



## Inhalt

1	Kurzdarstellung .....	7
1.1	Aufgabenstellung .....	7
1.2	Gesamtziel .....	7
1.3	Projektpartner.....	7
2	Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn .....	8
3	Darstellung der Ergebnisse .....	10
4	Darstellung der Verwertung und Veröffentlichungen.....	97
4.1	Verwertung.....	97
4.2	Veröffentlichungen .....	98
5	Zusammenfassung.....	99

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Türenkonzepte .....	9
Abbildung 2: Bauraummodell unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen .....	12
Abbildung 3: Ersatzmodell Stützstruktur .....	12
Abbildung 4: Innere Dachlasten .....	13
Abbildung 5: Windlasten in hohlen Windsabweisern .....	14
Abbildung 6: Beispiel einer möglichen Fügeverbindung .....	15
Abbildung 7: Dach-Kabinen-Positionierung durch keglische Aufsatzverschraubungen oder Inserts, Zentrierdome / -hülsen .....	15
Abbildung 8: Rahmenverschraubung über ins LFI bzw. im Rahmen eingebettete Gewinde- / Hülsen-Inserts .....	15
Abbildung 9: Direktverschraubung über eingelegte / umschäumten Blechleisten .....	16
Abbildung 10: Arbeitsstände (AS00-AS04) der Dachstruktur, Entwicklungsgrad aufsteigend von links oben nach rechts unten .....	17
Abbildung 11: Explosionsdarstellung der ersten Konstruktionsvariante .....	18
Abbildung 12: Prinzip Aufbau Variante 1 hinsichtlich Materialien und Schichtweisen .....	19
Abbildung 13: Explosionsdarstellung der zweiten Konstruktionsvariante .....	19
Abbildung 14: Prinzip Entwicklungsstand 2 und Detailansicht Sandwichaufbau CAD .....	20
Abbildung 15: Vorlage für Bauweisenanalyse und erste Bewertungskriterien.....	21
Abbildung 16: Bauweisenanalyse mit gewichteten Bewertungskriterien, daraus resultierenden und priorisierten Konzepten.....	22

Abbildung 17: Universalprüfmaschine Hegewald & Peschke mit 4-Punkt-Biege-Vorrichtung und Kernverbundprobe nach DIN 53 293.....	26
Abbildung 18: Materialauswahldiagramm für maximale Druckfestigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte .....	29
Abbildung 19: Designmodell Kabine (ohne Fugenbild) .....	30
Abbildung 20 Darstellung unterschiedlicher Dachaufbauten, Spoilern und Aerodynamikpaketen .....	31
Abbildung 21: Designfläche des Hochdachs mit integriertem Regenlauf .....	32
Abbildung 22: PUR-Schaumkerne .....	33
Abbildung 23: Darstellung des Daches mit Staukasten .....	34
Abbildung 24: Finale Darstellung des Hochdachs und des Staukastens.....	34
Abbildung 25: PUR-RTM-Werkzeug mit unterschiedlichen Inlays .....	36
Abbildung 26: Einfahrversuche im Technikum von Fritzmeier Composite.....	37
Abbildung 27: ursprünglich generischer Demonstrator und finales Sandwich-Inlay .....	38
Abbildung 28: Einfahrplatten und monolithische LFI-Platten im Vergleich .....	39
Abbildung 29: DXF-Schnittplan (links) und wasserstrahlgeschnittene LFI-Prüfplatte mit Probekörpern (rechts).....	41
Abbildung 30: Biegeprüfvorrichtung und Prüfung einer LFI-Probe nach DIN 14125 .....	41
Abbildung 31: Zugprüfvorrichtung und Prüfung einer LFI-Probe nach DIN EN ISO 527-1 .....	42
Abbildung 32: Echtzeitdatenverlauf der Zug-Proben V4 und V6 .....	43
Abbildung 33: Verlauf der Echtzeitdaten von Probe V4 und V6 im Biegeversuch.....	43
Abbildung 34: Oberflächencharakterisierung der Class-A-SMC-Referenzprobe.....	44
Abbildung 35: 3D-Ansicht der SMC-Referenzprobe, xyz-Achsen normalisiert .....	44
Abbildung 36: 3D-Ansicht eines extrahierten Ausschnittes der SMC-Referenzprobe, z-Achse 20% überhöht.....	45
Abbildung 37: oberflächenmodifizierte Teilbereiche im Sandwich-Inlay .....	46
Abbildung 38: LFI-Abmusterung des modifizierten Werkzeug-Inlays im Technikum von KraussMaffei.....	47
Abbildung 39: Prüfkörperplatte mit oberflächenmodifizierten Teilbereichen .....	47
Abbildung 40: Einfluss auf die Oberfläche bei unterschiedlichen Prozessparametern.....	48
Abbildung 41: Überlagerung von Gestaltabweichungen mit Profilfilterung .....	49
Abbildung 42: Betrachteter Ausschnitt der unbehandelten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts) .....	50
Abbildung 43: 3D-Ansichten des unbehandelten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert .....	50
Abbildung 44: 3D-Ansichten des unbehandelten Proben-Ausschnitts, z-Achse 20% überhöht .....	50
Abbildung 45: Betrachteter Ausschnitt der schmirgelstrichpolierten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts).....	51
Abbildung 46: 3D-Ansichten des schmirgelstrichpolierten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert .....	51
Abbildung 47: 3D-Ansichten des schmirgelstrichpolierten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht.....	52
Abbildung 48: Betrachteter Ausschnitt der gestrahlten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts) .....	52

Abbildung 49: 3D-Ansichten des gestrahlten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert .....	53
Abbildung 50: 3D-Ansichten des gestrahlten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht .....	53
Abbildung 51: Betrachteter Ausschnitt der spiegelpolierten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts) .....	54
Abbildung 52: 3D-Ansichten des spiegelpolierten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert .....	54
Abbildung 53: 3D-Ansichten des spiegelpolierten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht .....	54
Abbildung 54: Betrachteter Ausschnitt der geätzten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts) .....	55
Abbildung 55: 3D-Ansichten des geätzten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert .....	55
Abbildung 56: 3D-Ansichten des geätzten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht .....	56
Abbildung 57: Betrachteter Ausschnitt der folierten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts) .....	56
Abbildung 58: 3D-Ansichten des folierten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert .....	57
Abbildung 59: 3D-Ansichten des folierten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht .....	57
Abbildung 60: Ergebnisse der 3D (oben) und 2D (unten) Topologieoptimierungen mit einem verbleibenden Volumen von zehn Prozent .....	61
Abbildung 61: Ergebnisse einer 2D Topologieoptimierung an einer überarbeiteten Konstruktion mit unterschiedlicher Feinheit .....	61
Abbildung 62: Werkzeughälften zum Pressen verschiedener Plattendicken .....	62
Abbildung 63: Bemusterung auf der Fritzmeier Composites-Anlage .....	63
Abbildung 64: Hergestellte Platten für Materialvalidierung .....	63
Abbildung 65: Felder mit verschiedenen Oberflächengüten .....	64
Abbildung 66: Werkzeughälften mit „Spielzeugdach“ im Maßstab 1:5 .....	65
Abbildung 67: Explosionszeichnung der finalen Dachversion .....	66
Abbildung 68: CAD-Daten des Tiefziehwerkzeuges .....	67
Abbildung 69: Schnitt durch 3 der über 800 Vakuumborungen im Werkzeug .....	67
Abbildung 70: Tafel mit verschieden gestrahlten Feldern .....	68
Abbildung 71: Es wurde sich entschieden, das komplette Werkzeug mit der Oberfläche K36 auszustatten .....	68
Abbildung 72: Tiefziehwerkzeug während des Strahlvorgangs .....	69
Abbildung 73: CAD-Daten des Schaumkernwerkzeuges für die Dachfläche .....	70
Abbildung 74: Metallplatte, welche über Stifte und Magnet im Werkzeug fixiert ist .....	70
Abbildung 75: CAD-Stand des LFI-Werkzeuges .....	71
Abbildung 76: Oberwerkzeug (Stempel) inkl. Schaumkerne (gelb), welche über Magnete gehalten werden .....	72
Abbildung 77: Unterwerkzeug (Wanne) inkl. eingelegter, tiefgezogener Folie (weiß) .....	72
Abbildung 78: Die Formhälften eines der Schaumkernwerkzeuge nach der Politur .....	73
Abbildung 79: beiden Werkzeughälften des LFI-Gesamtwerkzeuges .....	73
Abbildung 80: zeigt die Formhälfte des Tiefziehwerkzeug .....	74
Abbildung 81: Ergebnisse einer 2D Topologieoptimierung an einer überarbeiteten Konstruktion mit unterschiedlicher Feinheit .....	74

Abbildung 82: Resultierende Faserorientierung während des Pressvorgangs in der Außenhaut der Konstruktion dargestellt als Komponenten des Faserorientierungstensors ..... 75

Abbildung 83: Dachkonstruktion unterteilt in verschiedene Bereiche je nach verwendetem Materialsystem. Die verwendeten Materialsysteme sind in Tabelle 2 zugeordnet ..... 76

Abbildung 84: Versagenskritische Bereiche, in denen das Versagenskriterium nach Hashin überschritten wird ..... 77

Abbildung 85: Die ersten vier Eigenmoden der eingespannten ..... 77

Abbildung 86: Aus dem Konzept überführte, bei Siebenwurst gefertigte Patrizie des Demonstratorwerkzeugs..... 80

Abbildung 87: Bei Siebenwurst gefertigte Matrize des Demonstratorwerkzeugs ..... 80

Abbildung 88: Im Tiefziehprozess vorgefertigte ABS-Außenhaut ..... 82

Abbildung 89: Fünf einzeln vorgefertigte und zwecks vereinfachtem Prozesshandling, zu einem Einleger gefügter Schaumkern ..... 82

Abbildung 90: Im Werkzeug eingelegte ABS-Tiefziehfolie mit darauf eingetragenen und verpresstem LFI sowie darin integriertem Schaumkerneinleger ..... 83

Abbildung 91: Querschnitt durch ein gefertigtes Demonstratorbauteil..... 83

Abbildung 92: Hochdach-Demonstrator „HylightCab“ bei der Vermessung..... 84

Abbildung 93: Auswirkungen von Witterungseinflüssen auf den Prototyp der ersten Abmusterung... 85

Abbildung 94: Validierung Passgenauigkeit Hochdach..... 86

Abbildung 95: Validierung Dachinnenseite..... 86

Abbildung 96: Hochdach-Demonstrator „HylightCab“ zur Anpassung und Sichtung..... 89

Abbildung 97: Aluminium-Sandwich-Komponenten der Staufächer des „HylightCab“ Hochdach-Demonstrators ..... 89

Abbildung 98: Verklebung und Anpassung der Staufach-Sandwichpanelen mit dem Pultrusionsprofil ..... 90

Abbildung 99: Hochdach-Demonstrator mit eingepasstem Staufachsystem ..... 91

Abbildung 100: Kabinenrohbaurahmenstruktur links und aufgesetzter Hochdach-Demonstrator rechts ..... 92

Abbildung 101: Prüfstands Aufbau mit aufgesetztem Demonstrator..... 93

Abbildung 102: Frontsicht des Hochdach-Demonstrators..... 93

Abbildung 103: „HylightCab“-Demonstrator mit ausgefräster Luke für das Ausstelldach ..... 94

Abbildung 104: Prüfstands Aufbau „HylightCab“ mit Prüfgewicht, passgenauer Dachverschraubung und Abdichtungsflächen ..... 95

Abbildung 105: Hochdach-Demonstrator „HylightCab“ mit aufgelegtem Prüfgewicht und Innenansicht ..... 96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: PUR-Sandwich-Verbunde mit unterschiedlichen Kernmaterialien, Kernstärken und Faseranteilen in der Deckschicht .....	25
Tabelle 2: Ergebnistabelle mit gegenübergestellten Materialkennwerten .....	27
Tabelle 3: Erläuterung der in der Ergebnistabelle aufgeführten Kürzel .....	27
Tabelle 4 Einzelgewichte der Komponenten .....	35
Tabelle 5: Prüfplattenübersicht der LFI-Versuche mit eingestellten Prozessparametern .....	39
Tabelle 6: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der SMC-Referenzprobe .....	45
Tabelle 7: unterschiedliche LFI-Prozessparameter in Abhängigkeit zum Faseranteil .....	48
Tabelle 8: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der unbehandelten Probe .....	51
Tabelle 9: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der schmirgelstrichpolierten Probe ....	52
Tabelle 10: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der gestrahlten Probe .....	53
Tabelle 11: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der spiegelpolierten Probe .....	55
Tabelle 12: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der geätzten Probe .....	56
Tabelle 13: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der folierten Probe .....	57
Tabelle 14: Probenspezifische Sq Rauheitswerte im Überblick .....	58
Tabelle 15: Zusammenfassung der simulierten statischen Lastfälle .....	75
Tabelle 16: Bereiche der Dachkonstruktion in Abbildung 83 unterteilt nach Materialsystem. Die Spalte Farbe bezieht sich auf die in Abbildung 83 verwendete farbliche Darstellung der einzelnen Bereiche	76

## 1 Kurzdarstellung

In diesem Kapitel werden Hintergründe und Rahmenbedingungen zum Projekt HylightCab erläutert.

### 1.1 Aufgabenstellung

Ein wesentlicher Anteil der CO<sub>2</sub> Emissionen stammt aus dem Gütertransport. Um diese zu verringern, muss der Fahrzeugverbrauch reduziert werden. Die treibende Kraft für den Verbrauch ist die Fahrzeugmasse. Ein großer Teil des Gütertransportes wird durch Lastkraftwagen (LKW) abgewickelt, daher kann schon mit einer kleinen Reduzierung der Fahrzeugmasse ein relativ großer Effekt erzielt werden. Im Güterverkehr ist speziell das Verhältnis zwischen Leergewicht und maximaler Zuladung zu betrachten. Da das zulässige Gesamtgewicht rechtlich beschränkt ist, wird durch eine Reduktion des Leergewichtes eine Steigerung der Zuladung erreicht und damit die insgesamt gefahrenen Kilometer reduziert. Um dieser Problemstellung Rechnung zu tragen, werden im Rahmen des hier vorgeschlagenen Vorhabens die werkstofflichen und verfahrenstechnischen Grundlagen zur Herstellung und Kombination sogenannter Multi-Material-Systeme (MMS) für gewichts- und kostenoptimierte Nutzfahrzeugkabinen anhand einer Lkw Fahrerkabine betrachtet. Dabei liegt der Fokus auf einer hybridisierten Leichtbaulösung für die Kabinenstruktur, welche aufgrund ihrer umfangreichen Funktionen die Möglichkeit zur Funktionsintegration und somit Leichtbaupotential bietet.

### 1.2 Gesamtziel

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens war die Konzeption eines innovativen, funktionsintegrierten Leichtbaukonzeptes im Multi-Material-Design für den Einsatz in einer hochbeanspruchten Nutzfahrzeugkabine. Im Speziellen wurde ein gewichts- und kostenoptimiertes Kabinenhochdach in Sandwich-Bauweise entwickelt. Die erzielten Gewichtsvorteile bei gleichbleibender Belastbarkeit sollen zu einer Reduktion des Gesamtfahrzeuggewichts führen und damit eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung bewirken. Außerdem kann eine Einsparung am Fahrzeuggewicht in Bezug auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen bei Nutzfahrzeugen, eine Erhöhung der Nutzlast ermöglichen.

### 1.3 Projektpartner

Die Zusammensetzung der Partner im Projektkonsortium (Fraunhofer ICT, Siebenwurst, Fritzmeier Composite, KIT FAST und GreenIng) stellt sicher, alle benötigten Kompetenzen für die Durchführung des Forschungsvorhabens vereint zu haben.

Die Firma Siebenwurst brachte Know-How im großserientauglichen und hochtechnologischen Werkzeug- und Formenbau mit ein, speziell in Bezug auf die meist mehrstufigen und wenig

automatisierten Prozesse im Bereich Faserverbund (CFK/GFK) in der Automobil- und Luftfahrtindustrie.

Die Firma Fritzmeier Composite ist Technologieführer im Bereich der Konstruktion von innovativen Leichtbauelementen und ein Hauptzulieferer der Automobilindustrie für CFK-Bauteile. Mit Maschinen und Anlagen auf dem aktuellen Stand der Technik produziert Fritzmeier Composite hochbelastbare Komponenten mit höchster Qualität basierend auf glasfaser- und karbonfaserverstärkten Kunststoffen sowie den unterschiedlichsten Kompositwerkstoffen.

Die Firma GreenIng arbeitet als Entwicklungspartner und Ideenschmiede von umweltfreundlicher Hochtechnologie in den Bereichen Automotive, schienengebundene Fahrzeuge und Luftfahrt. Als Impulsgeber für nachhaltige Lösungen konzentriert sich GreenIng bisher auf die Antriebstechnologie und auf den Leichtbau. GreenIng entwickelt Systeme und Komponenten, die maßgeblich zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen.

Im Mittelpunkt der Aktivitäten des KIT Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (KIT - FAST) – Lehrstuhl für Leichtbautechnologie stehen Technologien zur Gewichtsreduktion von Fahrzeugen. Am Institut positioniert sich der Leichtbau als Querschnittsthema und bietet einen interdisziplinären Ansatz zur Reduktion des dominierenden Fahrzeugwiderstands sowie der Fahrzeugmasse. Im Vordergrund der Aktivitäten steht im Besonderen die Weiterentwicklung und Befähigung von Simulationsmethoden für Faserverbundwerkstoffe

Das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT brachte für das Vorhaben relevante Kompetenzen in den Bereichen Umwelt Engineering und Polymer Engineering mit ein. Im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe sind insbesondere bei der Material- und Prozessentwicklung für lang- und endlosfaserverstärkten Thermoplaste und Duroplaste langjährige Erfahrungen vorhanden. Zudem flossen erarbeitete Erkenntnisse und Erfahrungen in Bezug auf Sandwichelemente und hybride Verbundbauteile mit in das Vorhaben ein.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn

In der Großserienproduktion werden Fahrerhäuser selbsttragend in Einschalenbauweise hergestellt, wobei ein Pressstahlgerippe mit geformten Stahlblechen verkleidet wird. Es gibt heute vereinzelt auch Kunststoff-Systeme, die in der Regel aus Einzelteilen gefügt sind. Eine Vielzahl von Verstärkungen wird durch weitere Bearbeitungsschritte eingeschweißt, eingeschraubt oder eingenetet. Leichtbauansätze für Lkw-Rohbaustrukturen wurden bereits bei Spezialfahrzeugen mit kleiner Stückzahl realisiert. Die Türen wurden als Aluminium-Strangpressprofil-Rahmen mit SMC- Beplankungsteilen oder in Kunststoff-Schalenbauweise in FVK- RTM- Lösungen gefertigt (siehe nachstehende Abbildung).



		
<p>Stahlblech-Türen am MAN TGS</p>	<p>Aluminium / SMC-Türen eines Daimler Econic</p>	<p>Kunststoff-Fahrerkabine in CFK/RTM-Bauweise des Unimog</p>

(Quelle: MAN, Daimler)

Abbildung 1: Übersicht Türenkonzepte

Die Darstellung der Varianz erfolgt über die unterschiedliche Kombination der Einzelteile. Hybride Strukturen, bei denen der Innenausbau des Daches ein Teil der Systemstruktur ist, sind bis heute nicht am Markt verfügbar.

Die heute am Markt verfügbaren Dächer tragen zur Sicherheitszelle nur bedingt bei. Dementsprechend ist die Lasteinleitung in die Kabinenstruktur eher auf produktionstechnische Belange und Dichtigkeit ausgelegt. In der Nutzfahrzeug- und Landmaschinenindustrie ist seit Jahren die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen z.B. für Dächer und Radhäuser also für nichtstrukturelle Anwendungen Stand der Technik. Hierbei wird überwiegend das auf duromerem Polyesterharz basierende SMC (Sheet Molding Compound) verwendet. Bei Haubenabdeckungen werden PUR-RIM-Strukturen (RIM für Reaction Injection Molding) verbaut.

Anwendungen von kostengünstigen faserverstärkten Thermoplasten und Duroplasten in strukturell tragenden und sicherheitsrelevanten Systemen, wie z. B. dem Fahrzeugboden, wurden allerdings aufgrund der oben beschriebenen Problemstellungen noch nicht realisiert.

Die am Markt verfügbaren Konzeptstudien für Fahrzeugleichtbau konzentrieren sich in der Regel auf homogene Werkstoffanwendungen, siehe Ulsab (1998) oder Ulsac (2001) New Steel Body (2003) oder Incar (2009). Diese Konzepte wurden im Wesentlichen von der Stahlindustrie entwickelt, um die Anwendungsmöglichkeiten hochfester- und hochumformbarer Stähle zu vermitteln. Das Thema Thermomanagement wird bei heutigen am Markt verfügbaren Lösungen ebenfalls nur nachgeordnet betrachtet. Relevant berücksichtigt wird hierbei das Thema Kondensatbildung an den Innenseiten der Kabinenstruktur. Der Projektpartner Fritzmeier fertigt im oben erläuterten technologischen Prozess heute Kunststoffdächer für MAN Truck & Bus. Ziel im Projekt ist also, hier einen technologischen Hub zu erzielen, der

insbesondere durch eine Erhöhung der Kostenattraktivität durch Hybridisierung und Funktionsintegration die Wettbewerbsfähigkeit von Kunststoffdächern deutlich erhöhen soll.

