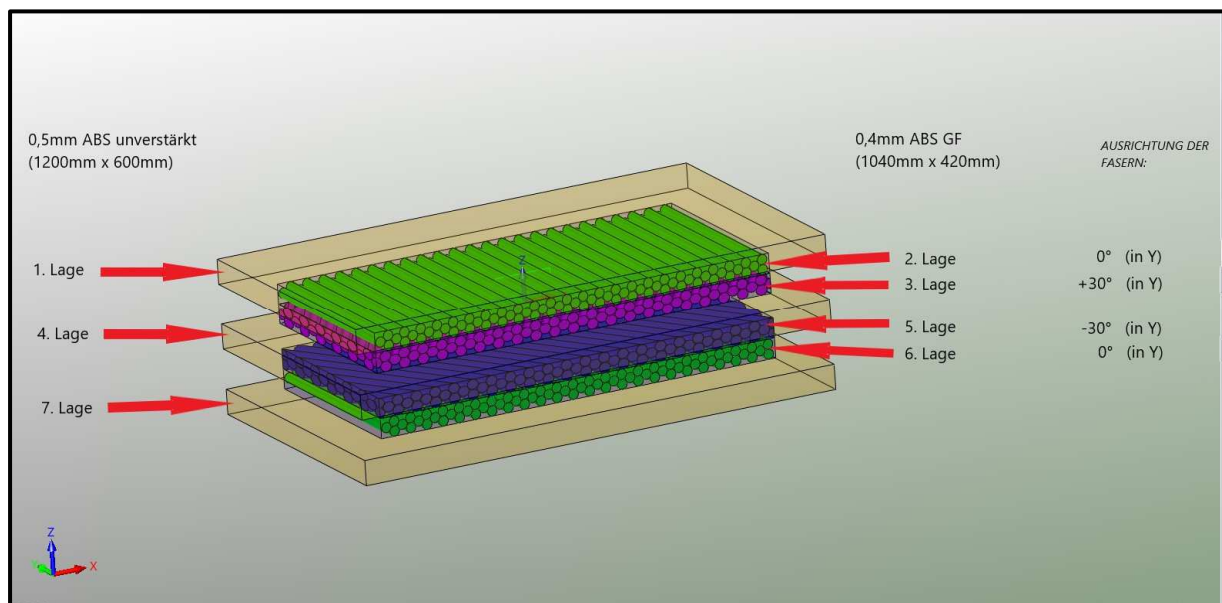


Abbildung 4.10: Unidirektionaler Materialaufbau / 15.04.24 Lakowa intern.

Zum anderen wurde ein hybrider Materialaufbau diskutiert und folgend auch favorisiert, um der Faltenbildung im Randbereich entgegenwirken zu können. Dieser beinhaltet im Außenbereich unverstärktes ABS und im inneren (Bereich der Bauteilkontur) das Glasfaserverstärkte Material (als 2. Schicht).

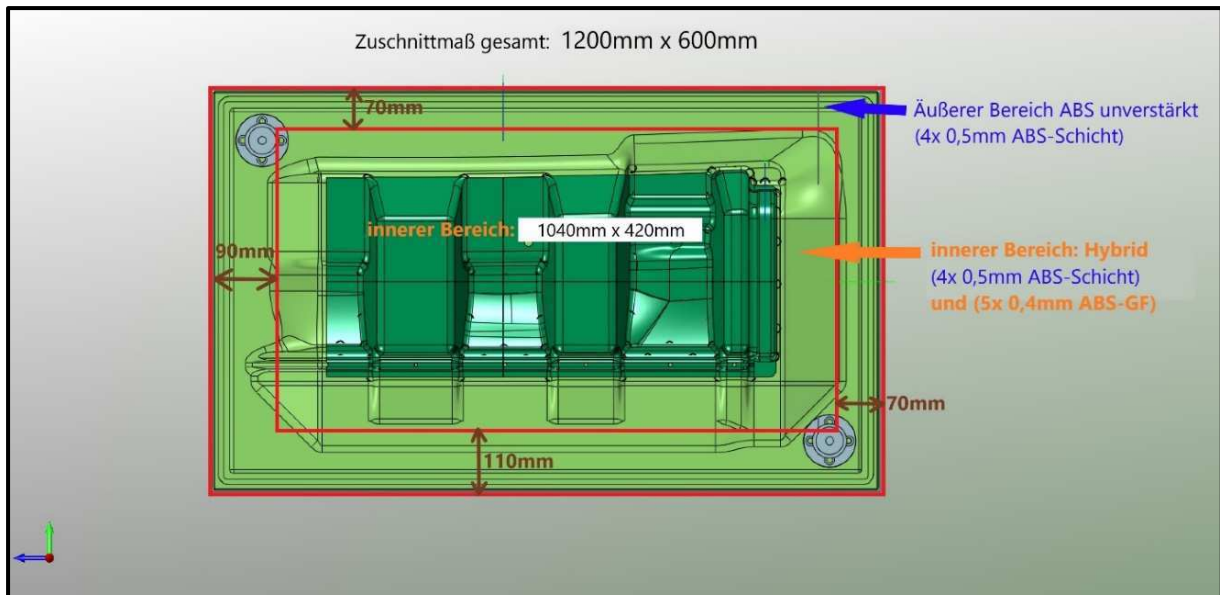


Abbildung 4.11: Analyse 1 Zuschnitt hybrid / 15.04.24 Lakowa intern.

Da weitere Versuche gezeigt haben, dass die Problematik der Faltenbildung auch in dem folgenden Bild rot dargestellten Bereichen liegt, wurde ein weiterer hybrider Materialaufbau diskutiert und auch umgesetzt. Hierbei wird das ABS-GF-Material lokal nur noch in den rot dargestellten Bereichen als 2. Schicht aufgebracht.

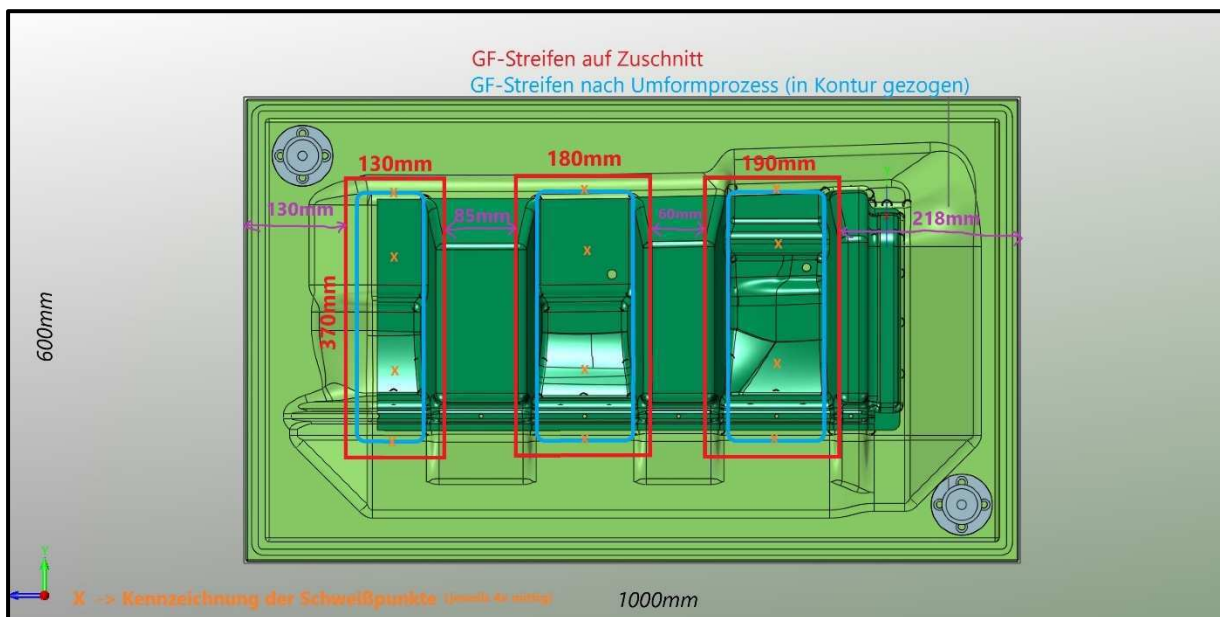


Abbildung 4.12: Analyse 2 Zuschnitt hybrid / 06.05.24 Lakowa intern.

Um das Verrutschen dieser Verstärkungslagen zu vermeiden, wurden diese mit jeweils 2 Ultraschall-Schweißpunkten fixiert. Außerdem wurde die starke Faltenbildung der bisherigen Versuche auch auf die mittlere Lage im Materialaufbau (90°) zurückgeführt, weshalb zusätzlich ein alternativer Lagenaufbau in 0°/-45°/0°/+45°/0° (in Y-Ausrichtung) für weitere Versuche bei der Steinbeis-Automation in Leichtbauprozessen (ALP) bestellt und verwendet wurde. Auf den unverstärkten ABS-Zuschnitt (2,0mm) sind die 3 lokalen ABS-GF Verstärkungen (1,7mm) so positioniert, dass diese nach dem Umformen exakt die Verrippungen des Stehers abbilden. Da die

verstärkten Bereiche eine Materialstärke von insgesamt ca. 3,7mm aufweisen, wurde die Kavität des Thermopresswerkzeuges noch einmal angepasst und überfräst.

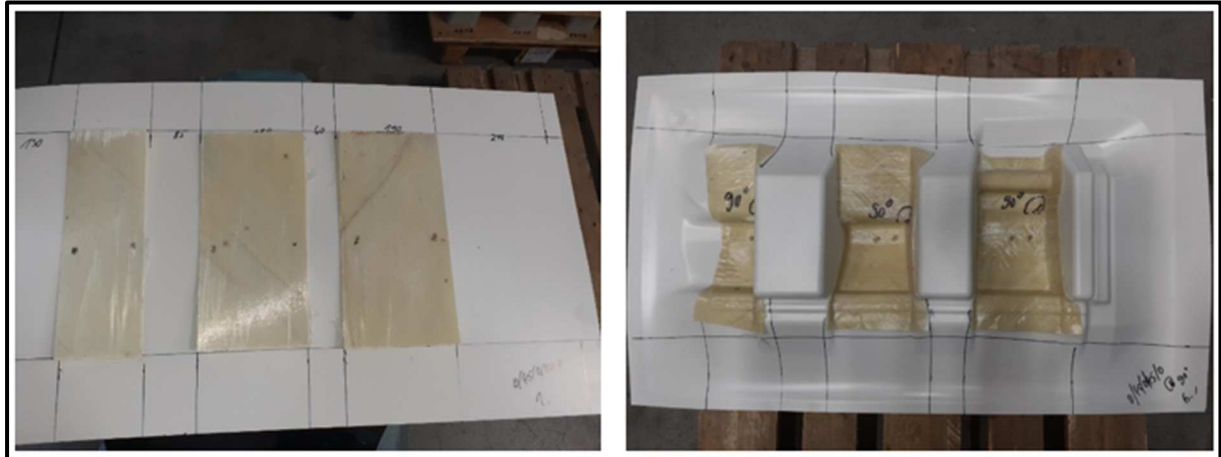


Abbildung 4.13: Zuschnitt hybrid ultraschallgeschweißt & thermogeformt / 04.06.24 Lakowa intern.

Die Thermopressversuche wurden ebenfalls mit dem 1. Lagenaufbau ($0^\circ/45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ$) wiederholt und zeigten auf Grund der lokalen Positionierung der Verstärkungen ein ähnlich gutes Umformergebnis. In Anhang E „Tabelle_Pressversuche ABS-GF“ sind die Umform-Parameter mit den entsprechenden Auswertungen beschrieben. Hierbei zeigte sich ein gutes Ergebnis nach entsprechender Optimierung der Umformparameter. Durch die lokalen Verstärkungsbereiche des hybriden Materialaufbaus konnte die Faltenbildung stark reduziert und ein entsprechend gutes Konturergebnis am Bauteil erzielt werden.

Die beiden unterschiedlichen Materialschichten (ABS & ABS-GF) sind bei dem Thermopressprozess sehr gut miteinander an den Oberflächen verschmolzen. Lediglich die äußeren Randbereiche weisen vereinzelt Fehlstellen auf, welche jedoch zukünftig durch optimierte Prozessparameter (Heizbild) vermieden werden können. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass eine Serienmäßige Herstellung von Bauteilen mit lokalen Materialaufdopplungen aus endlos-glasfaserverstärkten ABS, in Bereichen, die hochbeansprucht sind, möglich ist. Die beiden folgenden Bilder zeigen die ausgetrennten Teile des endlos glasfaserverstärkten ABS neigen zum Ausfransen der Faserenden.



Abbildung 4.14: Beschnitt mittlere Lage 0° / 06.06.24 Lakowa intern.

Für die bessere und einfachere Berechnung der Materialkarte für das endlos glasfaserverstärkte ABS wurde in Abstimmung mit Herrn Nossol und Herrn Meißner (IWU) ein vereinfachter Lagenaufbau (mit nur einer Faserrichtung) bei der Firma Steinbeis-Automation in Leichtbauprozessen (ALP) bestellt, um anschließend modifizierte Lagenaufbauvarianten einfacher und anwendungsorientierter simulativ rechnen zu können. Das Material wurde für Berechnungszwecke hergestellt, aber es wurde keine Materialkarte in Auftrag gegeben, da sich die Grundvoraussetzung seitens Capron in Bezug auf das Basisfahrzeug geändert haben. siehe Punkt 1.1.5 und folgende.

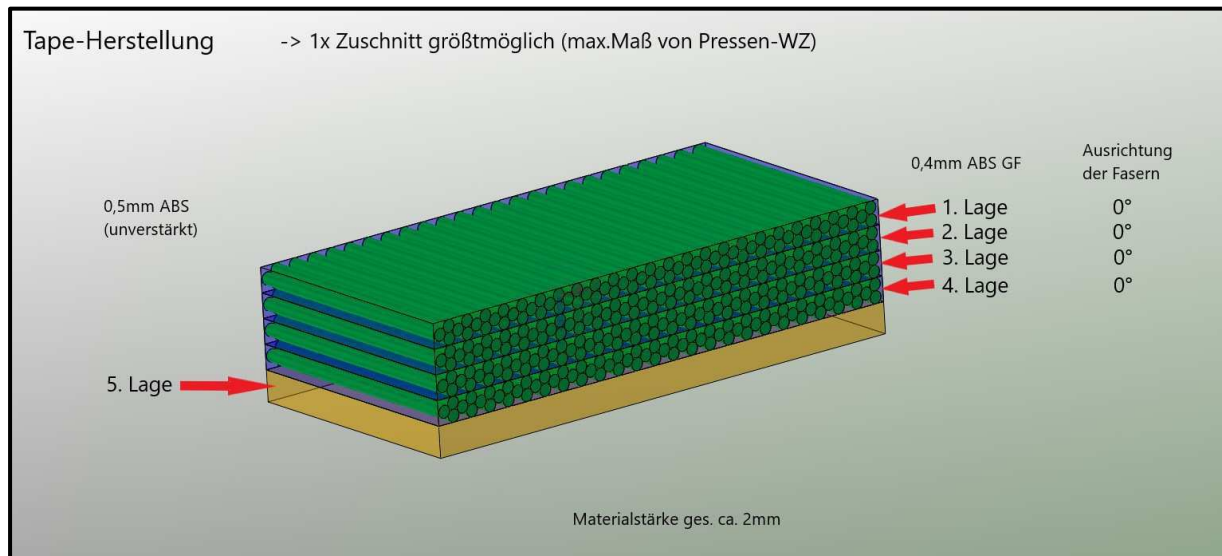


Abbildung 4.15: Tape-Aufbau für vereinfachte Berechnung / 08.05.24 Meeting zwischen Lakowa & IWU.

Entwicklung Verstärkungsteil (AP4.3)

Da die Firma Capron im August 2024 neue Gegebenheiten für das Wohnmobil und damit ein neues Verbindungsteil zwischen der Fahrerhauskabine und der Dachhaube über dem Fahrerhaus vorgestellt hat, wird diese Entwicklungsstufe als Phase 3 bezeichnet. Durch die neue Bauteilgeometrie, neue Gegebenheiten und Anforderungen mussten alle bisherigen Entwicklungen in Bezug auf Material und Technologie geprüft und angepasst werden. Die bisherigen Erkenntnisse aus dem L-Steher bieten für die neue Bauteilgeometrie des Verbindungsteils gute Voraussetzungen für die einzelnen Entwicklungsstufen bis hin zu einer finalen Prototypenherstellung. Die neue Bauteilgeometrie besteht aus jeweils 2 zusammengefügte Einzelteilen, welche links und rechts unter der Dachhaube im Fahrzeug verbaut sind. Das blaue Teil wird als Schale bezeichnet, dient als Verbindung zu angrenzenden Teilen und bringt eine Grundsteifigkeit in allen Richtungen. Das rote Teil wird als Verstärkungsrippe bezeichnet und soll die bei einem Crash nach vorn schiebenden Hauptkräfte im Bereich der Dachhaube in Richtung der A-Säule weiterleiten.

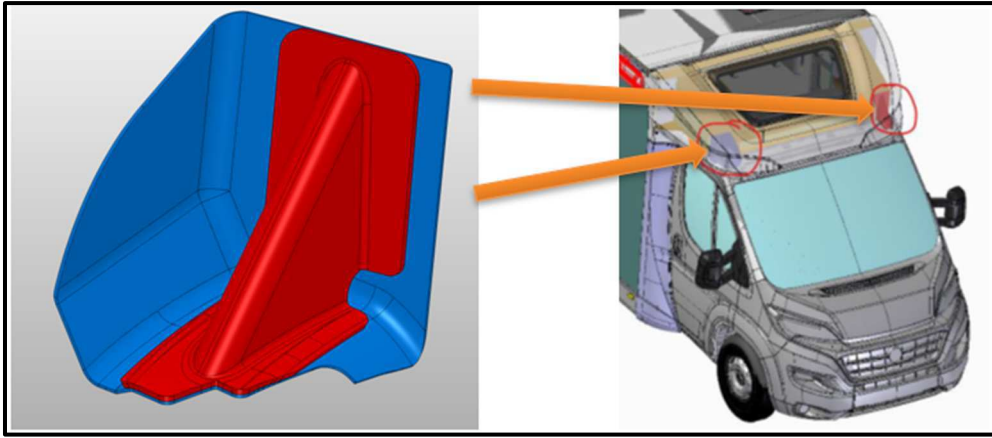


Abbildung 4.16: Crashelement / 04.11.24 Lakowa intern.

Die Lakowa GmbH hat in Abstimmung mit Capron Anpassungen der Bauteilgeometrie durchgeführt. Hierbei wurden die Kontaktflächen beider Bauteile vergrößert, um eine ausreichende Klebefläche zu gewährleisten. Die Bauteilradien wurden vergrößert und die Wandstärke der Rippe verbreitert, um ein bestmögliches Umformergebnis zu ermöglichen.

Für die Herstellung der beiden Einzelteile wird je ein Thermopresswerkzeug mit 2-fach Kavität benötigt, um die linke und rechte Seite im Fahrzeugdach gleichzeitig herstellen zu können. Durch die bereits erlangten Kenntnisse aus der Werkzeugkonstruktion des L-Stehers sollen auch die neuen Bauteilgeometrien durch 2-teilige hybride Formwerkzeuge (für Vakuumtiefzieh- & Thermopressverarbeitung) realisiert werden. Die beiden nachfolgenden Bilder zeigen die auskonstruierte Gestaltung der Werkzeuge seitens Lakowa, beziehend zu AP 4.3 („Konzeptionierung, Detailkonstruktion und Auslegung angepasster Formwerkzeuge“).

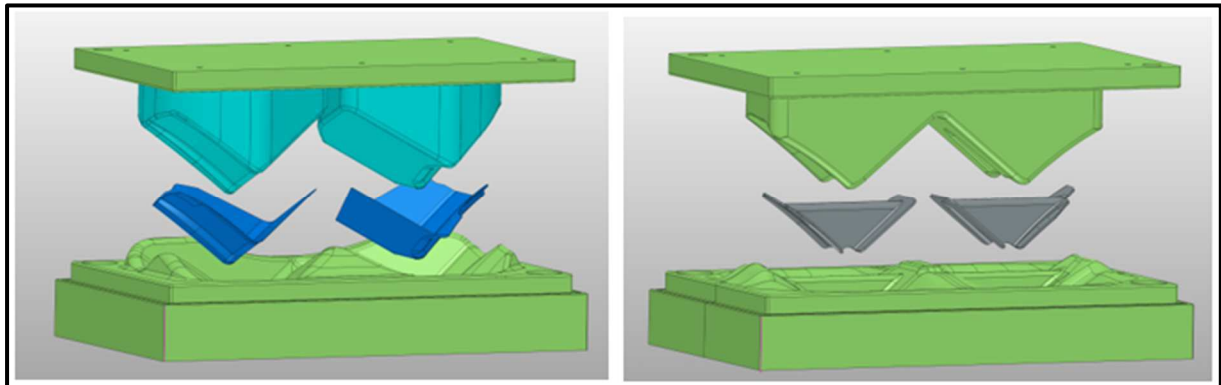


Abbildung 4.17: Aufbau Thermopresswerkzeug - Schale/ Rippe (rechts & links)/ 22.11.24 Lakowa intern.

Die Herstellung der Rohteilklötzer und das Befräsen der Werkzeugkontur beider Thermopresswerkzeuge wurde durch die Firma LSE realisiert. Hierbei wurden Blöcke aus dem Formbaumaterial RAKU® TOOL WB-1404 zugeschnitten und auf die benötigte Werkzeuggröße zusammengeklebt und anschließend mittels 3-Achs-CNC-Maschine bearbeitet und montiert.

Im folgenden Bild wird das 2-Teilige Werkzeug für das Bauteil „Schale“, bestehend aus oberer Werkzeughälfte (Werkzeugstempel) und unterer Werkzeughälfte gezeigt.

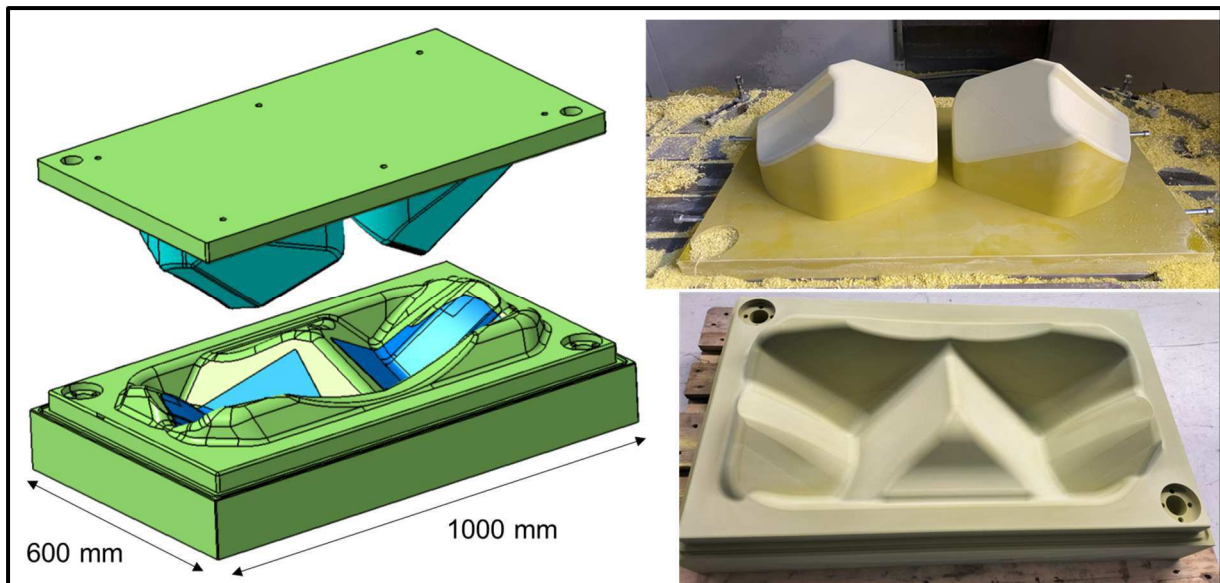


Abbildung 4.18: 3D-CAD-Detailkonstruktion sowie Herstellung und Montage Werkzeug Ecke (2-fach)) / 22.11.24 LSE.

Das zweite Thermopresswerkzeug für das Bauteil „Rippe“, welches ebenfalls aus Werkzeug-Patrize (Stempel) und Matrize besteht, wird im folgenden Bild gezeigt.

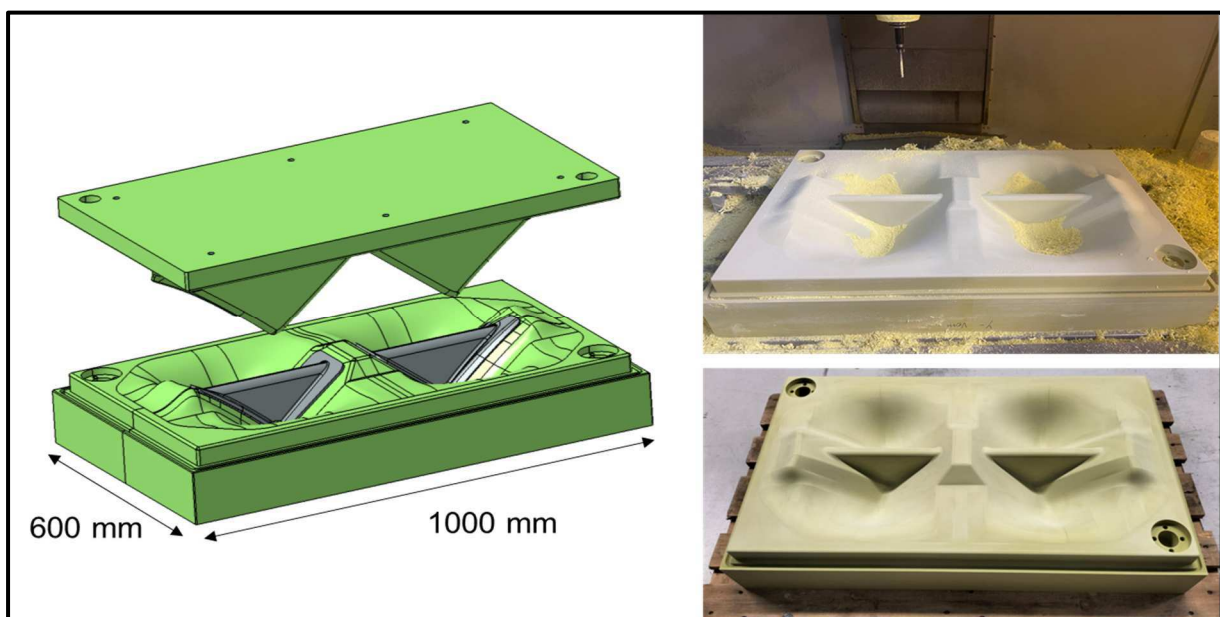


Abbildung 4.19: 3D-CAD-Detailkonstruktion sowie Herstellung und Montage Werkzeug Winkel (2-fach)) / 22.11.24 LSE.

Da die Werkzeuge zum Thermopressen als auch zum Vakuum-Tiefziehen verwendet werden, sind bei den unteren Werkzeughälften von der Unterseite Luftkanäle angebracht. Damit beim Umformen die Luft zwischen Kunststoff und Werkzeugoberfläche abgesaugt werden kann, werden in den Bereichen der dargestellten Bohrungen (D8) auf der Werkzeugkontaktseite mit einem 1mm Fräser händisch Vakuumlöcher gebohrt.

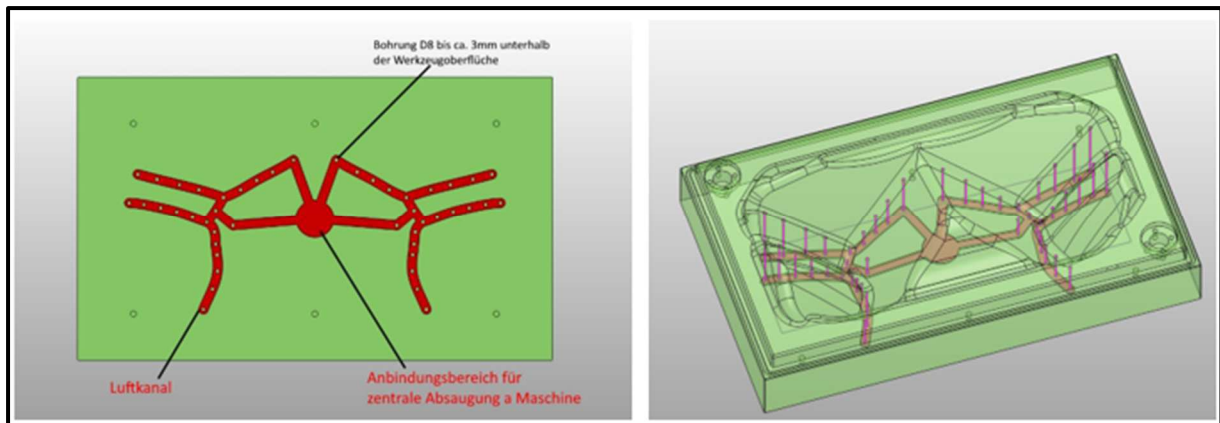


Abbildung 4.20: Vakuumkanäle / 22.11.24 Lakowa intern.

Um die geformten bzw. gepressten Rohlinge der Schalen/Rippen anschließend noch befräsen zu können, wurden die folgend dargestellten Fräsaufnahmen durch die Lakowa GmbH konstruiert und hergestellt. Die Formteile werden für den Beschnitt mittels Vakuumtechnik auf der Fräsaufnahme gehalten.

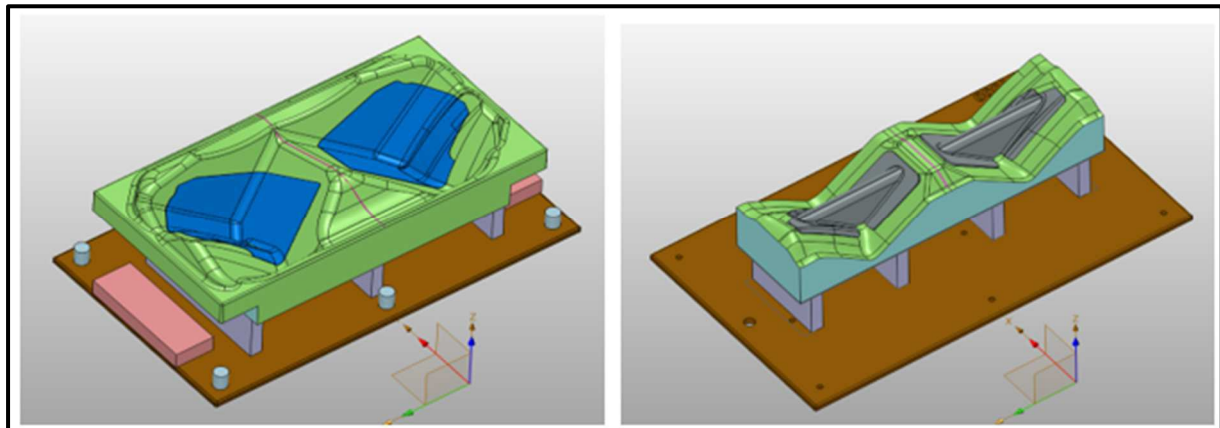


Abbildung 4.21: 3D-Daten von Fräsaufnahmen für Schale & Rippe (rechte und linke Seite)/ 17.12.24 Lakowa intern.

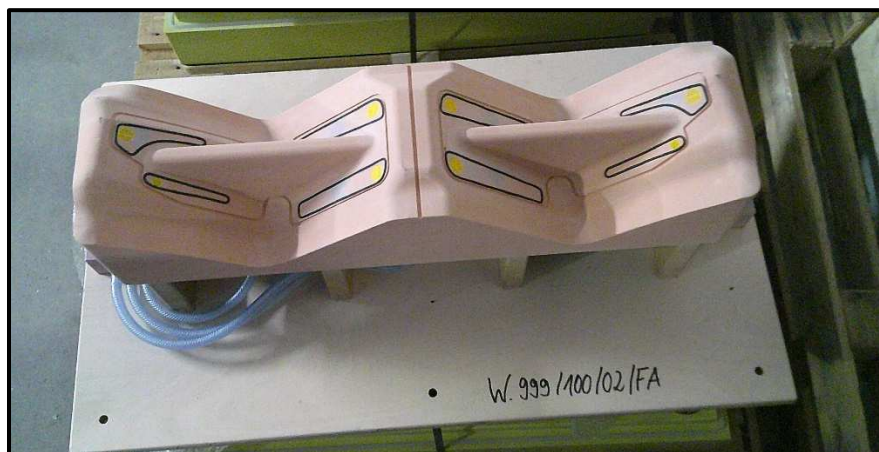


Abbildung 4.22: Hergestellte Fräsaufnahmen für Rippe (rechte und linke Seite)/ 19.12.24 Lakowa intern.

Alle Werkzeuge wurden mit den Projektpartnern erfolgreich bemustert und standen für die Prototypenherstellung auf der GEISS-Thermopressmaschine bei der Lakowa GmbH bereit.

Materialaufbau (AP4.2)

Durch die vorangegangenen Untersuchungen und Erstellung der Materialkarten der zu verwendenden Kunststoffmaterialien (ABS / ABS-GF) in Kooperation mit dem Fraunhofer-IWU konnte auf Grundlage einer Festigkeits-/ Steifigkeitssimulation der Firma LSE ein gezielter Materialaufbau gewählt werden. Siehe Anhang F: „Festigkeits-Drup_Analyse_CaraSave_LSE“

Hierzu wurde ein vereinfachten Ersatzlastfalls von 1.000 N angenommen und durchgeführt. Die dazugehörigen Randbedingungen sind in folgender Abbildung zu finden. Bei der Simulation wurde eine kinematische Drapiersimulation der Endlosglasfasern des ABS+GF-Laminats während des Umformens beim Tiefziehpressprozess durchgeführt.

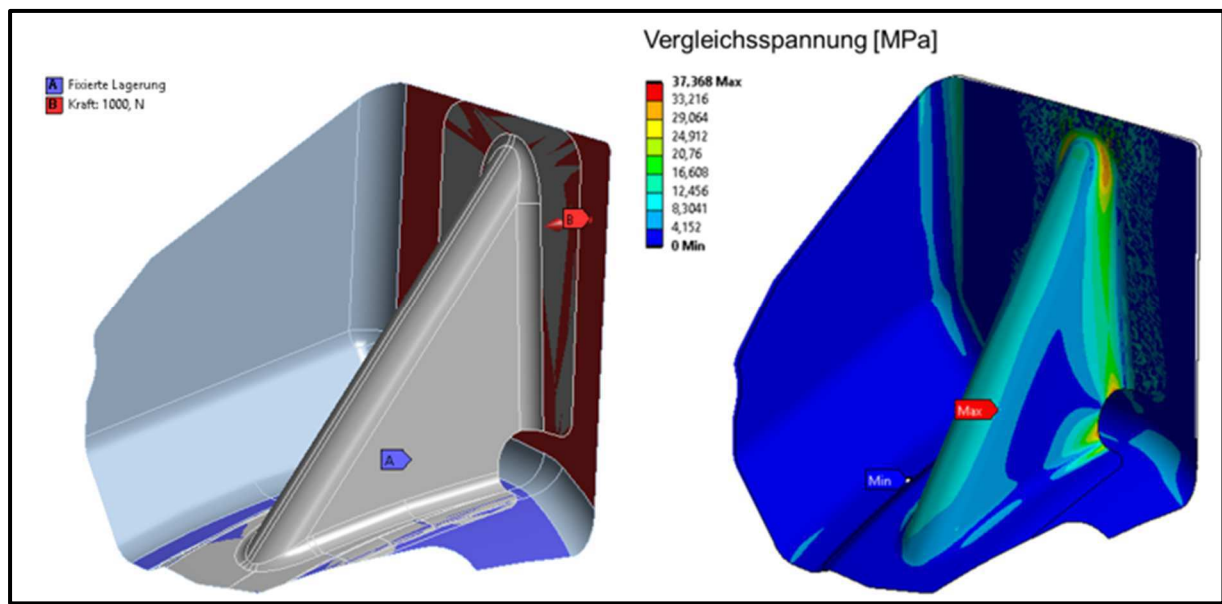


Abbildung 4.23: Randbedingungen und Spannungsbewertung für zweiteiliges Crashelement / 02.12.24 aus Festigkeits-Drup_Analyse_CaraSave_LSE.

Die Firma Steinbeis-Automation in Leichtbauprozessen (ALP) wurde beauftragt, das für uns gewünschte Material im folgend aufgeführten Materialaufbau (ohne 2mm Trägerschicht) für Thermopressversuche herzustellen. Hierbei sollen ABS-GF Organobleche im Zuschnitt 1000mm x 600mm hergestellt werden. Ziel ist es, aus diesen Platten, die erforderlichen Zuschnitte für die benötigte Bauteilgeometrie zu ermitteln. Anschließend sollen die Verstärkungszuschnitte auf dem 2,0mm ABS-Trägermaterial (weiß) ausgerichtet und durch Schweißpunkte fixiert werden. Die 0,5mm starke Deckschicht (schwarz) soll ein nach außen drücken der Fasern verhindern und ein besseres Gleiten der Glasfasern im Außenbereich ermöglichen. Außerdem kann durch diese dünne Schicht die Materialausdünnung und die Strapazierfähigkeit der Materialoberfläche nach dem Umformen besser sichtbar gemacht werden. Die Anzahl der Verstärkungslagen war Vorgabe von Capron und erfolgte aus der Simulationsberechnung. Bezugnehmend zu AP 4.2 („Entwicklung der Fertigungshilfsmittel für Crashelemente und Laminatplan“) wird der Lagenaufbau des Bauteilmaterials von insgesamt 15 Lagen wie folgend beschrieben:

D = 0,5mm ABS-Decklage in schwarz

X° = 0,4mm ABS-GF Tape ausgerichtet

T = 2,0mm ABS-Trägermaterial in weiß

Lagenaufbau:

D, 0°, +45°, 90°, -45°, 0°, +45°, 90°, -45°, 0°, +45°, 90°, -45°, 0°, **T**

0° entspricht Richtung der Hauptbelastung

Der Lagenaufbau des Verbundmaterials wird im folgenden Bild visuell dargestellt und zeigt die jeweilige Richtung der unidirektionalen Glasfasern an.

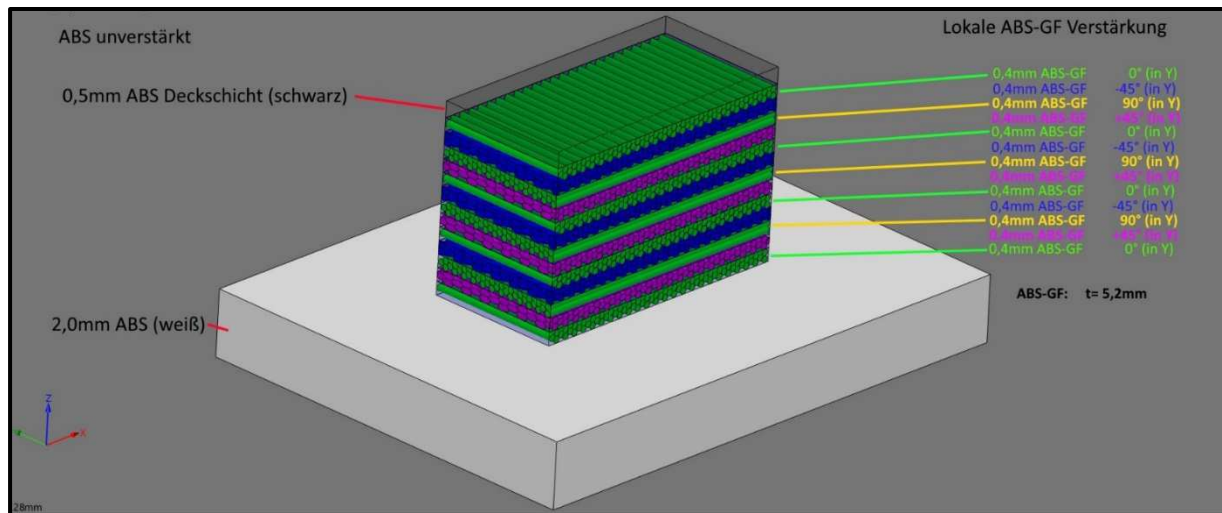


Abbildung 4.24: Materialaufbau / 02.12.24 Konversation zwischen Lakowa & Fa. Steinbeis-Automation.

Da das endlosglasfaserverstärkte ABS eine sehr schlechte Drapierfähigkeit hat und anfällig auf Faltenbildung ist, hat die Firma LSE mittels Drapieranalyse die Zuschnittgeometrie für die beiden Einzelteile ermittelt.

In folgender Abbildung sind für eine 0°-Lage (in x-Achse orientiert) für die Bauteile Schale und Rippe der kritische Drapierwinkel nach erfolgter Umformsimulation sowie die Zuschnittkontur (rote Kontur um das Bauteil) dargestellt. In den Bereichen mit hohem Drapierwinkel (rote Einfärbung im Falschfarbenbild > 30-35°) ist bei der Bauteilherstellung mit Faltenbildung und Wandstärkenvergrößerung zu rechnen. Für die Schale wurden verschiedene Varianten berechnet und einige Lagen mit zu hohem Drapierwinkel (> 40°) optimiert. Bereiche, die nicht ohne Faltenbildung herstellbar sind, wurden eingeschnitten. Durch den gezielten Beschnitt der Einzelschichten des Lagenaufbaus ist eine Herstellung der Bauteile möglich.

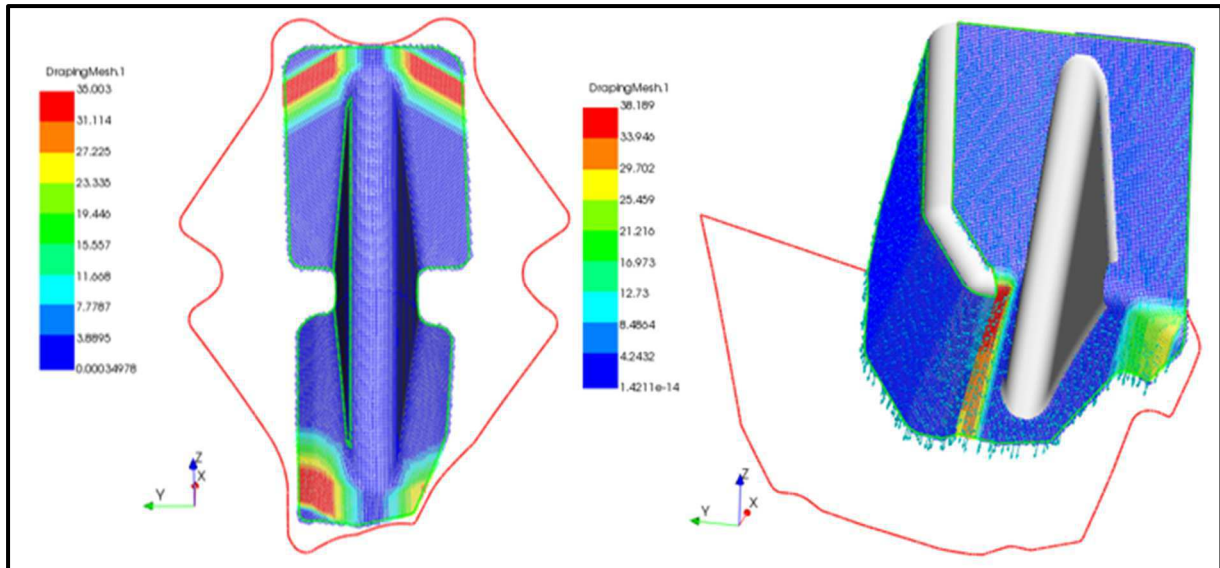


Abbildung 4.25: Darstellung kritischer Drapierwinkel und abgeleitete Zuschnittkontur für das Bauteil Verstärkungswinkel (links) und Ecke (rechts)fixiert / 02.12.24 aus Festigkeits-Drap_Analyse_CaraSave_LSE.

Mit einer umlaufenden Zugabe von 20mm an der Zuschnittkontur konnte ein optimales Umformergebnis erreicht werden. Der manuelle Beschnitt der Organobleche wurde mit Hilfe von vorgefertigten Schablonen realisiert. Einzelheiten zur Drapiersimulation sind unter Anhang F: „Festigkeits-Drap_Analyse_CaraSave_LSE“ zu finden.



Abbildung 4.26: Schablone (Rippe) / 08.01.25 Lakowa intern.

Das Verstärkungsmaterial muss vor dem Umformprozess auf dem Trägermaterial mit Hilfe der Schablone ausgerichtet und punktuell über Ultraschall-Schweißpunkte fixiert werden. Bei dem Bauteil Schale gab es zwei verschiedene Zuschnittvarianten. Die erste Variante wurde wie im folgenden rechten Bild dargestellt im Bereich einer möglichen Faltenbildung eingeschnitten. Dieser Bereich war nach dem Umformvorgang geschlossen und die offenen Kanten vollständig miteinander verschmolzen. Die zweite Variante wurde ohne einschneiden des Zuschnittes umgeformt und zeigte nach angepassten Prozessparametern ein qualitativ gleiches Ergebnis.



Abbildung 4.27: Zuschnitte mit Ultraschallschweißpunkten fixiert/ 08.01.25 Lakowa intern.

Fertigung des Verstärkungsteils (AP4.4/ AP4.5/ AP4.6/ AP6.3)

Bezugnehmend zu AP 4.4 („Herstellung. Montage und Inbetriebnahme der Werkzeuge“) wurden die beiden Einzelteile des Verstärkungsteils in der GEISS-Thermoformmaschine T10/2 bei der Lakowa GmbH thermogeformt. Im Vorfeld wurden die Zuschnitte des Verstärkungsmaterials und das Trägermaterial im Temperofen getrocknet. Das entsprechende 2-teilige Umformwerkzeuge wurde in der Thermoformmaschine aufgerüstet und auf eine Temperatur von ca. 80°C vortemperiert. Nach Einstellung aller relevanten Maschinenparameter wurden mehrere Versuchsreihen mit jeweils unterschiedlichen Materialstärken absolviert. Siehe Anhang G: „Tabelle_Thermopressen Prototyp ABS-GF Schale_Rippe“



Abbildung 4.28: GEISS-Thermopressanlage T10-2/ 17.01.25 Lakowa intern.

Durch Anpassung und Optimierung der Maschinenparameter konnten immer bessere Umformergebnisse erzielt werden. Folgende Optimierungen wurden dabei bezugnehmend zu AP4.5 („Prozessoptimierung und Herstellung demonstratorischer Crashelemente“) systematisch vorgenommen:

- Anpassung der Heizbilder von Ober- & Unterheizung

- Verkürzung und Überlagerung der Verfahrswege von Maschinentisch, Spannrahmen und Werkzeugstempel
- Anpassung der Heiz- & Kühltemperaturen
- Anpassung der Werkzeugpositionen im geschlossenen Zustand (Kavität) und des Schließdruckes

Für beide Einzelteile (Schale und Rippe) konnten gute Umformergebnisse erzielt werden. Die Faltenbildung konnte minimiert werden, die Fasern waren nach dem Umformprozess in Matrix eingebettet und wurden nicht nach außen gedrückt. Im Bereich der Klebeflächen sind die Bauteiloberflächen gut umgeformt und zeigen nur leichte Unebenheiten. Diese können aber aufgrund der Dickschichtverklebung vernachlässigt werden. Die beiden folgenden Bilder zeigen die umgeformten und befrästen Einzelteile, welche zum Vergleich auf einen Zuschnitt aus umgeformtem Trägermaterial (ABS) gelegt wurden. Hierbei ist sehr gut zu sehen, wie sich das Material in den Randbereichen verstreckt und wie groß der Umlaufende „Abfall“-Bereich ist, damit die Verstärkungsfasern auch nach dem Fräsbeschnitt auf dem gesamten Bauteil abgebildet sind. Siehe Vergleich zu Bild „Zuschnitte mit Ultraschallschweißpunkten fixiert / 08.01.25 Lakowa intern“ aus Punkt 1.6.

