

# Schlussbericht

zum Vorhaben

For<sup>(s)</sup>tschritt 

Teilprojekt:

**Projektleitung, Konstruktion, Auslegung und Entwicklung eines Bauteils für automobile Serienanwendung**

Laufzeit: 01.03.2017 – 31.08.2020

Autoren:

Große, Thomas<sup>1</sup>; Fischer, Fabian<sup>1</sup>; Kohl, Daniel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volkswagen AG

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



TÜVRheinland®

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Verbundprojekt

Innerhalb der Förderbekanntmachung „Leichtbaukonzepte für Straßen- und Schienenfahrzeuge“ innerhalb des BMWi-Fachprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“

**Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umweltauswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau (For(s)tschritt)**

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert und vom Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH betreut.

Eine Übersicht über die weiteren Teilvorhaben des Verbundprojekts zeigt die nachfolgende Tabelle:

**Tabelle 1: Übersicht der Teilvorhaben**

<i>Förderkennzeichen</i>	<i>Zuwendungsempfänger</i>	<i>Teilvorhaben</i>
19116013A	VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT	Projektleitung, Konstruktion, Auslegung und Entwicklung eines Bauteils für automobiler Serienanwendung
19116013B	RohTech - DST GmbH	Produktionsprozess des Prototyps
19116013C	ALSTOM Transport Deutschland GmbH	Demonstrator für ein Schienenfahrzeug
19116013D	Gebr. Bode GmbH & Co. KG	Konzeptionierung und Entwicklung der Prototypen (Schienenfahrzeugtüren)
19116013E	Siebenwurst Werkzeugbau GmbH	Entwicklung, Fertigung und Erprobung von Versuchs- und Prototypenwerkzeugen
19116013F	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	Bauteilkonzeption und -Auslegung, Entwicklung Simulationsmethode, Versuche an Teilstrukturen und Prototypen
19116013G	Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH	Untersuchung des Korrosionsschutzes metallischer Verbundmaterialien
19116013H	Universität Kassel	Qualifizierung holzbasierter Multimaterialsysteme für den Einsatz im Straßen- und Schienenfahrzeugbau
19116013I	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.	Entwicklung, Prüfung und Ertüchtigung holzbasierter Lagenwerkstoffe für Multi-Material-Systeme (MMS)

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	VI
I. Einleitung .....	7
II. Bericht der Arbeitsergebnisse .....	7
II.1 Projektleitung (AP0) .....	7
II.1.1 Projektmanagement .....	7
II.1.2 Publikationen, Tagungen, Öffentlichkeitsarbeit.....	8
II.2 Konzept, Konstruktion und Optimierung einer Baugruppe PKW (AP1) .....	10
II.2.1 Aufgabenstellung des Teilprojekts.....	10
II.2.2 Entwicklung Gesamtkonzept .....	10
II.2.3 Umsetzung des Konzepts .....	15
II.2.4 Optimierung der Struktur für quasistatische Lastfälle .....	24
II.2.5 Optimierung der Struktur für Crashlastfälle.....	36
II.2.6 Prüfung an generischen Teilstrukturen .....	36
II.2.7 Akustische Dämpfungseigenschaften.....	36
II.2.8 Materialauswahl und -validierung .....	46
II.2.9 Begleitende grundlegende fertigungstechnologische Fragestellungen .....	54
II.2.10 Herstellung und Test von Prototypen .....	61
II.2.11 Entwicklung einer möglichen Serienfertigungsprozesskette .....	66
II.3 Technologiebewertung (AP13) .....	66
II.3.1 Ökologische Bewertung .....	66
II.3.2 Kostenbewertung .....	70
II.3.3 Ermittlung weiterer zukünftiger Einsatz- und Gewichtseinsparpotenziale .....	73
III. Zusammenfassung der Projektergebnisse und Fazit zur Zielerreichung .....	79
Literaturverzeichnis .....	80

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Links: Instrumententafel des Passat B8 mit Cockpit-Modulquerträger; Mitte: Fahrertür des VW UP!; Rechts: Fahrersitz des VW Crafter/T6.....	11
Abbildung 2:	Übersicht Tür-Rohbau des VW UP! (ohne Außenblech).....	11
Abbildung 3:	Ergebnis Bauteilworkshop; A: Türaufprallträger und Scharnierverstärkung mit gleichgerichtetem Lagenaufbau ("Blattfederkonzept"); B: Türaufprallträger und Scharnierverstärkung mit zusammenlaufendem Lagenaufbau; C: Türaufprallträger und ausgestellte „Flügel“ als Schwingungsdämpfung.....	12
Abbildung 4:	Erster konstruktiver Entwurf (K1) des DLR für das holzbasierte, funktionsintegrierte Türinnenteil .....	15
Abbildung 5:	Konstruktionsstand des holzbasierten Türinnenteils zum Zeitpunkt des zweiten Projekttreffens (K2) .....	16
Abbildung 6:	Durchführung für das Stahl-Zugband und Anbindung an das Türinnenblech (K2).....	17
Abbildung 7:	Profilkonzepte für die Funktion des Türaufprallträgers, zwischenzeitlich favorisierte Profile E1 und F1 .....	18
Abbildung 8:	Zwischenzeitlich favorisierte Profile E1 und F1 mit Lasteinleitung und erwarteter Deformation .....	18
Abbildung 9:	Gegenüberstellung der Konstruktionsstände K2 und K3 .....	20
Abbildung 10:	Detailansicht Schnitt im Bereich der Türinnenblechanbindung / Kabeldurchführung.....	21
Abbildung 11:	Detailansicht von K3 zur Anbindung der Gewindebuchsen (links) und des Türfeststellers (rechts).....	21
Abbildung 12:	Holzbasiertes Türinnenteil (K3) in Einbausituation .....	21
Abbildung 13:	Demonstratorbauteil (K3) in Türrohbau .....	22
Abbildung 14:	Holzbasiertes Türinnenteil (K4) mit den einzelnen Bestandteilen .....	23
Abbildung 15:	Holzbasiertes Türinnenteil (V4) im CAD (links) und als real aufgebauter Funktionsdemonstrator (rechts).....	24
Abbildung 16:	FE-Modell des holzbasierten Türinnenteils V3 .....	25
Abbildung 17:	quasistatische Lastfälle; der rote Pfeil kennzeichnet die Position der Lasteinleitung.....	25

Abbildung 18:	simulierte Verformung der Serientür im Verhältnis zu den nach Prüfvorschrift zulässigen Werten.....	27
Abbildung 19:	Vernetzung des Konstruktionsstands K4 zur Berechnung der quasistatischen Lastfälle .....	33
Abbildung 20:	Klebstoffverteilung für die Modellierung des Konstruktionsstands K4 .....	33
Abbildung 21:	Versuchsplan zur Untersuchung der frequenzabhängigen Dämpfung .....	36
Abbildung 22:	Anregungs- und Sensorpositionen .....	37
Abbildung 23:	Frequenzabhängigen Verlustfaktoren.....	38
Abbildung 24:	Trendlinien der frequenzabhängigen Verlustfaktoren .....	38
Abbildung 25:	Vergleich der Verlustfaktoren von Furnierplatten, Aluminium und Kunststoff.....	39
Abbildung 26:	VW UPI, Position der Standard-Bitumendämmplatten in der Tür .....	39
Abbildung 27:	links: Bitumendämmplatten in der Fahrertür, rechts: entfernte und gewogene Dämmplatten .....	40
Abbildung 28:	Klebstoffauftrag und Massenbestimmung, links: große Dämmplatte, rechts: kleine Dämmplatte.....	40
Abbildung 29:	Fotos der modifizierten Türen und Massen der Dämmplatten mit/ohne Klebstoff.....	41
Abbildung 30:	links: Expander zwischen den Türgriffen innen; Mitte: Öffnung der Tür auf einen definierten Abstand; rechts: Einrichtung von Messmikrofonen in 1 m Abstand zum Fahrzeug .....	41
Abbildung 31:	Position der Beschleunigungsaufnehmer (auf Türaußenblech abgebracht).....	42
Abbildung 32:	Ergebnis der Punktinertanz an Messpunkt 1 nahe Türschloss .....	42
Abbildung 33:	Ergebnis der Punktinertanz an Messpunkt 2 nahe Lautsprecher.....	43
Abbildung 34:	Campbell-Diagramm Referenzfahrzeug, (1x Türschließen, sec 4-5, Schalldruck über 3 Mikrofone gemittelt) .....	43
Abbildung 35:	Campbell-Diagramm E-Up! Modifiziert, (1x Türschließen, sec 4-5, Schalldruck über 3 Mikrofone gemittelt) .....	44
Abbildung 36:	Campbell-Diagramm Up! GTI Modifiziert, (1x Türschließen, sec 4-5, Schalldruck über 3 Mikrofone gemittelt) .....	44
Abbildung 37:	FFT des Zuschlaggeräusches aller 6 Türen über 3 Ereignisse gemittelt ...	45

Abbildung 38:	Terz-Spektrum des Zuschlaggeräusches aller 6 Türen über 3 Ereignisse gemittelt, Mikro 1 .....	45
Abbildung 39:	Buchenfurniere für die Emissionsprüfung, von links nach rechts: unbehandelt, acetyliert, thermisch modifiziert, KTL-behandelt.....	47
Abbildung 40:	Neunteilige Skala der hedonischen Wirkung .....	52
Abbildung 41:	Versuchsaufbau und Prozessablauf zur Pultrusion mit Buchenfurnier, darin sind A: Furnierrolle, B: Durchführung im Harzbad, C: Werkzeugeinlauf .....	55
Abbildung 42:	Pultrudierte Streifenprofile mit Endlosglasfasern und 2 x 0,5 mm Buchenfurnier; A: Buchenfurniere als äußere Decklagen, B: Buchenfurniere als Sandwichkern.....	56
Abbildung 43:	Pultrudierte Streifenprofile mit 1 mm dicken Buchenfurnier im Kern mit verschiedenen Faservolumenanteilen (FVA) und Abzugsgeschwindigkeiten (v).....	57
Abbildung 44:	Blasenbildung bei Verwendung eines befeuchteten Furniers und UP-Harz .....	57
Abbildung 45:	Rohrwerkzeug für die Pultrusion mit drei verschiedenen Querschnittsradien.....	58
Abbildung 46:	Furniere unterschiedlicher Stärken in den verschiedenen Radien des Rohrprofils .....	59
Abbildung 47:	Versuchswerkzeug SMC+Holzfurnier.....	60
Abbildung 48:	Aus SMC und Holzfurnier hergestellte Interieurabdeckungen .....	60
Abbildung 49:	links: aus Presse entnommener Stapel in Schutzfolie mit Verwerfung auf der kurzen Bauteilseite; rechts: erstes Pressergebnis mit leichter Faltenbildung auf der langen Bauteilseite.....	62
Abbildung 50:	Beleimte Furnierlage mit dreieckigem Einschnitt im Bereich der Verwerfung auf der kurzen Bauteilseite.....	62
Abbildung 51:	entformter Pressling, noch nicht besäumt .....	63
Abbildung 52:	besäumtes Bauteil mit Rechteckausschnitt für Balken und Zugband.....	63
Abbildung 53:	Modifiziertes Crashrohr mit Holzstopfen.....	64
Abbildung 54:	Baugruppe des holzbasierten funktionsintegrierten Türinnenteils (Akustikdämmplatten noch nicht verklebt) .....	65
Abbildung 55:	Türrohbau mit holzbasiertem funktionsintegriertem Türinnenteil (ohne Türäußenblech).....	66

Abbildung 56:	Cradle-to-Gate (CtG) Emissionen der verwendeten Werkstofffraktionen innerhalb der Baugruppen, links: Serienbaugruppe aus Stahl mit Bitumen-Dämmmatten, rechts: funktionsintegriertes, holzbasiertes Türinnenteil .....	68
Abbildung 57:	Änderung der Tank-to-Wheel (TtW) Emissionen durch das höhere Gewicht der holzbasierten Baugruppe.....	69
Abbildung 58:	Änderung der Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus .....	69
Abbildung 59:	Kostenaufteilung zwischen den Bauelementen/-phasen .....	71
Abbildung 60:	Aufteilung Gesamtkosten in Kostenkategorien je Bauelement/-phase.....	72
Abbildung 61:	links: Crashrohr in der Fahrzeugstruktur, rechts: betrachtete Lastfälle .....	73
Abbildung 62:	Konzept des Stahl/Holz-Hybridcrashrohrs.....	74
Abbildung 63:	Ergebnisse bei Knickbeanspruchung .....	75
Abbildung 64:	Ergebnisse bei Dreipunktbiegung.....	76
Abbildung 65:	Konzept des lokal verstärkten Stahl/Holz-Hybridcrashrohrs .....	76
Abbildung 66:	Simulations- und Versuchsergebnisse mit lokal verstärktem Hybridcrashrohr bei Dreipunktbiegung .....	77
Abbildung 67:	Ergebnisse bei Dreipunktbiegung und lokal verstärktem Hybridcrashrohr mit reduzierter Wandstärke .....	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Teilvorhaben .....	1
Tabelle 2:	Gewichtsvergleich Serie und holzbasiertes Türinnenteil (K2) .....	17
Tabelle 3:	Quasistatische Lastfälle, Ergebnisübersicht ausgehend von K3.....	28
Tabelle 4:	Quasistatische Lastfälle, Ergebnisübersicht ausgehend von K4.....	35
Tabelle 5:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche unbehandelt" .....	48
Tabelle 6:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche thermisch modifiziert" .....	49
Tabelle 7:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche acetyliert" .....	49
Tabelle 8:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche unbehandelt gelüftet" .....	50
Tabelle 9:	Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche KTL-behandelt" .....	50
Tabelle 10:	Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde von unbehandeltem, thermisch modifiziertem und acetyliertem Buchenfurnier.....	51
Tabelle 11:	Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde von unbehandeltem gelüfteten sowie KTL-behandeltem Buchenfurnier.....	51
Tabelle 12:	Ergebnisse der Geruchsbewertung nach 48 h von unbehandeltem, thermisch modifiziertem und acetyliertem Buchenfurnier.....	53
Tabelle 13:	Ergebnisse der Geruchsbewertung nach 48 h von unbehandeltem gelüfteten sowie KTL-behandeltem Buchenfurnier .....	54

## I. Einleitung

Im nachfolgenden Bericht werden die von Volkswagen im Rahmen des Teilprojekts „ des Verbundvorhabens For(s)tschritt erzielten Arbeitsergebnisse erläutert. Daher wird ausschließlich auf die Arbeitspakete eingegangen, die durch Volkswagen verantwortet wurden. Eine allgemeine Einleitung zum Gesamtvorhaben, die Ausgangssituation und der Stand der Technik vor der Projektdurchführung sowie die Planung und der Ablauf des Vorhabens sind im übergreifenden Gesamtabschlussbericht gegeben.

## II. Bericht der Arbeitsergebnisse

### II.1 Projektleitung (AP0)

#### II.1.1 *Projektmanagement*

Im Rahmen des Projektmanagements wurden die halbjährlich stattfindenden Projekttreffen bei verschiedenen Partnern geplant und realisiert. Folgende Projekttreffen fanden statt:

- 31.03.2017 in Wolfsburg (Kickoff)
- 16.11.2017 in Stuttgart
- 19.04.2018 in Salzgitter
- 08.11.2018 in Kassel
- 10.04.2019 in Detmold
- 26.11.2019 in Salzgitter
- 15.09.2020 als Skype-Konferenz (Abschlusstreffen)

Im ersten Projekttreffen wurde darüber hinaus die Bildung von Arbeitsgruppen zu den Oberthemen „Konzept PKW“, „Konzept Schiene“, „Holzwerkstoffe“, „Detailkonzepte“, „Metall“ und „Werkzeuge“ beschlossen. In den Arbeitsgruppen fanden anschließend separate Treffen der an den Themen beteiligten Partner statt, wobei stets allen Partnern die Möglichkeit zur Teilnahme eingeräumt wurde. Zusätzlich wurden im Rahmen des Projektmanagements verschiedene Termine für Firmenbesuche mit dem Gesamtkonsortium organisiert, bei denen beispielsweise Firmen aus der Holzverarbeitenden Industrie Einblicke in die Produktion gewährten.

## **II.1.2 Publikationen, Tagungen, Öffentlichkeitsarbeit**

Um einer breiten Zielgruppe Informationen über das Projekt und die Ergebnisse zukommen zu lassen, wurde eine eigene Homepage mit einer allgemeinen Projektbeschreibung, Informationen zu den einzelnen Partnern und Publikationen aus dem Konsortium erstellt. Die Homepage ist unter den folgenden URLs zu erreichen:

- [www.holz-im-fahrzeug.de](http://www.holz-im-fahrzeug.de)
- [www.holz-im-auto.de](http://www.holz-im-auto.de)
- [www.holz-im-automobil.de](http://www.holz-im-automobil.de)
- [www.holz-im-karosseriebau.de](http://www.holz-im-karosseriebau.de)

Des Weiteren wurden die erzielten Forschungsergebnisse durch Vorträge und Veröffentlichungen auf Konferenzen bzw. in Fachjournalen gezielt für ein Fachpublikum publiziert. Im Rahmen des Projektes sind die nachfolgend aufgeführten Veröffentlichungen entstanden. Die Ergebnisse werden allerdings auch über das Projektende hinaus in Folgepublikationen Verwendung finden.

- Berthold, Dirk: „Furnierbasierte Hybridwerkstoffe – Chancen und Herausforderungen für die Holzindustrie in Deutschland“, 18. Holztechnologischem Kolloquium, Dresden, 12.04. - 13.04.2018
- Große, Thomas; Fischer, Fabian; Berthold, Dirk; Schauerte, Oliver: „Wood materials – suitable for structural automotive applications?“, 11. European Wood-based Panel Symposium, Hamburg, 10.10. - 12.10.2018
- Große, Thomas; Fischer, Fabian; Hillmann, Jürgen; Berthold, Dirk; Piazza, Giovanni; Käse, David; Beeh, Elmar; Kohl, Daniel; Nguyen, Hoa: „Holz als Strukturwerkstoff im modernen Automobilbau“, WerkstoffPlus Auto 2019, Stuttgart, 20.02. - 21.02.2019
- Henneken, Hartmut: „New development using glued wood (multi-material) systems in vehicle construction“, in-adhesives 2019, München, 25.02 - 26.02.2019
- Fischer, Fabian: „Wood Materials in the Automotive Industry“, InnovaWood General Assembly 2019, Hamburg, 27.03 - 28.03.2019
- Große, Thomas; Fischer, Fabian; Kohl, Daniel; Nguyen, Hoa; Böhm, Stefan; Poller, Benjamin; Käse, David; Piazza, Giovanni; Berthold, Dirk; Burgold, Claudia; Bachmann, Guido; Pellegrini, Andreas: „Woodbased multimaterials for structural parts in mobile applications“, Joining in Car Body Engineering 2019, Bad Nauheim, 09.04. - 10.04.2019
- Käse, David; Piazza, Giovanni; Beeh, Elmar; Fischer, Fabian; Große, Thomas; Kohl, Daniel; Nguyen, Hoa; Berthold, Dirk; Burgold, Claudia: „Einsatzpotentiale furnierbasierter Holzverbundwerkstoffe in Fahrzeugstrukturen“, 22. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde“, Kaiserslautern, 26.06. - 28.06.2019
- Enge, Jana; Bachmann, Guido; Pellegrini, Andreas; Nguyen, Hoa; Kohl, Daniel; Böhm, Stefan; Käse, David; Piazza, Giovanni; Beeh, Elmar; Burgold, Claudia; Berthold, Dirk; Albert, Torsten: „Türsysteme für den Schienenverkehr auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialien“, 20. Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 3. - 4. März 2020, Würzburg

- Käse, David; Piazza, Giovanni; Beeh, Elmar; Kohl, Daniel; Nguyen, Hoa; Berthold, Dirk; Burgold, Claudia: „Potential for Use of Veneer-Based Multi-Material Systems in Vehicle Structures“, Key Engineering Materials, ISSN: 1662-9795, Vol. 809, pp 633-638
- Käse, David B., Piazza, Giovanni, Beeh, Elmar, Friedrich, Horst E., Kohl, Daniel, Nguyen, Hoa, Dr. Berthold, Dirk, Burgold, Claudia „Innovative Konzepte für holz-basierte Hybridwerkstoffe in Fahrzeugstrukturen“, Werkstoffwoche Dresden 2019, 18.09. – 20.09.2019
- Heyner (geb. Käse), David B., Piazza, Giovanni, Beeh, Elmar, Friedrich, Horst E., Kohl, Daniel, Nguyen, Hoa, Dr. Berthold, Dirk, Burgold, Claudia, „Innovative concepts for the usage of veneer based hybrid materials in vehicle structures“, 3rd International Conference on Materials Design and Applications 2020, 05.11 – 06.11.2020
- Piazza, Giovanni, Heyner (geb. Käse), David B., Beeh, Elmar, Friedrich, Horst E., Methodology to simulate veneer based structural components for static and crash load cases, 3rd International Conference on Materials Design and Applications, 2020 05.11 – 06.11.2020

Neben den wissenschaftlichen Beiträgen für das Fachpublikum erfolgten in der Projektlaufzeit die folgenden Schutzrechtsanmeldungen:

- „Türinnenstruktur für eine Tür oder einen Deckel für ein Kraftfahrzeug“ (DE102018120190A1); Anmelder: DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Universität Kassel, Volkswagen AG, Anmeldetag 20.08.2018
- „Türflügelkonstruktion, Türflügel oder Tür sowie Verwendung von Holz oder eines auf Holz basierenden Materials bei einer Türflügelkonstruktion“ (DE202018102451U1); Anmelder: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Gebr. Bode GmbH & Co. KG, Anmeldetag 03.05.2018
- „Türflügelkonstruktion, Türflügel oder Tür sowie Verwendung von Holz oder eines auf Holz basierenden Materials bei einer Türflügelkonstruktion“ (DE102019109251A1); Anmelder: DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Gebr. Bode GmbH & Co. KG, Anmeldetag 09.04.2019
- „Exterior wall segment for a railway vehicle, railway vehicle and method for manufacturing an exterior wall segment“ (20178594.6 -1107); Anmelder: DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Alstom S.A.; Anmeldetag 05.06.2020

## **II.2 Konzept, Konstruktion und Optimierung einer Baugruppe PKW (AP1)**

### **II.2.1 Aufgabenstellung des Teilprojekts**

Die Aufgabe des Teilprojekts „Konzept, Konstruktion und Optimierung einer Baugruppe PKW“ bestand in der Entwicklung einer holzbasierten PKW-Komponente, die für den Einsatz in einem crashrelevanten Fahrzeugbereich ausgelegt und hinsichtlich der Fertigungstechnik für eine großserientechnische Umsetzung konzipiert sein sollte. Zur Erfüllung dieser Aufgabe wurden folgende Teilaufgaben abgeleitet:

- Entwicklung eines Gesamtkonzepts
  - o Identifikation einer geeigneten Baugruppe anhand aktueller Fahrzeugmodelle innerhalb des Volkswagen Konzerns und der einzelnen Bauteilfunktionen
  - o Ableitung der Anforderungen für eine Umsetzung der Funktionalitäten durch eine holzbasierte Komponente/Baugruppe
  - o Erstellung eines konzeptionellen Entwurfs
- Umsetzung des Konzepts
  - o Konstruktive Ausgestaltung des Entwurfs
  - o Iterative Optimierung der Konstruktion anhand von Berechnungs- und Versuchsergebnissen und Festlegung eines finalen Standes
- Herstellung und Prüfung von Funktionsdemonstratoren
- Entwicklung eines Fertigungskonzeptes für die großserientechnische Umsetzung
- Kostenbewertung
- Bewertung des ökologischen Fußabdrucks im Vergleich zur Referenzbaugruppe (Life Cycle Assessment)
- Durchführung begleitender Untersuchungen auf Basis der abgeleiteten Bauteilanforderungen, z.B. alternative fertigungstechnologische Ansätze, Werkstoffeigenschaften, etc.

### **II.2.2 Entwicklung Gesamtkonzept**

#### **II.2.2.1 Identifikation einer geeigneten Baugruppe**

Zur Identifikation einer geeigneten Baugruppe innerhalb eines PKWs wurde zunächst ein Screening potenzieller Einsatzbereiche holzbasierter Bauteile durch Volkswagen durchgeführt. Als potenzielle Einsatzbereiche wurden die B-Säule, der Mitteltunnel, die Bodenstruktur, die Sitze/Sitzschale, das Rückbankbodenblech, das Dach, der Cockpit-Modulquerträger und die Tür/Türbrüstung identifiziert. Als Bewertungskriterien für eine Priorisierung wurden die geometrische Komplexität, die Richtung vorhandener Lastpfade, zur Verfügung stehender Bauraum, und die Prozessfolge in der Fahrzeugfertigung im Hinblick auf eine ggf. erforderliche KTL-Kompatibilität angesetzt. Weiterhin wurden potenzielle Zusatznutzen durch die Integration oder Verbesserung von akustischen, thermischen oder haptischen Funktionen identifiziert.

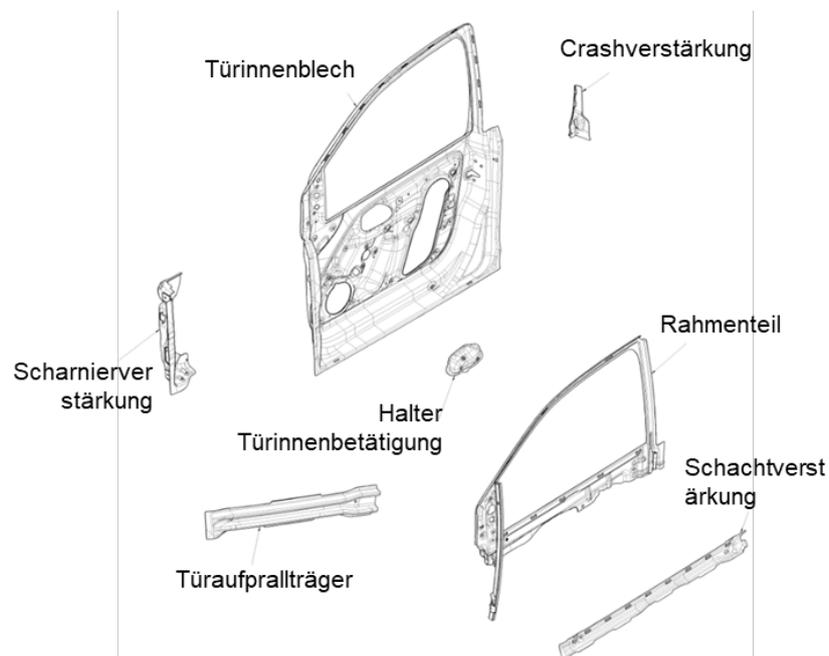
Als Ergebnis der Diskussion wurden die Fahrersitzschale des VW Crafter, der Cockpit-Modulquerträger des VW Passat und der Türrohbau des VW Up! für die weitere Betrachtung ausgewählt.



**Abbildung 1: Links: Instrumententafel des Passat B8 mit Cockpit-Modulquerträger; Mitte: Fahrertür des VW UP!; Rechts: Fahrersitz des VW Crafter/T6**

Darauf aufbauend erfolgte im Rahmen von Workshops mit Volkswagen-Fachexperten aus der Entwicklung und der Vorentwicklung eine detaillierte Klärung der Hauptanforderungen an die ausgewählten Baugruppen und die Bewertung des technologischen Potenzials durch den Einsatz von Holzwerkstoffen im Vergleich zur aktuellen Lösung. In gemeinsamer Entscheidung mit den an AP 1 beteiligten Projektpartnern wurde der Tür-Rohbau als Zielbaugruppe für das Projekt For(s)tschritt ausgewählt (Abbildung 2).

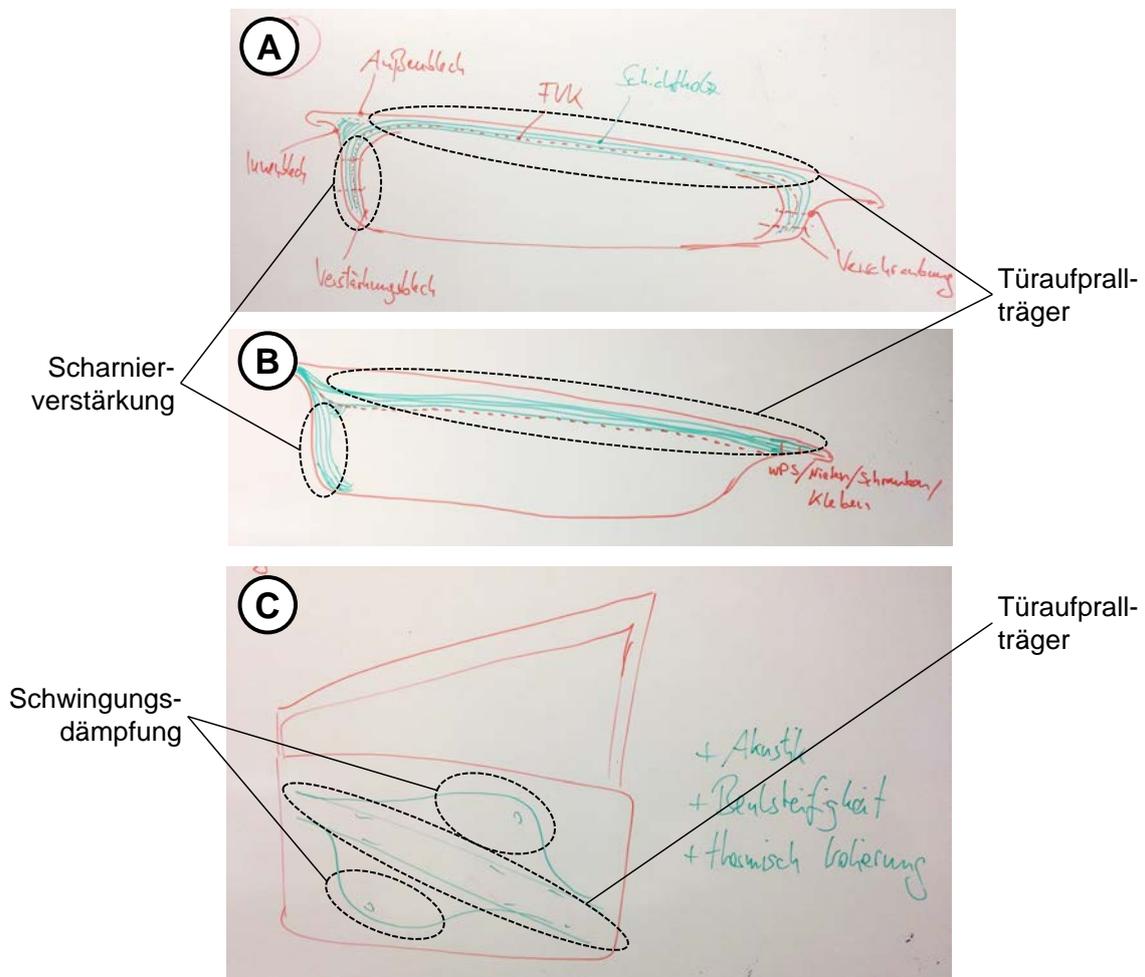
Maßgeblich für diese Entscheidung waren die relativ geringe geometrische Komplexität, der zur Verfügung stehende Bauraum für eine „holzgerechte“ Konstruktion im Türinneren und das Potenzial Funktionen des Türaufprallträgers, des Crashrohrs und der Türbrüstung in ein Holz-Hybrid-Bauteil zu integrieren.