### **3 Darstellung der Ergebnisse**

Im Rahmen von HylightCab wurde das Konzept eines funktionsintegrierten Leichtbau Hochdachs im Multi-Material-Design entwickelt. Dabei war es von großer Bedeutung, die hohen Anforderungen bezogen auf die Steifigkeit im Crashfall mit einer signifikanten Gewichtsreduktion im Vergleich zu einem konventionellen Hochdach darzustellen. Gleichzeitig sollten Materialpaarungen ausgewählt werden, die einerseits einen seriennahen Herstellungsprozess zulassen, als auch den in der Automobilindustrie üblichen hohen Anforderungen bezüglich Oberflächengüte entsprechen. Nach Festlegung einer zugrundeliegenden Kabinengeometrie mit den Konsortialpartnern wurde eine Hochdachstruktur in Sandwichbauweise entwickelt und konstruiert, welche nach iterativen Simulationsschleifen in Bezug auf Festigkeit, Gewicht und Herstellbarkeit optimiert wurden. Zusätzlich wurde, analog zu herkömmlichen Hochdächern ein Staufach konzipiert, welches einerseits Stauraum schafft und andererseits maßgeblich zur geforderten Steifigkeit des Hochdachs unter der Prämisse der maximalen Gewichtsreduktion beiträgt. Des Weiteren wurde die Herstellbarkeit mit zwei Abmusterungsdurchläufen untersucht und ein erster Demonstrator aufgebaut.

#### **AP 1 Allgemeine Anforderungen**

Im Arbeitspaket wurde zunächst das Kabinen-Sub-Modul ausgewählt und anschließend die allgemeinen Lastfälle, wie auch die geometrischen Rahmenbedingungen und Schnittstellen des Moduls definiert.

#### **AP 1001 Finale Bauteilfestlegung/ Varianz**

Unter dem Aspekt der Wirksamkeit des Leichtbaus wurde untersucht, in welchem Bereich der Fahrzeugleichtbau die höchste Priorität hat. Als wichtiges Bauteil wurde das Dach identifiziert, da hier eine Gewichtsreduzierung die meisten Vorteile bietet. So führt einerseits eine Reduzierung des Gewichts zu einer Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes sowie einer Vergrößerung der Reichweite und gleichzeitig zu einer möglichen Erhöhung der Nutzlast. Andererseits führt eine Gewichtsreduzierung im oberen Bereich des Fahrzeugs zu einer niedrigeren Schwerpunktlage was einen positiven Einfluss auf die Nick- und Wankbewegungen hat wodurch das Bremsverhalten sowie der Fahrkomfort des Fahrzeugs verbessert wird. Deshalb werden von Herstellern speziell im Nutzfahrzeug-Bereich Investitionen zur Gewichtsreduzierung im oberen Bereich des Fahrzeugs immer priorisiert betrachtet.

In diesem Arbeitspaket konnte das Fraunhofer ICT potentielle Multi-Material- bzw. Hybrid-Bauweisen unter Berücksichtigung materialspezifischer Leichtbaueigenschaften aufzeigen und mit

in die Bewertung einfließen lassen. Unter Einbezug der für die abzuleitenden Bauteilvarianzen und in Abhängigkeit zur Leichtbaueigenschaft wurde sich im Konsortium für die Kabinenstruktur mit dem größtmöglichen Kosten-Nutzen-Potential entschieden: den Kabinendachaufbau.

### **AP 1002 Erstellung Lastenheft/ Definition Lastfälle**

Im Konsortium wurden im Anschluss verschiedenste Anforderungen zu einem Lastenheft zusammengeführt und als Basis für eine zukunftsfähige Forschung verabschiedet. Neben gesetzlichen Belastungen wurden geometrische Grenzen, Umwelteinflüsse, Produktionsanforderungen sowie ein definiertes Kosten- / Gewichtsziel festgelegt. Im Rahmen eines Workshops wurde der Stand der Technik bei den Bauweisen und den Schnittstellen zur Karosserie erarbeitet, um eine Ausgangsbasis für zukünftige Forschungsinhalte zu schaffen. Als Vorbereitung für den Workshop hat GreenIng ein Benchmarking der Marktteilnehmer erarbeitet. Dieses Benchmarking diente auch als Basis für die Festlegung der geometrischen Rahmenbedingungen.

Unter der Leitung von Fritzmeier Composite unterstützte das Fraunhofer ICT und das KIT-FAST die gemeinsame Erarbeitung und Ableitung konzeptionell- und auslegungsrelevanter Lastfallanforderungen für eine multifunktionelle Kabinendachstruktur unter Einbezug vorhandener und zukünftiger Systemgrenzen, Schnittstellen, wie auch optischer Rahmenbedingungen.

### **AP 1003 Festlegung geometrische Rahmenbedingungen**

Basierend auf dem Arbeitspaket AP1001 und AP1002 wurde im Zuge des bei Fritzmeier Composite veranstalteten Projekt-Workshops eine Analyse der Kabinenbauweise, sowie des Bauraumfeldes durchgeführt. Mit Hilfe existierender Bauteilmaßen, Einbauanforderungen und Interieurausstattungen, wie z.B. Staufächern, Befestigungssystemen für Griffe, etc., aber auch funktionalen Ein- und Anbauteilen wurden die Lastenheftanforderungen in einem groben Bauraummodell zusammengefasst.

Dabei stand vor allem am Fraunhofer ICT die Ergänzung und Übertragung der definierten Lastfälle auf eine Kunststoffbauweise und damit auch die Sicherstellung der Berücksichtigung aller kunststoffrelevanten Aspekte im Vergleich zu metallischen Bauweisen im Fokus. Das Arbeitspaket stellte zudem den Einstieg in die Definition eines bauteilbezogenen, detaillierten Lasten- und Pflichtenheftes dar und diente dem gemeinsamen Vertrautwerden mit den Bauteilen selbst sowie deren Einbauumgebung.

Das KIT-FAST wirkte hier an der Definition des Bauraummodells mit, welches die Grundlage für die spätere Topologieoptimierung, vgl. AP4002, darstellt. Dies gewährleistete eine schnelle Übergabe des Modells zur Topologieoptimierung und vereinfachte somit das iterative Vorgehen in der Konstruktion, in die regelmäßig die Ergebnisse der Topologieoptimierung einfließen. Das Bauraummodell ist in Abbildung 2 zu sehen.

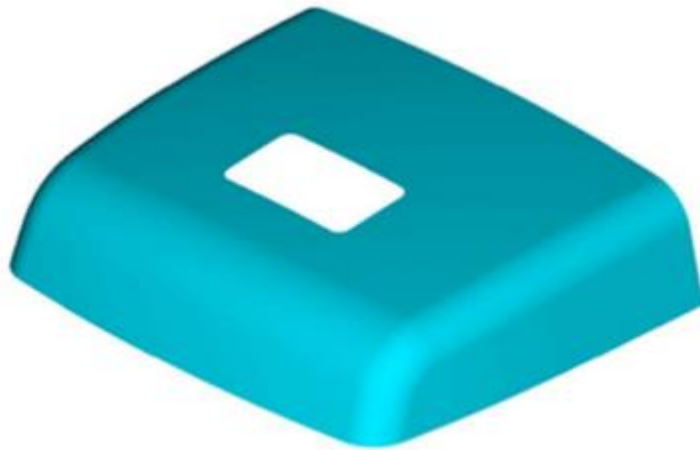


Abbildung 2: Bauraummodell unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen

Im Zusammenhang mit der Festlegung der Lastfälle wurde zusätzlich die Entscheidung getroffen, geometrisch sowie funktional das größte Dach mit der höchsten Funktionsintegration für die weiteren Untersuchungen zu wählen, welches aus den Benchmark Untersuchungen hervorgegangen ist. Im weiteren Projektverlauf wurde virtuell eine zusätzliche Variante untersucht. Ergänzend wurden Lasteinleitungspunkte und darauf aufbauend die Erstellung eines Ersatzmodells der Stützstruktur als wichtig Ausgangsbasis erarbeitet. Abbildung 3 zeigt das Ersatzmodell der Stützstruktur.

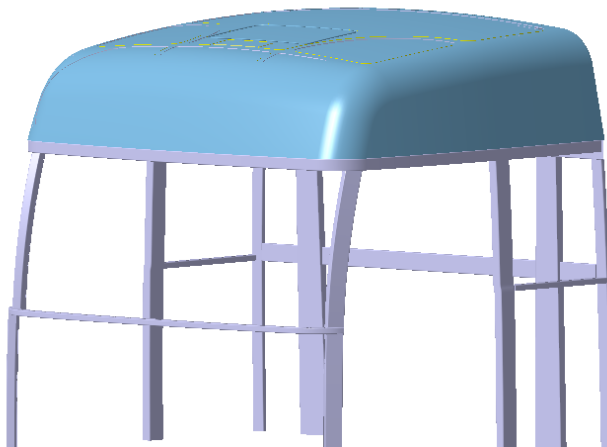


Abbildung 3: Ersatzmodell Stützstruktur

#### AP 1004 Definition Schnittstellen

Im Rahmen dieses AP wurde die geometrische Schnittstelle zur „Kabinenkarosserie“ als Teilaufbau konzipiert, um realistische Lasteinleitungen in das Dach darstellen zu können.

Dabei wurden einerseits innere Lasten durch beispielsweise den Staukasten betrachtet (Abbildung 4) als auch Lasten durch äußere Anbauteile, die in verschiedenen Fahrzuständen auf das Dach einwirken.

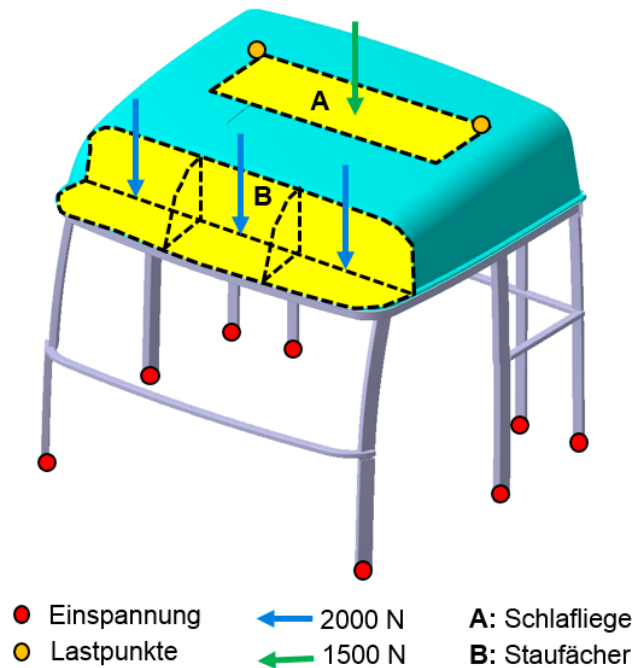


Abbildung 4: Innere Dachlasten

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Krafteinwirkung durch Seiten- und Dachwindabweiser wobei die Hauptbelastung hier durch eine rückwärtsseitige Windanströmung beim Transport der Zugmaschine auf einem Zug oder Anhänger auftreten kann. Hier treten große Kräfte entgegen der eigentlichen aerodynamischen Ausrichtung der Bauteile auf.

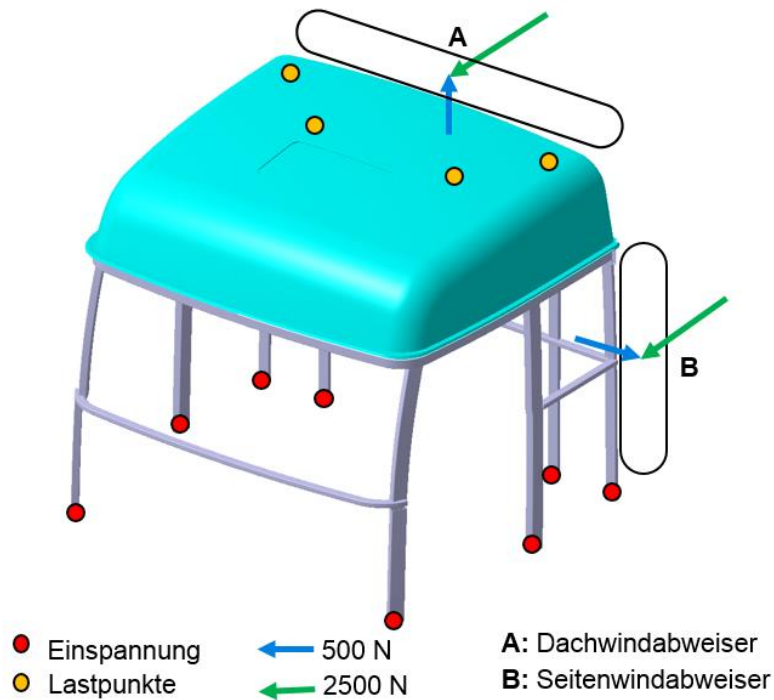


Abbildung 5: Windlasten in hohlen Windsabweisern

Darauf aufbauend konnten die geometrischen Verbindungen zur restlichen Kabine und den zuvor beschriebenen Funktionen festgelegt werden. Die komplette Forschung wurde als generischer Bauraum entwickelt, um hier nach Projektabschluss die Forschungsergebnisse ohne Einschränkung zur Verfügung stellen zu können.

Im gemeinsamen Workshop wurden neben den evaluierten Dach-Kabinen-Anbindungen bzw. Schnittstellendefinitionen auch die lasteinleitenden und -abstützenden Geometrien, sowie die Montagerichtung der Lastfälle festgelegt. Da ein Fokus auf dem zukunftsfähigen und innovativen Montagesamtkonzept der Kabine lag, wurden unterschiedlichste Fügeverbindungen und -verfahren betrachtet:

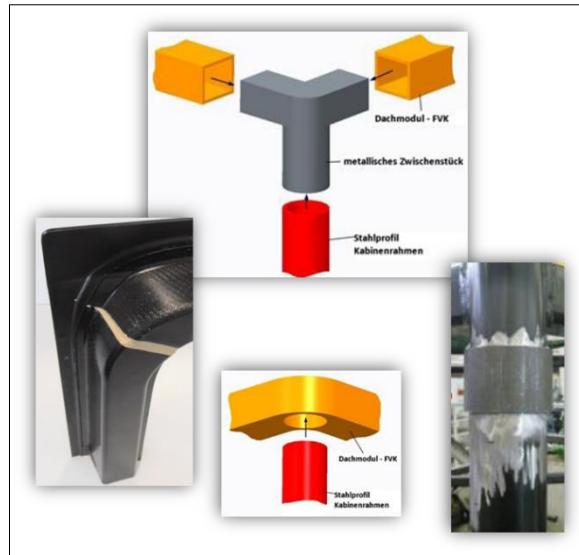


Abbildung 6: Beispiel einer möglichen Fügeverbindung

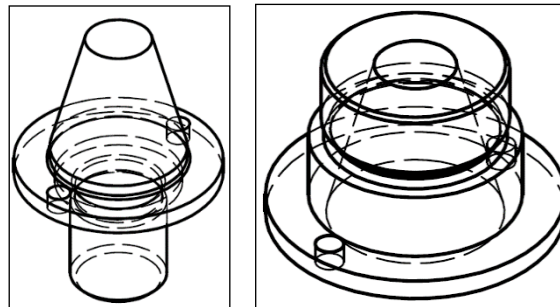


Abbildung 7: Dach-Kabinen-Positionierung durch kegliche Aufsatzverschraubungen oder Inserts, Zentrierdome / -hülsen

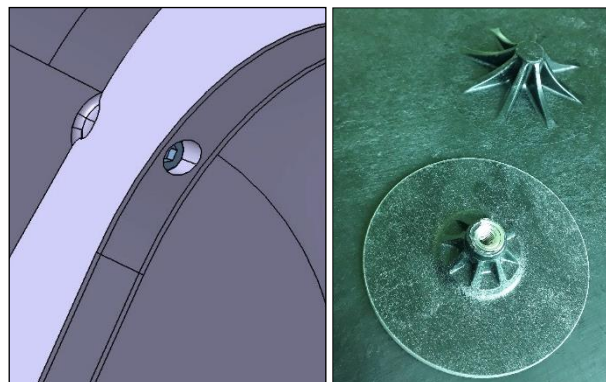


Abbildung 8: Rahmenverschraubung über ins LFI bzw. im Rahmen eingebettete Gewinde- / Hülsen-Inserts

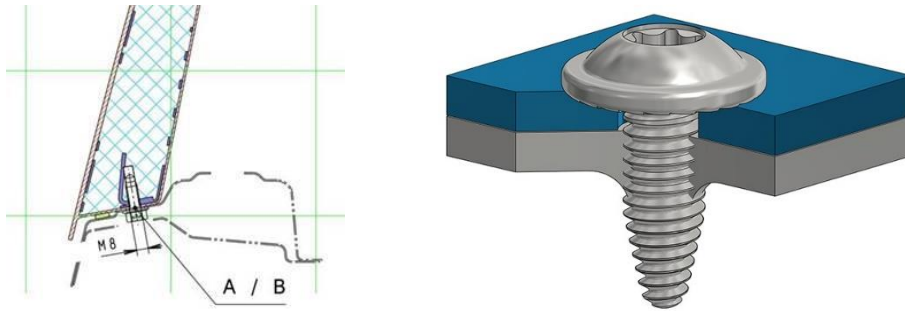


Abbildung 9: Direktverschraubung über eingelegte / umschäumten Blechleisten

Die evaluierten Dach-Kabinen-Anbindungen wurden durch neue Montagekonzepte und in einer Optimierungsphase ergänzt. Dabei konnte das Fraunhofer ICT stets durch sein bisher erarbeitetes Wissen, mitunter aus den vorangegangenen Forschungs- und Industrieprojekten, bei der Strukturierung der Anbindungs- und Schnittstellen beraten und unterstützen.

Insbesondere war die Lage der Anbindungspunkte von großem Interesse, da diese die Randbedingungen für die späteren Topologieoptimierungen (AP4002) und Struktursimulationen (AP4005) darstellen. In Vorstudien konnte außerdem gezeigt werden, dass Lage und Anzahl der Anbindungspunkte einen Einfluss auf die optimierte Struktur des Daches haben und somit das vorhandene Leichtbaupotential beeinflussen.

## AP 2 Konzeptstudie

Unter der Leitung des Fraunhofer ICT wurden, basierend auf dem aus AP1001 hervorgegangenen Bauteil der LKW-Kabinenstruktur, dem Kabinendachaufbau, unterschiedliche Bauweisenkonzepte erarbeitet. Unter Berücksichtigung der Bauteil- und Systemgrenzen erfolgte im Anschluss eine Detaillierung der Anforderungen mit spezifischen Auslegungskriterien und darauffolgender Prozess- und Materialbewertung.

## AP2001 Bauraumbasierte Topologiestudie

Der oben genannte Ausgangsdatensatz wurde mit ersten geometrischen Größen zur Darstellung der Belastungen aus den Betriebslasten aus dem Lastenheft versehen und dann dem Konsortialpartner KIT FAST zu einer ersten Topologiestudie zur Verfügung gestellt. Hier wurden Lasteinleitungen aus Betriebslasten und des Staukasten als Rahmenbedingungen der Bauraumbeschreibung hinzugefügt, um hier den „simultaneous engineering“-Prozess möglichst frühzeitig zu starten und dabei größtmögliche gestalterische Freiheit zu erhalten. Parallel konstruierte GreenIng weitere Funktionsinhalte wie das Ausstelldach und Lasteinleitungen für das Aerodynamikpaket. Zusammen mit der Umsetzung der ersten Erkenntnisse aus der Topologieberechnung wurde hier ein Stand erarbeitet, der die Bewertung der Kriterien aus der Bauweisenanalyse zulässt.



Hierfür wurden unterschiedliche Konzepte für mögliche Versteifungsstrukturen erarbeitet und untersucht. Das Hochdach ist durch Position und Geometrie der inneren Versteifungsstrukturen in seinem Bauraum definiert und wurde durch Simulationen (KIT FAST) verifiziert. Eine Struktur mit erhöhtem Querschnitt ist insbesondere im Bereich der Dachluke und der B-Säule notwendig. Der Staukasten stützt die Dachstruktur über dem Fahrer- und Beifahrersitz. Die ABS-Deckfolie ist in der Konstruktion und im Fertigungsprozess integriert.

Weitere geometrische, topologische Anpassungen und Simulationen haben gezeigt, dass eine feine Verrippung des Daches wie in Abbildung 10 dargestellt, aus Kosten- und Fertigungsgründen nicht zielführend ist. In der Sandwichbauweise wirken sich großflächig verteilte Stützstrukturen (AS004) positiv auf Gewicht und Stabilität aus.

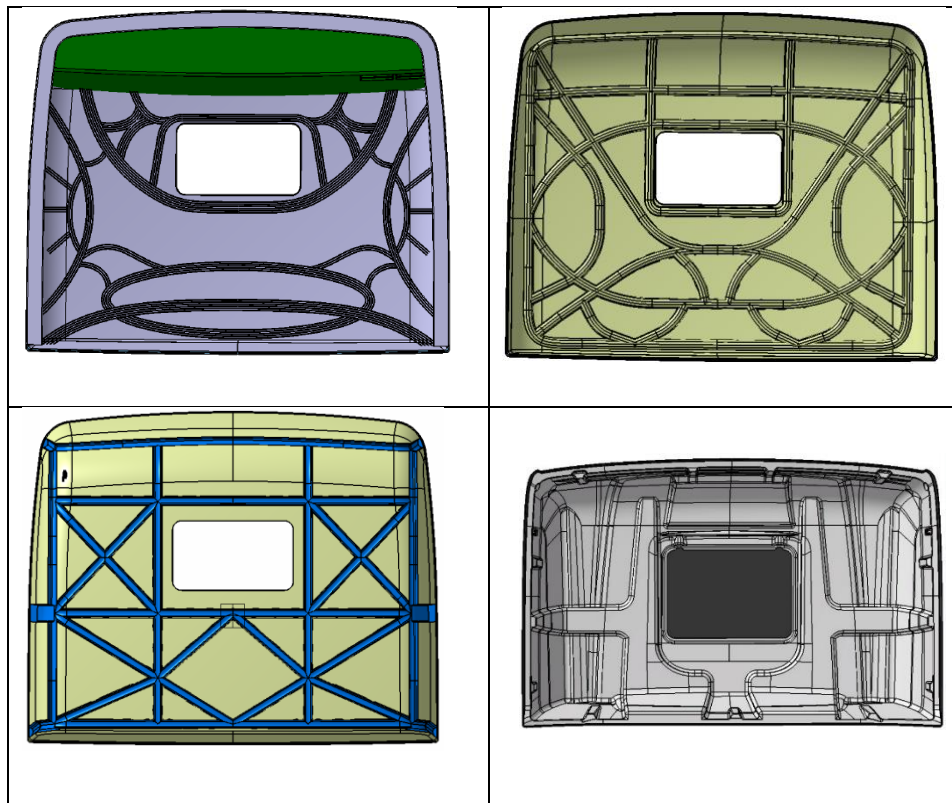


Abbildung 10: Arbeitsstände (AS00-AS04) der Dachstruktur, Entwicklungsgrad aufsteigend von links oben nach rechts unten

Diese Strukturen können lokal verschiedene Stärken aufweisen und so an die entsprechend belasteten Bereiche optimal angepasst werden. Durch weitere Simulationen (KIT FAST) mit optimierten, an die Fertigungstechnik angepassten, Materialkennwerten (Fraunhofer ICT), wurden diese Versteifungsstrukturen in ihrer Geometrie konkretisiert.