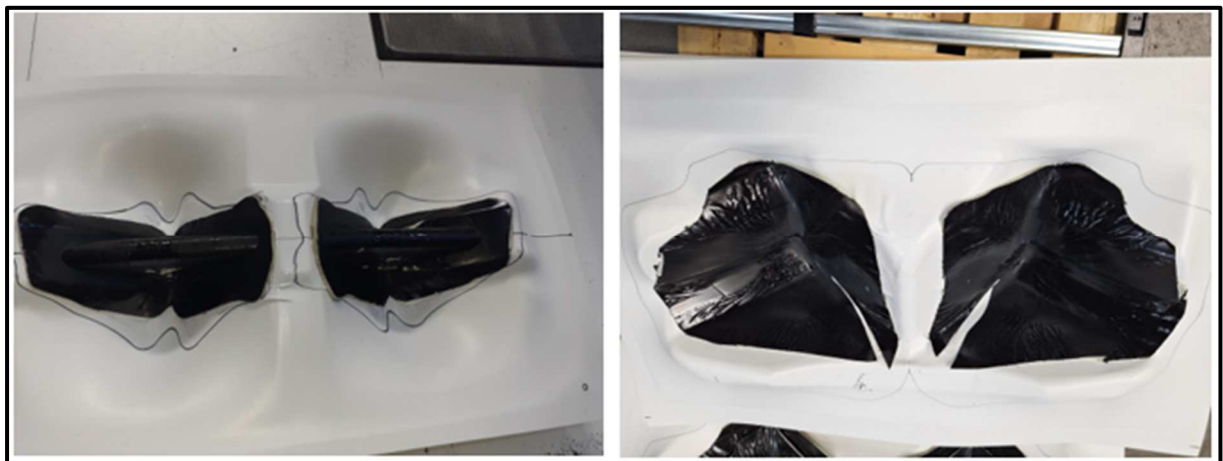


Abbildung 4.29: Zuschnitt von Rippe & Schale umgeformt/ 17.01.25 Lakowa intern.

Das stark abrasive Verhalten des glasfaserverstärkten Materials erforderte für die Fräswerkzeuge höhere Anforderungen. Eine Verringerung des Vorschubes, eine höhere Güteklasse der Werkzeuge und eine Anpassung der Frästiefe waren die Folge. Die bei der Lakowa GmbH konstruierten und hergestellten Fräsaufnahmen konnten jeweils bei Schale und Rippe für die linke und rechte Bauteilseite genutzt werden. Die Rohlinge wurden durch Vakuumtechnik auf den Fräsaufnahmen gehalten und befräst.

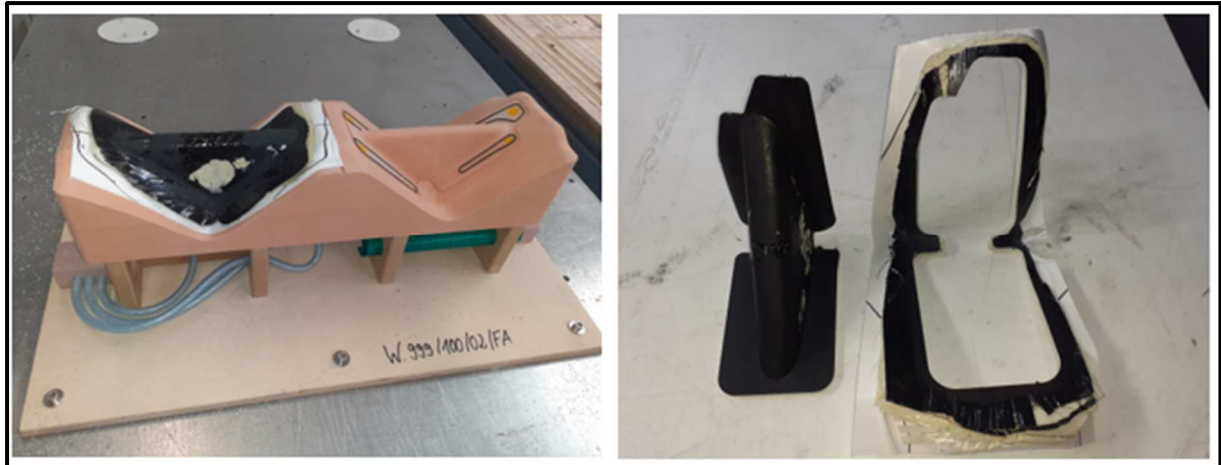


Abbildung 4.30: Fräsaufnahme für Beschnitt Rippe/ 17.01.25 Lakowa intern.

Nach dem Fräsbeschnitt wurde im Bereich der Schnittkanten der Lagenaufbau und die sehr gut miteinander verschmolzenen Materialschichten sichtbar. Die im Bereich der steilen Wandung teils abgeriebene schwarze Deckschicht deutet auf die hohen Reibungskräfte zwischen Bauteil und Werkzeugkontaktseite hin. Ein nach außen dringen der Glasfasern konnte jedoch erfolgreich vermieden werden, so dass alle Verstärkungsschichten intakt geblieben sind.



Abbildung 4.31: Rippe nach Beschnitt/ 17.01.25 Lakowa intern.

Rippe und Schale von linker bzw. rechter Seite wurden durch einen hochfesten MMA-Klebstoff zusammengefügt. Die folgenden beiden Bilder zeigen die fertigen Verstärkungsteile, welche bezugnehmend auf AP 4.6 & A.P 6.3 („Herstellung skalierter Crashelemente für Komponententest“) an die Capron GmbH gesendet wurden.



Abbildung 4.32: Prototyp für Dachhaube rechts; links / 27.01.25 Lakowa intern.

Mit umfangreichen Thermopressversuchen konnten geeignete Prozessparameter gefunden werden, wodurch gelungene Formteile mit Serientauglichkeit hergestellt werden konnten. Durch die erfolgreiche Herstellung der Prototypen konnten die geplanten Crashversuche durchgeführt werden und zeigten ein positives Ergebnis. Die Funktion dieses Verstärkungsteiles, eine geeignete Materialauswahl sowie ein ausreichender Materialaufbau wurden durch den Crashtest bestätigt. Weitere Anwendungen solcher oder ähnlicher Verstärkungselemente könnten mit den aktuell zur Verfügung stehenden Anlagen hergestellt werden und lassen im Bereich der Automobil- und Schienenindustrie ein starkes Marktpotential vermuten.

AP 5 Entwicklung der Fügetechnologie und Systemintegration der Crashmodule

AP 5.1 Entwicklung der Fügetechnologie für die Validierung von Crashprofilen mit Knotenelementen

Die Verklebung stellt dabei eine kritische Fügeverbindung dar. Über diese Schnittstelle sollen im Crashlastfall die entsprechenden Kräfte in den Winkel weitergeleitet werden. Die enormen Spannungen stellen dabei enorme Ansprüche an diese Verbindung. Aus diesem Grund musste neben der Klebstoffauswahl auch ein besonderes Augenmerk auf die Klebevorbereitung gelegt werden. Bevor die Klebeverbindung aufgetragen wird, muss daher unbedingt eine Fett- und Schmutzfreie Oberfläche garantiert werden. Aufgrund der Bauart der Verstärkungswinkel und deren Einsatzort konnten mögliche Fügeverbindungen schnell identifiziert und ausgewählt werden. Die Bauteile besitzen eine konstruktive Gestaltung, die sich der Form der benachbarten Teile anpasst. Sie müssen auf beiden Seiten, jeweils an zwei Stellen gefügt werden. Dabei ist die Schnittstelle zum Fahrerhaus (Chassis) als kritischere Verbindung anzunehmen, weil an dieser Stelle die Kräfte aus der B-Säule weitergeleitet werden müssen. Da die Verbindung nicht lösbar ausgeführt sein muss und eine Manipulation des Chassis an

dieser Stelle unzulässig ist, wurde sich an dieser Stelle für eine Klebverbindung entschieden. Bei der Verbindung der Winkel zum dahinter liegenden T-Haubenschrank wurde eine Fügung mittels Schrauben gewählt. Da es sich bei der Klebverbindung, wie bereits erwähnt, um die kritischere der beiden Verbindungen handelt, wird in diesem Abschnitt besonders auf diese eingegangen. Die Herausforderung dabei bestand in der Auswahl eines geeigneten Klebstoffs. Aus diesem Grund wurde eine Anforderungsliste für den Klebstoff erstellt. Diese beinhaltet die folgenden Informationen: Zu verbindende Werkstoffe, Größe des Klebspaltes und der Klebfläche, Belastung der Bauteile, Einsatzbedingungen. Des Weiteren wurden die Beanspruchungen identifiziert und die Produktionsbedingungen berücksichtigt. Es wurden die beeinflussenden Faktoren wie Einsatztemperaturen und Materialverträglichkeit betrachtet und eine Abwägung hinsichtlich Arbeits- und Umweltschutz durchgeführt. Es erfolgte ebenfalls eine Vorauswahl durch die Anforderungen an die Oberflächenvorbehandlung. Nachdem die Anforderungsliste erstellt war, wurden potenziell in Frage kommende Klebstoffe gesucht. Im ersten Prozessschritt wurde sich für das PowerCure Klebsystem 668 entschieden. Es handelt sich dabei um ein zwei Komponenten System, welches mithilfe einer numerischen Vorbetrachtung überprüft werden sollte. In der statischen Simulation (vergleiche Abschnitt 1.7) wurde eine Kraft von 39.294 N ermittelt, was mit der genutzten Klebfläche (siehe Abbildung 5.1) von 24.178 mm² einer Scherspannung von 1,6 MPa entspricht. Mit der Angabe aus dem erweiterten Datenblatt des Klebstoffs von der Firma Sika zur Zugscherfestigkeit von 5,8 MPa ergibt einen Sicherheitsfaktor von 3,6.

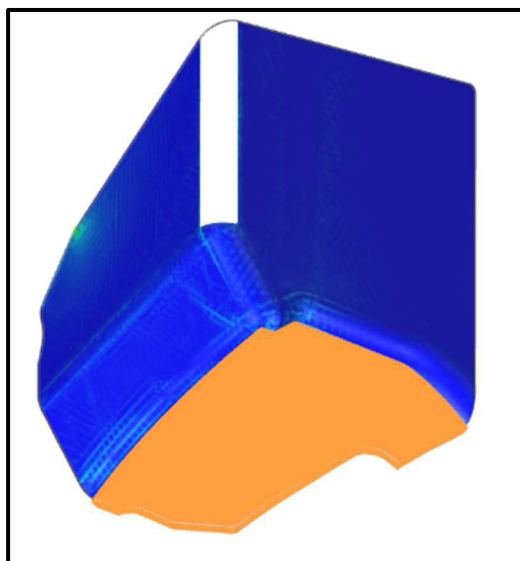


Abbildung 5.1: In orange eingefärbt die überprüfte Klebfläche in der statischen Simulation.

Für die Verklebung des Verstärkungswinkels wurde der Klebstoff Sikaflex 668 gewählt, da dieser für hoch-dynamische Belastung eine gute Dehnrage von ca. 366% auch bei Alterung und mit 5,8 MPa Festigkeit eine ausreichende Festigkeit nach Alterung besitzt. Die Materialdaten wurden aus dem Materialdatenblatt des Klebstoffs bezogen (siehe Abbildung 5.2)

After ageing cycle according to DIN ISO 21194:2020-12 (former DIN 54457) 28d 23 °C/50 % r.h. + 7d water immersion + 1d at 80 °C + 7d cataplasma (70 °C/100 % r.h.)					
Conditions	Standard average values			Characteristic value R _c (k _m = 0.95)	
	Tensile Strength [σ _{max}]	Elongation [ε _{at σmax}]	E-Modulus [E 0.5-5 %]	Tensile Strength [σ _{max}]	Elongation [ε _{at σmax}]
-35 °C	17.5 MPa*	474 %*	7.2 MPa	14.2 MPa*	378 %*
23 °C / 50 % r.h.	8.3 MPa	471 %	3.2 MPa	6.2 MPa	365 %
70 °C	5.0 MPa	291 %	3.0 MPa	4.3 MPa	251 %

2.3.2 Sikaflex®-668 PowerCure / Sikaflex®-668 + SikaBooster® P-50	
Tensile lap shear strength Quasi static test DIN EN 17460:2022-10	
6.8 MPa Standard average Tensile lap shear strength of Sikaflex®-668 PowerCure / Sikaflex®-668 + SikaBooster® P-50	5.8 MPa Characteristic value R_c Tensile lap shear strength of Sikaflex®-668 PowerCure / Sikaflex®-668 + SikaBooster® P-50 After aging cycle acc. DIN ISO 21194

Abbildung 5.2: Ausschnitt aus dem Materialdatenblatt zum Klebstoff Sikaflex 668.

Zielwert für die minimale Festigkeit des Klebstoffs waren ca. 4,5 MPa, da bei diesem Wert sich voraussichtlich der Lack von der Karosserie lösen würde und so nicht der Klebstoff als erstes versagen würde. Wie in den statischen Simulationen zu sehen war, konnte eine max. Spannung in der kritischen Klebfläche von 1,6 MPa gemessen werden und damit eine deutlich geringere Spannung als die von Sika angegebene Festigkeit. Da eine Verklebung nicht ohne weiteres auf dem Lack des Chassis realisierbar ist, ist der dazugehörige Primer 507 in jedem Fall mit anzuwenden.

AP 5.2 Anpassung des Innenraumkonzeptes zur Integration des Crashmoduls

Der Verstärkungswinkel wird an einer Stelle im Fahrzeug eingebaut, an dem er nur wenige Schnittstellen zu benachbarten Baugruppen besitzt. Er wurde darüber hinaus so konstruiert das er sich an die Geometrie des Fahrzeugs und dem bestehenden T-Hauben-Schrank anlehnt. Er wurde darüber hinaus sehr platzsparend konstruiert, sodass er sich unter der T-Haube kollisionsfrei einbauen lässt. Dennoch musste das Innenraumkonzept angepasst werden. Für das neue Sicherheitskonzept muss der T-Hauben-Schrank ebenfalls die Belastungen im Crashfall ertragen, er ist für die Weitergabe der Kräfte in den Wohnmobilaufbau zuständig. Aus diesem Grund musste die bestehende Konstruktion angepasst und verstärkt werden. Dabei wurde zwei prinzipielle Vorgehensweisen verfolgt. Zum einen wurde der prinzipielle Aufbau so verändert, dass die Kräfte nicht ausschließlich über die Holzschrauben übertragen werden, sondern zusätzlich über einen Materialanstoß in Krafrichtung abgesichert sind (siehe Abbildung 5.3 (B)). Zum anderen wurde an den kritischen Bauteilen eine Materialaufdickung vorgenommen. Größere Materialstärken sollen die flächenbezogenen Spannungen in den Bauteilen reduzieren und somit dem Versagen des Schrank entgegenwirken. Die einzeln verstärkten Komponenten sind in der Abbildung 5.3 dargestellt.

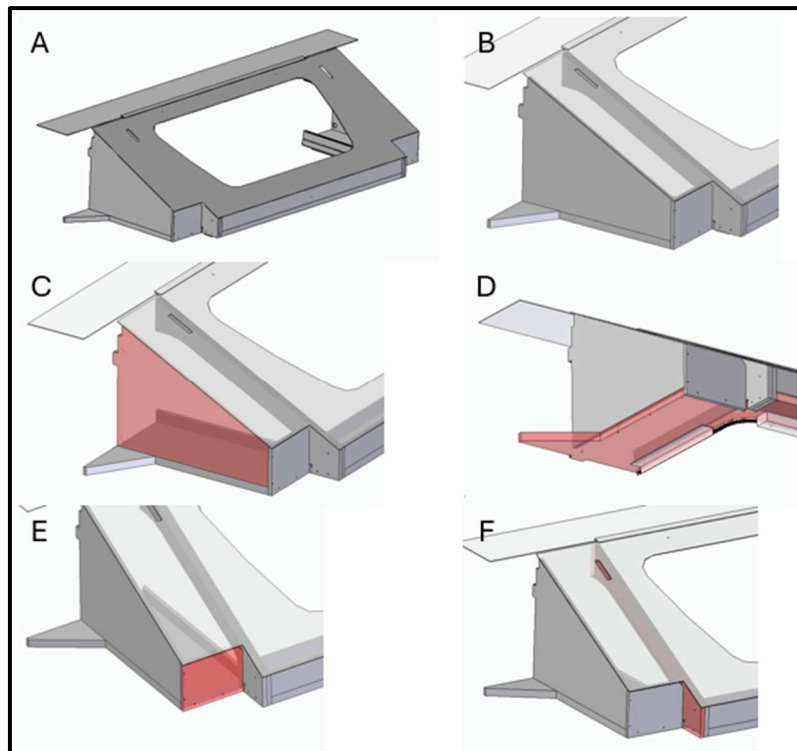


Abbildung 5.3: Das Teilbild A) zeigt den vollständig umkonstruierten Schrank. Das Teilbild B) zeigt das Aufbauprinzip mit Materialstoß entlang der Fahrtrichtung. Die Teilbilder C), D), E) und F) zeigen die Einzelkomponenten des Schrankes (rot hervorgehoben) die mit dickeren Materialien verstärkt wurden.

AP 5.3 Erarbeitung eines Montagekonzeptes für eine wirtschaftliche Fahrzeugintegration

Für die Erarbeitung eines Montagekonzeptes wurden die Teile schon von Beginn an unter diesem Kriterium bewertet und so konstruiert, dass sie eine einfache und somit wirtschaftliche Montage ermöglichen. Die Montage der Verstärkungswinkel mit dem Chassis sollte demnach durch eine Verklebung realisiert werden. Dabei sind besonders die Vorgaben an die Klebvorbereitung zu beachten. Für die Montage der Winkel mit dem T-Hauben-Schrank wurde eine Verschraubung gewählt. Um einen idealen Verbau-Platz an der Produktionslinie zu finden, wurden die Verstärkungswinkel über ein Rapid-Prototyping-Verfahren hergestellt. Die FDM-Werkstücke entsprachen dabei den ersten Konstruktionsvarianten der Verstärkungswinkel. Der Verbau Prozess konnte somit schon vorab auf seine Durchführbarkeit überprüft werden. Während des Probeverbaus wurden dabei sogar erste Kollisionen frühzeitig erkannt und das CAD-Modell daraufhin überarbeitet.

AP 5.4 Konstruktion und Fertigung von Montagevorrichtungen

Es wurden keine zusätzlichen Montagevorrichtungen konstruiert oder gefertigt.

AP 6 Herstellung von Demonstratoren auf Basis eines ausgewählten Fahrzeugs

AP 6.1 Erstellung der Arbeitspläne; Beschaffung der Materialien und ausgewählten Fahrwerkskomponenten

Der entwickelte Verstärkungswinkel weist eine geringe Integrationstiefe im Fahrzeug auf. Das bedeutet er besitzt lediglich zwei direkte Schnittstellen mit anderen Reisemobilkomponenten und erfordert keine komplexe Anpassung anderer Baugruppen. Aus diesem Grund muss die Arbeitsplanung, im Vergleich zu einem bestehenden Grundriss, nicht weitgreifend angepasst werden. Da die Arbeitsplanung und die Arbeitsabläufe ein Betriebsgeheimnis darstellen und nicht Teil des Forschungsprojektes sind, soll im Weiteren nur auf die Unterschiede, die aus dem Projekt hervorgehen, eingegangen werden.

Eine der zwei benachbarten Baugruppen ist der T-Hauben-Schrank, welcher ebenfalls für die Crashesicherheit angepasst werden musste. Dabei wurde die Zusammenbau-Abfolge leicht verändert: Die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Bauteile des T-Hauben-Schranks werden hier nun in chronologischer Reihenfolge, gemäß des Zusammenbaus, nacheinander aufgezählt. Der Zusammenbau beginnt mit dem T-Hauben-Schrank Boden (vgl. Abbildung 5.3 (D)) als Grundplatte, gefolgt von den in Abbildung 5.3 (C) zu sehenden Oberschrank Rückwänden (jeweils li. und re. Teil). Die vorher zusammengebauten Oberschrank-Rückwände (vgl. Abbildung 5.3 (F)) werden danach mit der Bodenplatte verschraubt. Es folgen die Oberschrank-Rückwände aus Abbildung 5.3 (E) jeweils auf der rechten und linken Seite. Alle weiteren Komponenten werden, wie bei dem aktuell eingesetzte T-Hauben-Schrank, montiert. Die zweite Schnittstelle des Verstärkungswinkels ist jene mit dem Chassis. Für die Verklebung des Verstärkungswinkels mit diesem, musste ein neuer Arbeitsplan entwickelt werden. Die Verklebung stellt zugleich den Beginn der Endmontage des Winkels dar. Dabei muss als erstes der bereits mit dem Steher verbundene Schrank mit Hilfe von Unterlegklötzern in eine parallele Position zum Fahrzeugdach gebracht werden. Dieser Arbeitsschritt ist notwendig, um bei der Montage des Verstärkungswinkels eine vollflächige Auflage zum T-Hauben-Schrank garantieren zu können. Es ist davon auszugehen dass eine ausreichende Verstärkung nur durch eine optimale und gewissenhafte Montage erreicht werden kann. Aus diesem Grund muss auch die Verklebung unter strengen Vorgaben erfolgen und sollte zumindest von einer geschulten Fachkraft durchgeführt werden. Dies umfasst sowohl die Klebvorbereitung, die aus der Reinigung der Klebeflächen und dem Primern besteht und das Verkleben selbst. Der Aufbau des Prototyps wurde zusammen mit dem internen Klebefachingenieur analysiert, geplant und durchgeführt. Für die Erstellung neuer Arbeitspläne oder Arbeitsanweisungen wurden Fotos während des Aufbaus gemacht und ist am Beispiel der Klebvorbereitung in Abbildung 6.1 zu sehen. Dabei wurde der Primer, der für einen besseren Haftgrund sorgt, im Bereich der Verklebung großflächig aufgetragen. Nach der vorgeschriebenen Einwirkzeit kann der Verstärkungswinkel aufgeklebt werden. Dabei sollte die Klebseite möglichst parallel zum Dach des Chassis positioniert sein. Als Hilfe kann dabei der Winkel in der Ecke des T-Hauben-Schranks angelegt und nach unten aufgesetzt werden. Der Schrank bildet dabei eine Art Führung zum Aufsetzen des Winkels und gewährleistet gleichzeitig optimale

Kontaktstellen zwischen dem Verstärkungswinkel und dem T-Hauben-Schrank, zu dem das Bauteil zum Schluss noch verschraubt werden muss.



Abbildung 6.1 Zu sehen ist der Primer-Auftrag an der linken Fahrzeugseite (schwarz auf weißem Lack). Das Foto zeigt den Bereich und die zu primernde Fläche, wie sie beim Prototyp vorbereitet wurde.

AP 6.2 Herstellung von Crashprofilen für demonstratorische Crashmodule

Die Arbeitsumfänge dieses Arbeitspaketes wurden bereits im Abschnitt AP 3 beschrieben und dokumentiert

AP 6.3 Herstellung von Knotenelementen für demonstratorische Crashmodule

Die Arbeitsumfänge dieses Arbeitspaketes wurden bereits im Abschnitt AP 4 beschrieben und dokumentiert

AP 6.4 Herstellung von demonstratorischen Crashmodulen für Fahrzeugintegration

Die Herstellung von komplexen demonstratorischen Crashmodulen war aufgrund der vergleichsweise simplen konstruktiven Gestaltung der Verstärkungswinkel nicht notwendig. Wie schon mehrfach ausgeführt, wurde das Konzept der Sicherheitszelle für das teilintegrierte Reisemobil nicht weiterverfolgt. Aus diesem Grund mussten keine zusammengesetzten Module aus Profilen und Eckverbindern gefertigt werden.

Für ein integriertes Reisemobil wäre eine Herstellung von Crashmodulen durchaus vorstellbar, jedoch konnte das bereits vorgestellte Konzept nur bis zu einer rechnerischen Validierung entwickelt werden, weshalb dieses Arbeitspaket für diesen Anwendungsfall entfiel.

AP 6.5 Montage von 4 funktionsfähigen Demonstratorfahrzeugen

Wie bereits in den vorderen Abschnitten erwähnt, konnte die Entwicklung eines crashsicheren Reisemobils auf einem integrierten Grundriss nicht abgeschlossen werden. Ursprünglich sollten zwei der vier Demonstratorfahrzeuge auf solch einem

Grundriss aufgebaut werden. Da im Laufe des Projektes lediglich die Entwicklung eines validierten Konzeptes fertiggestellt werden konnte und aus zeitlichen Gründen nicht produziert wurde, wurden die zwei integrierten Fahrzeuge nicht aufgebaut. Darüber hinaus zeigte sich im Laufe des Projektes, dass ein zweites teilintegriertes Fahrzeug für einen anderen Test als den Crashtest nach ECE R137 keine maßgeblichen technischen und ökologischen Vorteile bringt. Aus diesem Grund wurde lediglich eins der anfänglich zwei geplanten Fahrzeuge aufgebaut. In den folgenden Abbildungen 6.2 sind vier exemplarische Bilder des Aufbaus gezeigt.



Abbildung 6.2: In der Abbildung sind vier exemplarische Bilder vom Aufbau des Demonstratorfahrzeugs gezeigt. Die Bilder oben links, oben rechts und unten links zeigen den montierten Zustand des Versteifungswinkels aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Im Bild unten rechts ist darüber hinaus gezeigt, wie das Fahrzeug zusätzlich für den Fahrzeugtest modifiziert werden musste, um die empfindliche Messtechnik im Crashversuch zu schützen.

AP 7 Validierung des Crashkonzeptes

AP 7.1 Crashtest an Demonstratorfahrzeugen für den kritischen Lastfall

Wie bereits in Abschnitt AP1 beschrieben wurde für das Forschungsprojekt CaraSave der Crashtest nach ECE R137 als kritischer Lastfall definiert. Dieses Unfallszenario

stellt besonders große Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit und eignet sich deshalb besonders gut, um ein neues Sicherheitssystem zu validieren. Der Test ist in der Regel für Kfz der N1 Fahrzeugklasse verpflichtend. Diese Fahrzeuge dürfen zum heutigen Stand eine Gesamtmasse von 3,5 Tonnen nicht übersteigen. Reisemobile bringen aufgrund ihrer Zweckbestimmung ein hohes Leergewicht mit. Sie bewegen sich damit stets im oberen Massebereich, knapp unter der Gewichtsgrenze und bringen bei einem Unfall eine hohe Aufprallenergie mit. Diese Energie muss im Crashfall absorbiert werden und die Insassen müssen den Aufprall überleben. Damit stellt der Frontalaufprall den kritischsten Lastfall dar und wurde deshalb in diesem Projekt zur Validierung genutzt.

Nachdem das Fahrzeug bei der Firma Capron aufgebaut wurde, konnte eine Spedition das Fahrzeug zum Prüfstand überführen. Die Vorbereitungen wie das Ablassen aller brennbaren und umweltschädlichen Flüssigkeiten, das Instrumentalisieren (anbringen der Hochgeschwindigkeitskamera und Sensoren) und lackieren des Fahrzeugs fand innerhalb einer Woche statt. Am Tag des Fahrzeugversuchs wurden alle notwendigen Einstellungen getätigt, die Crash-Dummys platziert und präpariert. Anschließend wurde das Versuchsfeld geräumt und der Versuch wurde durchgeführt. Nachdem alle Untersuchungen, die direkt nach dem Test erfolgen müssen, durchgeführt wurden, konnte das Fahrzeug besichtigt werden. In Abbildung 7.1 ist zunächst einmal eine Auswahl an Bildern, die vor dem Crash geschossen wurden, gezeigt. Darüber hinaus wurde das Fahrzeug gewogen, um für eventuelle Folgeuntersuchungen die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. In Abbildung 7.2 ist das Ergebnis der Gewichtsermittlung im Leerzustand zu sehen. In Abbildung 7.3 sind die Zusatzgewichte aufgelistet und in Abbildung 7.4 ist das finale Versuchsgewicht des Fahrzeugs zu sehen.

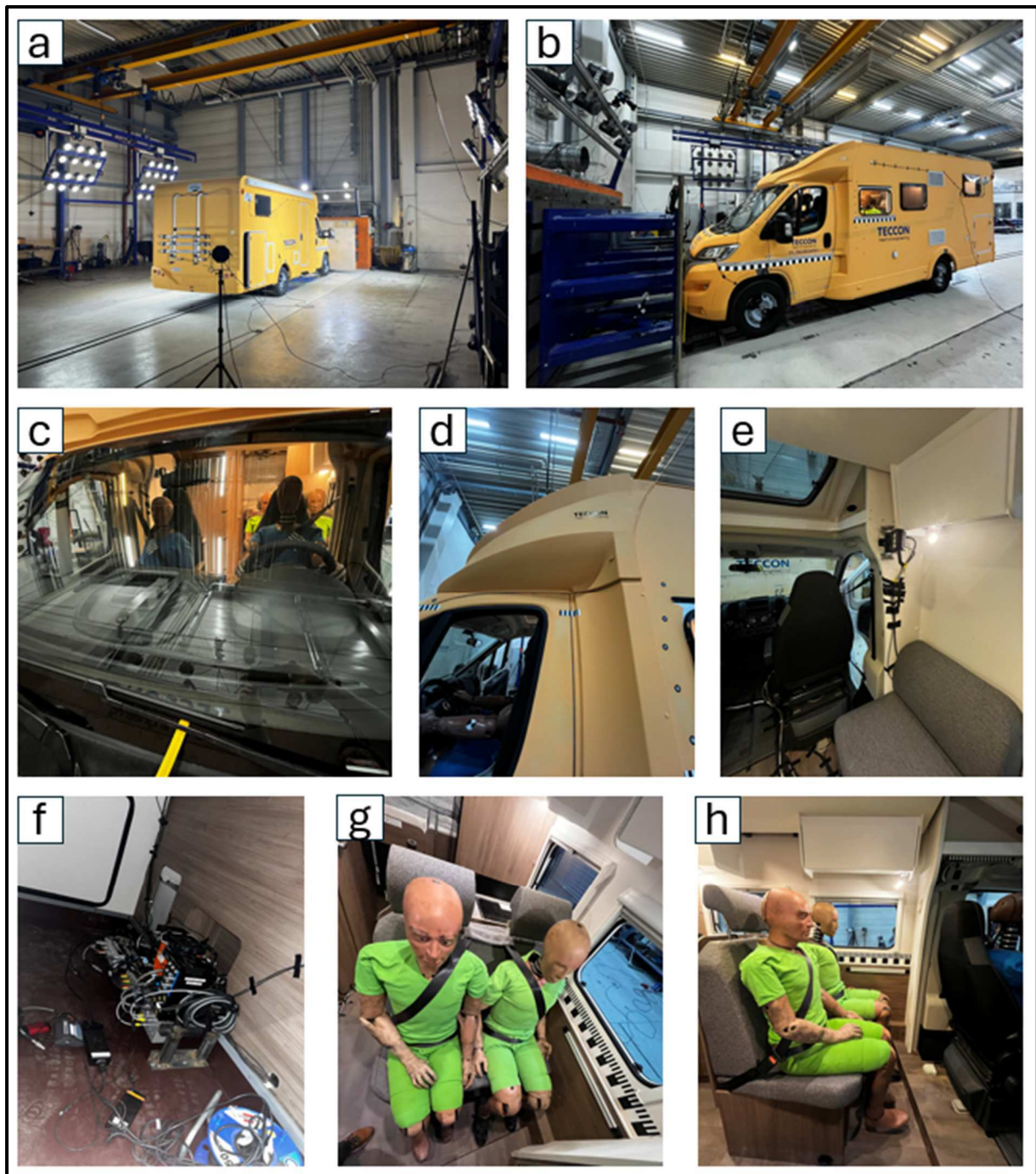


Abbildung 7.1: Es werden verschiedene Aufnahmen des Crashfahrzeugs, vor dem Fahrzeugversuch, gezeigt. In a) ist das Testfahrzeug von hinten rechts und in b) von vorne links fotografiert. Abbildung c) zeigt die Ansicht durch die Windschutzscheibe, in d) ist der Bereich der T-Haube von der Seite (links) gezeigt. In der Abbildung e) und f) ist die eingebaute Messtechnik zu sehen und g) und h) zeigen die positionierten Dummys der hinteren Sitzreihe.

Front left	753 kg
Front right	693 kg
Front axle	1446 kg
Rear left	653 kg
Rear right	659 kg
Rear axle	1312 kg
Total	2758 kg

Abbildung 7.2: Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Gewichtsermittlung am Fahrzeug, so wie von Capron bereitgestellt und durch die Spedition der Firma Teccon übergeben wurde. Es wurden die Wiegeergebnisse jedes Fahrzeugrades aufgenommen und in der jew. Achse zusammengefasst. In der letzten Spalte ist das Gesamtgewicht dargestellt.

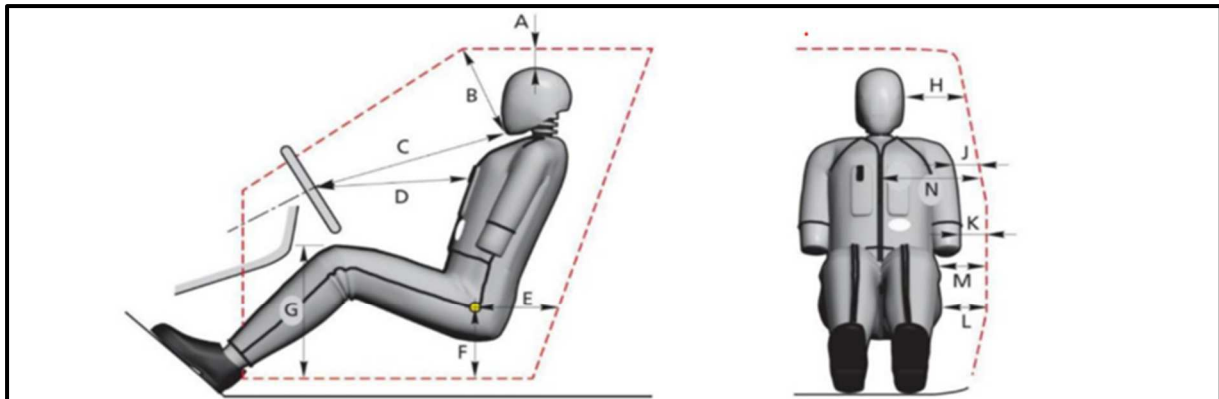
Dummy P1 – H3 50%	77kg
Dummy P3 – H3 5%	49kg
Dummy P4 - Ballast	77kg
Dummy P5 - Ballast	77kg
Onboard measuring apparatus	20kg
Misc.	N/A

Abbildung 7.3: In der Darstellung sind die einzelnen Zusatzgewichte, die für den Versuch in das Fahrzeug gebracht wurden, aufgeführt.

Front left	855,5kg
Front right	757,0kg
Front axle	1612,5kg
Rear left	777,5kg
Rear right	744,0kg
Rear axle	1521,5kg
Total	3134,0kg

Abbildung 7.4: Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Gewichtsermittlung, nachdem alle Messinstrumente, Kabel, Befestigungen, Dummies etc. im Fahrzeug eingebracht wurden. Es wurden die Wiegeergebnisse jedes Fahrzeugrades aufgenommen und in der jew. Achse zusammengefasst. In der letzten Spalte ist das Gesamtgewicht dargestellt.

In dem Crashversuch wurden insgesamt vier Dummies eingebracht. Bei der Belegung der Sitze wurde sich an die Vorgaben der ECE R 137 gehalten. Es wurden keine besonderen Ausnahmestände untersucht. Bei den Dummies der ersten Sitzreihe handelte es sich dabei um vollinstrumentalisierte Dummies. Auf dem Fahrersitz wurde ein Dummy vom Typ H III 50% und auf der Beifahrerseite Dummy vom Typ H III 5% verwendet. Die Dummies der hinteren Sitzreihe waren nicht instrumentalisiert. Alle Dummies wurden für den Test in eine normgerechte Sitzposition gebracht und angeschnallt. Die Positionierung der Dummies ist in Abbildung 7.5 zu sehen.



Fahrer:

#	Measurement	Value
1	Nose to dashboard	550 mm
2	Chest to dashboard (horizontal)	378 mm
3	Knee to knee (outer edge)	300 mm
4	COG of head to headrest (horizontal)	217 mm
5	Shortest distance between belly and dashboard (horizontal)	252 mm
6	Shortest distance between left tibia and dashboard	83 mm
7	Shortest distance between right tibia and dashboard	57 mm
8	Distance between center of ankles	330 mm
9	Nose to upper edge of windshield	580 mm
10	Chin to seatbelt	145 mm
11	Neck-disk to seatbelt	90 mm
12	Seat rail protrusion	31 mm

Beifahrer:

#	Measurement	Value
1	Nose to dashboard	652 mm
2	Chest to dashboard (horizontal)	580 mm
3	Knee to knee (outer edge)	230 mm
4	COG of head to headrest (horizontal)	175 mm
5	Shortest distance between belly and dashboard (horizontal)	490 mm
6	Shortest distance between left tibia and dashboard	35 mm
7	Shortest distance between right tibia and dashboard	54 mm
8	Distance between center of ankles	185 mm
9	Nose to upper edge of windshield	547 mm
10	Chin to seatbelt	130 mm
11	Neck-disk to seatbelt	120 mm
12	Seat rail protrusion	94 mm

Abbildung 7.5: Das Bild zeigt die schematische Sitzposition der Dummies auf Fahrer- und Beifahrerseite. Die dazugehörigen Werte sind in den Tabellen darunter abzulesen

AP 7.2 Auswertung der Ergebnisse und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen

Nach dem Crashversuch wurden Fotos von dem Testfahrzeug aufgenommen. Diese dienen unabhängig von den Messdaten zur allgemeinen quantitativen Beurteilung des Fahrzeugs. Die Bilder sind in Abbildung 7.6 zu sehen.

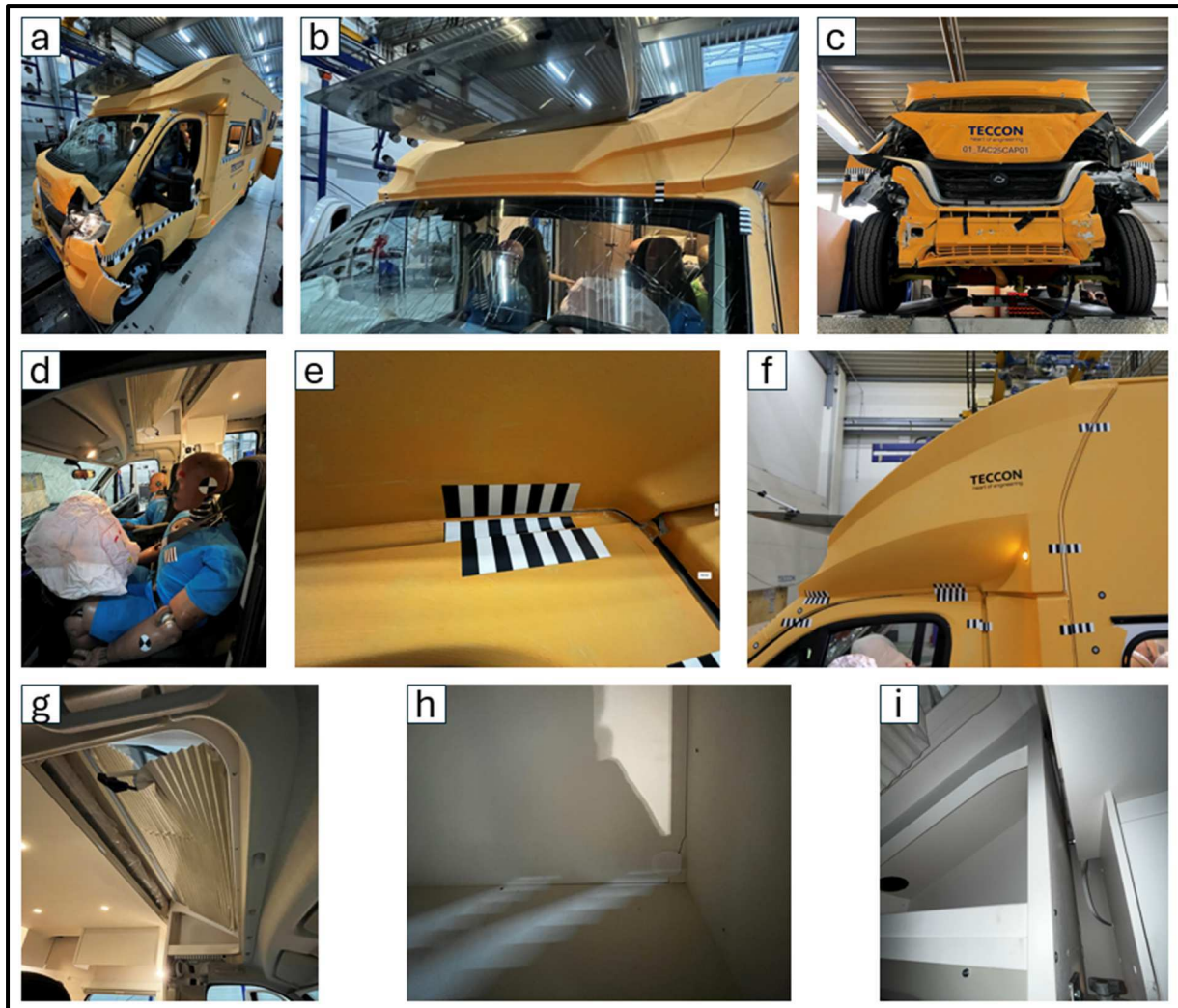


Abbildung 7.6: In der Abbildung a) ist das gecrashte Fahrzeug von vorne links abgebildet. Das Bild b) zeigt den Bereich der T-Haube von vorne und Bild c) den gesamten vorderen Bereich. In der Darstellung d) ist der Dummy auf dem Fahrersitz zu sehen. Die Bilder e) und f) zeigen den Bereich der T-Haube auf der linken Seite, es sind die nicht reversiblen Verformungen über die Zebrastricker zu erkennen. Die Aufnahmen g), h) und i) zeigen den Bereich der T-Haube vom Inneren des Fahrzeugs aus.

Aus der quantitativen Beurteilung des Fahrzeugs kann bereits die Wirksamkeit des Verstärkungswinkels erahnt werden. Neben den offensichtlichen Beschädigungen an dem Chassis im Bereich der Knautschzone und der Windschutzscheibe fallen keine weiteren unerwarteten Beschädigungen im vorderen Bereich des Fahrzeugs auf. Der Verstärkungswinkel hatte die Aufgabe über einen parallelen Lastpfad zur T-Haube, die Kräfte über den T-Hauben-Schrank in den Reisemobilaufbau weiterzuleiten, damit ein Einknicken des Chassis verhindert werden kann. Obwohl eine bleibende Verschiebung des Chassis beobachtet werden kann (vgl. Abbildung 7.6 e)), reicht diese offensichtlich nicht aus, um eine Intrusion in den Innenraum zu bewirken. In Abbildung 7.6 i) ist eindeutig zu erkennen, dass sich die Steher nicht in den Wohnraum gedreht haben (vgl. Abschnitt AP2). Somit kann die Integrität des Innenraums, auch nach dem Test, als gegeben bezeichnet werden. Für die hinteren Insassen bedeutet dies eine wesentlich höhere Überlebenschance.

Während des Tests wurden darüber hinaus Beschleunigungssignale ausgewertet und die Reaktion der Dummies auf den Crash mithilfe von Messmitteln erfasst. Diese Werte lassen eine qualitative Bewertung des Crashszenarios zu. In Abbildung 7.7 und 7.8 sind die Beschleunigungswerte an der Mitte der B-Säule während des Crashes in X, Y und Z Richtung dargestellt. In Abbildung 7.7 sind die Werte des Sensors auf der linken und in Abbildung 7.8 die Werte des Sensors auf der rechten Seite gezeigt.

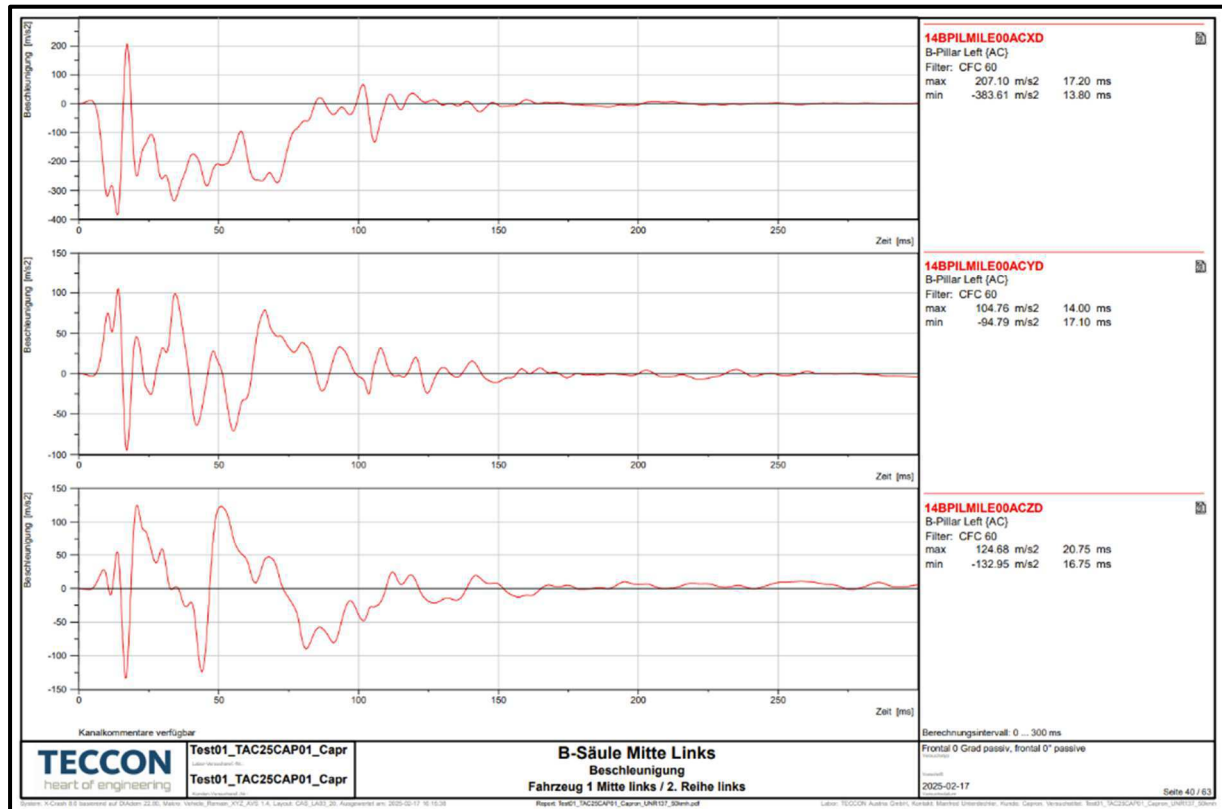


Abbildung 7.7: Beschleunigungswerte der linken B-Säule (mittlere Höhe) über den Crash. Die Abbildung zeigt drei verschiedene Diagramme welche jeweils die Beschleunigungen in X-, Y- und Z-Richtung darstellen.

Offensichtlich fallen die gemessenen Beschleunigungen auf der linken Seite des Fahrzeugs wesentlich höher aus. Obwohl die Ursache dieses Verhaltens nicht ermittelt werden konnte, scheint sich die Ursache auf die konstruktive Gestaltung der Knautschzone zurückführen zu lassen. Es wird angenommen das die höheren Beschleunigungen zu höheren Reaktionskräften in dem kompletten Wirkbereich und somit auch in dem Verstärkungswinkel führen. Dies könnte einen möglichen Ansatz für eine spätere Optimierung darstellen. Es ist vorstellbar die Winkel auf einer Seite des Fahrzeugs gezielt stärker auszulegen, während die andere Seite aus wirtschaftlichen Gründen schwächer ausgeführt sein kann.