**Abbildung 2: Übersicht Tür-Rohbau des VW UP! (ohne Außenblech)**

Das Projekt For(s)tschritt baut somit auf den Ergebnissen des Vorgängerprojektes HAMMER auf, in welchem der Türaufprallträger als isoliertes Bauteil ohne Anpassung der grundlegenden Werkstückgeometrie betrachtet wurde und erweitert den Fokus auf die gesamte Baugruppe des Tür-Rohbaus.

Im nächsten Schritt wurde ein Workshop terminiert, in welchem gemeinsam mit den Tür-Fachexperten und den Projektpartnern mehrere Baugruppenkonzepte unter Verwendung von Holzwerkstoffen zur Bewertung und Auswahl für die Auslegung und Konstruktion im weiteren Projektverlauf erarbeitet wurden. Hierzu wurden anhand eines Tür-Rohbaus als Schweißbaugruppe und des entsprechenden CAD-Modells konstruktive Möglichkeiten des Einsatzes von Holzwerkstoffen diskutiert. Als Ergebnis des Workshops wurde ein Konzept für ein holzbasierendes Türinnenteil verabschiedet, welches die Funktionen des Türaufprallträgers, der Scharnier- und Türfeststellerverstärkungen und der auf dem Türaußenblech angebrachten Matten zur Schwingungsdämpfung integriert (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Ergebnis Bauteilworkshop; A: Türaufprallträger und Scharnierverstärkung mit gleichgerichtetem Lagenaufbau ("Blattfederkonzept"); B: Türaufprallträger und Scharnierverstärkung mit zusammenlaufendem Lagenaufbau; C: Türaufprallträger und ausgestellte „Flügel“ als Schwingungsdämpfung

Das Bauteilkonzept sieht ähnlich wie im Vorgängerprojekt HAMMER einen mehrlagigen Aufbau aus Furnierholz und ggf. Einzellagen aus Stahl oder synthetischen Faser (z.B. Glas- oder Aramidfasern) als Türaufprallträger vor. Allerdings wird der Träger in Richtung der A-Säule verlängert und soll konturnah am Türinnenblech anliegen, um die Funktion der Scharnier- und Türfeststellerverstärkung, welche bisher als separate Stahlumformteile ausgeführt sind, mit zu übernehmen. Weiterhin sieht das Konzept vor, einzelne, dem Türaußenblech zugewandte Furnierlagen derart zu vergrößern, dass sie einen großen Bereich des Türaußenbleches überspannen und zumindest punktuell mittels Dickschichtklebung mit diesem verbunden werden. Auf diese Weise sollen Schwingungen des Türaußenbleches vermieden werden, wozu bisher separate Dämpfungsmatten eingesetzt werden, die in der Türmontage aufgeklebt werden und pro Tür eine Masse von bis zu mehreren 100 g aufweisen. Da Holz eine sehr geringe Wärmeleitung aufweist, kann dieser Ansatz auch zu einer Verbesserung der Wärmeisolation und somit zu einem geringeren Energiebedarf zur Fahrzeugklimatisierung beitragen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass bei einer flächigen Anbindung an das Türaußenblech die Beulsteifigkeit und -festigkeit deutlich verbessert wird. Gerade im Bereich der Türen, in dem oft auf Parkplätzen Beschädigungen durch das unachtsame Öffnen einer anderen Fahrzeugtür entstehen, kann dies einen unmittelbaren Kundennutzen darstellen.

Gemeinsam mit der Fachabteilung wurde im Anschluss entschieden, für die weitere Umsetzung den aktuellen VW Tiguan als Zielfahrzeug zu übernehmen, da dieser im Vergleich zum zuerst avisierten VW Up! das aktuelle Türkonzept, z.B. im Bereich der Spiegelanbindung, aufweist.

Das entwickelte Bauteilkonzept eines holzbasierten, funktionsintegrierten Türinnenteils weist einen erheblichen Neuerungsgrad zu bestehenden Konzepten innerhalb des Volkswagen-Konzerns aber auch anderen öffentlich bekannten Lösungen auf. Daher wurde eine entsprechende Erfindungsmeldung mit den Teilnehmern des Workshops als Erfindergemeinschaft eingereicht.

#### II.2.2.2 Ableiten umzusetzender Funktionen und weiterer Anforderungen

An die Fahrzeugtür werden hinsichtlich der mechanischen Funktion verschiedene Anforderungen gestellt, die auch durch die Variante mit dem holzbasierten funktionsintegrierten Türinnenteils erfüllt werden müssen. Hierzu zählen quasistatische Lastfälle und Crashlastfälle. Die quasistatischen Lastfälle sind dabei nur auf die Fahrzeugtür bezogen, wohingegen für die Crashlastfälle das Verhalten der Tür im Gesamtfahrzeug relevant ist. Bei den quasistatischen Lastfällen wird die gesamte Tür in einer definierten Einspannsituation an verschiedenen Punkten

mit Kräften beaufschlagt und die elastische Verformung an verschiedenen Messpunkten bestimmt. Die folgenden quasistatischen Lastfälle wurden zur Auslegung des holzbasierten funktionsintegrierten Türinnenteils herangezogen (vgl. Kapitel II.2.4):

- **Rahmensteifigkeit vorn:** Aufbringung einer Drucklast nach außen im vorderen, oberen Bereich des Fensterrahmens und Messung der Auslenkung am Lastangriffspunkt
- **Rahmensteifigkeit hinten:** Aufbringung einer Drucklast nach außen im hinteren, oberen Bereich des Fensterrahmens und Messung der Auslenkung am Lastangriffspunkt
- **Schachtsteifigkeit innen:** Aufbringung einer Drucklast nach innen in der Mitte des Fensterschachts und Messung der Auslenkung am Lastangriffspunkt
- **Schachtsteifigkeit außen:** Aufbringung einer Drucklast nach außen in der Mitte des Fensterschachts und Messung der Auslenkung am Lastangriffspunkt
- **Türdurchhang:** Aufbringung einer Zugkraft nach unten an der Drehfalle und Messung der Auslenkung an der Türunterkante
- **Überdrücken:** Aufbringung einer Zugkraft am Türgriff bei geöffneter Tür und Messung der Auslenkung an der Türunterkante

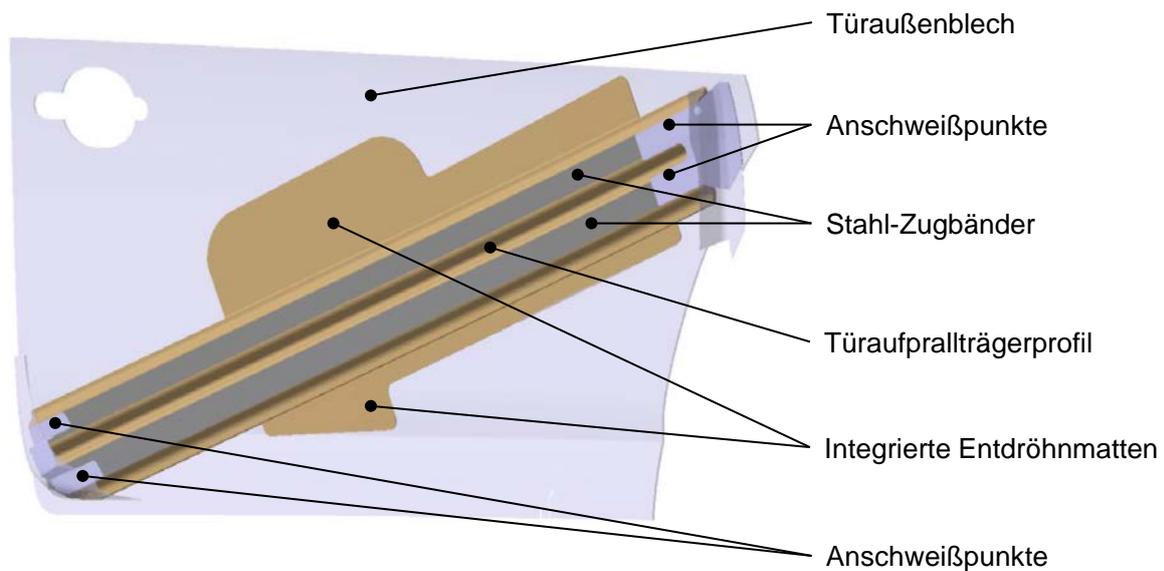
Neben den quasistatischen Lastfällen stellt die Gewährleistung der Insassensicherheit eine Hauptfunktion der Türelemente, insbesondere des ebenfalls in seiner Funktion in das holzbasierte Türinnenmodul integrierten Türaufprallträgers dar. Die Tür ist dabei unter anderem für die Crashlastfälle des Pfahl-, Seiten- und Frontalaufpralls mit geringer Überdeckung relevant. Als Hauptlastfall für die Betrachtung der Crasheigenschaften wurde der Pfahlaufprall definiert, da sich dieser im Auslegungsprozess gut in vereinfachter Form als Dreipunktbiegung abbilden lässt (vgl. Kapitel II.2.5 und II.2.6). Dieses Vorgehen wurde auch gewählt, da die Simulationsmöglichkeiten für einen Holzverbund erst innerhalb des Projekts erarbeitet werden mussten und somit eine Berücksichtigung der anderen Lastfälle in der Bauteilauslegung zu spät möglich gewesen wäre.

Neben den mechanischen Funktionen sieht das verabschiedete Bauteilkonzept die Integration der Funktion der Akustikdämmmatten vor. Von daher müssen auch die Anforderungen hinsichtlich der Akustik in Bezug auf die Dämpfung eingehalten werden (vgl. Kapitel II.2.7).

Als letztes Anforderungskollektiv müssen die verwendeten Materialien an sich bestimmte Eigenschaften aufweisen (vgl. Kapitel II.2.8). Dies gilt sowohl für den Holzwerkstoff als auch den Verbund inklusive der Verklebung und umfasst beispielweise die Beständigkeit gegenüber wechselnden Umgebungseinflüssen (Temperatur, Feuchtigkeit) oder die Emission flüchtiger organischer Verbindungen (Volatile Organic Compounds, VOC). (vgl. Kapitel II.2.8)

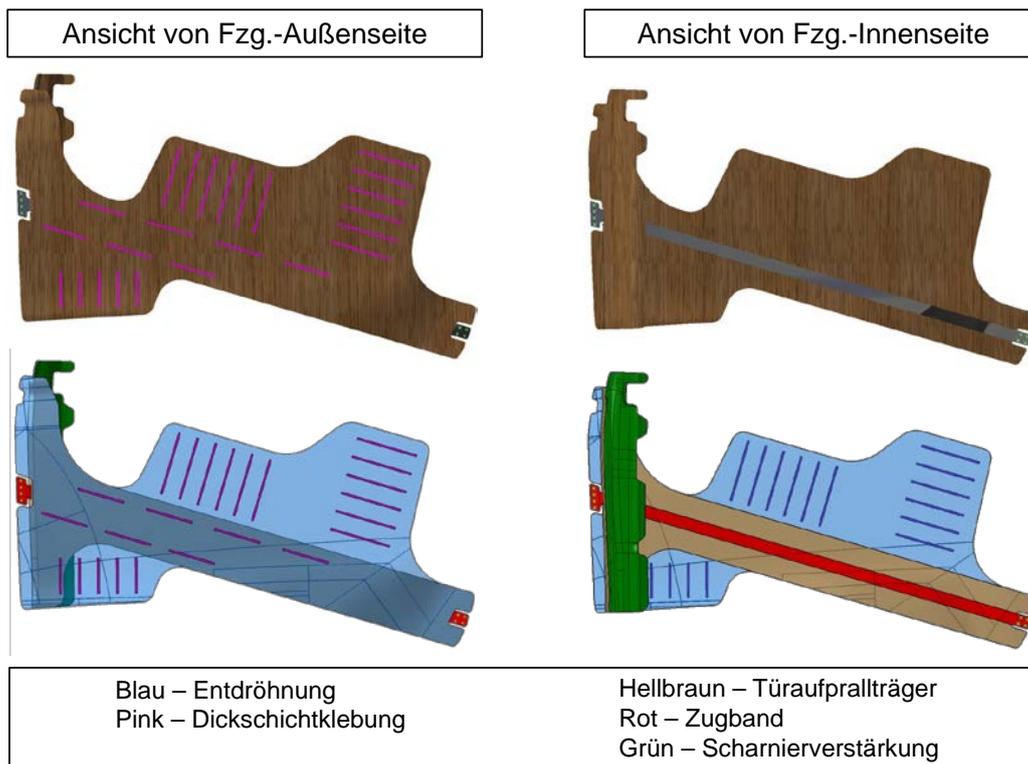
### II.2.3 Umsetzung des Konzepts

Ein erster konstruktiver Entwurf (K1) des holzbasierten Türinnenteils wurde vom DLR erstellt (Abbildung 4). Als Profil des integrierten Türaufprallträgers wurde zunächst analog zum Vorgängerprojekt HAMMER die auch schon vom Stahlbauteil bekannte Doppelwelle verwendet. Weiterhin ist die Scharnierverstärkung noch nicht integriert. Dafür sieht der erste konstruktive Entwurf die Verwendung von Zugbändern aus kostengünstigem Flachstahl vor. Auf diese Weise bildet das holzbasierte Türinnenteil mit dem Türaußenblech eine Art Sandwichverbund, der eine hohe Energieabsorption im Crashfall in Aussicht stellt.



**Abbildung 4: Erster konstruktiver Entwurf (K1) des DLR für das holzbasierte, funktionsintegrierte Türinnenteil**

Zur Unterstützung der weiteren konstruktiven Ausgestaltung und Basisauslegung hinsichtlich der vorgegebenen Lastfälle wurde gemäß des Arbeitsplans mit der IAV GmbH ein Ingenieurdienstleister beauftragt. In mehreren Iterationen wurde das Bauteilkonzept detailliert. Der Stand zum Zeitpunkt des zweiten Projekttreffens (K2) ist als Übersicht in Abbildung 5 dargestellt.



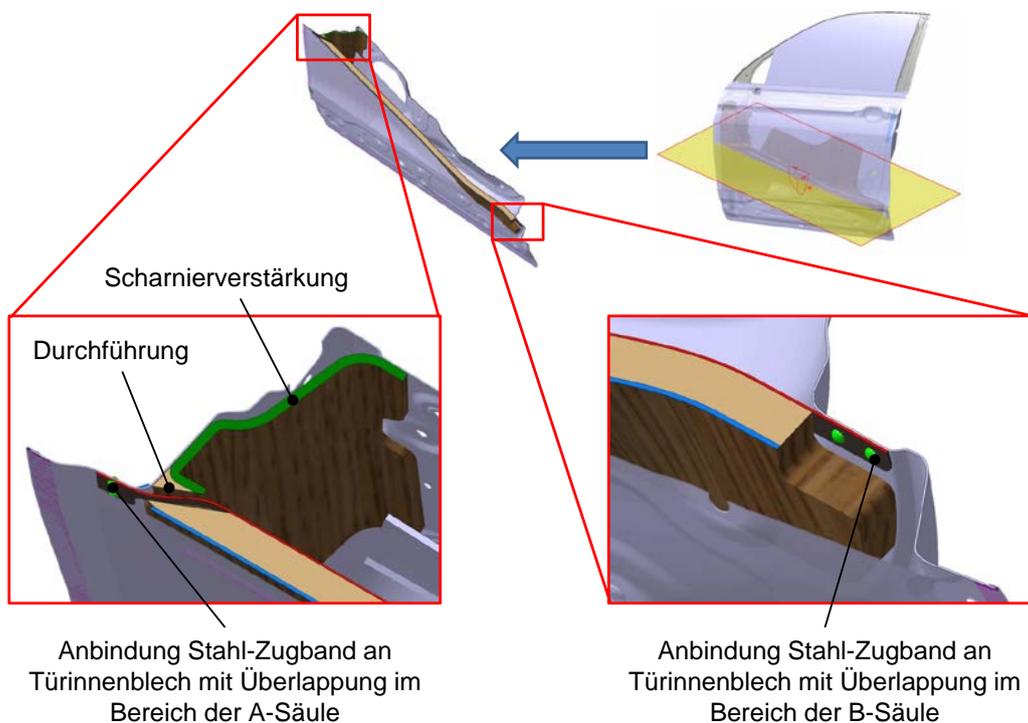
**Abbildung 5: Konstruktionsstand des holzbasierten Türinnenteils zum Zeitpunkt des zweiten Projekttreffens (K2)**

In gemeinsamen Konstruktionsbesprechungen mit den Projektpartnern wurden dabei verschiedene Ansätze zur Einhaltung von Restriktionen bedingt durch die prinzipielle Fertigbarkeit, den Bauraum und die Crashmechanik der Gesamttür entwickelt. So sieht diese Version der Konstruktion beispielweise eine Durchführung des Zugbandes durch die Scharnierverstärkung zwischen dem oberen und unteren Türscharnier im Bereich der A-Säule vor (Abbildung 6). Weiterhin ist das Zugband derart gestaltet, dass es am Türinnenblech angebonden die Bereiche der A- und B-Säule etwas überlappt, um so eine weitere Abstützung beim Seitencrash zu gewährleisten. Im weiteren Projektverlauf wurde die Konstruktion hinsichtlich der Fertigbarkeit des holzbasierten Türinnenteils im Hinblick auf eine experimentelle Validierung weiter optimiert.

Der Vergleich der Massen der Referenzbauteile aus der aktuellen Serientür und dem ersten Konstruktionsstand des holzbasierten Türinnenteils (Tabelle 2) noch keinen nennenswerten Gewichtsvorteil für das holzbasierte Konzept auf. Allerdings konnten zu diesem Zeitpunkt nur Abschätzungen für das Gewicht getroffen werden, da noch keine rechnerische Auslegung und Optimierung stattgefunden hatte.

**Tabelle 2: Gewichtsvergleich Serie und holzbasiertes Türinnenteil (K2)**

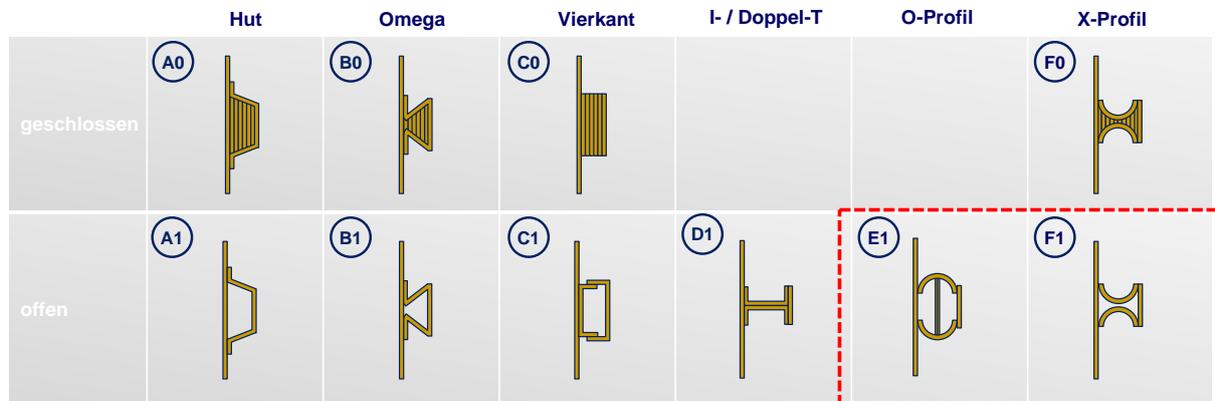
Referenz Serientür VW Tiguan		Holzbasiertes Türinnenteil (K2)	
Türaufprallträger (TAT)	1.575 g	Formholzteil	~3.000 g
TAT-Verstärkungsblech	511 g	Stahl-Zugband	~350 g
Scharnierverstärkung oben	576 g		
Scharnierverstärkung unten	553 g		
Entdröhnmatten	~400 g		
<b>Summe:</b>	<b>3.415 g</b>	<b>Summe:</b>	<b>3.350 g</b>



**Abbildung 6: Durchführung für das Stahl-Zugband und Anbindung an das Türinnenblech (K2)**

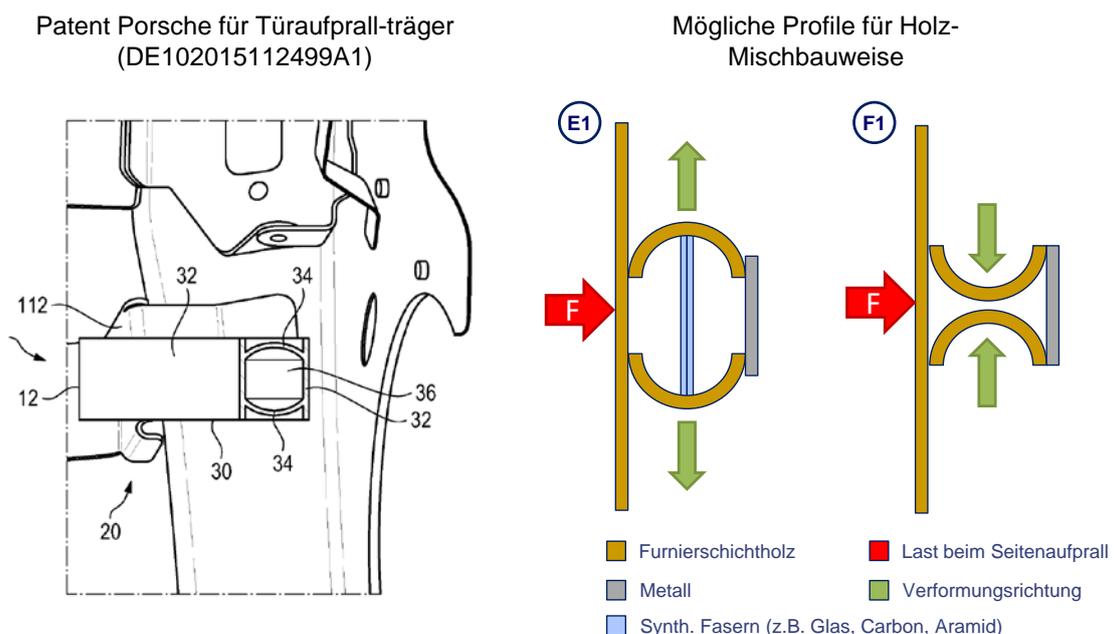
Im Vorgängerprojekt HAMMER wurde die als Doppelwelle ausgeführte Profilgeometrie des Türaufprallträgers nicht verändert, um zunächst die prinzipielle Machbarkeit der Lastaufnahme bei Verwendung von Holzwerkstoffe in Verbindung mit synthetischen Verstärkungsfasern nachzuweisen. Allerdings beruht das Profilkonzept des Stahlbauteils auf der im Crashfall eintretenden plastischen Verformung. Die auftretenden Versagensmechanismen bei Holzwerkstoffen unterscheiden sich allerdings grundlegend vom Stahl des Referenzbauteils. Daher sollte im Projekt Forstschrift eine holzgerechte Anpassung der Profilgeometrie für die Funktion des Türaufprallträgers evaluiert werden.

Der Bereich des Türaufprallträgers ist aktuell noch als einfaches Vollprofil mit rechteckigem Querschnitt ausgeführt. Alternativ wurden mehrere Konzepte für Profilgeometrien entwickelt (Abbildung 7) und gemeinsam mit den Projektpartnern der Gruppe „Konzept PKW“ im Rahmen eines Workshops hinsichtlich des Leichtbaupotenzials und der Fertigbarkeit bewertet.



**Abbildung 7: Profilkonzepte für die Funktion des Türaufprallträgers, zwischenzeitlich favorisierte Profile E1 und F1**

Für die Betrachtung im weiteren Projektverlauf wurden zwischenzeitlich die Profile E1 und F1 favorisiert, da sie eine effektive Nutzung der angedachten Werkstoffe und ihres Bruchverhaltens in Aussicht stellen. Die Profile stellen dabei die holzgerechte Weiterentwicklung eines von Porsche patentierten Profils (DE102015112499A1) für einen Türaufprallträger als Aluminium-Strangpressprofil dar (Abbildung 8). Beide Konzepte zielen im Prinzip daraufhin ab, die beim Seitencrash auftretende Last in werkstoffgerechte, richtungsabhängige Kräfte umzuleiten und die Bruchmechanik der verwendeten Materialien zu nutzen.



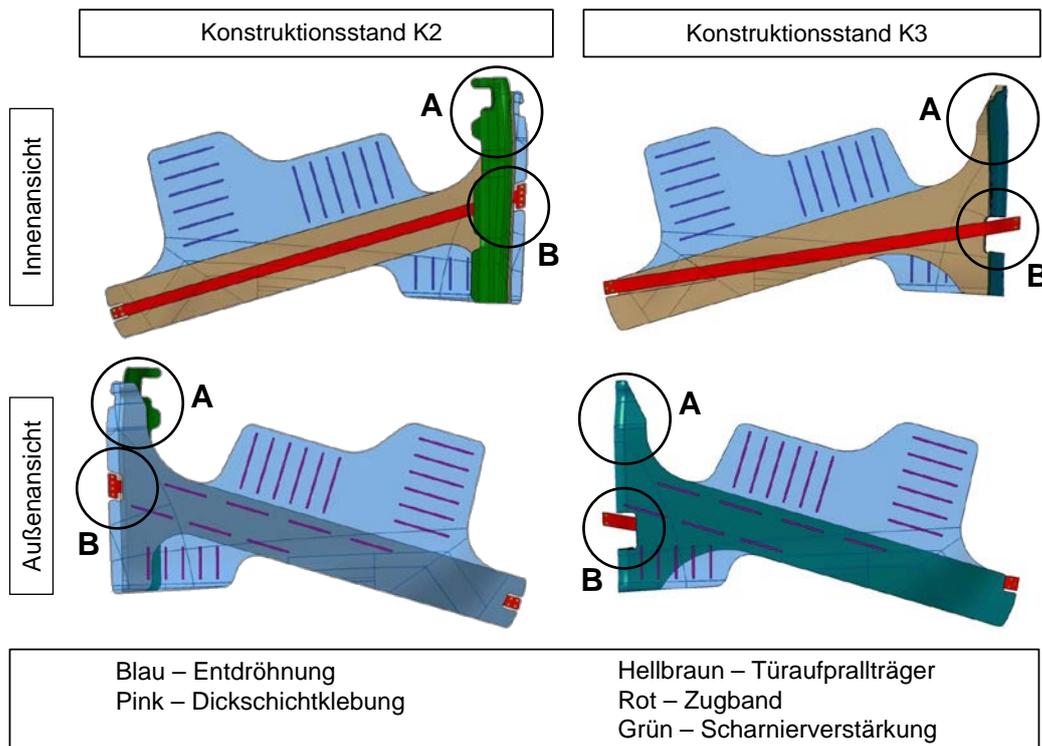
**Abbildung 8: Zwischenzeitlich favorisierte Profile E1 und F1 mit Lasteinleitung und erwarteter Deformation**

Der Ansatz bei Profil E1 besteht in der zumindest teilweisen Umwandlung der seitlich eingeleiteten Last in eine reine Zugbelastung für synthetische Hochleistungsfasern (z.B. Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfasern), welche in das Furnierschichtholz mit einlaminiert werden können. Bei Profil F1 wird von einer Deformation und Versagensrichtung des Furnierschichtholzes in Richtung des Profilinneren ausgegangen. Der Ansatz besteht nun darin, dass sich die beiden schalenförmigen Profilteile beim Versagen gegenseitig behindern und den Querschnitt des Gesamtprofils möglichst lange aufrechterhalten und so eine effektive Umlenkung der Last in eine Zugbeanspruchung des Stahlbandes ermöglichen.

Beide Profile stellen allerdings im Vergleich zum Vollprofil einen deutlichen fertigungstechnologischen Mehraufwand dar. Daher wurden begleitende Untersuchungen wie z.B. zur Pultrusion als einem möglichen Fertigungsverfahren für solche Profilgeometrien und die Kombination von Holz mit synthetischen Faserhalbzeugen durchgeführt (vgl. Absatz II.2.9), der Ansatz allerdings aufgrund der zeitlichen Machbarkeit innerhalb des Projektes nicht weiter verfolgt.

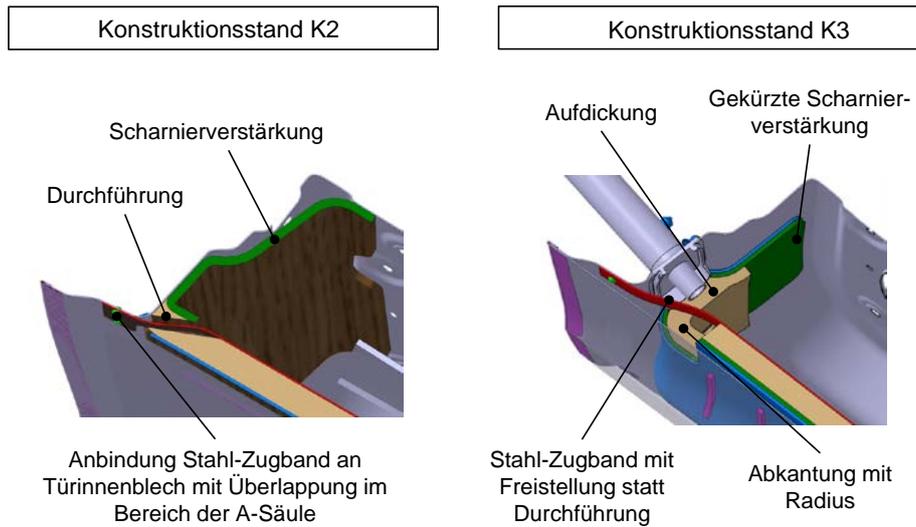
Eine Bewertung unterschiedlicher Querschnittsgeometrien hinsichtlich des Verhaltens im Crashlastfall wurde durch das DLR mittels der FEM durchgeführt (siehe Einzelbericht DLR oder Gesamtabschlussbericht). Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Ansatz eines einfachen Vollprofils weiterverfolgt.

Im weiteren Projektverlauf wurde das Gesamtkonzept des holzbasierten, funktionsintegrierten Holz-Türinnenteils weiter detailliert. Ausgehend vom Konstruktionsstand K2 wurde die Bauteilgeometrie insbesondere in Bezug auf eine fertigungstechnische Umsetzbarkeit optimiert. Hierzu wurde der obere Bereich in seiner geometrischen Komplexität reduziert, um starke Krümmungen des Bauteils um mehrere Achsen zu vermeiden (vgl. **A** in Abbildung 9). Anstelle der schlitzförmigen Durchführung für das Stahl-Zugband eine Freistellung um das Band herum im des abgewinkelten Bereich des Bauteils realisiert (vgl. **B** in Abbildung 9), wodurch das Stahl-Zugband nicht durch eine kleine Öffnung eingefädelt werden muss. Da die Freistellung allerdings im Bereich der Türfeststellerverstärkung liegt, welche weiter als integrierte Funktion im Holzbauteil erhalten bleiben soll, wurde die Lage des Stahl-Zugbands verändert, so dass dieses nun unterhalb des Türfeststellers über eine Punktschweißverbindung am Türinnenblech angebunden wird.