Die definierten Bauteilbelastungen und des Kabinenbauraums wurde mittels einer Optimierungsrechnung eine Systemtopologie erstellt. Dies erfolgte bei den dafür verantwortlichen Projektpartnern GreenIng und KIT – FAST. Das Fraunhofer ICT war hierbei unterstützend tätig.

### AP2002 Bauweisenanalyse

Bei der Bauweisenanalyse hat GreenIng den Konsortialpartner Fraunhofer ICT unterstützt, indem sowohl Bauweisenideen formuliert, als auch die Kriterienentwicklung und -bewertung aus Sicht der Bauteilentwicklung erarbeitet wurden.

Im Rahmen der Konzeptstudie wurden unterschiedliche Konzepte in einem iterativen Prozess konstruiert. Nach einer Bauraumbeschreibung wurde eine Konstruktion auf Basis einer ersten Topologie erstellt. Nach der ersten Simulation (KIT FAST) eines konstruierten Konzeptes erfolgte eine weitere Entwicklungsschleife, die einen simulationsoptimalen Konstruktionsstand abbildete. Dieser wurde im Anschluss zusammen mit dem Fraunhofer ICT hinsichtlich der Herstellbarkeit bewertet und eine erste Variante der beschlossenen Bauweise dokumentiert.

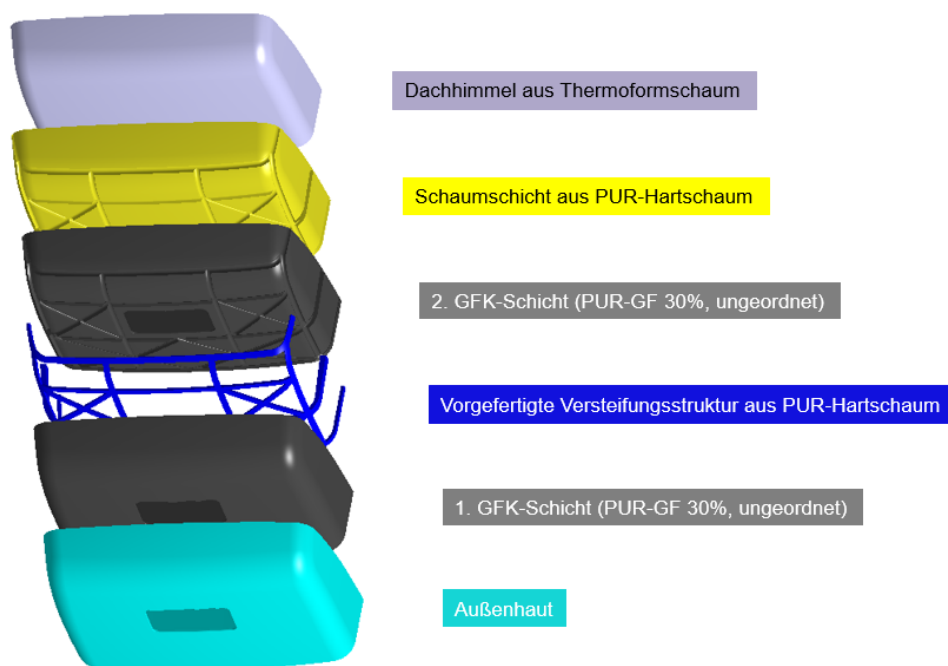


Abbildung 11: Explosionsdarstellung der ersten Konstruktionsvariante

Eine Prinzipdarstellung der Variante 1 zeigt Abbildung 11. Hierbei kamen ein vorgefertigtes und in die Form eingelegtes PU/PUR-Hartschaumprofil als Versteifungsstruktur zum Einsatz, das mit LFI umspritzt werden sollten. Ein Konzeptschnitt durch die erarbeitete Dachstruktur ist in Abbildung 12 dargestellt, auf der die verschiedenen Schichten schematisch dargestellt sind.

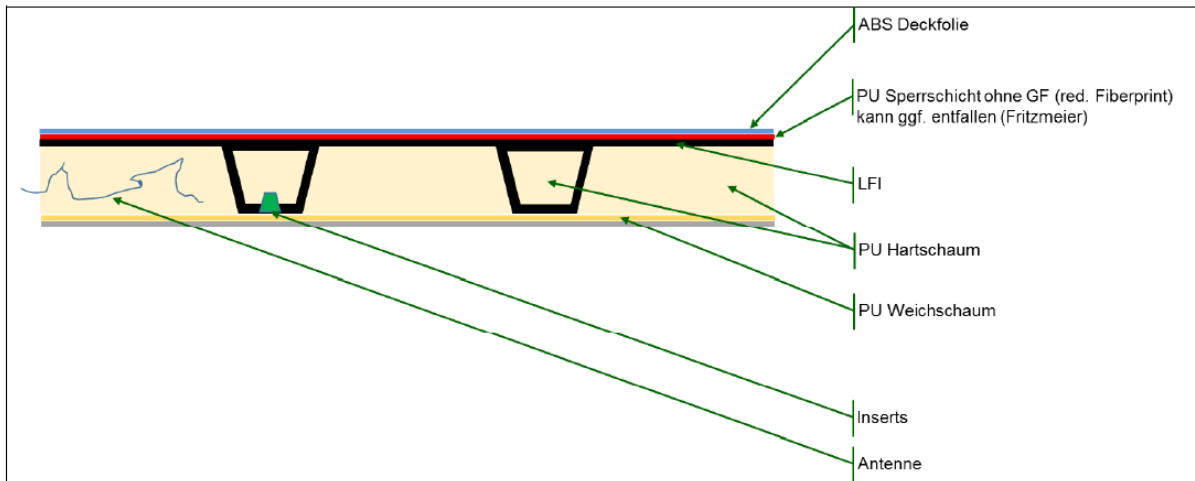


Abbildung 12: Prinzip Aufbau Variante 1 hinsichtlich Materialien und Schichtweisen

Daraus folgte ein weiterer Konstruktionsstand des Daches. Dieser wurde erneut bewertet und eine zweite Variante zur Optimierung der Bauweise erarbeitet. Diese ermöglichte die Einsparung einer Werkzeugseite von drei auf zwei Werkzeuge und stellt damit ein relevantes Kostenpotential dar. Das Ergebnis dieser Entwicklungsschleifen wurde als Grundlage für ein fertigungs- und konstruktionstechnisch ausgereiftes Bauteil herangezogen. Dieses basiert prozesstechnisch auf dem vorhergehenden Entwicklungsstand 2 und ist im Prinzip in Abbildung 13 dargestellt.

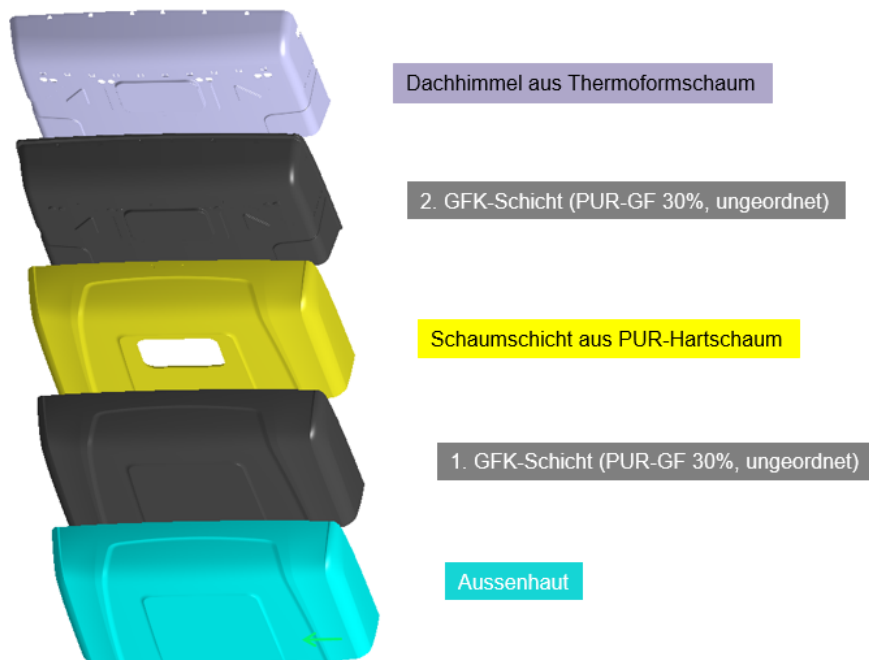


Abbildung 13: Explosionsdarstellung der zweiten Konstruktionsvariante

Anders als bei Variante 1 entfiel der zweite LFI-Sprüh- und Pressprozess zwischen den Schäumen. Die vorgefertigten und mit LFI umspritzten Schaumprofile fielen weg und wurden in die gesamte Dachstruktur eingebunden. Abbildung 14 zeigt das prinzipielle Aufbauschema der einzelnen Schichten der Variante 2. Hier gibt es keine separate Stützstruktur und der Ansatz des funktionsintegrierten Leichtbaus wird gezielt verfolgt.

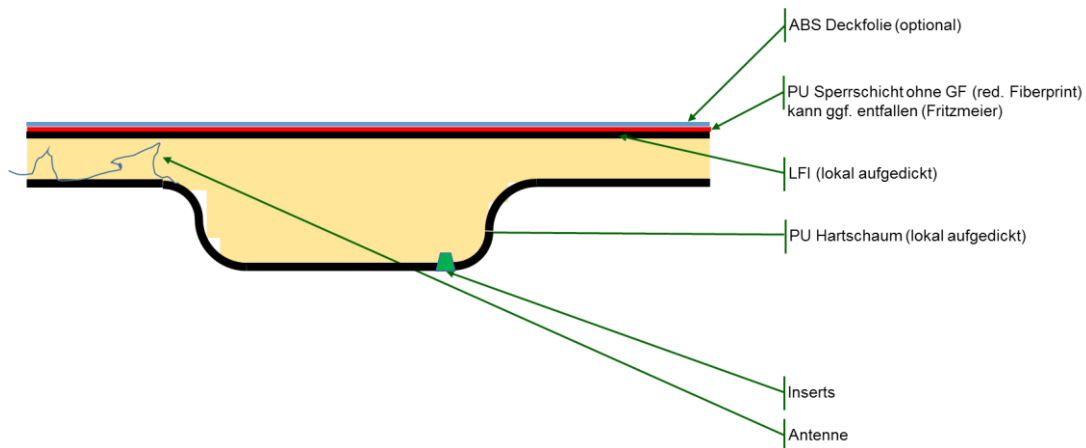


Abbildung 14: Prinzip Entwicklungsstand 2 und Detailansicht Sandwichaufbau CAD

Unter der Federführung des Fraunhofer ICT wurde bei Fritzmeier Composite ein gemeinsamer Workshop zur Bauteil- und Schnittstellenevaluierung veranstaltet. Bei Fritzmeier deshalb, weil durch die an deren Standort vorhandenen Produktionslinien, viele der in Frage kommenden Fertigungsverfahren, den Projektpartnern direkt veranschaulicht und erläutert werden konnte. Darauf aufbauend konnten wir eine systematische Bewertungsmatrix zur Analyse von Multi-Material-Bauweisen anhand ihrer Fertigungskonzepte zusammenstellen. Diese ermöglichte, die gemeinsam erarbeiteten Konzepte hinsichtlich der in AP1000 aufgeführten allgemeinen Anforderungen, unter Ergänzung und Gewichtung der aus dem Lastenheft stammenden Kriterien zu bewerten und im Konsortium zu diskutieren. Hierzu fanden mehrere Arbeitstreffen und Web-Meetings statt.



		Bearbeiter: wdz Erstelldatum: 29.09.2017 Änderungsdatum: 15.03.2018 Änderung durch: wdz Projektname: HylightCab Kunden/Pf: (BWL)	<b>Bauweisenanalyse HylightCab</b>															
<b>Bauweisen und Bewertungen</b>																		
Bewertung möglicher Bauweisen	Bauweise	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Beschreibung Skizzen, Schnitt, Draht-, CAD-Darstellung	Dichtung mit Tragelementen		Dichtung mit Tragelementen und separater Außenbohle		Dichtung mit Tragelementen		Dichtung mit Tragelementen		Dichtung mit Tragelementen		Dichtung mit Tragelementen		Dichtung mit Tragelementen		Dichtung mit Tragelementen		Dichtung mit Tragelementen
Material		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Gewicht		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Kosten		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Gesamtsumme		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<b>GESAMTSUMME</b>		3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813	3,813

Abbildung 16: Bauweisenanalyse mit gewichteten Bewertungskriterien, daraus resultierenden und priorisierten Konzepten

Final entschieden wir uns bei der Bauweise für ein strukturell aufbauendes, mehrschaliges Konzept, welches den hybriden Ansatz durch den materialdifferenzierenden Aufbau weiterverfolgt und durch seine Kombination unterschiedlicher Prozessschritte, verglichen mit den kommerziell kostentreibenden Vor- bzw. Nacharbeiten, wie z.B. Entgraten, Reinigen oder dem anschließenden Lackieren, einzelne Montageschritte einspart und somit bestehende Kostenfaktoren reduziert. Hinzu kommt der Aspekt des Leichtbaus, welcher durch lediglich lokal integrierte oder aufgebrauchte Verstärkungs- oder Funktionsstrukturen realisiert werden konnte.

Im Abgleich mit den in AP3000 erstellten CAD-Konstruktionen konnte so das AP2002 ergänzt und erfolgreich abgeschlossen werden.

Seitens KIT-FAST wurden hier Beiträge und Abschätzungen zu materialwissenschaftlichen und strukturmechanischen Fragestellungen geleistet.

### AP2003 Festlegung der Prozessroute

Nach dem Start der simultanen Topologieentwicklung, wurde die bauraumseitige Konzeptionierung des innovativen Strukturinnenträgers und die Ausführung des Staukastens als tragendes Bauteil ergänzt. Auch die Darstellung von Bauraumbedarfen hinsichtlich Dachhimmel sowie diversen Dämmungsmaßnahmen hinsichtlich Akustik und Wärmeisolation wurden als wichtige Punkte mit aufgenommen.

Außerdem befassten sich die Forschungen mit der Entwicklung eines hybriden Grundrahmens, der die doppelte Struktur zwischen Karosserierohrbau und Dachstruktur auflöst. Das Ziel

eines funktionsintegrierten Ansatzes sah vor, dass sich beide Baugruppen zu einer Struktur verbinden. Mit der Implementierung weiterer Lasten, aus den im Lastenheft beschriebenen Bauteilbelastungen, wurde die Machbarkeit des Konzepts frühzeitig abgeprüft.

Bei der Validierung der Bauweisen hat GreenIng, anhand der in diesem Projektstadium zur Verfügung stehenden Informationen, beratend unterstützt.

Zudem hat GreenIng ein „Mass-monitoring“ aufgesetzt, um den Projekterfolg in Bezug auf das Leichtbaukonzept frühzeitig sicherzustellen. Erste Ergebnisse lassen bereits Rückschlüsse auf ein erfolgreiches Projektergebnis zu. Eine ABS-Deckschicht konnte dadurch als Gewichtstreiber identifiziert werden. Hier konzentriert sich das Konsortium auf kostenbewusste Lösungen, um hier noch Gewichtspotentiale zu generieren.

Bei Fritzmeier und am Fraunhofer ICT wurden vorhandene Verarbeitungs- und Anlagentechnologien, sowie den Ergebnissen aus dem bei GreenIng veranstalteten Workshop zur Bauweisen-, Prozess- und Materialbeurteilung, konnte die zielorientierteste Prozessroute weiterverfolgt und im Detail betrachtet. Die Prozessroute vereint die Prozessschritte des mit Polyurethans hinterprühten thermoplastischen Folien-Tiefziehens mit lokal verstärkenden, durch im LFI-Prozess (Long Fiber Injection) aufgebraachte Verstärkungsstrukturen bzw. Sicken und zwischen äußerer und innerer LFI-Schicht eingebrachter Polyurethan-Schaumstruktur. Letztere dient zudem als thermische, wie auch akustische Isolierung und wurde parallel zur Herstellung der Außenschale, in einem separat gefahrenen Herstellungsprozess gefertigt. Sofern erforderlich und/oder gewünscht, könnte durch weiterführende Material- und Prozessanpassungen die so erarbeitete Prozessroute auch in nur einem Werkzeug, noch kosteneffektiver und zeitoptimierter, umgesetzt werden.

Darüber hinaus wurden zwecks weiterer Funktions- und Struktureinbringung das Lade- und Staufachsystem in die Dachstützstruktur integriert. Die so anzubindenden Struktur- und Verstärkungselemente konnten ebenfalls über ein Multimaterialdesign, mit Fokus auf den hybriden Leichtbau, über pultrudierte Kohlenstofffaserprofile und Aluminium-Sandwichbauteile realisiert werden. Somit finden sowohl thermoplastische, als auch duromere Prozesse und Verfahren Anwendung im späteren „HylightCab“ Demonstrator.

Eine finale Prozessroute konnte somit festgelegt und das AP2003 erfolgreich beendet werden. Bei der Festlegung der finalen Prozessrouten stand das KIT-FAST beratend zu Seite. Insbesondere bei der Beurteilung von sich im Prozess einstellenden Faserorientierungen (vgl. AP4003) bei Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen und dem bei Abkühlung auftretendem Bauteilverzug konnte sich das KIT-FAST aufgrund vorhandener Erfahrung einbringen. Die final ausgewählte Prozessroute vereint die Prozessschritte des mit Polyurethans hinterprühten thermoplastischen Folien-Tiefziehens mit lokal verstärkenden, durch im Long-Fiber-Injection-Prozess (LFI) aufgebraachte Verstärkungsstrukturen bzw. Sicken - 9 - und zwischen äußerer und innerer LFI-Schicht eingebrachten Polyurethan-Schaumstruktur. Letztere dient

zudem als thermische, wie auch akustische Isolierung und wurde parallel zur Herstellung der Außenschale, in einem separaten gefahrenen Prozess gefertigt. Sofern erforderlich und/oder gewünscht, könnte durch weiterführende Material- und Prozessanpassungen die so erarbeitete Prozessroute auch in nur einem Werkzeug, noch kosteneffektiver und zeitoptimierter umgesetzt werden. Darüber hinaus wurden zwecks weiterer Funktions- und Struktureinbringung das Lade- und Staufachsystem in die Dachstützstruktur integriert. Die so anzubindenden Struktur- und Verstärkungselemente konnten ebenfalls über ein Multimaterialdesign, mit Fokus auf den hybriden Leichtbau, über pultrudierte Kohlenstofffaserprofile und Aluminium-Sandwichbauteile realisiert werden.

### **AP2004 Materialauswahl / AP2005 Kennwertabsicherung für Materialdesign**

Durch die Vorstellung der am Fraunhofer ICT existierenden Prozesse und Besichtigung der Fertigungshallen von Fritzmeier Composite konnte die im Konsortium vorhandene Verarbeitungs- und Anlagentechnik zusammengestellt und den Projektpartnern aufgezeigt werden. Hierdurch ergab sich die Möglichkeit mit der Betrachtung später prozesstechnisch relevanter Materialien und Materialkombinationen frühzeitig zu beginnen. Mitunter wurden Materialien in Betracht gezogen, wie z.B. Polyolefine, Polyurethane oder Harzsysteme, basierend auf Phenol, Epoxid, Polyester oder hybriden Harzkombinationen. Auch in Kombination mit Aluminium, Stahl und weiteren Verstärkungsmaterialien wie Glasfasern, Kohlenstofffasern oder sofern einsetzbar auch basierend auf nachwachsenden Rohstoffen. Mit im Fokus war auch stets die Möglichkeit einer Substitution durch recyceltes Material.

Im Zuge der von der Rühl Puromer AG veranstalteten „Rühl Arena 2018“ und auch weiteren bei Rühl durchgeführten Materialabmusterungen konnten für das Projekt interessante Materialinformationen und Musterteile eingeholt werden. Darüber hinaus entstanden dabei interessante Kontakte zu bereits langjährig, im Themenfeld tätigen Industriefirmen.