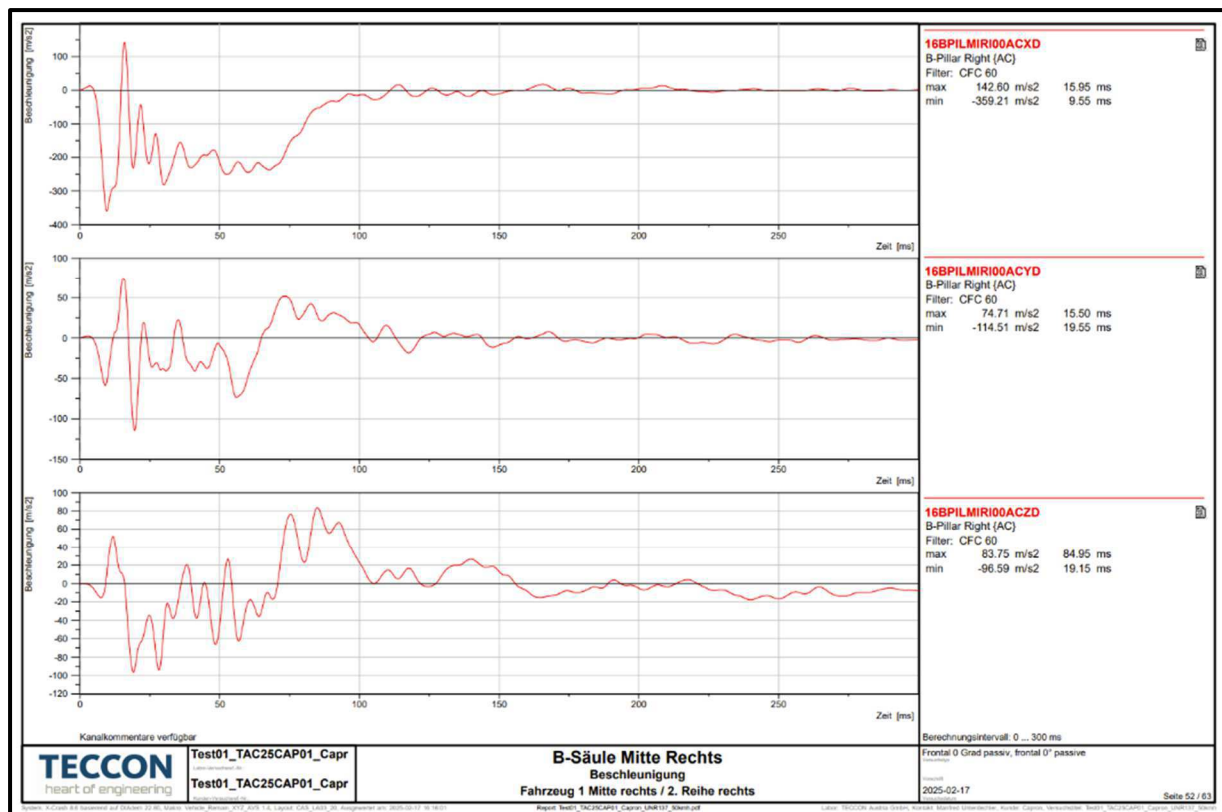


Abbildung 7.8: Beschleunigungswerte der rechten B-Säule (mittlere Höhe) über den Crash. Die Abbildung zeigt drei verschiedene Diagramme welche jeweils die Beschleunigungen in X-, Y- und Z-Richtung darstellen.

AP 7.3 Simulation nach Optimierung

Eine Simulation nach Optimierung wurde nicht durchgeführt da die Optimierungsmaßnahmen nicht im CAD umgesetzt wurden.

AP 7.4 Finaler Nachweis durch Crashtest (abhängig von Optimierungsmaßnahme)

Ein finaler Nachweis durch einen Crashtest wurde nicht durchgeführt da die Optimierungsmaßnahmen nicht im CAD umgesetzt oder simulativ überprüft wurden.

AP 7.5 Erarbeitung technischer Maßnahmen für eine Serieneinführung

Für die Serieneinführung sind im Wesentlichen drei technische Maßnahmen zu erarbeiten. Die erste Maßnahme betrifft die konstruktive Gestaltung des Winkels. Obwohl während der Konstruktion auf die umliegenden Bauteile im Reisemobil geachtet wurde und ein Sicherheitsabstand eingehalten wurde, kam es beim Aufbau des Prototyps zu einer Kollision mit dem T-Hauben-Schrank. Der Kollisionsbereich lag außerhalb der Stütze, weshalb eine Beeinflussung der Kraftleitung nicht zu erwarten war. Der Aufbau des Prototyps konnte nach einer geringfügigen Anpassung (schleifen) ungestört erfolgen. In Abbildung 7.9 ist die Anpassung an dem Winkel abgebildet. Die Abweichung lässt sich mit der Toleranz des Chassis oder einer Kombination aus

Toleranzen des Aufbaus und des Chassis erklären. Für ein Serienprodukt muss der Verstärkungswinkel somit konstruktiv leicht angepasst werden.



Abbildung 7.9: Seitenansicht des Verstärkungswinkels nach dem Abschleifen der zur Kollision führenden Ecke (rot eingekreist).

Wie bereits in Abschnitt 7.1 bereits erwähnt, konnte während des Crashversuchs eine ungleiche Verteilung der Beschleunigungswerte festgestellt werden. Diese Beobachtung lässt somit eine ungleiche Belastung der Fahrzeugseiten vermuten. Beim Rückbau des Fahrzeugs konnte jedoch festgestellt werden, dass beide Verstärkungswinkel den Belastungen standgehalten haben. Dies führt zu der Annahme, dass der rechte Verstärkungswinkel noch ausreichende Festigkeitsreserven besitzt, sodass eine schwächere Auslegung möglich erscheint. Dies könnte in Form einer dünnwandigeren Konstruktion realisiert werden, die zusätzlich Kosten reduzieren würde und somit wirtschaftlicher wäre. Darüber hinaus könnte somit weiter Gewicht eingespart werden.

Die letzte Maßnahme für die Serieneinführung betrifft die Verklebung des Verstärkungswinkels zum Chassis. Bei der Verklebung wurde auf eine belastungsgerechte Auslegung geachtet. Der Ausgewählte Klebstoff besaß ausreichend gute mechanische Eigenschaften, um den beim Crash auftretenden Kräften standzuhalten. Im Zuge der weiteren Ausarbeitung hat sich jedoch gezeigt, dass das Kriterium der Langzeitfestigkeit initial nicht berücksichtigt wurde. Die Auswahl eines entsprechenden Klebstoffs muss entsprechend nachgeholt werden.

AP 7.6 Zusammenfassung und Veröffentlichung der Ergebnisse

Für das teilintegrierte Reisemobil konnte nach zahlreichen konstruktiven und simulativen Iterationen ein crashsicheres Leichtbau Konzept entwickelt werden. Dieses besteht im Wesentlichen aus 3 verschiedenen Maßnahmen. Zum einen wurde ein Winkel entwickelt, der die beim Frontalcrash auftretenden Kräfte aus der A-Säule in den T-Hauben-Schrank weitergibt. Zusätzlich musste der T-Hauben-Schrank und dessen Anbindung an den Wohnmobilaufbau verstärkt werden. Zusammen mit der belastungsgerechten Auslegung der Fügeverbindungen stellt das System eine wirksame Verbesserung der Crashsicherheit dar.

AP 8 Projektleitung

Alle Projektpartner nahmen an den regelmäßigen Projektmeetings teil und organisierten fachspezifische Treffen vor Ort oder online zur Abstimmung. Federführend wurde das Projekt durch die Firma Capron geleitet. Alle Projektpartner stellten dem Konsortialführer die erforderlichen Personalkapazitäten für administrative Aufgaben, falls benötigt, zur Verfügung.

II Eingehende Darstellung Vollintegrierter

II.1 der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Vorgehensweise entspricht im Großen und Ganzen der des teilintegrierten Reisemobils. Die Erkenntnisse aus dem vorangegangenen TI wurden hier berücksichtigt, sofern es zum Fahrzeugkonzept passt.

- AP1: Entwicklung von crashsicheren Bauweisenkonzepten für Reisemobile
- AP2: Kennwertermittlung und Auslegung der Crashmodule
- AP3: Technologieentwicklung für crashoptimierte Profilstrukturen aus Faserverbundstrukturen – abgewandelt, stark reduziert
- AP4: Technologieentwicklung für crashoptimierte Knotenelemente - entfällt
- AP5: Entwicklung der Fügetechnologie und Systemintegration der Crashmodule - entfällt
- AP6: Herstellung von Demonstratoren auf Basis eines ausgewählten Fahrzeugtyps - entfällt
- AP7: Validierung des Crashkonzeptes - entfällt

Auch hier wurde für die Computer- gestützte- Simulation Teilbereiche der Arbeitspakete AP1, AP2, AP3, AP4 und AP5 an Unterauftragnehmer vergeben.

AP 1 Entwicklung von Crashsicheren Bauweisenkonzepten für Reisemobile

Die Crashszenarien und Lastfälle sind identisch mit denen, die im teilintegrierten Reisemobil definiert wurden.

Auch hier soll eine Vorzugsvariante ausgewählt und eine Integrationsstrategie erarbeitet werden, soweit es bei einem nicht durch physische Tests validierten Konzept möglich ist.

AP 1.1 Analyse der Crashszenarien und -lastfälle

Es gelten die gleichen Crashszenarien bzw. Lastfälle wie bereits beim Teilintegrierten ausführlich beschrieben.

Wie im teilintegrierten Wohnmobil ausführlich dargelegt, konzentrieren wir uns auch hier auf den Frontalcrash nach ECE R137. Die Argumentation kann aus dem Teilintegrierten übernommen werden, da sich die Fahrzeuge in allen anderen

Crashszenarien sehr ähnlich verhalten und diese damit vernachlässigt werden können.

UN-ECE-Regelung Nr. 137 (Frontalaufprall für Rückhaltesysteme)



Abbildung V1.1: Schnittdarstellung eines vollintegrierten Reisemobils. Die erste und zweite Sitzreihe sind gekennzeichnet und der direkte Wirkungsbereich des Aufpralls bei einem Frontaufprall (rot).

AP 1.2 Ermittlung des Standes der Technik anhand Crashsimulationen

Es wurde ein repräsentativer Grundriss ausgewählt, um mittels Crashsimulationen den Stand der Technik zu ermitteln und die Schwachstellen am Fahrzeug zu identifizieren. Auch hier wurde ein Modell des OEM Stellantis gewählt, da es zu den meist verbauten in der Branche gehört, hier in Kombination mit dem vollintegrierten Aufbau I68.

Basissimulation I68 Frontalcrash nach ECE R137

Anders als beim teilintegrierten Reisemobil, wo der crashrelevante Frontbereich durch die Originalstruktur des OEMs zum großen Teil abgesichert ist, hat das vollintegrierte Modell nur einen Windlauf als Basischassis, das nur aus dem OEM-Chassis ohne das Fahrerhaus mit A- und B-Säule besteht. Somit entfällt der Übergang von Triebkopf zu Wohnaufbau. Die fehlende OEM-Struktur wird vollständig durch eine Aufbaustruktur ersetzt und in den Wohnaufbau integriert. Die Hauptabsorptionselemente des OEM-Leiterrahmen sowie der Prallträger bleiben jedoch unverändert bestehen.

In der Untersuchung wurde sich daher hauptsächlich auf diesen Unterschied konzentriert, der eine andere Herangehensweise erfordert als beim Teilintegrierten. Um zielführend zu arbeiten, wurde bereits für die erste Simulation eine Ersatz-A-Säule in das Modell integriert.

Um den Simulationsaufwand bei dem Simulationsdienstleister zu reduzieren, wurde diese Ersatzstruktur vorab statisch berechnet und dimensioniert, welches in mehreren Schleifen erfolgte, und anschließend in das Gesamtmodell integriert.

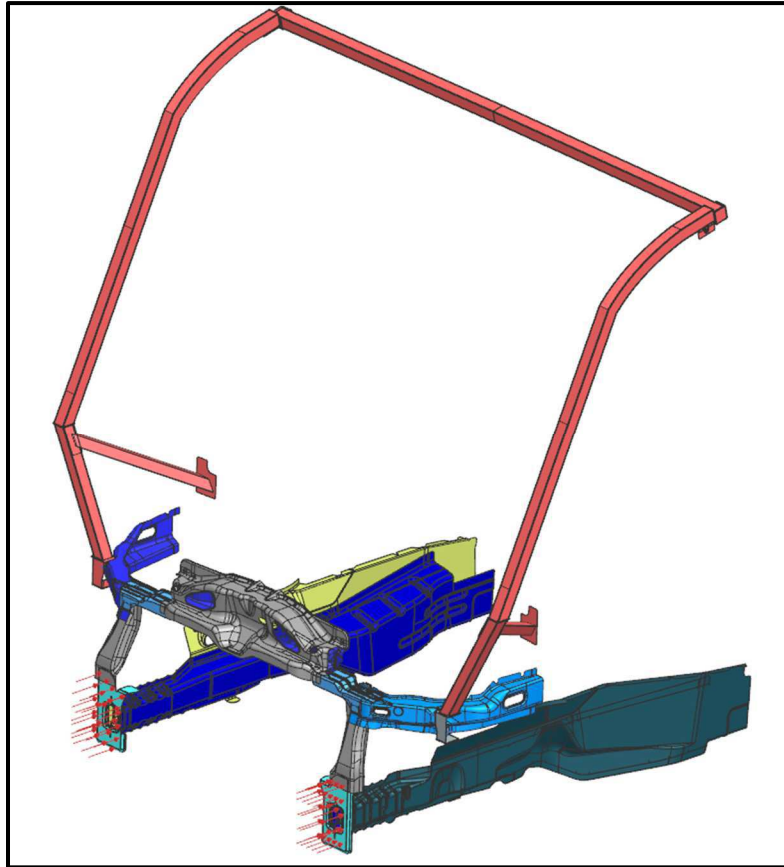


Abbildung V1.2: Profil Ersatzstruktur A-Säule mit Anbindung an Chassis/Windlauf

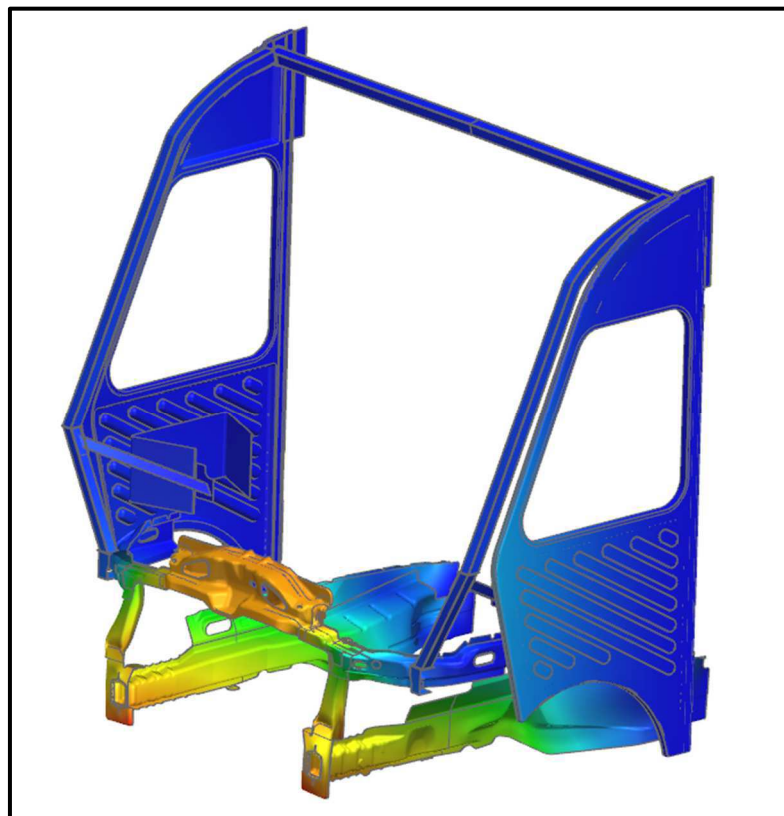


Abbildung V1.3: FE-Berechnung Ersatzstruktur zur statischen Vorauslegung für dynamische Gesamtfahrzeugsimulation

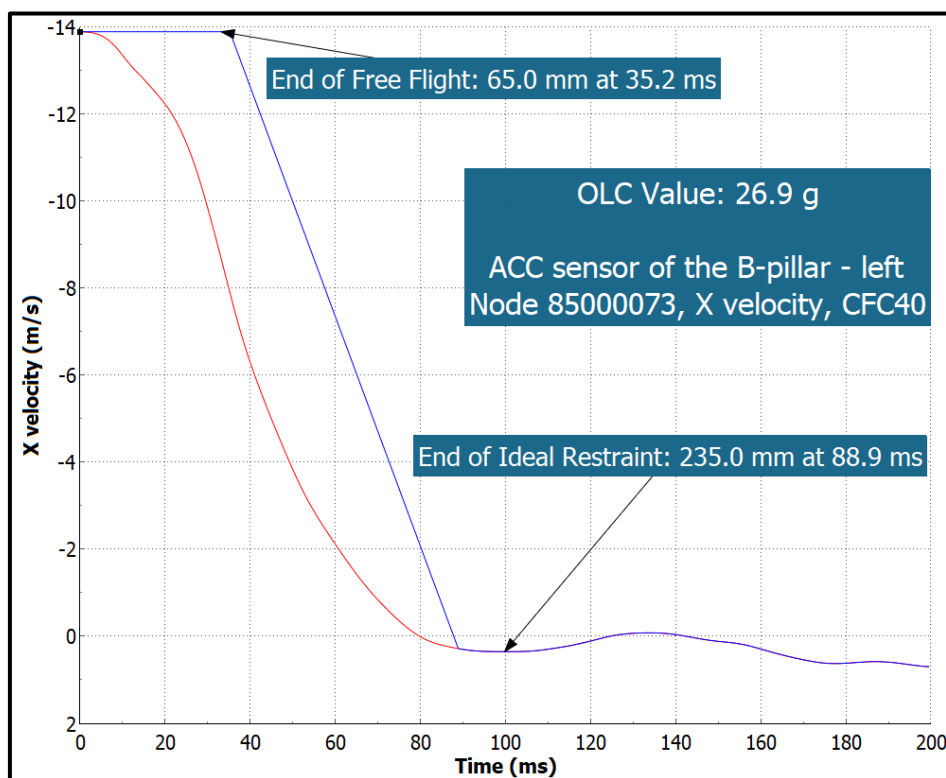
In der darauffolgenden Simulation wurden die Beschleunigungswerte an definierten Positionen im Fahrzeug ermittelt, diese sind auch hier ein wichtiges Bewertungskriterium (Messpunkte, siehe Abbildung V1.5 & V1.6), genauso wie der berechnete OLC- Wert (Occupant Load Criterion).

OLC ist die konstante Verzögerung in g-Einheiten eines virtuellen Fahrgastes, die über den Impuls des Fahrzeugs bestimmt wird.

$$OLC = \frac{v1-v2}{t1-t2} * \frac{1}{9.81} * g$$

$$OLC = 26,9 g$$

Für eine weitere Bewertung des OLC wären zusätzliche Informationen über die Rückhaltesysteme erforderlich. Grundsätzlich liegt der Wert im unkritischen Bereich.



Geschwindigkeit eines virtuellen Passagiers

Geschwindigkeit des Fahrzeugs

Abbildung V1.4: Verlauf der Belastungen auf Passagiere in Abhängigkeit von Zeit und Geschwindigkeit des Fahrzeugs

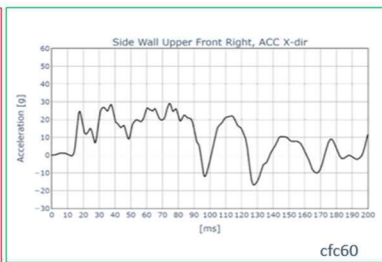
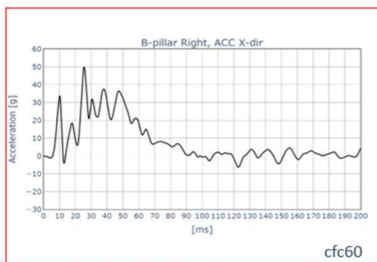
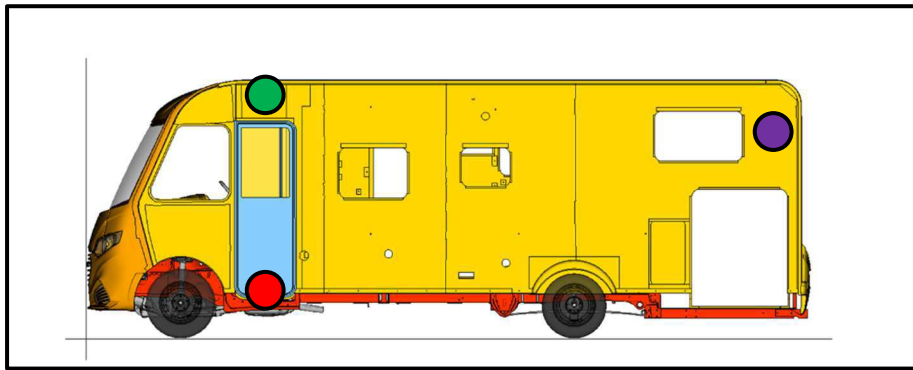


Abbildung V1.5: Messpunkte Seitenwand (rot, grün, lila) mit zugehörigen Beschleunigungswerten bei ECE R137 Frontalaufprall aus dynamischer Simulation

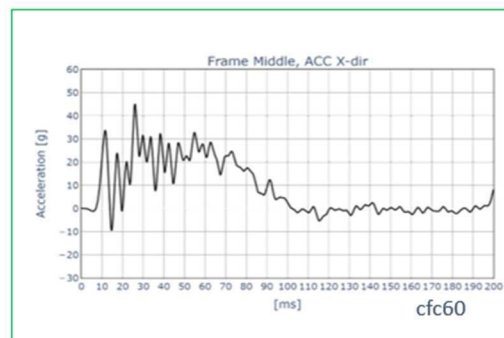
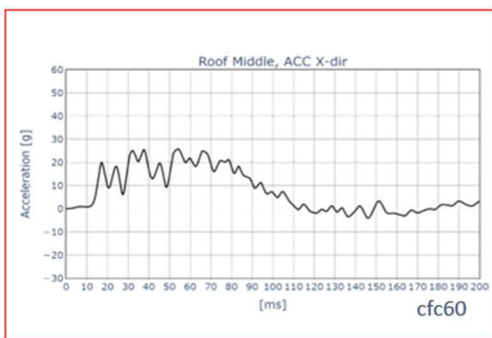
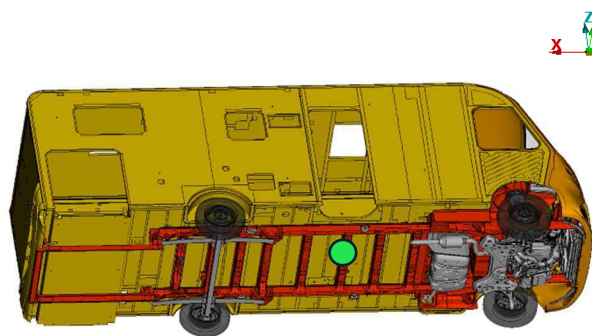
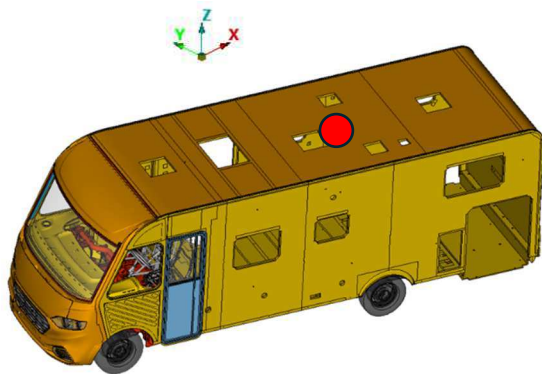


Abbildung V1.6: Messpunkte Dach (rot) und Karosserie (grün) mit den zugehörigen Beschleunigungswerten bei Frontalaufprall nach ECE R137 aus dynamischer Simulation

AP 1.3 Erstellung der Anforderungsliste für vollintegrierte Fahrzeuge

Die Anforderungsliste ist bereits zusammen mit dem teilintegrierten Fahrzeug erstellt worden.

In vorangegangenen Kapiteln wurde die Herausforderung eines vollintegrierten Fahrzeugs beschrieben. Anders als beim teilintegrierten Wohnmobil, wo der Frontteil bereits getestet ist, muss hier der Hersteller des Reisemobils die Crashesicherheit gewährleisten und verantworten.

Dazu wurden intensive Untersuchungen durchgeführt.

Es wurden die Anforderungen und die daraus resultierenden Kräfteinleitungen zugrunde gelegt, um eine Vorauslegung der Ersatz-Stützstruktur zu ermöglichen, s. AP 1.2.

Diese Struktur hat die Aufgabe, sowohl die kinetische Energie des Frontaufpralls (ECE R137) zu absorbieren als auch letztendlich dazu beitragen, die Deformation der Tür zu verhindern, um ein Öffnen gem. ECE R137 zu gewährleisten.

AP 1.4 Definition der zu verstärkenden Fahrzeugbereiche

Das Fahrzeug wurde simulativ, gemäß den Bestimmungen des ECE R137, gecrasht. Die Beschleunigungswerte, gerade im Bereich der (nicht vorhandenen) B-Säule zeigten, dass die auftretenden Werte sehr hoch sind.

Die Herausforderung stellt sich nun, hier eine Ersatzstruktur zu entwickeln, die die Aufgaben der fehlenden OEM-Karosseriekomponenten erfüllt, um die Energie zu absorbieren, sowie ein Eindringen der Tür zu verhindern, da deren Öffnung ein entscheidendes Kriterium zum Bestehen des Tests gemäß ECE R 137 ist.

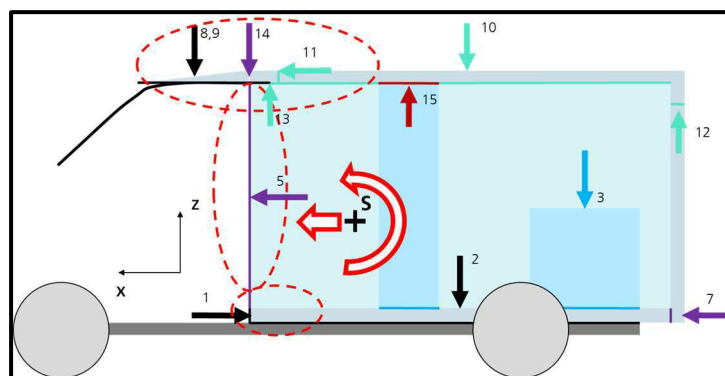


Abbildung V1.7: Schematische Darstellung der Kräfte und Momente, die während eines Frontalcrashes im Fahrzeug auftreten.

AP 1.5 Konzeptionierung zielführender Crashwirkprinzipien und Auswahl einer Vorzugsvariante

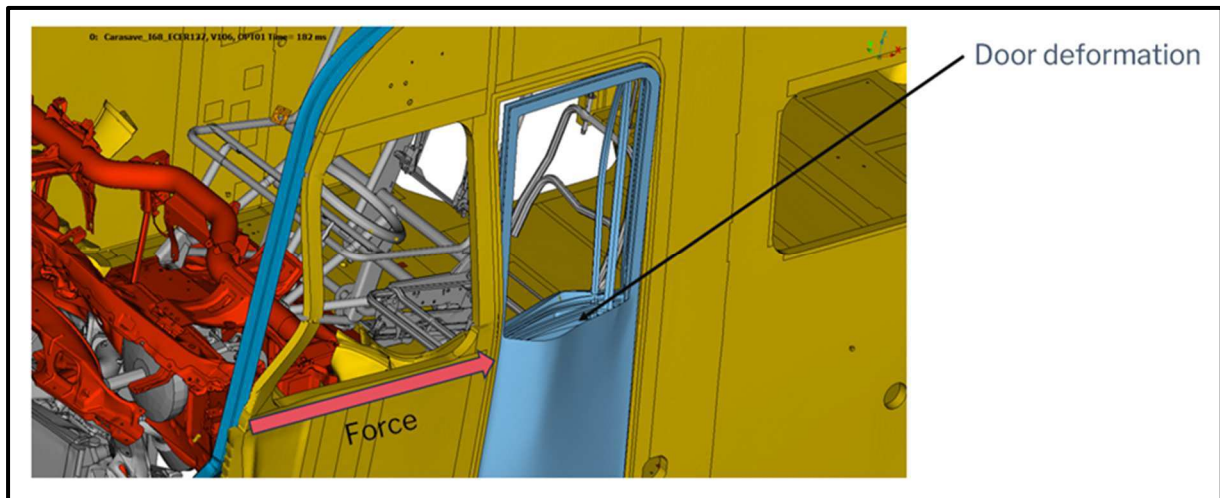


Abbildung V1.8: Verformungen in Simulation bei Frontalaufprall nach ECE R137

a) OEM-Ersatzstruktur und Schaffung einer Energieabsorptionszone

Beim Frontaufprall wird der Impuls durch die Seitenwand weitestgehend steif auf den Türrahmen eingeleitet, der sich stark verformt. Ein Öffnen der Tür wird, über die in der ECE R137 ausgewiesenen zulässigen Öffnungskraft erschwert oder sogar vollständig verhindert.

Dies zu vermeiden, wird einerseits durch eine Struktur erreicht, die sich zusammen mit der OEM-Absorptionsstruktur definiert verformt und somit die kinetische Energie beim Frontaufprall absorbiert. Beim Test des Teilintegrierten konnte man deutlich erkennen, wie die Stahlstruktur des OEM-Triebkopfes als auch die Anbauteile, wie bspw. die Kotflügel, sich gezielt zusammenschieben. Dieses Konzept soll für das vollintegrierten Wohnmobil übernommen werden.

Hierzu wird im vorderen seitlichen Teil der Bugmaske/Seitenwand ein Bereich eingebracht, in der sich die Sandwichplatte ebenfalls zusammenfallen oder zusammendrücken lassen kann. Beide Maßnahmen verursachen eine deutliche Reduktion der Kraft, die auf die Tür drückt.



Abbildung V1.9: Verformungen beim Crashtest des Teilintegrierten T68 nach ECE R137 – die Stahlstruktur des Ducato faltet sich gezielt zusammen.

b) Verstärkung des Türrahmens

Als Teil der Türaufnahme wird bereits heute im Serienprodukt eine Holz- oder Hartschaumleiste in den vorderen Teil der Seitenwand (oder Bugmaskenstruktur) eingebracht, um diese entsprechend auszusteifen. Diese garantiert allerdings nicht ausreichende die Steifigkeit, die erforderlich ist, um im Falle eines Frontaufpralls ein Verbiegen des eigentlichen Türrahmens zu verhindern. Das bedeutet, dass sich die Tür nach dem Crash wahrscheinlich nicht mehr öffnen lässt. Daher muss diese Leiste verstärkt ausgeführt werden.

Dies wird durch die Verwendung steiferer Materialien erreicht, die ganz oder teilweise die Holz- oder Hartschaumleiste ersetzen. Wenn das Versteifungselement oder die Versteifungselemente gute thermische Leitfähigkeiten aufweisen, so ist eine partielle Ersetzung zu bevorzugen, um die Dämmeigenschaften weiterhin zu gewährleisten.

Bei niedriger thermischer Leitfähigkeit, bspw. bei Faserverbundwerkstoffen wie GFK oder CFK, ist eine großflächiger Austausch denkbar.

Für die Untersuchungen wurde eine Aluminiumversteifung auf der Innenseite der Außenlage des Sandwichs eingebracht und die Holzleiste entsprechend substituiert.

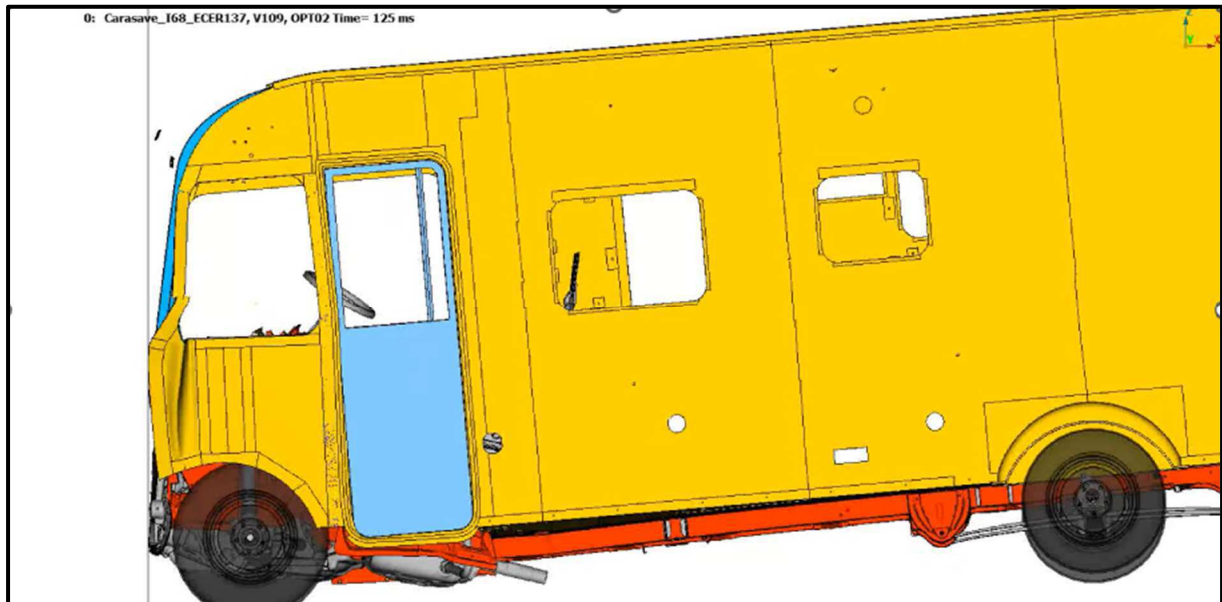


Abbildung V1.10: Verformungen Front Simulation ECE R137



Abbildung V1.11: „Knautschzone“ faltet sich gezielt zusammen und absorbiert Energie

Eine weitere Optimierung der Türrahmenverstärkung erfolgte durch ein zusätzliches Verstärkungselement unterhalb des Türausschnitts, dass das Sandwichpanel der Seitenwand wieder schließt, um das Eindringen des Türrahmens weiter zu reduzieren. Der Wirkmechanismus der Verstärkung vor der Tür im vorderen Seitenteil wurde nochmal deutlich verbessert, so dass eine bessere Kraftverteilung erreicht wurde.

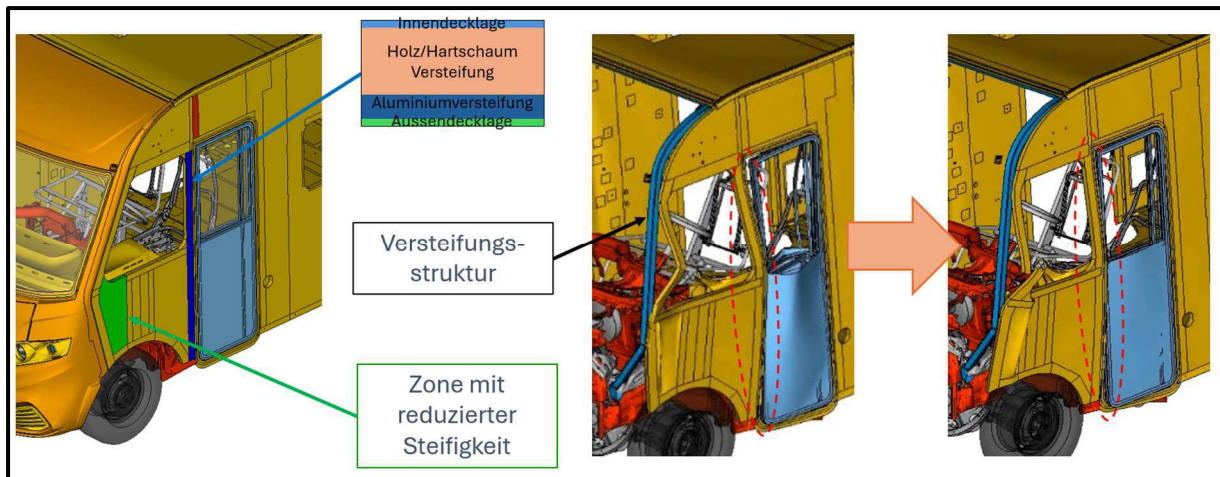


Abbildung V1.12: deutliche Verbesserung des Impacts auf Tür

AP 1.6 Konzeptionelle Modularisierung zur Verwendung in unterschiedlichen Fahrzeugen

Die Stützstruktur (A-Säulen Ersatz) ist in seiner Bauform an das OEM-Chassis angepasst, daher ist die Anwendung für alle Basisfahrzeuge dieses OEMs identisch. Die Bugmaske selbst wird als nicht tragendes Verkleidungsteil ausgeführt, welches im markenspezifischen Design gehalten werden kann. Das hat den großen Vorteil, dass anders als Stand der Technik in GFK-Laminat Ausführung, hier ein nachhaltiges Material für das Formteil verwendet werden kann. Im Falle einer Beschädigung ist es austauschbar und kann recycelt werden. Eine mehrteilige Ausführung ist möglich, was das Handling in der Fertigung erleichtert.

AP 1.7 Iterative Ermittlung zielführender Maßnahmen zur Realisierung der erforderlichen strukturellen Steifigkeit und Festigkeit anhand reduzierter Simulationsmodelle

Es wurde eine Struktur ermittelt, die dem Kraftverlauf im Falle eines Frontcrashes folgt. Sie besteht aus einem A-Säulen Ersatz, der die Kraft, wie beim Teilintegrierten, einmal ins Chassis ableitet und zum Teil in das Dach.

Dies erforderte mehrere Schleifen in der Simulation, um einen sauberen Übergang der Kräfte in den Dachbereich und vorderen Chassis Bereich zu ermitteln. Hier wurde besonders an den Schnittstellen ein allmählicher Übergang realisiert, der die Kraft sauber in den Aufbau weiterleitete und ein Wegknicken verhindert wird.

Weiterhin wurde die Knautschzone im vorderen Bereich des Seitenteils so optimiert, dass sie nun die gewünschte Funktion übernimmt und die maximal mögliche Energie beim Aufprall absorbiert.

Die Verstärkung des Türrahmens wurde in unterschiedlichen Ausführungen simuliert. Die finale Variante verteilt die Kräfte zufriedenstellend und stellt in seiner Ausführung keine Wärmebrücke dar.

Fazit:

- c) Nutzung einer definierten Profil-Versteifungsstruktur (Ersatz A-Säule)
- d) Schwächung der Seitenwand im Aufprallbereich – Erzeugung einer Knautschzone
- e) Versteifung des Aufbaus im Türbereich zur Kraftverteilung

Die ermittelten Beschleunigungswerte haben sich gegenüber der Erstsimulation, siehe Abbildung V1.5 & V1.6, nicht gravierend verändert, da hier der Einfluss der Hauptcrashelemente des OEM-Chassis ausschlaggebend sind, welches nicht verändert wurde.

AP 1.8 Modularisierung und Integrationstrategie der Crashstruktur

Siehe Punkt 1.6

AP 1.9 Erarbeitung von Verbindungs- und Montagekonzepten der Crashprofile und Verbindungselemente (Knoten)

Aufgrund der fehlenden Zeit zur Umsetzung in einen Prototyp, ist dieser Punkt nur konzeptionell ausgearbeitet worden, um die Simulation der Struktur zu ermöglichen. Die Verstärkung ist hier als Stahl Schweißkonstruktion vorgesehen, die in das OEM-Chassis geschraubt wird. Die Verbindung zum Dachquerträger erfolgt über einen Adapter, der neben Formschluss auch geschraubt wird. Eine konkrete und fertigungsgerechte Ausführung der Anbindungs- und Knotenelemente konnte bis zum Abschluss des Projekts nicht detailliert erarbeitet werden.

AP 1.10 Detaillierung und Bewertung von Crashstruktur-Varianten hinsichtlich Leichtbau

Im ersten Schritt wurden die Maßnahmen mit konventionellen Materialien ausgelegt. Die Simulation wurde mit Stahlprofilen durchgeführt, da hierfür die notwendigen Materialkarten vorliegen. Außerdem handelt es sich um eine gebogene Struktur, die prototypisch am einfachsten in einer Metallbauweise herstellbar wäre.

Die Konstruktion ist grundsätzlich auch für pultrudierte, infusionsierte oder laminierte FKV-Profile geeignet.

In Perspektive sollte die Frontverstärkung, als OEM-Ersatzstruktur, mit Leichtbaumaterialien ausgeführt werden. Hier kann, wie bereits aufgeführt, ein thermoplastisches Pultrusionsprofil verwendet werden, welches im Nachgang zum Herstellprozess durch thermisches Verformen in die entsprechende Kontur gebracht werden kann. Das hat den Vorteil nicht nur des Leichtbaus, sondern auch der Rezyklierbarkeit, da es im Gegensatz zu duroplastischen Materialien gut recycelbar ist.

Die Verstärkung des Türrahmens kann durch gerade Profile erfolgen. Somit können klassische Extrusions- und Pultrusionsprofile verwendet werden, ohne ein nachträgliches Umformen dieser.

AP 1.11 Ausarbeitung der Crashstrategie

n.a.

AP 1.12 Ausarbeitung der Zulassungsstrategie

Da ein Windlauf nicht von allen OEMs verfügbar ist, ausschließlich von Stellantis (z.B. Ducato) und Mercedes Benz (Sprinter Frontantrieb), kann man sich auf beide Basisfahrzeuge konzentrieren.

AP 2: Kennwertermittlung und Auslegung der Crashmodule

Mit den für Stahl vorhandenen Materialkennwerten konnte die Simulation erfolgen. Anhand der erstellten Materialkarten für UD-Glasfasermaterial, durch Tests am IWU, konnte mittels Laminattheorie die Materialkarte für den kompletten Lagenaufbau der Profile ermittelt werden. Somit war es möglich die Verstärkungsstruktur in Faserverbundmaterial zu simulieren.

AP 3: Technologieentwicklung für crashoptimierte Profilstrukturen aus Faserverbundstrukturen – abgewandelt

Für die tragende Stützstruktur im Frontbereich des integrierten Reisemobils wurde Faserverbundmaterial gewählt, welches in seinen Herstellungsverfahren sehr vielseitig ist. Dabei bietet das Pultrusionsverfahren ideale Möglichkeiten große Stückzahlen umzusetzen. Es wird endlos produziert und auf Länge geschnitten. Einmal entwickelt und eingefahren, läuft der Prozess stabil.

Um den Anforderungen der Crashabsorption gerecht zu werden, wurde ein entsprechender Lagenaufbau für das Pultrusionsprofil bestimmt. Neben Rovings in UD müssen auch Gelegelagen (z.B. +/-45°) enthalten sein, um ein Aufspießen der Profile zu vermeiden. Außerdem ermöglichen Gelege einen höheren Faservolumengehalt, da sie im Gegensatz zu Gewebe, keine Hohlräume bilden. Sie können exakt nach Lastpfaden ausgerichtet werden. Daher sollten Faserbänder mit entsprechenden Gelegen verwendet werden.

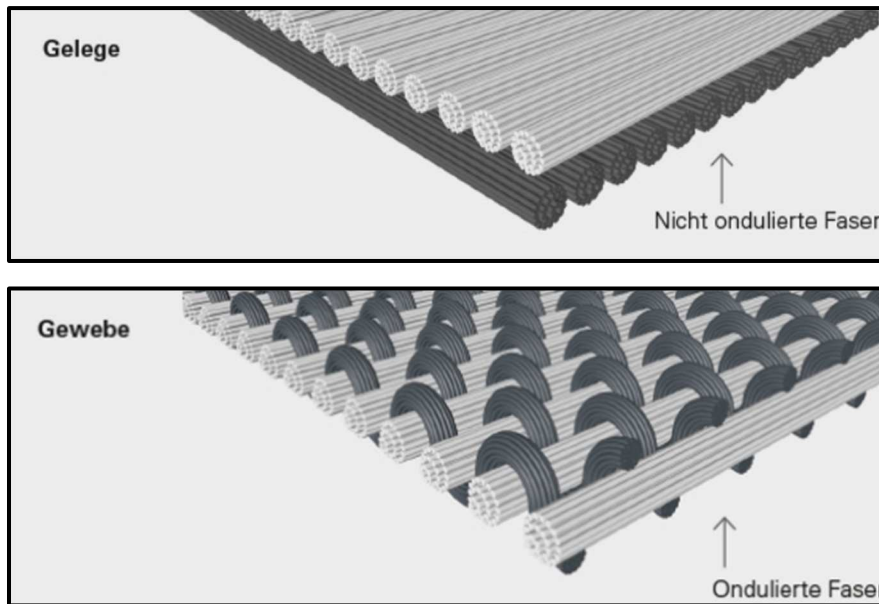


Abbildung V3.1, V3.2: Unterschied Gelege biaxial (2 Lagen unterschiedlich ausgerichtet) und Gewebe mit 2 Lagen miteinander verwoben (Quelle: Saertex)

Es wurde ein Lagenaufbau für die Profile definiert, bestehend aus unidirektionalen und biaxialen Gelegen, einige Konturen wurden faserverbundgerecht optimiert und anschließend simuliert.