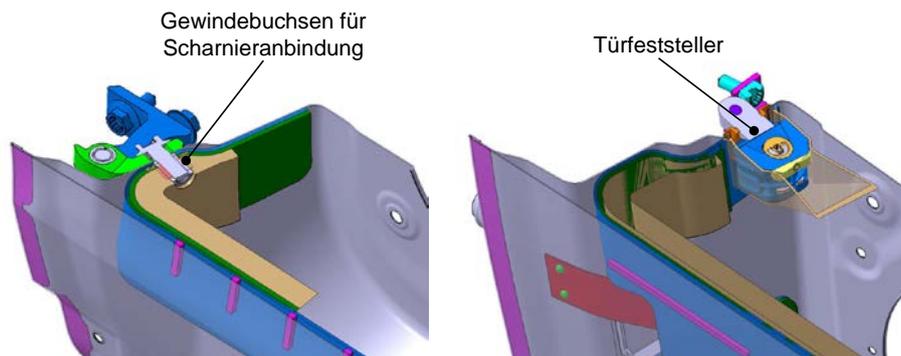


**Abbildung 9: Gegenüberstellung der Konstruktionsstände K2 und K3**

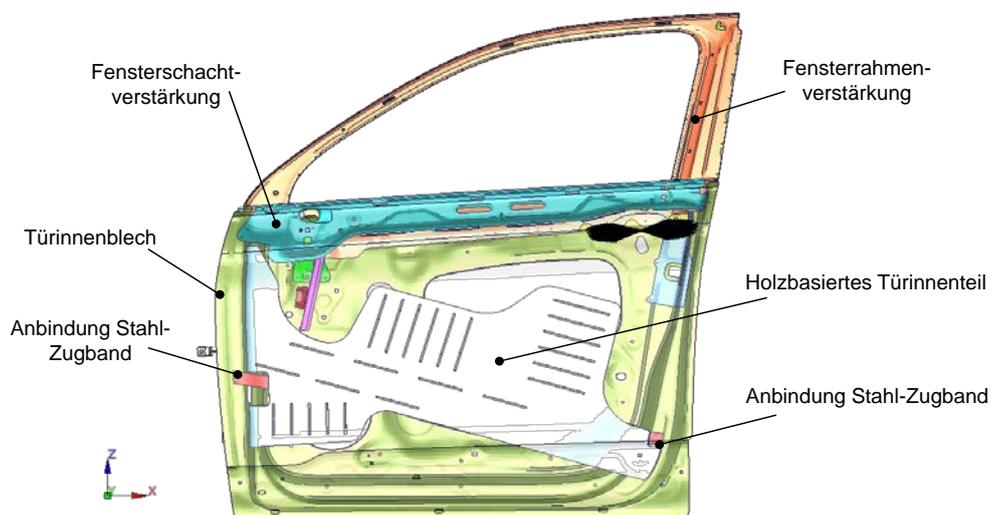
In einem weiteren Schritt wurde der auskragende Bereich der Scharnierverstärkung in Fahrzeugseitenrichtung gekürzt, um Hinterschneidungen zu vermeiden und so eine Herstellbarkeit des Bauteils durch Pressen mit einer einzigen Wirkrichtung zu ermöglichen (Abbildung 10). Im Zuge dieser Maßnahme wurde der verbleibende Bereich der Scharnierverstärkung hinsichtlich der Wandstärke verdickt, um Gewindebuchsen für die Scharnieranbindung aufnehmen zu können. Der verdickte Bereich wird aus den Furnierlagen des integrierten Türaufprallträgers gebildet, welche über einen vergrößerten Radius an die Innenseite des Türinnenbleches geführt werden (Abbildung 11). Der resultierende Konstruktionsstand K3 des holzbasierten, funktionsintegrierten Türinnenteils ist auf Abbildung 12 in der Einbausituation dargestellt. Gleichzeitig bildete dieser Konstruktionsstand den Ausgangspunkt für die Optimierung der Struktur für die quasistatischen Lastfälle (vgl. Kapitel II.2.4).



**Abbildung 10: Detailansicht Schnitt im Bereich der Türinnenblechanbindung / Kabeldurchführung**



**Abbildung 11: Detailansicht von K3 zur Anbindung der Gewindebuchsen (links) und des Türfeststellers (rechts)**



**Abbildung 12: Holzbasierendes Türinnenteil (K3) in Einbausituation**

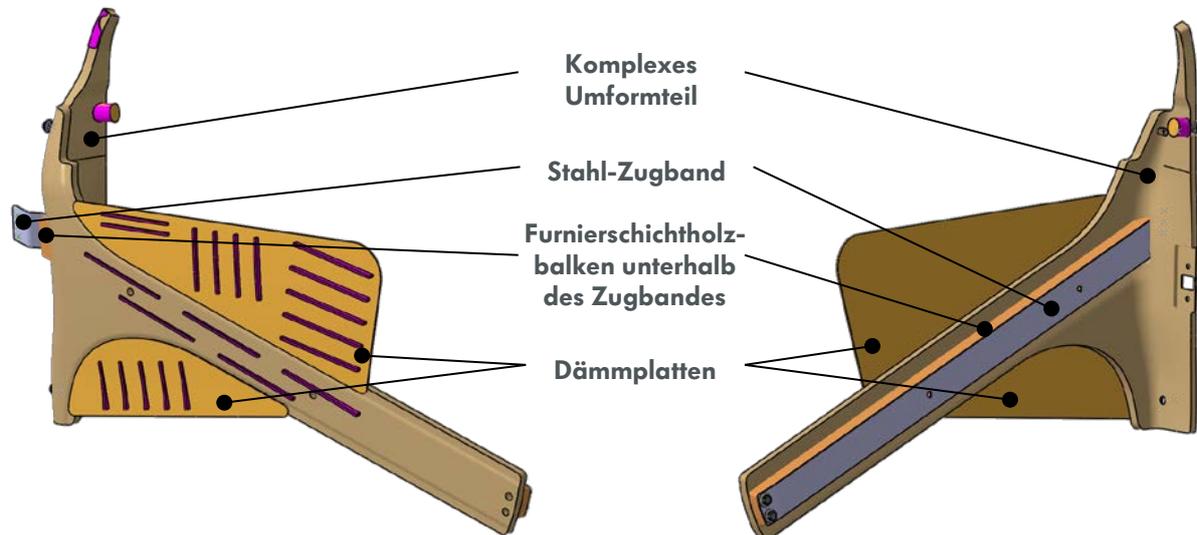
Zur Demonstration der Konstruktion wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Invent ein Muster des Bauteils in einem mehrstufigen Autoklavprozess hergestellt und dieses im Volkswagen-Versuchsbau in den Rohbau einer Tiguan Fahrertür integriert (Abbildung 13). Hierfür wurde zunächst eine Formhälfte mit der Negativkontur des späteren Bauteils ohne die Umkantung auf Höhe der A-Säule aus Kunststoff hergestellt. Auf diese Formhälfte wurden in mehreren Schritten im Vorfeld zugeschnittene und mit Klebstoff versehene Buchenfurniere durch einen Vakuumaufbau drapiert und verklebt. Zwischen die Furnierlagen für die Funktion des Türaufprallträgers und der Entdröhnung wurde eine Trennfolie eingelegt, so dass die entsprechenden Furnieraufbauten zunächst separat, aber geometrisch zueinander passend verklebt wurden. Auf diese Weise konnte ein separater Zuschnitt der Randbereiche erfolgen. Im weiteren Verlauf wurden die Furnieraufbauten miteinander verklebt und das Stahl-Zugband appliziert. Der gesamte Aufbau wurde, wie auch beim späteren Bauteil vorgesehen, über Punktschweißverbindungen zwischen Zugband und Türinnenblech sowie über eine Klebverbindung in den Türrohbau gefügt. Zu Anschauungszwecken wurde ein Sichtfenster im Bereich des holzbasierten Türinnenteils in das Türaußenblech geschnitten.



**Abbildung 13: Demonstratorbauteil (K3) in Türrohbau**

In den weitergehenden Untersuchungen hinsichtlich der Crashbelastungen (vgl. Kapitel II.2.5) wurde deutlich, dass zur Erfüllung der Crashlastfälle der gesamte Dickenbauraum des Trägers ausgenutzt werden muss. Aus Gründen des Bauteilgewichts und der Fertigbarkeit wurde das Konzept von einem Bauteil aus mehreren unterschiedlich zugeschnittenen Furnierlagen zu einer Baugruppe mit einem komplexen Umformteil aus Buchenfurnier und ansonsten sehr einfachen Halbzeugen (Konstruktionsstand V4 - Abbildung 14) angepasst. Maßgeblich hierfür

war, dass die Erhöhung der Bauteildicke zu einer Unterschreitung der mit Holzfurnier herstellbaren Biegeradien geführt hätte (vgl. Abbildung 11 rechts).



**Abbildung 14: Holzbasiertes Türinnenteil (K4) mit den einzelnen Bestandteilen**

Das Bauteilkonzept K4 besteht dabei im Kern aus einem komplexen Umformteil aus Furnierschichtholz, auf das weitere, aus einfachen zweidimensionalen Halbzeugen durch Zuschnitt gefertigte Komponenten (Furnierschichtholzbalken und die Akustikdämmplatten), appliziert werden. Das komplexe Umformteil bildet durch seine dreidimensionale Kontur die Funktionen der Scharnier- und Türfeststellerverstärkung ab und trägt einen Teil zur Funktion des Türaufprallträgers bei. Das Bauteilkonzept sieht dabei eine lokale Verdichtung der Holzfurniere um bis zu ca. 30 % vor, um einerseits die Anbindung der ebenen Halbzeuge (Balken und Dämmplatten) zu ermöglichen und andererseits mit der Bauteilform den Formen der umgebenden Blechteile der Rohbautür soweit wie nötig zu folgen. Ein weiteres Argument für die lokale Verdichtung ist die mit der Dichte skalierende mechanische Belastbarkeit, so dass der gegebene Bauraum besser ausgenutzt werden kann. Des Weiteren ermöglicht dieses Bauteilkonzept die Verwendung gleicher Furnierzuschnitte für den Pressvorgang und einen einfacheren Zuschnitt des Presslings auf die finale Bauteilkontur.

Dieser Konstruktionsstand wurde als finale Konstruktion festgelegt und entsprechend für die Auslegung und Fertigung des Prototypenwerkzeugs und für die Bauteilherstellungsversuche herangezogen (vgl. Kapitel II.2.10)



**Abbildung 15: Holzbasierendes Türinnenteil (K4) im CAD (links) und als real aufgebauter Funktionsdemonstrator (rechts)**

#### ***II.2.4 Optimierung der Struktur für quasistatische Lastfälle***

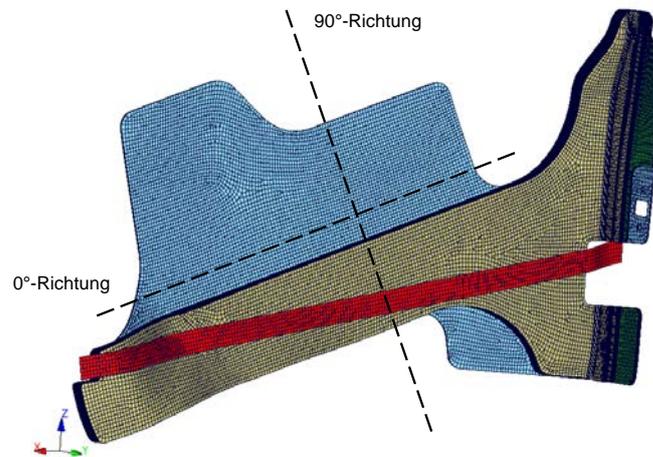
Die Optimierung der Konstruktion erfolgte zunächst anhand der quasistatischen Lasten entsprechend der Prüfvorschriften für Türen von Volkswagen. Hierhin werden Vorgaben für die zulässigen elastischen und plastischen Verformungen bei typischen Beanspruchungen, wie z.B. Windlasten, der Tür getroffen. Hierzu gehören:

- Rahmensteifigkeit vorn
- Rahmensteifigkeit hinten
- Fensterschachtsteifigkeit innen
- Fensterschachtsteifigkeit außen
- Türdurchhang
- Überdrücken der Tür

##### **II.2.4.1 Modellierung des Bauteils und der Lastfälle**

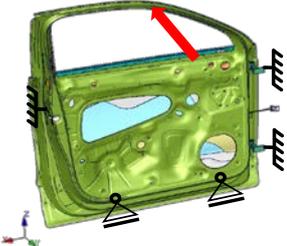
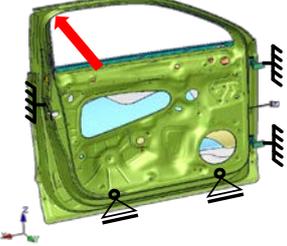
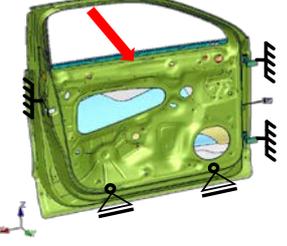
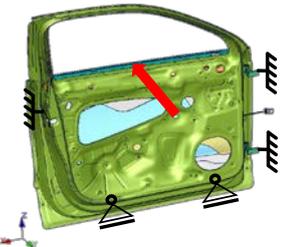
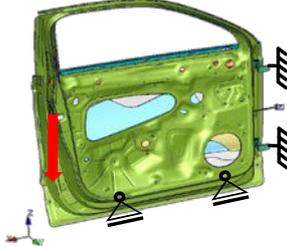
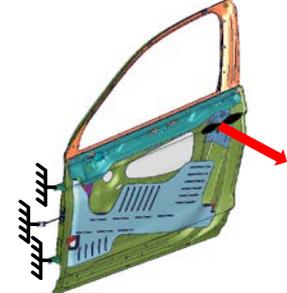
Die Belastungsfälle wurden zunächst mit der Stahl-Serientür als Referenz mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet. Im Anschluss wurde der Konstruktionsstand K3 des holzbasierten Türinnenteils als Ergebnis der Konzeptphase (vgl. Kapitel II.2.3) vernetzt und anstelle der in der Tür enthaltenen Blechteile (Scharnier- und Türfeststellerverstärkung, Türaufprallträger) in das Türmodell integriert. Zur Berücksichtigung der Anisotropie wurde über

das gesamte Bauteil eine globale 0°, bzw. 90° Ausrichtung der Faserorientierung in den einzelnen Furnierlagen festgelegt (Abbildung 16).



**Abbildung 16: FE-Modell des holzbasierten Türinnenteils K3**

Die Berechnung der Lastfälle in der FE-Simulation erfolgt durch Abbildung der entsprechenden Prüfvorschriften hinsichtlich der Einspannung der Tür und der Lasteinleitungspunkte (Abbildung 17).

Rahmensteifigkeit vorn	Rahmensteifigkeit hinten	Schachtsteifigkeit innen
		
Schachtsteifigkeit außen	Durchhang	Überdrücken
		

**Abbildung 17: quasistatische Lastfälle; der rote Pfeil kennzeichnet die Position der Lasteinleitung**

#### II.2.4.2 Materialmodell und Materialkarte

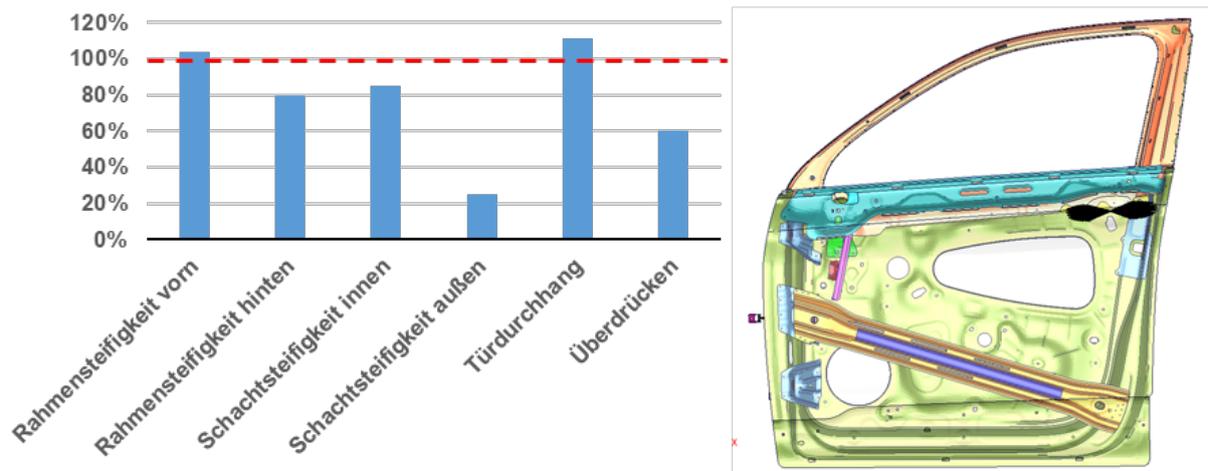
Da zum Zeitpunkt der Betrachtung der quasistatischen Lastfälle die Materialkarte für die Holzschichtverbünde noch nicht vorlag, wurde mit einem vereinfachten Materialmodell gerechnet, in welchem die Elastizitäts- und Schubmoduln, die Querkontraktionen in den verschiedenen Raumrichtungen sowie die zulässigen Maximalspannungen (Zugfestigkeiten) berücksichtigt wurden. Für die Betrachtung der quasistatischen Lastfälle ist diese Modellierung ausreichend, da im Gegensatz zu den Crashlastfällen der Holzwerkstoff nur im linear-elastischen Bereich belastet wird und somit die Abbildung der Bruchmechanik keine Rolle spielt. Die Modellierung des Holzbauteils erfolgte mit Solid-Elementen, wobei jede Furnierlage mit einer Stärke von 0,5 mm einzeln abgebildet wurde. Als Ausgangspunkt wurde eine abwechselnde Furnierorientierung von  $0^\circ$  und  $90^\circ$  (gespernte Lagen, vgl. Abbildung 16) angenommen. Folgende Werkstoffkennwerte wurden für den Holzverbund in der Simulation verwendet:

- Elastizitätsmoduln:
  - o  $E_1 = 14.000 \text{ N/mm}^2$
  - o  $E_2 = 2.280 \text{ N/mm}^2$
  - o  $E_3 = 1.160 \text{ N/mm}^2$
- Schubmoduln:
  - o  $G_{12} = 1.080 \text{ N/mm}^2$
  - o  $G_{13} = 1.640 \text{ N/mm}^2$
  - o  $G_{23} = 465 \text{ N/mm}^2$
- Querkontraktion
  - o  $\nu_{12} = 0,073$
  - o  $\nu_{13} = 0,037$
  - o  $\nu_{23} = 0,360$
- Dichte:
  - o  $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$  (höhere Dichte als Rohdichte von Buchenholz mit ca.  $700 \text{ kg/m}^3$  zur Berücksichtigung des Klebstoffs)
- maximal zulässige Spannungen
  - o  $\sigma_{\text{längs, Zug}} = 100 \text{ N/mm}^2$
  - o  $\sigma_{\text{längs, Druck}} = 60 \text{ N/mm}^2$
  - o  $\sigma_{\text{quer, Zug}} = 8 \text{ N/mm}^2$
  - o  $\sigma_{\text{quer, Druck}} = 6 \text{ N/mm}^2$
  - o  $\tau = 10 \text{ N/mm}^2$

#### II.2.4.3 Durchgeführte Optimierungsschritte und Ergebnisse

Ausgehend vom Konstruktionsstand K3 wurden die Auswirkungen verschiedener konstruktiver Änderungen in mehreren Iterationsschleifen untersucht. Als Vergleichsbasis für die Auswer-

tung dient die Serientür. Auf Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Serientür für die quasistatischen Lastfälle im Verhältnis zu den maximal nach Prüfvorschrift zulässigen Werten für die auftretenden Verformungen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass Rahmensteifigkeit vorn und der Türdurchhang die kritischen Lastfälle darstellen, bei denen die für dieses Projekt simulierten Verformungen sogar etwas über den nach Prüfvorschrift zulässigen Werten liegen. In der Realität können die Prüfvorschriften dennoch erfüllt sein, da hier in der Regel die Tür an der Fahrzeugkarosserie oder entsprechenden Ersatzsystemen geprüft wird und daher etwas andere Einspannbedingungen vorliegen, als in der Simulation.



**Abbildung 18:** simulierte Verformung der Serientür im Verhältnis zu den nach Prüfvorschrift zulässigen Werten

In der nachfolgenden Übersicht sind die Ergebnisse der iterativen Optimierungsschleifen dargestellt. Die verwendeten Abkürzungen stehen dabei für:

Ggü: Gegenüber

GW: Grenzwert

Ser.: Serienstand

RSV: Rahmensteifigkeit vorn

RSH: Rahmensteifigkeit hinten

SSI: Schachtsteifigkeit innen

SSA: Schachtsteifigkeit außen

TD: Türdurchhang

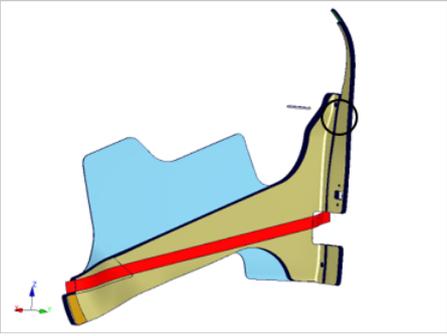
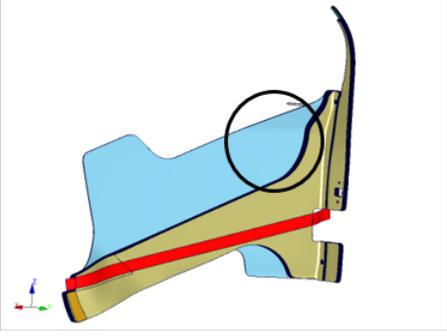
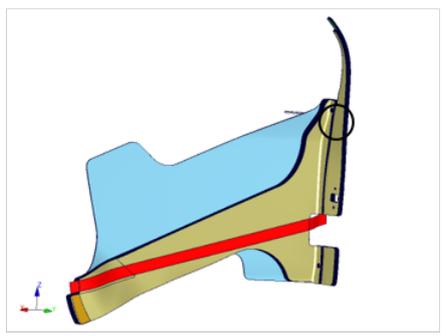
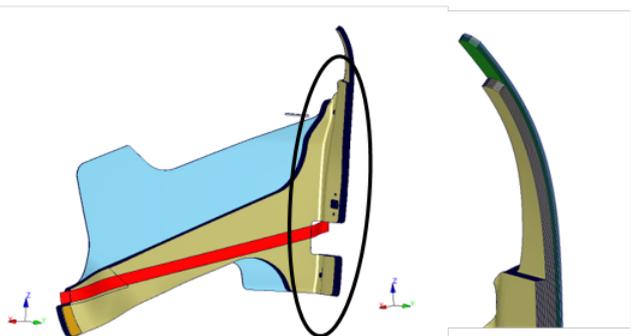
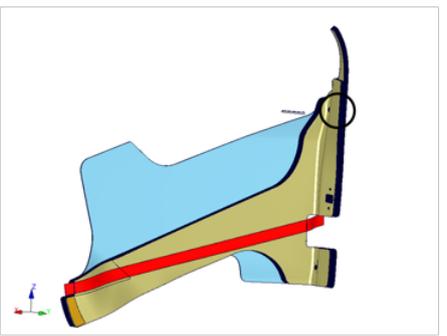
ÜD: Überdrücken

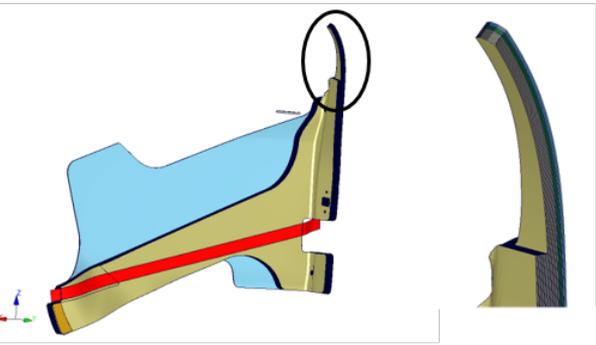
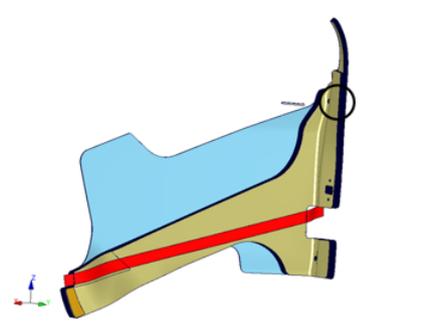
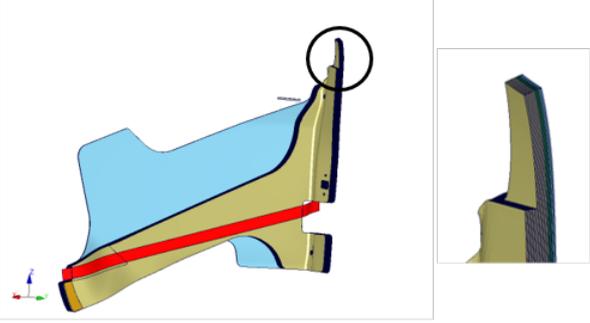
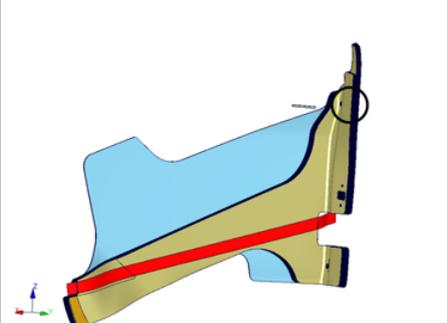
M: Masse des gesamten Türrohbaus

**Tabelle 3: Quasistatische Lastfälle, Ergebnisübersicht ausgehend von K3**

Version	Beschreibung	Ergebnisse			Abbildungen
		Ggü.	GW	Ser.	
V010	<ul style="list-style-type: none"> <li>Basisversion des holzbasierten Türinnenteils</li> <li>Entspricht Konstruktionsstand K3</li> </ul>	RSV	120%	115%	
		RSH	82%	102%	
		SSI	85%	100%	
		SSA	28%	110%	
		TD	117%	105%	
		ÜD	70%	117%	
		M		99%	
V012	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V010, aber Stahlzugband oberhalb des Türfeststellers nach außen geführt</li> </ul>	RSV	120%	115%	
		RSH	82%	102%	
		SSI	85%	100%	
		SSA	28%	110%	
		TD	114%	103%	
		ÜD	80%	133%	
		M		99%	
V013	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V010, aber Lagen der Dämmplatten großflächiger ausgeführt</li> </ul>	RSV	120%	115%	
		RSH	82%	102%	
		SSI	85%	100%	
		SSA	28%	110%	
		TD	103%	92%	
		ÜD	50%	83%	
		M		99%	
V014	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V010, aber Lagen mehr Lagen im Bereich der Scharnierverstärkungen</li> </ul>	RSV	120%	115%	
		RSH	82%	102%	
		SSI	85%	100%	
		SSA	28%	110%	
		TD	109%	97%	
		ÜD	100%	167%	
		M		99%	
V020	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V010, aber Lagen äußere Lagen in den vorderen Fensterrahmen hinein verlängert</li> </ul>	RSV	107%	103%	
		RSH	78%	98%	
		SSI	85%	100%	
		SSA	28%	110%	
		TD	91%	82%	
		ÜD	50%	83%	
		M		99%	

Version	Beschreibung	Ergebnisse			Abbildungen
		Ggü.	GW	Ser.	
V022	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V020, zusätzliche Klebstoffraupe und mechanische Anbindung zwischen Holzteil und Crashrohr</li> </ul>	RSV	100%	96%	
		RSH	78%	98%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	100%	90%	
		ÜD	50%	83%	
		M		99%	
V031	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V014, mehr Lagen im Bereich der Umbiegung Höhe A-Säule mit umgeformt</li> </ul>	RSV	120%	115%	
		RSH	82%	102%	
		SSI	85%	100%	
		SSA	28%	110%	
		TD	109%	97%	
		ÜD	100%	167%	
		M		99%	
V040	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V031, Rahmenverstärkung als Stahleinleger mit 2,0 mm Stärke ausgeführt</li> </ul>	RSV	104%	100%	
		RSH	78%	98%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	100%	90%	
		ÜD	70%	117%	
		M		102%	
V041	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V040, aber Stahleinleger mit 1,5 mm Stärke ausgeführt</li> </ul>	RSV	109%	105%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	94%	85%	
		ÜD	60%	100%	
		M		100%	
V050	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V031, aber Holzbauteil bis einseitig bis in Fensterrahmen hochgezogen</li> </ul>	RSV	113%	109%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	85%	100%	
		SSA	28%	110%	
		TD	103%	92%	
		ÜD	90%	150%	
		M		100%	

Version	Beschreibung	Ergebnisse			Abbildungen
		Ggü.	GW	Ser.	
V051	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V050, aber zusätzlich mechanische Anbindung zw. Holzbauteil und Crashrohr (vgl. V022)</li> </ul>	RSV	109%	105%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	94%	85%	
		ÜD	60%	100%	
		M		100%	
V052	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V050, aber Lagen der Dämmplatten großflächiger ausgeführt (vgl. V013)</li> </ul>	RSV	113%	109%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	85%	100%	
		SSA	28%	110%	
		TD	86%	77%	
		ÜD	40%	67%	
		M		100%	
V053	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V052, aber mit zusätzlicher Anbindung zwischen Holzteil und Crashrohr (vgl. V022)</li> </ul>	RSV	109%	105%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	80%	72%	
		ÜD	30%	50%	
		M		100%	
V054	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V052, aber alle Lagen mit in die Umbiegung auf Höhe der A-Säule umgeführt</li> </ul>	RSV	111%	107%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	28%	110%	
		TD	71%	64%	
		ÜD	20%	33%	
		M		102%	
V054a	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V054, aber mit zusätzlicher Anbindung zwischen Holzteil und Crashrohr (vgl. V022)</li> </ul>	RSV	107%	103%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	71%	64%	
		ÜD	10%	17%	
		M		102%	

Version	Beschreibung	Ergebnisse			Abbildungen
		Ggü.	GW	Ser.	
V055	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V054, aber Bereich, der in den Fensterrahmen hineinragt, etwas gekürzt</li> </ul>	RSV	111%	107%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	28%	110%	
		TD	71%	64%	
		ÜD	20%	33%	
		M		102%	
V055a	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V055, aber mit zusätzlicher Anbindung zwischen Holzteil und Crashrohr (vgl. V022)</li> </ul>	RSV	107%	103%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	71%	64%	
		ÜD	10%	17%	
		M		102%	
V056	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V055, aber Bereich, der in den Fensterrahmen hineinragt, noch weiter gekürzt</li> </ul>	RSV	113%	109%	
		RSH	82%	102%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	28%	110%	
		TD	71%	64%	
		ÜD	20%	33%	
		M		102%	
V056a	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wie V056, aber mit zusätzlicher Anbindung zwischen Holzteil und Crashrohr (vgl. V022)</li> </ul>	RSV	109%	105%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	71%	64%	
		ÜD	10%	17%	
		M		102%	

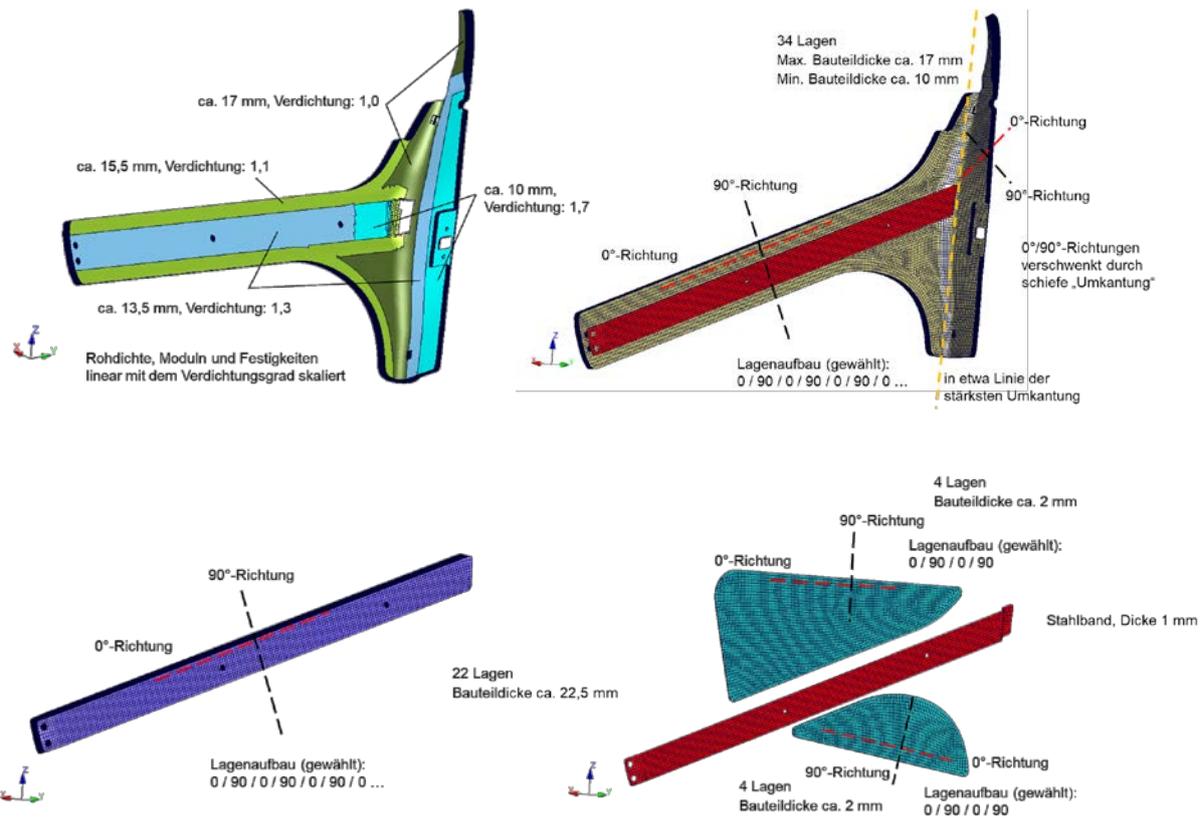
Die Ergebnisse verdeutlichen, dass zur Erfüllung des kritischen Lastfalls der Rahmensteifigkeit vorn das Bauteil möglichst weit in den entsprechenden Hohlraum der Türstruktur hineinragen sollte, um diesen Bereich zu verstärken. Die einzige Variante, bei der dieser Lastfall im Vergleich zur Serientür verbessert wird und der damit auch in der Simulation in den Grenzen der

zulässigen Verformung liegt, ist Variante V022, bei der der umgeformte Bereich mit unterschiedlich auslaufenden Furnierlagen bis in den Rahmen hinein verlängert wurde. Diese Variante ist allerdings fertigungstechnisch kaum umsetzbar, weshalb in den nachfolgenden Varianten (ab V040) versucht wurde, den aussteifenden Effekt durch Verlängerung nur der umgebogenen kurzen Seite des Bauteils zu erzielen.