Somit wurde aus den vorangehenden Arbeitspaketen abgeleitet und den im Konsortium verfügbaren Verarbeitungs- und Anlagentechniken die Dachaußenschale, die Stützstrukturen, wie auch die für das Interieur relevanten Materialien und Materialkombinationen näher betrachtet. Verwendung fanden dabei thermoplastische ABS-Tiefzieh-Folien, ein kompakt-schäumendes Polyurethansystem für sowohl akustische, wie auch thermische Isolierung im Kern, aber auch ein faserverstärktes PUR-System für die formstützende Dachaußenstruktur. Die lasttragende Stützstruktur des Hochdachaufbaus erfolgte über verstärkende Rippen und Sicken, die durch lokale Dicken sprünge im Sandwichaufbau umgesetzt wurden. Für die zusätzlich mittragende Dachstützstruktur im Stau- und Gepäckfach wurden Pultrusionsprofile aus kohlenstofffaserverstärktem Epoxydharz eingesetzt. Diese in Kombination mit aluminiumbasierten Sandwichstrukturplatten, die der Einhausung dienen und später in ihrer Kern-, als auch Deckschichtauswahl variabel aufgebaut werden können.



Mit Fokus auf die Dachaußenschale und relevanter Materialkennwerte für die vom KIT – FAST durchzuführende Struktursimulation konnten Grundlagenmaterialversuche zur Kennwertermittlung von LFI-Sandwichstrukturen mit in der Höhe variierendem PUR-Sandwichkern durchgeführt werden.

Es wurden insgesamt 18 PUR-Sandwich-Verbunde mit unterschiedlich konfektioniertem Aufbau hinsichtlich Kernmaterial, Kernstärke, Faseranteil in der Deckschicht und somit variierender Gesamtaufbaustärke geprüft. Aufgrund unterbrochener Prozessabläufe und somit unvollständig aufgebrachter Deckschichten kamen lediglich 15 der 18 Verbundaufbauten in die Gesamtauswertung.

Folgende Verbundaufbauten wurden hergestellt und geprüft.

Probenbez.	Deckschicht		Kernmaterial	Kernstärke	Anmerkung
	Material-Faser-Gew.-% / GFLänge	PUR-Austrag bzw. Stahlstärke			
4PB_1	PU-GF40 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	30mm	
4PB_2	PU-GF40 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	30mm	PU-Kern mittig zerschnitten und gefügt
4PB_3	PU-GF30 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	30mm	
4PB_7	PU-GF30 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	45mm	
4PB_8	PU-GF40 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	60mm	
4PB_9	PU-GF30 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	60mm	
4PB_10	PU-GF30 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	60mm	PU-Kern mittig zerschnitten und gefügt
4PB_11	PU-GF50 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	60mm	
4PB_12	PU-GF50 / 25mm	1200g/Seite	X-PET mod.	25mm	
4PB_13	PU-GF50 / 25mm	1200g/Seite	X-PET	25mm	
4PB_14	PU-GF40 / 25mm	1200g/Seite	X-PET mod.	25mm	
4PB_15	PU-GF40 / 25mm	1200g/Seite	X-PET	25mm	
4PB_16	PU-GF30 / 25mm	1200g/Seite	X-PET mod.	25mm	
4PB_17	PU-GF30 / 25mm	1200g/Seite	X-PET	25mm	
4PB_18	PU-GF40 / 25mm	1200g/Seite	Polyurethan	45mm	

Tabelle 1: PUR-Sandwich-Verbunde mit unterschiedlichen Kernmaterialien, Kernstärken und Faseranteilen in der Deckschicht

Die Probekörper wurden mehrere Tage bei Normklima 23°C/ 50% r.F. gelagert und anschließend einer 4-Punkt-Biege-Prüfung unterzogen. Je nach Sandwichstärke mussten die Probekörper unterschiedlich konfektioniert werden. Entsprechend der Gesamtverbundstärke, wurden nachstehend aufgeführte Probekörpergeometrien mit Länge (L) mal Breite (B) gewählt:

L x B bei Verbund-/Kernstärke 25mm → 600mm x 65mm

L x B bei Verbund-/Kernstärke 28mm → 720mm x 77mm

L x B bei Verbund-/Kernstärke 30mm → 720mm x 77mm

L x B bei Verbund-/Kernstärke 42mm → 1080mm x 115mm

L x B bei Verbund-/Kernstärke 45mm → 1080mm x 115mm

L x B bei Verbund-/Kernstärke 60mm → 1440mm x 152mm

Die zu prüfenden Proben wurden aus jeweils oberflächenunversehrten Plattenstellen entnommen und entsprechend der DIN 53 293, Prüfung von Kernverbunden, geprüft. Die Prüfung erfolgte auf einer Universalprüfmaschine Hegewald & Peschke Inspekt-Table-50kN (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Universalprüfmaschine Hegewald & Peschke mit 4-Punkt-Biege-Vorrichtung und Kernverbundprobe nach DIN 53 293

Nachstehend sind die Mittelwerte der Materialkenngrößen nach Probenhöhe sortiert und farblich gegenübergestellt (rot: niedrigster Kennwert, grün: höchster Kennwert).

Höhe 25							
NAME	4PB_sf[MPa]	Fmax[N]	WbKmax[mm]	4PB_M[Nmm]	4PB_s[MPa]	4PB_tk[MPa]	Gewicht
12	10,18	781,18	11,84	48823,43	22,43	0,27	166,0
13	14,16	1110,68	13,00	69417,70	29,88	0,37	204,2
14	9,56	724,38	14,60	45273,43	36,40	0,24	147,2
15	8,36	644,08	14,06	40255,02	30,39	0,21	145,7
16	8,08	610,53	17,43	38158,35	30,71	0,20	138,7
17	7,47	565,30	16,66	35331,25	24,57	0,19	135,7
Höhe 30							
NAME	4PB_sf[MPa]	Fmax[N]	WbKmax[mm]	4PB_M[Nmm]	4PB_s[MPa]	4PB_tk[MPa]	Gewicht
1	4,18	535,74	13,21	40180,30	20,50	0,11	191,8
2	5,16	672,99	15,48	50474,26	26,96	0,14	203,1
3	4,54	593,10	15,87	44482,48	37,27	0,12	210,1
Höhe 45							
NAME	4PB_sf[MPa]	Fmax[N]	WbKmax[mm]	4PB_M[Nmm]	4PB_s[MPa]	4PB_tk[MPa]	Gewicht
7	2,85	771,83	21,73	86830,33	21,73	0,07	530,6
18	3,46	935,34	20,08	105225,95	25,78	0,09	577,1
Höhe 60							
NAME	4PB_sf[MPa]	Fmax[N]	WbKmax[mm]	4PB_M[Nmm]	4PB_s[MPa]	4PB_tk[MPa]	Gewicht
8	2,43	1173,61	23,91	176041,50	21,94	0,06	1171,9
9	2,03	971,76	26,76	145763,75	20,54	0,05	1106,9
10	2,51	1220,44	30,42	91533,10	24,75	0,13	279,7
11	2,93	1415,05	22,22	212257,50	38,42	0,08	1304,5

Tabelle 2: Ergebnistabelle mit gegenübergestellten Materialkennwerten

Die in den Ergebnistabellen aufgeführten Kürzel stehen für folgende Werte:

4PB_sf = 4PB_Biegespannung
Fmax = Maximalkraft (global)
WbKmax= Weg bei Maximalkraft
4PB_M = 4PB_Biegemoment
4PB_s = 4PB_Druckspannung der Deckschicht
4PB_tk = 4PB_Schubspannung

Tabelle 3: Erläuterung der in der Ergebnistabelle aufgeführten Kürzel

Die bislang herangezogenen Material-, Verfahrens- und Prozesskennwerte basierten auf bestehenden Parametern und wurden somit stets durch die im späteren Demonstrator eingesetzten Materialkennwerte ergänzt und ersetzt.

Im anschließenden Schritt wurden die Oberflächen der abgemusterten Bauteile hinsichtlich oberflächennaher Fehler und Faserabzeichnungen charakterisiert, wie auch die innenliegenden Dachstrukturen und Materialkombinationen näher untersucht. Die Kennwertabsicherung erfolgte in direkter Ergänzung der in AP4001 durchzuführenden Materialkennwertermittlungen. Durch die Materialauswahl, die ersten Materialkennwertabsicherungen und die Festlegung der Prozessroute in AP2003, wurde der Meilenstein der Konzeptstudie erfolgreich erreicht.

Darauf aufbauend fand die Planung der Abmusterungsversuche für die generischen Bauteile statt. Die dafür notwendigen, weiteren Abstimmungen hinsichtlich Materialkompatibilität, Prozesseignung, Modifikation und Verarbeitung erfolgte stets zwischen dem Systemlieferanten Rühl Puromer und dem Fraunhofer ICT, ebenso die Beauftragung und Bereitstellung für die Versuche im Technikum des Projektpartners Fritzmeier Composite in Bruckmühl. Bei der Abmusterung der Materialien war das Fraunhofer ICT vor Ort und unterstützte.

Zum Einsatz kamen nachstehende Polyurethansysteme:

- Rühl puropreg 569 IT schwarz
- Rühl EP 3587/2 (Isolationsschaum)
- Rühl puronate 900

Bei den ausgewählten Materialien handelt es sich um 2K-Polyurethansysteme, deren jeweilige B-Komponente, puronate 900, identisch ist. Dies erlaubte ein flexibel programmierbares und vor allem prozessoptimiertes Austragen der Materialien, bei gleichzeitig reduzierter Zykluszeit durch Wegfall des Materialwechsels der B-Komponente.

Rühl puropreg 569 IT schwarz ist ein Hartintegralschaum mit einem Raumgewicht von ca. 210 kg/m<sup>3</sup>. Mit und ohne Zusatz von Fasern eignet er sich bestens für monolithische oder als Sandwich aufgebaute Bauteile in der Sprühtechnologie.

Rühl EP 3587/2 ist ein für unseren Zweck modifizierter Hartschaumstoff (Entwicklungsprodukt, EP) auf ähnlicher Polyetherpolyolbasis wie puropreg 569 IT schwarz, jedoch bei 43 kg/m<sup>3</sup> mit einem wesentlich geringeren Raumgewicht. Der Schaum eignet sich zur Herstellung von Polyurethanhartschaumstoffen mit isolierender Wirkung. In unserem Anwendungsfall kommt er zur Herstellung des druckstabilen Sandwichkerns zum Einsatz.

Beim puronate 900 handelt es sich um die zweite Komponente, B-Komponente der beiden Polyolsysteme. Ein flüssiges, lösungsmittelfreies Diphenylmethandiisocyanat (MDI). Es ist besonders gut für Isolations- und Verpackungsschaumstoffe sowie zur Herstellung von Teilen aus Halbhart- und Hartintegralschaumstoffen und Coatings geeignet.

Basierend auf den bisher durchgeführten Bauraumoptimierungen konnten die wichtigsten Lastpfade identifiziert werden. KIT-FAST konnte hier Vorschläge einbringen, um das aus strukturelle am besten geeignete Material zu finden. Neben der in AP2003 ausgewählten Material- und Prozesskombination für die Außenschale wurden für die zusätzlich mittragende Dachstützstruktur im Stau- und Gepäckfach wurden Pultrusionsprofile aus kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz eingesetzt. Diese in Kombination mit aluminiumbasierten Sandwichstrukturplatten, die der Einhausung dienen und später in ihrer Kern-, als auch Deckschichtauswahl variabel aufgebaut werden können. Die Auswahl der Materialien erfolgte u.a. mithilfe von durch das KIT-FAST erstellten Materialauswahldiagrammen, wie in Abbildung 18 gezeigt.

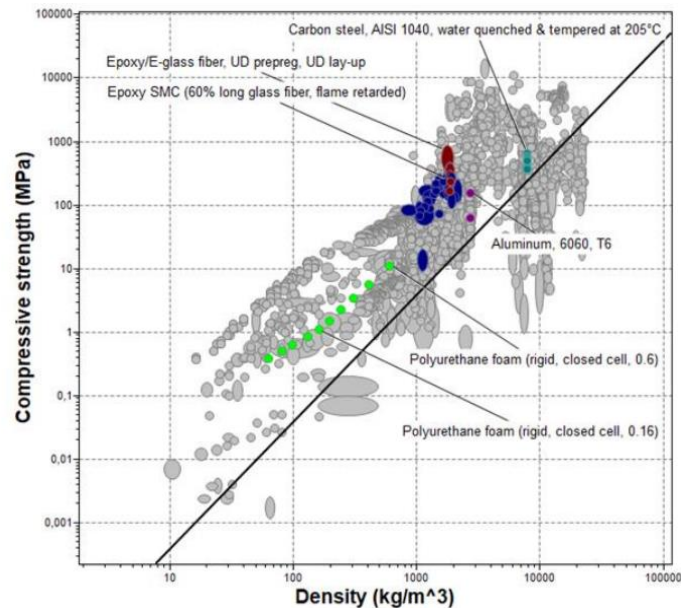


Abbildung 18: Materialauswahldiagramm für maximale Druckfestigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte

Im Rahmen der Kennwertabsicherung wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Fraunhofer ICT ein experimenteller Versuchsplan aufgestellt, der die Identifikation aller für die Simulation benötigten Materialparameter erlaubt. Für die Charakterisierung der LFI-Sandwich-Struktur wurden insgesamt 18 Konfigurationen untersucht, die sich hinsichtlich der Deckschichtdicke, Kernmaterial, Kerndicke und Faservolumengehalt der Deckschicht unterscheiden. Die Materialien wurden im Vier-Punkt-Biegeversuch am Fraunhofer ICT getestet und gemeinsam ausgewertet. Für Details zu Versuchsaufbauten und für eine umfangreiche Zusammenstellung aller ermittelten Kennwerte sei auf den Schlussbericht des Verbundpartners Fraunhofer ICT verwiesen.

### AP 3 Konstruktive Bauteilkonzeption

In diesem Arbeitspaket setzte GreenIng den Fokus auf die Konstruktion und die detaillierte Ausarbeitung des Daches sowie des Staufaches. Das Dach wurde konstruktiv auf eine am Markt verfügbare LKW-Kabine angepasst und mittels Klebe- sowie Schraubverbindung montagegerecht ausgeführt. Für die Verbindung zwischen Dach und Kabinenrohbau wurden Metallblech-Inserts entwickelt, die im Dach integriert sind und den Formschluss zum Sandwich sowie zur Kabine mittels Schraubverbindung darstellen. Zudem wurden im Bauteil alle prozesstechnisch relevanten Entformungswinkel auf die Innen- und Außenflächen der Dachform angewendet. Hier war es notwendig, eine erneute Konstruktionsschleife zu durchlaufen, da der Winkel nicht wie erwartet durch die Werkzeugöffnung, sondern durch die Anhaftung beim Aushärten des LFI am Werkzeug bestimmt wurde.

Die in AP2 beschriebenen Erkenntnisse wurden im AP3 in zweierlei Hinsicht in die Konstruktion mit einbezogen. Die Variante 2 der Bauweise floss in die Gesamtkonstruktion des Daches mit ein. Darüber hinaus konstruierte GreenIng Musterbauteile, um für die detaillierte Charakterisierung Referenzbauteile nutzen zu können.

### **AP 3001 Konstruktive Bauraumabgrenzung**

In diesem AP hat das Fraunhofer ICT den AP-leitenden Projektpartner GreenIng bei der Ergänzung und Übertragung der Lastfälle auf Kunststoffbauweise beratend begleitet. GreenIng hat unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der Topologiestudie, wie oben beschriebenen, sowohl die Lasteinleitungspunkte, als auch die endgültige Außenkontur (siehe Abbildung 19) und ihre Abgrenzung zum Karosserierohbau festgelegt. Des Weiteren wurde das Konzept hinsichtlich technischer Machbarkeit weiter ausdetailliert und abgesichert.

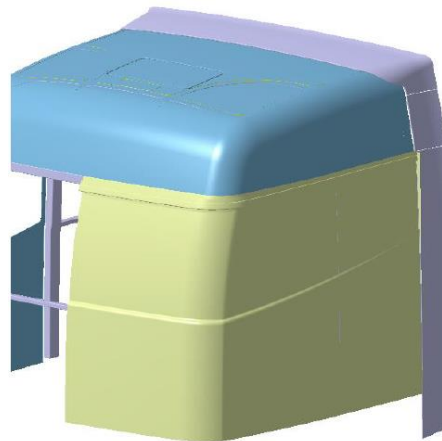


Abbildung 19: Designmodell Kabine (ohne Fugenbild)

Die Position und Geometrie der Anbindungsfläche und Anschraubpunkte (Schnittstellen) des Daches an eine Kabinenstruktur wurden festgelegt und konstruktiv ausgeführt. Daraus folgte die Definition der Lasteinleitungspunkte und Randbedingungen für die weitere simulative Ausarbeitung.

### **AP 3002 Entwicklungsvariante mit Ableitung der Ecktypen**

Im Arbeitspaket 3002 wurde der Baukasten abgeleitet. Daraus resultierte eine zusätzliche Dachvariante, welche virtuell untersucht wurde. Dabei wurde das im AP2 erforschte Konzept auf den neuen Anwendungsfall übertragen. Hierfür wurde der schwere Verteilerverkehr als relevant identifiziert, da durch das flachere Dach und niedrigere Aufsetzhöhen der Kabine im Zusammenspiel mit hohen Koffer- oder Planaufbauten der Dachspoiler sehr groß wird und

damit eine hohe Windlast entsteht. Es wurde der Einfluss auf die Lastenleitungsstellen in das Dach virtuell erforscht.

Des Weiteren wurde in Form eines Giga-Space Hochdaches eine weitere Entwicklungsvariante untersucht, die durch einen höheren Dachaufbau ein größeres Staufachvolumen ermöglicht. Hier wurde ebenfalls virtuell die Anpassbarkeit des Konzepts auf die abweichende Variante geprüft. Da der Fertigungsablauf festgelegt ist, wurden in dem Bauteil konstruktiv alle Fertigungsrandbedingungen berücksichtigt und umgesetzt. Dies bezieht sich insbesondere auf Entformungsschrägen und Entformungswinkel sowie Entlüftungsgeometrien, Radien und Kanten.



Abbildung 20 Darstellung unterschiedlicher Dachaufbauten, Spoilern und Aerodynamikpaketen

Abbildung 20 zeigt mögliche Aufbauvarianten verschiedener LKW-Hersteller. Je nach Aufbau des daran anschließenden Trailers, müssen diese Windleitsysteme auch in der Höhe verstellbar sein. Hierfür müssen weitere Eckpunkte berücksichtigt und eine Montagemöglichkeit vorgesehen werden.

### AP 3003 Konzeption Baukasten

GreenIng untersuchte die unterschiedlichen Dachvarianten hinsichtlich der Möglichkeiten einzelne Bauteile zu vereinheitlichen. Dies soll die Varianz der Einzelteile des Baukastens minimieren. Ein wesentliches Potenzial diesbezüglich zeigt das Staufach als Baugruppe, welches sich in die unterschiedlichen Dachkonzepte integrieren lässt. Zudem können einzelne Komponenten, wie die im Rahmen des Projekts entwickelten Metallblech-Inserts verwendet werden. Basierend auf den Ergebnissen aus AP3002 wurde ein Variantenbaukastensystem abgeleitet. Dieses wurde kontinuierlich ergänzt, ausgearbeitet und schließlich in die von GreenIng erarbeiteten Topologien und teilweise einzeln herstellbare Produktbauteile überführt. Gerade bei deren Auslegung und multimaterialien Kombination, insbesondere im Bereich der Fügeverbindungen und eventueller Vorbehandlungen zur dauerhaften Anbindung der unterschiedlichen Materialien war das Fraunhofer ICT beteiligt.

### AP 3004 Bauteil/Modulkonstruktion

In diesem Arbeitspaket stand die Konstruktion und die detaillierte Ausarbeitung des Hochdaches sowie des Staufaches im Vordergrund. Das Dach wurde konstruktiv auf eine am Markt verfügbare LKW-Kabine angepasst und mittels Klebe- sowie Schraubverbindung montagegerecht ausgeführt. Für die Verbindung zwischen Dach und Kabinenrohbau wurden Metallblech-Inserts entwickelt, die im Dach integriert sind und den Formschluss zum Sandwich sowie mittels Schraubverbindung zur Kabine, darstellen. Zudem wurden an diesem Bauteil alle prozesstechnisch relevanten Entformungswinkel auf die Innen- und Außenflächen der Dachform angewendet. Hier war es notwendig, eine erneute Konstruktionsschleife zu durchlaufen, da der Winkel nicht wie erwartet durch die Werkzeugöffnung, sondern durch die Anhaftung beim Aushärten des LFI am Werkzeug bestimmt wurde. Dieser Teil war entscheidend für den späteren Fertigungsablauf und die vorhergehende Werkzeugkonzeption. Die erforderlichen Kenntnisse wurden aus den Untersuchungen mit dem simulativ abgeprüften Konstruktionsdatensatz des Hochdachs sowie dem Knowhow der Projektpartner gewonnen. In einem nächsten Schritt wurden aus der akribischen Materialanalyse finale Änderungen für die verstärkende Schaumstruktur abgeleitet. Diese wurden in die Konstruktion eingearbeitet. Die tragenden Eigenschaften des Staukastens sowie die Geometrie der Schaumstruktur wurden aufeinander abgestimmt, um hier möglichst leichte und dünne Materialschichten zu erreichen. Durch diese strukturelle Integration des Staukastens konnte ein enormes Leichtbaupotential erzielt werden. Zusätzlich wurden gezielte Applikationen in die Designfläche des Hochdachs integriert, die neben einem Regenlauf auch konstruktive Maßnahmen zur Abdichtung sowie aerodynamischen Optimierung der Schnittstelle zwischen Fahrerhaus und Leichtbaudach beinhaltet. Abbildung 21 zeigt die Designfläche des Daches mit integriertem Regenlauf im CAD. Dies ermöglicht im Realbetrieb die gezielte Ableitung von Regenwasser nach hinten und reduziert somit die Verschmutzung der Seitenscheiben was eine zusätzliche Sicherheit durch eine bessere Sicht im alltäglichen Betrieb bringt.