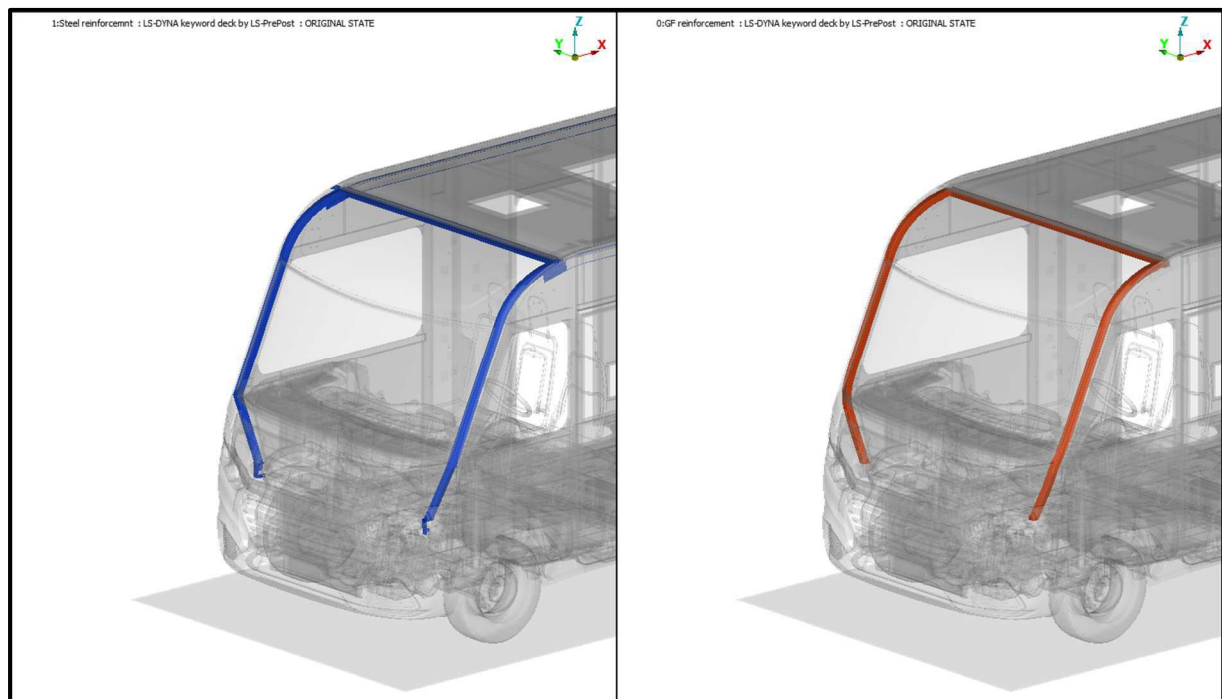


Abbildung V3.3 / V3.4: Struktur in Stahl (links blau), FKV-Profil (rechts orange)

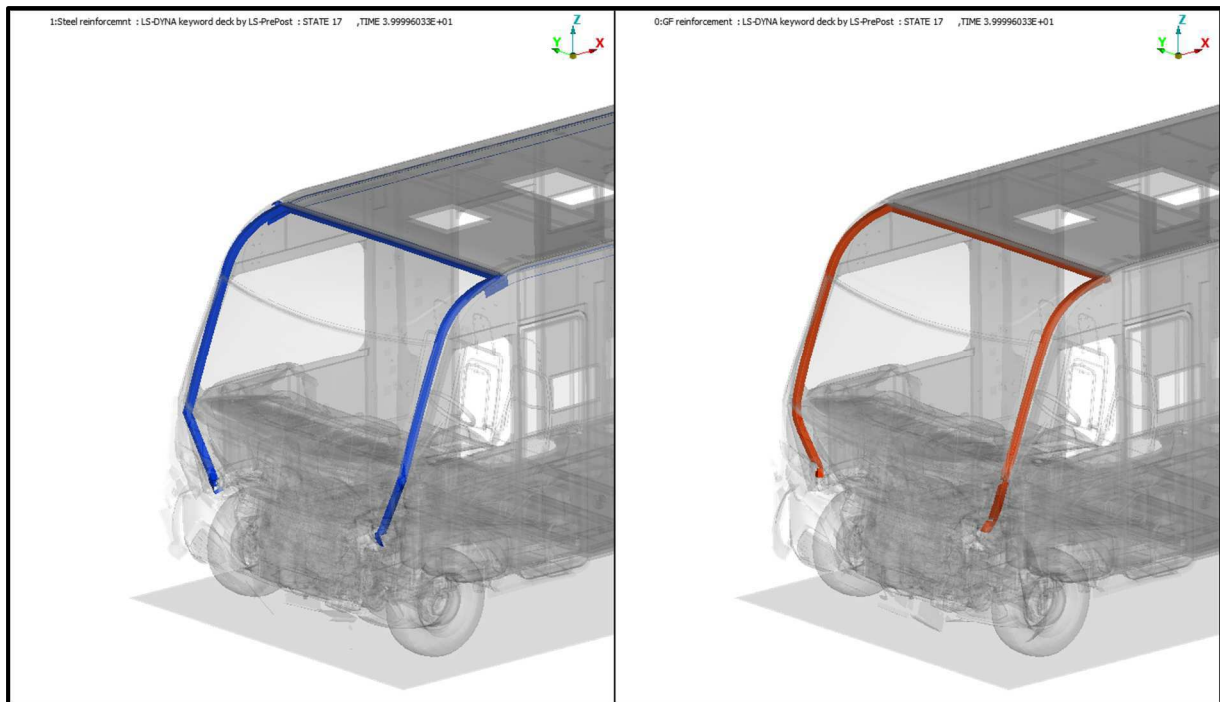


Abbildung V3.5 / V3.6: Frontaufprall nach 40ms

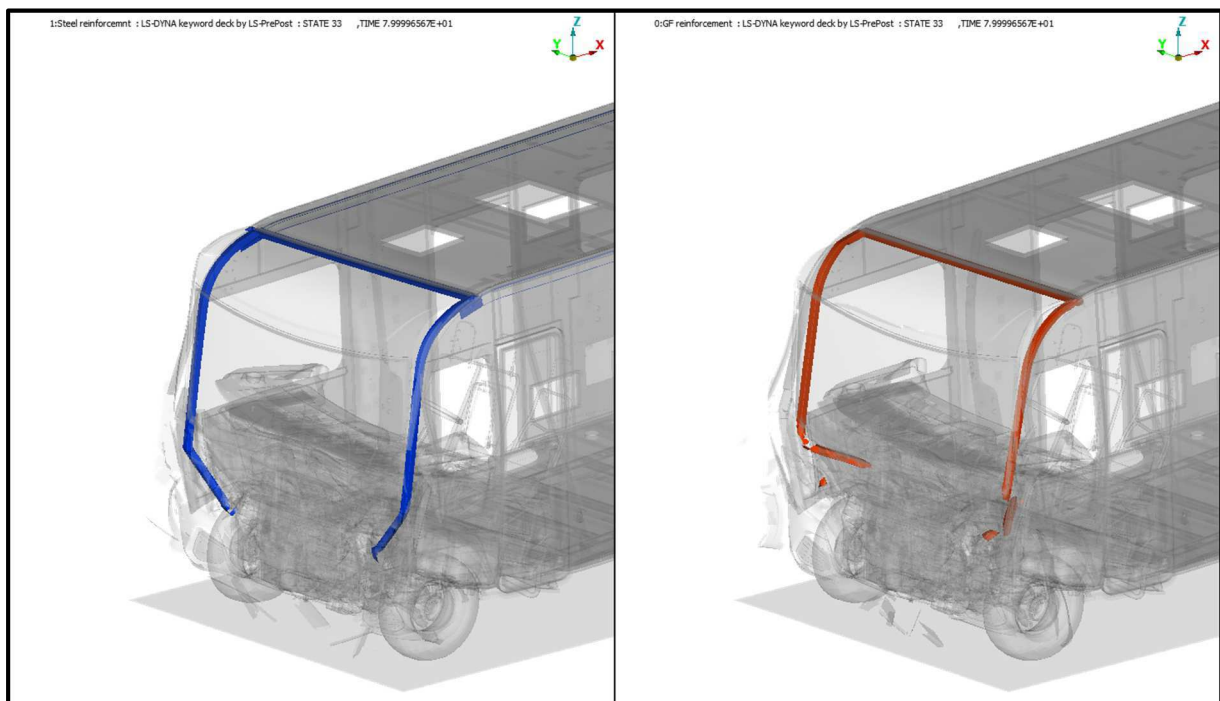


Abbildung V3.7 / V3.8: Frontaufprall nach 80ms, Versagen der FKV-Profile

In der vorliegenden Simulation ist erkennbar, dass die FKV-Profile versagen. Nach Anpassung des Lagenaufbaus wurde erneut festgestellt, dass es in der Simulation zu einem Splintern der Profile kommt. Eine Resttragfähigkeit der Profile nach Versagen kann in der vorhandenen Simulationsumgebung nicht abgebildet werden. Die Stahlprofile verformen sich, was beabsichtigt ist, da sie dadurch Energie absorbieren. Somit sind basierend auf den Simulationsdaten zumindest duroplastische Faserverbundprofile in dieser Bauweise ungünstig, da sie sich nur begrenzt verformen können bevor diese undefiniert versagen. Sind sie integriert in eine Bugmaskenstruktur, könnte man das durchaus noch in Erwägung ziehen, da ein

Splittern dann nicht erwartet wird, sondern eher ein Bruch. Thermoplastische Profile hätten hier Vorteile, da leichter verformbar und schweißbar sind, außerdem ist ein Splittern aufgrund der thermoplastischen Matrix tendenziell nicht zu erwarten.

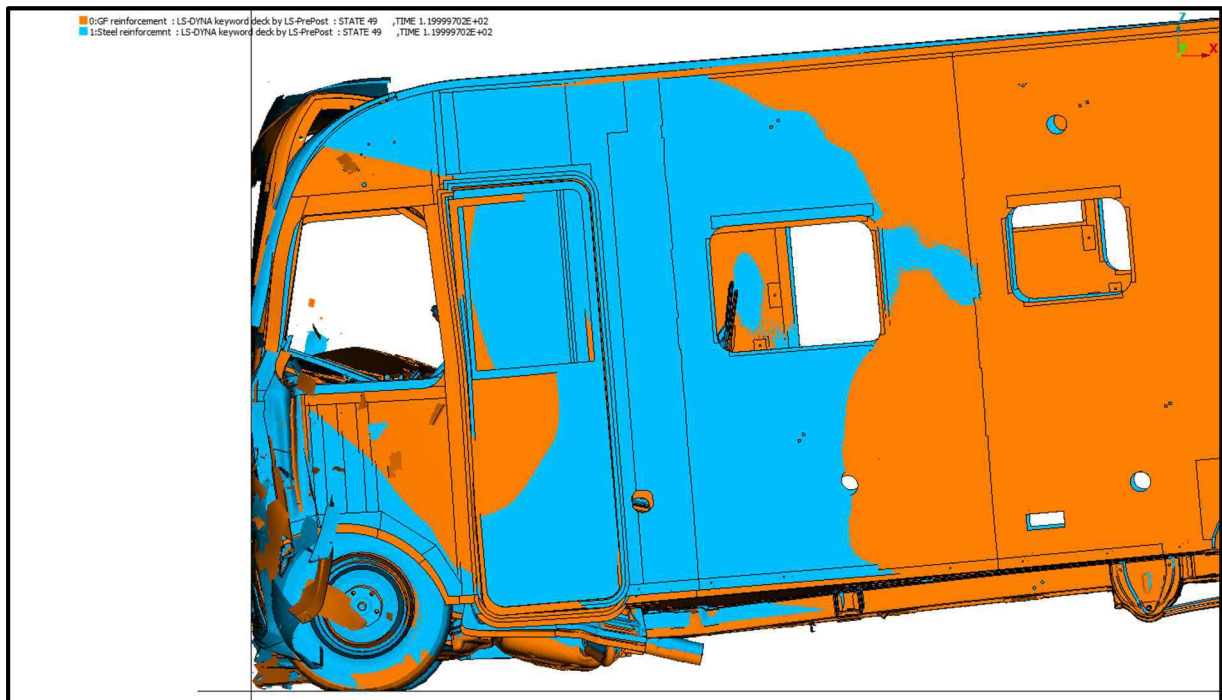


Abbildung V3.9: Frontaufprall nach 120ms, die Verformung des Türrahmens konnte weitestgehend vermieden werden: der Frontbereich schiebt sich definiert zusammen

In der Simulation hat sich bestätigt, dass sich der Frontbereich, wie gewollt und definiert, zusammenschiebt. Dabei ist die verformt sich die Stahl-Variante definiert (Abb. V3.9 blau), bei der GFK-Struktur kommt es hingegen gerade im oberen vorderen Bereich zu einem Knicken der Profile die zu deutlichen Verformungen führen (Abb. V3.9 orange). Die Auswirkungen der unterschiedlichen Verformungen von Stahl oder FKV auf den Türrahmen kann man, wie in Abbildung V3.9 zu sehen, vernachlässigen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für die Frontverstärkung auf metallische Materialien zurückgegriffen werden sollte.

Im Bereich des Türrahmens, wo ebenfalls Verstärkungen angebracht werden, können FKV Pultrusionsprofile eingesetzt werden. Der Vorteil hier ist, dass es sich um gerade Profile handelt und damit den Pultrusionsprozess vereinfacht bzw. keine nachträgliche Umformung erforderlich ist.

AP 4: Technologieentwicklung für crashoptimierte Knotenelemente

Für die Simulation wurde bewusst auf Knotenelemente verzichtet, da festgestellt werden sollte, ob das Konzept den Anforderungen entspricht.

AP 5: Entwicklung der Füge-technologie und Systemintegration der Crashmodule

Hier gilt das Gleiche wie bei AP4.

Grundsätzlich stehen als Füge-technologien für thermoplastische Profile sowohl Schraubverbindungen als auch Kleben und Schweißen zur Verfügung. Bei duroplastischen Profilen entfällt die Möglichkeit des Schweißens.

AP 6: Herstellung von Demonstratoren auf Basis eines ausgewählten Fahrzeugtyps

Aus Zeitgründen war es nicht mehr möglich die Lösung prototypisch umzusetzen.

AP 7: Validierung des Crashkonzeptes

Siehe AP 6, daher war eine Validierung durch praktische Tests nicht möglich.

Anhang 1

	ECE R-34 (rear)	ECE R-95 (side)	ECE R-137 (front)	
Vehicle structure	Green	Green	Green	Green
Interior	Green	Green	Green	Green
Intrusion at B-pillar	Green	Green	Green	Green
Passengers	Green	Green	Green	Green

Teilintegrierter	
T-Haube	Stiffigkeit erhöhen

[Altran-Empfehlungen, übergeben am 13.06.2022]

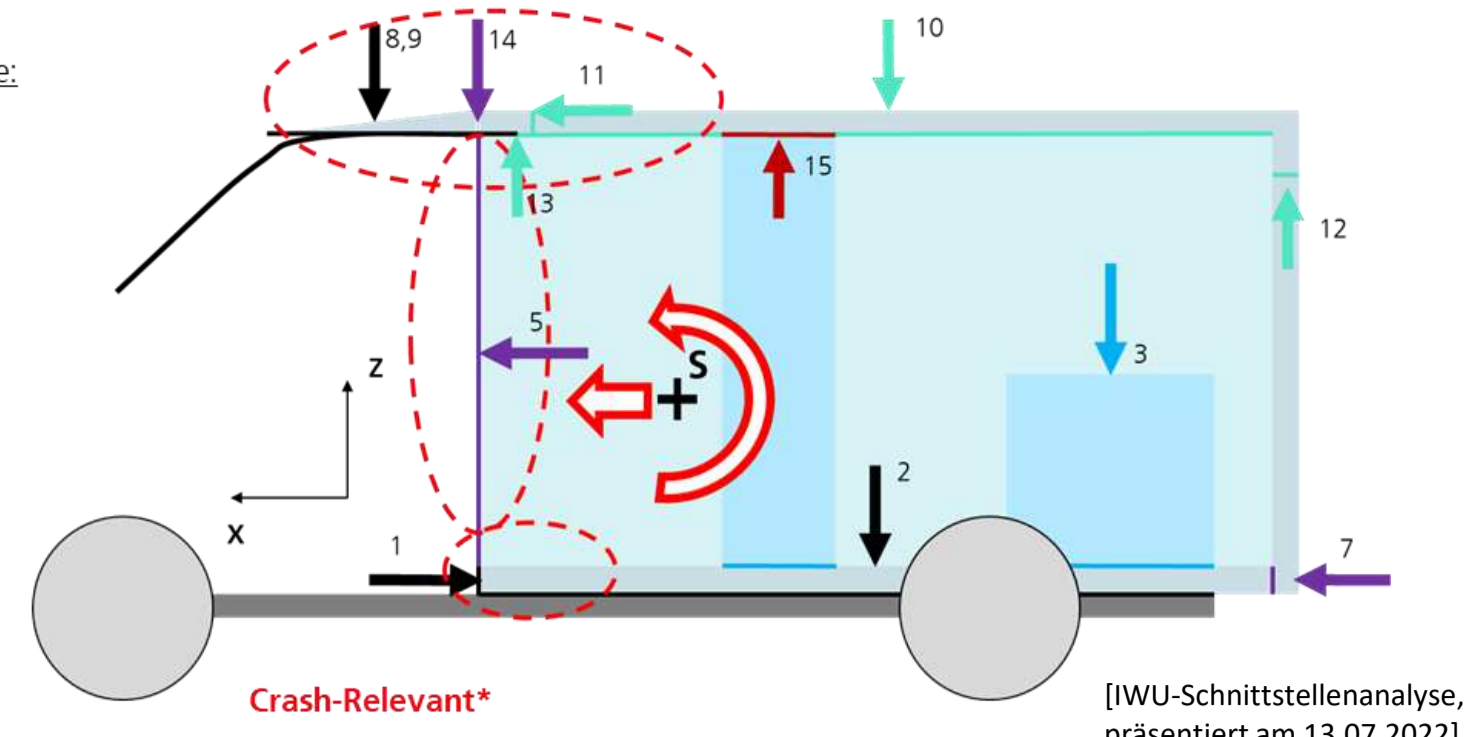
Leiterrahmen	
Verstärkung im Bereich der B-Säule (Pole Blocker)	



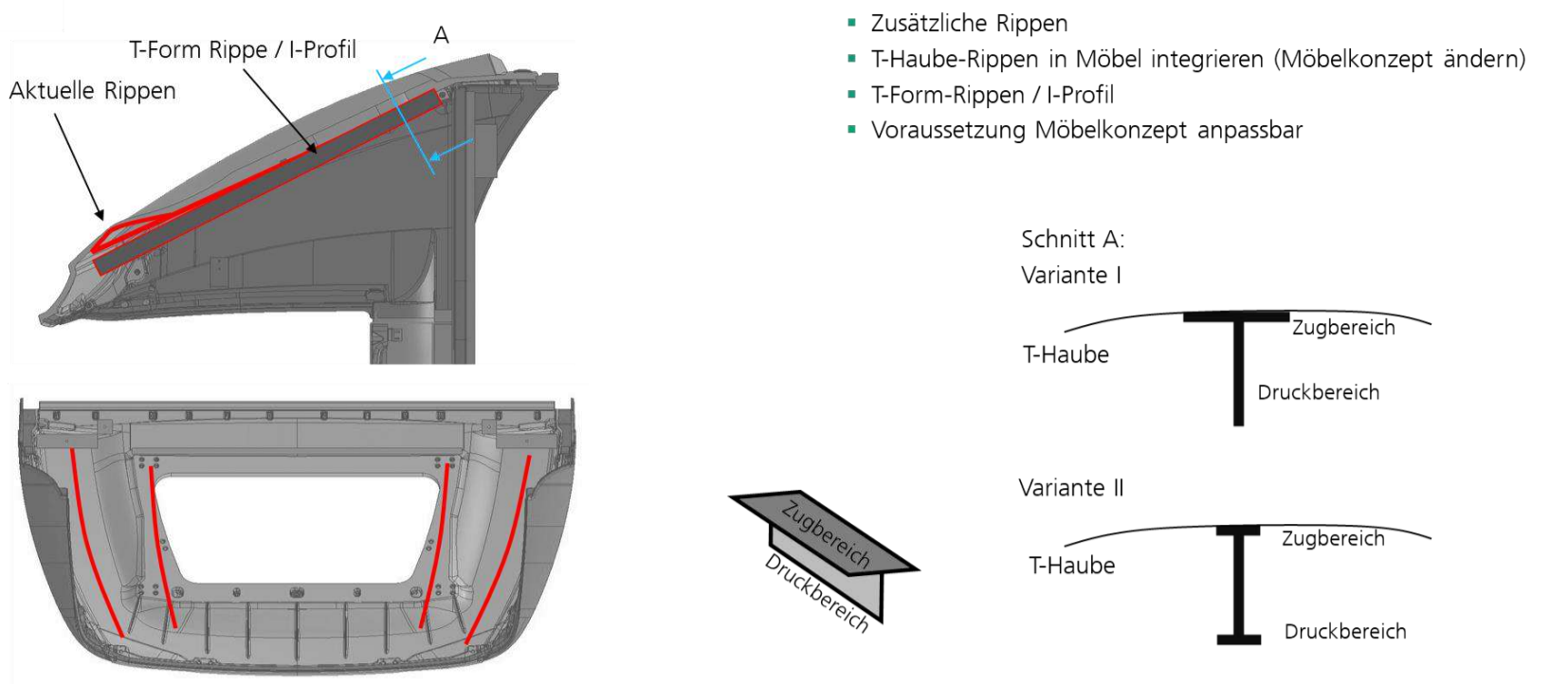
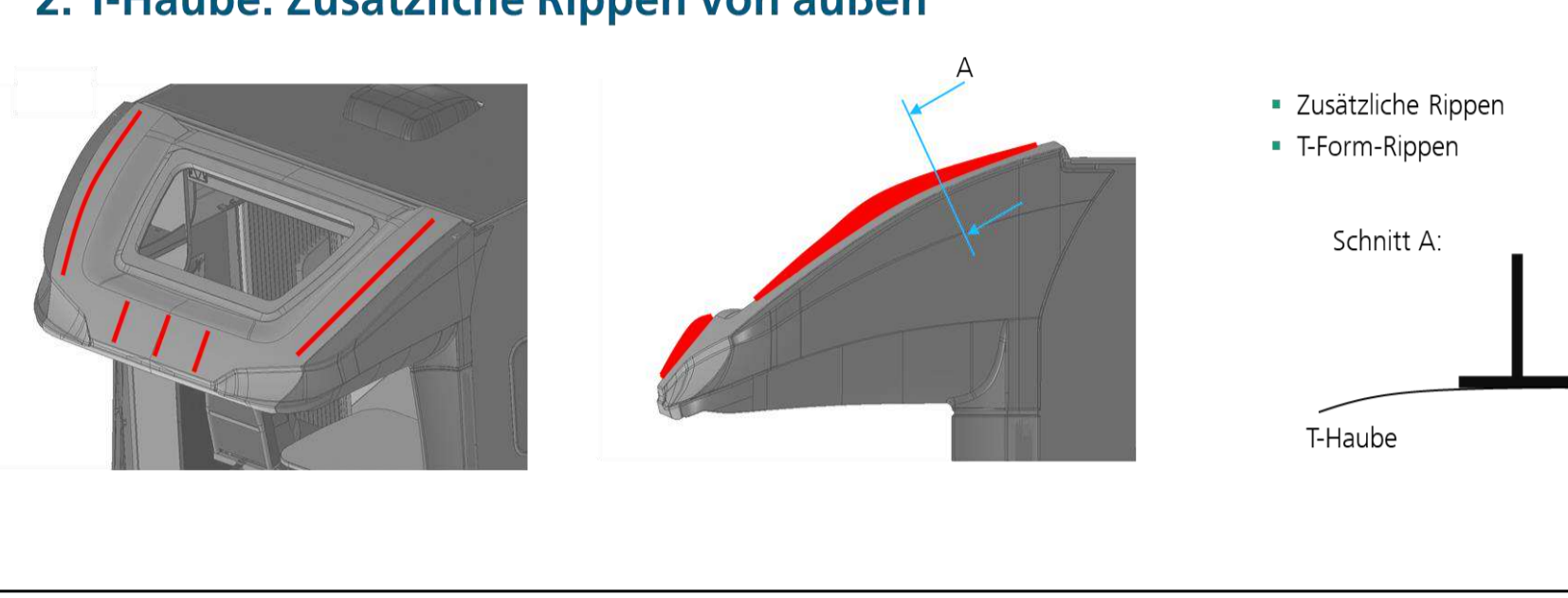
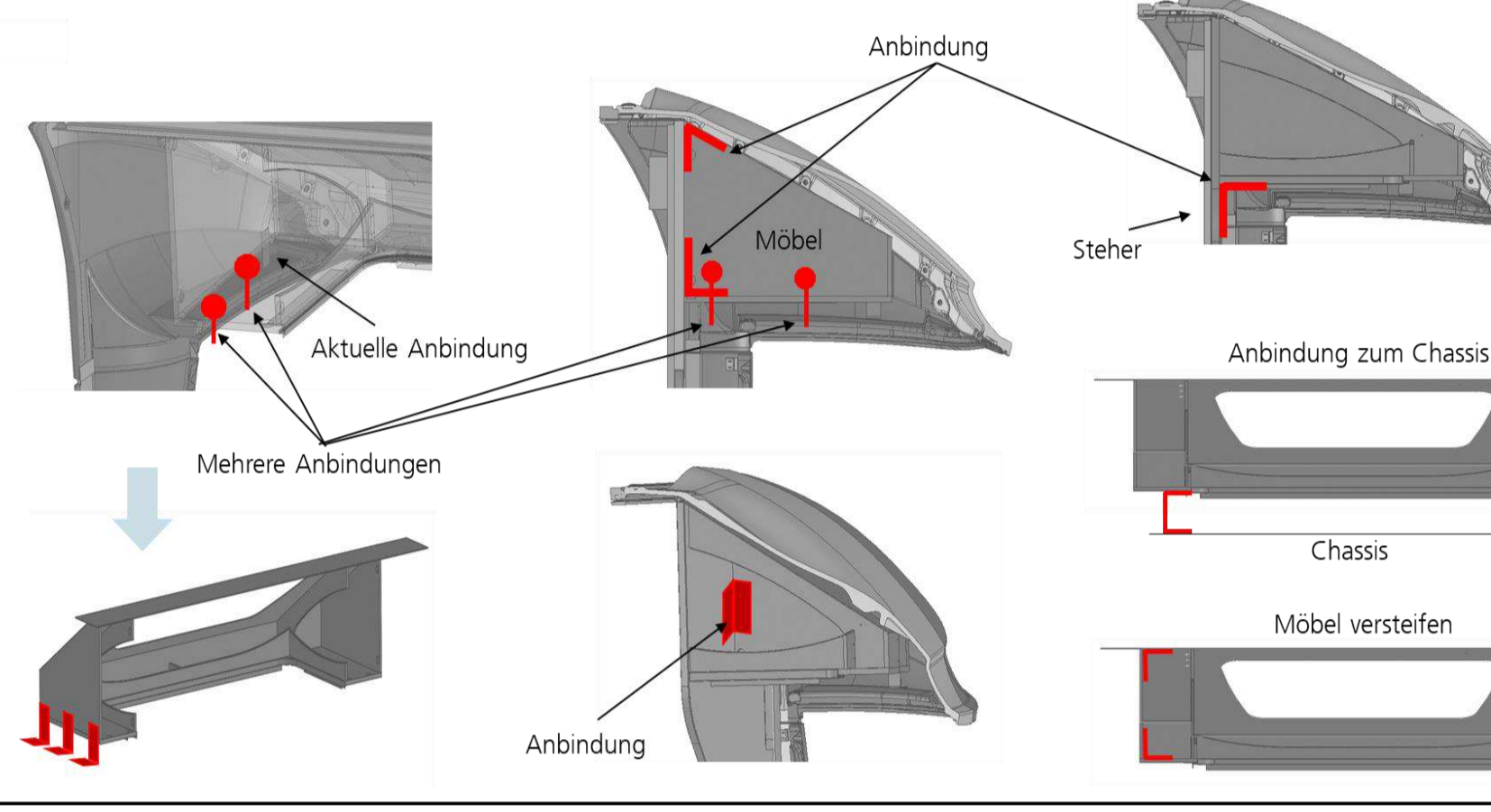

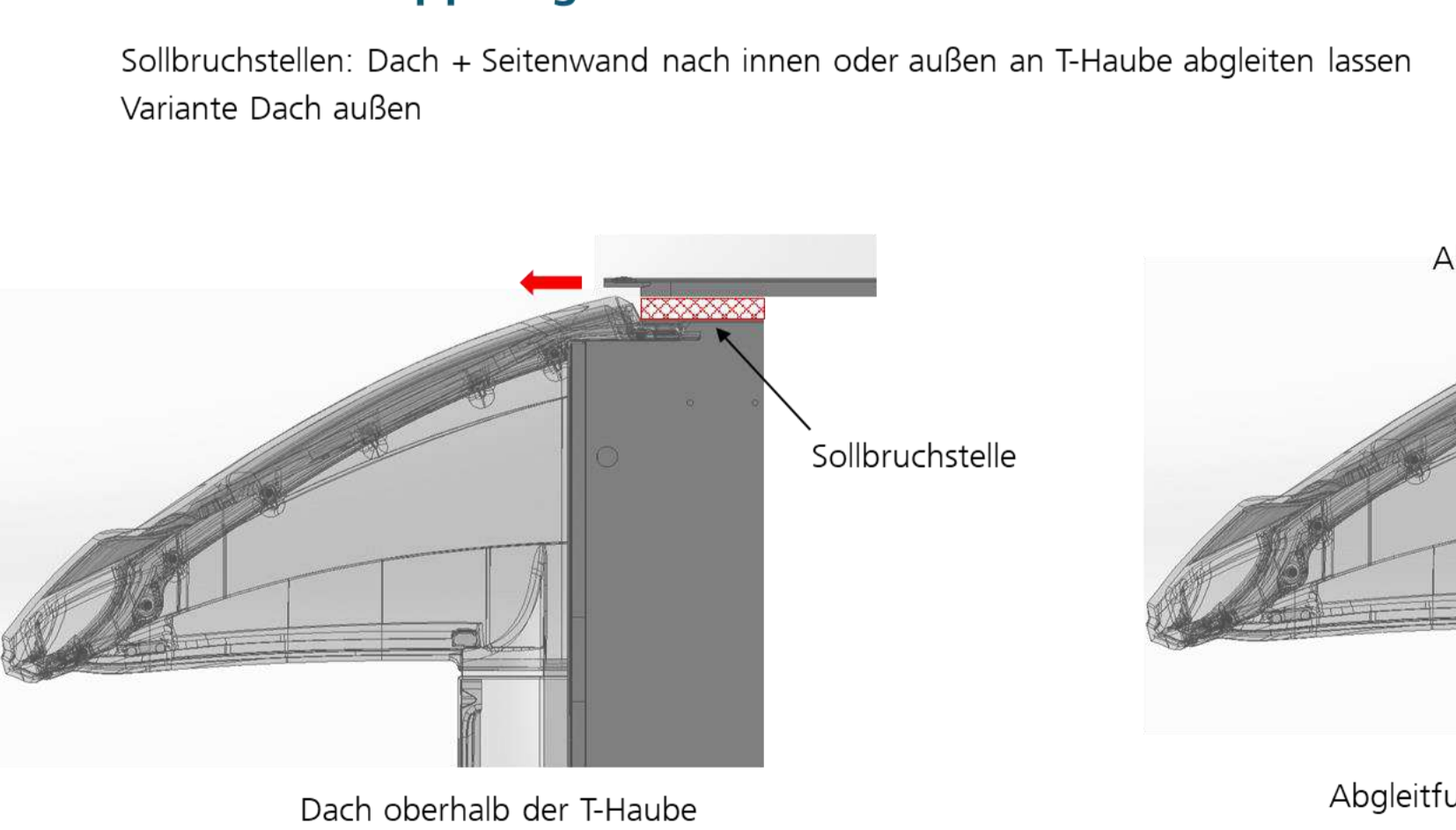
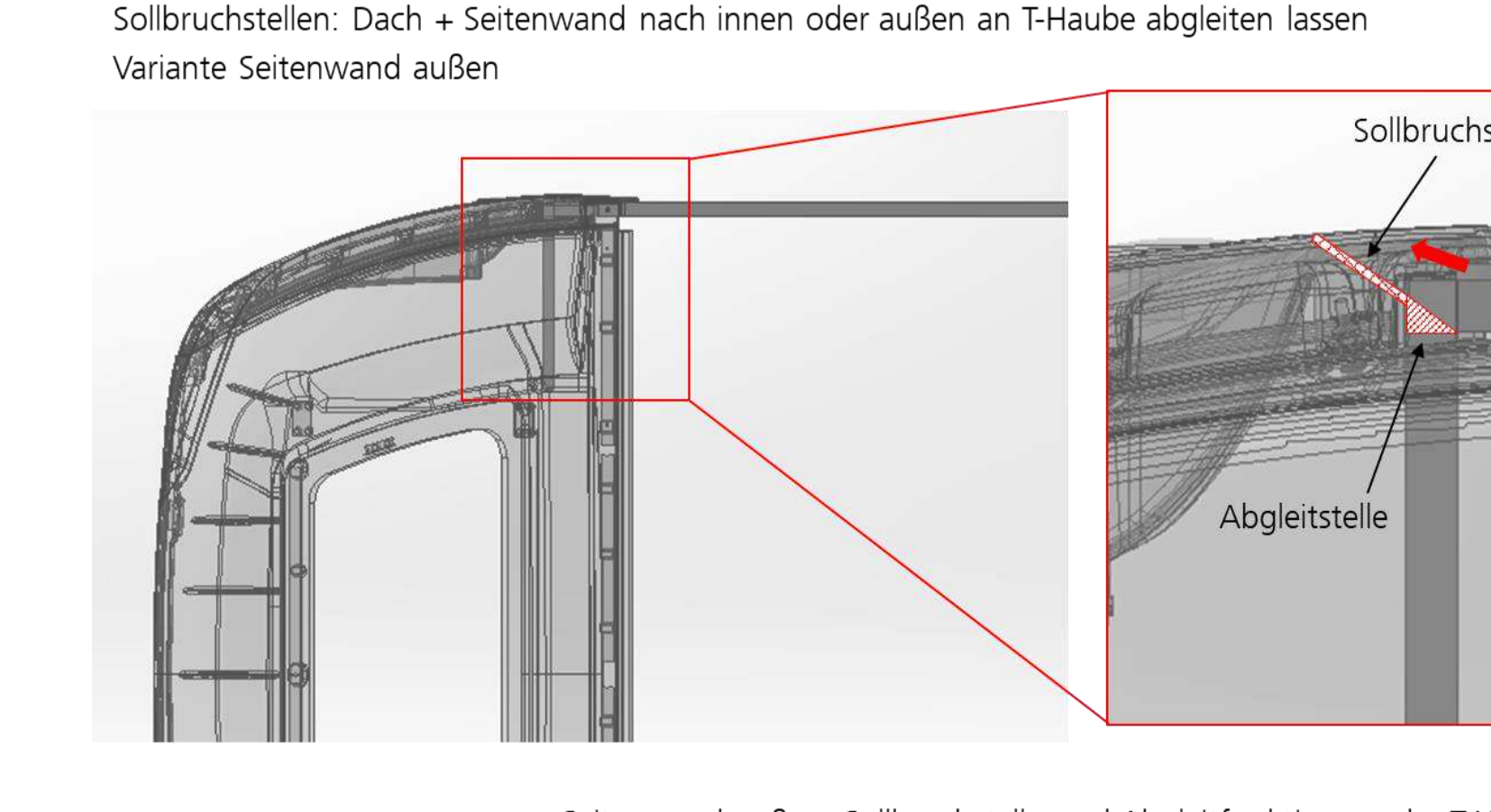
B-Säule	
Verstärken	




Verbindung B-Säule Seitenwand	
Verstärkung im Bereich der B-Säule (Pole Blocker)	

Verbindungen / Montagereihenfolge:

- 1: Boden-Steher-B-Säule
- 2: Boden-Leiterrahmen
- 3: Boden-Möbel/Interieur
- 4: Seitenwand-Boden
- 5: Seitenwand-Steher-B-Säule
- 6: Seitenwand-Möbel/Interieur
- 7: Heckwand-Boden
- 8: T-Haube-Triebkopf
- 9: T-Haube-Seitenwand
- 10: Dach-Seitenwände
- 11: Dach-T-Haube
- 12: Dach-Heckwand
- 13: Dach-Triebkopf
- 14: Dach-Steher
- 15: Dach-Möbel/Interieur



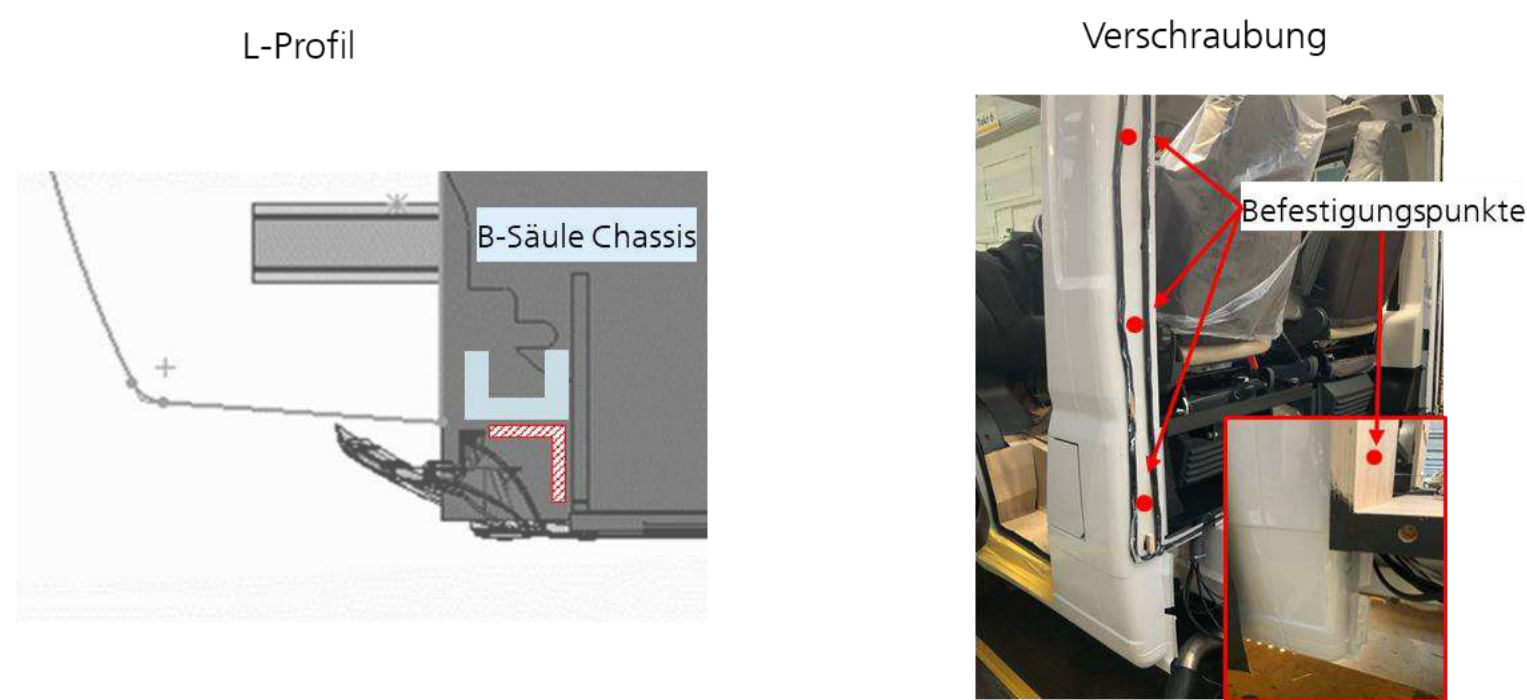
Fahrzeugbereich	Altran-Empfehlungen	Kommentare IWU	Aktuelle Ausführung relevanter Verbindungen	Maßnahme - Vorschläge IWU
T-Haube	Stiffigkeit erhöhen	<p>Struktur der T-Haube ändern -> steifer (z.B. durch Rippen) oder nachgiebiger (z.B. Sollbruchstellen, Wandstärkenänderung)</p> <p>Einbettungsmatrix der T-Haube ändern -> zähere Matrix, z.B. Thermoplast -> Technologieänderung notwendig</p> <p>Anbindung der T-Haube versteifen</p> <p>direkte Anbindung zu Steher schaffen</p> <p>direkte Anbindung zu Sicherheitszelle (Abschlussprofil Dach)</p> <p>Achtung: Steifigkeitserhöhung kann kontraproduktiv sein (höhere g-Kräfte)</p> <p>T-Haube entkoppeln (z.B. gummielastische Anbindung, Sollbruchstellen etc.)</p> <p>größere Energieabsorption auch durch höhere Nachgiebigkeit realisierbar</p> <p>größere Verschiebungen zulassen</p> <p>Kraftfluss ändern</p> <p>aktuell: von Dach + SW über T-Haube auf Chassis</p> <p>Maßnahme: von Dach + SW direkt in Chassis einleiten</p>	<p>8: T-Haube - Triebkopf (+ Möbel) - 8 x geschraubt von unten durch Chassis + Dichtmasse</p>  <p>9: T-Haube - Seitenwand -> von oben in Seitenwand geschraubt + Dichtmasse</p> <p>11: Dach - T-Haube -> 12 x geschraubt + Dichtmasse</p>  <p>14: Dach - Steher -> aktuell keine Verbindung</p>	<p>1. T-Haube: Zusätzliche Rippen innen</p> <ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche Rippen T-Haube-Rippen in Möbel integrieren (Möbelkonzept ändern) T-Form-Rippen / I-Profil Voraussetzung Möbelkonzept anpassbar  <p>2. T-Haube: Zusätzliche Rippen von außen</p> <ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche Rippen T-Form-Rippen  <p>3. T-Haube: Möbelanbindung versteifen</p>  <p>4. T-Haube: Versteifendes Skelett</p> <ul style="list-style-type: none"> Pultrudierte CFK-Profil - Lätzsch Knotenelemente - Lakowa Indirekte Verbindung der T-Haube und des Stehers über Skelett / Chassis  <p>5. T-Haube: Direkte Verbindung zum Steher</p>  <p>6. T-Haube: Entkopplung durch Pufferelement</p> <p>Pufferelement: Elastisch oder Knautschzone</p>  <p>7. T-Haube: Entkopplung durch Sollbruchstelle</p> <p>Sollbruchstellen: Dach + Seitenwand nach innen oder außen an T-Haube abgleiten lassen</p> <p>Variante Dach außen</p>  <p>Sollbruchstellen: Dach + Seitenwand nach innen oder außen an T-Haube abgleiten lassen</p> <p>Variante Seitenwand außen</p> 

Leiterrahmen	Verstärkung im Bereich der B-Säule (Pole Blocker)	aktuell entkoppelt: keine Verbindung zwischen Steher und B-Säule im unteren Bereich, zwischen Steher und Boden 2 Schrauben, 2 Dübel und Dichtmasse Direkte Verbindung zwischen Steher und B-Säule bzw. Boden	
B-Säule	Verstärken	Verbindung Steher zu B-Säule versteifen Zusätzliche Montagepunkte Anbindung über FKV-L-Profil	
Verbindung B-Säule Seitenwand	Verstärkung im Bereich der B-Säule (Pole Blocker)	Verbindung Steher-SW ändern (Krafteinleitung über gesamte B-Säulenhöhe) durchgängiges FKV-Profil in Steher zusätzliche Krafteinleitungselemente Schürzen als krafteitendes Element nutzen Struktur der Schürzen versteifen Verbindung SW-Schürze-B-Säule anpassen	

1. B-Säule: Winkel zwischen Chassis und Steher auf Bodenhöhe



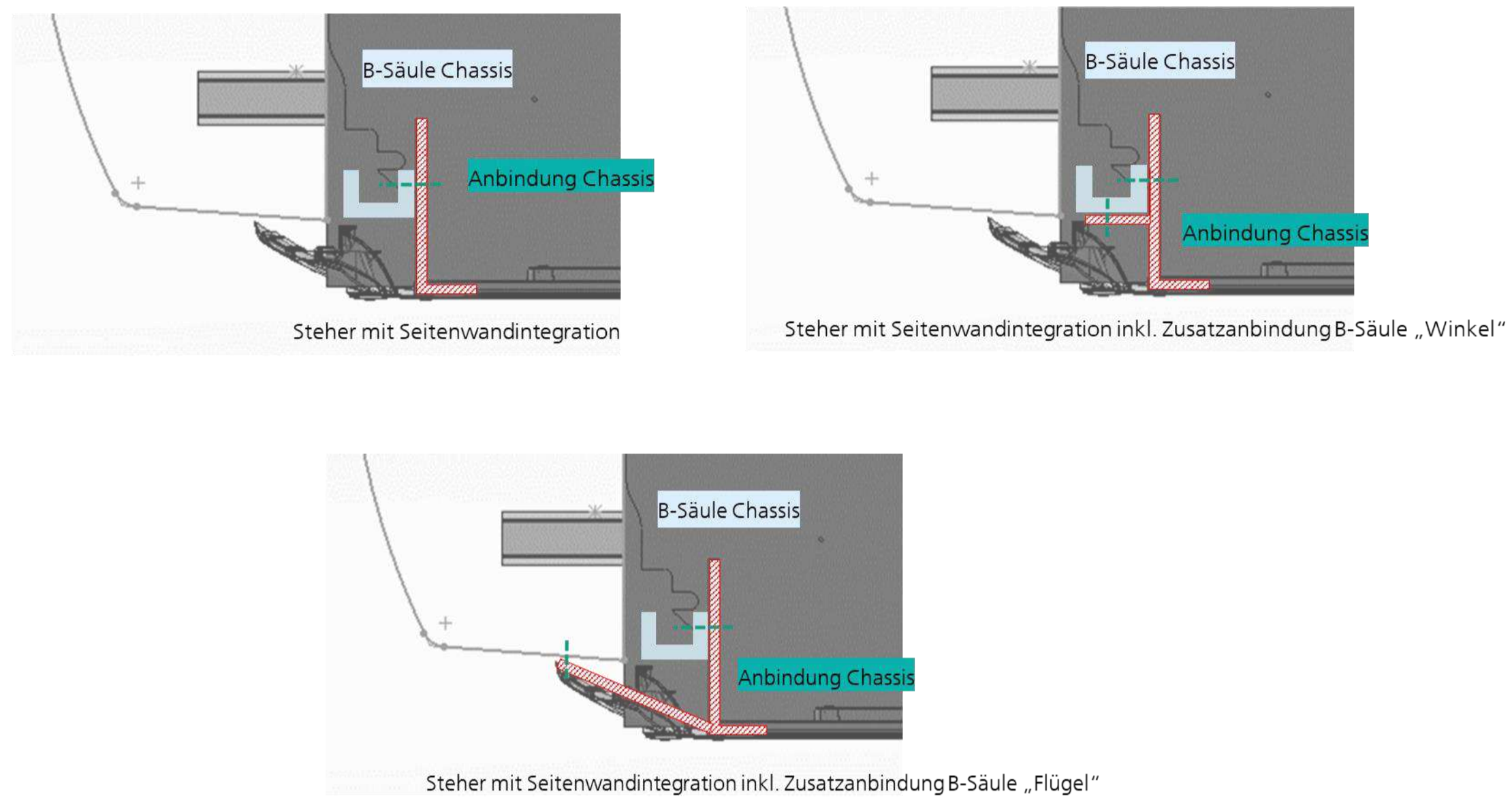
2. B-Säule: Direkte Verbindung zwischen Chassis und Steher



3. B-Säule: Neugestaltung des Stehers

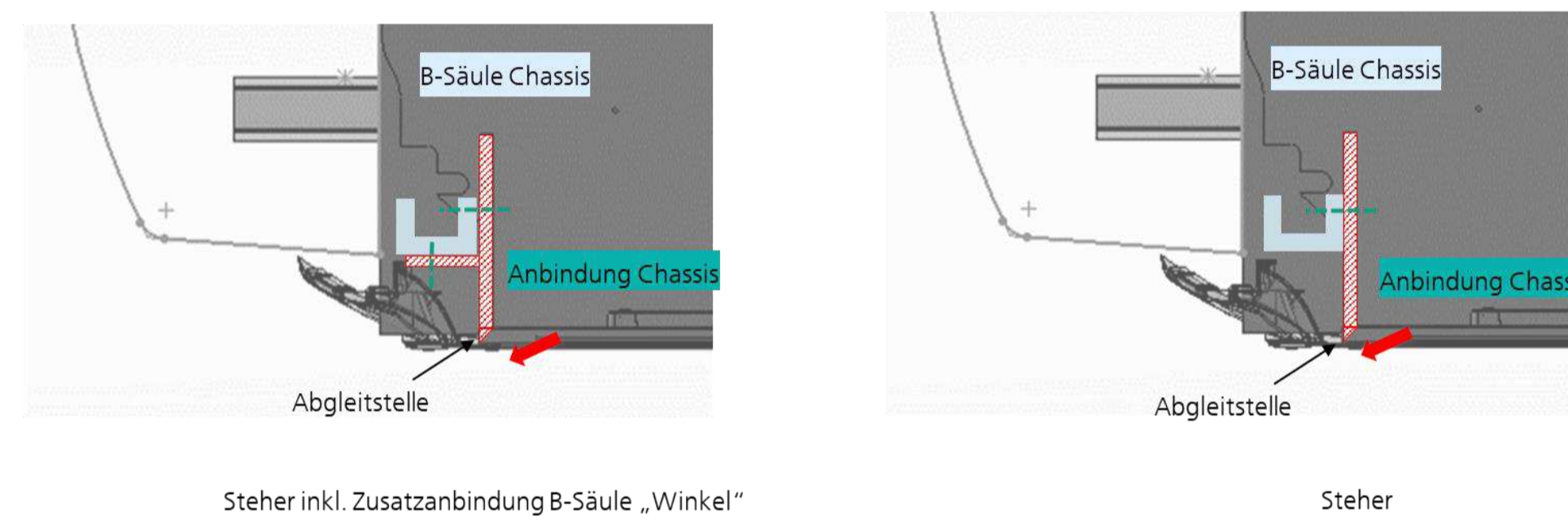
Beachte: Türblockade durch Seitenwand nach Crash
-> Seitenwand durch neuen Steher (L- oder T-Profil) abfangen

Sandwich -> Lakowa
GFK bzw. CFK pultrudiertes Profil -> Lätzsch



Beachte: Türblockade durch Seitenwand nach Crash
-> Abgleitfunktion für die Seitenwand

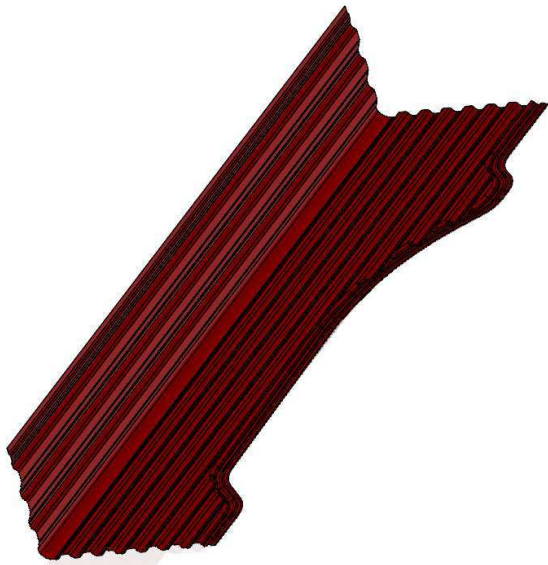
Sandwich -> Lakowa
GFK bzw. CFK pultrudiertes Profil -> Lätzsch



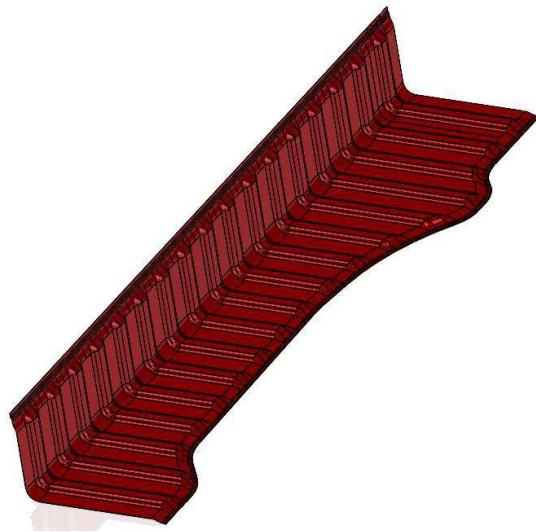
Anhang A

- Entwurf Werkzeugkonzept LSE

Entwurf Presswerkzeuge zur Fertigung Bauteil „Steher“
 Bauteilabmessungen ca. 2095 x 480 x 275mm, Wandstärke 1,2mm