Interessanterweise konnte in allen Fällen durch das gewählte Konzept der Lastfall des Türdurchgangs im Vergleich zur Serientür deutlich verbessert werden. Dies ist auf die funktionsintegrierte Bauweise des holzbasierten Konzepts und die Ausführung als ein einziges Bauteil zurückzuführen, da hierdurch eine zusätzliche diagonale Verstrebung der Tür mit einer Abstützung über den gesamten Bereich der Scharnieranbindung erfolgt, welche für diesen Lastfall zusätzliche Steifigkeit bringt.

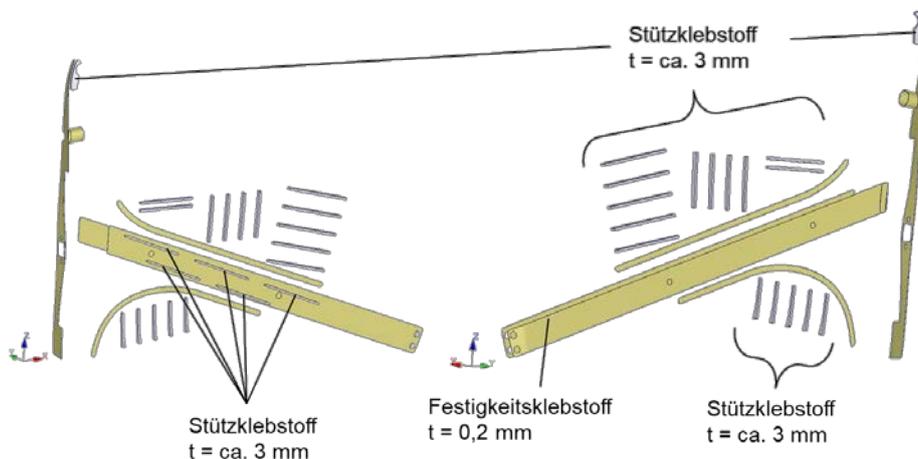
In fast allen bis hier hin betrachteten Konzepten ist das funktionsintegrierte Konzept schwerer als die Serienbaugruppe. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die funktionsintegrierte Bauweise auch Bauraum „mit Holz gefüllt“ wird, der in der Serientür nicht genutzt wird.

Wie zuvor beschrieben wurde im Projektverlauf eine Änderung des Konstruktionskonzepts aufgrund der Anforderungen aus dem Crashlastfall notwendig. Die Lösung (Konstruktionsstand K4) umfasst ein komplexes und lokal verdichtetes Furnierschichtholzteil, auf das weitere aus einfachen flachen Halbzeugen zugeschnittene Bauteile appliziert werden. Die resultierende Baugruppe (vgl. Abbildung 14) ist immer noch funktionsintegriert, da sie als ein gemeinsamer „Holz-ZSB“ (ZSB = Zusammenbau) in den Türrohbau integriert werden kann. Analog zum Vorgehen beim Konstruktionsstand K3 wurde das entsprechende CAD-Modell vernetzt und um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen mit den gleichen Materialparametern hinsichtlich der Eigenschaften in den quasistatischen Lastfällen berechnet. In den Bereichen, in denen eine Verdichtung des Werkstoffs vorgesehen ist, wurden die mechanischen Kennwerte linear mit dem Grad der Verdichtung skaliert. Eine Übersicht zu den angenommenen Bauteilorientierungen und des für die quasistatischen Berechnungen angenommenen Lagenaufbaus zeigt Abbildung 19.



**Abbildung 19: Vernetzung des Konstruktionsstands K4 zur Berechnung der quasistatischen Lastfälle**

Bei der Umsetzung des Konstruktionsstands K4 flossen bereits Erkenntnisse aus dem Bauteilverhalten des Konstruktionsstands K3 mit ein. So wurde z.B. die kurze umgekanntete Seite des Bauteils möglichst weit in den vorderen Fensterrahmen hinein verlängert und eine feste Anbindung zwischen Holzteil und Crashrohr eingeplant. Eine Übersicht zu den für die Berechnung angenommenen Klebstoffgruppen und Klebschichtstärken zeigt Abbildung 20.



**Abbildung 20: Klebstoffverteilung für die Modellierung des Konstruktionsstands K4**

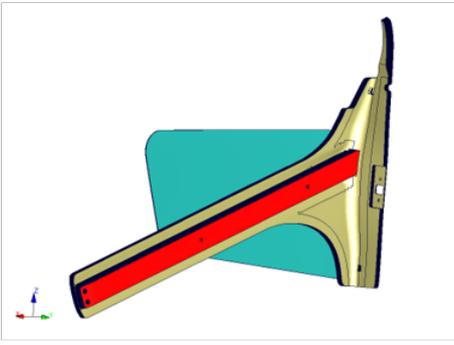
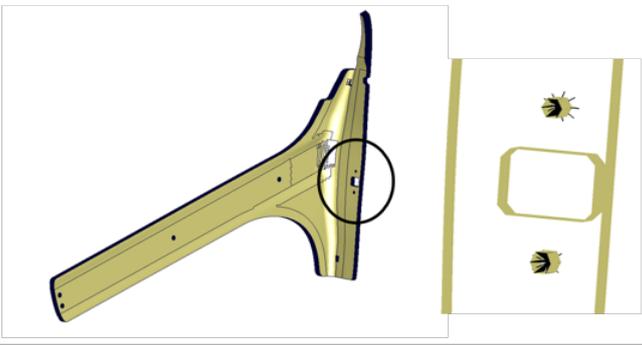
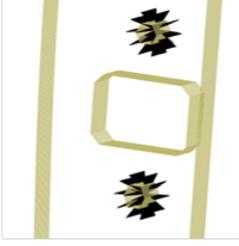
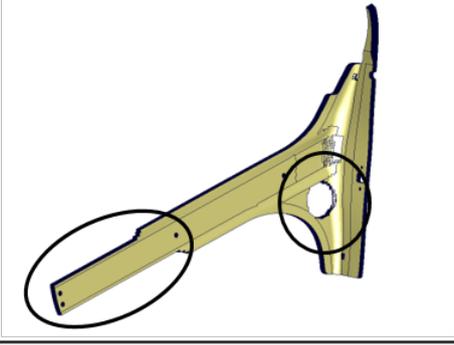
Ausgehend vom Konstruktionsstand K4 wurden ebenfalls wieder iterative Optimierungen vorgenommen (Tabelle 4). Dabei wurde sich auf das komplexe Umformteil beschränkt, da dieses für die Erfüllung der kritischen quasistatischen Lastfälle maßgeblich ist. Aufgrund des Projektzeitplans und der einzuplanenden Zeit für die Werkzeugfertigung betrafen Optimierungen allerdings nicht die Geometrie des komplexen Umformteils, sondern eher Aspekte der Spannungsverteilung durch Lasteinleitungspunkte wie die Scharnierverschraubung. Für die Fertigung der Funktionsdemonstratoren wurde daher die Version V106 als finale Bauteilgeometrie festgelegt, in welcher auch die zulässigen Spannungen an den Lasteinleitungspunkten eingehalten werden.

Hinsichtlich der quasistatischen Lastfälle ist festzuhalten, dass es mit diesem Bauteilkonzept nicht gelungen ist, die Rahmensteifigkeit vorn zu verbessern. Diese Verformungen in diesem Bereich liegen sogar noch 5 % über dem Serienstand. Wie zuvor erwähnt liegt allerdings auch der Serienstand mit den hier abgebildeten Simulationsrandbedingungen über den eigentlichen Grenzwerten. Da diese in der Realität jedoch erfüllt werden, ist es durchaus vorstellbar, dass in der realen Einspannsituation auch bei 5 % größerer Deformation die Grenzwerte eingehalten werden. Ein Versuch hierzu war im Rahmen der Projektlaufzeit leider nicht mehr möglich.

Bei allen anderen quasistatischen Lastfällen zeigt sich, dass die Performance der Serientür erreicht und in vielen Fällen sogar übertroffen wird. Beim Türdurchhang werden die Grenzwerte für die Deformation zwar immer noch leicht überschritten, allerdings wurde auch hier eine Verbesserung gegenüber der Serie erreicht. Wie auch bei der Rahmensteifigkeit müsste eine Einhaltung der Grenzwerte im realen Versuch bei realen Einspannbedingungen verifiziert werden.

Bzgl. des Bauteilgewichts liegt der Türrohbau mit dem holzbasierten Türinnenteil nach Konstruktionsstand K4 ca. 4 % über der Serientür. Erste Wege zur Gewichtseinsparung wurden durch Variante V107 aufgezeigt. Weitere Iterationen waren im Projektzeitplan nicht realisierbar, es ist allerdings davon auszugehen, dass durch gezielte Geometrieoptimierung hier eine Gewichtsneutralität bei gleicher Funktionsintegration erzielt werden kann. Zu diesem Zeitpunkt wurde im Projekt für das betrachtete Bauteil der Funktionsintegration somit der Vorrang gegenüber der reinen Gewichtsersparnis eingeräumt. Eine reine Gewichtsreduzierung durch den Einsatz von Holz in der Fahrzeugstruktur wurde dagegen an einem anderen Bauteil nachgewiesen (siehe Kapitel II.3.3).

**Tabelle 4: Quasistatische Lastfälle, Ergebnisübersicht ausgehend von K4**

Version	Beschreibung	Ergebnisse			Abbildungen
		Ggü.	GW	Ser.	
V104	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basisvariante</li> <li>• Entspricht Konstruktionsstand K4</li> </ul>	RSV	109%	105%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	103%	92%	
		ÜD	0%	0%	
		M		104%	
V105	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie V105 aber durchgängige Lagen auf Höhe des Türfeststellers zur besseren Lasteinleitung</li> <li>• Zusätzliche Lastverteilung durch Washer</li> </ul>	RSV	109%	105%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	103%	92%	
		ÜD	0%	0%	
		M		104%	
V106	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie V105, aber größere Washer zur Vermeidung von Spannungen oberhalb der Werkstofffestigkeit</li> </ul>	RSV	109%	105%	
		RSH	80%	100%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	103%	92%	
		ÜD	0%	0%	
		M		104%	
V107	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie V106, aber mit großzügigerem Beschnitt in den wenig belasteten Bauteilbereichen</li> </ul>	RSV	109%	105%	
		RSH	82%	102%	
		SSI	80%	94%	
		SSA	25%	100%	
		TD	103%	92%	
		ÜD	0%	0%	
		M		103%	

### II.2.5 Optimierung der Struktur für Crashlastfälle

Die Optimierung der Struktur für Crashlastfälle erfolgte durch das DLR. Daher sei an dieser Stelle auf den Einzelbericht des DLR oder den Gesamtabschlussbericht verwiesen.

### II.2.6 Prüfung an generischen Teilstrukturen

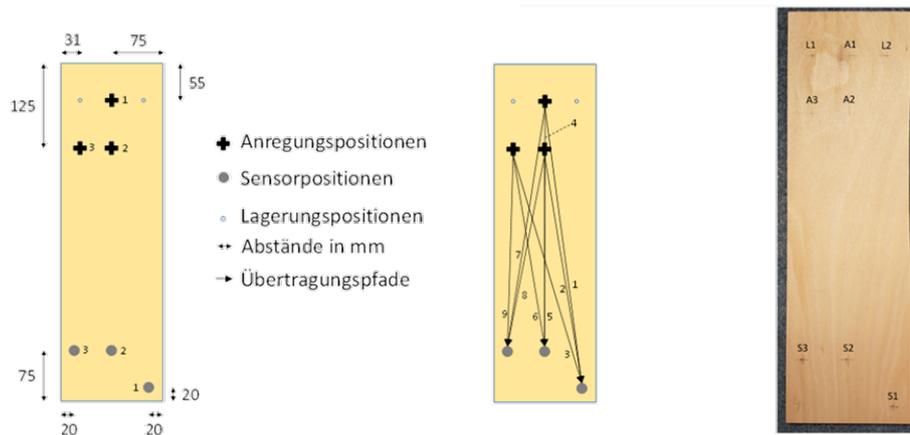
Die Herstellung und Prüfung von generischen Teilstrukturen erfolgte durch das DLR. Daher sei an dieser Stelle auf den Einzelbericht des DLR oder den Gesamtabschlussbericht verwiesen.

### II.2.7 Akustische Dämpfungseigenschaften

Eine wesentliche Funktion des holzbasierten Türinnenmoduls stellt die Substitution der Dämpfungsmatten dar, welche in der Fahrzeugmontage auf die Innenseiten der Tür außenbleche geklebt werden. Um die Einflüsse verschiedener Lagenaufbauten (Furnierstärke /-orientierung) auf die Dämpfungseigenschaften zu untersuchen, wurden entsprechend des auf Abbildung 21 dargestellten Versuchsplans Probestplatten angefertigt, welche in Form eines Unterauftrags beim Institut für Akustik der Technischen Universität Braunschweig hinsichtlich ihrer frequenzabhängigen Dämpfung untersucht wurden. Die Platten wurden dabei an verschiedenen Positionen mittels eines Impulshammers zur Schwingung angeregt und die Dämpfung des Körperschalls bei den Eigenfrequenzen im Frequenzintervall von 50 Hz bis 3.050 Hz durch einen Beschleunigungssensor an ebenfalls unterschiedlichen Positionen gemessen, um verschiedene Übertragungspfade zu berücksichtigen (Abbildung 22).

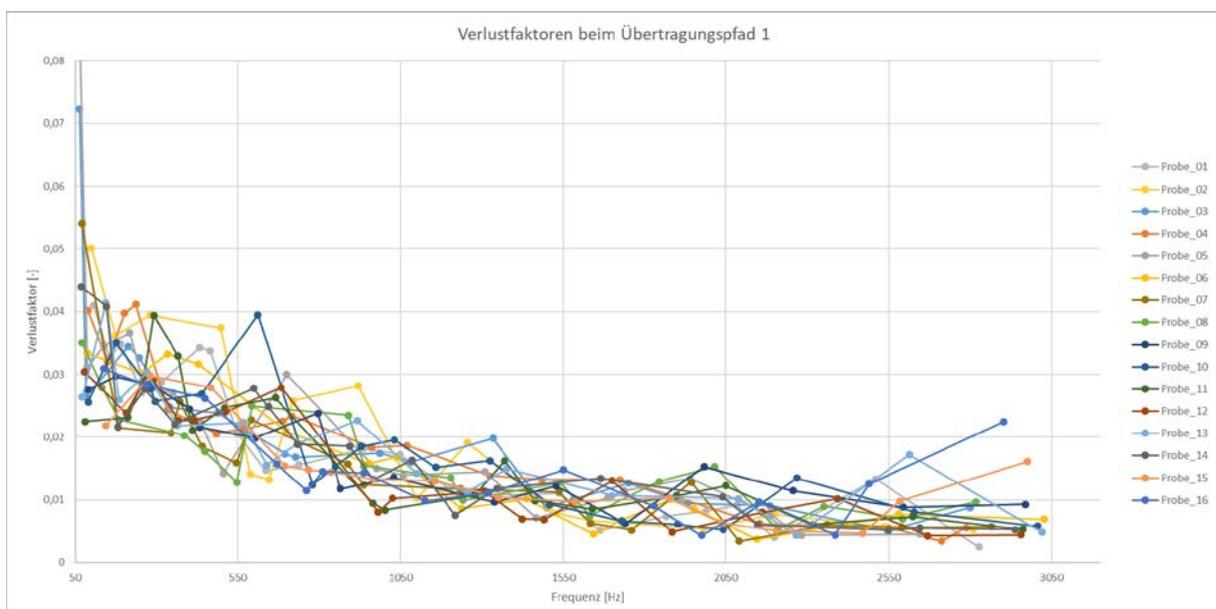
Versuch-Nr.	Holzart	Plattenlänge	Plattenbreite	Plattenstärke	Furnierstärke	Lagenanzahl	Lagenaufbau	Klebstoffmenge
1	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	4 mm	1	0°	200 g/m <sup>2</sup>
2	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	4 mm	1	0°	200 g/m <sup>2</sup>
3	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	2 mm	2	0° U-D	200 g/m <sup>2</sup>
4	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	2 mm	2	0° U-D	200 g/m <sup>2</sup>
5	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	1 mm	4	0° U-D	200 g/m <sup>2</sup>
6	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	1 mm	4	0° U-D	200 g/m <sup>2</sup>
7	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	1 mm	4	0/90/90/0	200 g/m <sup>2</sup>
8	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	1 mm	4	0/90/90/0	200 g/m <sup>2</sup>
9	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	1 mm	4	90/0/0/90	200 g/m <sup>2</sup>
10	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	1 mm	4	90/0/0/90	200 g/m <sup>2</sup>
11	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	0,5 mm	8	0° U-D	200 g/m <sup>2</sup>
12	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	0,5 mm	8	0° U-D	200 g/m <sup>2</sup>
13	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	0,5 mm	8	0/90/0/90/90/0/90/0	200 g/m <sup>2</sup>
14	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	0,5 mm	8	0/90/0/90/90/0/90/0	200 g/m <sup>2</sup>
15	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	0,5 mm	8	90/0/90/0/0/90/0/90	200 g/m <sup>2</sup>
16	Buche	500 mm	150 mm	4 mm	0,5 mm	8	90/0/90/0/0/90/0/90	200 g/m <sup>2</sup>

Abbildung 21: Versuchsplan zur Untersuchung der frequenzabhängigen Dämpfung

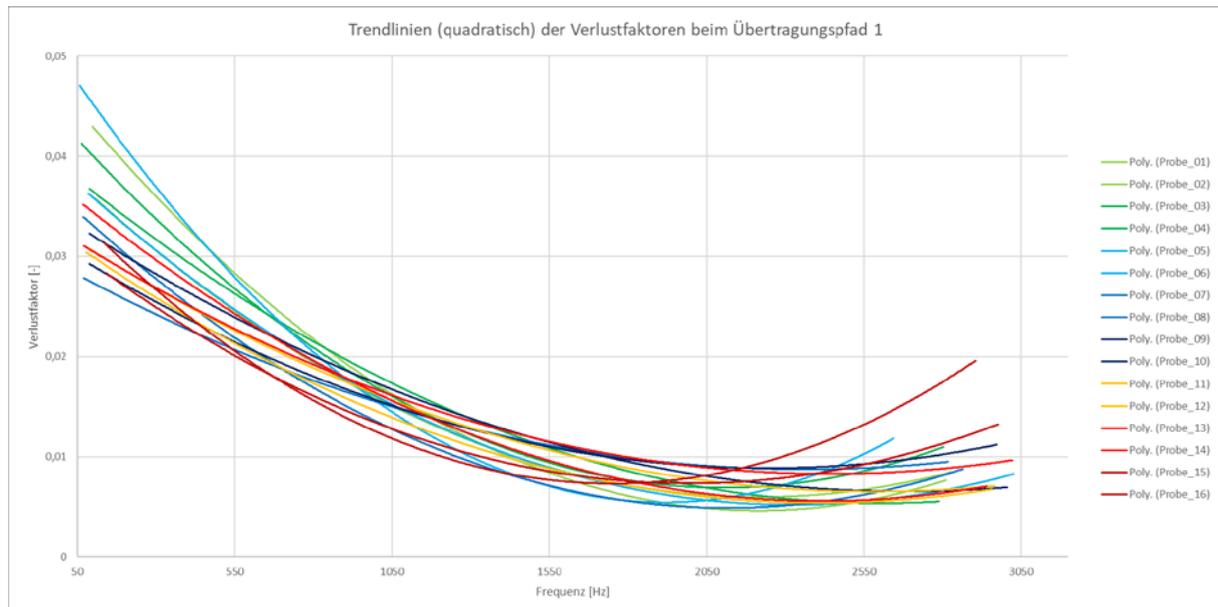


**Abbildung 22: Anregungs- und Sensorpositionen**

Die Ergebnisse sind nachfolgend aus Gründen der Übersichtlichkeit nur für den Übertragungspfad 1 dargestellt, da sich hinsichtlich des Übertragungspfad 1 keine nennenswerten Unterschiede ergaben. Insgesamt zeigte sich, dass die gemessenen Verlustfaktoren starken Streuungen unterworfen sind (Abbildung 23), weshalb zur weiteren Auswertung quadratische Trendlinien verwendet wurden (Abbildung 24). Zwischen den einzelnen Lagenaufbauten können keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Lediglich die Platten mit 8 gesperrten Lagen und Außenlagen im Winkel von  $90^\circ$  zur längeren Plattenseite weisen bei höheren Frequenzen eine etwas höhere Dämpfung als andere Probestplatten auf. Dies kann zum einen auf den durch die vielen Furnierlagen bedingten höheren Anteil an Klebstoff zurückgeführt werden, zum anderen reduziert die  $90^\circ$ -Orientierung in den Decklagen die Biegesteifigkeit der Platte in Längsrichtung im Vergleich zu einer  $0^\circ$ -Orientierung, wodurch der Körperschall in Übertragungspfaden parallel zur Längsrichtung schlechter übertragen wird.

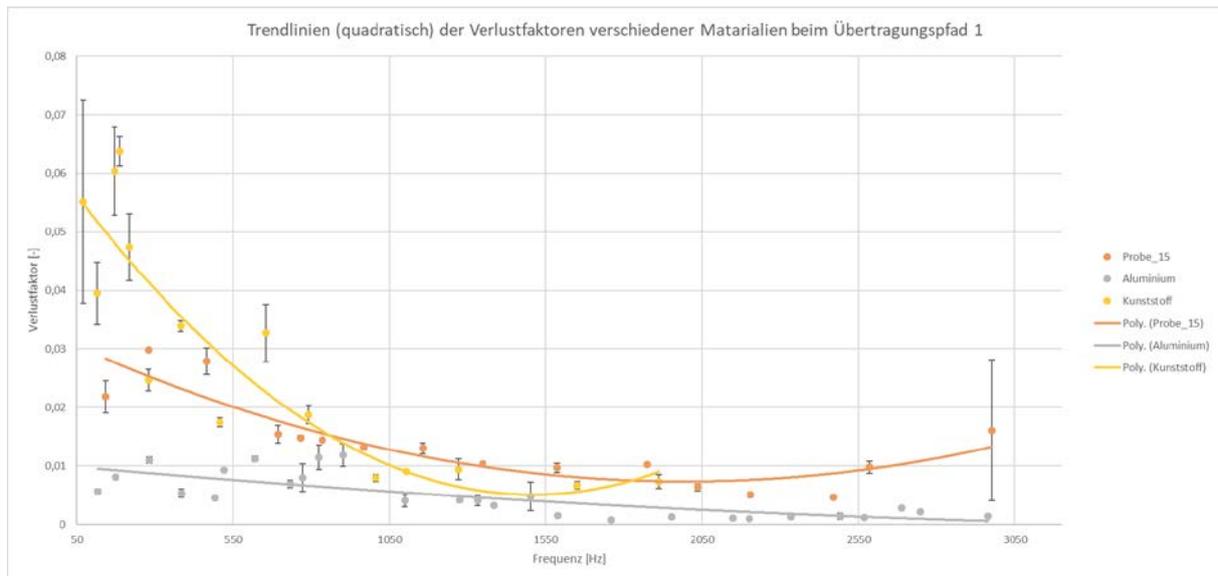


**Abbildung 23: Frequenzabhängigen Verlustfaktoren**



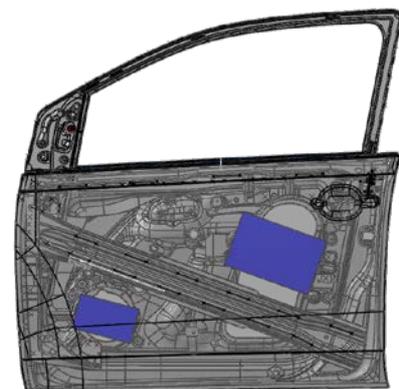
**Abbildung 24: Trendlinien der frequenzabhängigen Verlustfaktoren**

Unter Berücksichtigung der starken Streuung der Werte lässt sich als Fazit der durchgeführten Untersuchungen festhalten, dass der Lagenaufbau im betrachteten Frequenzbereich für die Schwingungseigenschaften eine eher untergeordnete Rolle spielt, weshalb bei der späteren Bauteilgestaltung die Priorität eher auf andere Aspekte, wie z.B. die Geometriegenauigkeit, gelegt werden kann. Zum Abschluss wurden weiterhin vergleichende Untersuchungen mit Probeplatten gleicher Abmessungen aus Aluminium und Kunststoff (ohne Faserverstärkung) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Holz furnierplatten mit Ausnahme des Frequenzbereichs von ca. 800 Hz bis 1.800 Hz Verlustfaktoren aufweisen, die zwischen denen von Aluminium und Kunststoff liegen (Abbildung 25).



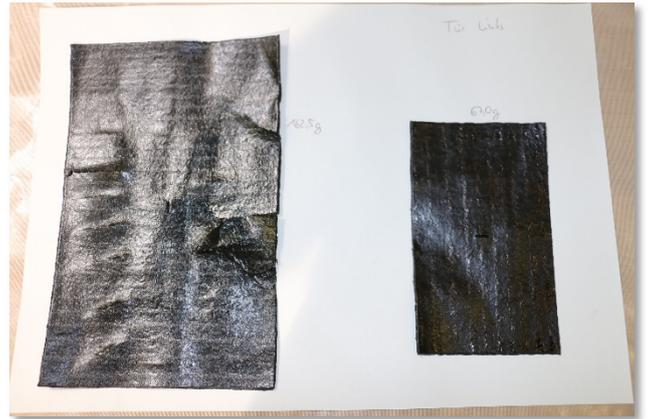
**Abbildung 25: Vergleich der Verlustfaktoren von Furnierplatten, Aluminium und Kunststoff**

Im nächsten Schritt wurde der Einsatz von Dämmplatten aus Furnierschichtholz im Fahrzeug getestet. Hierfür wurden zwei VW UP! in den Varianten als reines Elektrofahrzeug (eUP!) und mit klassischem Verbrennungsmotor (UP! GTI) beschafft, bei denen die Bitumenmatten (Abbildung 26) durch Furnierschichtholzplatten ersetzt wurden. Der Türaufprallträger wurde nicht verändert, um die Fahrzeuge ohne Änderungen an sicherheitsrelevanten Bauteilen im normalen Straßenverkehr einsetzen können.



**Abbildung 26: VW UP!, Position der Standard-Bitumendämmmatten in der Tür**

Zunächst wurden die Bitumenmatten mittels Heißluftfön und Spachtel vom Türaußenblech entfernt und die freigelegten Blechflächen gründlich gereinigt. Anschließend wurde jede Matte gewogen, um Vergleichswerte für die Massen der Furnierschichtholzplatten und des zur Befestigung benötigten Klebstoffes zu gewinnen (Abbildung 27).