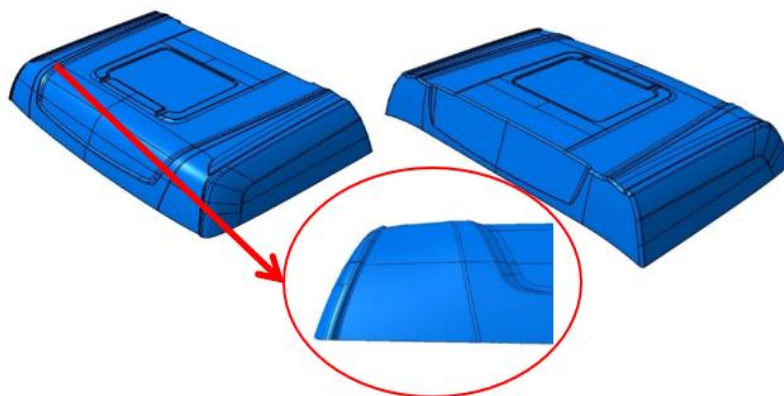


Abbildung 21: Designfläche des Hochdachs mit integriertem Regenlauf



Um die verstärkende Sandwichstruktur des Hochdachs herstellen zu können, wurden analog zur oben erwähnten Variante einzelne Schaumkerne konstruiert, die in das Werkzeug eingelegt und dann von LFI im Werkzeug umspritzt wurden. Abbildung 22 zeigt diese Schaumkerne.

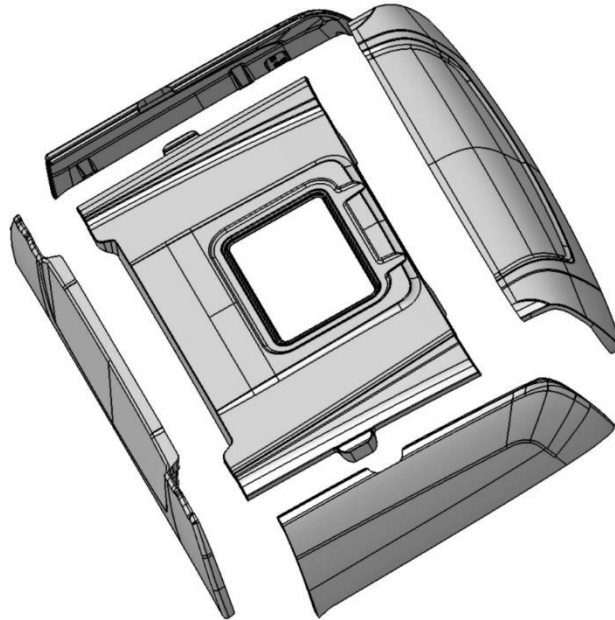


Abbildung 22: PUR-Schaumkerne

Das Konzept eines tragenden Staukastens wurde von GreenIng konzeptioniert. Hierbei wurde in mehreren Konstruktionsschleifen ein, hinsichtlich des Stauraum und Belastbarkeit optimierter Konstruktionsstand abgeleitet. Beim Staukasten wird der materialhybride Ansatz durch u.a. die Erforschung des Einsatzes von GFK-Pultrusionsprofilen und Papierwabensandwiches verfolgt. Es wurden verschiedene Methoden zur strukturellen Integration der Staufachkomponenten ins Dach ausgearbeitet und bewertet. Das Staufach wurde nicht, wie ursprünglich geplant, in Sandwichbauweise hergestellt, sondern durch eine Aluminiumwabenstruktur, welche durch ein Pultrusionsprofil als Querträger unterstützt wird. Die Verwendung eines Papierwabenkerns für die Sandwichstruktur wurde aufgrund der geometrischen Komplexität der Strukturen verworfen. Das Material für Boden, Seitenwand und Rahmen des Staukastens besteht nun ausschließlich aus einem ebenen Plattenmaterial mit Wabenkern. Hier kann ein optimales Steifigkeits- Gewichtsverhältnis erzielt werden. Allerdings ist man aus designtechnischen Gründen etwas eingeschränkt.

Zur Montage werden klebende Verbindungen eingesetzt, wofür entsprechende Klebeflansche in die Dachstruktur integriert sind. Die Form des Daches wurde ebenfalls mit Designflächen präzisiert und dem Stand der Technik entsprechend gestaltet.

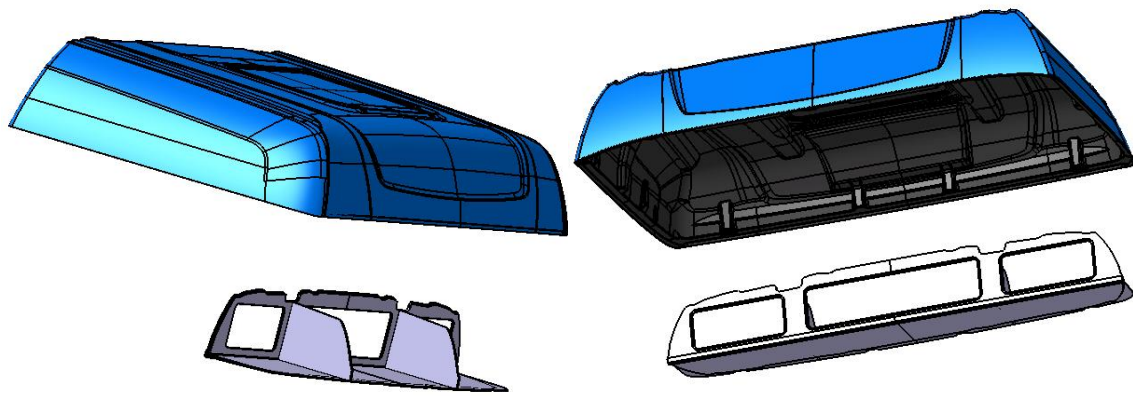


Abbildung 23: Darstellung des Daches mit Staukasten

Die Abbildung 23 zeigt das konzipierte Staufach als Explosionsdarstellung mit dem finalen Konstruktionsstand des Hochdachs und die Abbildung 24 ein finales Rendering der Komponenten.

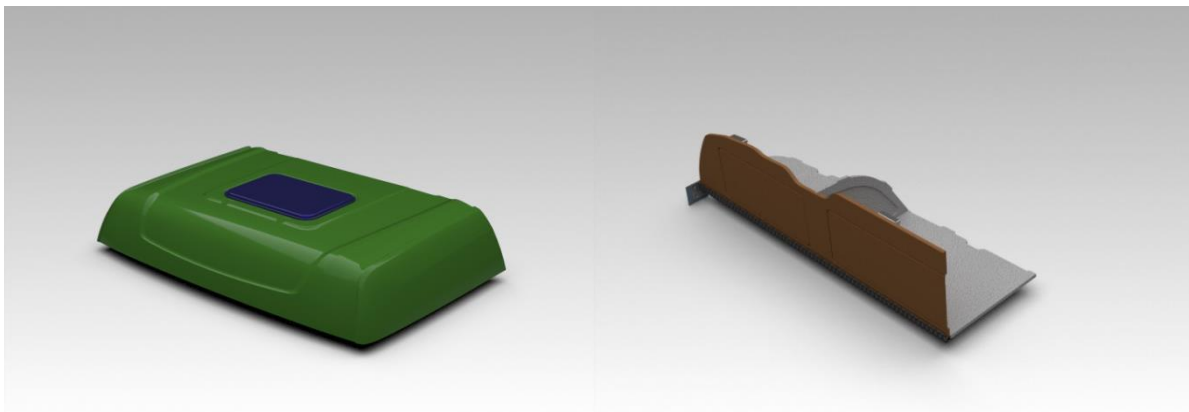


Abbildung 24: Finale Darstellung des Hochdachs und des Staukastens

Anhand der Festigkeitsanforderungen sowie der Bauraum- und Montagevorgaben, wurden abschließend die Befestigungspunkte des Staukastens im Hochdach konstruktiv eingearbeitet. Ein weiterer Punkt im Konstruktionsprozess, hinsichtlich des Staukastens, war die Berücksichtigung der Montageabfolge aller Komponenten des Daches und des Staukastens. Daraus folgend erreichte das Dach den Freigabestand für die Herstellung und wurde im Konsortium als Zielvariante definiert.

Im weiteren Verlauf wurde ein Klappmechanismus sowie ein Verschluss für die entsprechenden Staufachklappen hinzugefügt. Es wurde beschlossen für diese Bauteile einen Lieferanten mit einem ausgereiften Produktportfolio und dem notwendigen Knowhow heranzuziehen. Im Bereich der Staufachöffnungen wurden Aluminiumbleche vorgesehen, die mittels

Klebeverfahren appliziert werden, um zum einen den Lichtspalt zu reduzieren und zum anderen Standardbauteile des Fahrzeugzulieferers einsetzen zu können. Für diese Bauteile wurden die finalen konstruktiven Anpassungen umgesetzt. Nach Absprache mit den Projektpartnern wurde eine einfache Umsetzung bevorzugt, da hier keine Leichtbau- und Strukturbauteil bedingten Anforderungen erfüllt werden müssen und die Nutzfahrzeughersteller ohnehin ihre individuellen Lösungen und Designs bevorzugen.

In AP3004 wurde die Konstruktion des Hochdachs beendet. Ein erstes Gewicht für das Hochdach konnte daraufhin aus der Konstruktion abgeleitet werden. Die Konstruktion wurde mittels beanspruchungsgerechter Simulationen von KIT-FAST abgesichert. Des Weiteren wurde die Materialstärken der LFI-Schicht weiter reduziert um eine „design-to-limit“-Variante zu entwickeln. Weitere Gewichteinsparpotentiale wurden erarbeitet.

Für das oben beschriebene Konzept eines LKW-Hochdachs in Sandwichbauweise haben sich folgende Einzelgewichte ergeben, welche addiert zu einem Gesamtsystemgewicht von 55,95 kg führen.

	Gewicht in kg HyLightCab
<b>Dach</b>	<b>47,55</b>
Folie (1&2) (1,05 kg/dm <sup>3</sup> )	4,25
LFI (1,9 kg/dm <sup>3</sup> )	20,8
Schaumkerne (0,2 kg/dm <sup>3</sup> )	21,7
Blecheinleger	0,8
<b>Staufach</b>	<b>8,4</b>
2x Trennwand	0,7
Bodenplatte	5,0
Pultrusionsprofil	0,7
Rahmen	2,0
<b>Gesamtgewicht</b>	<b>55,95</b>

Tabelle 4 Einzelgewichte der Komponenten

## AP3005 Ableitung Konzept generisches Demonstratorbauteil

Aufbauend auf den vorangehenden Arbeitspaketen der Topologieoptimierung, der konstruktiven Bauraumbegrenzung und der Ableitung weiterer Varianten des Dachmoduls, konnte ein generisches Demonstratorbauteil konzeptionell erstellt werden. Konstruktiv wurde dieses stets weiter im Detail ausgearbeitet und basierend auf den ergänzenden Materialkennwerten aus AP2005 und AP4001 modifiziert. Der anvisierte Halbzeitmeilenstein wurde somit erreicht. Nach mehreren Abstimmungsterminen und Projektreffen konnte mit der Umsetzung und Fertigung des bereits konzeptionell erstellten generischen Demonstratorbauteils begonnen werden. Konstruktiv umgesetzt wurde es durch den Projektpartner Siebenwurst. Dabei unterstützte das Fraunhofer ICT konstruktiv, wie auch beratend vor Ort. Sowohl das Grundwerkzeug, ein Inlay-Rahmenwerkzeug mit unterschiedlichen Werkzeugeinsätzen, wie auch die CAD-Daten des Werkzeuges lieferte das Fraunhofer ICT. Bei dem Grundwerkzeug handelt es sich um ein aus dem vorangehend, geförderten Projekt „PURTrain“ stammendes Werkzeug, welches durch seinen modularen Aufbau für unterschiedliche Prozesstechnologien eingesetzt und umgebaut werden kann. Dabei dient es mit seinem Rahmenaufbau als Träger für unterschiedliche Einsätze, ohne dass diese eine extra Temperierung benötigen, da die bereits im Grundwerkzeug integriert ist.

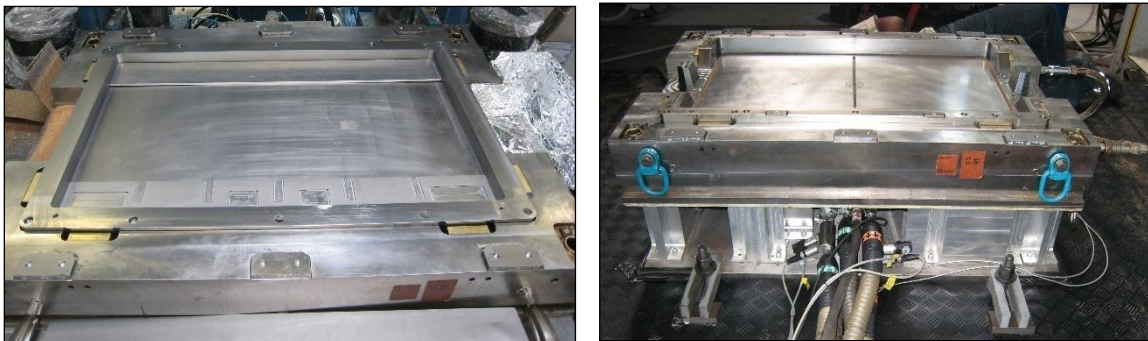


Abbildung 25: PUR-RTM-Werkzeug mit unterschiedlichen Inlays

Abbildung 25 zeigt das PUR-RTM-Werkzeug mit den jeweiligen Inlay-Varianten. Links der Werkzeugeinsatz zur Herstellung monolithischer oder als Sandwich konfektionierter Bauteile im PUR-Fasersprüh- (FCS) bzw. LFI-Prozess. Rechts das Werkzeug mit zusätzlichem Unterbau zur Montage des Injektionsmischkopfes von unten zur mittigen Infiltration von Faserhalbzeugen und in der Kavität seitlich angeordneten Vakuum-Entlüftungs-Domen.



Abbildung 26: Einfahrversuche im Technikum von Fritzmeier Composite

Abbildung 26 zeigt das für die Einfahrversuche bei Fritzmeier Composite aufgespannte PUR-RTM-Rahmenwerkzeug. Daneben abgebildet sind die zwecks Sprühbahnoptimierung durchgeführten unverpressten LFI-Platten.

Durch das bereits vorhandene und zur Verfügung gestellte Werkzeug konnte ein großer Teil des zeitlichen Projektplanverzugs wieder aufgeholt werden. Zudem ermöglicht es uns einen Teil der im Antrag veranschlagten Werkzeugkosten in technisch aufwendigere oder zusätzliche Werkzeuge zu investieren.

Zu Beginn des Arbeitspaketes wurde ein generisches Demonstratorbauteil zur Prüfung und später skalierbaren Übertragung der Dimensionen auf das finale Demonstratordach erstellt. Dabei handelte es sich um ein im Maßstab 1:5 generiertes Hochdachmodul. In mehreren Treffen und Abstimmungsrunden kamen wir zum Entschluss, dass mit dem generischen Bauteil nicht alle gestellten Lastanforderungen auf das später zu prüfende Demonstratorbauteil übertragen werden können und es sinnvoller ist, die am Dach auftretenden Dickensprünge und Wandstärkendifferenzen des Daches in Form monolithischer LFI- und Sandwichbauteilen abzumustern und zu untersuchen.

Abbildung 27 zeigt den ursprünglich mit Siebenwurst generierten Demonstrator in Form eines kleinen „Hochdachmoduls“ als Werkzeug-Inlay (oben) im Grundrahmenwerkzeug des Fraunhofer ICT und das später erstellten Sandwich-Inlay (unten).

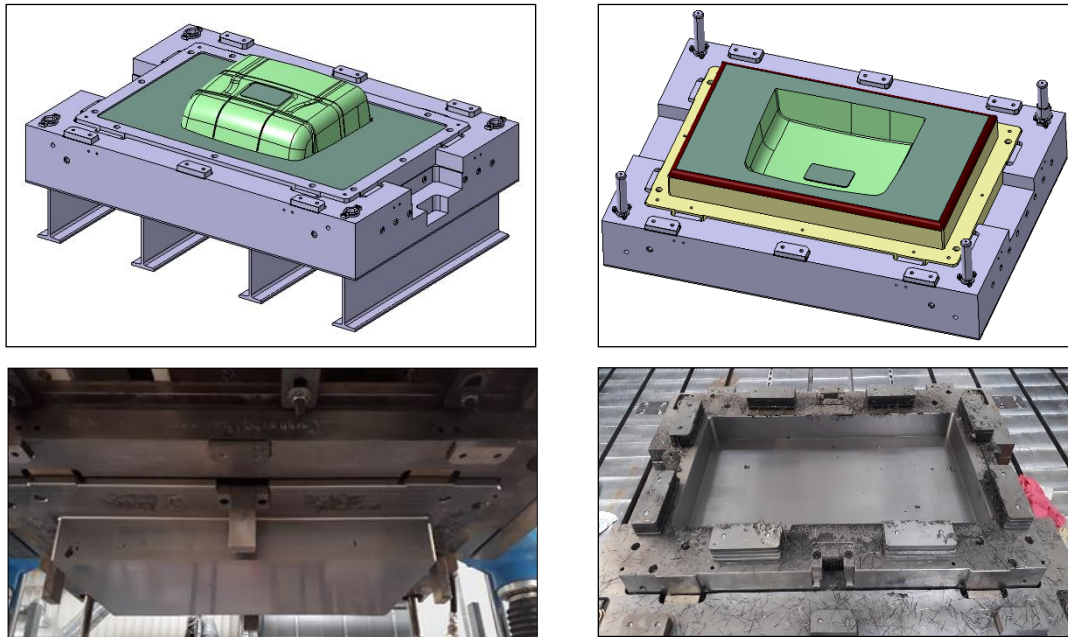


Abbildung 27: ursprünglich generischer Demonstrator und finales Sandwich-Inlay

Bei der Erstabmusterung in KW 20/2019 konnten fast alle relevanten Material- und Prozessparameter evaluiert werden. In der darauffolgenden Versuchskampagne in KW 29-30/2019 bei Fritzmeier Composite wurden mit dem neuen Inlay unterschiedliche LFI-Plattenkonfigurationen, Sandwichkerne, wie auch Sandwichplatten mit nachstehend aufgeführten Prozessparametern abgemustert:

- PU-Austragsmenge: 480–1100g
- Glasfaserlängen: 12,5 / 25mm
- Faseranteil: 25 / 35 / 45 / 55%
- Porengehalt (errechnet): 0–55%
- Schaumkernstärken: 13 / 16 / 21 / 31mm

Gemeinsam mit dem KIT – FAST wurden die Material- und Prozessparameter so gewählt, dass nahezu alle im Hochdach später zu realisierenden Wand- bzw. Schaumkerndicken, lokalen Verstärkungen und Rippen, wie auch unterschiedlich auftretende Porengehalte im PUR-Matrixmaterial abgemustert werden konnten. In der letzten Versuchskampagne wurden so die in Tabelle 5 aufgeführten LFI- und Sandwichprüfplatten zur Kennwertermittlung hergestellt. Damit entstand ein wesentlich höherer Prüfumfang bzw. -aufwand als vormals geplant.