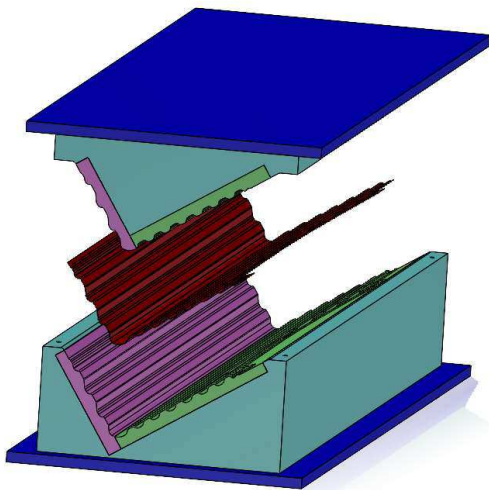


Bauteil Typ 1

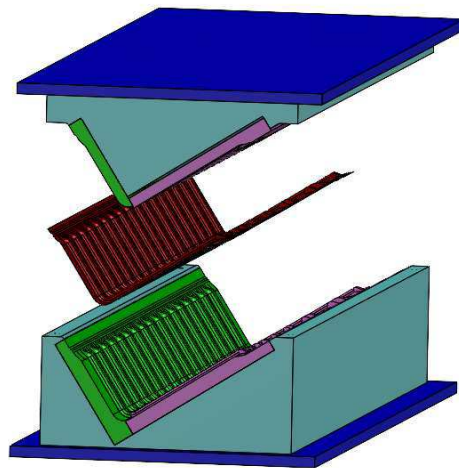


Bauteil Typ 2

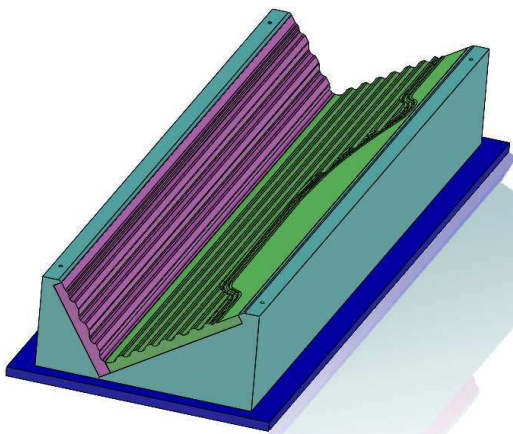
Bauteilfertigung mit einem Presswerkzeug mit Wechseleinsätzen für das Bauteil Typ 1+2



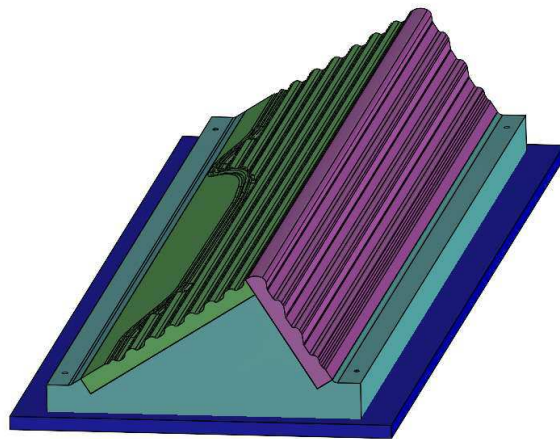
Bauteil Typ 1



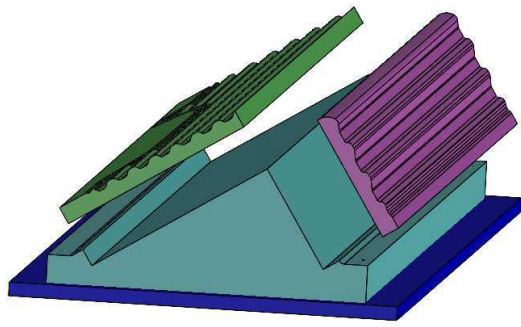
Bauteil Typ 2



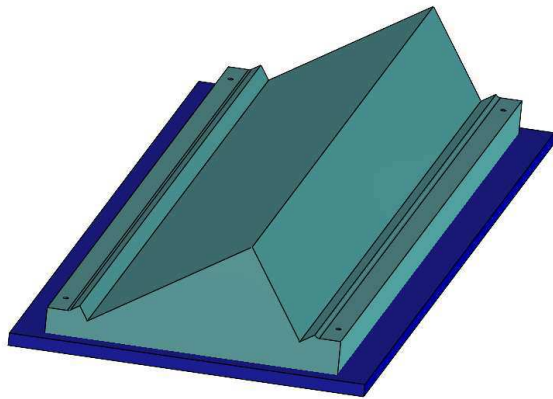
Bauteil Typ 1 Matrize mit Wechseleinsätzen



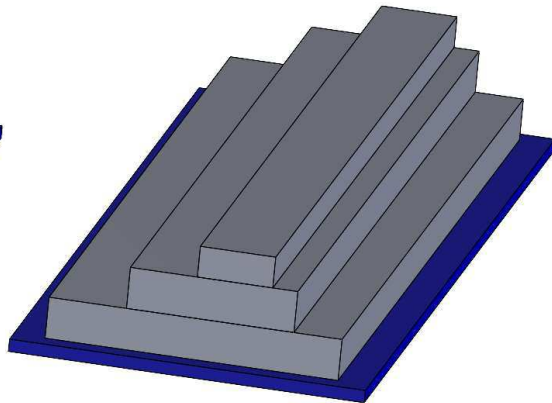
Bauteil Typ 1 Stempel mit Wechseleinsätzen



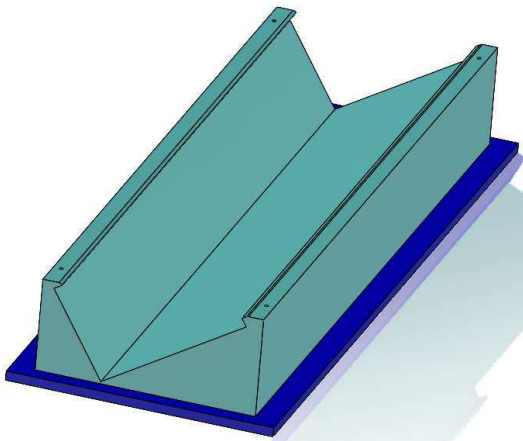
Prinzip Darstellung des Einbau der Wechseleinsätze



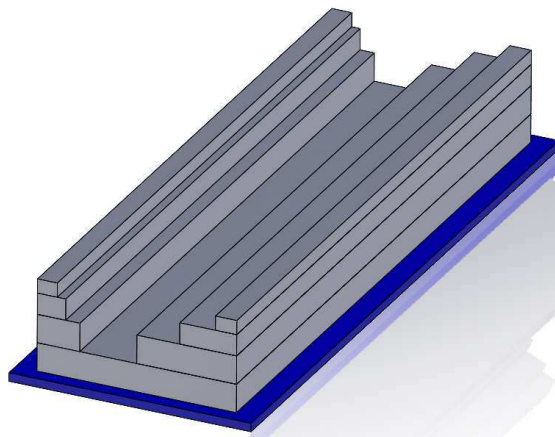
Hauptform Stempel



Rohblock für Hauptform Stempel



Hauptform Matritze



Rohblock für Hauptform Matritze

Materialbedarf:

Hauptform Stempel Ureol 275 Liter

Hauptform Matritze Ureol 330 Liter

2x Grundplatte 2300 x 850 x 30mm

4 x Wechseleinsätze für Bauteil Typ 1 Blockmaterial mit hoher Dichte 180 Liter

4 x Wechseleinsätze für Bauteil Typ 2 Blockmaterial mit hoher Dichte 210 Liter

Anhang B

- IWU Materialprüfungen faserverstärkt

Dr.-Ing. Ondrej Kotera, Dipl.-Ing. Marc Luginsland

Geplante Untersuchungen von mechanischen Eigenschaften
innerhalb des Projektes CaraSave

Agenda

Bestimmung von mechanischen Kennwerten

Zur Charakterisierung von mechanischen Eigenschaften der ausgewählten Verstärkungsprofile sollen an Probekörpern folgende Versuche durchgeführt werden:

- Zug-, Druck- und Biegeversuch (Normalspannungen, quasistatische Belastung)
- Schubversuch (Schubspannung, quasistatische Belastung)
- Schlagversuch (dynamische Belastung)

Bestimmung von Zugeigenschaften nach DIN EN ISO 527-5: 2009, Teil 5:

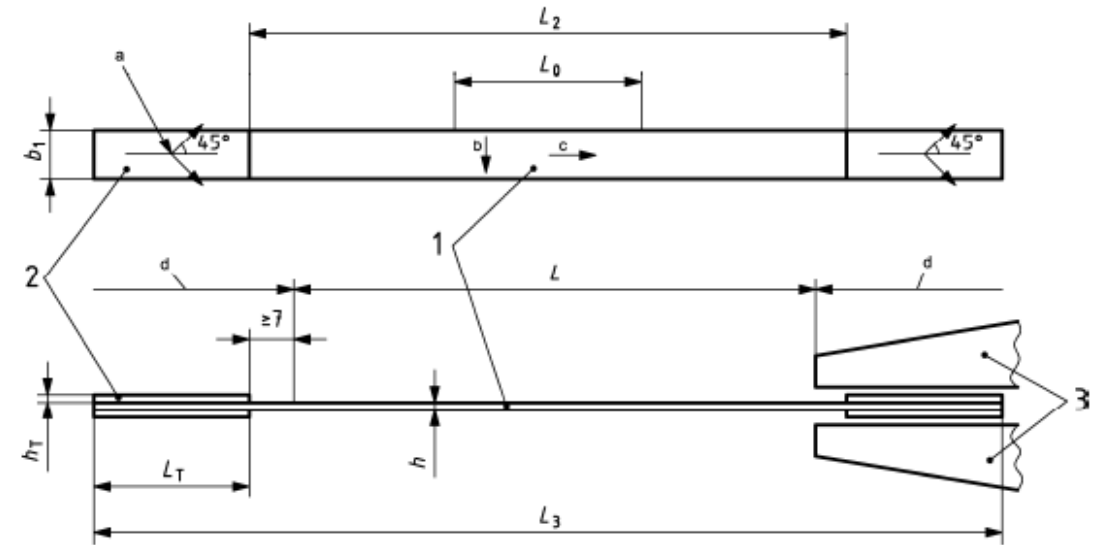
Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe

Die DIN EN ISO 527-5 ist für alle unidirektional faserverstärkten Polymermatrixsysteme geeignet, die den in diesem Teil von ISO 527 angegebenen Anforderungen, einschließlich Ausfallart, entsprechen.

Das Verfahren ist geeignet für sowohl thermoplastische als auch duroplastische Verbundwerkstoffe, einschließlich vorimprägnierter Materialien (Prepregs). Die Verstärkung umfasst Kohlenstofffasern, Glasfasern, Aramidfasern und andere ähnliche Fasern. Die Verstärkungsgeometrien umfassen unidirektionale (d. h. vollständig ausgerichtete) Fasern und Rovings und unidirektionale Gewebe und Bänder.

Als Ergebnis werden folgende Kennwerte bestimmt:

- **Spannungs-Dehnungs-Diagramm**
- **Zugfestigkeit** σ_M [MPa]
- **Zugdehnung** ϵ [-]
- **Elastizitätsmodul aus dem Zugversuch** E [MPa]



Abmessungen in mm

		Typ A	Typ B
L_3	Gesamtlänge	250	250
L_2	Abstand zwischen den Krafteinleitungselementen	150 ± 1	150 ± 1
b_1	Breite	$15 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
h	Dicke	$1 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$
L_0	Messlänge (für Längenänderungsmesseinrichtungen empfohlen)	50 ± 1	50 ± 1
L	Anfangsabstand zwischen den Klemmen (nominal)	136	136
L_T	Länge der Krafteinleitungselemente	> 50	> 50
h_T	Dicke der Krafteinleitungselemente	0,5 bis 2	0,5 bis 2

Bestimmung von Druckeigenschaften nach DIN EN ISO 14126:1999

Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene

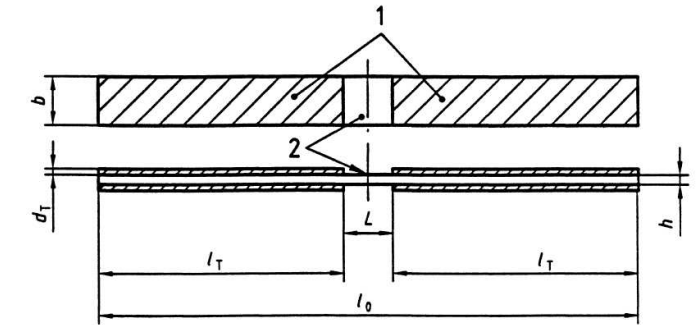
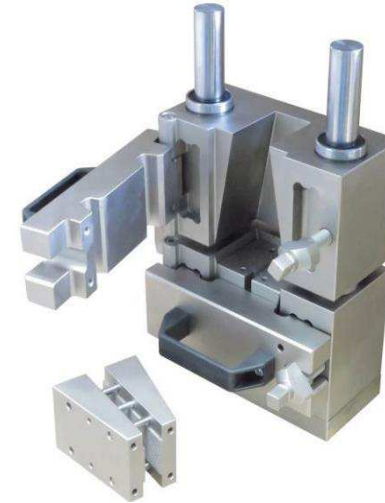
Die DIN EN ISO 14126:1999 legt zwei Verfahren zur Bestimmung der Druckeigenschaften parallel zur Laminierungsebene von faserverstärkten Kunststoffen fest. Angewendet wird dabei:

- Verfahren 1: Scherbeanspruchung des Probekörpers (Einspannlänge nicht unterstützt) und der Probekörper Typ A: rechteckiger Querschnitt, feststehende Dicke, mit Aufleimern,

Der Probekörper A wird für unidirektional verstärkte Werkstoffe bevorzugt, die parallel zur Faserrichtung geprüft werden. Für andere Werkstoffe dürfen die Probekörper- Typen A oder B verwendet werden. Probekörper der Größe B2 wird für Matten, Gewebe und multidirektional verstärkte Werkstoffe bevorzugt.

Das Verfahren ist geeignet für sowohl thermoplastische als auch duroplastische Verbundwerkstoffe, einschließlich vorimprägnierter Materialien (Prepregs). Die Verstärkung umfasst Kohlenstofffasern, Glasfasern, Aramidfasern und andere ähnliche Fasern. Als Ergebnis werden folgende Kennwerte bestimmt:

- **Druckfestigkeit** σ_{cM} [MPa]



Abmessungen in mm

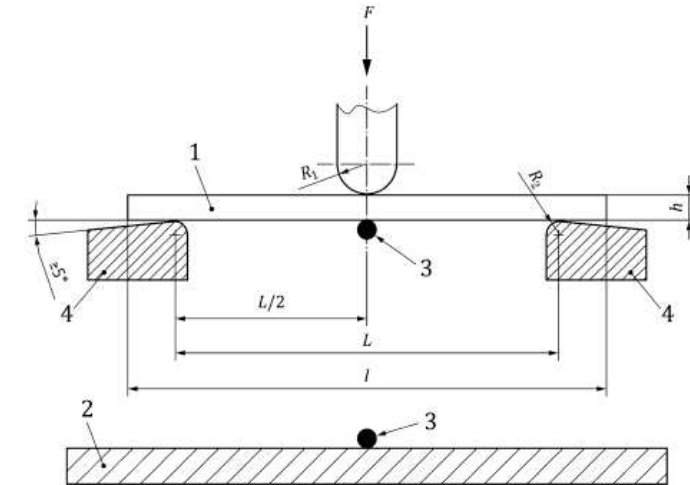
		Typ A	Typ B1	Typ B2
l_0	Gesamtlänge (mindestens)	110 ± 1	110 ± 1	125 ± 1
h	Breite	2 ± 0,2	2 ± 0,2 bis 10 ± 0,2	≥ 4
b	Dicke	10 ± 0,5	10 ± 0,5	25 ± 0,5
L	Abstand zwischen den Aufleimern /Klemmen	10	10	25
l_t	Länge der Aufleimer (mindestens)	50	50 (falls verlangt)	50 (falls verlangt)
d_t	Dicke der Aufleimer	1	0,5 – 2 (falls verlangt)	0,5 – 2 (falls verlangt)

Bestimmung von Biegeeigenschaften nach DIN EN ISO 178: 2019

Das Verfahren wird für die Untersuchung des Biegeverhaltens der Probekörper und für die Bestimmung der Biegefestigkeit, des Biegemoduls und anderer Gesichtspunkte der Beziehung Biegespannung/Biegedehnung unter den definierten Bedingungen eingesetzt. Es bezieht sich auf einen frei unterstützten Biegebalken, der mittig belastet wird (Dreipunkt-Biegeversuch).

Die DIN EN ISO 178 ist zur Anwendung u.a. auf duroplastische Formmassen, einschließlich gefüllter und verstärkter Compounds sowie duroplastische Platten geeignet. Als Ergebnis werden folgende Kennwerte bestimmt:

- **Spannungs-Dehnungs-Diagramm**
- **Biegefestigkeit** σ_{fM} [MPa]
- **Biegedehnung** ε_f [-]
- **Biege-Elastizitätsmodul** E_f [MPa]



Abmessungen in mm

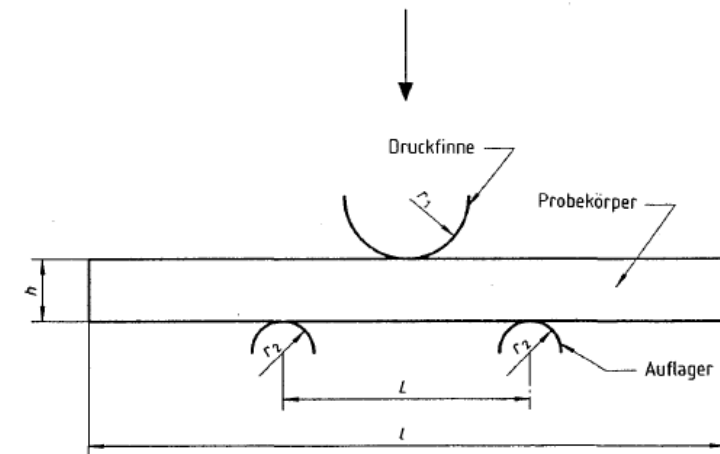
l	Gesamtlänge	80 ± 2
h	Breite	10 ± 0,2
b	Dicke	4 ± 0,2
L	Auflagerabstand	(16 ± 1)h

Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken nach ISO 14130: 1997

Das Verfahren ist anwendbar auf faserverstärkte Kunststoffe, mit duroplastischer und thermoplastischer Matrix, vorausgesetzt, daß ein Versagen durch interlaminare Scherung hervorgerufen wird.

Das Verfahren ist zur Festlegung konstruktiver Größen ungeeignet, darf jedoch zur Vorauswahl von Werkstoffen oder zur Qualitätskontrolle verwendet werden. Als Ergebnis werden folgende Kennwerte bestimmt:

- **Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit τ_M [MPa]**



Abmessungen in mm

l	Gesamtlänge	20 ± 1
b	Breite	$10 \pm 0,2$
h	Dicke	$2 \pm 0,2$
L	Auflagerabstand	5h

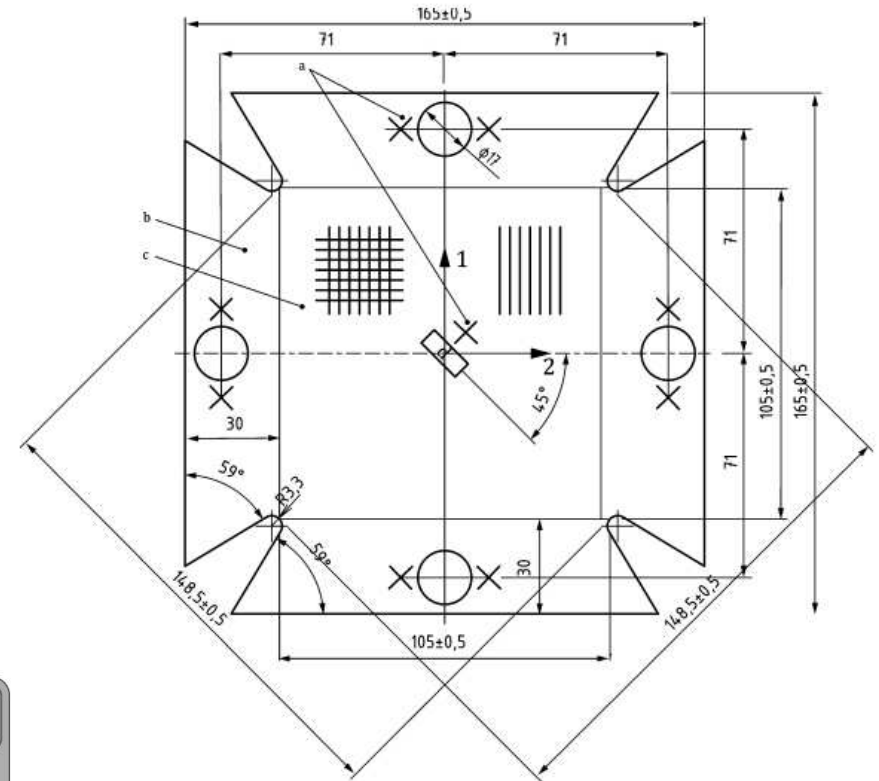
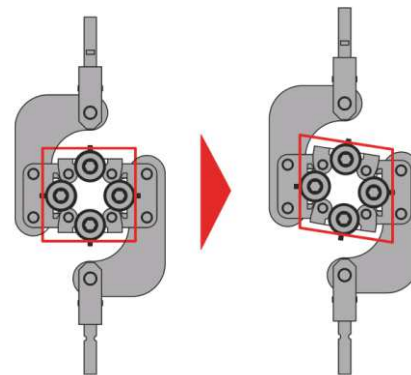
Bestimmung der Schubspannungs-/Schubverformungskurve und des Schubmoduls in der Lagenebene mittels Schubrahmen (DIN EN ISO 20337:2020-01)

Maße in Millimeter

Das Verfahren ist anwendbar auf Laminat, die aus einer thermoplastischen oder duroplastischen Grundmasse und aus unidirektionalen Lagen/Gelegen und/oder Geweben einschließlich unidirektionaler Gewebe mit einer Faserorientierung in 0° bzw. $0^\circ/90^\circ$ zur Probekörperachse bestehen. Der Laminataufbau muss symmetrisch und ausgeglichen um die Mittelebene des Probekörpers gestaltet werden.

Das Verfahren ist für die Bestimmung der Schubeigenschaften sowohl im linearen als auch im nicht-linearen Last-Verformungs-Bereich bei Schubverformungen auch über 5 % geeignet. Als Ergebnis werden folgende Kennwerte bestimmt:

- **Schubspannungs-/Schubverformungs-Kurve**
- **Schubspannung** τ_{12} [MPa]
- **Schubverformung** γ_{12} [-]
- **Schubmodul aus dem Schubversuch** G_{12} [MPa]



Abmessungen in mm

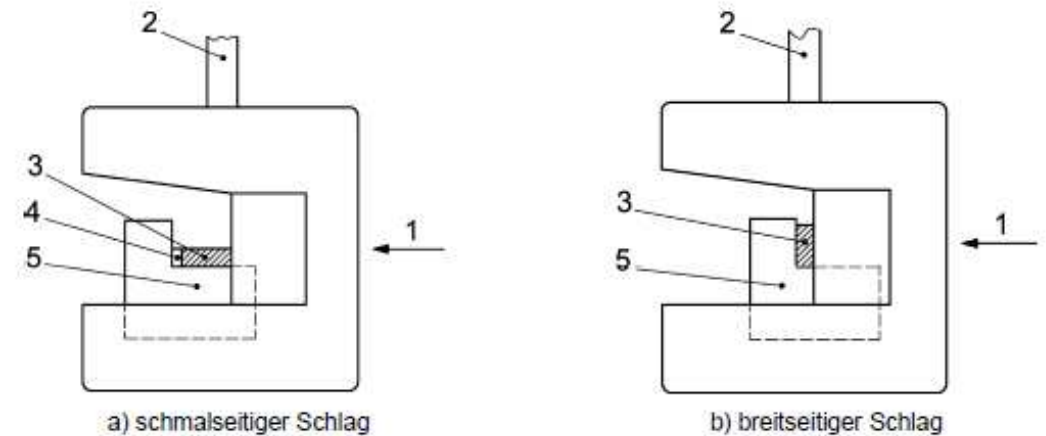
l	Länge	$165 \pm 0,5$
b	Breite	$165 \pm 0,5$
h	Dicke	$2 \dots 4 \pm 0,1$

Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften nach ISO 179-1: 2010

Das Prüfverfahren kann angewendet werden, um das Verhalten festgelegter Probekörpertypen bei den festgelegten Schlagbedingungen zu untersuchen und die Sprödigkeit oder Zähigkeit von Probekörpern innerhalb der Grenzen der Prüfbedingungen zu beurteilen.

Das Prüfverfahren ist zur Anwendung u.a. auf faserverstärkte duroplastische und thermoplastische Verbundwerkstoffe mit unidirektionaler oder multi- direktionaler Verstärkung (wie Matten, Gewebe, Rovinggewebe, Kurzfasern, verbundene und Hybrid- verstärkungen, Rovings und gemahlene Fasern) oder Verbundplatten aus vorimprägnierten Werkstoffen (Prepregs), einschließlich gefüllter und verstärkter Verbundwerkstoffe geeignet.

- **Charpy-Schlagzähigkeit a_{cU} [kJ.m⁻²]**



Abmessungen in mm

		Typ 1
l	Gesamtlänge	80 ± 2
h	Breite	10 ± 0,2
b	Dicke	4 ± 0,2
L	Auflagerabstand	62

Anhang C

- IWU Materialprüfungen Thermoplaste

Dr.-Ing. Ondrej Kotera

Geplante Untersuchungen von mechanischen Eigenschaften innerhalb des Projektes CaraSave

Teil 2: Thermoplastische Kunststoffe

Agenda

Bestimmung von mechanischen Kennwerten

Zur Charakterisierung von mechanischen Eigenschaften der ausgewählten thermoplastischen Materialien sollen an Probekörpern folgende Versuche durchgeführt werden:

- Zug-, Druck- und Biegeversuch (Normalspannungen, quasistatische Belastung)
- Schubversuch (Schubspannung, quasistatische Belastung)
- Schlagversuch (dynamische Belastung)

Bestimmung von Zugeigenschaften nach DIN EN ISO 527-1, 2: 2009

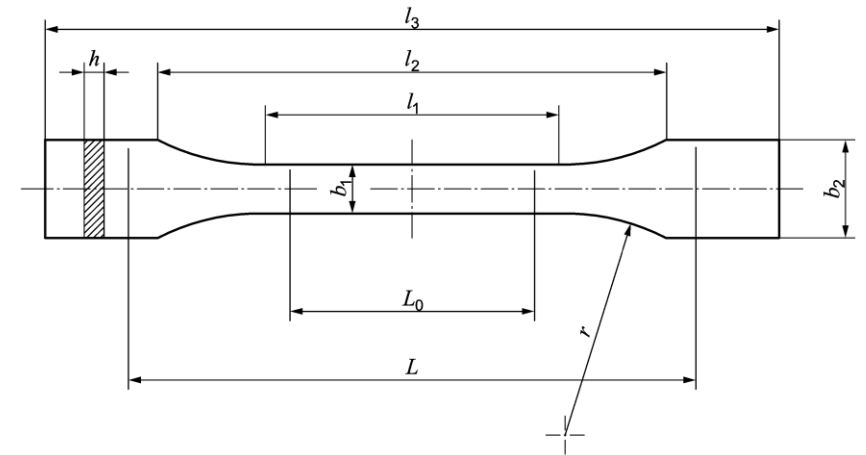
Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe

Das Verfahren wird verwendet, um das Zugverformungsverhalten von Probekörpern zu untersuchen und die Zugfestigkeit, den Zugmodul und andere Gesichtspunkte der Zugspannungs-/Dehnungs-Beziehung unter festgelegten Bedingungen zu ermitteln.

Das Verfahren ist geeignet für sowohl thermoplastische als auch duroplastische Verbundwerkstoffe, einschließlich vorimprägnierter Materialien (Prepregs). Die Verstärkung umfasst Kohlenstofffasern, Glasfasern, Aramidfasern und andere ähnliche Fasern. Die Verstärkungsgeometrien umfassen unidirektionale (d. h. vollständig ausgerichtete) Fasern und Rovings und unidirektionale Gewebe und Bänder.

Als Ergebnis werden folgende Kennwerte bestimmt:

- **Spannungs-Dehnungs-Diagramm**
- **Zugfestigkeit** σ_M [MPa]
- **Zugdehnung** ϵ [-]
- **Elastizitätsmodul aus dem Zugversuch** E [MPa]



Abmessungen in mm

		Typ 1A	Typ 1B
l_3	Gesamtlänge	170	≥ 150
l_1	Länge des engen parallelen Teils	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r	Radius	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Breite an den Enden	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Breite des engen Teils	$10 \pm 0,2$	
h	Bevorzugte Dicke	$4 \pm 0,2$	
L_0	Messlänge (bevorzugt) Messlänge (zulässig auf Anforderung für die Qualitätskontrolle oder wenn festgelegt)	$75,0 \pm 0,5$ $50,0 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
L	Anfangsabstand der Klemmen	115 ± 1	115 ± 1

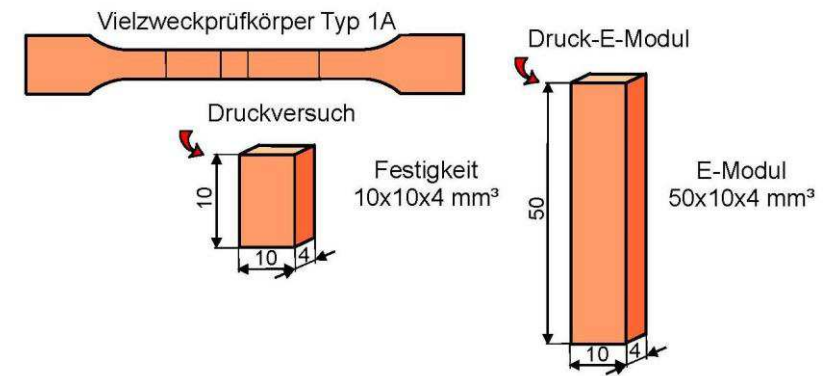
Bestimmung von Druckeigenschaften nach EN ISO 604: 2002

Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene

Die EN ISO 604:2002 legt ein Verfahren zur Ermittlung der Druckeigenschaften parallel von Kunststoffen unter definierten Bedingungen fest. Das Verfahren wird für die Untersuchung des Druckverhaltens und für die Bestimmung von:

- **Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm**
- **Druckfestigkeit** σ_{cM} [MPa]
- **Nominelle Stauchung bei Druckfestigkeit [-]**
- **Elastizitätsmodul aus dem Druckversuch E [MPa]**

unter definierten Bedingungen verwendet.



Abmessungen in mm

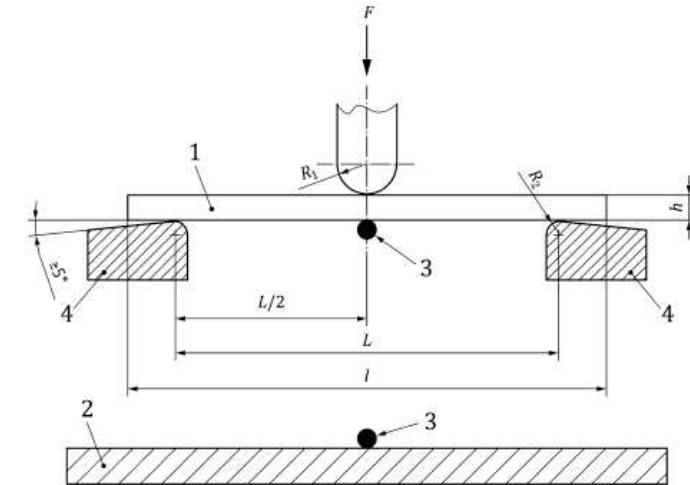
		Typ A	Typ B
	Bestimmung von	Modul	Festigkeit
l	Länge	50 ± 2	10 ± 0,2
b	Breite	10 ± 0,2	
h	Dicke	4 ± 0,2	

Bestimmung von Biegeeigenschaften nach DIN EN ISO 178: 2019

Das Verfahren wird für die Untersuchung des Biegeverhaltens der Probekörper und für die Bestimmung der Biegefestigkeit, des Biegemoduls und anderer Gesichtspunkte der Beziehung Biegespannung/Biegedehnung unter den definierten Bedingungen eingesetzt. Es bezieht sich auf einen frei unterstützten Biegebalken, der mittig belastet wird (Dreipunkt-Biegeversuch).

Die DIN EN ISO 178 ist zur Anwendung u.a. auf duroplastische Formmassen, einschließlich gefüllter und verstärkter Compounds sowie duroplastische Platten geeignet. Als Ergebnis werden folgende Kennwerte bestimmt:

- **Spannungs-Dehnungs-Diagramm**
- **Biegefestigkeit** σ_{fM} [MPa]
- **Biegedehnung** ε_f [-]
- **Biege-Elastizitätsmodul** E_f [MPa]



Abmessungen in mm

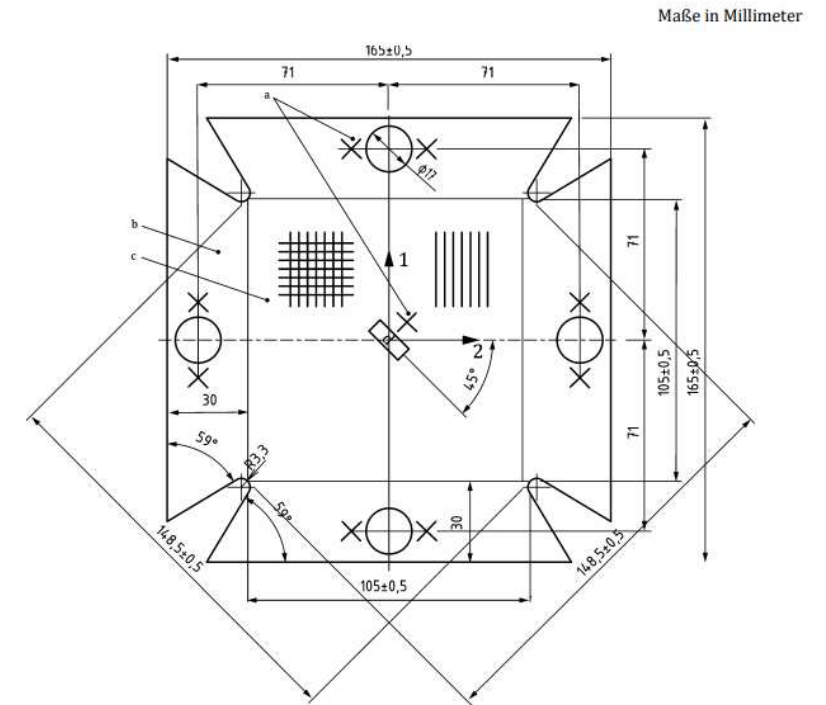
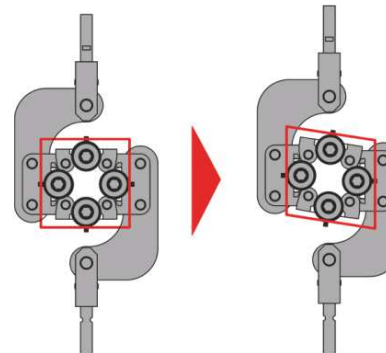
l	Gesamtlänge	80 ± 2
h	Breite	10 ± 0,2
b	Dicke	4 ± 0,2
L	Auflagerabstand	(16 ± 1)h

Bestimmung der Schubspannungs-/Schubverformungskurve und des Schubmoduls in der Lagenebene mittels Schubrahmen (DIN EN ISO 20337:2020-01)

Das Verfahren ist anwendbar auf Laminat, die aus einer thermoplastischen oder duroplastischen Grundmasse und aus unidirektionalen Lagen/Gelegen und/oder Geweben einschließlich unidirektionaler Gewebe mit einer Faserorientierung in 0 bzw. 0 °/90 zur Probekörperachse bestehen. Der Laminataufbau muss symmetrisch und ausgeglichen um die Mittelebene des Probekörpers gestaltet werden.

Das Verfahren ist für die Bestimmung der Schubeigenschaften sowohl im linearen als auch im nicht linearen Last Verformungs Bereich bei Schubverformungen auch über 5 % geeignet. Als Ergebnis werden folgende Kennwerte bestimmt:

- Schubspannungs-Schubverformungs Kurve
- Schubspannung τ_{12} [MPa]
- Schubverformung γ_{12} [-]
- Schubmodul aus dem Schubversuch G_{12} [MPa]



Abmessungen in mm

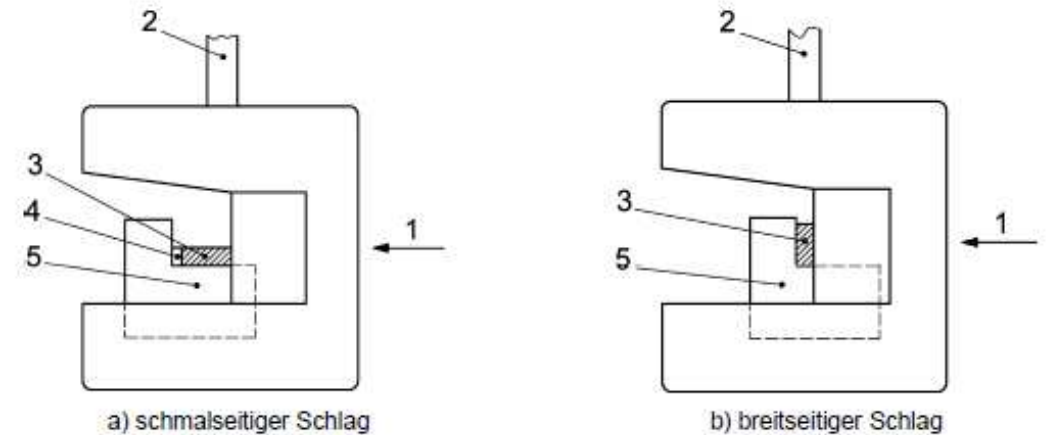
l	Länge	165 ± 0,5
b	Breite	165 ± 0,5
h	Dicke	2..4 ± 0,1

Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften nach ISO 179-1: 2010

Das Prüfverfahren kann angewendet werden, um das Verhalten festgelegter Probekörpertypen bei den festgelegten Schlagbedingungen zu untersuchen und die Sprödigkeit oder Zähigkeit von Probekörpern innerhalb der Grenzen der Prüfbedingungen zu beurteilen.

Das Prüfverfahren ist zur Anwendung u.a. auf faserverstärkte duroplastische und thermoplastische Verbundwerkstoffe mit unidirektionaler oder multi- direktionaler Verstärkung (wie Matten, Gewebe, Rovinggewebe, Kurzfasern, verbundene und Hybrid- verstärkungen, Rovings und gemahlene Fasern) oder Verbundplatten aus vorimprägnierten Werkstoffen (Prepregs), einschließlich gefüllter und verstärkter Verbundwerkstoffe geeignet.

- **Charpy-Schlagzähigkeit a_{cU} [kJ.m⁻²]**



Abmessungen in mm

		Typ 1
l	Gesamtlänge	80 ± 2
h	Breite	10 ± 0,2
b	Dicke	4 ± 0,2
L	Auflagerabstand	62

Anhang D

- Schlussbericht des Fraunhofer IWU - Teilprojekt: Crashknoten

Schlussbericht CaraSave

Entwicklung eines crashsicheren Leichtbaufahrzeugaufbaus für Reisemobile

Teilprojekt: Crashknoten

Verfasser: Sven Meißner, Patryk Nossol, Marc Luginsland

Auftragnehmer (AN):

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz

Auftraggeber (AG):

LAKOWA - Gesellschaft für Kunst-
stoffbe- & -verarbeitung mbH
Dresdener Straße 25
02681 Wilthen

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
1.1	Zielstellung	3
1.2	Teilaufgaben	3
2	Projektergebnisse	4
AP 2.2	Materialcharakterisierung unter Berücksichtigung von richtungsabhängigem Werkstoffverhalten für ausgewählte FKV-Materialien	4
AP 2.3	Erstellung und Validierung von Materialkarten für FE-Simulation auf Prüfkörperebene	11
3	Zusammenfassung	15

1 Aufgabenstellung

1.1 Zielstellung

Zielstellung und innovativer Kern des BMWK-Kooperationsprojektes CaraSave ist die Entwicklung eines skalierbaren und leichtbaugerechten Fahrzeugaufbaus mit einer deutlich erhöhten Crash-Sicherheit für Reisemobile bei gleichbleibender Fahrzeugmasse. Zur wirtschaftlichen Herstellung des in bestehende Fahrzeuge integrierbaren Crashmoduls sind angepasste Leichtbauweisen, Fertigungsverfahren und Materialkombinationen aus Faserkunststoffverbunden zu entwickeln. Die Validierung des neuartigen Crashkonzepts erfolgt an Demonstratorfahrzeugen mittels Crashtest. Die weiterhin stark ansteigenden Zulassungszahlen von Reisemobilen erfordern zwingend die Erforschung, Entwicklung und Markteinführung wirtschaftlicher und praxistauglicher Crashstrukturen zur signifikanten Steigerung des Insassenschutzes. Dazu leistet CaraSave einen wichtigen Beitrag.

Folgende wesentliche Einzelziele stehen im Rahmen des Unterauftrags dabei im Vordergrund:

- Kennwertermittlung für Faserverbundmaterialien
- Erstellung von Materialkarten für hochdynamische FE-Simulation
- Validierung der Materialkarten auf Probekörperebene

Auftraggeber (AG) ist die LAKOWA - Gesellschaft für Kunststoffbe- & -verarbeitung mbH und Auftragnehmer (AN) das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU.

1.2 Teilaufgaben

AP 2.2 Materialcharakterisierung unter Berücksichtigung von richtungsabhängigem Werkstoffverhalten für ausgewählte FKV-Materialien

Im vorangegangenen Arbeitspaket AP 2.1 erfolgte u. a. eine Materialauswahl für Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) Knotenelemente. Im Rahmen des Arbeitspaketes AP 2.2 erfolgt nun eine Materialcharakterisierung solcher favorisierten FKV-Materialien. In Anlehnung an die Normen DIN EN ISO 527, DIN EN ISO 14126 und DIN EN ISO 14129 werden entsprechende Festigkeiten, Steifigkeiten und Dehnungen mittels Zug-, Druck- bzw. Schubversuchen für LS-DYNA-Materialkarten (MAT54 bzw. MAT58) ermittelt. Der AG liefert die durch den AN definierten Probekörper an den AN in entsprechender Menge und Qualität. Die Probekörper (maximal 120 Stck) sind jeweils aus Halbzeugplatten durch den AG mittels geeigneter Schneidtechnik zu entnehmen und entsprechend zu bezeichnen. Um eine statistische Absicherung zu gewährleisten, werden jeweils 10 Proben pro Versuch erforderlich sein.

AP 2.3 Erstellung und Validierung von Materialkarten für FE-Simulation auf Prüfkörperebene

Die in AP2.2 ermittelten Kennwerte für zwei Materialien werden in LS-DYNA-Materialkarten (MAT054 bzw. MAT058) implementiert. Es erfolgt die FE-Modellierung und Simulation eines ausgewählten Versuchs, zwecks Validierung. Hierzu ist eine Gesamtzahl von bis zu 140 Simu-

lationsläufen für zwei Bruchmodelloptimierungen vorgesehen. Im Weiteren sollen diese Materialarten für die rechtechnische Dimensionierung der Crashmodul-Knotenelemente dienen (AP2.5).

2 Projektergebnisse

AP 2.2 Materialcharakterisierung unter Berücksichtigung von richtungsabhängigem Werkstoffverhalten für ausgewählte FKV-Materialien

Das AP beinhaltet die Ermittlung der quasistatischen und hochdynamischen Kennwerte für den in AP 2.1 ausgewählten mehrlagigen glasfaserverstärkten Acrylnitril-Butadien-Styrol (GF-ABS) Verbund und das unverstärkte, Polymethylmethacrylat (PMMA)-beschichtete Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS). Hierfür wurden die richtungsabhängigen quasistatischen Eigenschaften durch Zug-, Druck- und Schubversuche sowie die dynamischen Kennwerte im Rahmen eines instrumentierten Schlagversuches ermittelt.

Durchführung der Zugprüfungen:

GF-ABS

Die Prüfbedingungen sind wie folgt festgelegt: Die Prüfnorm, die zur Anwendung kommt, ist die DIN EN ISO 527-5. Die Prüfung erfolgt mit einer Universalprüfmaschine des Typs Inspekt 100 kN Hegewald & Peschke. Die Prüfbedingungen sehen ein Klima von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45 % rH vor. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 bzw. 2 mm/min. Zur Dehnungsmessung werden sowohl optische Methoden zur Erfassung der Querdehnung als auch taktile Verfahren zur Bestimmung der Längsdehnung eingesetzt. Für die Prüfung werden Probekörper des Typs A für 0°-Verbundorientierung bzw. des Typs B für 90°-Verbundorientierung verwendet. Die Probekörpergeometrien sowie der Prüfaufbau sind Abb. 1 bzw. Tab. 1 zu entnehmen. Die Versagensbilder und Messverläufe der Einzelproben sind in Abb. 2 dokumentiert.

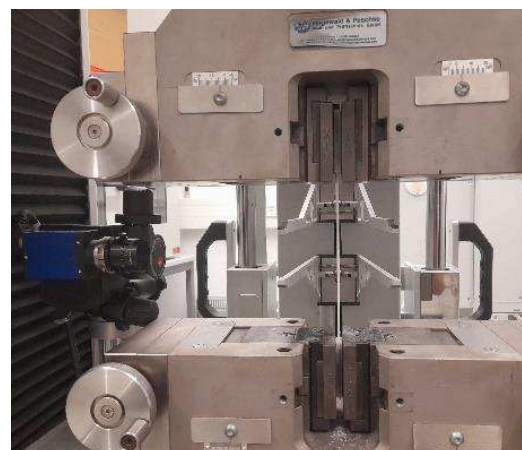
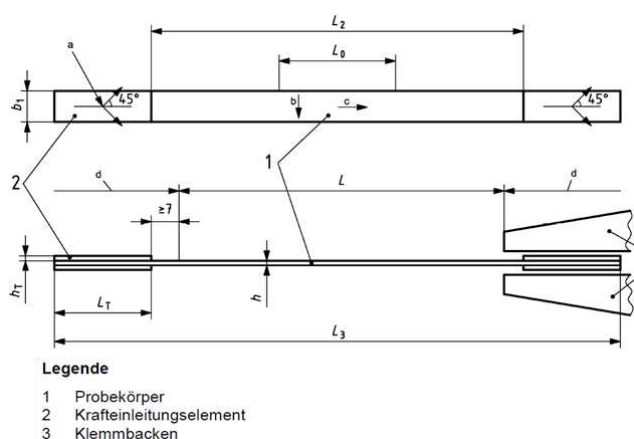


Abb. 1: Probekörpergeometrie (li.) und exemplarische Darstellung des Zugversuches nach DIN EN ISO 527-5: Einspannung an der Prüfmaschine (re.)