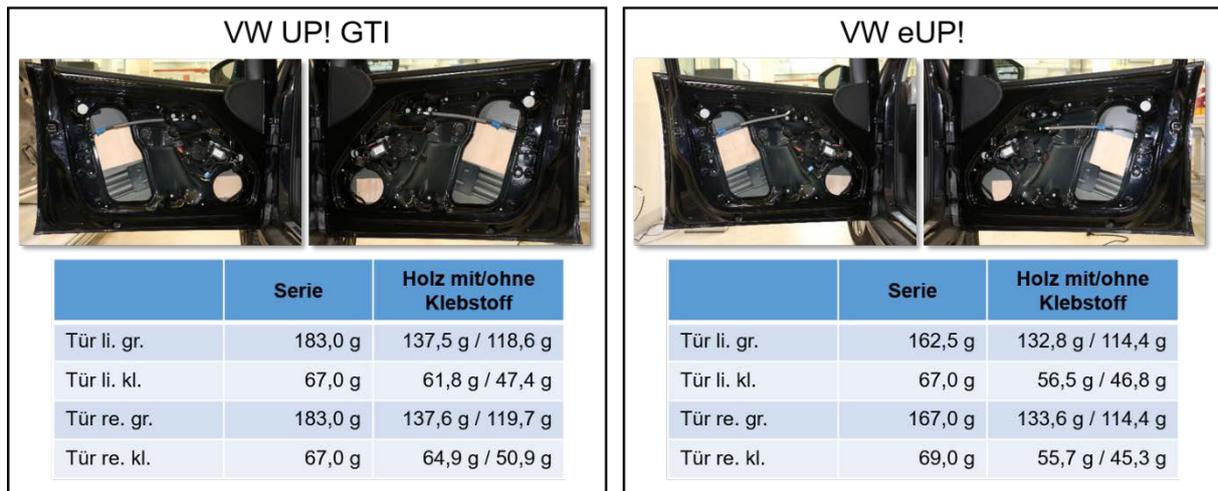


**Abbildung 27:** links: Bitumendämmmatten in der Fahrtür, rechts: entfernte und gewogene Dämmmatten

Im Anschluss wurden Buchen-Sperrholzplatten aus 3x 1,0 mm Furnier in identischen Abmessungen hergestellt und über eine Dickschichtverklebung mittels 1-K Polyurethan an die Positionen der Bitumendämmmatten geklebt. Vor der Verklebung wurden die Massen der reinen Sperrholzplatten und der Platten inklusive des aufgetragenen Klebstoffes mittels Feinwaage bestimmt (Abbildung 28).



**Abbildung 28:** Klebstoffauftrag und Massenbestimmung, links: große Dämmplatte, rechts: kleine Dämmplatte

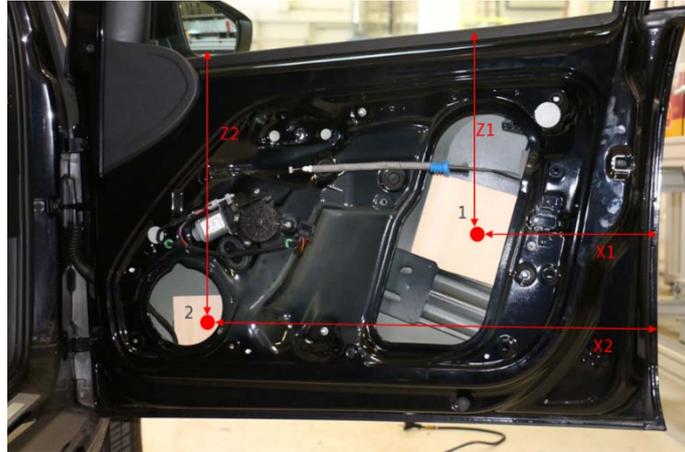


**Abbildung 29:** Fotos der modifizierten Türen und Massen der Dämmplatten mit/ohne Klebstoff

Mit den modifizierten Fahrzeugen und einem Serien-Referenzfahrzeugen wurden akustische Messungen des Türzuschlaggeräuschs vorgenommen (Abbildung 30). Hierzu wurde im Fahrzeuginnenraum ein Gummiexpander mit definierter Zugspannung zwischen den Türgriffen der Fahrer- und Beifahrertür gespannt. Im Anschluss wurde die Tür mit einer definierten Auslenkung geöffnet und durch den Expander wieder geschlossen. Das entstehende Türzuschlaggeräusch wurde über 3 Messmikrofone im Abstand von 1 m vom Fahrzeug gemessen. Zusätzlich wurde die Punktinertanz mittels Beschleunigungsaufnehmer an zwei Positionen am Türaußenblech bei der Anregung der Türstruktur mit einem Impulshammer bestimmt (Abbildung 31).



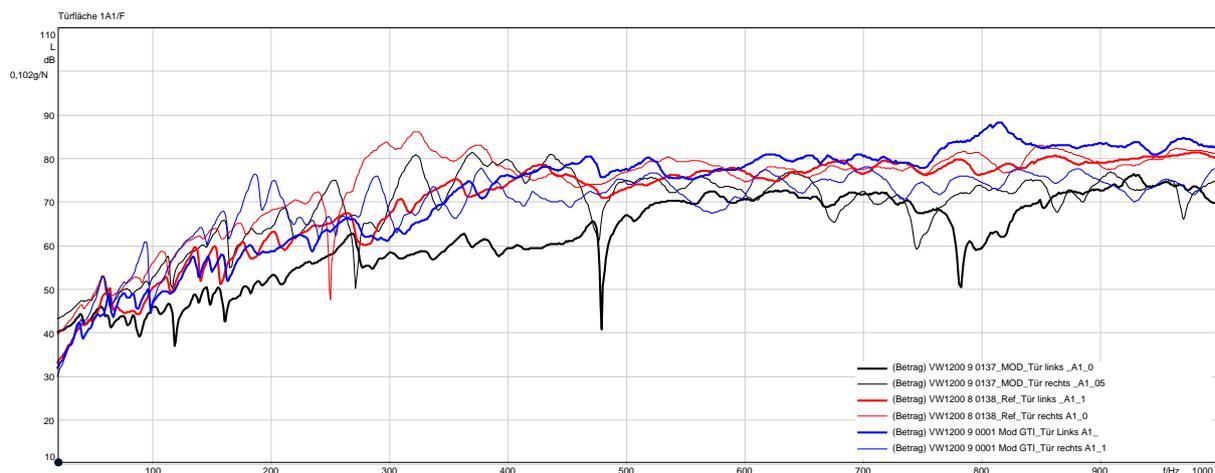
**Abbildung 30:** links: Expander zwischen den Türgriffen innen; Mitte: Öffnung der Tür auf einen definierten Abstand; rechts: Einrichtung von Messmikrofonen in 1 m Abstand zum Fahrzeug



**Abbildung 31: Position der Beschleunigungsaufnehmer (auf Türaußenblech abgebracht)**

Die Ergebnisse der Messungen der Punktintertanz an der Position nahe des Türschlosses (Abbildung 32) und nahe des Türlautsprechers (Abbildung 33) zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Türen des Referenzfahrzeugs mit Bitumenmatten und den mit Holzplatten modifizierten Fahrzeugen. Auch die Ergebnisse der Messmikrofone zeigen keine nennenswerten Unterschiede im Türzuschlaggeräusch, die über die Streuung durch die unterschiedlichen Fahrzeuge hinausgehen.

Insgesamt sind die Ergebnisse positiv zu bewerten, da die Entdröhnung mit den Holzdämmplatten trotz des etwas geringeren Gewichts keine Nachteile in Bezug auf die Fahrzeugakustik mit sich bringt und Holz im Vergleich zu Bitumenmatten deutliche ökologische Vorteile aufweist (vgl. Kapitel II.3.1).



**Abbildung 32: Ergebnis der Punktintertanz an Messpunkt 1 nahe Türschloss**

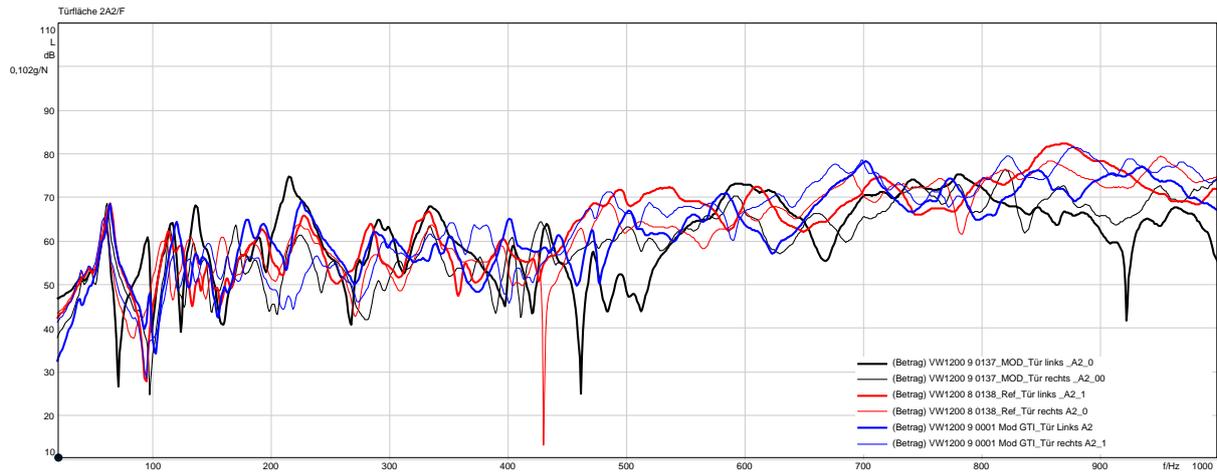


Abbildung 33: Ergebnis der Punktinertanz an Messpunkt 2 nahe Lautsprecher

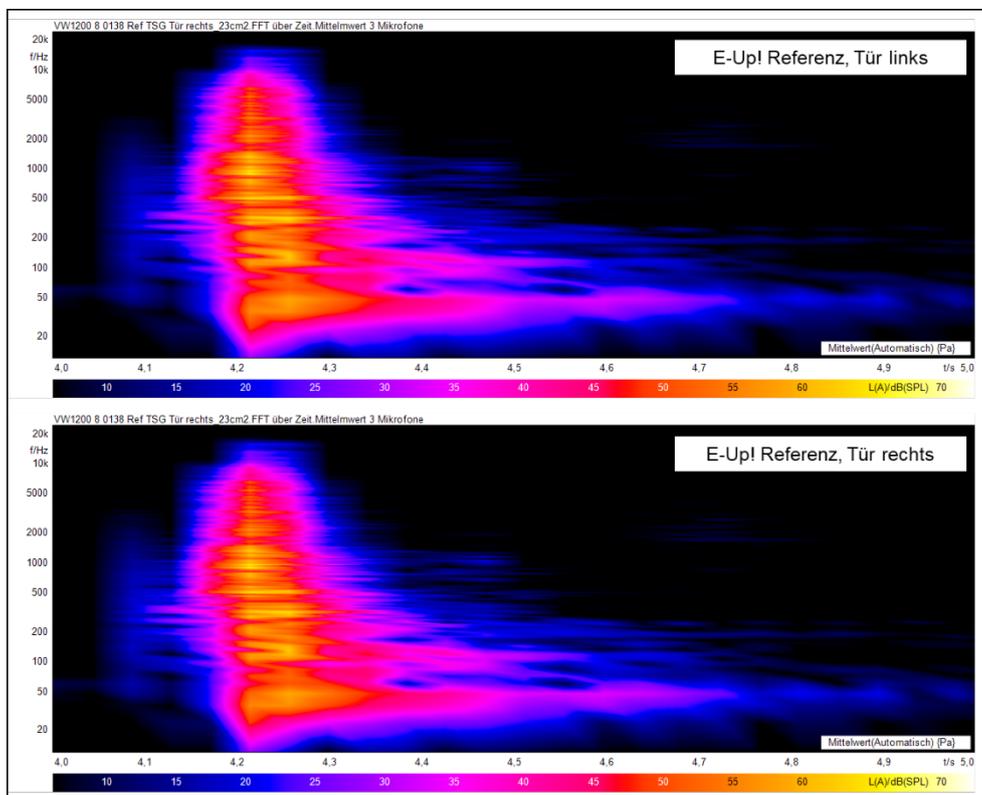
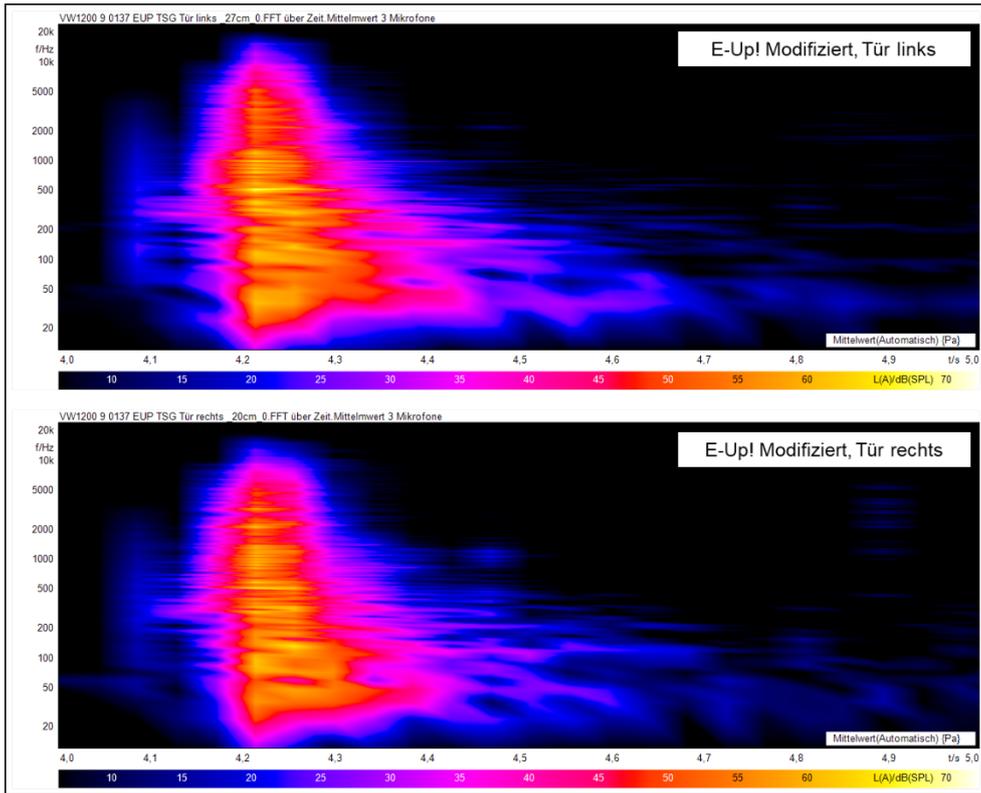
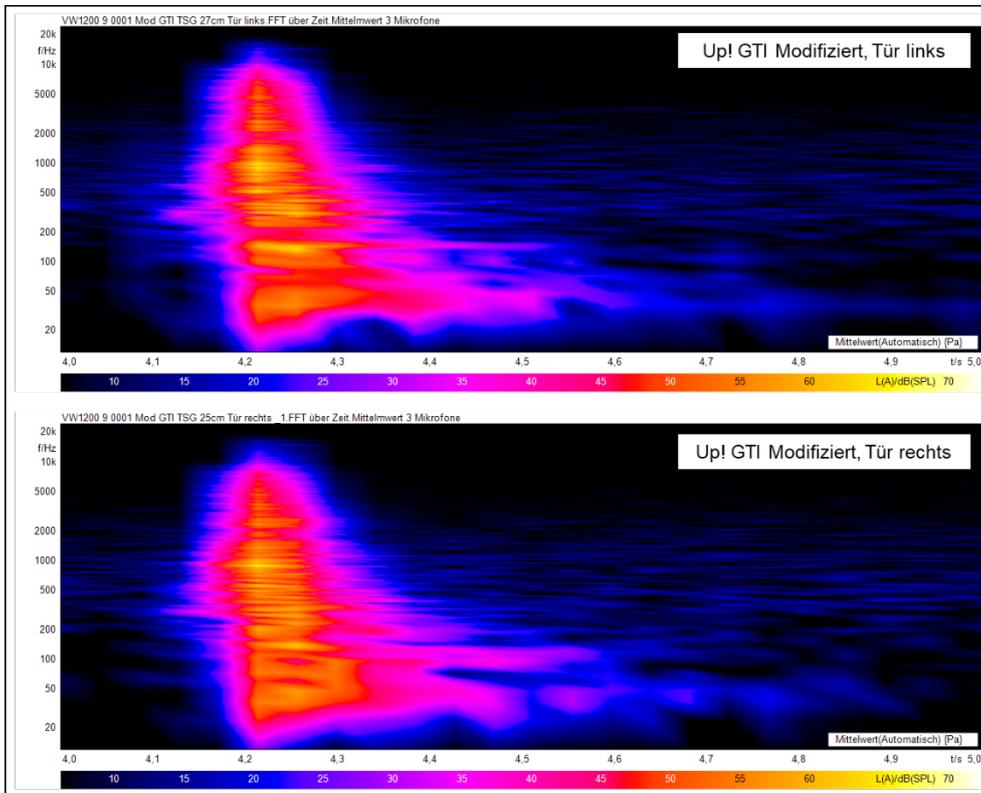


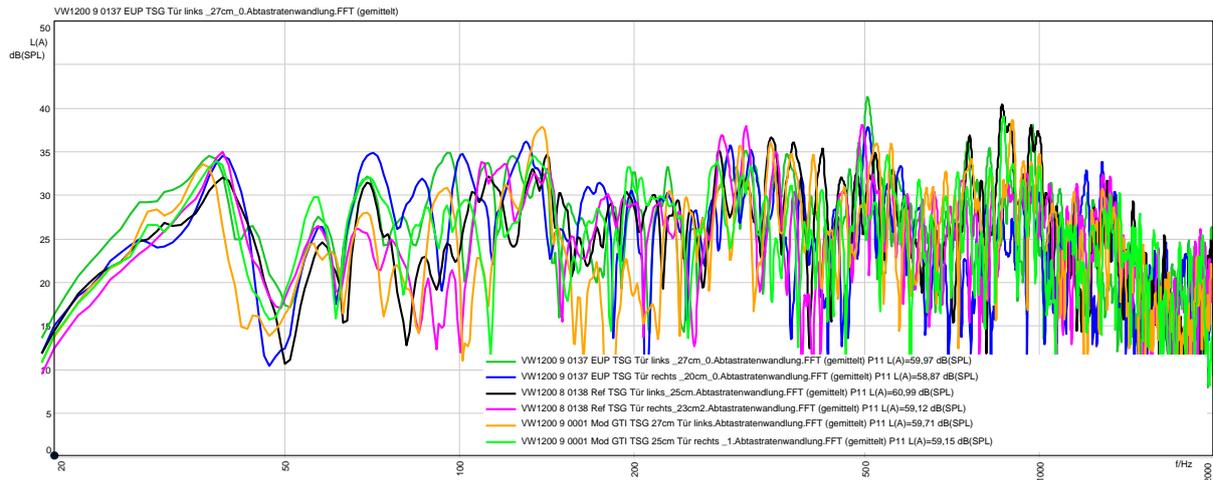
Abbildung 34: Campbell-Diagramm Referenzfahrzeug, (1x Türschließen, sec 4-5, Schalldruck über 3 Mikrofone gemittelt)



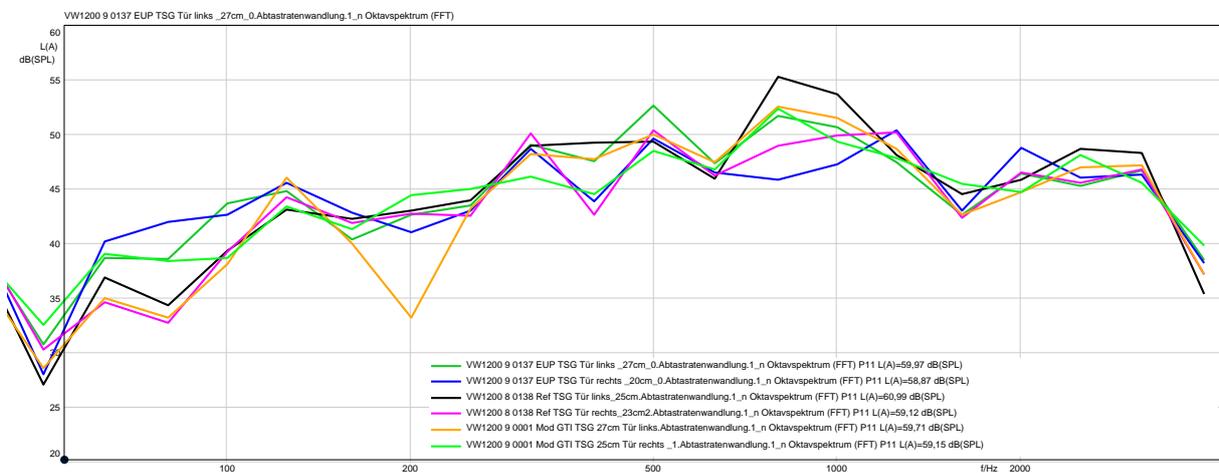
**Abbildung 35: Campbell-Diagramm E-Up! Modifiziert, (1x Türschließen, sec 4-5, Schalldruck über 3 Mikrofone gemittelt)**



**Abbildung 36: Campbell-Diagramm Up! GTI Modifiziert, (1x Türschließen, sec 4-5, Schalldruck über 3 Mikrofone gemittelt)**



**Abbildung 37: FFT des Zuschlaggeräusches aller 6 Türen über 3 Ereignisse gemittelt**



**Abbildung 38: Terz-Spektrum des Zuschlaggeräusches aller 6 Türen über 3 Ereignisse gemittelt, Mikro 1**

Zusätzlich zu den beschriebenen Messungen wird das Verhalten während der Fahrt beobachtet. Da die Fahrzeuge als Testfahrzeuge weiterhin in der F&E von Volkswagen im Einsatz sind, wurde in den Fahrtenbüchern eine Zusatzkategorie ergänzt, die Auffälligkeiten in Bezug auf die Fahrzeugakustik dokumentiert. Bis zur Abgabe dieses Berichts wurden dabei keine Auffälligkeiten festgestellt.

## **II.2.8 Materialauswahl und -validierung**

### **II.2.8.1 Untersuchungen in Bezug auf Holz-Holz-Verklebung**

Die Untersuchungen in Bezug auf die Holz-Holz-Verklebung erfolgte durch die Uni Kassel. Daher sei an dieser Stelle auf den Einzelbericht der Uni Kassel oder den Gesamtabschlussbericht verwiesen.

### **II.2.8.2 Untersuchungen in Bezug auf die Holz-Metallverklebung sowie Korrosion**

Die Untersuchungen in Bezug auf die Holz-Metallverklebung sowie Korrosion erfolgte durch die Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH. Daher sei an dieser Stelle auf den Einzelbericht der Mannesmann Forschung GmbH oder den Gesamtabschlussbericht verwiesen.

### **II.2.8.3 Emissionsuntersuchungen**

Im Unterauftrag von Volkswagen wurden durch das Fraunhofer WKI Emissionsmessungen an verschiedenen Furnierproben durchgeführt. Als Untersuchungsmaterial wurden die vorbehandelten Proben thermisch modifiziertes Furnier, acetyliertes Furnier und KTL-behandeltes Furnier sowie unbehandeltes und unbehandeltes, gelüftetes Furnier gewählt. Auf Abbildung 39 sind die einzelnen Furniere und deren durch die Vorbehandlung bedingten Farbabstufungen dargestellt.

Für die Furnierherstellung wurden die Stämme zunächst drei Tage bei 70 °C gekocht, anschließend entrindet und geschält. Die erzeugten Furniere wurden anschließend bei 60 °C für zwei Tage getrocknet. Nach der Herstellung wurde das unbehandelte Furnier sofort luftdicht in Folie verschlossen. Für die unbehandelten, gelüfteten Furniere wurde das Furnier nach der Trocknung sechs Tage in einem möglichst geruchsneutralen Raum „gelüftet“. Bei der thermischen Behandlung der Furniere gab es drei verschiedene Behandlungsvarianten, welche auch eine unterschiedlich starke Verfärbung der Furniere bewirken:

- 185 °C 33 h Gesamtprozesszeit, 3 h bei 185 °C
- 200 °C 35 h Gesamtprozesszeit, 3 h bei 185 °C
- 215 °C 37 h Gesamtprozesszeit, 3 h bei 185 °C.

Für die Emissionsmessung wurden Furniere der drei verschiedenen Prozesse gewählt. Bei der Acetylierung wurden die Furniere mit Essigsäureanhydridlösung imprägniert. Sowohl thermische Modifizierung, als auch Acetylierung wurden vom WKI bei der Universität Göttingen in Auftrag gegeben.

Die Phosphatierung und kathodische Tauchlackierung (KTL) der Furniere wurde bei dem Projektpartner der Salzgitter Mannesmann Forschung durchgeführt. Die Furniere haben dabei zunächst den kompletten Prozess der automobiltypischen Phosphatierung durchlaufen, welche die folgenden Prozessschritte beinhaltet:

- Alkalische Entfettung
- Spülen mit vollentsalztem Wasser
- Aktivierungsbehandlung (auf die Blechoberflächen werden dabei die Kristallisationskeime für die Phosphatierung etabliert)
- Phosphatierung mit Tri-Kationen-Phosphatierung
- Spülen mit vollentsalztem Wasser
- Trocknung.

Im Anschluss wurden die Furniere, analog zum Automobilprozess, in das KTL-Bad eingetaucht, mit destilliertem Wasser gespült und abschließend im Ofen bei 180 °C für 25 Minuten ausgelagert. Nach der Behandlung wurden auch diese Furniere dicht verschlossen in PE-Folie verpackt.



**Abbildung 39: Buchenfurniere für die Emissionsprüfung, von links nach rechts: unbehandelt, acetyliert, thermisch modifiziert, KTL-behandelt**

#### *Emissionsprüfung:*

Das Probenmaterial wurde in einer Prüfkammer ohne vorherige Konditionierung geprüft. Die klimatischen Parameter der Kammeruntersuchung sind wie folgt:

- Kammertyp: 1 m<sup>3</sup> - Glaskammer A
- Klima: 23 °C, 50 % rel. Luftfeuchte
- Luftwechselrate: 1 h<sup>-1</sup>
- Beladung: 1 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

Nach definierten Zeiten wurden Luftproben auf Tenax-gefüllten Probenröhrchen entnommen, thermisch desorbiert und gaschromatographisch analysiert. Freigesetzte organische Verbindungen wurden mittels Massenspektrometrie identifiziert und gegen reine Referenzsubstanzen quantifiziert. Das beschriebene Verfahren erfasst die flüchtigen organischen Verbindungen von C5 bis C22 und hat eine Nachweisgrenze (NWG) von ca. 1 µg/m<sup>3</sup>. Bei den nachfolgenden Ergebnissen werden die Substanzen von C6 bis C16 als volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen, VOC), die vorher eluierenden als very volatile organic compounds (VVOOC) und die nach C16 detektierten Verbindungen als semi volatile organic compounds (SVOC) angegeben. Die Messungen wurden gemäß DIN EN ISO 16000 Teil 6, 9 und 11 durchgeführt. Bei dem Nachweis der Emissionen wird zwischen den verschiedenen Leveln „Spuren“, „leicht“, „mäßig“, „stark“ und „sehr stark“ differenziert.

Die flüchtigen Aldehyde werden auf DNPH-Kartuschen gesammelt und nach Elution mit Acetonitril mittels HPLC/UV gemäß DIN ISO 16000 Teil 3 analysiert. In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Emissionsprüfungen aufgezeigt.

Das Probenmaterial „Buche unbehandelt“ war eine sehr starke Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure, n-Butanol, 1-Hydroxy-2-propanon, Propionsäure, Isobuttersäure, n-Hexanal, Buttersäure, Pentansäure und Hexansäure wurden in niedrigen bis sehr hohen Konzentrationen nachgewiesen (siehe Tabelle 5).

**Tabelle 5: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche unbehandelt"**

Substanz	Konzentration in µg/m <sup>3</sup> nach		
	5 h	24 h	48 h
Ethanol	76	3	< 1
Aceton	4	4	4
n-Propanol	4	1	< 1
Essigsäure	1824	1071	777
n-Butanol	3	1	< 1
1-Hydroxy-2-propanon	8	3	2
Propionsäure	2366	1293	908
Isobuttersäure	88	48	34
n-Hexanal	5	2	1
Buttersäure	275	147	108
Pentansäure	15	9	6
Hexansäure	14	4	2
Summe VVOOC (< C6):	84	8	5
Summe VOC (C6-C16):	4598	2578	1838

Summe SVOC (> C16): < 1 < 1 < 1

Das thermisch modifizierte Buchenfurnier war eine starke Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure, 1-Hydroxy-2-propanon, Propionsäure, Furfural und 5-Methylfurfural wurden in niedrigen bis hohen Konzentrationen nachgewiesen (Tabelle 6). Die giftige Substanz Furfural wurde in mäßigen Konzentrationen nachgewiesen.

**Tabelle 6: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche thermisch modifiziert"**

Substanz	Konzentration in µg/m <sup>3</sup> nach		
	5 h	24 h	48 h
Aceton	4	4	3
Methylacetat	7	4	4
Essigsäure	3143	1574	1134
1-Hydroxy-2-propanon	18	7	4
Propionsäure	18	16	10
Furfural	183	81	55
5-Methylfurfural (Furfural)	8	1	< 1
Summe VVOC (< C6):	11	8	7
Summe VOC (C6-C16):	3370	1679	1203
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Das acetylierte Buchenfurnier war eine sehr starke Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure und Furfural wurden in niedrigen bis sehr hohen Konzentrationen nachgewiesen. Die giftige Substanz Furfural wurde in Spuren-Konzentrationen nachgewiesen (siehe Tabelle 7).

**Tabelle 7: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche acetyliert"**

Substanz	Konzentration in µg/m <sup>3</sup> nach		
	5 h	24 h	48 h
Aceton	7	3	3
Methylacetat	8	< 1	< 1
Essigsäure	7536	4207	2785
Furfural	17	8	5
Methylendiacetat (Toluen)	12	7	5

Ethanol, 1,1'-oxybis-, diacetate (Toluen)	12	5	3
Summe VVOC (< C6):	15	4	4
Summe VOC (C6-C16):	7577	4227	2798
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Das Probenmaterial des unbehandelten, aber gelüfteten Buchenfurniers war eine starke Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure, Propansäure, iso-Butansäure, n-Butansäure, Pentansäure, Hexansäure und Phenol wurde in niedrigen bis hohen Konzentrationen nachgewiesen. Die giftige Substanz Phenol wurde in Spuren-Konzentrationen nach 5 und 24 Stunden nachgewiesen (siehe Tabelle 8).

**Tabelle 8: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche unbehandelt gelüftet"**

Substanz	Konzentration in µg/m <sup>3</sup> nach		
	5 h	24 h	48 h
Ameisensäure	9	6	6
Essigsäure	498	337	275
Propansäure	773	639	530
iso-Butansäure	25	21	16
n-Butansäure	102	90	76
Pentansäure	8	7	6
Hexansäure	3	3	3
Phenol	1	1	< 1
Summe VVOC (< C6):	9	6	6
Summe VOC (C6-C16):	1410	1098	906
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Das KTL-behandelte Furnier war eine schwache Quelle von flüchtigen organischen Komponenten (VOC). Die geruchsrelevanten Verbindungen Essigsäure, n-Butylacetat und Furfural wurden in niedrigen Konzentrationen nachgewiesen. Die giftige Substanz Furfural wurde in Spuren-Konzentrationen über die gesamte Messdauer nachgewiesen.