Allgemeines:										Eintragsbahnen: 4 Bahnen				Schusszeit: 6 sec.		PU Dichte		Porositäten	
schlechte Trennwirkung vor allem im niedrig verdichteten Zustand										Distanz: 12mm		-> entspricht 3mm Bauteildicke				1,16		0	
viele Poren bei wenig Glasgehalt										Aushärtezeit 480 sec									
										Werkzeugtemp. 75°C									
										Schließdruck: 50/90 bar									
										Plattendimension: 800*400 mm									
										Schließzeit Werkzeug: Schusszeit+20sec.									
Datum	Schuß-Nr.	Bauteil-Nr.	PU Menge	Schusszeit	Durchfluß	eingestellter Glasgehalt [%]	Faserlänge	Gesamtgewicht inkl. Austrieb	Gewicht Platte	Plattendicke	errechnete PU Menge	errechnete Glasmenge	errechnete Dichte	errechneter Glasgehalt	Volumen-Anteil Glas	PU Dichte	Porosität	Oszillieren	
			[g]	[sec]	[g/sec]	[%]	[mm]	[g]	[g]	[mm]	[g]	[g]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]				
15. Jul		1	1100			25	25	1444	1286	3,05	942	344	1,34	26,7%	14%	1,12	3	3/9,5	
15. Jul		2	1100			25	25	1454	1284	3	930	354	1,34	27,6%	15%	1,14	2	3/9,5	
15. Jul		3	1100			35	25	1656	1425	3	869	556	1,48	39,0%	23%	1,18	0	3/7,0	
16. Jul	1	4	1100			35	25	1656	1420	3,02	864	556	1,48	39,2%	23%	1,16	0	3/7,0	
16. Jul	2	5	1100			35	25	1652	1420	3,15	868	552	1,48	38,9%	23%	1,10	5	3/5,0	
16. Jul	4	6	1100			45	25	1912	1630	3,08	818	812	1,70	49,8%	34%	1,24	0	3/5,5	
16. Jul	5	7	1030			45	25	1815	1563	3,02	778	785	1,63	50,2%	33%	1,19	0	3/5,5	
16. Jul	8	970	7	138,57		55	25	2037	1839	3,27	772	1067	1,92	58,0%	44%	1,25	0	2,8/9,0	
16. Jul	9	850	6	141,67		55	25	1749	1666	3,12	767	899	1,74	54,0%	37%	1,20	0	2,8/5,5	
16. Jul	14	10	850	6	141,67		55	1742	1634	3,08	742	892	1,70	54,6%	37%	1,18	0	2,8/5,5	
16. Jul	15	11	850	6	141,67		55	1744	1632	3,21	738	894	1,70	54,8%	37%	1,10	5	2,8/5,5	
16. Jul	2	12	850	6	141,67		55	1800	1680	3,21	730	950	1,75	56,5%	40%	1,13	3	2,8/5,5	
16. Jul		13	1100	6	183,33		25	1455	1260	3,03	905	355	1,31	28,2%	15%	1,09	6	3/4,0	
16. Jul		14	1100	6	183,33		25	1453	1251	3,15	898	353	1,30	28,2%	15%	1,04	11	3/4,0	
16. Jul		15	1100	6	183,33		25	1441	1267	3,01	926	341	1,32	26,9%	14%	1,12	3	3/4,0	
16. Jul	7	16	1100	6	183,33		25	1449	1258	2,99	909	349	1,31	27,7%	15%	1,11	4	3/4,0	
17. Jul	1	17	900	6	150		25	1178	1125	2,99	847	278	1,17	24,7%	12%	1,00	14	3/4,0	
17. Jul	2	18	900	6	150		25	1185	1125	3,08	840	285	1,17	25,3%	12%	0,96	17	3/4,0	
17. Jul	3	19	900	6	150		35	1362	1295	3	833	462	1,35	35,7%	19%	1,07	7	3/4,0	
17. Jul	4	20	900	6	150		35	1359	1295	2,97	836	459	1,35	35,4%	19%	1,09	6	3/4,0	
17. Jul	5	21	800	5,5	145,45		45	1418	1371	2,99	753	618	1,43	45,1%	26%	1,06	9	3/4,0	
17. Jul	6	22	800	5,5	145,45		45	1414	1368	3,13	754	614	1,43	44,9%	26%	1,00	14	3/5,5	
17. Jul	7	23	750	5	150		55	1585	1550	3,5	715	835	1,61	53,9%	35%	0,91	22	3/6,5	
...																			
19. Jul	18	72	600	5	120		35	899	886	2,92	587	299	0,92	33,7%	12%	0,72	38		
19. Jul	19	73	700	5	140		35	1052	1033	3	681	352	1,08	34,1%	15%	0,83	28		
19. Jul	20	74	500	5	100		55	1050	1041	3	491	550	1,08	52,8%	23%	0,66	43	2,5/3,5	
19. Jul	21	75	500	5	100		55	1046	1038	2,9	492	546	1,08	52,6%	23%	0,69	40	2,5/5	
19. Jul	22	76	400	5	80		55	835	827	2,9	392	435	0,86	52,6%	18%	0,52	55		
19. Jul	23	77	430	5	86		55	925	891	2,93	396	495	0,93	55,6%	21%	0,54	54		
19. Jul	24	78	780	6	130		55	1667	1615	3,17	728	887	1,68	54,9%	37%	1,10	5		
19. Jul	25	79	690	6	115		55	1460	1436	2,97	666	770	1,50	53,6%	32%	1,04	11		
19. Jul	26	80	690	6	115		55	1467	1443	3,02	666	777	1,50	53,8%	32%	1,02	12		

Tabelle 5: Prüfplattenübersicht der LFI-Versuche mit eingestellten Prozessparametern

Zum Vergleich sind in Abbildung 28 links die in der Erstabmusterung zwecks Vorevaluierung der Material- und Prozessparameter hergestellten und unverpressten Einfahrplatten, rechts die in der Folgekampagne prozessoptimierten und verpressten LFI-Platten abgebildet.

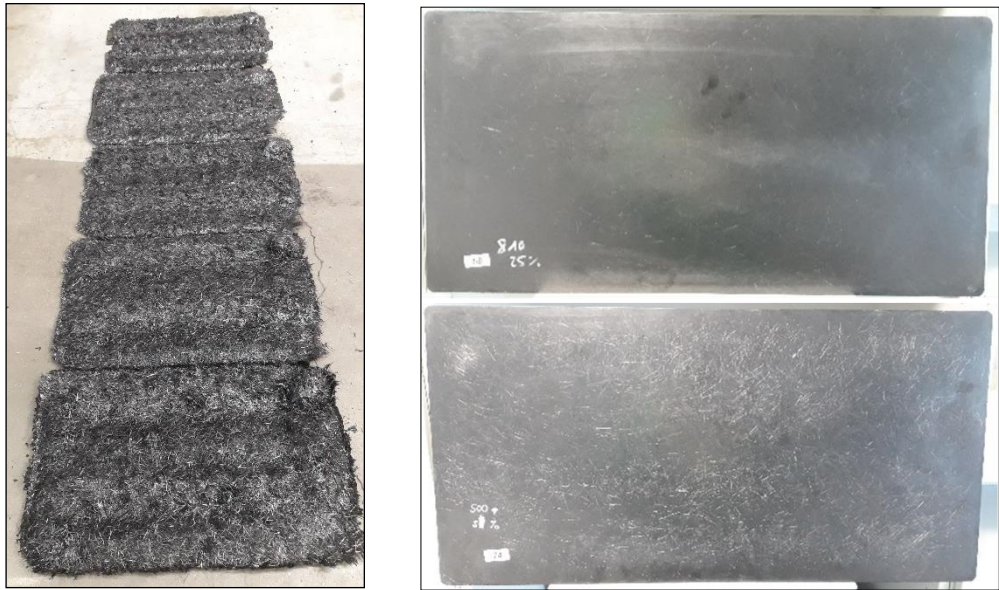


Abbildung 28: Einfahrplatten und monolithische LFI-Platten im Vergleich

In diesem AP konsultierte KIT-FAST den Verbundpartner GreenIng wiederum beratend bezüglich des Multi-Material-Designs und des fasergerechten Konstruierens. Gemeinsam mit dem Verbundpartner Fraunhofer ICT wurden die Material- und Prozessparameter so gewählt, dass nahezu alle im Hochdach später zu realisierenden Wand- bzw. Schaumkerndicken, lokalen Verstärkungen und Rippen, wie auch unterschiedlich auftretende Porengehalte im PUR-Matrixmaterial abgemustert werden konnten. Weiterhin unterstützte das KIT-FAST die resultierende Versuchskampagne und beteiligte sich an der Auswertung dieser. Außerdem wurden erneut finale Materialkennwerte für die LFI-Deckschichten und den Schaumkern ermittelt. Hierdurch entstand ein nicht vorhergesehener Mehraufwand. Für weitere Details sei auf den Schlussbericht des Verbundpartners Fraunhofer ICT verwiesen.

#### **AP 4 Rechnerische Auslegung des Hybridbauteils in der CAE-Kette**

Um eine materialspezifische Auslegung gewährleisten zu können, wurde die CAE-Kette sowohl auf die Bauteile, wie auch auf die generischen Geometrien angewendet. Dies bedeutet, dass die konstruktiven Ausarbeitungen virtuell auf ihre strukturellen und prozesstechnischen Eigenschaften untersucht wurden.

#### **AP 4001 Kennwertabsicherung**

Seitens GreenIng wurden für dieses Arbeitspaket den Konsortialpartnern alle notwendigen Daten und Informationen für eine umfangreiche FEM Simulation zur Verfügung gestellt.

In direktem Abgleich mit AP2005 und in enger Abstimmung mit dem KIT – FAST wurden materialspezifische Prüfungen besprochen und für die Bauteilauslegung benötigte Materialkennwerte definiert. Die damit anstehenden Materialabmusterungen wurden im Konsortium abgestimmt und anschließend durchgeführt. Erste Platten hierfür konnten in KW20/2019 im Technikum von Fritzmeier Composite in Brückmühl hergestellt werden.

Aufgrund des unter AP3005 erläuterten höheren Prüfumfanges, den damit verbundenen zeit- und aufwendigen Probenpräparationen, sowie zeitlich eingeschränkt verfügbaren Prüfanlagen, als auch basierend auf den bislang herangezogenen Materialkennwerten, wurden die Prüfplatten mit 12,5mm bzw. 25mm Glasfaservolumenanteil von 25, 35, 45 und 55% und einem angestrebten Porenanteil von 0% priorisiert geprüft.

Die restlichen Prüfplatten wurden im Anschluss geprüft.

Entsprechend den Absprachen mit den Projektpartnern KIT – FAST und GreenIng wurden folgende Prüfungen zur Kennwertermittlung durchgeführt:

- Zug nach DIN EN ISO 527-1
- Biege nach DIN 14125
- Charpy nach ISO 179-1



Für die Probenpräparation wurde zunächst ein DXF-Schnittplan mittels CAD-Programm und den der Norm entsprechenden Probekörpergeometrien erstellt. Im Anschluss erfolgte der Zugschnitt durch einen externen Wasserstahlschneidbetrieb. Abbildung 29 zeigt den Schnittplan und exemplarisch eine der über 80 bereits wasserstrahlgeschnittenen Prüfplatten mit noch nicht entnommenen Probekörpern.

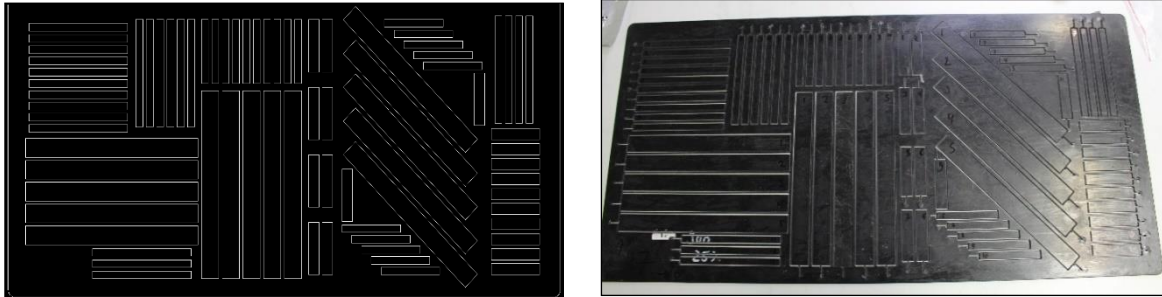


Abbildung 29: DXF-Schnittplan (links) und wasserstrahlgeschnittene LFI-Prüfplatte mit Probekörpern (rechts)

Die Proben wurden schließlich beschriftet, entnommen und nach den entsprechenden Normen geprüft. Die Abbildungen 30 und 31 zeigen die jeweils unterschiedlichen Prüfvorrichtungen und Materialprüfungen.

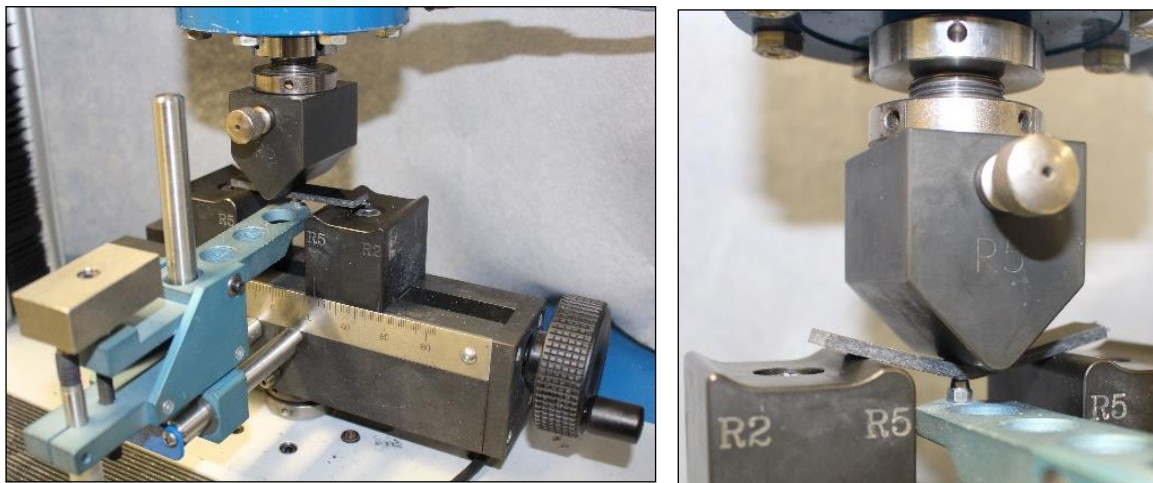


Abbildung 30: Biegeprüfvorrichtung und Prüfung einer LFI-Probe nach DIN 14125



Abbildung 31: Zugprüfvorrichtung und Prüfung einer LFI-Probe nach DIN EN ISO 527-1

In enger Abstimmung mit dem KIT – FAST und GreenIng wurden die in KW 29-30/2019 hergestellten Prüfplatten und die damit verbundenen materialspezifisch benötigten Prüfungen und Materialkennwerte besprochen und definiert. Hierzu wurde am 11. November 2019, im Zuge eines Vororttermins zur Begleitung der Prüfungen und Besichtigung der Tec-Service-Prüflabore am Fraunhofer ICT, wie auch am KIT, ein Workshop mit den zuständigen Tec-Service-Kolleginnen und -Kollegen durchgeführt. Dabei wurden u.a. mögliche Ergebnisdetails und Ausgabeformate geklärt.

Damit wurde gewährleistet, dass die für die Bauteiloptimierung von den Partnern benötigten Materialkennwerte in entsprechenden Dateiformaten vorlagen und direkt in die Simulationen überführt werden konnten.

Die aufgenommenen Echtzeitdaten wurden dem gesamten Konsortium im projektinternen Share-Point zur Verfügung gestellt. Abbildung 32 zeigt den exemplarisch dargestellten Spannungs-Dehnungs-Verlauf der Echtzeitdaten von in 0°- und 90°-Richtung geprüfter LFI-Zug-Probekörper.

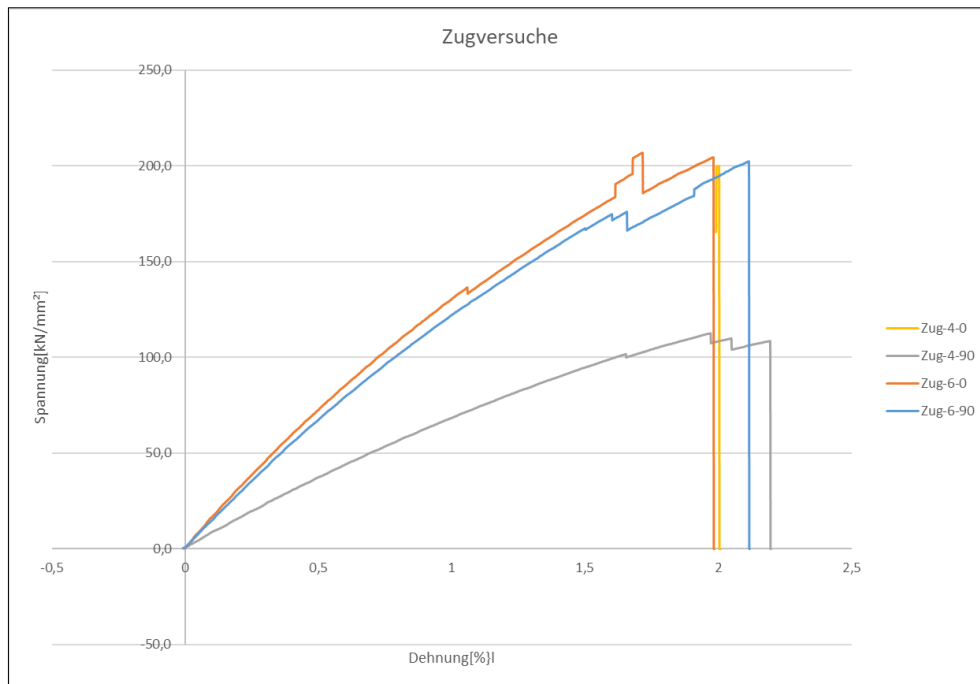


Abbildung 32: Echtzeitdatenverlauf der Zug-Proben V4 und V6

In Abbildung 33 ist der exemplarische Verlauf der Biegespannung über der Randfaserdehnung einer LFI-Probe im Biegeversuch aufgezeigt.

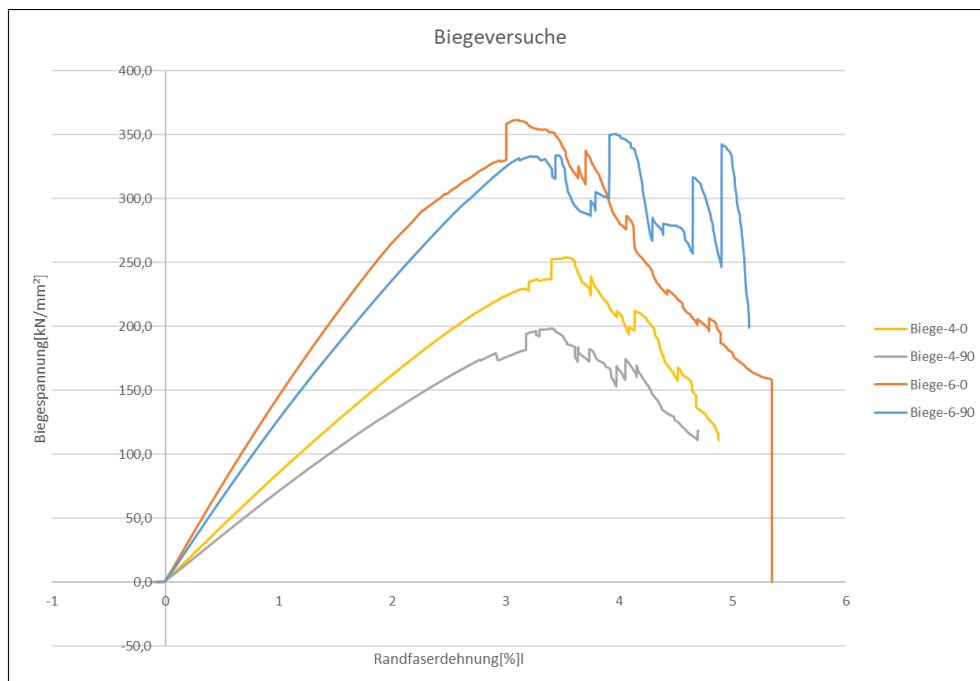


Abbildung 33: Verlauf der Echtzeitdaten von Probe V4 und V6 im Biegeversuch

Auch die Charakterisierung der Oberflächengüte abgemusterter, wie auch relevanter Referenzbauteile wurde durchgeführt. Als Referenz diente ein im Automobilbereich eingesetztes

SMC-Halbzeug (Sheet-Molding-Compound) mit sehr geringer Faserabzeichnung und Class-A-Oberflächengüte, welches gerade deswegen für Sichtbauteile am Fahrzeug zum Einsatz kommt. Das Halbzeug wurde kalt vorkonfektioniert und bei 145°C in einem Werkzeug mit einseitig hochglanz-spiegelpolierter Oberfläche und 2480 kN Presskraft im Fließpressverfahren in Form gepresst. Abbildung 34 zeigt die SMC-Referenzprobe, welche mittels Konfokalmikroskop und chromatischem Sensor auf deren Topographie und Rauheit untersucht wurde.



Abbildung 34: Oberflächencharakterisierung der Class-A-SMC-Referenzprobe

Durch die automatisierte Detektion lassen sich 3D- und Profildarstellungen der Bauteiloberflächen anfertigen und vergleichen. Abbildung 35 und 36 zeigen den topographischen Verlauf der Referenzprobe in 3D-Ansicht.

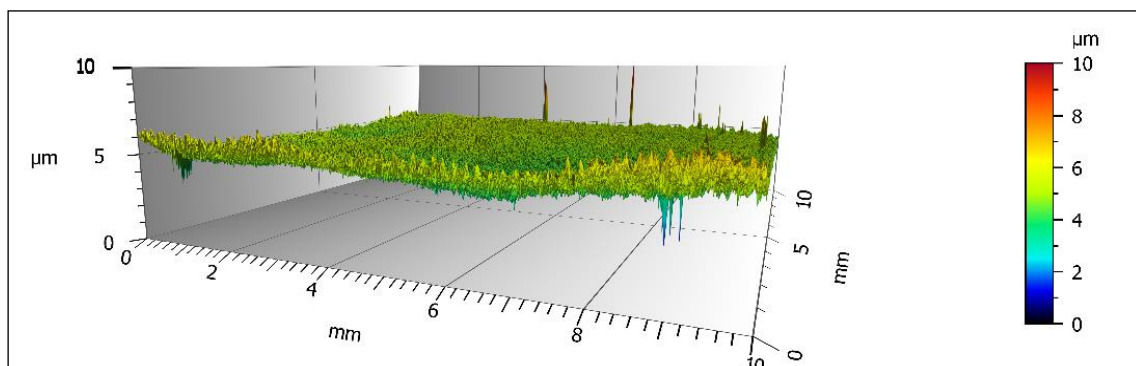


Abbildung 35: 3D-Ansicht der SMC-Referenzprobe, xyz-Achsen normalisiert

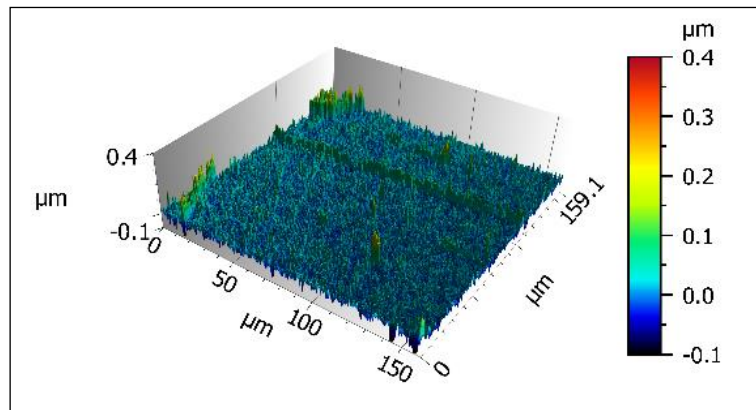


Abbildung 36: 3D-Ansicht eines extrahierten Ausschnittes der SMC-Referenzprobe, z-Achse 20% überhöht

Parametertabelle - Rauheit (Gauß-Filter, 0.8...		
Höhen-Parameter		
Sa	0.028	µm
Sq	0.039	µm

Tabelle 6: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der SMC-Referenzprobe

Die mit Siebenwurst gemeinsam erarbeitete Möglichkeit zur Untersuchung des Fiber-Prints, welche einhergehen mit den materialspezifischen Charakterisierungen aus AP2005 und AP4001, musste aufgrund von kostentechnischen Aspekten geändert werden. Ursprünglich war geplant, dass gewisse Teilbereiche der zu fertigenden Demonstratorwerkzeuge mit einer definierten Oberflächenstruktur versehen werden. Stattdessen brachte Siebenwurst die verschiedenen Oberflächenstrukturen in das in AP3005 von Siebenwurst gefertigte Sandwich-Inlay ein. Damit konnten Kosten im Transport, der Struktureinbringung, wie auch beim Handling der Werkzeuge reduziert werden.