Tab. 1: Abmessungen der Probekörper für Zugversuch

		Typ A	Typ B
L_3	Gesamtlänge	250	250
L_2	Abstand zwischen den Krafteinleitungselementen	150 ± 1	150 ± 1
b_1	Breite	$15 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
h	Dicke (verwendete Dicke)	$1 \pm 0,2$ ($2 \pm 0,2$)	$2 \pm 0,2$
L_0	Messlänge	50 ± 1	50 ± 1
L	Anfangsabstand zwischen den Klemmen (nominal)	136	136
L_T	Länge der Krafteinleitungselemente	> 50	> 50
h_T	Dicke der Krafteinleitungselemente	0,5 bis 2	0,5 bis 2

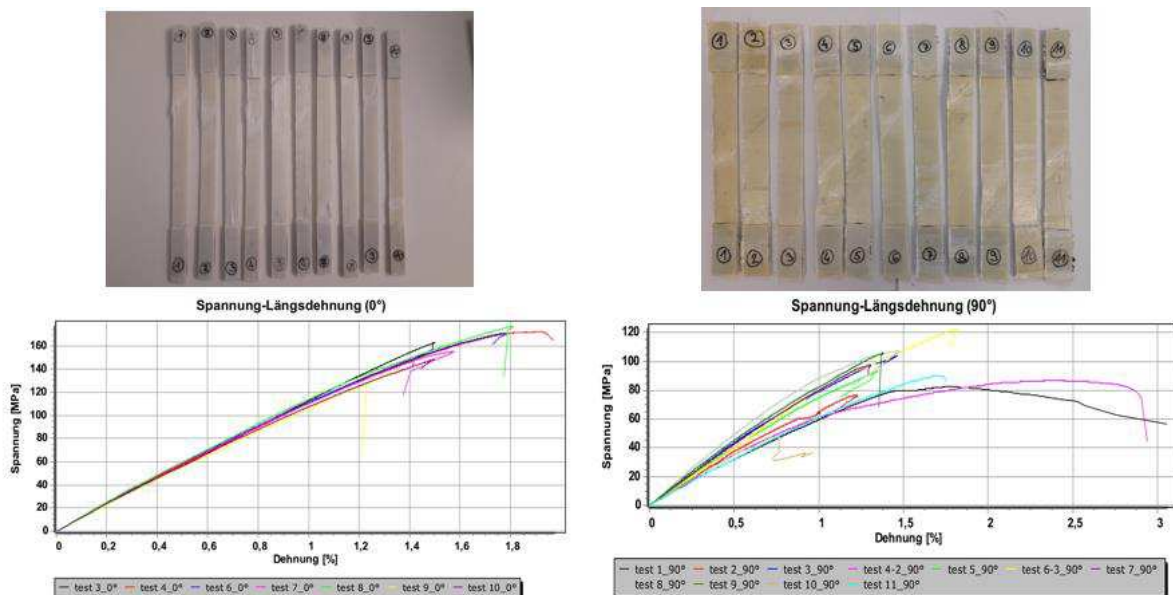


Abb. 2: Schadensbilder (oben) und Messverläufe (unten) der Zugversuche für 0°-Richtung (li.) bzw. 90°-Richtung

ABS

Die Prüfbedingungen sind wie folgt festgelegt: Die Prüfnorm, die zur Anwendung kommt, ist die DIN EN ISO 527-1,2. Die Prüfung erfolgt mit einer Universalprüfmaschine des Typs Inspekt 100 kN Hegewald & Peschke. Die Prüfbedingungen sehen ein Klima von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45% rH vor. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min bzw. 5 mm/min (ab $\epsilon = 0,3$ %). Zur Dehnungsmessung werden sowohl optische Methoden zur Erfassung der Querdehnung als auch taktile Verfahren zur Bestimmung der Längsdehnung eingesetzt. Für die Prüfung werden Probekörper des Typs 1B verwendet. Die Probekörpergeometrien sowie der Prüfaufbau sind Abb. 3 bzw. Tab. 2 zu entnehmen. Die Versagensbilder und Messverläufe der Einzelproben sind in Abb. 4 dokumentiert.

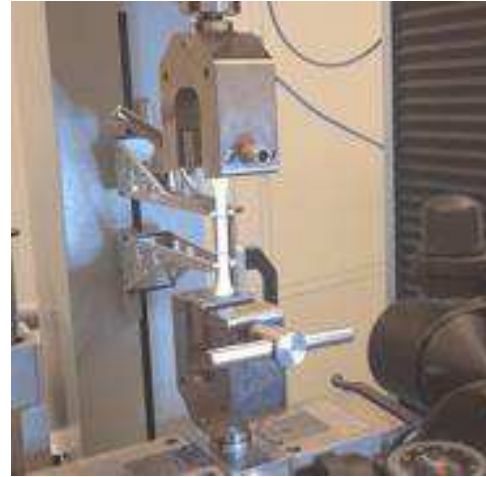
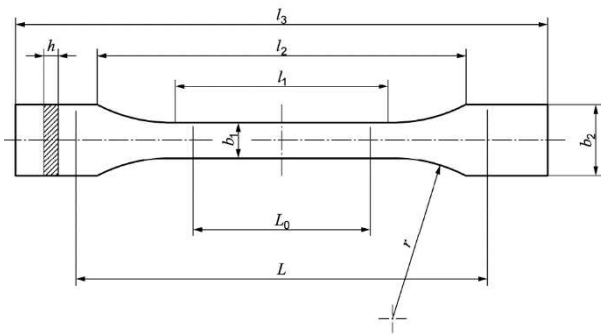


Abb. 3: Probekörpergeometrie (li.) und exemplarische Darstellung des Zugversuches nach DIN EN ISO 527-1,2: Einspannung an der Prüfmaschine (re.)

Tab. 2: Abmessungen der Probekörper für Zugversuch

l_3	Gesamtlänge	150
l_1	Länge des engen parallelen Teils	$60,0 \pm 0,5$
r	Radius	$60,0 \pm 0,5$
l_2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten	$108,0 \pm 1,6$
b_2	Breite an den Enden	$20,0 \pm 0,2$
b_1	Breite des engen Teils	$10,0 \pm 0,2$
h	Bevorzugte / Verwendete Dicke	4 (2)
L_0	Messlänge	$50,0 \pm 0,5$
L	Anfangsabstand der Klemmen	115 ± 1

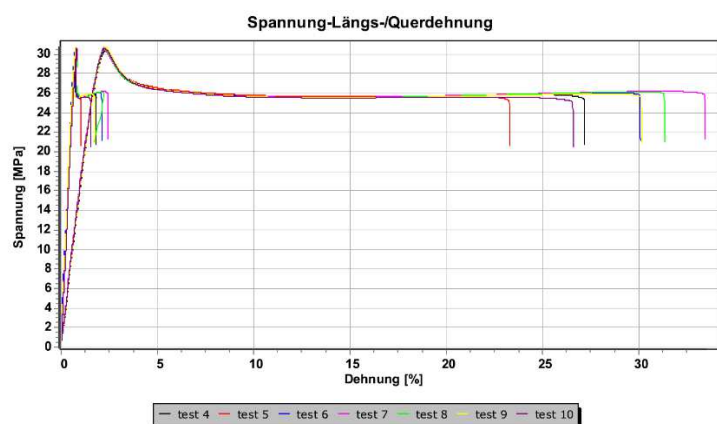
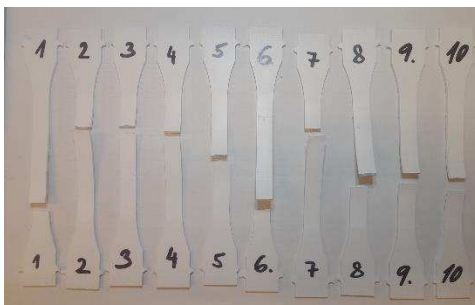


Abb. 4: Schadensbilder (links) und Messverläufe (rechts) der Zugversuche

Durchführung der Druckprüfungen:

GF-ABS

Die Prüfbedingungen sind wie folgt festgelegt: Die Prüfnorm, die zur Anwendung kommt, ist die DIN EN ISO 14126, Verfahren 1. Die Prüfung erfolgt mit einer Universalprüfmaschine des Typs Inspekt 100 kN Hegewald & Peschke. Die Prüfbedingungen sehen ein Klima von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45 % rH vor. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min. Die Dehnungsmessung erfolgt optisch. Für die Prüfung werden Probekörper des Typs A verwendet. Die Probekörpergeometrien sowie der Prüfaufbau sind Abb. 5 bzw. Tab. 3 zu entnehmen. Die Versagensbilder und Messverläufe der Einzelproben sind in Abb. 6 dokumentiert.

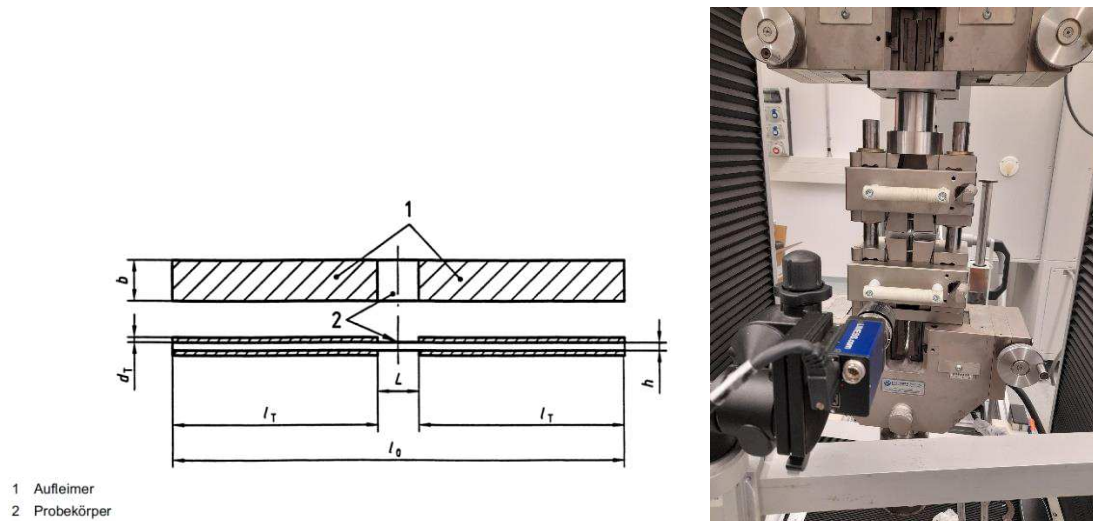


Abb. 5: Probekörpergeometrie (li.) und exemplarische Darstellung des Druckversuches DIN EN ISO 14126: Einspannung an der Prüfmaschine (re.)

Tab. 3: Abmessungen der Probekörper für Druckversuch

Maße	Symbol	Probekörper A
Gesamtlänge (mindestens)	l_0	110 ± 1
Dicke	h	$2 \pm 0,2$
Breite	b	$10 \pm 0,5$
Abstand zwischen den Aufleimern/Klemmen	L	10
Länge der Aufleimer (mindestens)	l_t	50
Dicke der Aufleimer	d_t	1

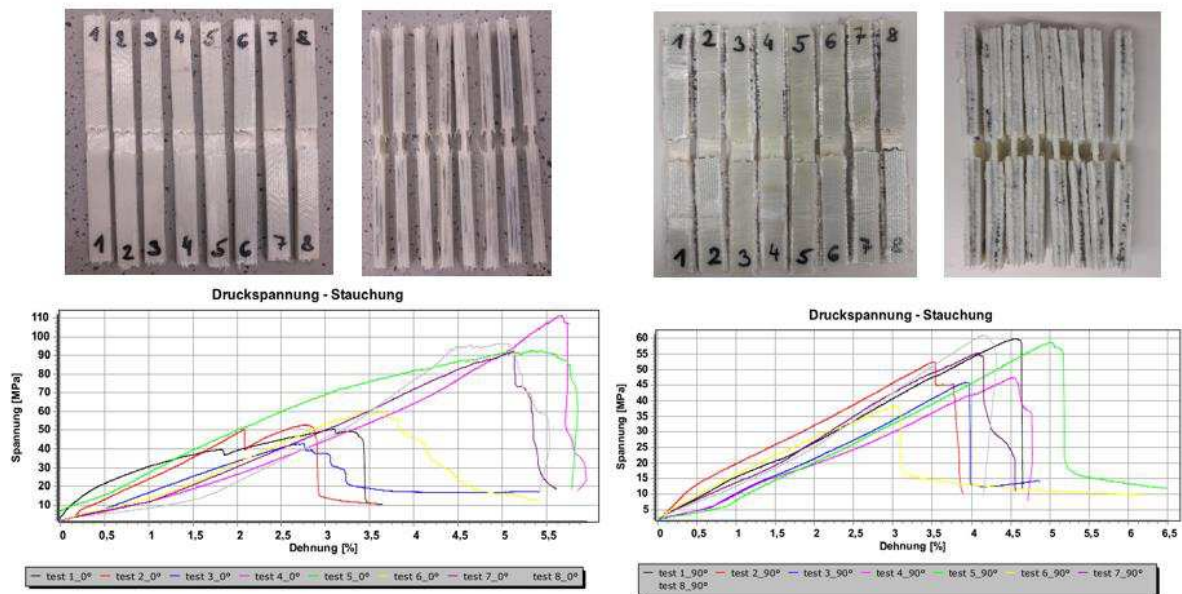


Abb. 6: Schadensbilder (oben) und Messverläufe (unten) der Druckversuche für 0°-Richtung (li.) bzw. 90°-Richtung

ABS

Die Prüfbedingungen sind wie folgt festgelegt: Die Prüfnorm, die zur Anwendung kommt, ist die DIN EN ISO 604. Die Prüfung erfolgt mit einer Universalprüfmaschine des Typs Inspekt 100 kN Hegewald & Peschke. Die Prüfbedingungen sehen ein Klima von 22 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 42 % rH vor. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min. Für die Prüfung werden prismatische Proben verwendet. Die Probekörpergeometrien sowie der Prüfaufbau sind Abb. 7 bzw. Tab. 4 zu entnehmen. Die Messverläufe der Einzelproben sind in Abb. 8 dokumentiert.

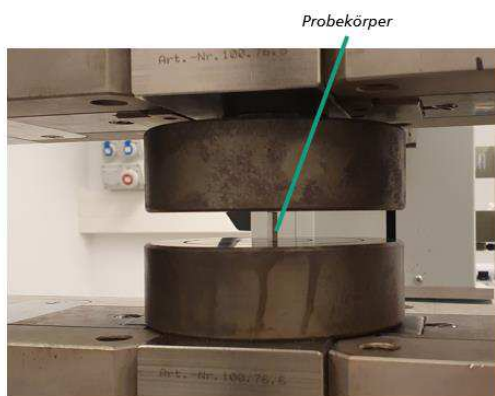


Abb. 7: Exemplarische Darstellung des Druckversuches DIN EN ISO 604: Einspannung an der Prüfmaschine

Tab. 4: Abmessungen der Probekörper für Druckversuch

l	Länge	$10 \pm 0,2$
b	Breite	$10 \pm 0,2$
h	Genormte / verwendete Dicke	$4 \pm 0,2 / 2,09 \pm 0,01$

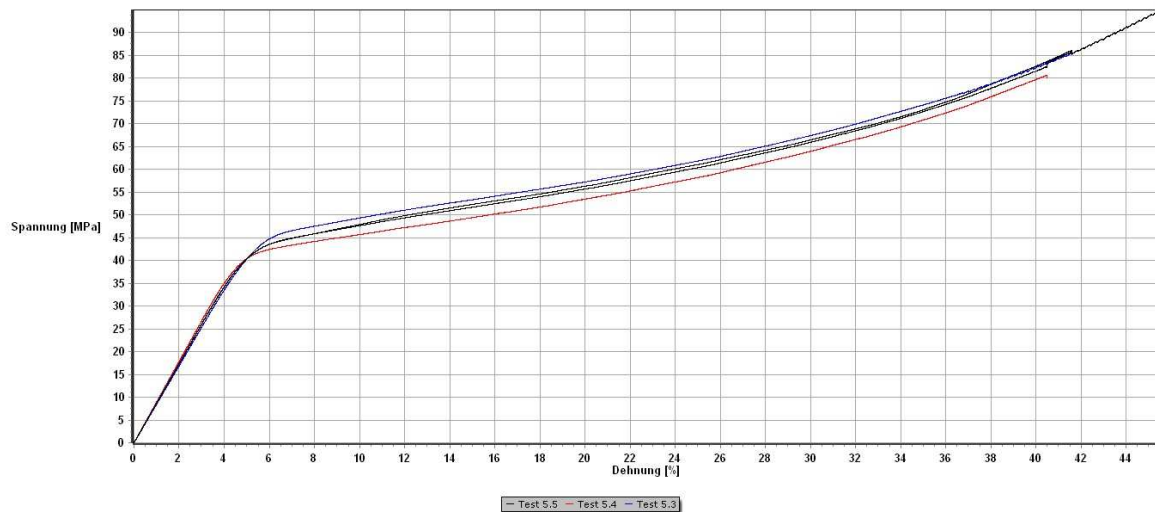


Abb. 8: Messverläufe der Druckversuche

Durchführung der Schubprüfungen:

GF-ABS

Die Prüfbedingungen sind wie folgt festgelegt: Die Prüfnorm, die zur Anwendung kommt, ist die DIN EN ISO 20337. Die Prüfung erfolgt mit einer Universalprüfmaschine des Typs MTS Criterion C45.105, 100 kN. Die Prüfbedingungen sehen ein Klima von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45 % rH vor. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 4 mm/min. Die Dehnungsmessung erfolgt mittels Dehnmessmessstreifen (120 Ohm, $k = 2,08$). Für die Prüfung werden Probekörper mit den äußeren Abmessungen 165 x 165 x 1,65 mm verwendet. Die Probekörpergeometrien sowie der Prüfaufbau sind Abb. 9 zu entnehmen. Die Versagensbilder und Messverläufe der Einzelproben sind in Abb. 10 dokumentiert.

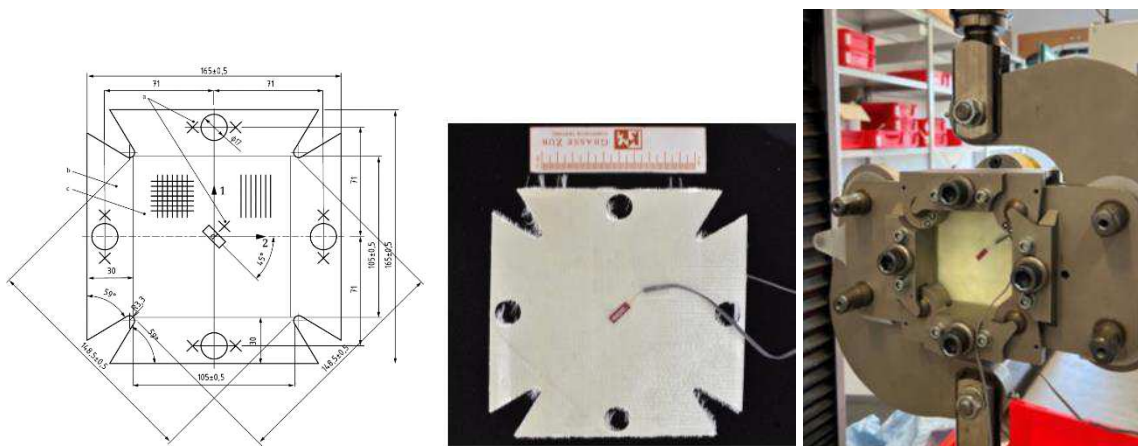


Abb. 9: Probekörpergeometrie (li./ mi.) und exemplarische Darstellung des Schubversuches DIN EN ISO 20337: Einspannung an der Prüfmaschine (re.)

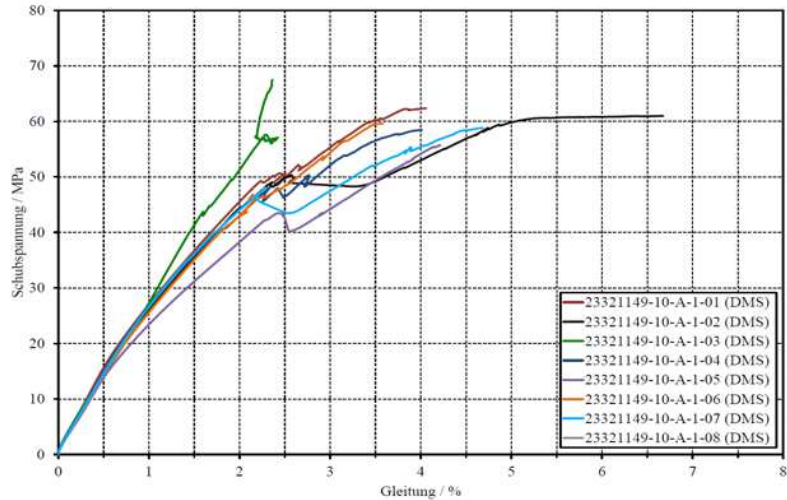
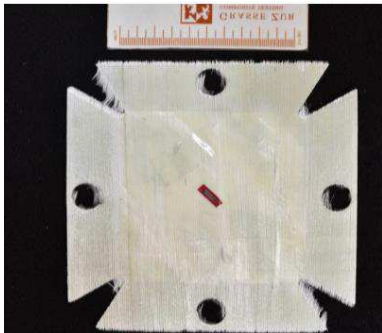


Abb. 10: Exemplarisches Schadensbild (li.) und Messverläufe (re.) der Schubversuche

ABS

Die Prüfbedingungen sind wie folgt festgelegt: Die Prüfnorm, die zur Anwendung kommt, ist die DIN EN ISO 20337. Die Prüfung erfolgt mit einer Universalprüfmaschine des Typs MTS Criterion C45.105, 100 kN. Die Prüfbedingungen sehen ein Klima von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 53 % rH vor. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 4 mm/min. Die Dehnungsmessung erfolgt mittels Dehnmessmessstreifen (120 Ohm, $k = 2,08$). Für die Prüfung werden Probekörper mit den äußeren Abmessungen 165 x 165 x 2,07 mm verwendet. Die Probekörpergeometrien sowie der Prüfaufbau sind Abb. 11 zu entnehmen. Die Versagensbilder und Messverläufe der Einzelproben sind in Abb. 12 dokumentiert.

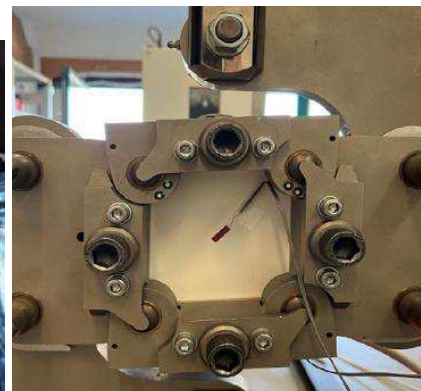
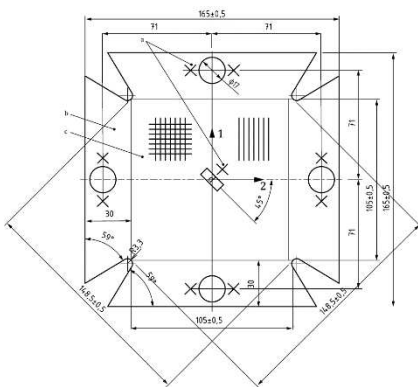


Abb. 11: Probekörpergeometrie (li./ mi.) und exemplarische Darstellung des Schubversuches DIN EN ISO 20337: Einspannung an der Prüfmaschine (re.)

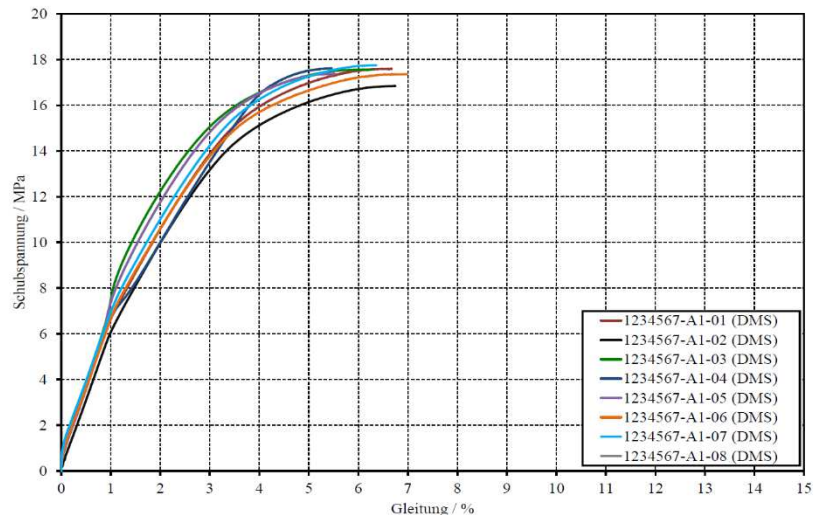
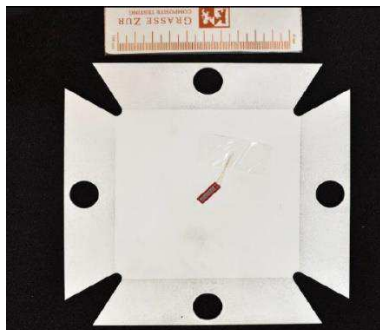


Abb. 12: Exemplarisches Schadensbild (li.) und Messverläufe (re.) der Schubversuche

AP 2.3 Erstellung und Validierung von Materialkarten für FE-Simulation auf Prüfkörperebene

Das Ziel des AP 2.3 ist die Erstellung der Materialkarten, welche weiterführend zur Bruchmodellkalibrierung in AP 2.5 genutzt werden. Für hochdynamische Simulationen stehen im numerischen Software-Tool LS-DYNA diverse Materialmodelle zur Verfügung. Das jeweils geeignete Materialmodell ist basierend auf dem spezifischen Materialverhalten (inkl. Bruchverhalten) auszuwählen.

GF-ABS

Für das GF-ABS wurde die LS-DYNA-spezifische Materialkarte MAT054 erstellt. Hierfür wurden die in AP 2.2 durchgeführten Prüfungen ausgewertet und die erforderlichen Parameter entsprechend Tab. 5 extrahiert. Zur Ergebnisdarstellung kommen Boxplot-Diagramme entsprechend der in Abb. 13 dargestellten Legende zum Einsatz. Die extrahierten Materialkennwerte sind Tab. 6 zu entnehmen. Ergebnis des AP 2.3 ist die in Abb. 14 erstellte Materialkarte.

Tab. 5: Bezeichnung der ermittelten Materialkennwerte für eine LS-DYNA Materialkarte (MAT054)

Nummer	Variable	Description	Nummer	Variable	Description
1	RO	Mass density	8	DFAILM	Transverse failure strain
2	EA	Ea, Young's modulus - longitudinal direction	9	GAB	G_{12} , shear modulus 12
3	EB	Eb, Young's modulus - transverse direction	10	SC	Shear strength
4	PRBA, PRAB	ν_{21} , Poisson's ratio 21 ν_{12} , Poisson's ratio 12	11	DFAILS	Shear failure strain
5	XT	Axial tensile strength	12	XC	Axial compressive strength
6	YT	Transverse tensile strength	13	YC	Transverse compressive strength
7	DFAILT	Axial tensile failure strain	14	DFAILC	Axial compressive failure strain

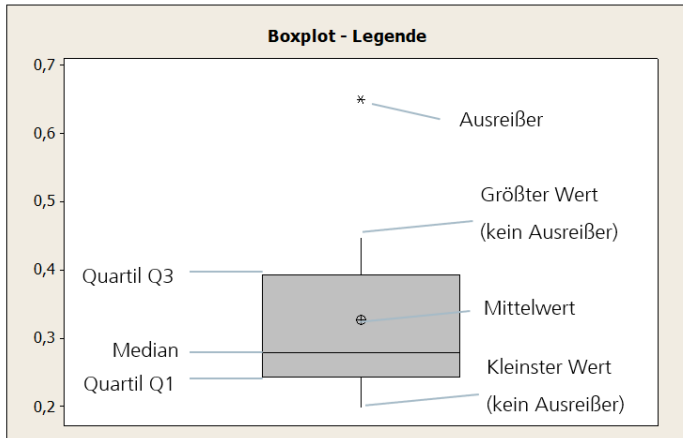
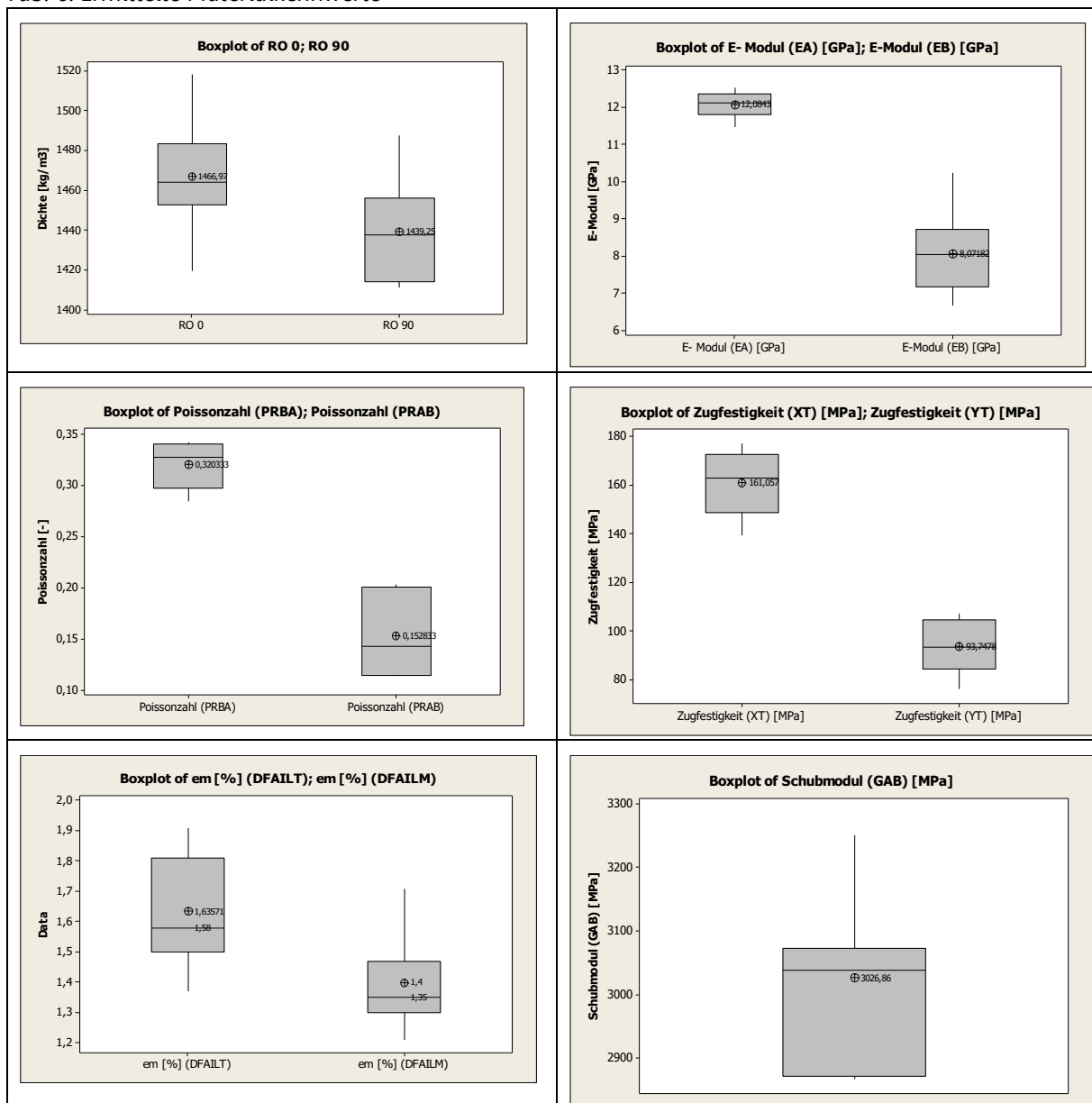
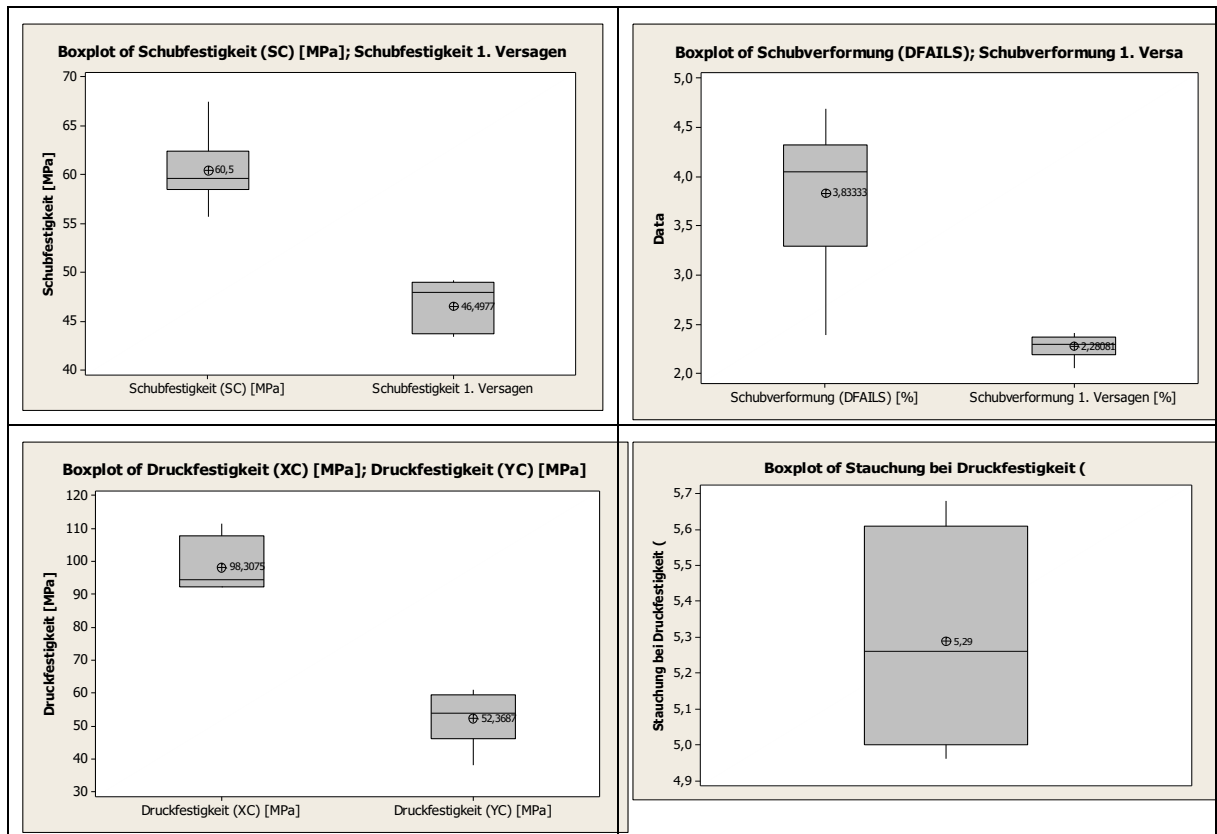


Abb. 13: Legende eines Boxplot-Diagramms

Tab. 6: Ermittelte Materialkennwerte





*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE_TITLE (054/055) (1)

TITLE
GFK ABS Probekörper

MID	RO	EA	EB	(EC)	PRBA	(PRCA)	(PRCB)
4	1.453e-09	1.208e+04	8430.0000	0.0	0.3340000	0.0	0.0
2	GAB	GBC	GCA	(KF)	AOPT	ZWAY	TI
	3027.0000	3027.0000	3027.0000	0.0	2.0000000	0.0	0.0
3	XP	YP	ZP	A1	A2	A3	MANGLE
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	0.0
4	V1	V2	V3	D1	D2	D3	DFAIL
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0140000
							DFAILS
							0.0218000
5	TFAIL	ALPH	SOFT	FBRT	YCFAC	DFAIL	DFAILC
	1.153e-09	0.3000000	0.5700000	0.5000000	1.2000000	0.0409000	-0.1322500
							EFS
							0.0
6	XC	XT	YC	YT	SC	CRIT	BETA
	98.3099998	161.06000	52.3699999	93.7500000	46.5000000	54,0	0.5000000

ALPH	Schubspannungsparameter für den nicht-linearen Fall
FBRT	Entfestigungsfaktor für die Faserzugfestigkeit
YCFAC	Reduzierungsfaktor der Druckfestigkeit der Faser nach Matrixversagen
TFAIL	Zeitschrittgröße zur Löschung der kritischen Elemente
SOFT	Entfestigungsfaktor der Materialfestigkeit an der Crashfront
BETA	Gewichtungsfaktor für den Scherungsterm im Zugfasermodus

Abb. 14: Kalibrierte Materialkarte ABS-GF (MAT054, LS-DYNA). Experimentell ermittelte Kennwerte sind grün und iterativ angepasste Bruchparameter in rot gekennzeichnet.

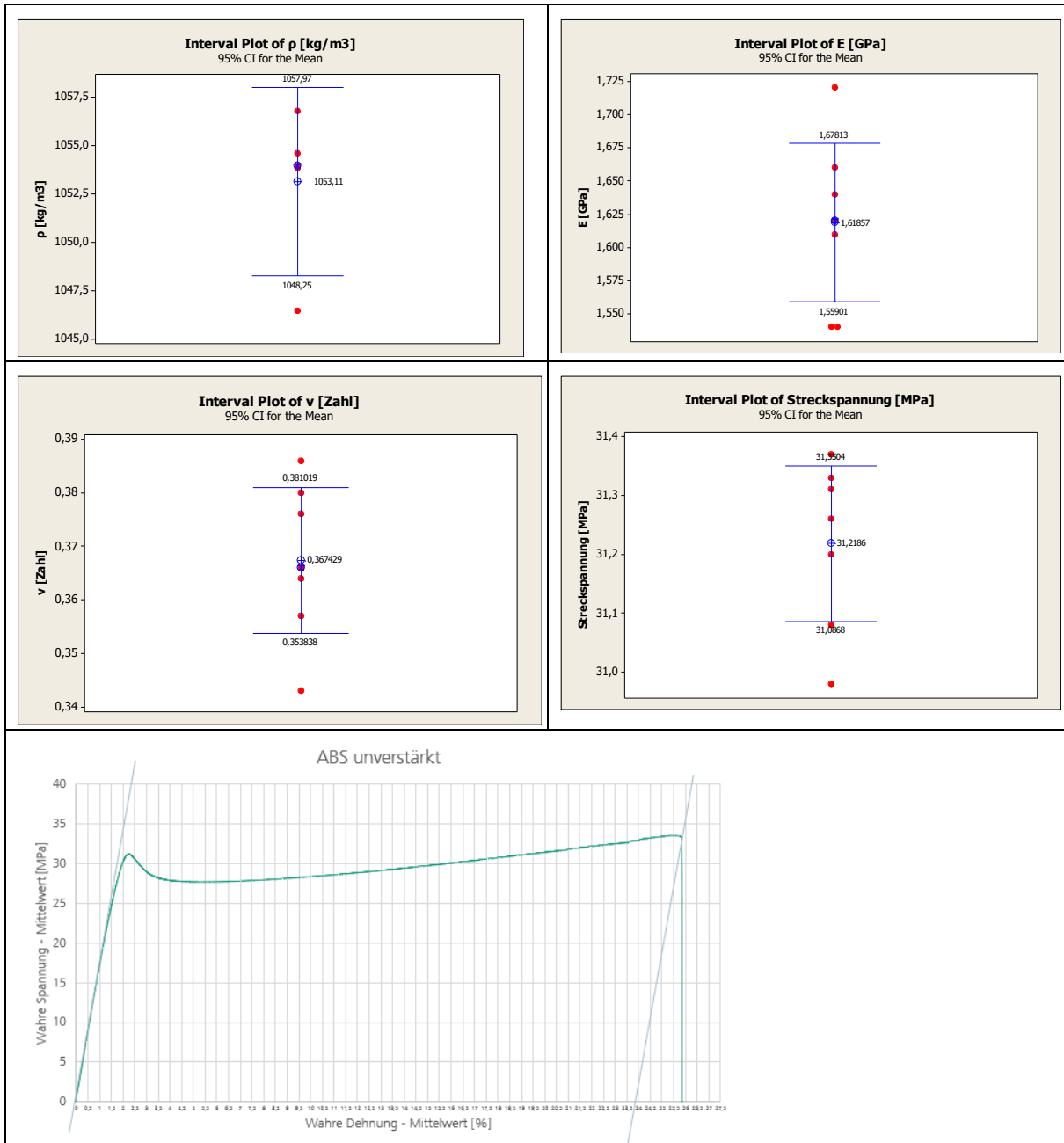
ABS

Für das ABS wurde die LS-DYNA-spezifische Materialkarte MAT024 erstellt. Hierfür wurden die in AP 2.2 durchgeführten Prüfungen ausgewertet und die erforderlichen Parameter entsprechend Tab. 7 extrahiert. Die Konfidenzintervalle (Vertrauensbereiche) der extrahierten Ingenieurskonstanten sowie der Wahre-Spannung-Wahre-Dehnungs-Verlauf sind Tab. 8 zu entnehmen. Ergebnis des AP 2.3 ist die in Abb. 15 erstellte Materialkarte.

Tab. 7: Bezeichnung der ermittelten Materialkennwerte für MAT_024 (LS-DYNA)

Nummer	Variable	Description
1	RO	Mass density
2	E	Young's modulus
3	PR	Poisson's ratio
4	SIGY	Yield stress
5	FAIL	GT.0.0: Effective plastic strain to failure
6	LCSS	Effective stress as a function of effective plastic strain

Tab. 8: Ermittelte Materialkennwerte



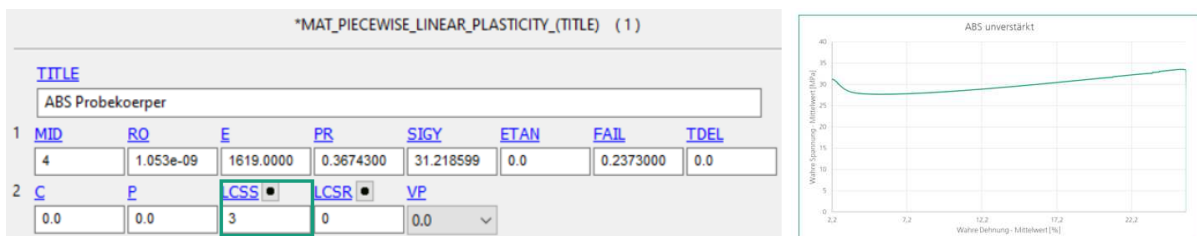
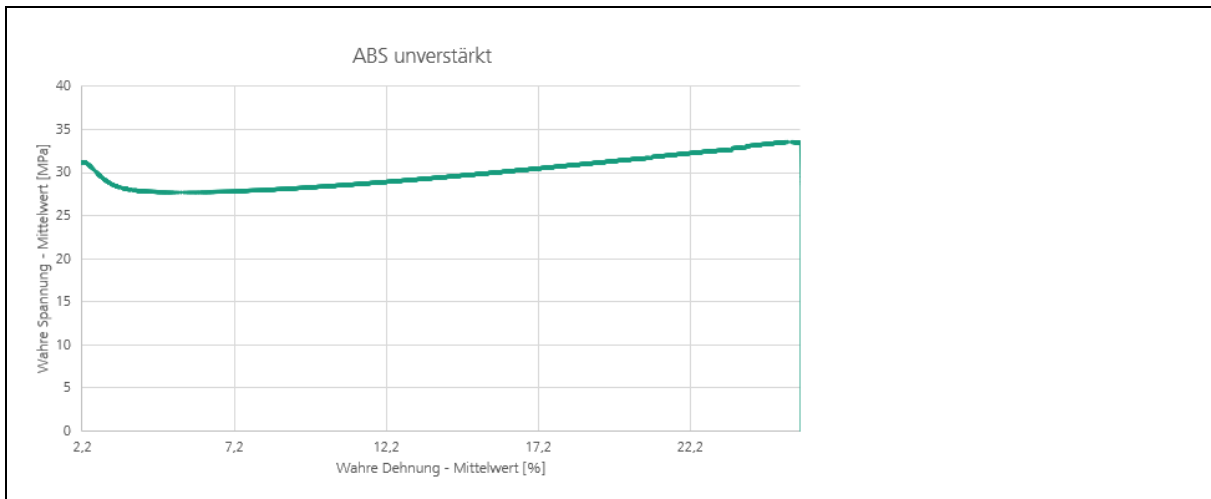


Abb. 15: Kalibrierte Materialkarte ABS (MAT024, LS-DYNA). Rechts: Verfestigungskurve - Wahre Spannung vs. Wahre Dehnung.

3 Zusammenfassung

AP 2.2 und AP 2.3 beinhalten die Materialcharakterisierung und Erstellung zweier Materialkarten für einen mehrlagigen glasfaserverstärkten Acrylnitril-Butadien-Styrol (GF-ABS) Verbund und unverstärktes, Polymethylmethacrylat (PMMA)-beschichtetes Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), welche zur Realisierung von FKV-Crashknoten zum Einsatz kommen sollen.

In AP 2.2 wurden Zug-, Druck- und Schubversuche unter festgelegten Prüfbedingungen durchgeführt. Die Prüfungen erfolgten mit einer Universalprüfmaschine, und es wurden spezifische Probekörper für unterschiedliche Materialien und Verbundorientierungen verwendet. Die Ergebnisse umfassen Versagensbilder und Messverläufe.

In AP 2.3 wurden Materialkarten für die Finite-Elemente-Simulation erstellt, die für die Bruchmodellkalibrierung in einem späteren Arbeitspaket des Konsortialführers Capron genutzt werden. Hierbei wurden zwei spezifische Materialkarten für LS-DYNA entwickelt, basierend auf den in AP 2.2 ermittelten Werten. Dazu kamen die beiden Materialmodelle MAT054 bzw. MAT024 zum Einsatz und enthalten experimentell ermittelte und im Rahmen des AP 2.5 angepasste Bruchparameter.

Zusammenfassend konzentrieren sich die beiden Arbeitspakete auf die umfassende Analyse und Modellierung der Materialeigenschaften von GF-ABS und ABS für die Anwendung in Simulationen.