**Tabelle 9: Ergebnisse der Emissionsprüfung von Probe "Buche KTL-behandelt"**

Substanz	Konzentration in µg/m <sup>3</sup> nach		
	5 h	24 h	48 h
Aceton	4	4	2
Ameisensäure	11	12	10
Essigsäure	83	101	66
n-Butylacetat	2	< 1	< 1
Furfural	7	6	3

1-Butoxy-2-propanol	2	6	3
Summe VVOC (< C6):	15	16	12
Summe VOC (C6-C16):	94	113	72
Summe SVOC (> C16):	< 1	< 1	< 1

Furfural, wie es bei thermisch modifiziertem, acetyliertem und KTL-behandelten Furnieren nachgewiesen wurde, entsteht bei der thermischen Behandlung von Holz. Aus den Hemicellulosen des Holzes entstehen dabei u. a. Essigsäure und Ameisensäure sowie bei höheren Temperaturen das besagte Furfural. Da bei allen drei Vorbehandlungen verhältnismäßig hohe Temperaturen eingesetzt wurden, ist der Nachweis des Furfural nicht überraschend.

In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind die Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde aller unbehandelten und behandelten Furnierproben zu sehen. Bis auf die beiden Proben „thermisch modifiziert“ und „KTL-behandelt“, bei welchen Formaldehyd nachgewiesen werden konnte, liegen die Konzentrationen leichtflüchtiger Aldehyde bei den anderen Furnierproben unterhalb der Bestimmungsgrenze

**Tabelle 10: Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde von unbehandeltem, thermisch modifiziertem und acetyliertem Buchenfurnier**

Substanz	Konzentration in µg/m³ nach						Bestimmungsgrenze [µg/m³]
	24 h			48 h			
	unbehandelt	thermisch	acetyliert	unbehandelt	thermisch	acetyliert	
Formaldehyd	< 2	9	< 2	< 2	7	< 2	2
Acetaldehyd	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Propanal	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Butanal	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	4
Aceton	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2

**Tabelle 11: Ergebnisse der leichtflüchtigen Aldehyde von unbehandeltem gelüfteten sowie KTL-behandeltem Buchenfurnier**

Substanz	Konzentration in µg/m³ nach				Bestimmungsgrenze [µg/m³]
	24 h		48 h		
	unbehandelt gelüftet	KTL-behandelt	unbehandelt gelüftet	KTL-behandelt	
Formaldehyd	3	16	< 2	10	2
Acetaldehyd	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Propanal	< 3	< 3	< 3	< 3	3

Butanal	< 4	< 4	< 4	< 4	4
Aceton	2	3	< 2	2	2

*Geruchsintensitätsbewertung mit einem Vergleichsmaßstab gemäß ISO 16000-28 – indirekte Bewertung:*

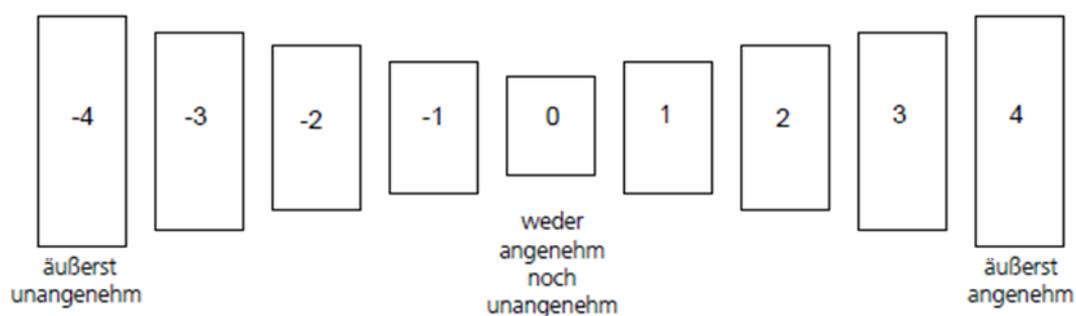
Die Luftproben werden in NALOPHAN-Beutel gefüllt und sobald wie möglich durch eine trainierte Probandengruppe bewertet. Die Probandengruppe besteht aus mindestens 8 trainierten Personen gemäß ISO 16000-28. Die zu untersuchende Luftprobe wird den einzelnen Testpersonen mithilfe eines Probendarbietungsgeräts zur Bewertung angeboten. Die Testpersonen bewerten unter Zuhilfenahme eines Aceton-Vergleichsmaßstabs die empfundene Intensität des Materials. Die Einheit der empfundenen Intensität  $\Pi$  ist pi. Der Vergleichsmaßstab für die Intensität ist durch folgende Punkte festgelegt:

- 0 pi entsprechen 20 mg/m<sup>3</sup> (Geruchsschwelle von Aceton)
- 15 pi entsprechen 320 mg/m<sup>3</sup>.

Eine Erhöhung von 1 pi entspricht einer Erhöhung von 20 mg/m<sup>3</sup>.

*Hedonische Wirkung*

Die hedonische Wirkung der Probe wird im Anschluss an die Bestimmung der empfundenen Intensität durch die Probanden bewertet. Sie gibt Auskunft über die Lästigkeit eines Geruchs. In Abhängigkeit vom Geruchsstoff bzw. der Geruchsstoffkonzentration und dem individuellen Erfahrungshintergrund des jeweiligen Probanden werden dessen Empfindungen auf einer neunteiligen Skala von „äußerst angenehm“ (4) bis „äußerst unangenehm“ (-4) beschrieben (siehe Abbildung 40). In Tabelle 12 und Tabelle 13 sind Geruchsintensität und hedonische Wirkung der einzelnen Proben gegenübergestellt.



**Abbildung 40: Neunteilige Skala der hedonischen Wirkung**

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier unbehandelt“ wurde durch die Probanden mit 11,0 pi als sehr starke Geruchsquelle eingestuft. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als unangenehm bis äußerst unangenehm (-3,3) wahrgenommen.

Ursächlich für die sehr hohe Intensität sowie den unangenehmen Geruchseindruck der Probe sind sehr wahrscheinlich die durch das Material freigesetzten Carbonsäuren Essigsäure, Propionsäure, iso-Butansäure und Butansäure. Gerade die Carbonsäuren Propionsäure, iso-Butansäure sowie Butansäure haben sehr niedrige Geruchsschwellen und sind somit von der menschlichen Nase bereits in geringen Konzentrationen wahrnehmbar. Darüber hinaus besitzen Verbindungen wie Propionsäure, iso-Butansäure und Butansäure unangenehme Geruchseindrücke wie stechend, säuerlich, ranzig und käseartig.

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier thermisch modifiziert“ wurde durch die Probanden mit 9,3 pi als starke Geruchsquelle eingestuft. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als unangenehm (-1,4) wahrgenommen.

Ursächlich für die hohe Intensität sowie den unangenehmen Geruchseindruck der Probe sind hier ebenfalls sehr wahrscheinlich die durch das Material freigesetzten Carbonsäuren Essigsäure und Propionsäure sowie das Aldehyd Furfural. Der Geruchseindruck wird u. a. als säuerlich, holzig sowie rauchig wahrgenommen, was sich durch die thermische Vorbehandlung des Holzes erklären lässt.

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier acetyliert“ wurde durch die Probanden mit 7,4 pi als deutliche bis starke Geruchsquelle eingestuft. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als unangenehm (-1,3) wahrgenommen.

Ursächlich für die deutlich bis starke Intensität sowie den unangenehmen Geruchseindruck der Probe ist sehr wahrscheinlich die durch das Material freigesetzte Carbonsäure Essigsäure, welche prozessbedingt in großen Mengen nachgewiesen werden konnte und der Probe einen säuerlichen Geruchseindruck verschafft.

**Tabelle 12: Ergebnisse der Geruchsbewertung nach 48 h von unbehandeltem, thermisch modifiziertem und acetyliertem Buchenfurnier**

	Intensität			Hedonik		
	unbehandelt	thermisch	acetyliert	unbehandelt	thermisch	acetyliert
Mittelwert	11,0	9,3	7,4	-3,3	-1,4	-1,3
Standardabweichung	3,0	4,4	2,7	0,5	1,0	1,2

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier unbehandelt gelüftet“ wurde durch die Probanden mit 9,8 pi als sehr starke Geruchsquelle eingestuft. Somit fällt die Geruchsintensität der gelüfteten Probe nur geringfügig kleiner aus als jene der unbehandelten, nicht gelüfteten Furnierprobe. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als unangenehm bis äußerst unangenehm (-3,2) wahrgenommen.

Ursächlich für die sehr hohe Intensität sowie den unangenehmen Geruchseindruck der Probe sind auch bei dieser Probe sehr wahrscheinlich die durch das Material freigesetzten Carbon-säuren Essigsäure, Propansäure, iso-Butansäure und n-Butansäure. Gerade die Carbonsäu-ren Propionsäure, iso-Butansäure sowie n-Butansäure haben sehr niedrige Geruchsschwellen und werden somit von der menschlichen Nase bereits in geringen Konzentrationen wahrge-nommen.

Die empfundene Intensität der Probe „Buchenfurnier KTL-behandelt“ wurde durch die Proban-den mit 5,0 pi als schwache Geruchsquelle eingestuft. Die hedonische Wirkung der Probe wurde als leicht unangenehm (-0,8) wahrgenommen. Der Geruchseindruck wurde u. a. mit holzig, süßlich und säuerlich beschrieben.

**Tabelle 13: Ergebnisse der Geruchsbewertung nach 48 h von unbehandeltem gelüfteten sowie KTL-behandeltem Buchenfurnier**

	Intensität		Hedonik			
	unbehandelt	gelüftet	KTL-behandelt	unbehandelt	gelüftet	KTL-behandelt
Mittelwert	9,8	5,0	-3,2	-0,8		
Standardabweichung	3,9	3,0	0,9	1,0		

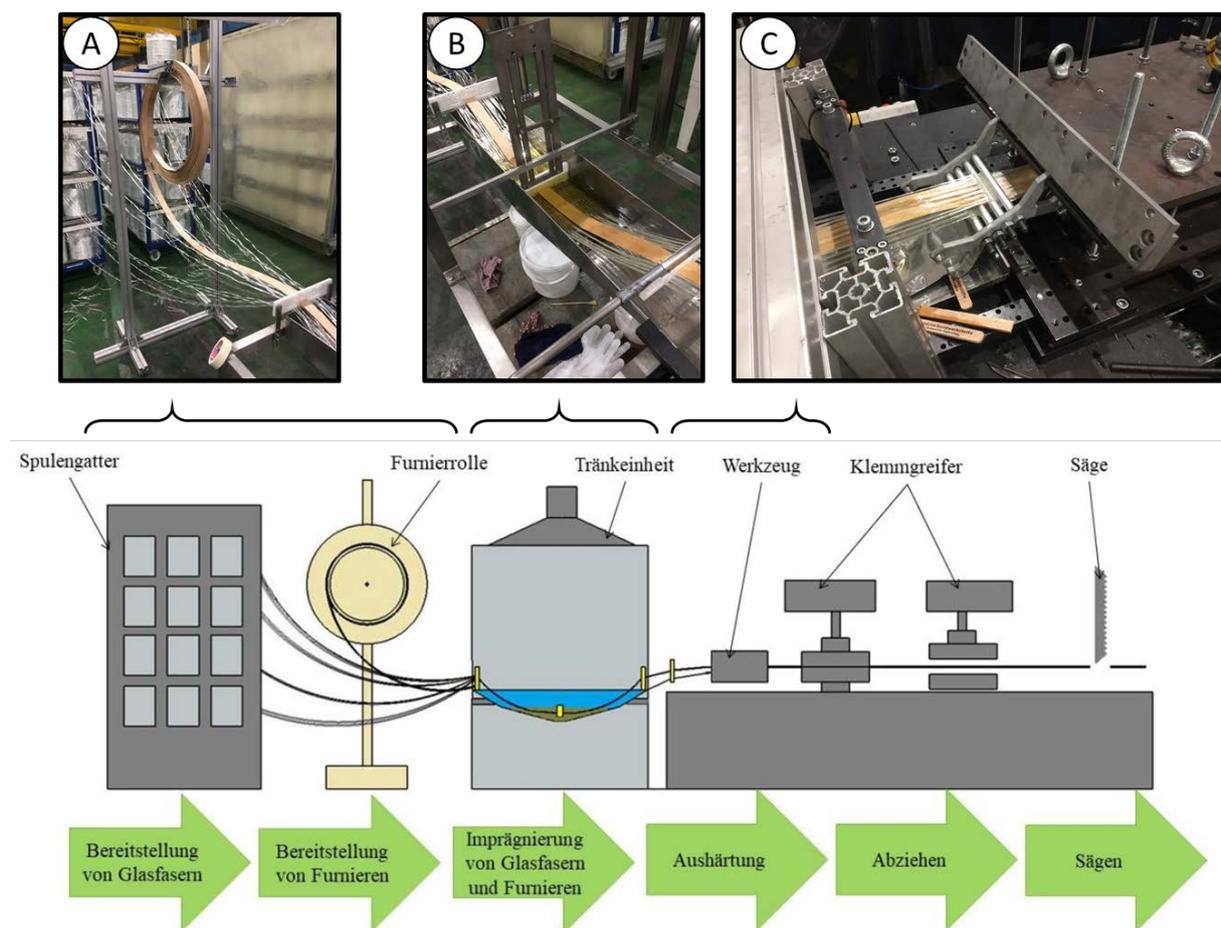
## **II.2.9 Begleitende grundlegende fertigungstechnologische Fragestellungen**

### **II.2.9.1 Pultrusion**

Neben der Herstellung rein holzbasierter Bauteile wurde im Projektrahmen die Kombination von Holz mit anderen Werkstoffen, wie z.B. faserverstärkten Kunststoffen untersucht, da sich durch diesen Hybridansatz die Vorteile der jeweiligen Werkstoffe miteinander kombinieren las-sen. Zur Herstellung gerader Profile bietet sich die Pultrusion hierfür als Fertigungsverfahren an. Der Ansatz besteht darin, einfache Holzfurnierstreifen als Endlosmaterial einem Standard-Pultrusionsprozess zuzuführen, um auf diese Weise ein Profil mit einem Sandwich-Aufbau herzustellen. Die Vorteile bestehen darin, dass

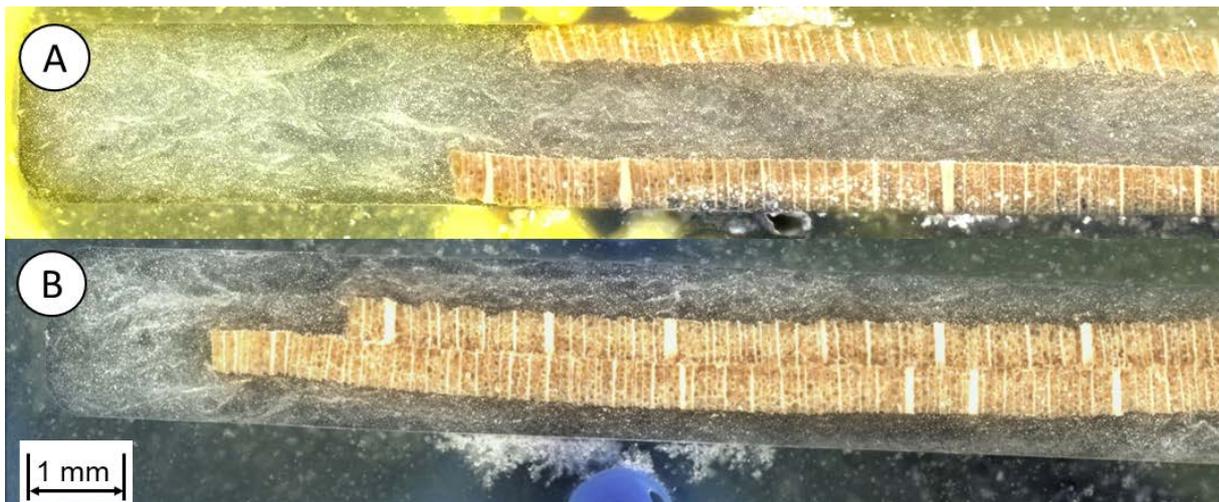
- durch den Einsatz von Holz als Werkstoff für den Sandwichkern immer noch über recht gute mechanische Materialeigenschaften verfügt,
- im Vergleich zum Holz schwere und teure synthetische Fasern im Bereich der neutralen Faser von biegebeanspruchten Profilen gespart werden können,
- die Menge an Matrixpolymer ebenfalls reduziert werden kann und
- das Holz durch die Umhüllung mit faserverstärktem Kunststoff vor Umgebungseinflüssen geschützt ist.

Im ersten Schritt wurde anhand eines einfachen Streifenprofils mit einem Querschnitt von  $50 \times 2 \text{ mm}^2$  die grundlegende Machbarkeit untersucht. Hierzu wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner WKI Pultrusionsversuche an einer Anlage des Fraunhofer IWU in Chemnitz durchgeführt. Als Holzwerkstoff wurden Streifen aus Buchenfurnier mit der Faserorientierung in Längsrichtung zu einem Endlosband verklebt und auf eine Rolle gewickelt. Diese wurde zwischen Faserlager und der Tränkeinheit positioniert, um das Buchenfurnier zusammen mit den Glasfasern durch ein Bad mit ungesättigtem Polyesterharz in der Tränkeinheit zu führen. Der Versuchsaufbau sowie der grundlegende Prozessablauf sind auf Abbildung 41 dargestellt.



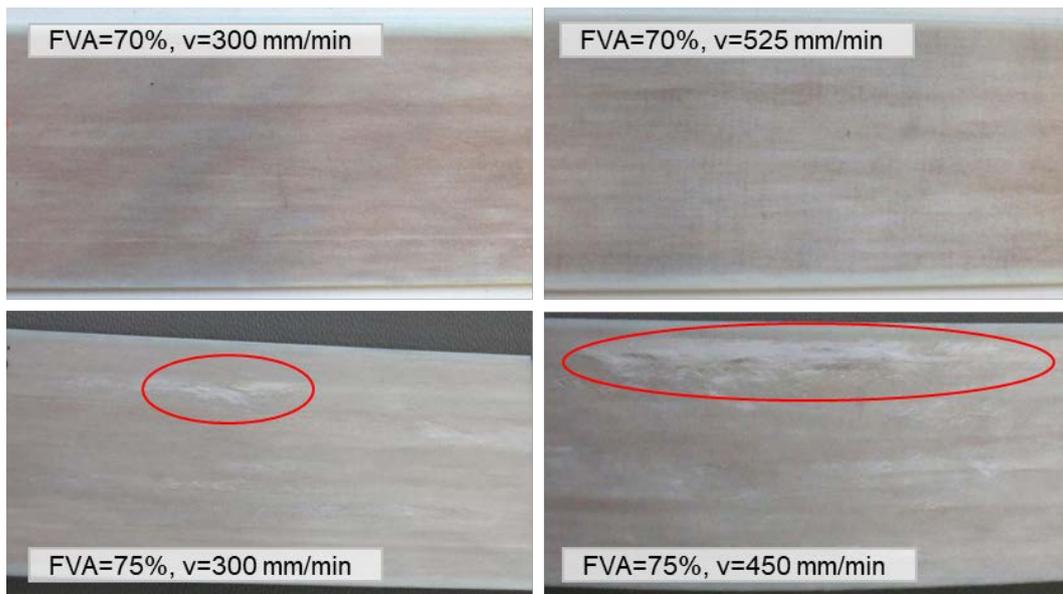
**Abbildung 41:** Versuchsaufbau und Prozessablauf zur Pultrusion mit Buchenfurnier, darin sind A: Furnierrolle, B: Durchführung im Harzbad, C: Werkzeugeinlauf

In diesen ersten Versuchen konnte bereits eine sehr gute Machbarkeit der Kombination von Buchenfurnier und endlosfaserverstärktem Kunststoff durch die Pultrusion aufgezeigt werden. Dabei wurde sowohl die Anordnung des Furniers als äußere dekorative Decklage, als auch die Positionierung im Inneren des Rechteckquerschnitts entsprechend eines Sandwichansatzes untersucht (Abbildung 42). Anhand der Schlibfbilder konnte nachgewiesen werden, dass die Kunststoffmatrix ca. 0,1 mm tief in das Holzfurnier eindringt und so für eine sehr gute Haftung sorgt.

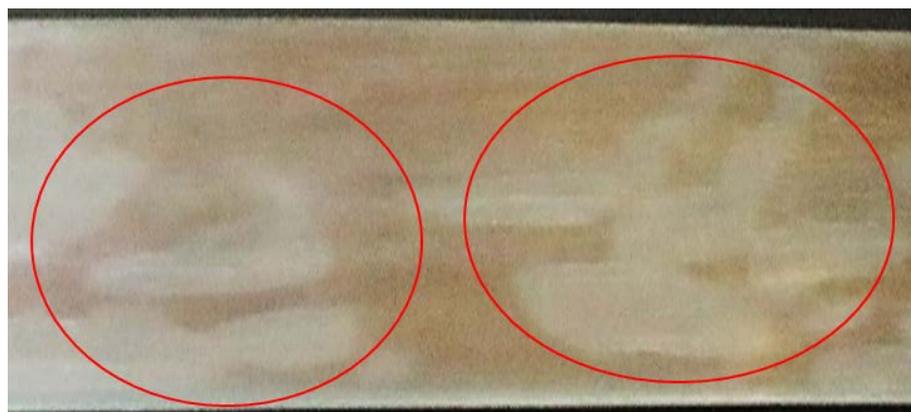


**Abbildung 42: Pultrudierte Streifenprofile mit Endlosglasfasern und 2 x 0,5 mm Buchenfurnier; A: Buchenfurniere als äußere Decklagen, B: Buchenfurniere als Sandwichkern**

Im weiteren Projektverlauf wurde anhand des Streifenprofils und 1 mm dicken Buchenfurnierstreifen der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Pultrusionsergebnisse bei einem weiteren UP-Harz und bei einem Epoxidharzsystem (EP) untersucht. Beim UP-Harz zeigte sich, dass insbesondere bei hohen Faservolumengehalten im Bereich der Endlosglasfaser eine zu hohe Abzugsgeschwindigkeit zu einer unvollständigen Faserimprägnierung führt (Abbildung 43). Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass eine zu hohe Feuchtigkeit des Furniers durch Dampfbildung beim Einzug in das im Mittel auf ca. 150°C temperierte Pultrusionswerkzeug zu einer mangelhaften Anbindung zwischen Furnier und Harz führt (Abbildung 44).



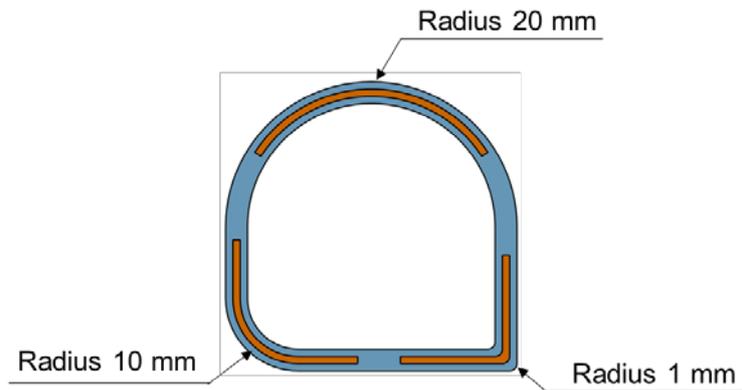
**Abbildung 43:** Pultrudierte Streifenprofile mit 1 mm dicken Buchenfurnier im Kern mit verschiedenen Faservolumenanteilen (FVA) und Abzugsgeschwindigkeiten (v)



**Abbildung 44:** Blasenbildung bei Verwendung eines befeuchteten Furniers und UP-Harz

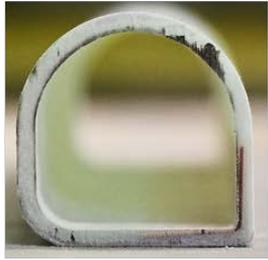
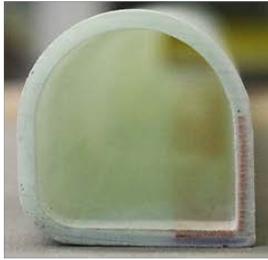
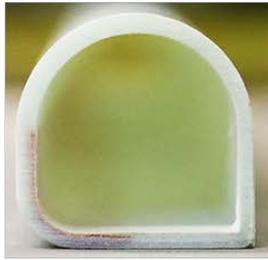
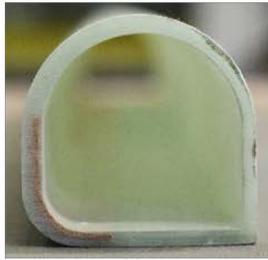
Bei der Verwendung des Epoxidharzsystems zeigte sich, dass die noch im Holz befindliche Restfeuchtigkeit die Härtingsreaktion deutlich negativ beeinflusst, so dass mit diesem Harzsystem keine prüfbaren Proben hergestellt werden konnten.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Möglichkeit untersucht, das Furnier in verschiedenen Querschnittsradien einzubringen. Hierzu wurde eigens ein Rohrwerkzeug hergestellt, in welches an drei verschiedenen Positionen Furniere unterschiedlicher Stärke zugeführt werden konnten (Abbildung 45).



**Abbildung 45: Rohrwerkzeug für die Pultrusion mit drei verschiedenen Querschnittsradien**

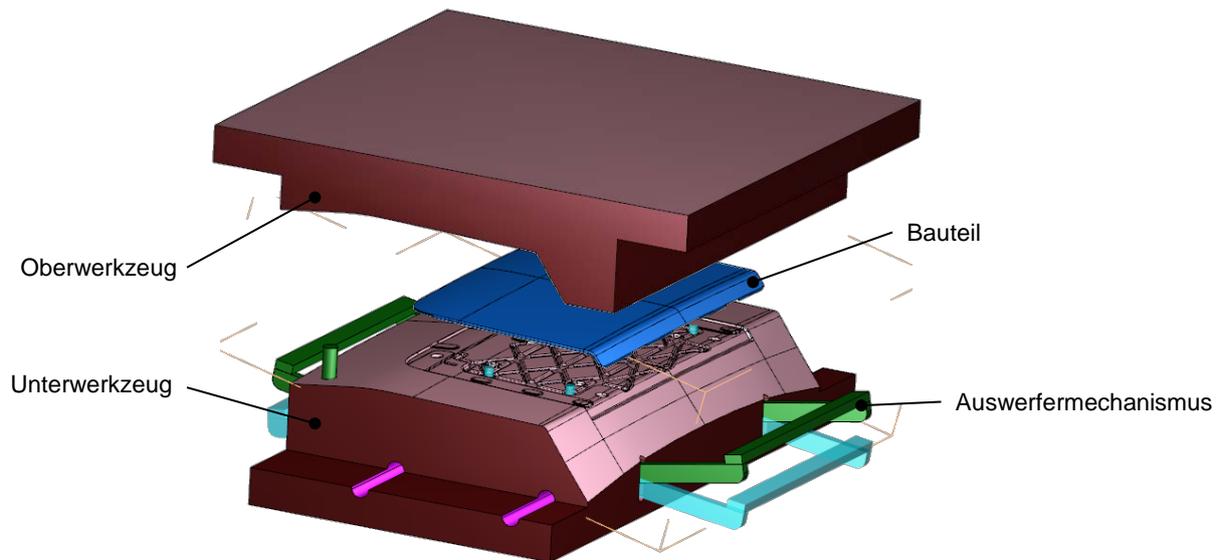
In den Versuchen konnte trotz einer Variation der Blendenbesetzung vor dem Werkzeugeinlauf mit unterschiedlichen Rovinganzahlen keine mittige Positionierung des Furniers im Querschnitt erzielt werden, was auf die relativ große Biegesteifigkeit des Furniers zurückzuführen ist (Abbildung 46). In Versuchen konnte dennoch eine sehr gute Anbindung zwischen Furnier und Kunststoffmatrix erzielt werden. Insgesamt erwies sich die Pultrusion in Kombination mit Holzfurnieren als ein vielversprechender Ansatz, der ein hohes Potential für die Kombination dieser klassischen Leichtbautechnologie mit biologischen Werkstoffen aufweist.

		Furnierstärke		
		0,5 mm	1,0 mm	1,5 mm
Radius	1 mm			
	10 mm			
	20 mm			

**Abbildung 46: Furniere unterschiedlicher Stärken in den verschiedenen Radien des Rohrprofils**

#### II.2.9.2 Kombination von Sheet Molding Compound (SMC) mit Holzfurnier

Ein weiterer Ansatz besteht in der gemeinsamen presstechnischen Verarbeitung von Holzfurnier und so genanntem Sheet Molding Compound (SMC, vorgetränkte Langfaserharzmatten, welche im Werkzeug verformt und ausgehärtet werden). In Vorversuchen mit einem einfachen Plattenwerkzeug konnte bereits gezeigt werden, dass das SMC-Harzsystem beim Aufschmelzen das Holzfurnier zu einem gewissen Maß durchtränkt und so eine gute Haftung zwischen Faserverstärkung und Holzfurnier entsteht. Für die weiteren Untersuchungen wurde ein kleines Werkzeug (Abbildung 47) für eine Abdeckung im Fahrgastraum eines Bentley angefertigt, die relativ großen statischen Belastungen standhalten muss und aktuell aufwendig im Aluminiumdruckgussverfahren gefertigt wird.



**Abbildung 47: Versuchswerkzeug SMC+Holzfurnier**

Exemplarisch sind auf (Abbildung 48) drei verschiedene Resultate dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der beim Pressen der SMC-Halbzeuge einsetzende Materialfluss quer zur Faserrichtung des Holzfurniers zu Rissen innerhalb des Furniers führen kann. Dies ist allerdings abhängig von der verwendeten Holzsorte. So traten beispielsweise bei der Holzsorte Vavona sehr starke Risse auf. Kaum Risse konnten dagegen bei Buchen- oder Koaholz festgestellt werden. Die Anbindung zwischen der Kunststoffmatrix und dem Holzfurnier kann als sehr positiv bewertet werden, so dass dieser Ansatz hohes Potenzial für weitere Anwendungen aufweist. Tiefergehende Untersuchungen waren im Rahmen der Projektlaufzeit jedoch leider nicht möglich.



**Abbildung 48: Aus SMC und Holzfurnier hergestellte Interieurabdeckungen**

## ***II.2.10 Herstellung und Test von Prototypen***

### II.2.10.1 Konstruktion eines Prototypenwerkzeugs

Die Konstruktion und Fertigung des Prototypenwerkzeugs erfolgte durch die Fa. Siebenwurst. Daher sei an dieser Stelle auf den Einzelbericht der Fa. Siebenwurst oder den Gesamtabschlussbericht verwiesen.

### II.2.10.2 Prototypenfertigung (VW)

Mit dem funktionstüchtigen Prototypenwerkzeug für das Komplex-Umformteil wurden Pressversuche im FVK-Technikum der Volkswagen Group Innovation in Wolfsburg durchgeführt. Im ersten Schritt wurden einfache, rechteckige Furnierzuschnitte verwendet. Für einen lokalen Klebstoffauftrag nur in den Bereichen, die später zum eigentlichen Bauteil verpresst werden, wurde eine Schablone der Abwicklung des Komplexumformteils mit einem Offset von 15 cm um Bauteilkontur erstellt. Diese Schablone wurde auf jedem Furnier platziert und der Bereich des Klebstoffauftrags markiert. Im zweiten Schritt erfolgte der manuelle Klebstoffauftrag mittels Zahnspachtel auf die einzelnen Furniere und die Bildung des Furnierstapels. Um das Werkzeug und insbesondere die beweglichen Teile des Werkzeugs, wie den Voreiler, vor austretendem Klebstoff zu schützen, wurde der beleimte Furnierstapel in eine dünne Kunststoffolie eingeschlagen, bevor er in das geöffnete Werkzeug eingelegt wurde. Im Anschluss erfolgte das Schließen der Presse und der Aufbau der Presskraft von 10.000 kN für eine Presszeit von 60 min bei einer Werkzeugtemperatur von 100°C. In den ersten Versuchen zeigten sich verschiedene Bereiche der Faltenbildung durch die dreidimensionale Umformung des Furniers. Als kritisch wurden dabei die Verwerfungen auf der kurzem umgeformten Seite des Bauteils eingestuft (Abbildung 49 links), da die resultierende Materialanhäufung und das Umschlagen und Überlappen der Furniere in diesem Bereich bis in die eigentliche Bauteilkontur hineinreichen. Die leichte Faltenbildung auf der langen Seite (Abbildung 49 rechts) wurde als eher unkritisch eingestuft, da diese Bereiche nach dem Besäumen des umgeformten Furnierstapels entfallen und sich die Falten nicht auf das finale Bauteil auswirken.



**Abbildung 49:** links: aus Presse entnommener Stapel in Schutzfolie mit Verwerfung auf der kurzen Bauteilseite; rechts: erstes Pressergebnis mit leichter Faltenbildung auf der langen Bauteilseite

Um den auftretenden Verwerfungen auf der kurzen Bauteilseite entgegenzuwirken, wurden in den folgenden Versuchen der Zuschnitt dahingehend angepasst, dass in diesem Bereich ein dreieckiger Einschnitt erfolgte (Abbildung 50). Die Position des Einschnitts wurde über die einzelnen Furnierlagen jeweils um einige Zentimeter variiert, um eine ausreichende Überlappung der Furnierlagen sicherzustellen und das Bauteil in diesem Bereich nicht zu schwächen.

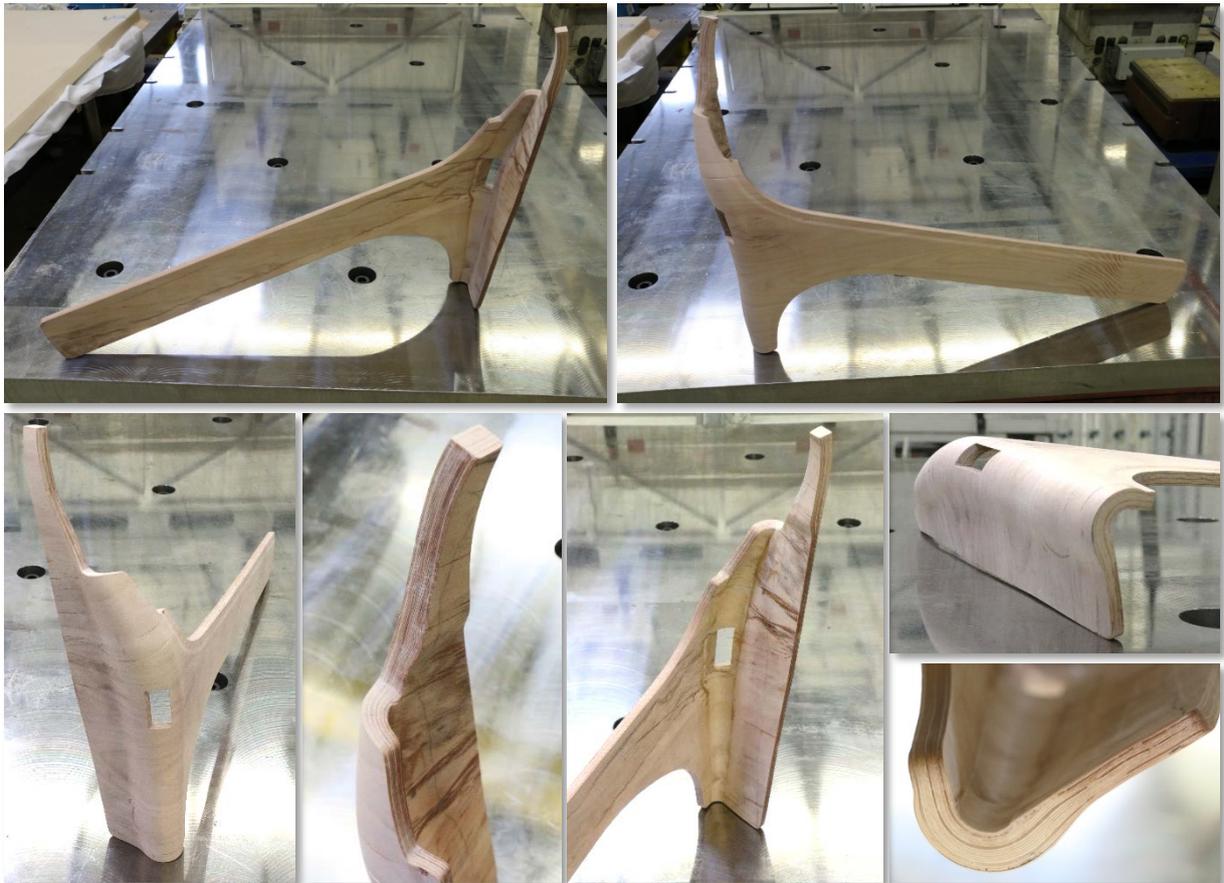


**Abbildung 50:** Beleimte Furnierlage mit dreieckigem Einschnitt im Bereich der Verwerfung auf der kurzen Bauteilseite

In den anschließenden Fertigungsversuchen wurden Prozessparameter wie die genaue Form des Zuschnitts, die Klebstoffmenge auf den einzelnen Furnierlagen sowie die Werkzeugtemperatur und -schließgeschwindigkeit weiter optimiert. Die gefertigten Presslinge (Abbildung 51) wurden manuell besäumt und die notwendigen Aussparungen / Bohrungen etc. entsprechend des CAD-Modells eingebracht (Abbildung 52).



**Abbildung 51: entformter Pressling, noch nicht besäumt**



**Abbildung 52: besäumtes Bauteil mit Rechteckausschnitt für Balken und Zugband**

Die weiteren Einzelteile der funktionsintegrierten, holzbasierten Baugruppe wurden Parallel hergestellt. So wurden z.B. im Vorfeld auf einem bereits bei Volkswagen vorhandenen Plattenwerkzeug Lagenverbundholzplatten gefertigt, aus denen durch Längssägeschnitte die Balken mit ihrem trapezförmigen Querschnitt unterhalb des Stahlzugbandes getrennt wurden. Das Stahlzugband selbst wurde in den benötigten Endabmessungen vom Projektpartner SZMF zur Verfügung gestellt und manuell entsprechend der Geometrie des CAD-Modells umgeformt. Die Akustikdämmplatten wurden durch das tff der Uni Kassel gefertigt und bereitgestellt.

Des Weiteren wurde das Crashrohr dem Baugruppenkonzept entsprechend modifiziert und mit einem Stopfen aus Furnierschichtholz versehen, um es mit dem komplexe Umformteil im weiteren Verlauf über eine Verschraubung verbinden zu können (Abbildung 53).

Im nächsten Schritt wurde die Baugruppe des holzbasierten funktionsintegrierten Türaufprallträgers erstellt. Hierfür wurde zunächst der Holzbalken auf das komplexe Umformteil geklebt. Anschließend wurden Metallbuchsen für die Verschraubung mit dem Türinnenblech auf Höhe der B-Säule eingebracht und das Stahlzugband auf dem Holzbalken verklebt (Abbildung 54).



**Abbildung 53: Modifiziertes Crashrohr mit Holzstopfen**



**Abbildung 54: Baugruppe des holzbasierten funktionsintegrierten Türinnenteils (Akustikdämmplatten noch nicht verklebt)**

Die gesamte Baugruppe wurde dem Volkswagen-Versuchsbau übergeben, um ihn gemäß den Vorgaben der Serienfertigung (Schweißpunkte, Umfaltung des Türaußenblechs, etc.) mit den Rohbauteilen der Serientür zu fügen. Die so hergestellten Rohbautüren stellen die prüffähigen Prototypenbauteile für die Versuche auf der Crashanlage des DLR dar. Zusätzlich wurde zu Demonstrationszwecken ein Türrohbau ohne Türaußenblech gefertigt (Abbildung 55).



**Abbildung 55: Türrohbau mit holzbasiertem funktionsintegriertem Türinnenteil (ohne Türäußenblech)**

### II.2.10.3 Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

Die Durchführung der experimentellen Untersuchungen oblag dem DLR. Daher sei an dieser Stelle auf den Einzelbericht des DLR oder den Gesamtabschlussbericht verwiesen.

### ***II.2.11 Entwicklung einer möglichen Serienfertigungsprozesskette***

Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket erfolgten durch die Fa. Roitech. Daher sei an dieser Stelle auf den Einzelbericht der Fa. Roitech oder den Gesamtabschlussbericht verwiesen.

## **II.3 Technologiebewertung (AP13)**

### ***II.3.1 Ökologische Bewertung***

Im Rahmen des Arbeitspakets der Technologiebewertung wurden die klimarelevanten Auswirkungen bei einer Substitution der Serienbauteile durch das neue holzbasierte Konzept evaluiert. Hierzu wurde ein LCA(Life Cycle Assessment)-Screening durchgeführt, mit dem sich der Serienstand direkt mit dem neuen Konzept vergleichen lässt. Als maßgebliche Größe zur Auswertung wurde das Erderwärmungspotenzial (Global Warming Potential, GWP) in Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (kg CO<sub>2</sub>-eq) herangezogen. Als Fragestellungen sollten insbesondere geklärt werden:

1. Wie wirkt sich selbst ein schwereres Bauteil aus Holz über den gesamten Lebenszyklus aus (worst-case Szenario)?
2. Werden die ökologischen Vorteile, die der Werkstoff Holz mit sich bringt, durch den Einsatz von relativ viel Klebstoff wieder (über-)kompensiert?

Um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Fahrzeugtypen sicherzustellen wurden verschiedene Antriebskonzepte, also Verbrennungsmotoren mit Benzin- und Dieselmotoren sowie Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) mit verschiedenen Strommixes betrachtet. Des Weiteren wurden die Auswirkungen hinsichtlich einer Verbrauchsänderung in der Fahrzeugnutzungsphase als Resultat der Gewichtsänderung durch einen gemittelten Faktor (Fuel Reduction Value, FRV) unabhängig von einem spezifischen Fahrzeug ermittelt. Für die Nutzungsphase wird eine Laufleistung von 200.000 km festgelegt. Das Vorgehen und die Datenerhebung wurden Volkswagen-intern durch die Abteilung „Life Cycle Optimierung“ (K-AETU-2) unterstützt. Die für das LCA-Screening verwendeten Daten wurden die Quellen [1] [2] [3] [4] verwendet.

Im ersten Schritt wurden die Massenanteile der verschiedenen Werkstoffe für die Serienbaugruppe und das neue, holzbasierte Konzept ermittelt und das Erderwärmungspotenzial pro kg des entsprechenden Materials ermittelt. Aus den zur Verfügung stehenden Werten für Holzwerkstoffe wurde der Klebstoff herausgerechnet und separat aufgeschlüsselt. Des Weiteren wurde für das verwendete Holz furnier und den zur Holz-Holz-Verbindung verwendeten Klebstoff der Massenanteil an Kohlenstoff ermittelt, um das bei einer energetischen Verwertung am Ende des Lebenszyklus (ebenfalls Worst-Case-Szenario im Vergleich zu einer Werkstoffwiederverwendung) durch Rekombination mit atmosphärischem Sauerstoff entstehende und wieder freigesetzte CO<sub>2</sub> berechnen zu können.

Im zweiten Schritt wurden die Erderwärmungspotenziale pro kg Material mit den entsprechend in den Baugruppen verwendeten Massen multipliziert, um die Emissionen bis zum Zeitpunkt der Fahrzeugherstellung (Cradle-to-Gate, CtG) vergleichen zu können (Abbildung 56). In den Ergebnissen zeigen sich deutlich die ökologischen Vorteile des Werkstoffs Holz, da die CO<sub>2</sub>-Speicherwirkung im Vergleich zur Serienbaugruppe zu einer Reduktion des Erderwärmungspotenzials um 10,568 kg CO<sub>2</sub>eq pro Tür führt. Die ökologischen Vorteile des Werkstoffs Holz werden somit nicht durch die verwendeten Klebstoffe überkompensiert.

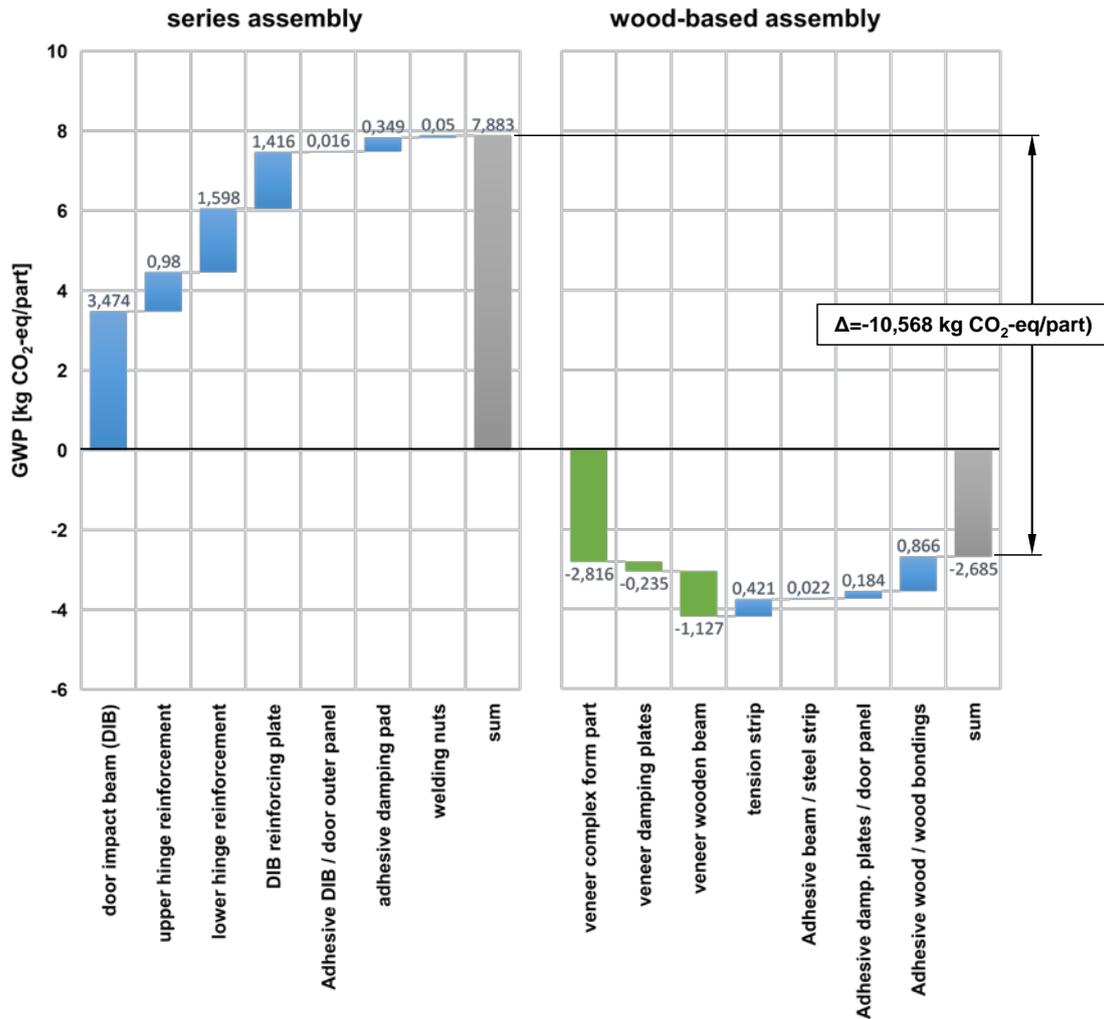


Abbildung 56: Cradle-to-Gate (CtG) Emissionen der verwendeten Werkstofffraktionen innerhalb der Baugruppen, links: Serienbaugruppe aus Stahl mit Bitumen-Dämmmatten, rechts: funktionsintegriertes, holzbasiertes Türinnenteil

Im dritten Schritt wurden die Auswirkungen der Gewichtsänderung auf die während der Nutzungsphase erzeugten Emissionen bewertet. Hierzu wurde die antriebspezifische Änderung des Kraftstoff-, bzw. Energieverbrauchs über eine Laufleistung von 200.000 km ermittelt (Abbildung 57). Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass besonders bei den Antriebskonzepten mit klassischem Verbrennungsmotor das Mehrgewicht von 0,462 kg zu höheren Emissionen führt. Wie eingangs erwähnt wurde allerdings für die Betrachtung ein Konstruktionsstand mit diesem Mehrgewicht verwendet, um ein Worst-Case-Szenario abzubilden. Als Fazit lässt sich jedoch festhalten, dass auch bei der Verwendung von sehr nachhaltigen Werkstoffen der Leichtbau als Strategie zum Klimaschutz weiterhin eine wichtige Rolle spielen muss.

### Use phase (Tank to wheel)

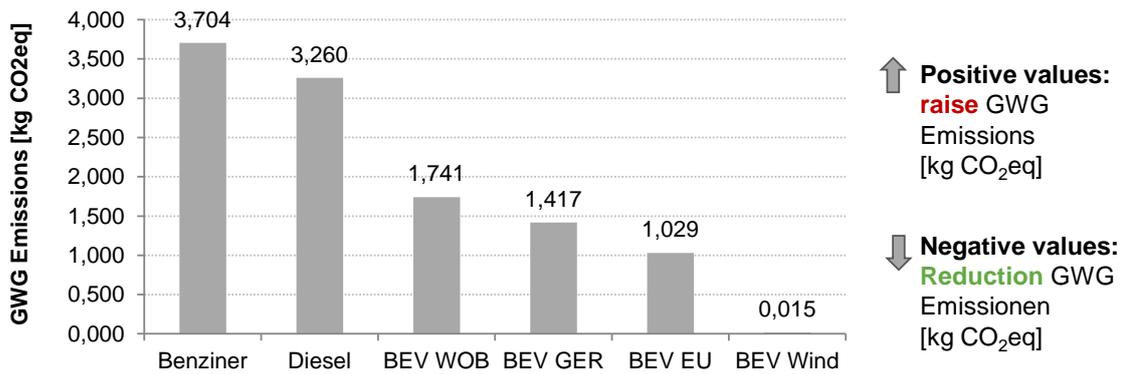


Abbildung 57: Änderung der Tank-to-Wheel (TtW) Emissionen durch das höhere Gewicht der holzbasierten Baugruppe

Im letzten Schritt wurden die Daten der Herstellungs- und Nutzungsphase mit der Annahme einer energetischen Verwertung der Holzkomponenten am Ende des Lebenszyklus zusammengefasst, um die Änderungen der Treibhausgasemissionen durch das holzbasierte Konzept über den gesamten Lebenszyklus zu ermitteln. Die Ergebnisse zeigen, dass das holzbasierte Konzept selbst unter sämtlichen getroffenen Worst-Case-Annahmen (höheres Gewicht, kein Second Life der Holzkomponenten, kleinsten Wert für das GWP der Bitumenmatten) sogar bei einem Fahrzeug mit Benzinmotor zu geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Lebenszyklus führt (Abbildung 58).

### Over complete Life Cycle

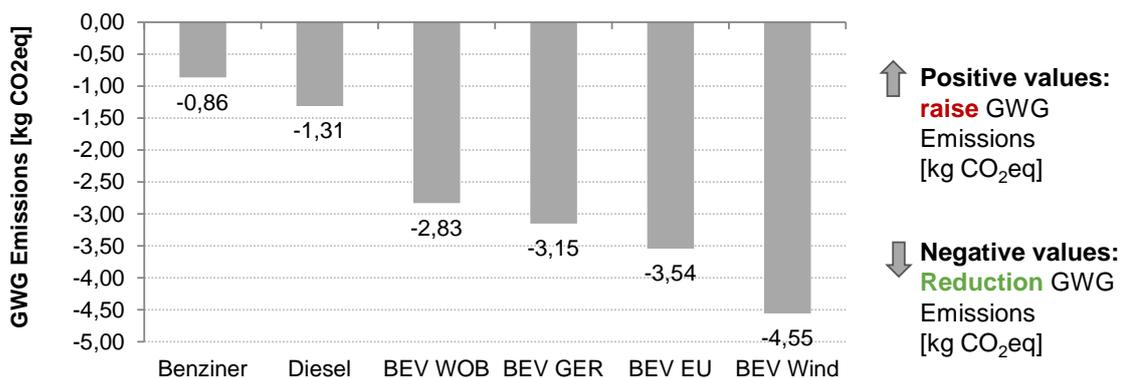


Abbildung 58: Änderung der Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus

### **II.3.2 Kostenbewertung**

Basierend auf dem im Projekt entwickelten funktionsintegrierten Türaufprallträger für das Volkswagenmodell Tiguan wurde eine erste, vorausschauende Kostenanalyse erstellt. Da eine präzise, marktreife Kostenanalyse u.a. erst nach Abschluss aller Entwicklungstätigkeiten, finaler Produktionskapazitätsplanungen sowie finalen Preis- und Lieferkonditionsverhandlungen erfolgen kann, soll die Analyse im Rahmen des Forschungsprojekts eine grundsätzliche Vorausschau geben. Daher basiert diese Analyse neben dem Bauteil selbst, auf

- den Planungsergebnissen des Projektpartners Rohtech (siehe Kapitel II.2.11),
- den praktischen Erfahrungen aus der Erstellung des Demonstrators im Labormaßstab,
- den potenziellen Stückzahlen bei Ausrüstung aller Modellfahrzeuge sowie
- öffentlich zugänglichen Listenpreisen bzw. Richtpreisen für Rohstoffe.

Durch die Berechnungsmethodik wurden schwerpunktmäßig die Material- sowie Fertigungskosten analysiert, erfasst und bewertet. Die Entwicklung einer möglichen Serienprozesskette durch Fa. Rohtech hat als limitierenden Faktor die Presszeit von min. 300 s ergeben, wodurch die Fertigung mit einer einzigen Anlage auf die Größenordnung von ca. 50.000 Stück/a begrenzt wird. Die entsprechenden Mengenansätze wurden für eine Stückzahl von 560.000 Türen/ Jahr (280.000 Autos) hochskaliert, um beim Referenzfahrzeug zu bleiben zu können. Zunächst nicht berücksichtigt wurden Overheadkosten und sonstige Umlagen wie Verwaltungs- und Vertriebsgemeinkosten oder Gewinn bzw. Deckungsbeiträge.

Die Ermittlung erfolgte über 4 Blöcke, analog zum Vorgehen der Fa. Rohtech (siehe Kapitel II.2.11):

- Herstellung des funktionsintegrierten Komplextteils
- Herstellung des Balkens
- Herstellung der Entdröhnplatten
- Assemblierung zum Zusammenbauteil

Block 1, die Herstellung des Komplextteils, umfasst im Bereich des Materialeinsatzes die auf Bruttomaß zugeschnittenen Furniere, den zur Furnierverklebung verwendeten Klebstoff sowie die im Komplextteil einzubauenden zwei Gewindebuchsen. Die Fertigung des Teils setzt sich zusammen aus dem Klebstoffauftrag auf die Furniere mittels Roboter sowie parallelem Stapeln der benetzten Furniere durch einen weiteren Roboter, dem kombiniertem Press-Umform-Aushärteprozess in einem entsprechenden Werkzeug, der 3D-Fräsbearbeitung des gepressten Teils in einem CNC-Fräszentrum sowie dem manuellen Einbringen der beiden Gewindebuchsen.

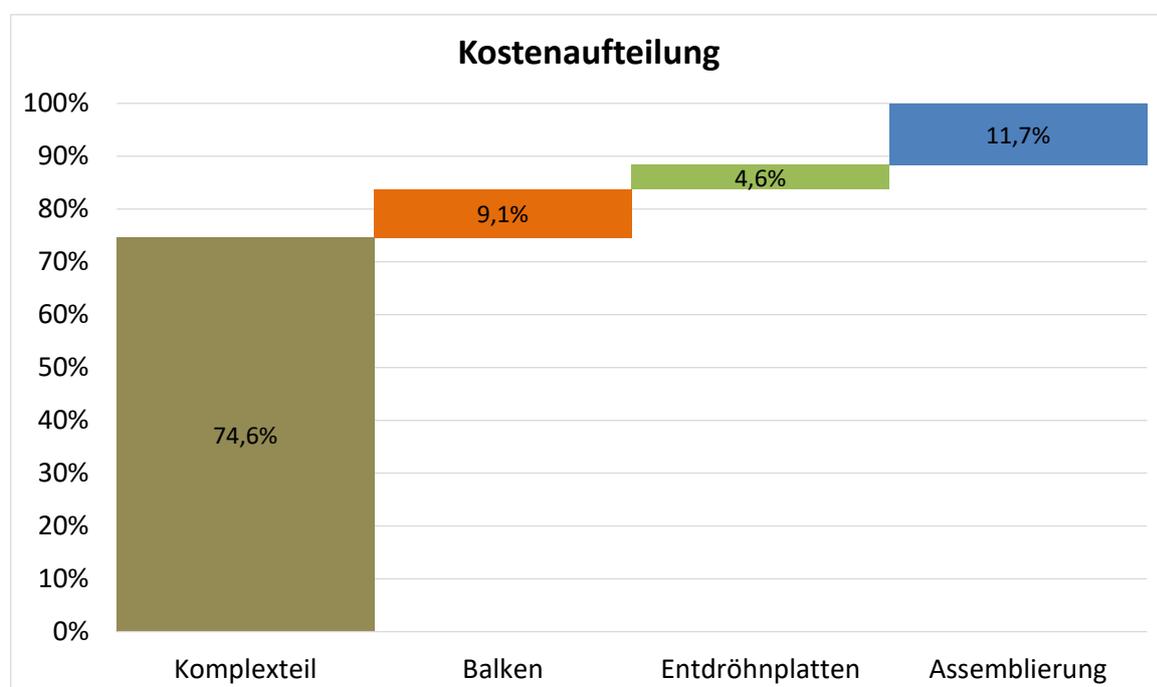
Block 2, die Herstellung des Balkens, beinhaltet als Rohmaterial eine zugekaufte 22 mm starke Furnierschichtholzplatte. Im Vergleich zur Demonstratorerstellung im Projekt, wird der Zukauf

einer ebenen Platte für eine Serienfertigung als wirtschaftlicher erachtet, als die Eigenfertigung aus Furnieren und Klebstoff. Beim Zukauf des Plattenwerkstoff muss auf die Erfüllung aller Spezifikationen geachtet werden. Die Fertigungsumfänge zur Erstellung des Balkens umfassen die Holzbearbeitung (Zuschnitt und Bohrungen) mittels CNC-Portal-Bearbeitungszentrum sowie die manuelle Einbringung der weiteren beiden Buchsen, analog zu Block 1.

Block 3, Herstellung der Entdröhnplatten, umfasst jeweils 1 Set, bestehend aus einer großen und einer kleineren Platte. Der Materialeinsatz hierfür besteht aus zugekauftem (Intention analog zur Herstellung des Balkens) 3 mm Sperrholz entsprechend der Spezifikationen. Als Fertigungsschritt wird hier der Zuschnitt per CNC-Portal-Bearbeitungszentrum eingeplant.

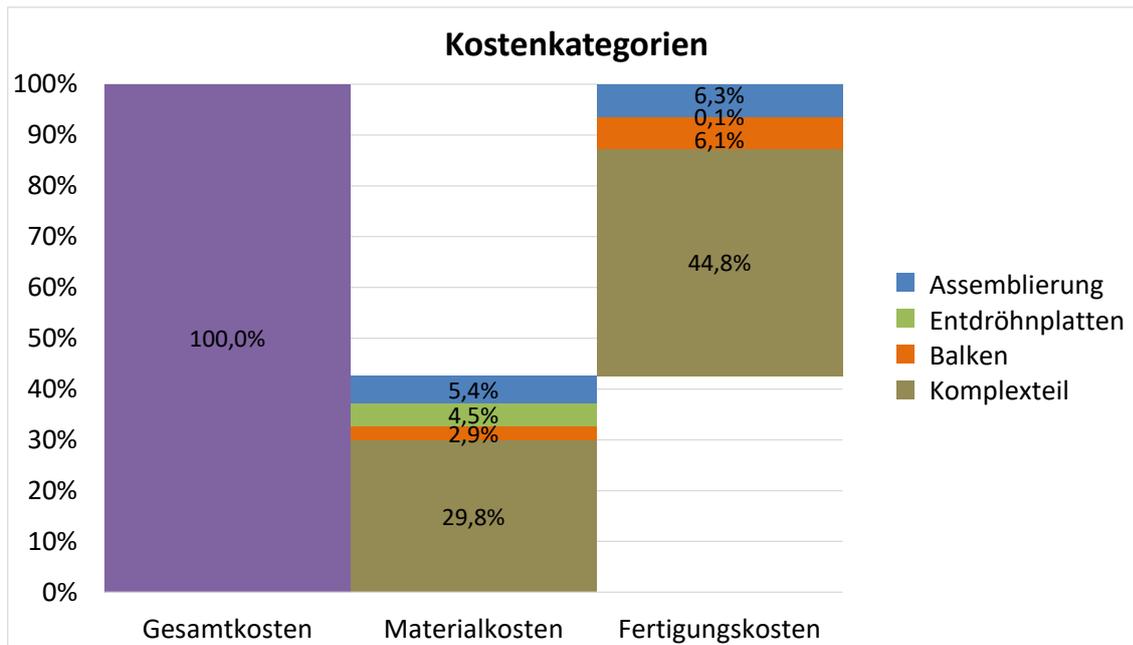
Block 4 umfasst abschließend alle zusätzlichen Materialien und Tätigkeiten zur Erstellung eines Zusammenbauteils aus den Elementen der Blöcke 1 bis 3. Materialeitig wird hierfür zunächst das Stahl-Zugband benötigt, welches als beschichtetes und gestanztes (Kontur und Geometrie) Zukaufteil beschafft wird. Zusätzlich werden Klebstoffe zur Verklebung von Balken und Zugband, zur Verklebung von Balken und Komplextteil sowie zur Verklebung der Entdröhnplatten auf dem Komplextteil eingesetzt. Entsprechend umfassen die Fertigungsschritte den Klebstoffauftrag mittels Roboter, die Fügeoperationen, ebenfalls mittels Roboter sowie den Gesamt-Press-Aushärte-Prozess.

Abbildung 59 zeigt die prozentuale Zusammensetzung der prognostizierten Gesamtkosten durch die vier Blöcke.