Anhang E

- Tabelle_Pressversuche ABS-GF Lakowa

Presseversuche ABS_GF

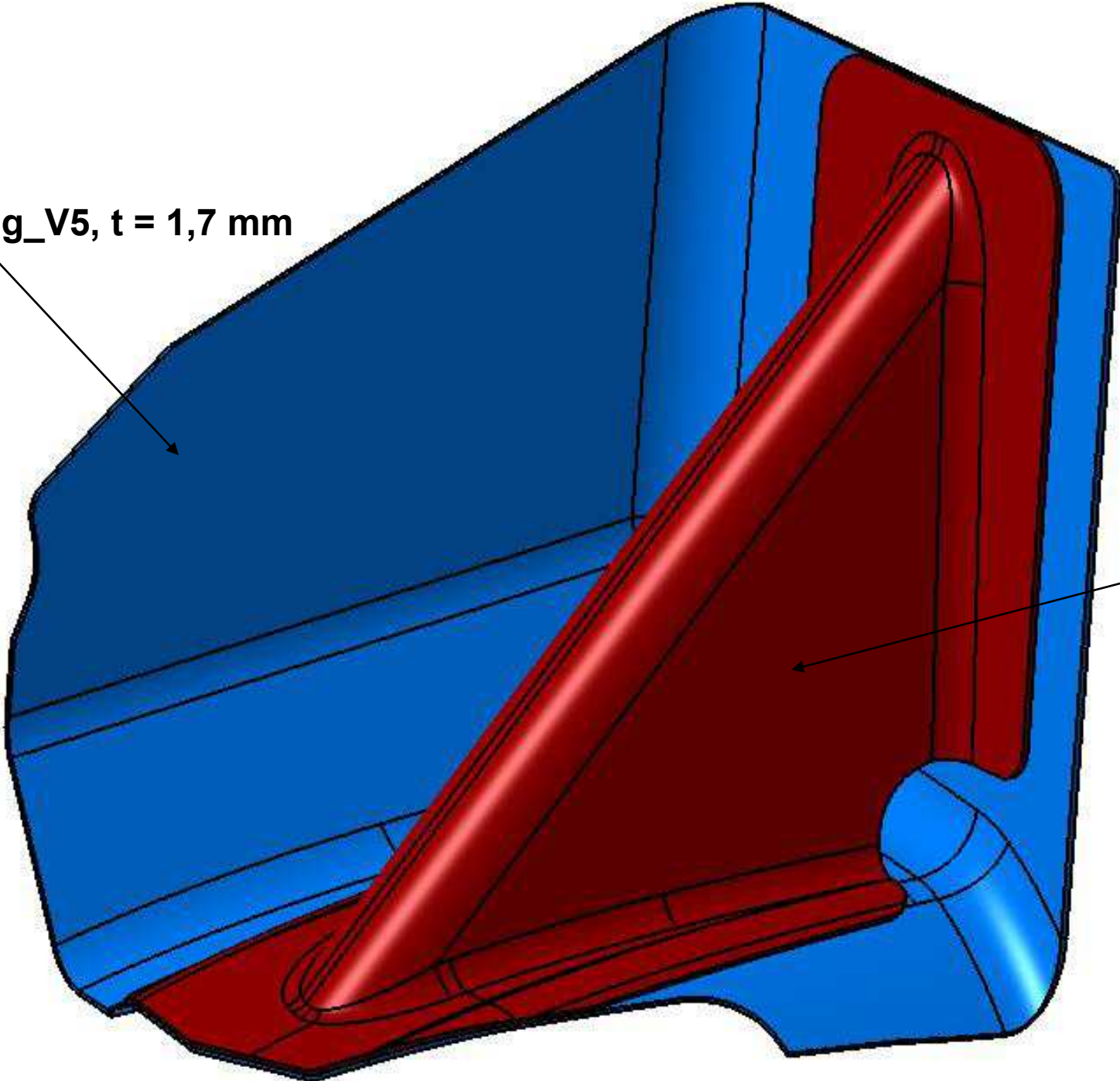
Versuch	Vorheizen der Zugschnitte im Umluftofen	Umformtemperatur [°C]	Oberheizung [%] ab >100°C	Unterheizung [%] ab >100°C	Umformdauer (Start HZ bis Ende WZ geschl.) [min]	Abkühltemperatur [°C]	Abkühldauer [s]	Öffnung Spannrahmen [mm]	Fahrgeschwindigkeit Oberstempel	Bemerkungen / Ergebnis
0	t= 6h T= 80 °C	186	60/45	45/45	ca 2	50	50	0	300mm/s	2mm ABS Platte ohne VST-Streifen aus endlos ABS-GF ohne Vakuum geformt / Ergebnis GUT
1	t= 6h T= 80 °C	192	60/45	40/25	ca 2	50	50	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/0/-45/0] GF Ausrichtung 0° ohne Vakuum geformt / Ergebnis BEFRIEDIGEND
2	t= 6h T= 80 °C	192	60/45	40/25	ca 2	< 50	80	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/0/-45/0] GF Ausrichtung 0° ohne Vakuum geformt / Ergebnis BEFRIEDIGEND
3	t= 6h T= 80 °C	203	60/30	40/25	ca 2	< 50	200	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/0/-45/0] GF Ausrichtung 0° und Deckschicht 0,5mm ABS schwarz ohne Vakuum geformt / Ergebnis Mangelhaft
4	t= 6h T= 80 °C	194	60/30	40/25	ca 2	< 50	200	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/0/-45/0] GF Ausrichtung 0° und Deckschicht 0,5mm ABS schwarz (im Abfallbereich geschlitzt um Lufteinschlüsse zu vermeiden) ohne Vakuum geformt / Ergebnis Mangelhaft
5	t= 6h T= 80 °C	192	60/45	40/25	ca 2	< 50	200	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/0/-45/0] GF Ausrichtung 0° ohne Vakuum geformt / Ergebnis BEFRIEDIGEND / Oberste GF aus matrix gelöst
6	t= 6h T= 80 °C	192	60/45	40/25	ca 2	< 50	200	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/0/-45/0] aber GF-Ausrichtung um 90° gedreht!!! mit Vakuum geformt 1s vor WZ zusammenfahren / Trennmittel verwendet / Ergebnis GUT aber Material an Seiten zu dünn
7	t= 6h T= 80 °C	192	60/45	40/25	ca 2	< 50	200	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/0/-45/0] aber GF-Ausrichtung um 90° gedreht!!! mit Vakuum geformt 7s vor WZ zusammenfahren / Ergebnis GUT aber Material an Seiten zu dünn
8	t= 6h T= 80 °C	202	60/45	40/25 (175°C)	ca 2	< 50	200	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] GF Ausrichtung 0° mit Vakuum geformt 7s vor WZ zusammenfahren / Trennmittel verwendet / Ergebnis GUT aber Material an Seiten zu dünn & lokal unzureichende Verschmelzung der Platten
9	t= 6h T= 80 °C	203	60/45	40/30 (191°C)	ca 2	< 50	200	0	300mm/s	2mm ABS Platte mit 3 separaten VST-Streifen aus endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] GF Ausrichtung 0° mit Vakuum geformt 7s vor WZ zusammenfahren / Trennmittel verwendet / Ergebnis GUT aber Material an Seiten zu dünn

Anhang F

- Festigkeits-Drup Analyse CaraSave LSE

30.08.24

Verstaerkung_V5, t = 1,7 mm



Verstaerkung_lang-Winkel_ZZ_A
t = 1,7 mm

III. Erstellung Materialkarte – ABS

Materialkarte MAT_024 (LS-DYNA)

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (1)

TITLE

ABS Probekörper

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>SIGY</u>	<u>ETAN</u>	<u>FAIL</u>	<u>TDEL</u>
	4	1.053e-09	1619.0000	0.3674300	31.218599	0.0	0.2373000	0.0
2	<u>C</u>	<u>P</u>	<u>LCSS</u>	<u>LCSR</u>	<u>VP</u>			
	0.0	0.0	3	0	0.0			

$t_{\text{ABS}} = 1,2 \text{ mm}$

Variable	Beschreibung
RO	Dichte
E	Elastizitätsmodul
PR	Poissonzahl
SIGY	Streckspannung
FAIL	Effektive plastische Dehnung bis zum Versagen
LCSS	Kurve: effektive Spannung in Abhängigkeit von der effektiven plastischen Dehnung



Verfestigungskurve - Wahre Spannung vs. Wahre Dehnung

III. Erstellung Materialkarte – ABS-GF

Materialkarte MAT_054 (LS-DYNA)

*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE_(TITLE) (054/055) (1)

TITLE

GFK ABS Probekörper

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>EA</u>	<u>EB</u>	<u>(EC)</u>	<u>PRBA</u>	<u>(PRCA)</u>	<u>(PRCB)</u>
	4	1.453e-09	1.208e+04	8430.0000	1619.0000	0.3340000	0.0	0.0
2	<u>GAB</u>	<u>GBC</u>	<u>GCA</u>	<u>(KF)</u>	<u>AOPT</u> <input type="checkbox"/>	<u>2WAY</u>	<u>TI</u>	
	3027.0000	3027.0000	3027.0000	0.0	2.0000000	0.0	0.0	
3	<u>XP</u>	<u>YP</u>	<u>ZP</u>	<u>A1</u>	<u>A2</u>	<u>A3</u>	<u>MANGLE</u>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	0.0	
4	<u>V1</u>	<u>V2</u>	<u>V3</u>	<u>D1</u>	<u>D2</u>	<u>D3</u>	<u>DFAILM</u>	<u>DFAILS</u>
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0140000	0.0218000
5	<u>TFAIL</u>	<u>ALPH</u>	<u>SOFT</u>	<u>FBRT</u>	<u>YCFAC</u>	<u>DFAILT</u>	<u>DFAILC</u>	<u>EFS</u>
	1.153e-09	0.3000000	0.5700000	0.5000000	1.2000000	0.0409000	-0.1322500	0.0
6	<u>XC</u>	<u>XT</u>	<u>YC</u>	<u>YT</u>	<u>SC</u>	<u>CRIT</u>	<u>BETA</u>	
	98.309998	161.06000	52.369999	93.750000	46.500000	54.0	0.5000000	

Kennwerte aus Versuchen (experimentell)

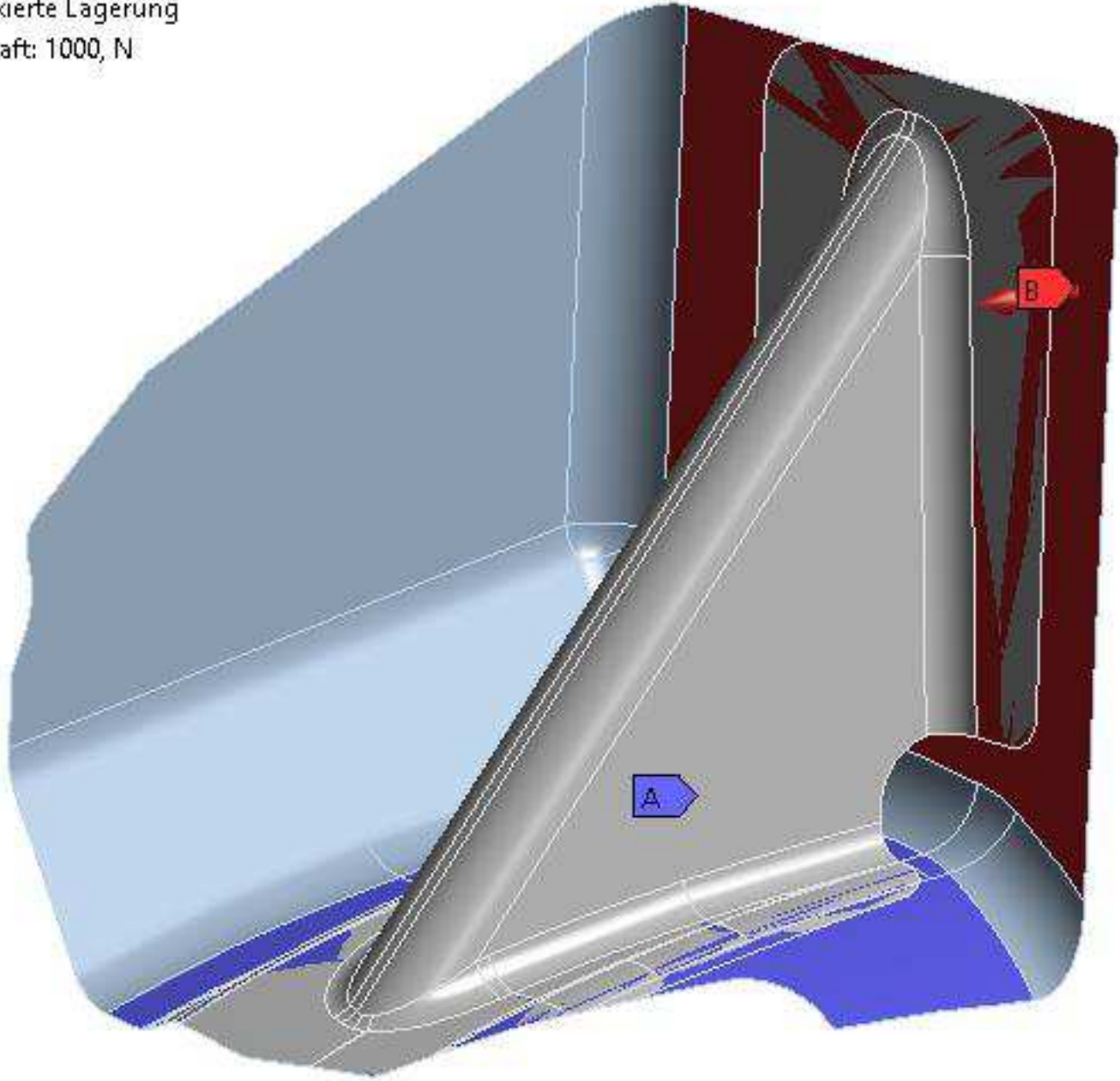
Iterativ angepasste Bruchparameter

Variable	Beschreibung
ALPH	Schubspannungsparameter für den nicht-linearen Fall
FBRT	Entfestigungsfaktor für die Faserzugfestigkeit
YCFAC	Reduzierungsfaktor der Druckfestigkeit der Faser nach Matrixversagen
TFAIL	Zeitschrittgröße zur Löschung der kritischen Elemente
SOFT	Entfestigungsfaktor der Materialfestigkeit an der Crashfront
BETA	Gewichtungsfaktor für den Scherungsterm im Zugfasernmodus

Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Beide Teile aus ABS+GF mit $t = 1,7 \text{ mm}$

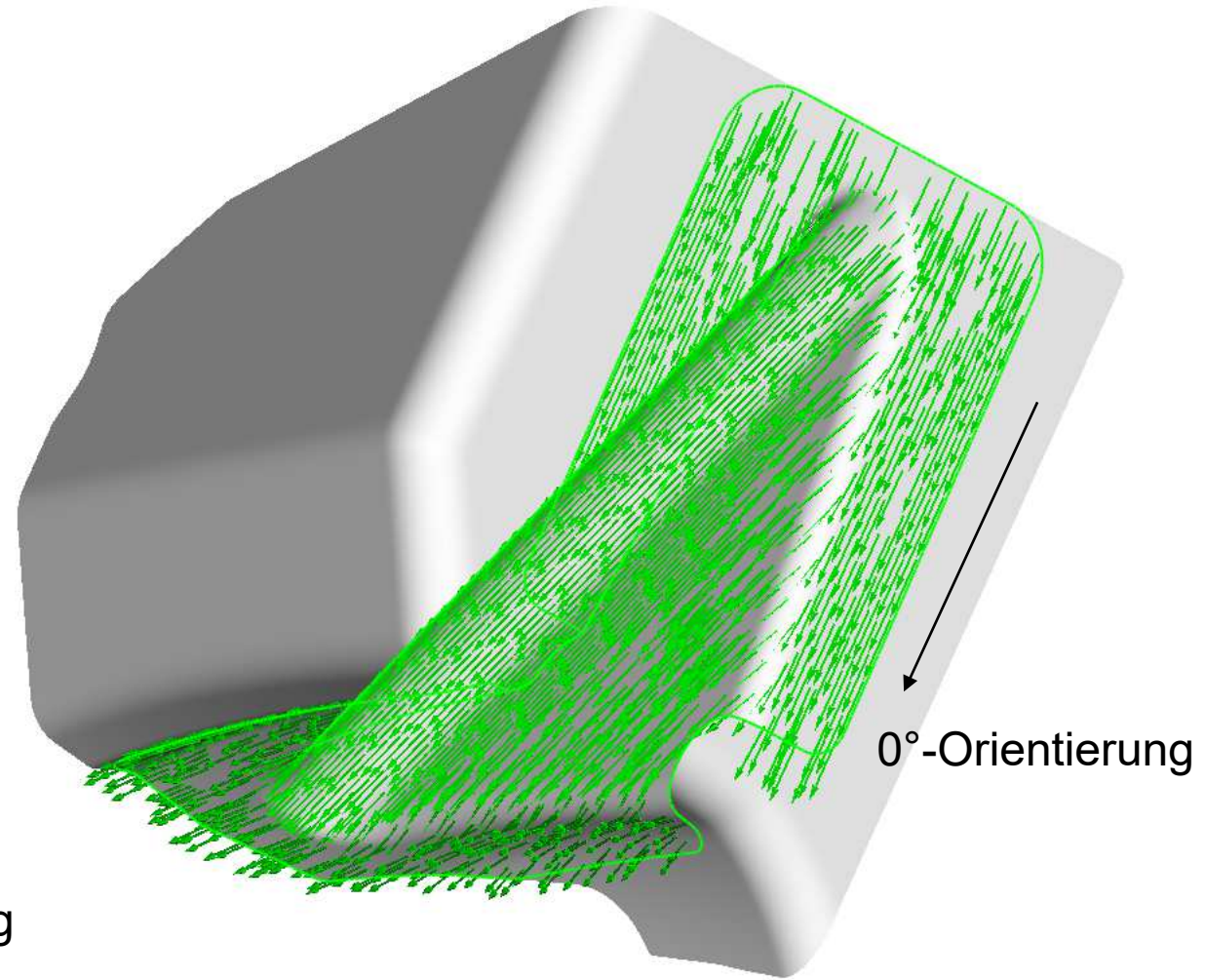
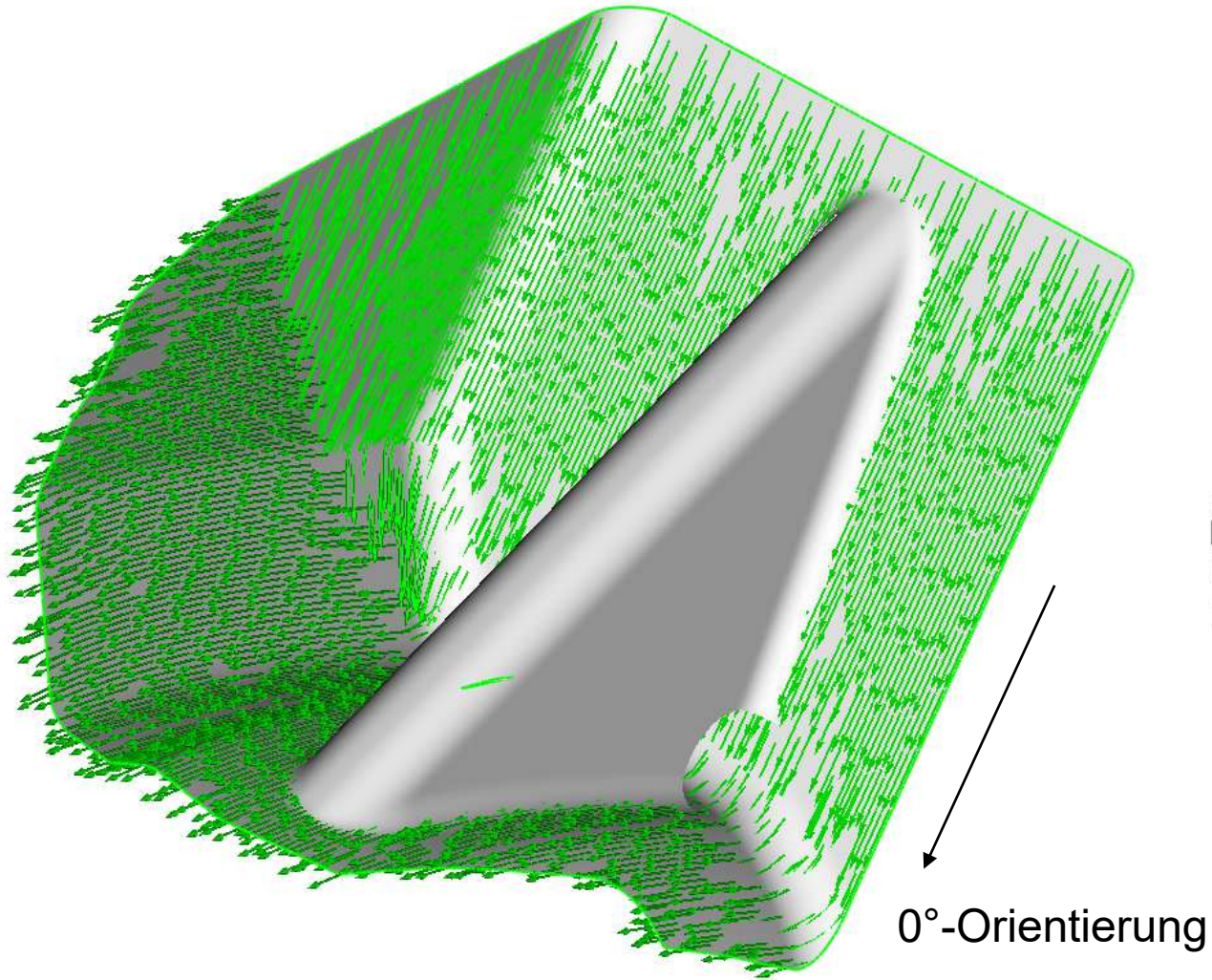
Ohne Drap.

- A** Fixierte Lagerung
- B** Kraft: 1000, N



Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Beide Teile aus ABS+GF mit $t = 1,7 \text{ mm}$

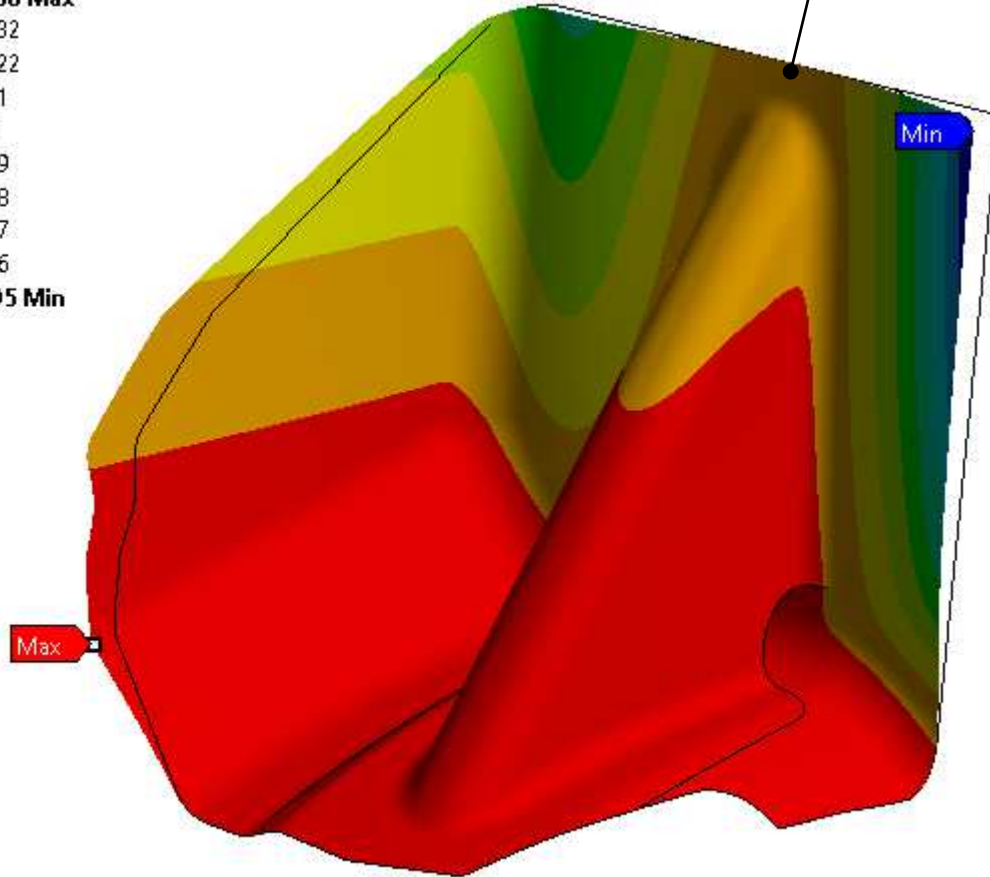
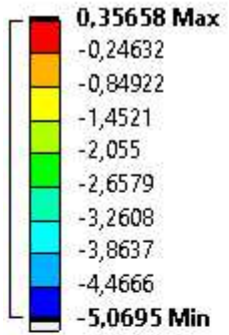
Ohne Drap.



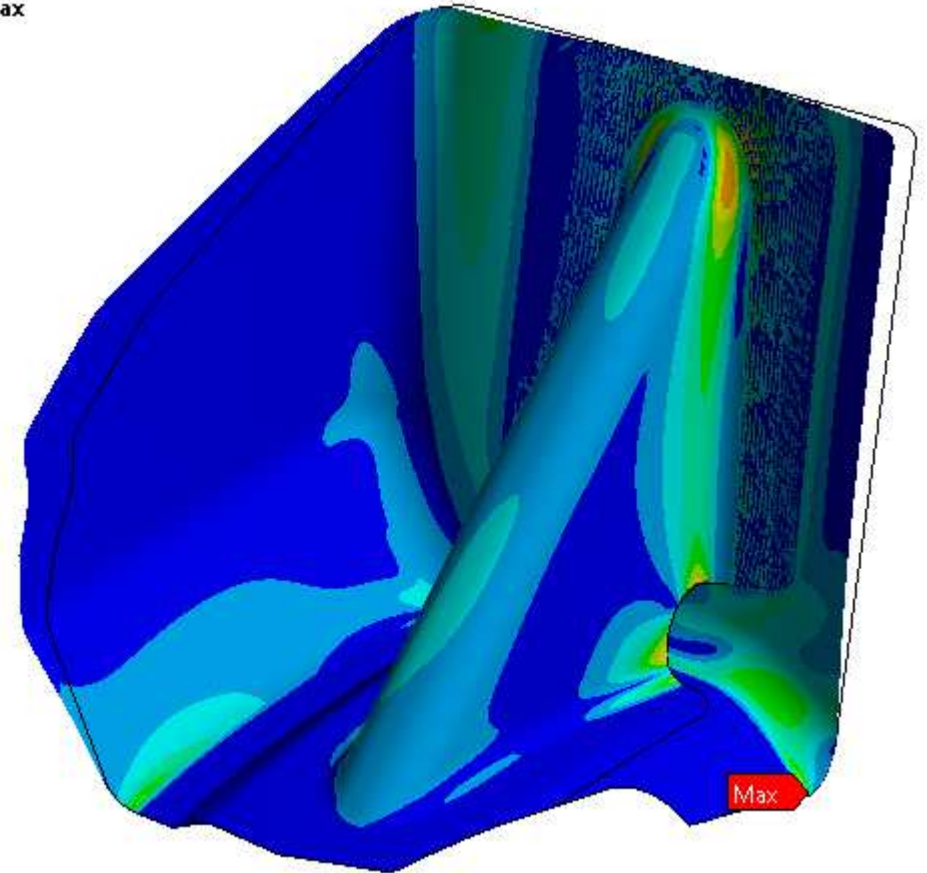
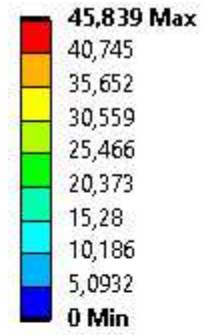
Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Beide Teile aus ABS+GF mit $t = 1,7 \text{ mm}$

Ohne Drap.

Verschiebung in x-Achse [mm]

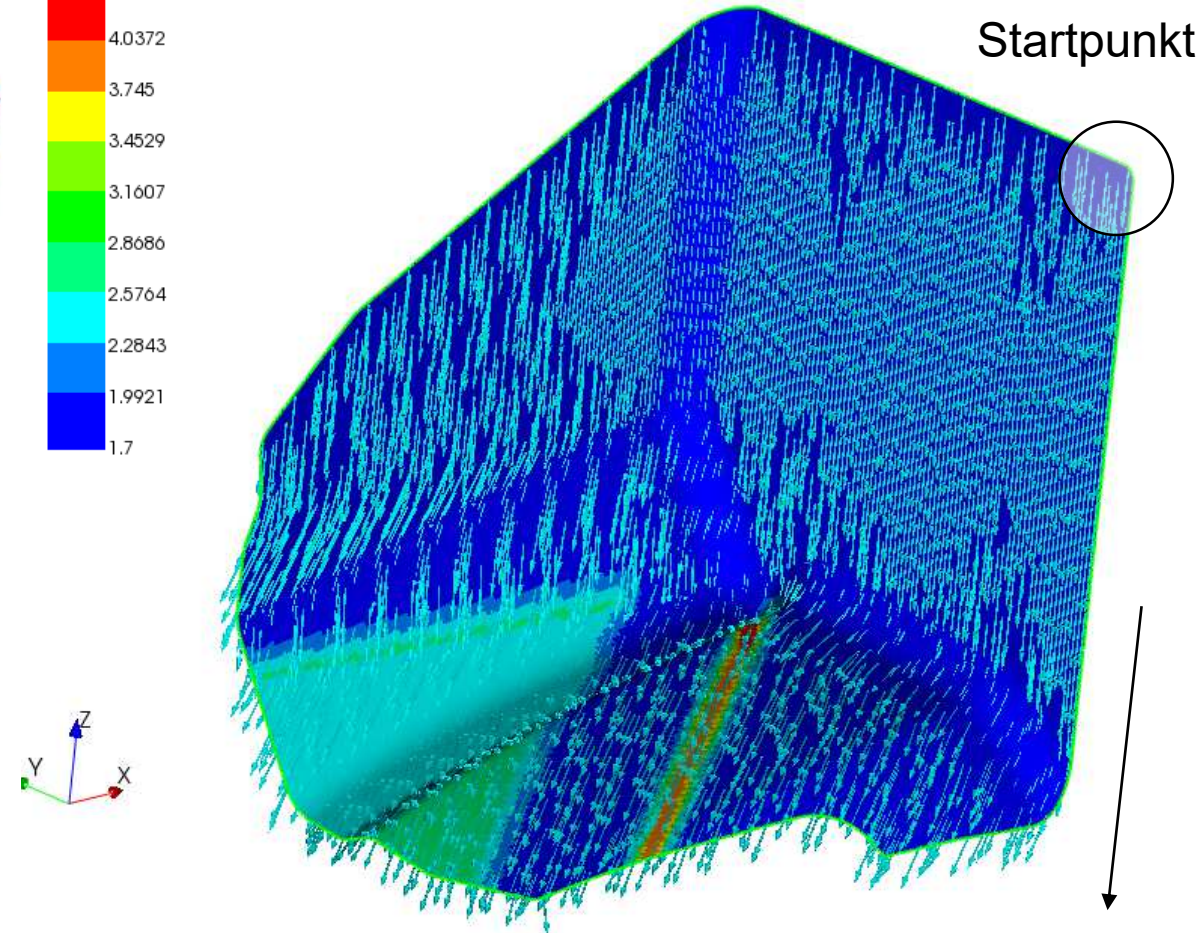
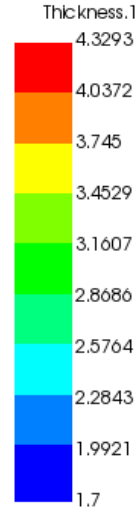
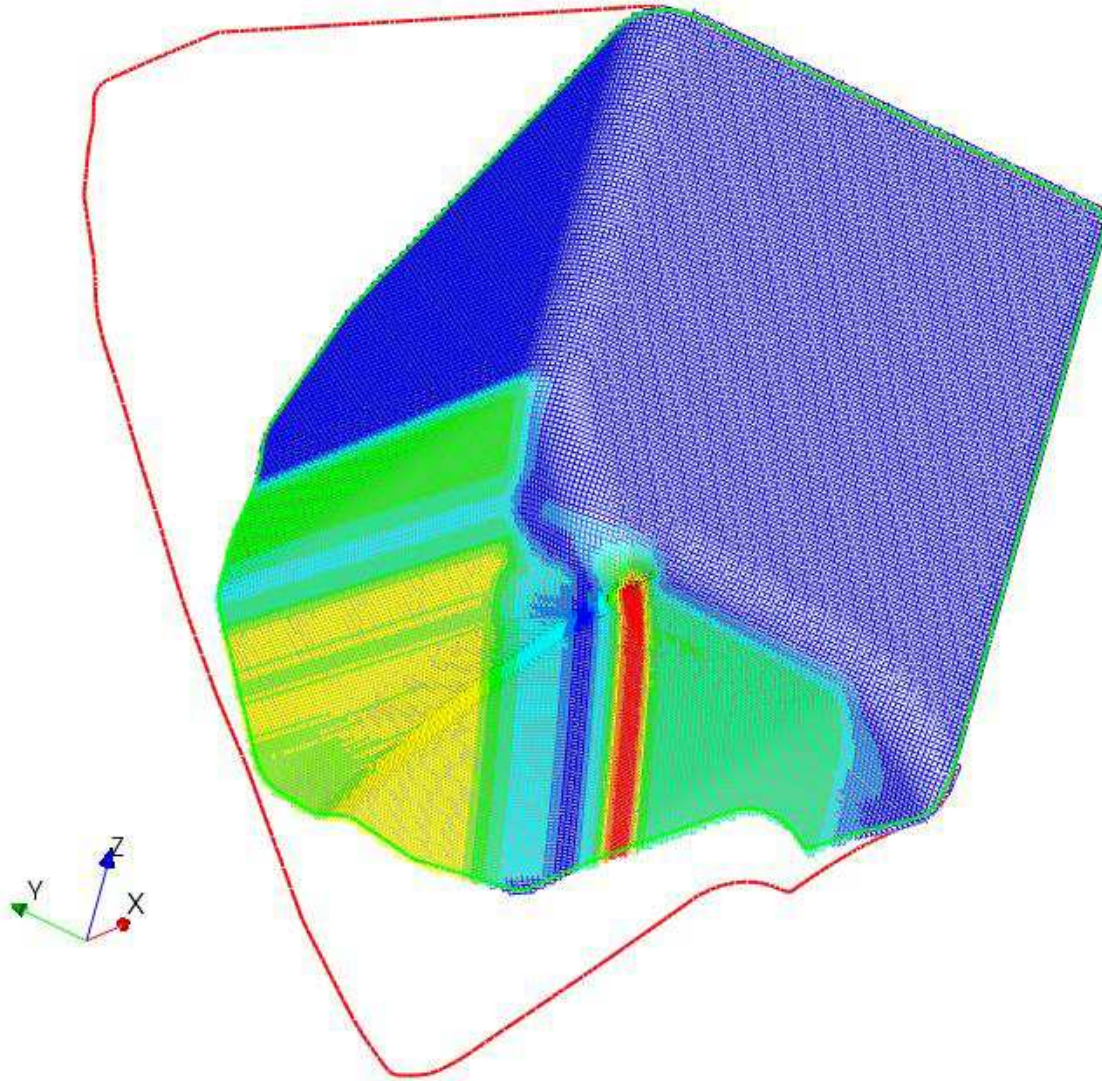
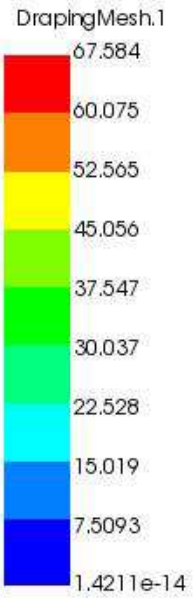


Vergleichsspannung [MPa]



Umformsimulation in Anlehnung an Drape Estimator für Basis und Winkel

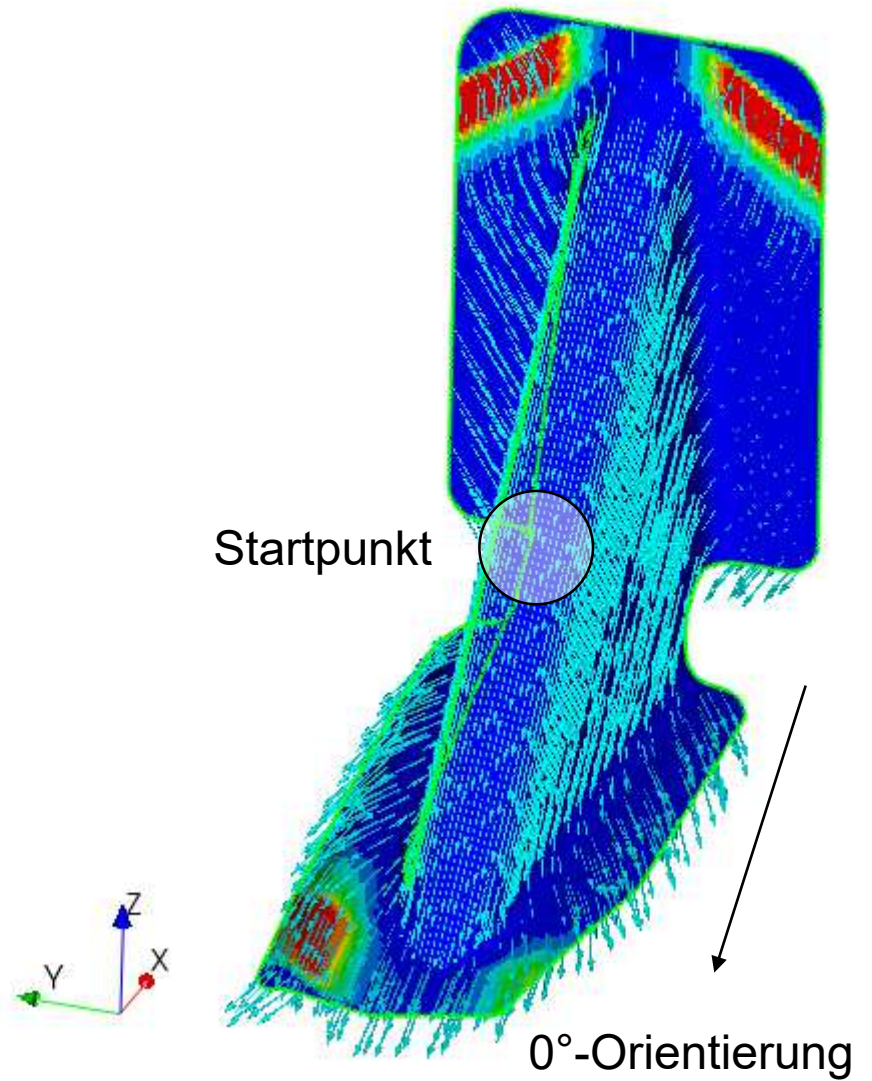
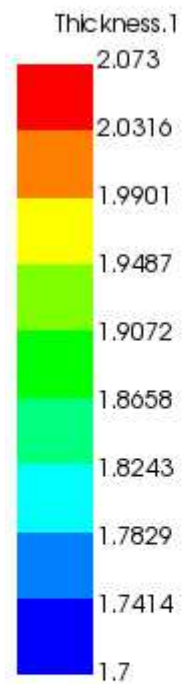
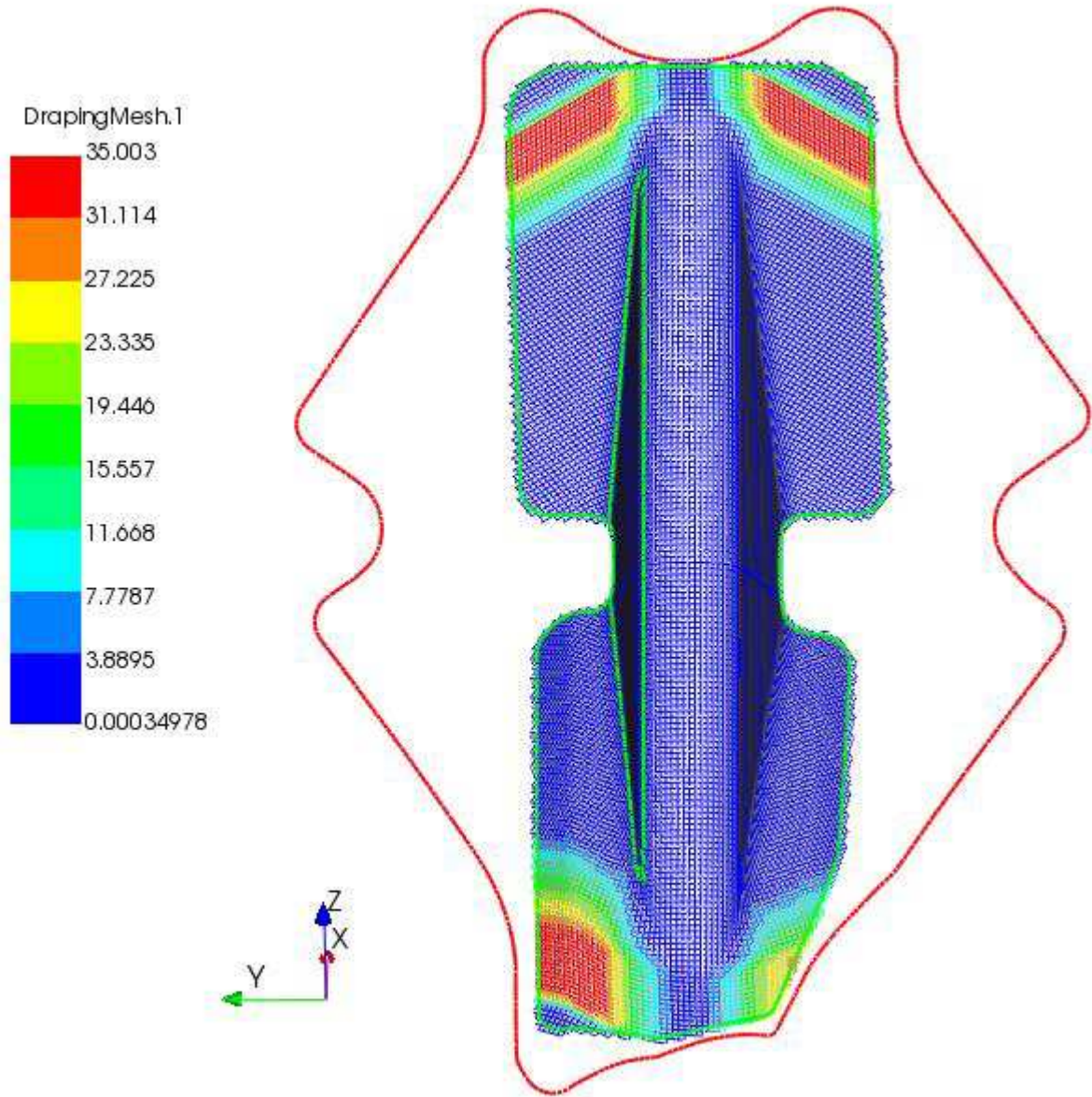
UD-Drapierung



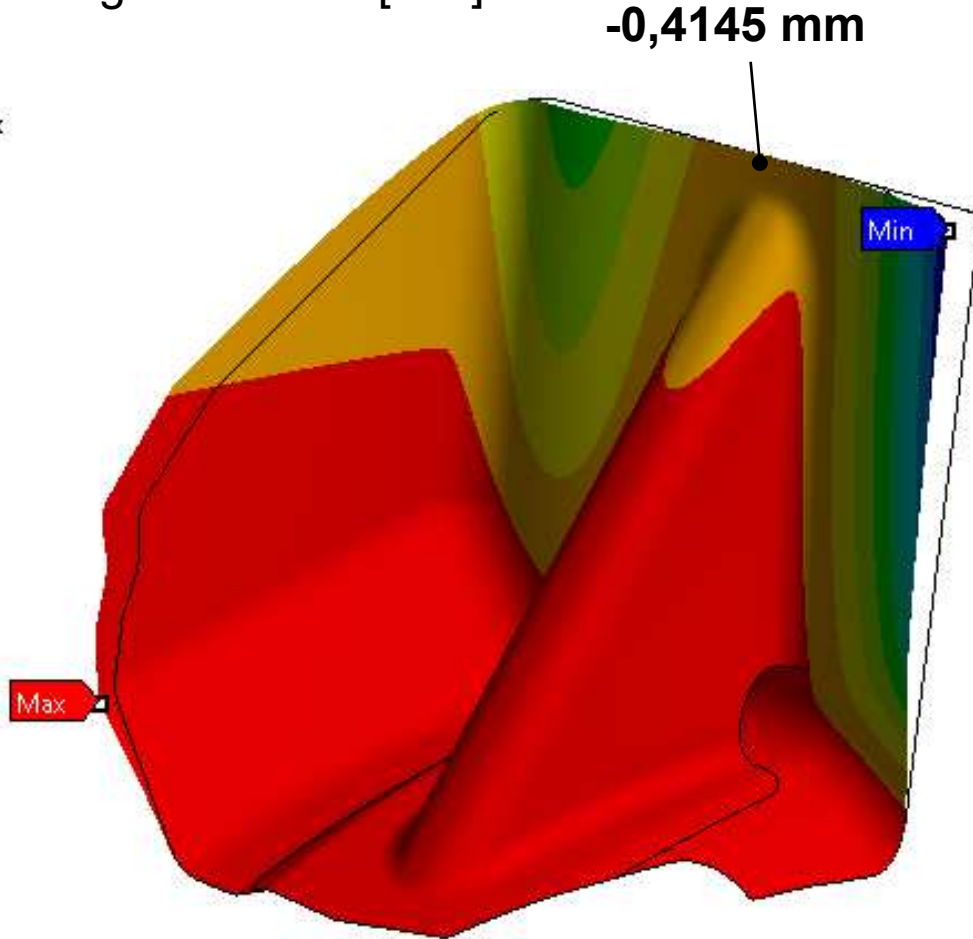
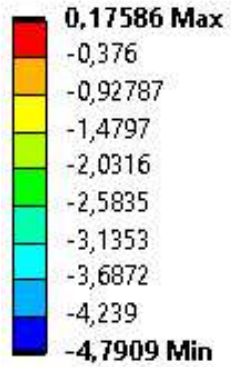
0°-Orientierung

Umformsimulation in Anlehnung an Drape Estimator für Basis und Winkel

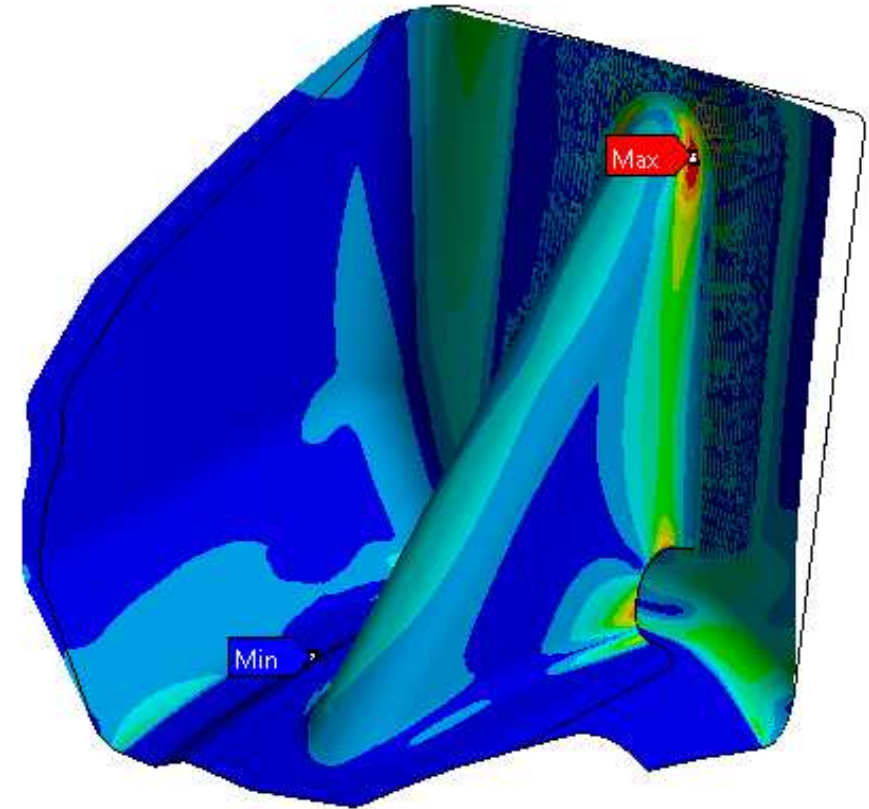
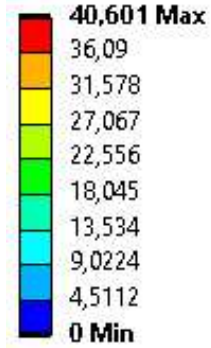
UD-Drapiertung



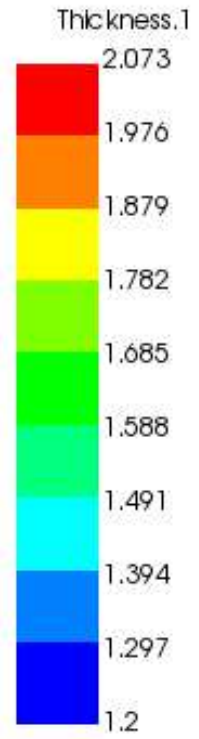
Verschiebung in x-Achse [mm]



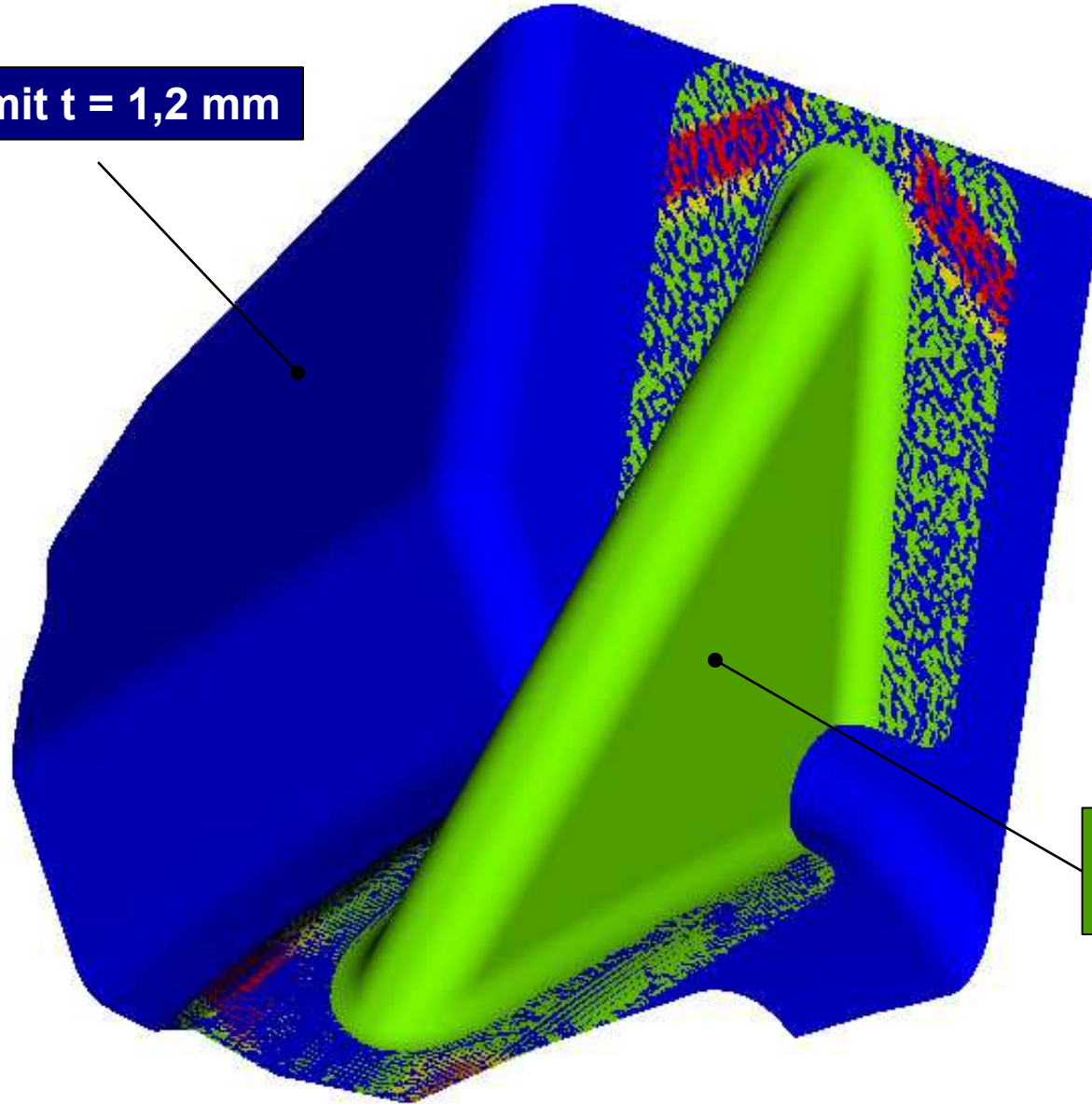
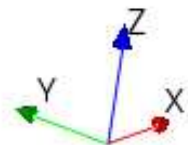
Vergleichsspannung [MPa]



Festigkeits- und Steifigkeitssimulation



ABS mit t = 1,2 mm

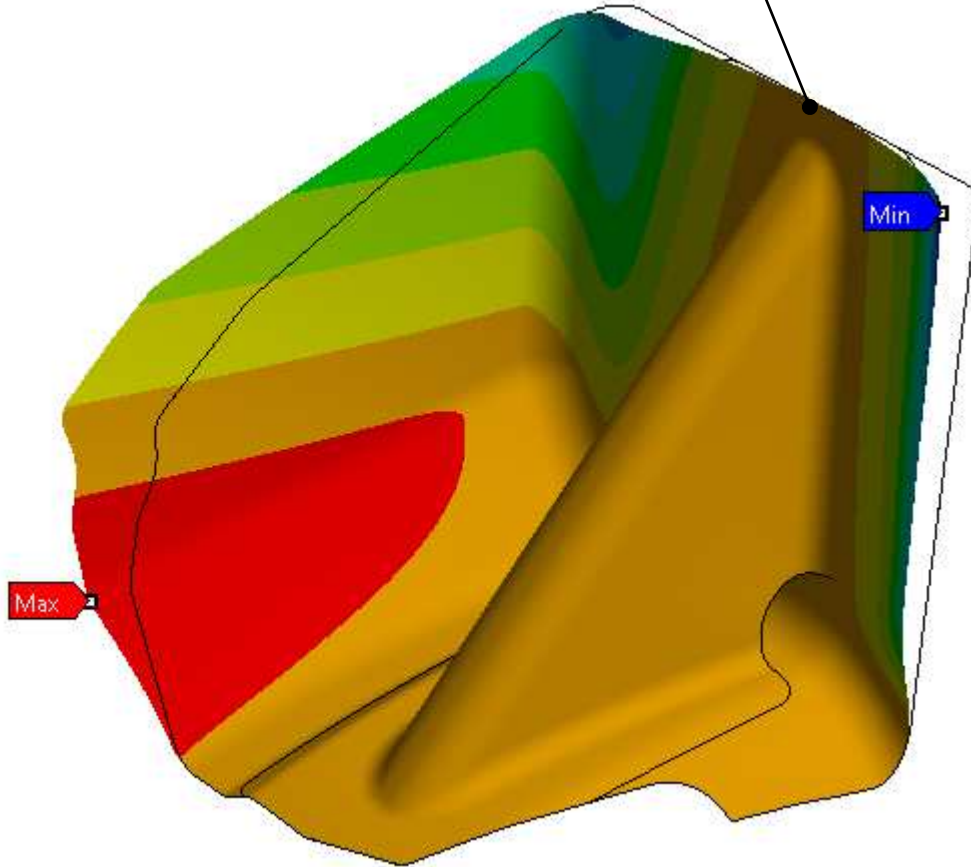
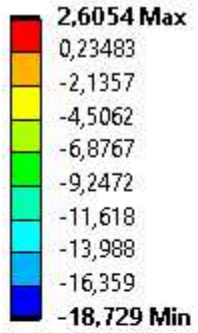


**ABS+GF mit t = 1,7 mm
UD-Drapierung**

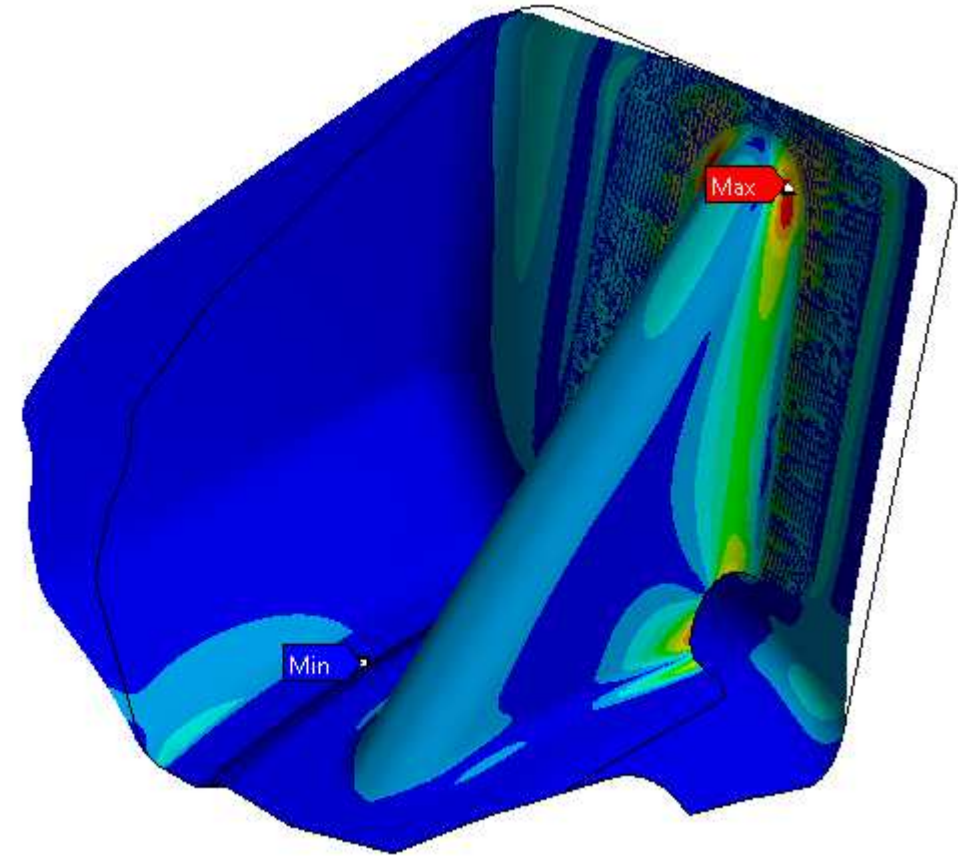
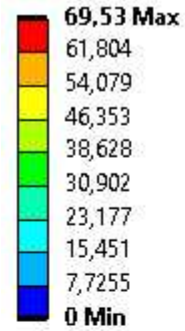
Festigkeits- und Steifigkeitssimulation

Verschiebung in x-Achse [mm]

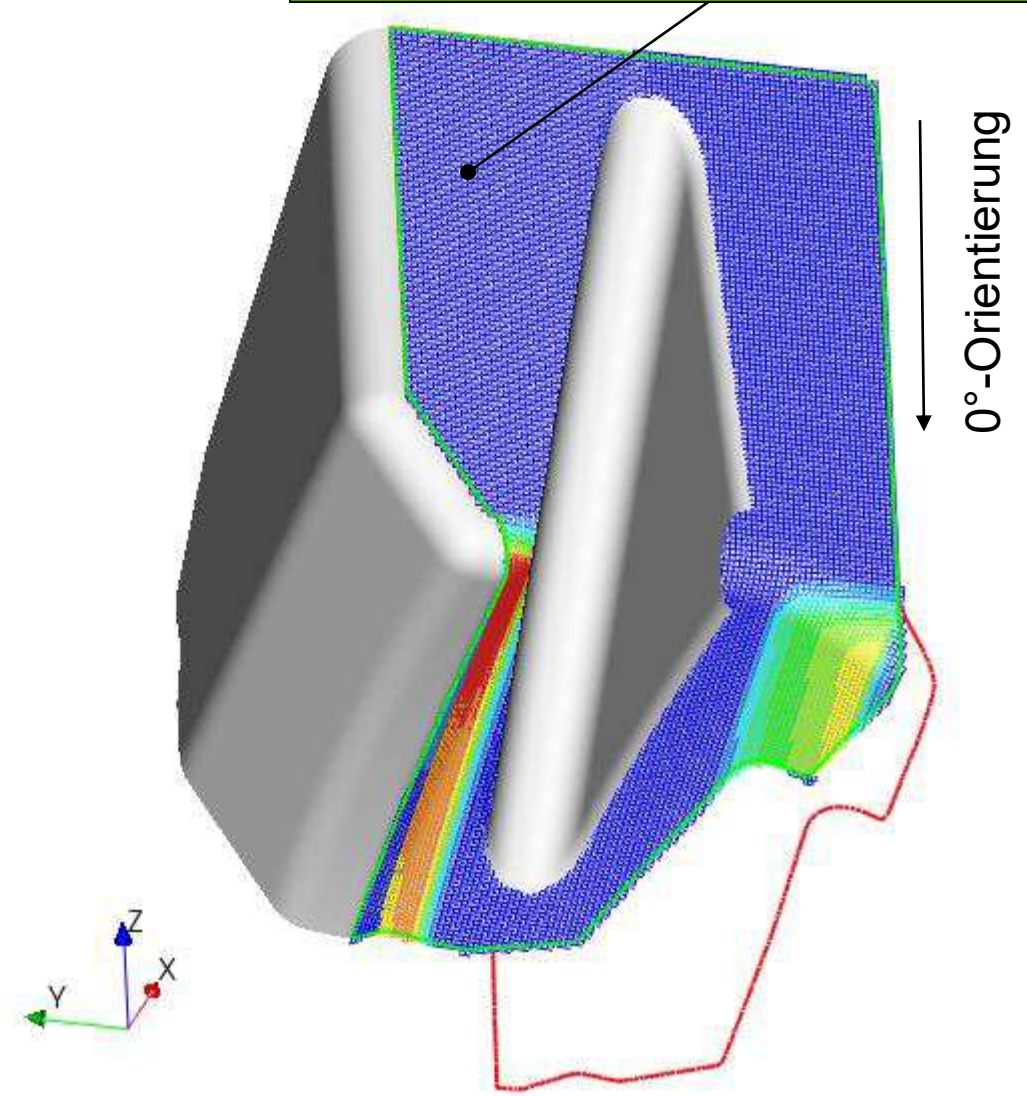
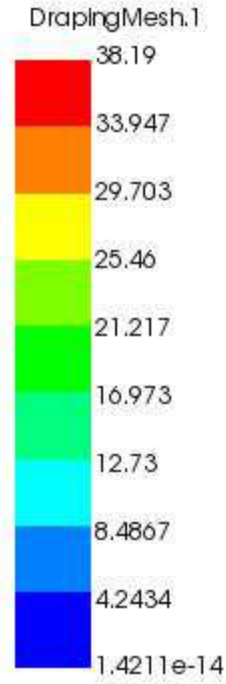
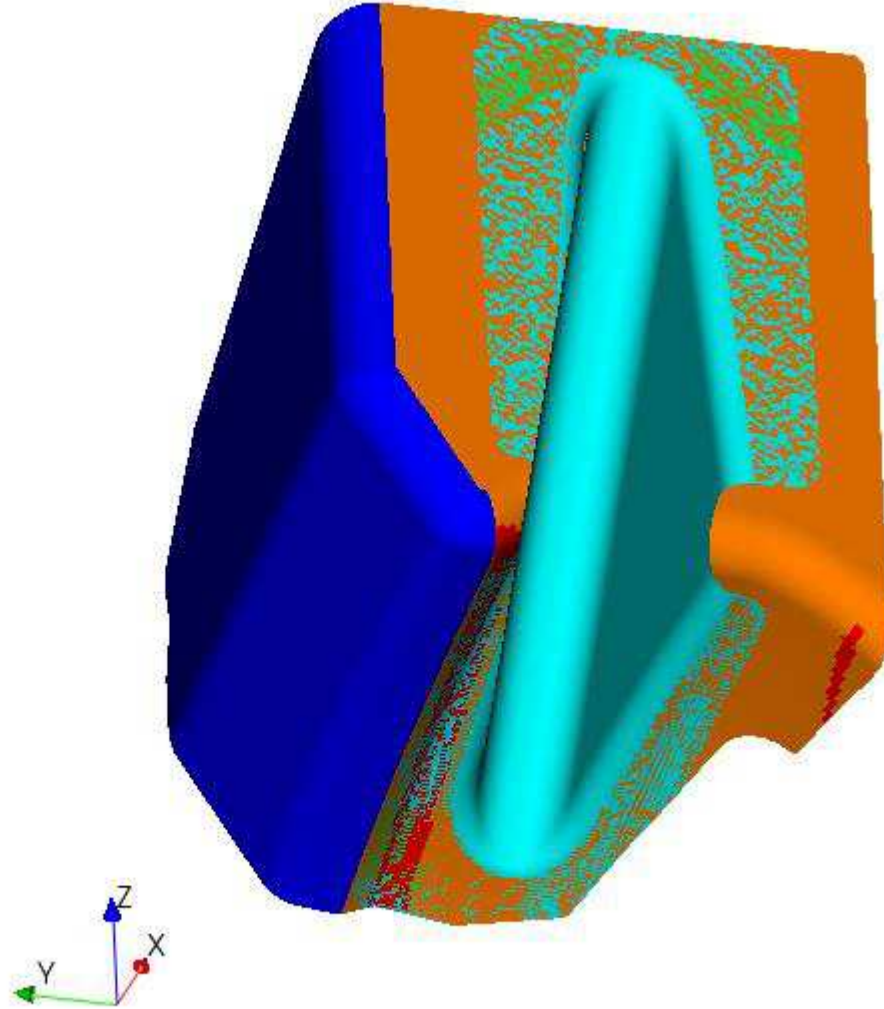
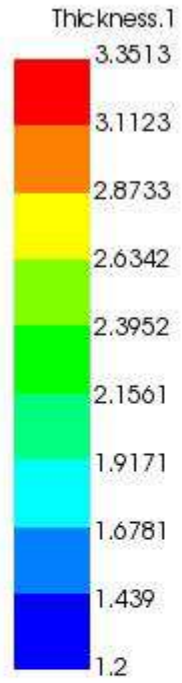
-0,60786 mm



Vergleichsspannung [MPa]



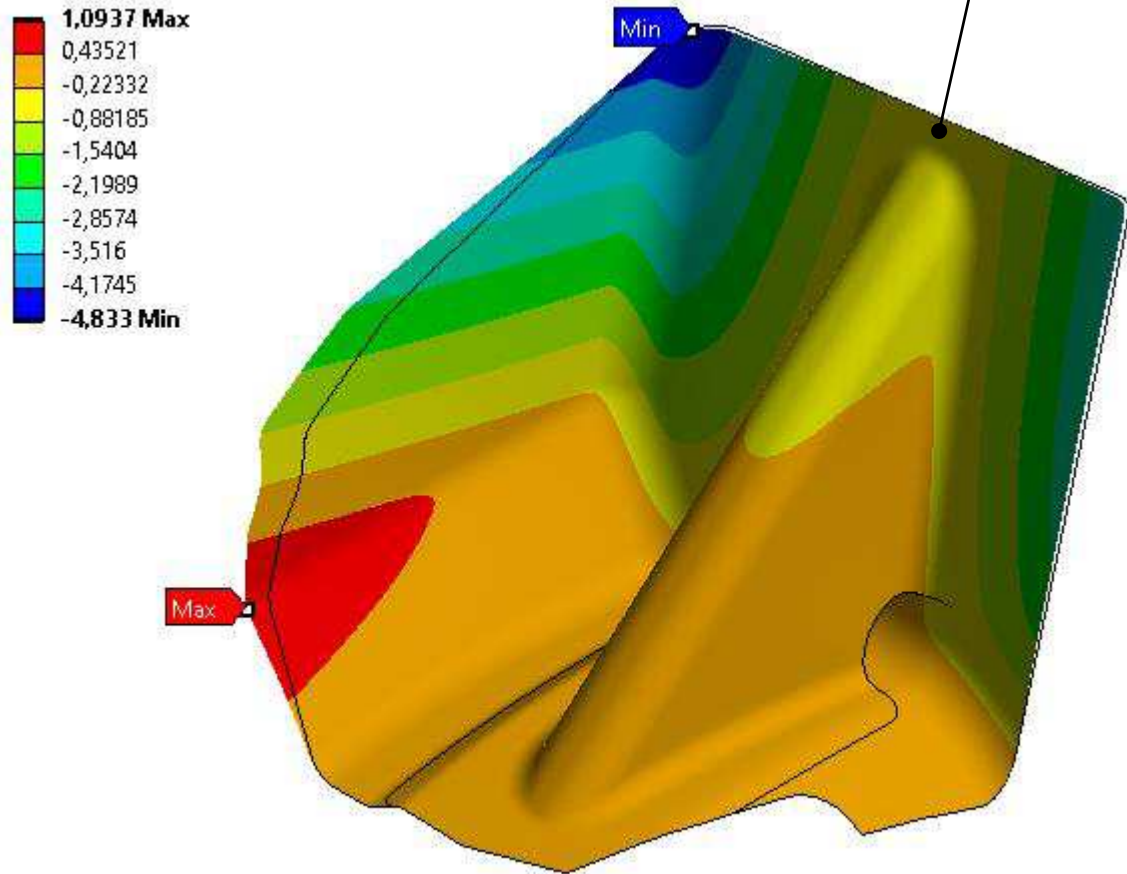
Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Winkel aus ABS mit $t = 1,2$ mm mit ztzl. Versteifung aus ABS+GF



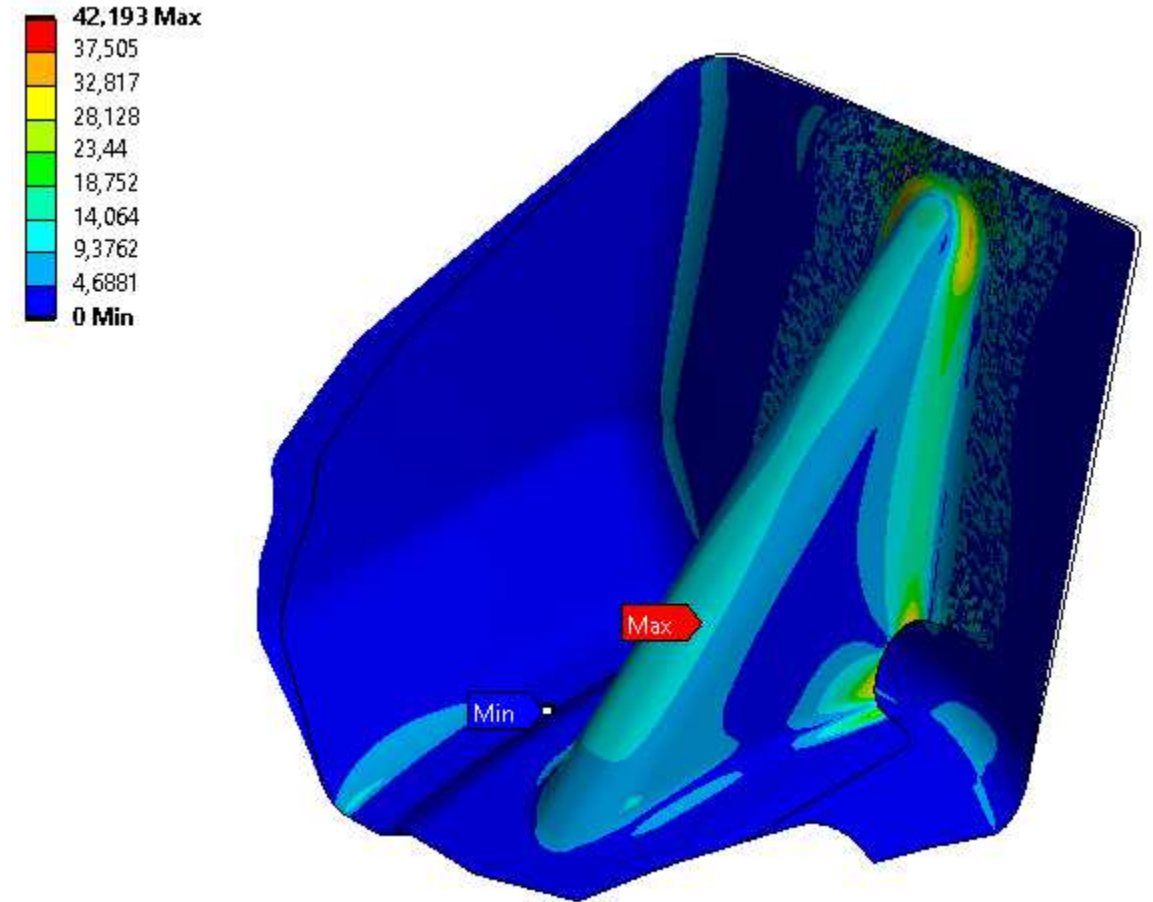
Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Winkel aus ABS mit $t = 1,2$ mm mit ztzl. Versteifung aus ABS+GF

Var. 1: ABS+GF mit $t = 1,7$ mm
UD-Drapiierung

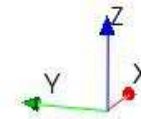
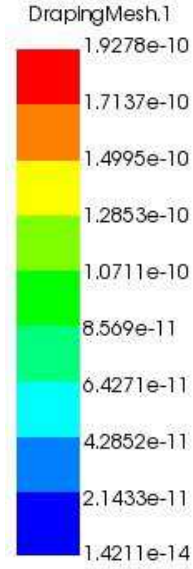
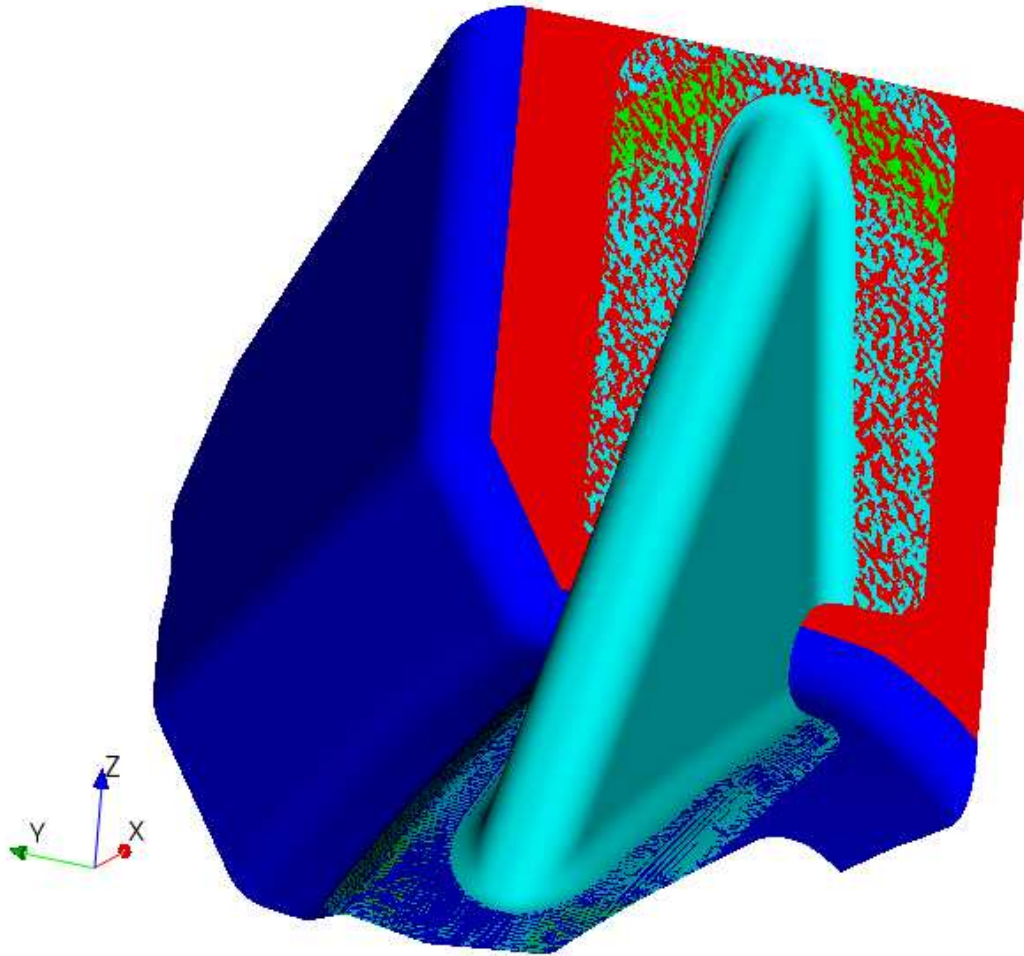
Verschiebung in x-Achse [mm]



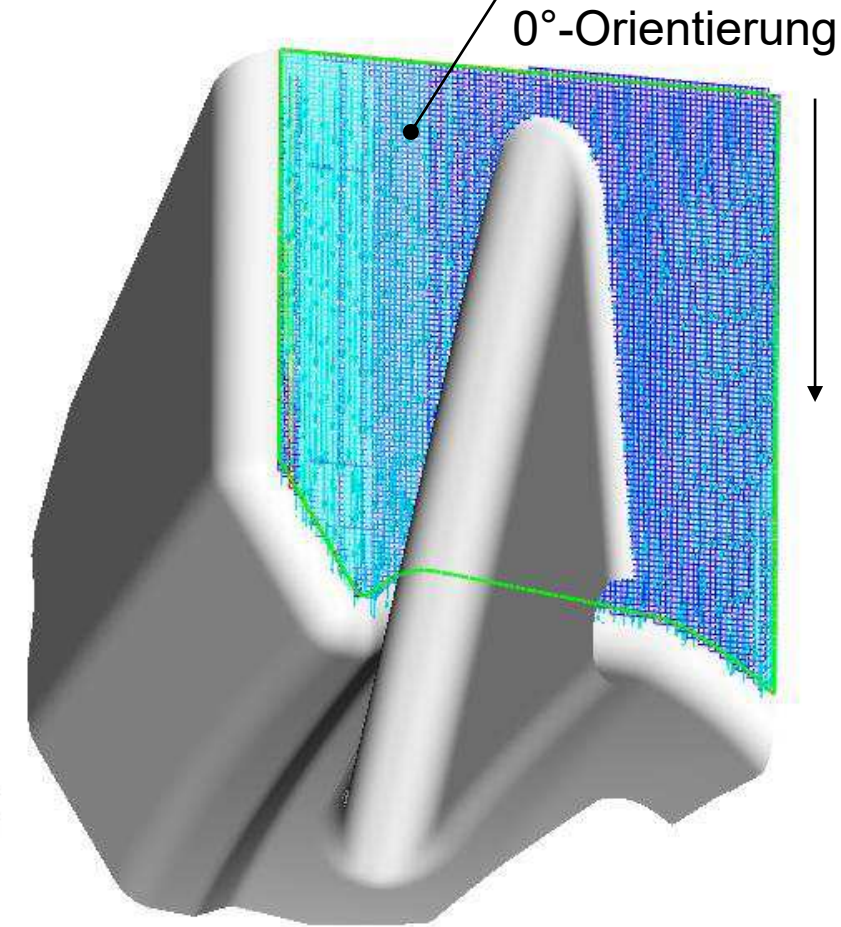
Vergleichsspannung [MPa]



Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Winkel aus ABS mit $t = 1,2$ mm mit ztzl. Versteifung aus ABS+GF



**Var. 2: ABS+GF mit $t = 1,7$ mm
UD-Drapiertung**

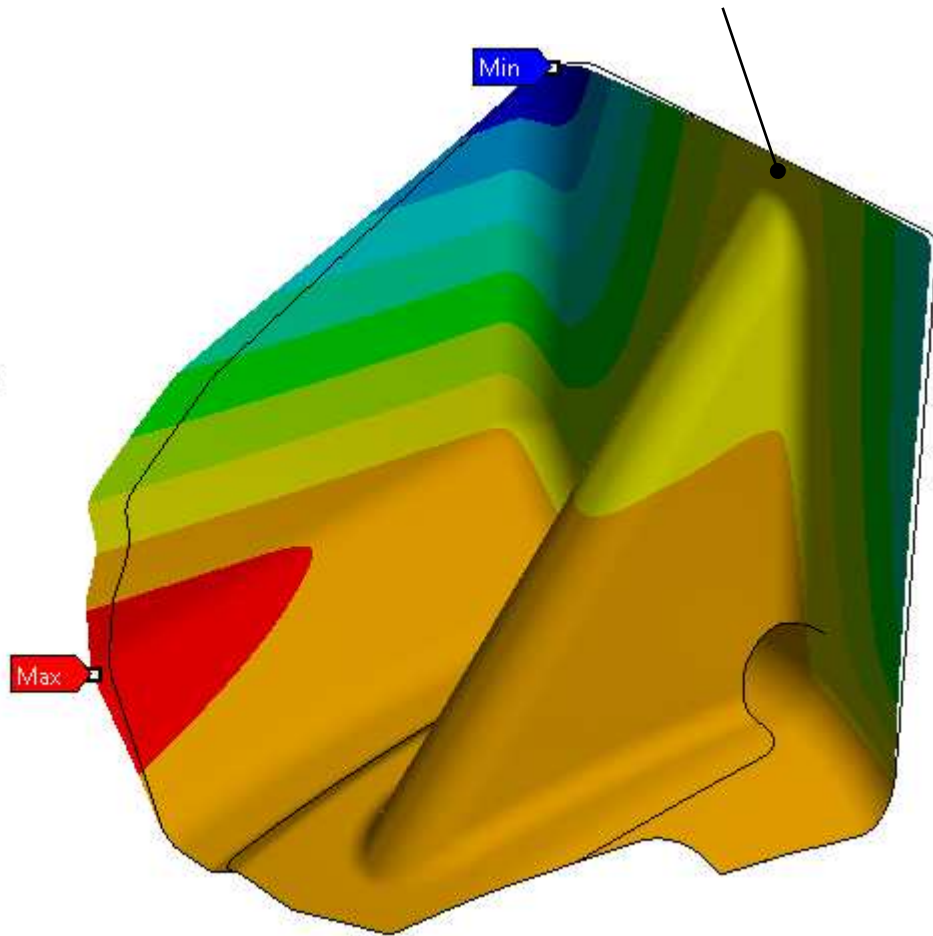
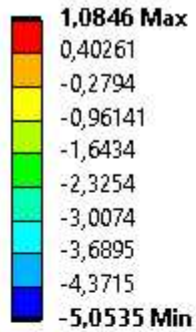


Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Winkel aus ABS mit $t = 1,2$ mm mit ztzl. Versteifung aus ABS+GF

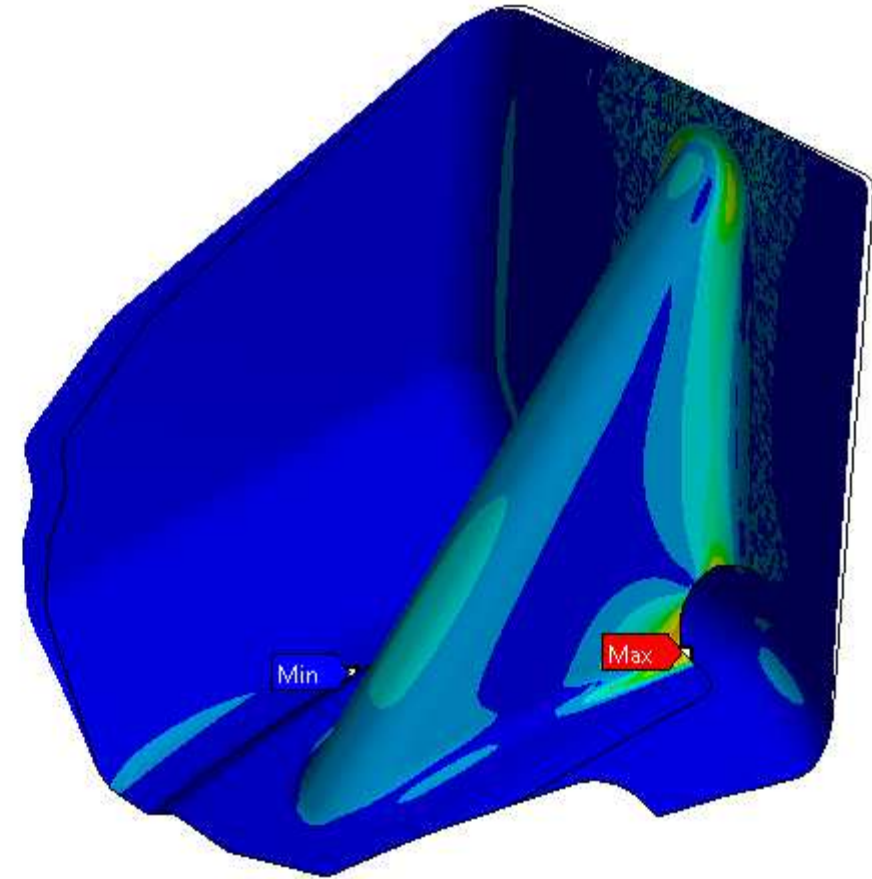
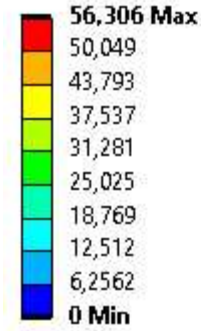
**Var. 2: ABS+GF mit $t = 1,7$ mm
UD-Drapiierung**

Verschiebung in x-Achse [mm]

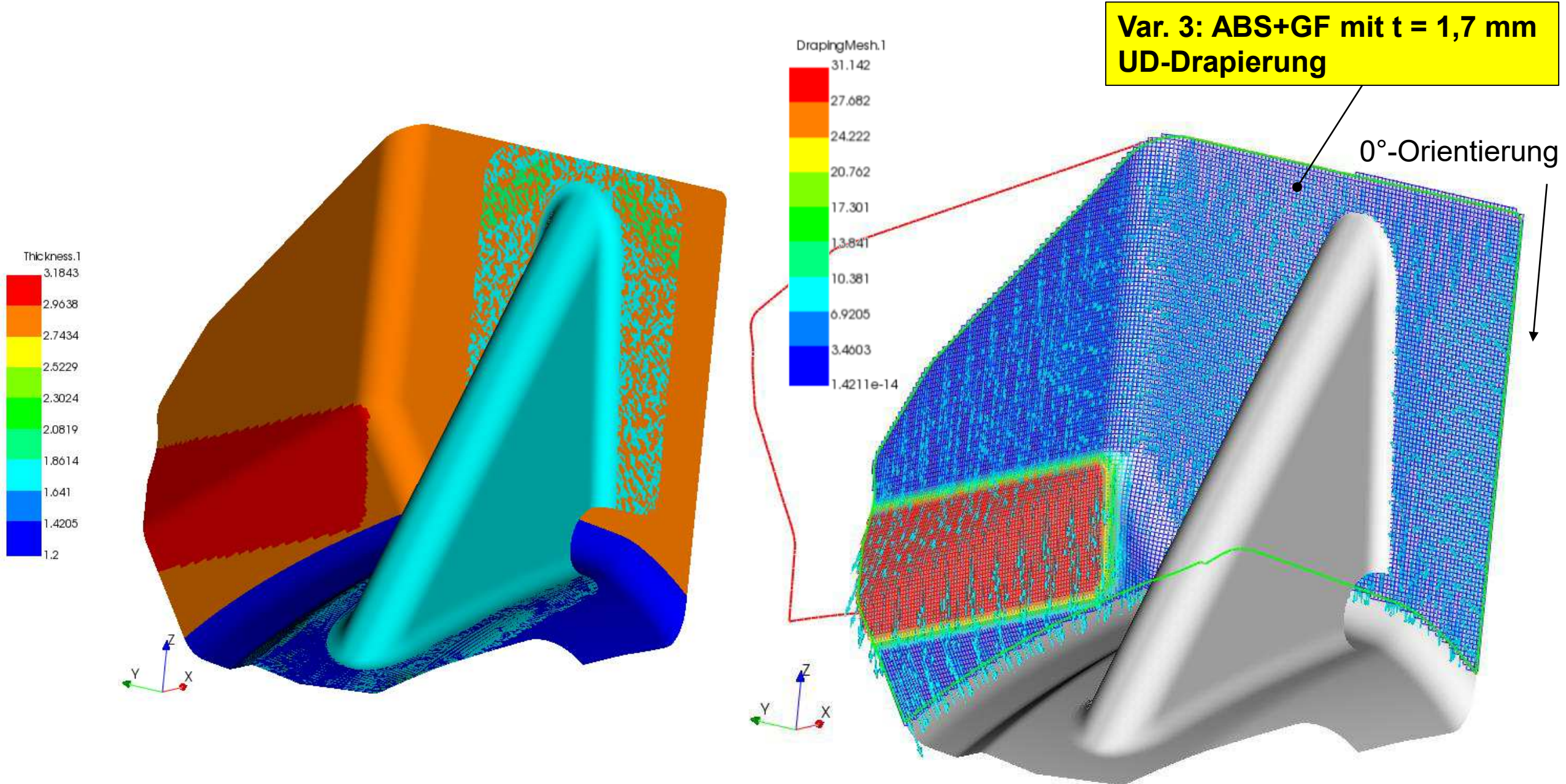
-0,67264 mm



Vergleichsspannung [MPa]



Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Winkel aus ABS mit $t = 1,2$ mm mit ztzl. Versteifung aus ABS+GF

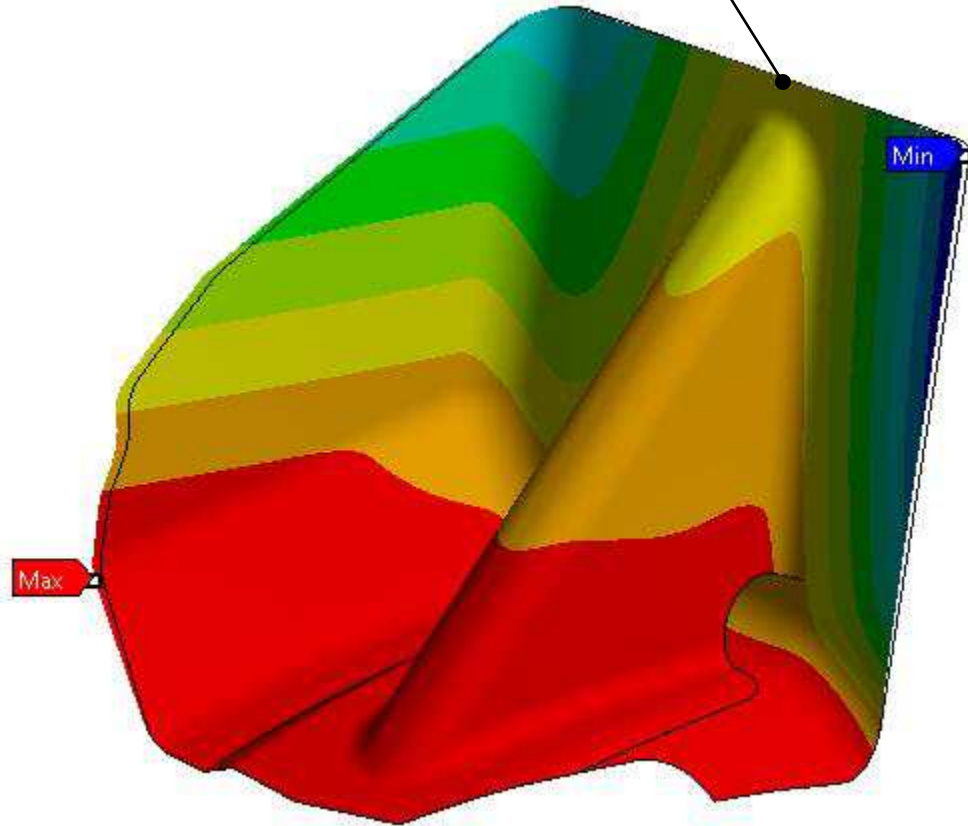
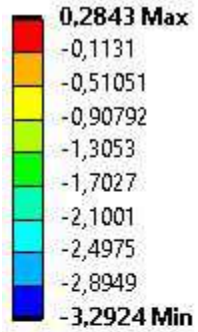


Festigkeits- und Steifigkeitssimulation, Winkel aus ABS mit $t = 1,2$ mm mit ztzl. Versteifung aus ABS+GF

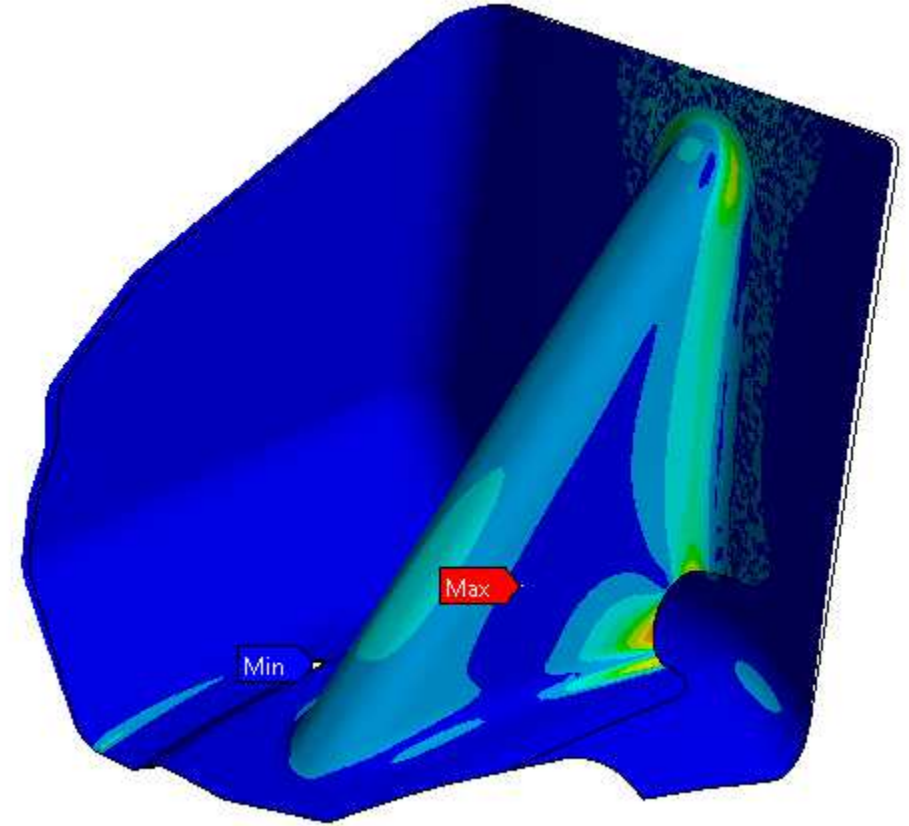
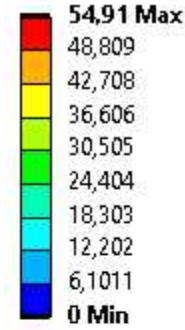
**Var. 3: ABS+GF mit $t = 1,7$ mm
UD-Drapiierung**

Verschiebung in x-Achse [mm]

-0,66359 mm



Vergleichsspannung [MPa]



Anhang G

- Tabelle Thermopressen Prototyp ABS-GF Schale Rippe

Versuch	vorziehen der Zuschnitte im Umformfen	Umformtemperatur [°C]	Oberheizung [s] ab > 100°C	unterheizung [s] ab > 100°C	Abschüßdauer [s]	Fahrgeschwindigkeit Oberstempel	Bemerkungen / Ergebnis
1	t ₀ = min T ₀ = 80 °C	205/157	60/45	30/15	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] GF Ausrichtung 0° mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten gut / Zuschnitt zu groß
2	t ₀ = min T ₀ = °C	209/159	60/45	30/25	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] GF Ausrichtung 0° mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten gut / Zuschnitt zu groß
3	t ₀ = min T ₀ = °C	212/155	60/45	30/25	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] GF Ausrichtung 0° mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten gut /Zuschnitt reduziert/ Zustellung Oberstempel +1 mm
4	t ₀ = min T ₀ = °C	214/156	60/45	30/25	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] GF Ausrichtung 0° mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten gut /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Zustellung Oberstempel +1 mm
5	t ₀ = min T ₀ = °C	216/165	60/45	30/25	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] GF Ausrichtung 0°/auser mittig geschweißt mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten gut /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Zustellung Oberstempel +1 mm
6	t ₀ = min T ₀ = °C	216/163	60/45	30/20	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] GF Ausrichtung 0°/auser mittig geschweißt mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten gut /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Zustellung Oberstempel +1 mm

SCHALE 17.12.24

1	t ₀ = min T ₀ = °C	210/160	60/45	30/25	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [0/45/90/-45/0] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten schlecht /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 3,4 Materialstärke: 2,2 +1,2
2	t ₀ = min T ₀ = °C	212/160	60/45	30/20	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [10-lagig] / Ausrichtung 0°/mittig geschweißt/ Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten schlecht /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 5,4 Materialstärke: 4,4 +1,2
3	t ₀ = min T ₀ = °C	210/160	60/45	30/20	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [10-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ auf 0 gestoßen in der Mitte / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 4,4 Materialstärke: 4,4 +1,2
4	t ₀ = min T ₀ = °C	211/157	60/45	30/20	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [10-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ auf 0 gestoßen in der Mitte / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 4,4 Materialstärke: 4,4 +1,2
5	t ₀ = min T ₀ = °C	210/162	60/45	30/20	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [10-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ auf 0 gestoßen in der Mitte / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 3,4 Materialstärke: 4,4 +1,2
6	t ₀ = min T ₀ = °C	198/158	60/45	30/20	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [10-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ nur rechts belegt/ Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 2,9 Materialstärke: 4,4 +1,2
7	t ₀ = min T ₀ = °C	220/160	60/45	30/20 30/50 bei Stützluft	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [10-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ nur links belegt/ Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 2,9 Materialstärke: 4,4 +1,2
8	t ₀ = min T ₀ = °C	211/160	60/45	30/20	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [10-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ auf 0 gestoßen in der Mitte / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 2,9 Materialstärke: 4,4 +1,2

RIPPE 09.01.25

10	t ₀ = min T ₀ = °C	213/153	60/50	30/25	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [14-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ linke Seite +30 mm/ Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 6,3 Materialstärke: 6,0 +1,2
11	t ₀ = min T ₀ = °C	218/156	60/50	30/25	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [14-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ linke Seite +30 mm / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 5,3 Materialstärke: 6,0 +1,2
12	t ₀ = min T ₀ = °C	218/158	60/50	30/20 30/50 bei Stützluft	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [14-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ linke Seite +30 mm / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 4,3 Materialstärke: 6,0 +1,2
13	t ₀ = min T ₀ = °C	218/158	60/50	30/20 30/50 bei Stützluft	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [14-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ linke Seite +30 mm / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 3,3 Materialstärke: 6,0 +1,2
14	t ₀ = min T ₀ = °C	190/156	60/50	30/20 30/50 bei Stützluft	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [14-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ rechte Seite +30 mm / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 3,3 Materialstärke: 6,0 +1,2
15	t ₀ = min T ₀ = °C	190/156	60/60	30/20 30/15 bei Stützluft	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [14-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ rechte Seite +30 mm / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 2,3 Materialstärke: 6,0 +1,2 Fehlermeldung Oberstempel -> Antrieb Oberstempel gestört
16	t ₀ = min T ₀ = °C	186/152	60/50	30/20 30/50 bei Stützluft	240	300mm/s	2mm ABS Platte mit Zuschnitten endlos ABS-GF [14-lagig] / Ausrichtung 0°/ mittig geschweißt/ rechte Seite +30 mm / Oberstempel mit Trennmittel mit Vakuum geformt 10s nach WZ zusammenfahren / Verschmelzung der Platten mittel /Zuschnitt mit Ausschnitt Ecke/ Spalt 2,8 Materialstärke: 6,0 +1,2

RIPPE 14.01.25