**Abbildung 59: Kostenaufteilung zwischen den Bauelementen/-phasen**

Es wird deutlich, dass die Herstellung des Komplextteils mit fast 75% Gesamtkostenanteil den mit Abstand größte Kostentreiber darstellt. Sowohl Balken als auch Entdröhnplatten machen jeweils einen signifikant geringeren Anteil aus, was insbesondere auch auf den oben genannten Zukauf von Halbzeugen zurückzuführen ist. Die Assemblierung aller Elemente kann, trotz diverser Prozessschritte und Materialbedarfe, effektiv und synergetisch durchgeführt werden. Abbildung 60 zeigt die Zusammensetzung der Gesamtkosten über Material- und Fertigungskostenanteile der jeweiligen Blöcke.



**Abbildung 60: Aufteilung Gesamtkosten in Kostenkategorien je Bauelement/-phase.**

Auch in dieser Darstellung wird deutlich, dass die Herstellung des Komplextteils den größten Kostenanteil verursacht. Insbesondere die Fertigungskosten des komplexen Grundbauteils machen knapp 45% der Gesamtkosten aus. Hinzu kommen die Kosten für die Rohmaterialien, welche sich zu knapp 60% auf den Klebstoff und zu ca. 40% auf die eingesetzten, hochwertigen Holzurniere beziehen. Hierbei ist jedoch zu bemerken, dass insbesondere die preisliche Kalkulation entsprechender Mengen hochwertiger Holzurniere sehr diffizil ist. Aktuell ist den Projektarbeitern kein Bereich bekannt, aus dem man, im Sinne eines best-practice Ansatzes, mengenskalierte Preise für den Bezug von Furnieren in der Menge bei gleichzeitig hoher Qualität ableiten kann.

Hinsichtlich aktuell benennbarer Optimierungspotenziale liegt der Fokus klar auf dem umgeformten, partiell verdichteten Komplextteil, dessen Herstellung aus aktueller Sicht ca. 75% der Gesamtkosten ausmacht. Hierbei müssen zunächst die Materialkosten betrachtet werden: Einerseits müssen, wie oben benannt, großserienfähige Bezugspreise ermittelt bzw. verhandelt

werden. Nur dadurch kann gewährleistet werden, dass bereits beim Basiswerkstoff ein Kostenlevel erreicht wird, welches mit potenziellen Substitutionsmaterialien (Stahl, Aluminium, FVK) konkurrieren kann. Weiterhin wird großes Potenzial in der Wahl des, nicht nur technisch, sondern auch preislich für die Serienfertigung fähigen Klebstoffs gesehen. Hier wurde im Projekt, bedingt durch die vielfältigen, anspruchsvollen technischen Anforderungen, der Fokus auf die technisch-mechanische Performance gelegt, um die grundsätzliche Machbarkeit aufzuzeigen. Abschließend sei bemerkt, dass sich die großserienfähige Fertigung von Holzformteilen grundsätzlich generisch weiterentwickeln muss, um mit den über Jahrzehnte etablierten und hochentwickelten Fertigungsprozessen im Bereich der Metalle aufschließen zu können. Diese Entwicklungsbedarfe können analog zu den intensiven Bemühungen bezüglich der Serienfertigung von FVK-Bauteilen betrachtet werden.

### II.3.3 Ermittlung weiterer zukünftiger Einsatz- und Gewichtseinsparpotenziale

Neben den vorgestellten Arbeiten zum Türinnenmodul wurde nach weiteren potenziellen Bauteilen für eine Holz(-Hybrid)bauweise gesucht, bei denen weniger die Funktionsintegration als der reine Leichtbau im Fokus steht. Als Bauteil zur Abschätzung des Leichtbau- und Weiterentwicklungspotenzials wurde das in der Türbrüstung befindliche Crashrohr des Golf VII (Abbildung 61, links) identifiziert und im Rahmen einer Masterarbeit näher betrachtet. Als maßgebliche Lastfälle wurden die axiale Druckbeanspruchung, entsprechend der Bauteilbelastung im Small-Overlap-Crash und die Dreipunktbiegung entsprechend des Pfahlaufpralls, ausgewählt (Abbildung 61, rechts). Das aktuelle Serienbauteil weist dabei eine Wandstärke von 2,5 mm und ein Gewicht von 1,96 kg auf.

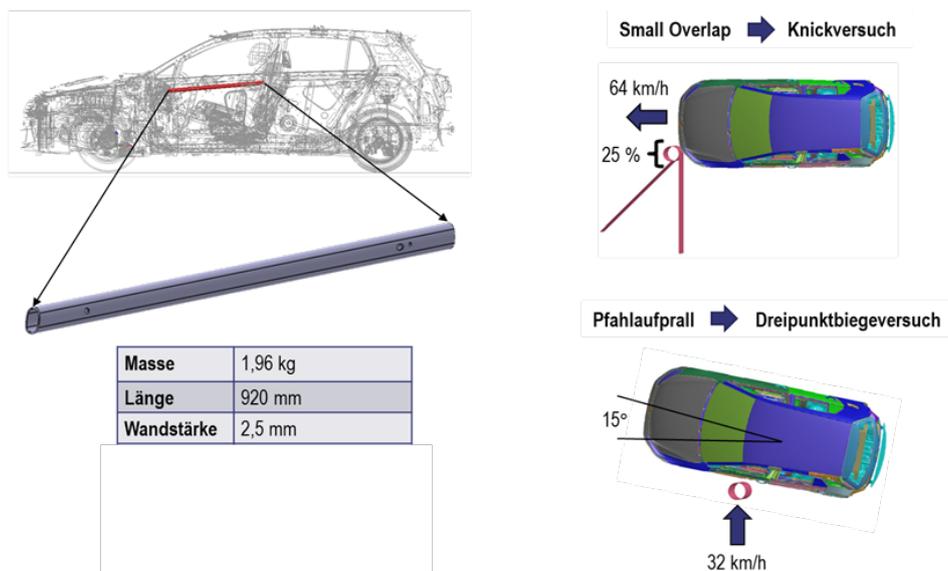
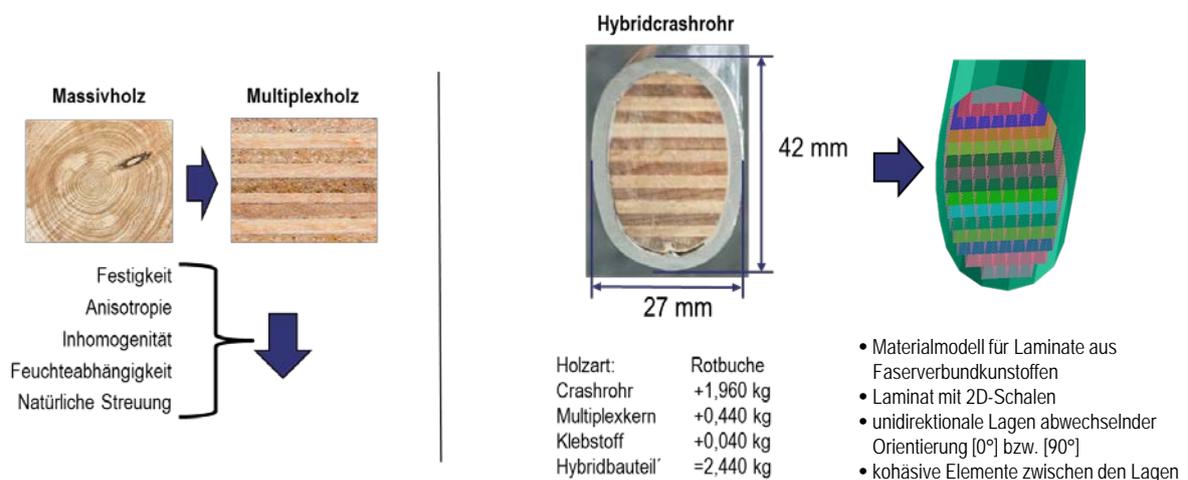


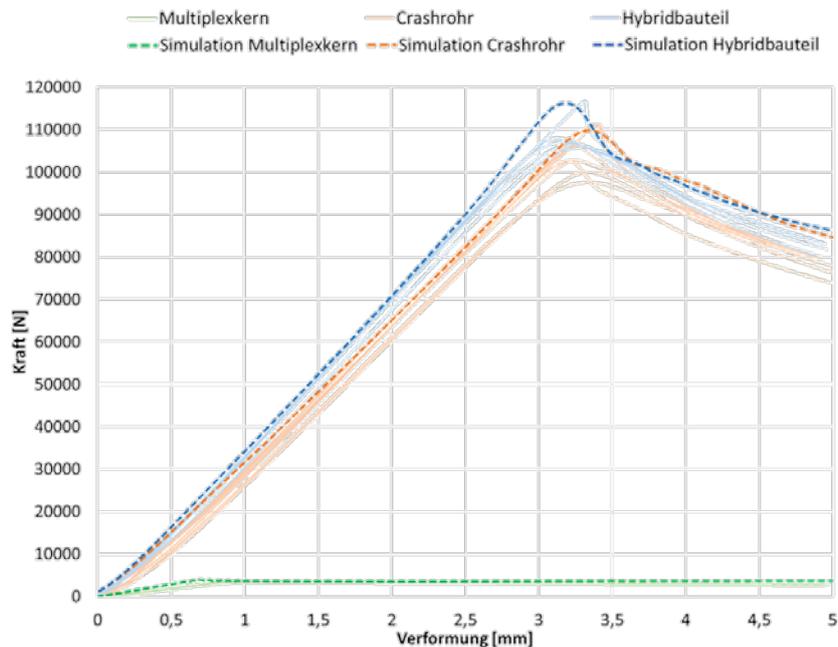
Abbildung 61: links: Crashrohr in der Fahrzeugstruktur, rechts: betrachtete Lastfälle

Das neue Bauteilkonzept (Abbildung 62) sieht einen Kern aus Holz innerhalb des Crashrohres vor, der das Einknicken des Querschnittes aufgrund seiner Druckstabilität verhindern, und damit für eine höhere Deformation und Energieaufnahme des umgebenden Stahlblechs sorgen soll. In der Folge könnte die Wandstärke des Stahlblechs reduziert und so eine Reduzierung des Bauteilgesamtgewichts erzielt werden. Dieser Holzkern könnte prinzipiell aus Massivholz oder anderen Holzwerkstoffen bestehen. Dabei ist zu beachten, dass mit zunehmender Aufschlüsselung des Werkstoffs Holz zwar in der Regel die absolute Festigkeit sinkt, dafür aber auch die Streuung der Werkstoffeigenschaften und deren Abhängigkeit von der Feuchtigkeit reduziert werden. Im Falle des Crashrohres wurde daher als Werkstoff für den Kern ein Buchenschichtholz (Buchenmultiplex) gewählt. Des Weiteren können hierdurch die im Projekt For(s)tschritt bereits erstellten Modellierungsansätze und Materialkarten auch für dieses Bauteil verwendet werden.



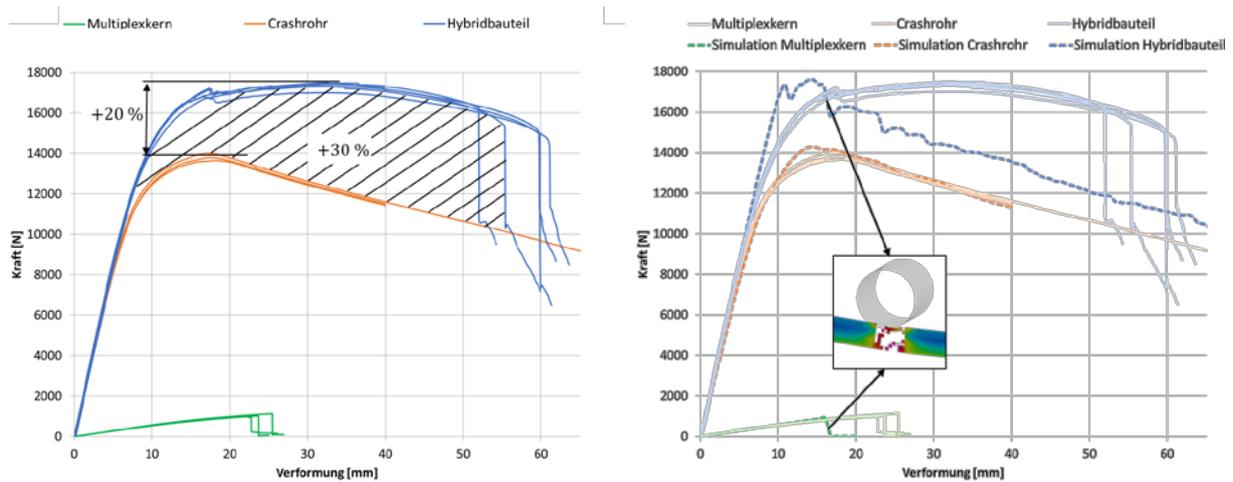
**Abbildung 62: Konzept des Stahl/Holz-Hybridcrashrohrs**

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden Bauteilaufnahmen für eine mechanische Prüfmaschine gefertigt, mit denen das Stahlcrashrohr als Referenz sowie der reine Holzkern und das Stahl/Holz-Hybridcrashrohr auf Knick- und Dreipunktbiegebeanspruchung getestet werden konnten. Die Ergebnisse für die Knickbeanspruchung (Abbildung 63) zeigen eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment, wobei durch den Holzkern eine Erhöhung der maximalen Kraft von ca. 5 bis 6 % erzielt wird. Des Weiteren verfügt das Hybridbauteil bedingt durch den Holzkern über eine höhere Steifigkeit im linear-elastischen Bereich. In Bezug auf die Gesamtenergieaufnahme und das Mehrgewicht durch den Holzkern sind die Unterschiede zwischen dem reinen Stahlrohr und dem Hybridbauteil jedoch relativ gering.



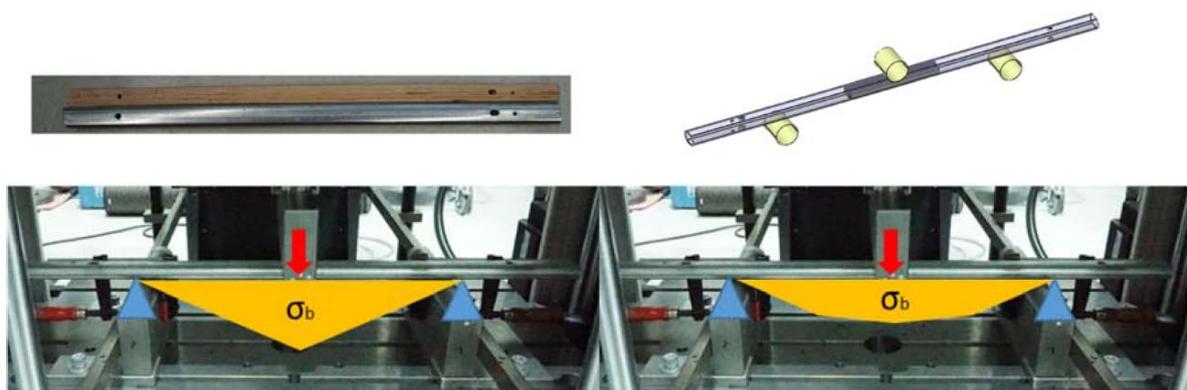
**Abbildung 63: Ergebnisse bei Knickbeanspruchung**

Die experimentellen Ergebnisse bei Dreipunktbiegung zeigen im Gegensatz zum Knicklastfall eine deutlich stärkere Erhöhung bei der maximalen Kraft (um ca. 20 % von 14 kN auf 17 kN) sowie bei der Energieaufnahme (um ca. 30 %; Abbildung 64, links). Der Vergleich mit den Simulationsergebnissen offenbart dagegen deutliche Abweichungen beim Hybridcrashrohr (Abbildung 64, rechts). In der Simulation tritt ein deutlich früheres Versagen mit einem stärkeren Abfallen der Kraftkurve nach Erreichen der Maximalkraft auf. Dies ist auf das verwendete Materialmodell zur Abbildung des Holzkerns zurückzuführen, welches beim Versagen eine Löschung von Elementen vornimmt. Diese Elementlöschung im Bereich der Knickstelle führt dazu, dass sich der Querschnitt des Stahlrohres einengen kann und die geometrische Steifigkeit abnimmt. In der Realität verbleibt das Holz natürlich auch nach lokalem Versagen der Fasern im Stahlrohr und verhindert das Einknicken des Stahlrohres.



**Abbildung 64: Ergebnisse bei Dreipunktbiegung**

Als Zwischenfazit aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen lässt sich festhalten, dass die Hybridisierung des Crashrohrs mit einem Holzkern im Lastfall der Dreipunktbiegung zu einer deutlich größeren Performancesteigerung führt als beim reinen Knicklastfall. Um weiteres Gewichtseinsparpotenzial zu identifizieren, wurde ein weiterer Ansatz untersucht, bei dem das Crashrohr lediglich in der Mitte durch einen Holzkern verstärkt wurde, um eine Verteilung der Biegespannung über die Rohrlänge zu erzielen (Abbildung 65). Hierzu wurde die Länge des eingebrachten Kerns von 920 mm, was der vollen Länge des Crashrohrs entspricht, auf 200 mm verkürzt. Die Holzverstärkung bringt somit nur lediglich Gewichtszunahme von 96 g anstatt von 480 g mit sich.

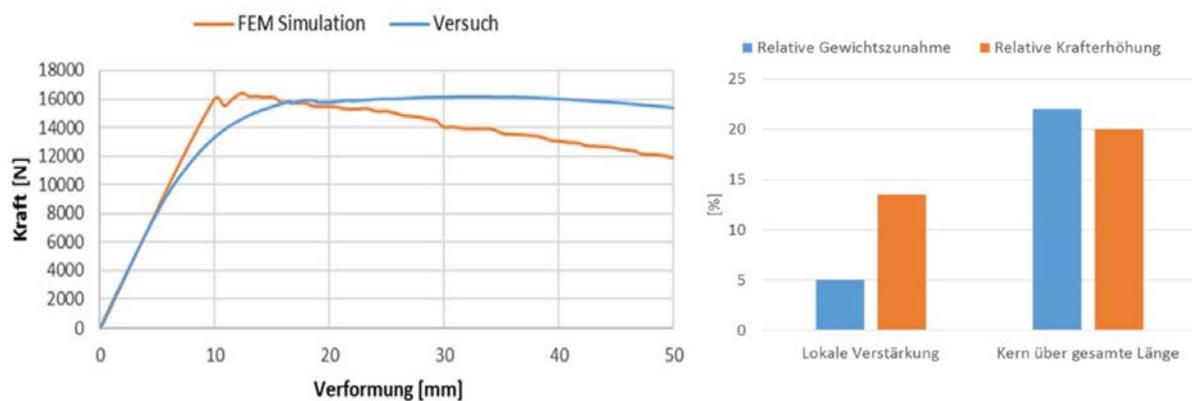


- Kern auf voller Länge (920 mm)
- Gewicht 480 g (inkl. Klebstoff)

- Kernabschnitt 200 mm
- Gewicht 96 g

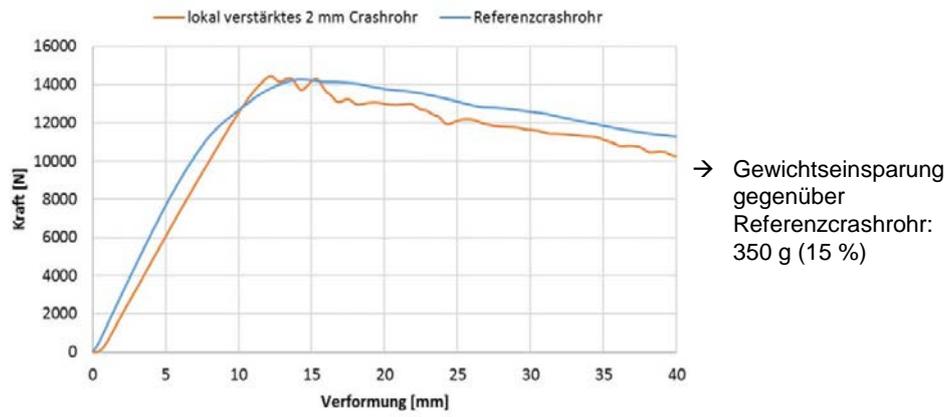
**Abbildung 65: Konzept des lokal verstärkten Stahl/Holz-Hybridcrashrohrs**

Das lokal verstärkte Crashrohr wurde im Anschluss einer Dreipunktbiegeprüfung unterzogen. Wie auch schon beim Hybridrohr mit Holzkern über die gesamte Rohrlänge zeigen sich deutliche Abweichungen zwischen Simulation und Experiment (Abbildung 66, links), welche auf die oben beschriebene Löschung von Elementen beim gewählten Modellierungsansatz zurückführen lassen. Sowohl Versuch als auch Simulation ergaben eine maximale Kraft von 16 kN, was im Vergleich zum reinen Stahlcrashrohr mit 14 kN einer Erhöhung um 14 % entspricht. Somit übersteigt bei diesem Ansatz die relative Krafterhöhung die relative Gewichtszunahme von 5 % deutlich (Abbildung 66, rechts). Beim Holzkern über die gesamte Rohrlänge konnte dagegen zwar eine Krafterhöhung von 20 % erzielt werden, dafür betrug die relative Gewichtszunahme 22 %.



**Abbildung 66: Simulations- und Versuchsergebnisse mit lokal verstärktem Hybridcrashrohr bei Dreipunktbiegung**

In einem weiteren Schritt wurde in der Simulation die Wandstärke des Stahlcrashrohrs auf 2 mm reduziert, um eine Gewichtsreduzierung bei gleicher Lastaufnahme von 14 kN Maximalkraft wie mit dem Serienbauteil zu erzielen. Diese Reduzierung der Wandstärke führt zu einer Gewichtsersparnis des lokal verstärkten Crashrohrs im Vergleich zur Serienvariante von 350 g, was ca. 15 % entspricht. Eine experimentelle Validierung dieser Simulationsergebnisse konnte im Rahmen der Masterarbeit leider nicht mehr erfolgen, da hierfür neue Crashrohre mit der verringerten Wandstärke angefertigt werden müssten. Allerdings haben die vorangegangenen Ergebnisse gezeigt, dass sich trotz des Modellierungsansatzes mit Elementlöschung stets eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Maximalkraft ergeben hat. Die im Forschungsantrag als Zielstellung genannte Gewichtsreduzierung von ca. 15 % für lasttragende Bauteile konnte somit zwar nicht für das funktionsintegrierte Türinnenmodul erfüllt werden, jedoch zeigen die Ergebnisse, dass sich dieses Ziel mit Holz in Hybridbauweise durchaus erreichen lässt.



**Abbildung 67:** Ergebnisse bei Dreipunktbiegung und lokal verstärktem Hybridcrashrohr mit reduzierter Wandstärke

### III. Zusammenfassung der Projektergebnisse und Fazit zur Zielerreichung

Im vorliegenden Teilprojekt des Verbundvorhabens For(s)tschritt wurden innovative Ansätze für den Einsatz von Holz als ökologisch nachhaltigen Werkstoff in Multimaterialsystemen für tragende Anwendungen in Straßenfahrzeugen entwickelt. Entsprechend des im Antrag formulierten Ziels wurden sowohl großflächige strukturelle Baugruppen als auch lokale Verstärkungen mit holzbasierten Multimaterialsystemen betrachtet. Ausgehend von den konstruktiven Konzepten wurden auch die Grundlagen für eine Abbildung der relevanten Lastfälle mittels der Finite-Elemente-Methode hinsichtlich eines Materialmodells und einer Materialkarte geschaffen sowie zahlreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

Im Bezug auf das Leichtbaupotenzial wurde für das konkret erarbeitete funktionsintegrierte Türinnenteil dem Aspekt der Funktionsintegration der Vorrang gegenüber der reinen Gewichtersparnis eingeräumt. Hierdurch wurde diese Baugruppe am Projektende etwas schwerer als der Serienstand ist (allerdings mit dem Potenzial eine Gewichtsneutralität zu erreichen), dafür wurde anhand eines anderen möglichen Anwendungsbeispiels für ein holzbasiertes Multimaterialsystem, dem Crashrohr in der Türbrüstung, ein Gewichtseinsparpotential von ca. 15 % nachgewiesen.

Für eine serientechnische Umsetzung stellen die Aushärtezeiten der verwendeten Klebstoffe, deren Materialkosten und die mit der Verwendung bei hohen Stückzahlen notwendige Anlagentechnik die größte Herausforderung dar, wenn Bauteile mit anspruchsvollen Geometrien durch Pressvorgänge wirtschaftlich gefertigt werden sollen.

In Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit sind die anhand der PKW-Tür gewonnenen Erkenntnisse als positiv zu bewerten. Beim durchgeführten LCA-Screening konnte gezeigt werden, dass selbst unter verschiedenen Worst-Case-Annahmen, wie beispielweise einem etwas höheren Bauteilgewicht, die CO<sub>2</sub>-Vorteile des Werkstoffs Holz über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zur reinen Stahlbaugruppe überwiegen.

#### Fazit zur Zielerreichung:

Die im Vorfeld formulierten Größenordnungen der Gewichtsreduzierungen wurden nicht ganz erreicht, da die Gewichtersparnis bei den Demonstratorbauteilen zugunsten der Funktionsintegration etwas in den Hintergrund rückte. Bei alleiniger Fokussierung auf die Gewichtseinsparung sind die angestrebten Werte jedoch realisierbar. Besonders positiv ist das Ergebnis der LCA hervorzuheben. Selbst unter Worst-Case-Annahmen kann mit dem hybriden Metall-Holz-Verbunden CO<sub>2</sub> eingespart werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Sphera, *GaBi Database for Life Cycle Engineering, Version 9.2, Servicepack 40*, Leinfelden-Echterdingen, 1992-2020.
- [2] S. Rüter und S. Diederichs, *Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz, Abschlussbericht*, 2012.
- [3] Wecobis, [Online]. Available: <https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/grundstoffegs/kunststoffe-gs/polyurethan-gs.html>. [Zugriff am 16 04 2020].
- [4] S. Diestel und H. Weimar, „Der Kohlenstoffgehalt in Holz- und Papierprodukten - Herleitung und Umrechnungsfaktoren; Thünen Working Paper 38,“ Thünen-Institut, 2014. [Online]. Available: [https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper\\_38.pdf](https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_38.pdf). [Zugriff am 16 04 2020].

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN <b>geplant.</b>	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>
3. Titel Verbundprojekt: Strukturbaugruppen auf Basis nachhaltiger holzbasierter Materialsysteme zur Reduzierung von Masse und Umweltauswirkungen im Straßen- und Schienenfahrzeugbau (For(s)tschritt) Teilvorhaben: Projektleitung, Konstruktion, Auslegung und Entwicklung eines Bauteils für automobiler Serienanwendung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Dr. Große, Thomas Dr. Fischer, Fabian Kohl, Daniel	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>31.08.2020</b>
	6. Veröffentlichungsdatum <b>geplant</b>
	7. Form der Publikation <b>Schlussbericht</b>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <b>VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT</b> <b>38436 Wolfsburg</b> <b>Abt. K-AERB/P (ehemals K-GERW/P)</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution  10. Förderkennzeichen <b>19I16013A</b>
	11. Seitenzahl <b>82</b>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  <b>Bundesministerium für</b> <b>Wirtschaft und Energie (BMWi)</b>  <b>11019 Berlin</b>	13. Literaturangaben <b>4</b>
	14. Tabellen <b>13</b>
	15. Abbildungen <b>67</b>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) <b>TÜV Rheinland Consulting GmbH, Forschungsmanagement, Am Grauen Stein, 51105 Köln</b> <b>30.11.2020</b>	
18. Kurzfassung  Ausgangssituation des Projekts waren die neuartigen Ergebnisse des BMBF-Vorgängerprojekts HAMMER, worin erste neuartige automobiler Strukturbauteile auf Basis holzbasierter Materialsysteme erarbeitet wurden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen, wurden im Projekt For(s)tschritt innovative Ansätze für den Einsatz von Holz als ökologisch nachhaltigen Werkstoff für tragende Strukturen mit Blick auf einen Serieneinsatz weiterentwickelt. Im Teilvorhaben wurden lokale Verstärkungen mit holzbasierter Multimaterialsystemen entwickelt. Ausgehend von den konstruktiven Konzepten wurden auch die Grundlagen für eine Abbildung der relevanten Lastfälle mittels Finite-Elemente-Methode hinsichtlich eines Materialmodells und einer Materialkarte geschaffen sowie zahlreiche experimentelle Untersuchungen an generischen Teilstrukturen zu deren Validierung durchgeführt. Anhand verschiedener Bauteile konnte ein Gewichtseinsparpotenzial von bis 15 % ausgewiesen werden. Weiterhin wurde mit dem funktionsintegrierten Türaufprallträger gezeigt, dass durch eine materialgerechte Konstruktion und Auslegung große Chancen hinsichtlich neuer, effektiver Baugruppen entstehen können. In Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit konnte gezeigt werden, dass selbst unter verschiedenen Worst-Case-Annahmen, wie beispielweise einem höheren Bauteilgewicht, die CO <sub>2</sub> -Vorteile einer Holzhybridbauweise über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zur reinen Stahlbaugruppe überwiegen. Abschließend zeigen die Ergebnisse eine sehr gute Anschlussfähigkeit für weitere Anstrengungen in Richtung Serieneinsatz.	
19. Schlagwörter <b>Formholz, holzbasierte Hybridbauweise, Fahrzeug-Rohbau, Leichtbau</b>	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title collaborative project: Structural assemblies based on sustainable wood-based material systems to reduce mass and environmental impact in road and rail vehicle construction (For(s)tschritt)  Sub-project: Project management, construction, design and development of a component for automotive series application	
4. author(s) (family name, first name(s))  Dr. Große, Thomas Dr. Fischer, Fabian Kohl, Daniel	5. end of project 31.08.2020
	6. publication date planned
	7. form of publication final report
8. performing organization(s) (name, address)  VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT 38436 Wolfsburg Abt. K-AERB/P (formerly K-GERW/P)	9. originator's report no.
	10. reference no. 19I16013A
	11. no. of pages 82
12. sponsoring agency (name, address)  Federal Ministry for Economic Affairs and Energy  11019 Berlin	13. no. of references 4
	14. no. of tables 13
	15. no. of figures 67
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Researchmanagement, Am Grauen Stein, 51105 Köln 30.11.2020	
18. abstract The starting point of the project were the innovative results of the earlier BMBF project HAMMER, in which the first innovative automotive structural components based on wood-based material systems were developed. Based on these results, the project For(s)tschritt developed innovative approaches for the use of wood as an ecologically sustainable material for load-bearing structures with a view to series application. In the subproject local reinforcements with wood-based multi-material systems were developed. Based on the design concepts, the basis for a representation of the relevant load cases using the finite element method with regard to a material model and a material map was created and numerous experimental investigations were carried out on generic substructures for their validation. On the basis of different components a weight saving potential of up to 15 % could be shown. Furthermore, the function-integrated door impact beam was used to demonstrate that a material-compatible construction and design can create great opportunities for new, effective assemblies. With regard to ecological sustainability, it was shown that even under various worst-case scenarios, such as a higher component weight, the CO2 advantages of a wooden hybrid construction over the entire life cycle outweigh those of a pure steel assembly. In conclusion, the results show very good prospects for further efforts to achieve series production.	
19. keywords Molded wood, wood-based hybrid construction, vehicle body construction, lightweight construction	
20. publisher	21. price