Die vier nachstehend erläuterten Oberflächenstrukturen wurden mit Siebenwurst und deren Oberflächenfertiger abgestimmt und wie in Abbildung 37 dargestellt, im Werkzeug-Inlay eingebracht.

- Werkzeugoberfläche 1  
Hochglanz 3  $\mu\text{m}$ , Ra 0,05, Rt 0,30, Ry 0,30, Rz 0,30, Glanzgrad > 66%
- Werkzeugoberfläche 2:  
80er Schmirgelstrichpolitur, Ra 1,27, Rt 12,30, Ry 10,10, Rz 8,60, Glanzgrad > 17%
- Werkzeugoberfläche 3:  
Korund-gestrahlte Oberfläche, Korund f46, mittlere Korngröße 370  $\mu\text{m}$
- Werkzeugoberfläche 4:  
geätzte Oberflächennarbung (Leder-Optik) entsprechend Abstimmung

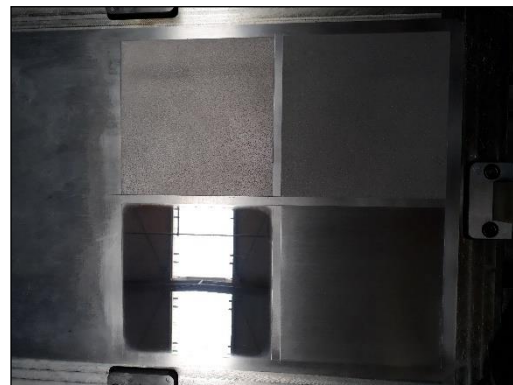
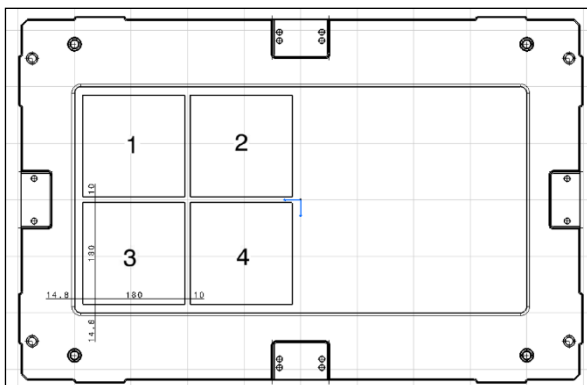


Abbildung 37: oberflächenmodifizierte Teilbereiche im Sandwich-Inlay

Mit diesem Inlay werden die Möglichkeiten zur zeitgleichen Abmusterung eines Materialsystems für Oberflächencharakterisierungen und die Entnahme „unversehrter“ Probekörper für Standard-Prüfungen vereint, ohne dass Werkzeuge zeit- bzw. kostenintensiv gewechselt oder umgebaut werden müssen.

Die Kennwertabsicherung sollte nach abschließender Materialabmusterung auf der LFI-Anlagentechnik von Fritzmeier Composite fortgeführt und abgeschlossen werden. Leider war es seitens Fritzmeier Composite nicht möglich einen für die Abmusterung der zu charakterisierenden PUR-Systeme notwendigen Termin auf deren Anlagen einzurichten.

Stattdessen konnte das Fraunhofer ICT auf das bestehende Firmennetzwerk und somit auf ehemalige Projektpartner aus den bereits im Antrag erwähnten Projekten „PURTrain“ zurückgreifen. Somit hatten wir die Möglichkeit unser oberflächenmodifiziertes Werkzeug-Inlay, mit dem ebenfalls für Fritzmeier Composite bereitgestellten LFI-Materialsystem, auf einer herstellergleichen und nahezu identischen LFI-Großserienlage im Technikum des Anlagenlieferanten KraussMaffei in München durchzuführen.

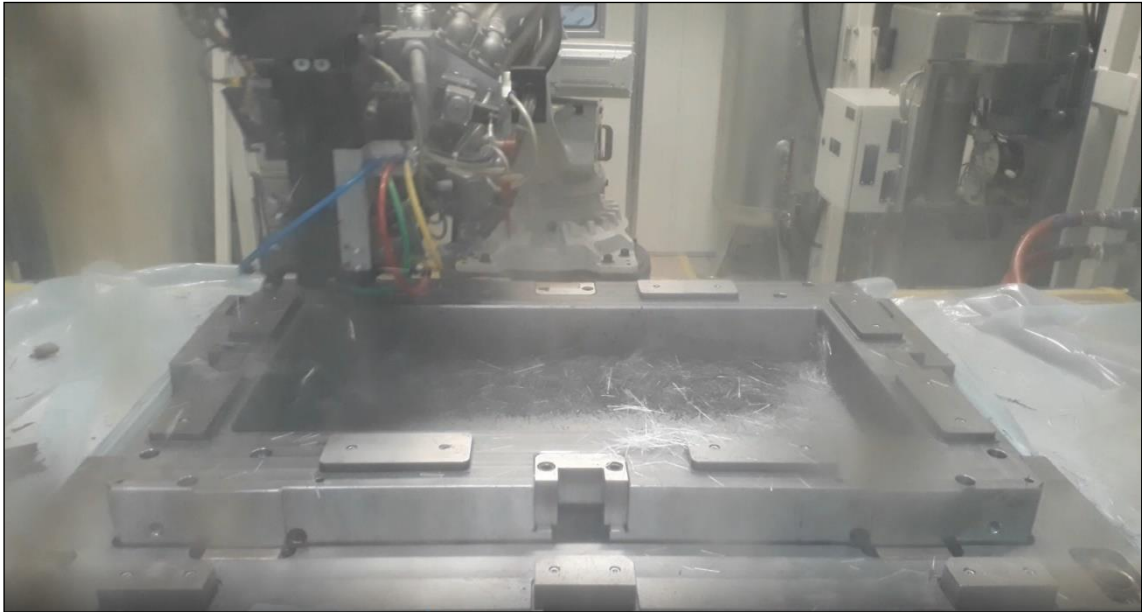


Abbildung 38: LFI-Abmusterung des modifizierten Werkzeug-Inlays im Technikum von KraussMaffei



Abbildung 39: Prüfkörperplatte mit oberflächenmodifizierten Teilbereichen

Um den Einfluss der unterschiedlichen Prozess- und Materialparameter eingehend zu untersuchen, entschieden wir uns für nachstehende Anlageneinstellungen:

Faseranteil [Gew.-%]	PUR-Menge [g]	Durchflussmenge [g/sec]
15	1100	165
25	1030	158,46
35	900	150
45	870	133,85

Tabelle 7: unterschiedliche LFI-Prozessparameter in Abhängigkeit zum Faseranteil

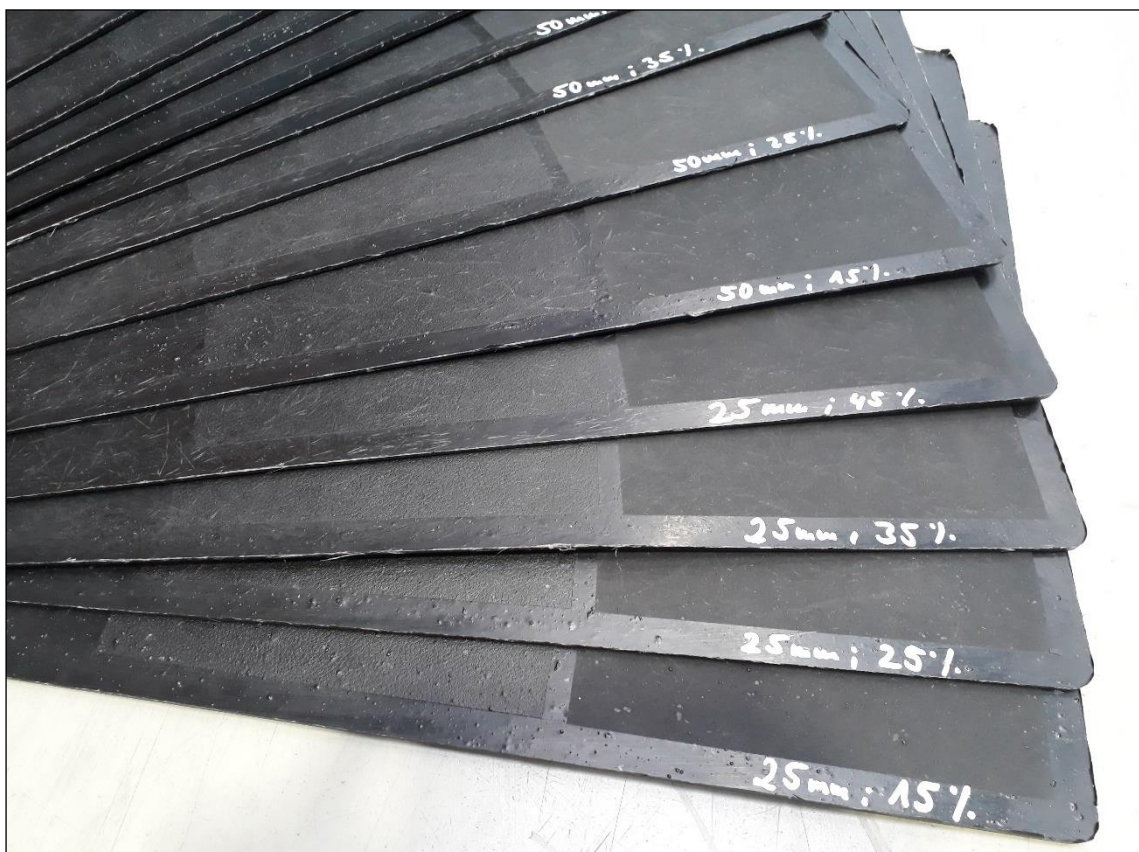


Abbildung 40: Einfluss auf die Oberfläche bei unterschiedlichen Prozessparametern



Die im Technikum von KraussMaffei hergestellten Prüfkörperplatten mit oberflächenmodifizierten Teilbereichen dienen zum Abgleich mit den späteren Oberflächengüten der finalen Dachdemonstratoren.

Zwecks Vergleichbarkeit der Proben und Berechnung der Parameter diene die Mittelebene der gemessenen Oberflächen als Bezugsebene. „Sq“, die durchschnittliche quadratische Höhe der Oberfläche, berechnete so die Standardabweichung für die Amplituden der RMS-Oberflächenrauheit. Durch die so erfassten Oberflächenstrukturbilder und anschließende Anpassung des Gaußfilters, der die Grenzwellenlänge definiert, konnten die in Abbildung 41 ersichtliche Überlagerung von Gestaltabweichungen ersichtlich gemacht werden.

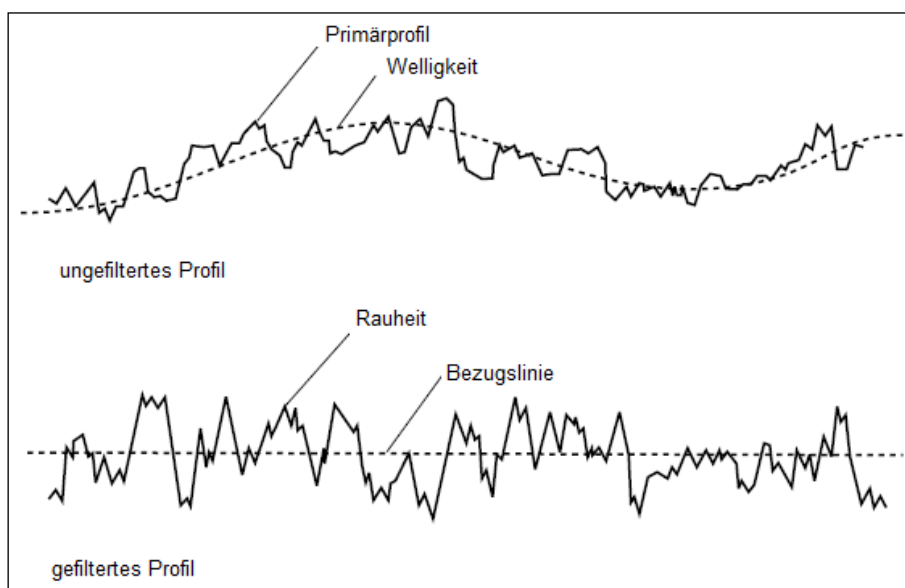


Abbildung 41: Überlagerung von Gestaltabweichungen mit Profilfilterung

Hierbei entspricht das gefilterte Rauheitsprofil der Abweichung des Primärprofils der Wellenlänge, die Bezugslinie des Rauheitsprofils bildet den langwelligen Profilanteil ab.

Zum Nachweis der Oberflächengüten wurden die in Abbildung 40 ersichtlichen Prüfplatten herangezogen und in Abhängigkeit zu den verwendeten Prozess- und Materialparametern charakterisiert. Stellvertretend für die insgesamt hierfür abgemusterten Parameter ist nachstehend die der späteren Serienproduktion am naheliegendste Materialeinstellung mit 25mm Glasfaserlänge, einem Faseranteil von 35 Gew.-% und den oben aufgeführten Oberflächenstrukturen abgebildet.

Konfokalmikroskopische Untersuchung der „unbehandelten“ Probe (aus dem nicht oberflächenmodifizierten Werkzeugbereich):

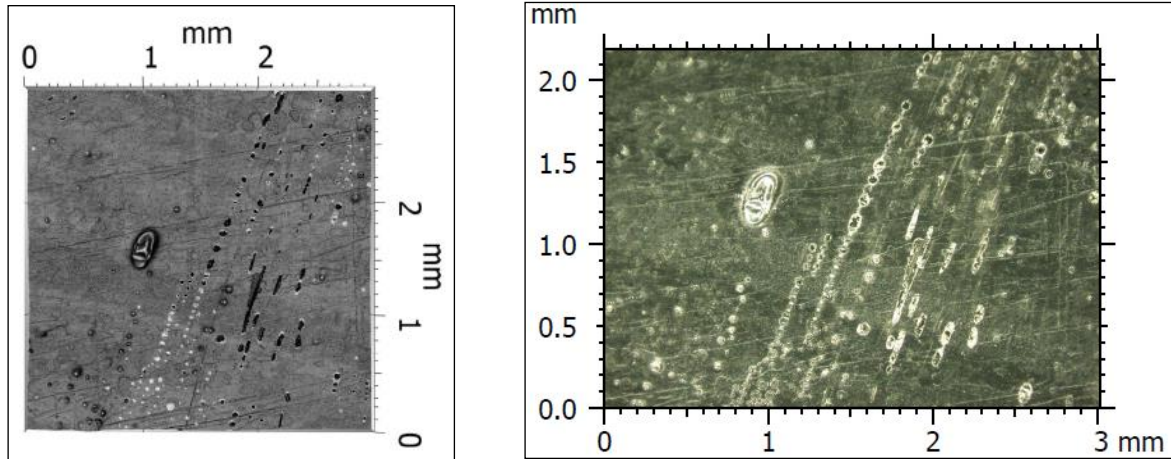


Abbildung 42: Betrachteter Ausschnitt der unbehandelten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts)

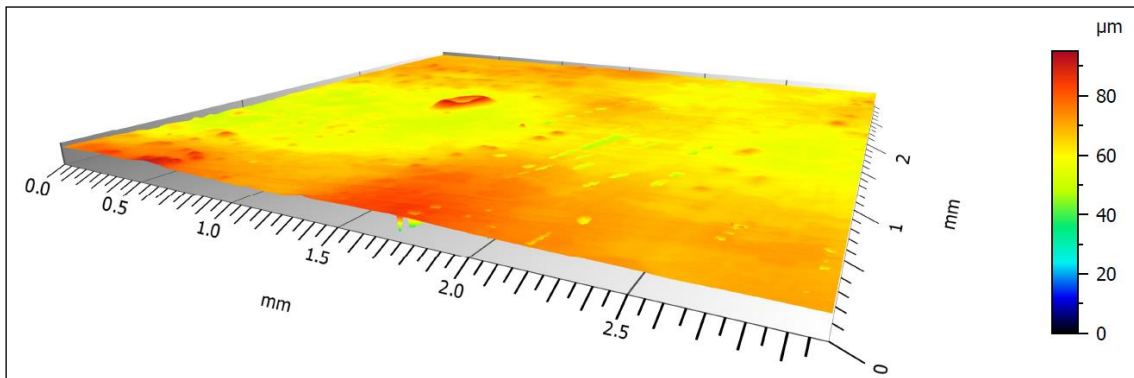


Abbildung 43: 3D-Ansichten des unbehandelten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert

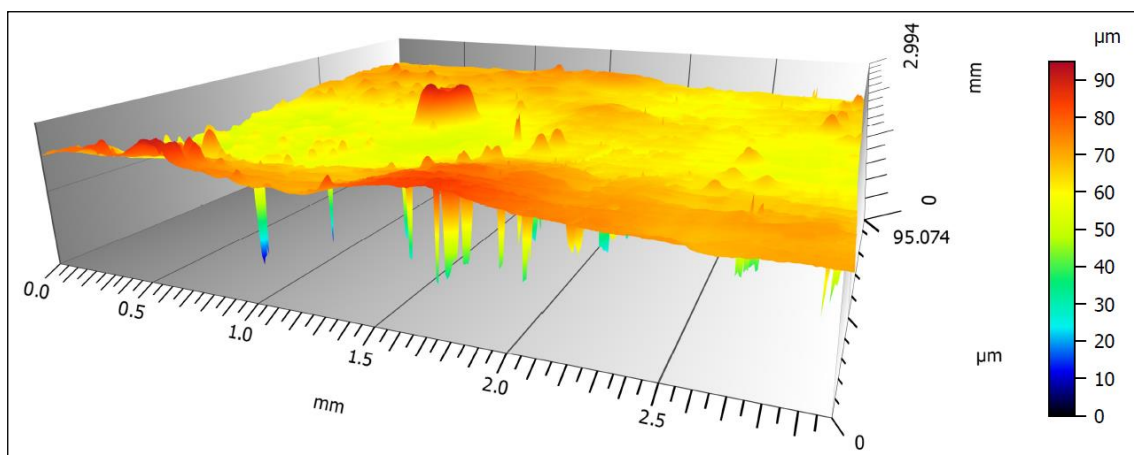


Abbildung 44: 3D-Ansichten des unbehandelten Proben-Ausschnitts, z-Achse 20% überhöht

Parametertabelle - Rauheit (Gauß-Filter, 0.8...		
Höhen-Parameter		
Sa	1.386	µm
Sq	1.810	µm

Tabelle 8: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der unbehandelten Probe

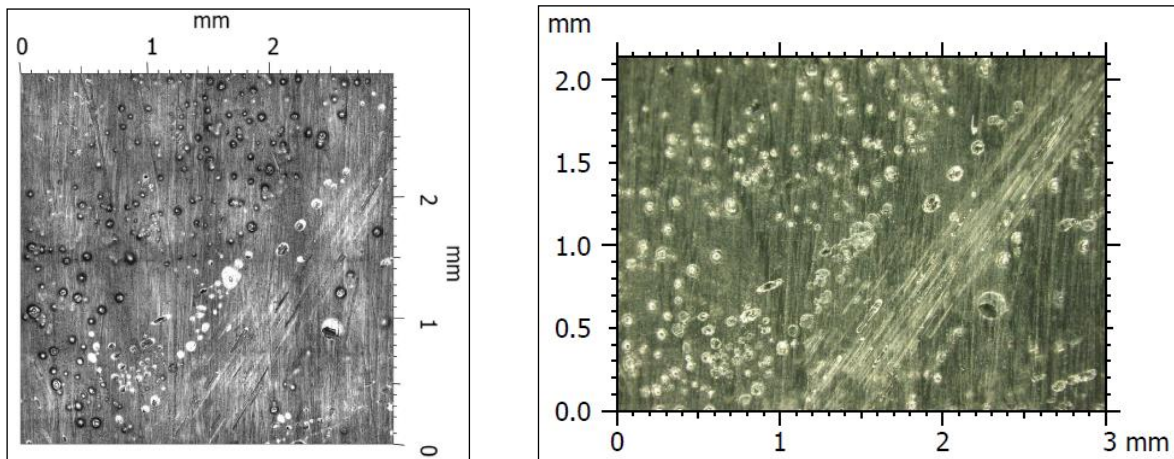


Abbildung 45: Betrachteter Ausschnitt der schmirgelstrichpolierten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts)

Konfokalmikroskopische Untersuchung der „schmirgelstrichpolierten“ Probe:

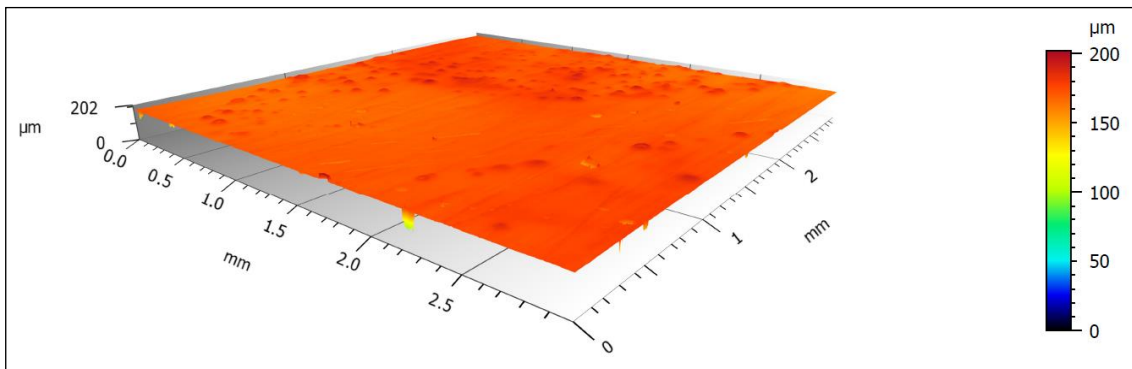


Abbildung 46: 3D-Ansichten des schmirgelstrichpolierten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert

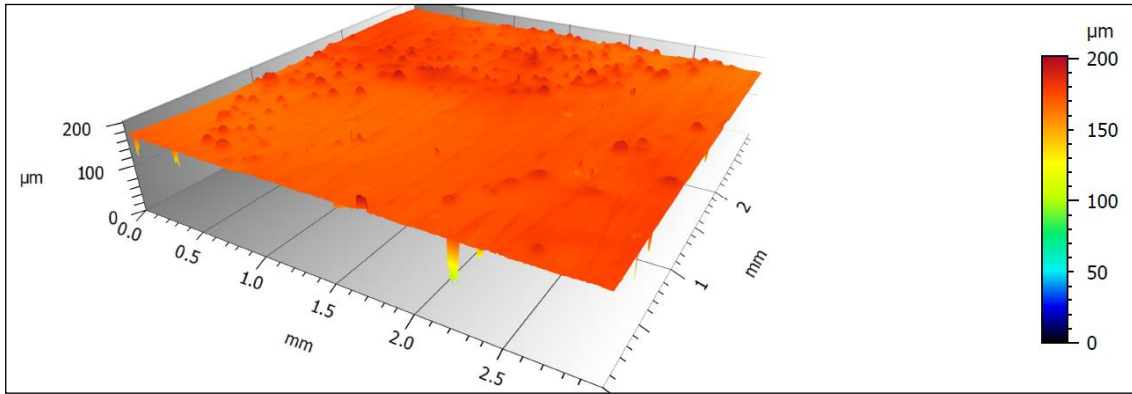


Abbildung 47: 3D-Ansichten des schmirgelstrichpolierten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht

Parametertabelle - Rauheit (Gauß-Filter, 0.8...		
Höhen-Parameter		
Sa	2.07	µm
Sq	2.76	µm

Tabelle 9: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der schmirgelstrichpolierten Probe

Konfokalmikroskopische Untersuchung der „gestrahlten“ Probe:

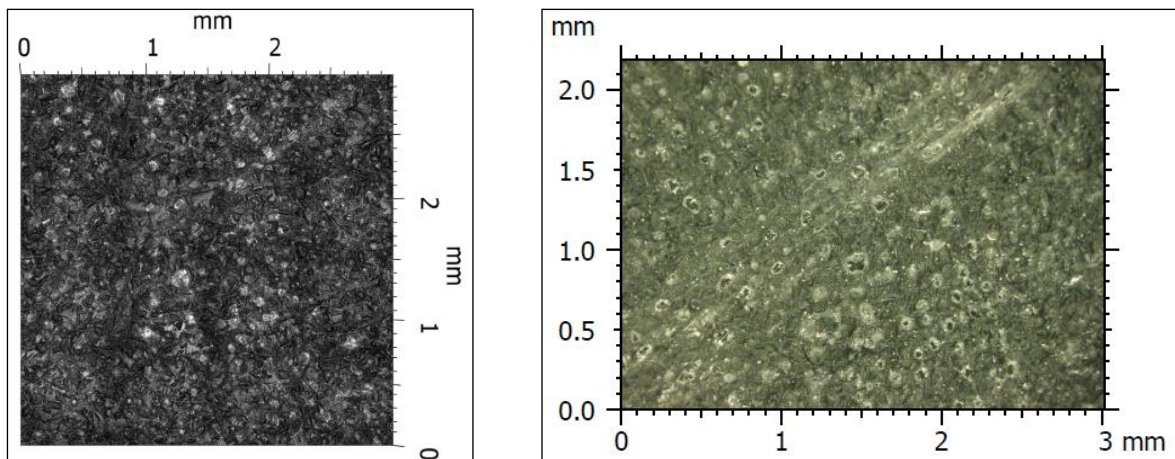


Abbildung 48: Betrachteter Ausschnitt der gestrahlten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts)

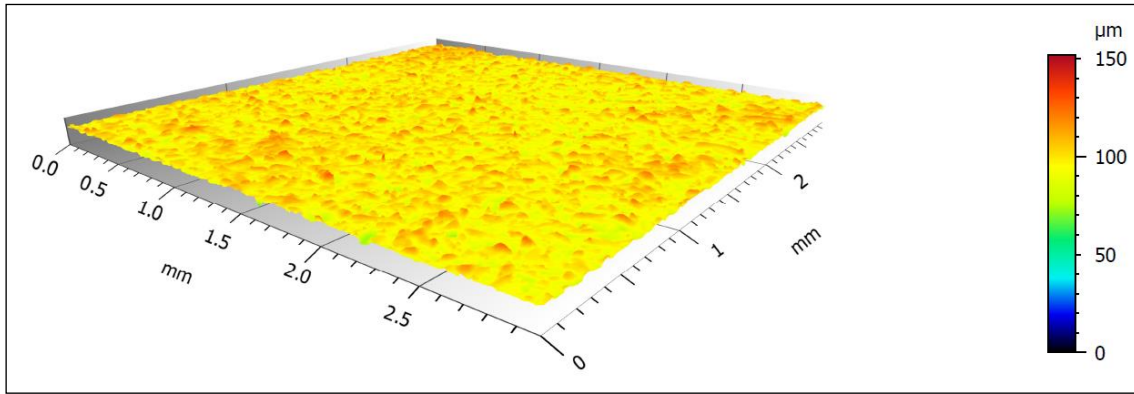


Abbildung 49: 3D-Ansichten des gestrahlten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert

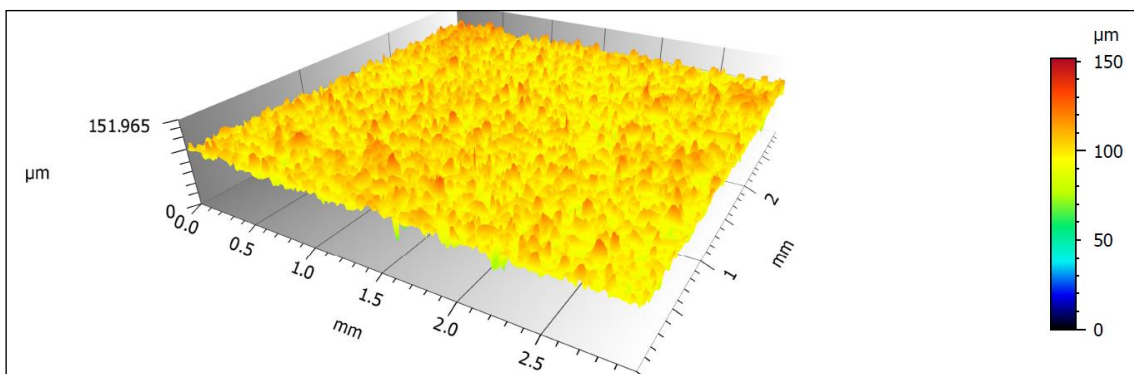


Abbildung 50: 3D-Ansichten des gestrahlten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht

Parametertabelle - Rauheit (Gauß-Filter, 0.8...		
Höhen-Parameter		
Sa	5.299	µm
Sq	7.011	µm

Tabelle 10: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der gestrahlten Probe

Konfokalmikroskopische Untersuchung der „spiegelpolierten“ Probe:

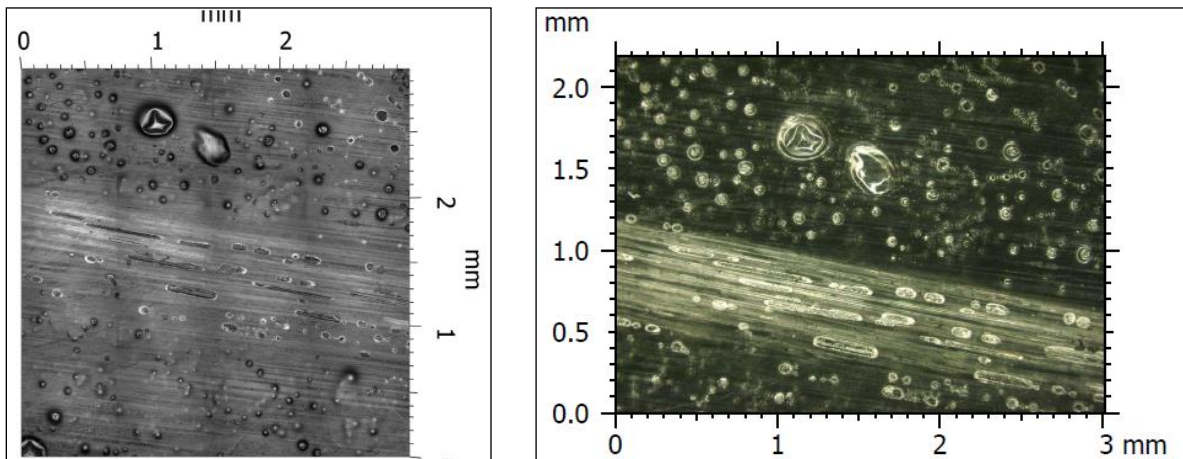


Abbildung 51: Betrachteter Ausschnitt der spiegelpolierten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts)

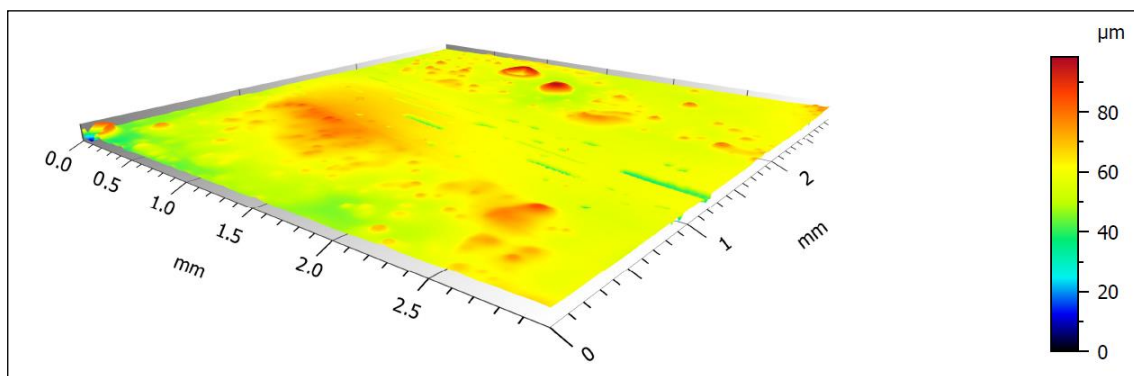


Abbildung 52: 3D-Ansichten des spiegelpolierten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert

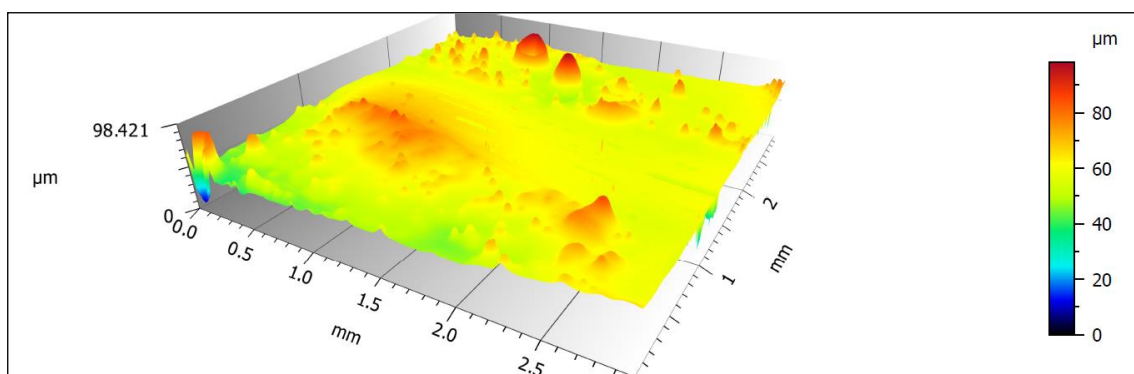


Abbildung 53: 3D-Ansichten des spiegelpolierten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht

Parametertabelle - Rauheit (Gauß-Filter, 0.8...		
Höhen-Parameter		
Sa	2.345	µm
Sq	3.047	µm

Tabelle 11: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der spiegelpolierten Probe

Konfokalmikroskopische Untersuchung der „geätzten“ bzw. lederähnlich genarbtten Probe:

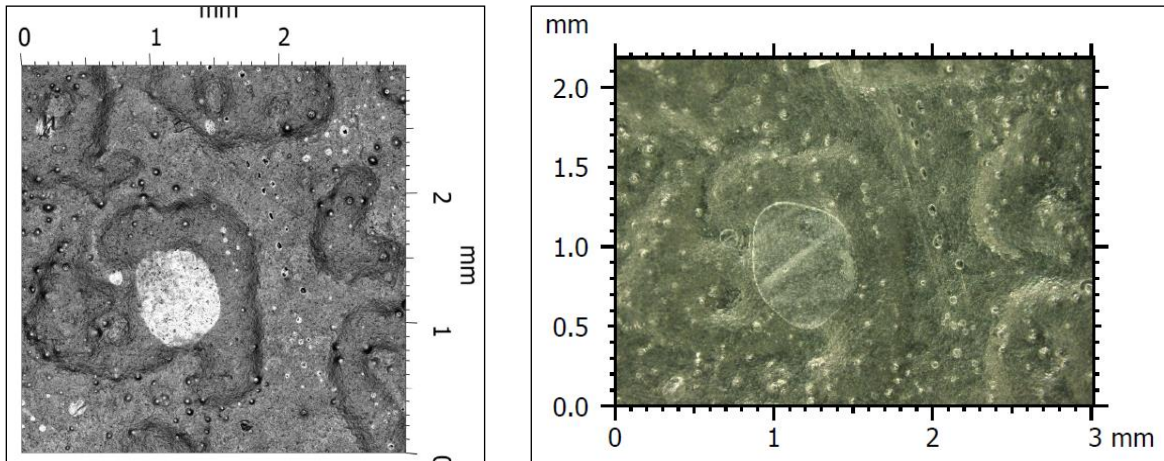


Abbildung 54: Betrachteter Ausschnitt der geätzten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts)

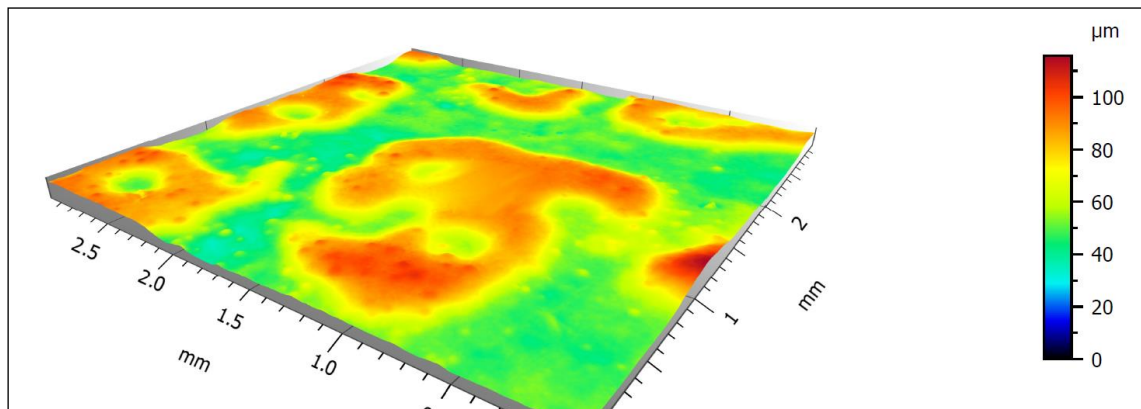


Abbildung 55: 3D-Ansichten des geätzten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert

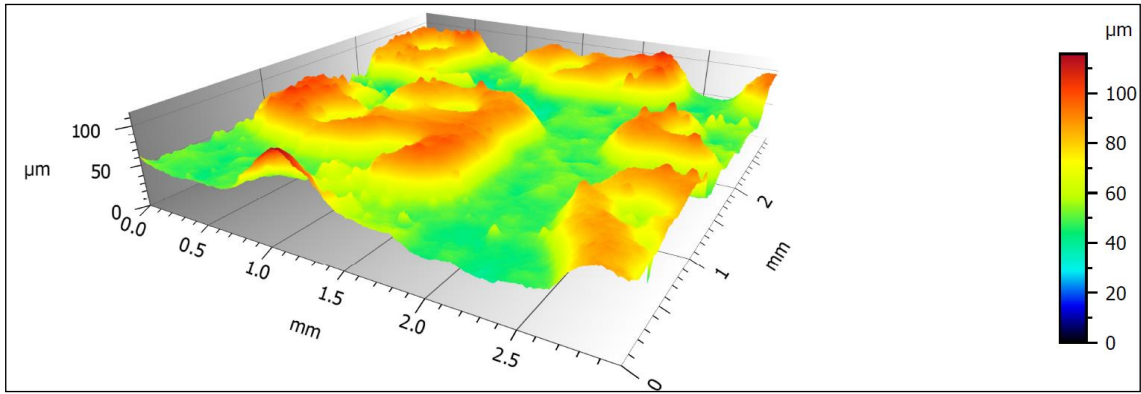


Abbildung 56: 3D-Ansichten des geätzten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht

Parametertabelle - Rauheit (Gauß-Filter, 0.8...		
Höhen-Parameter		
Sa	3.900	µm
Sq	5.439	µm

Tabelle 12: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der geätzten Probe

Konfokalmikroskopische Untersuchung der im thermoplastischen Tiefziehverfahren hergestellten, „folierten“ Demonstratorprobe, welche zuvor mit faserverstärktem Polyurethan hinter-schäumt wurde:

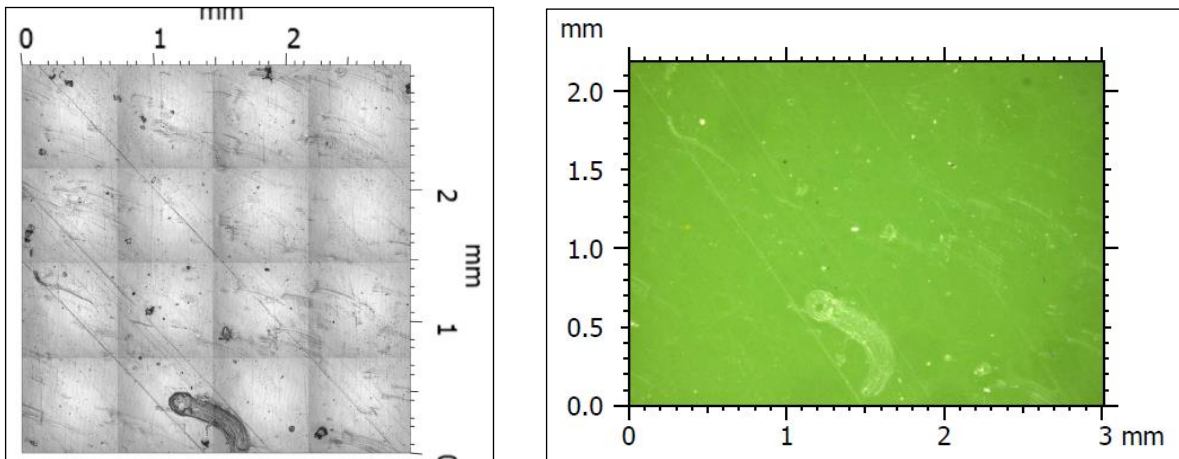


Abbildung 57: Betrachteter Ausschnitt der folierten Probe im Konfokalmikroskop (links), Lichtmikroskop (rechts)



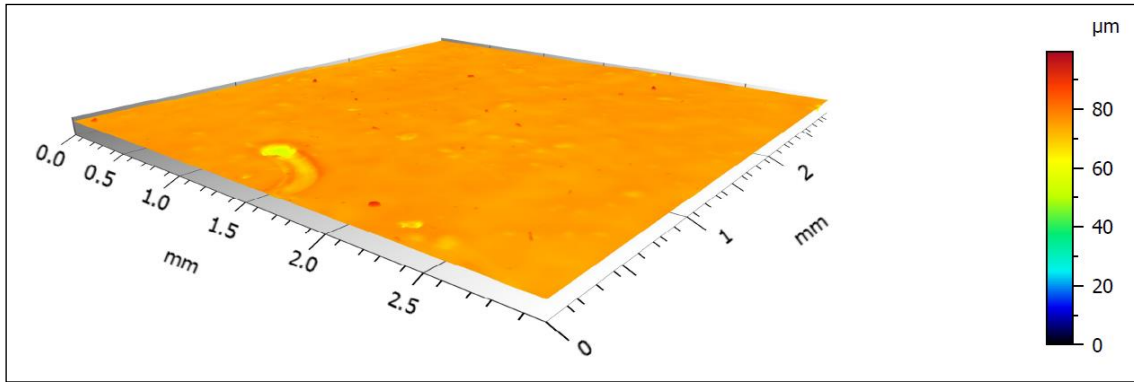


Abbildung 58: 3D-Ansichten des folierten Proben-Ausschnitts, xyz-Achsen normalisiert

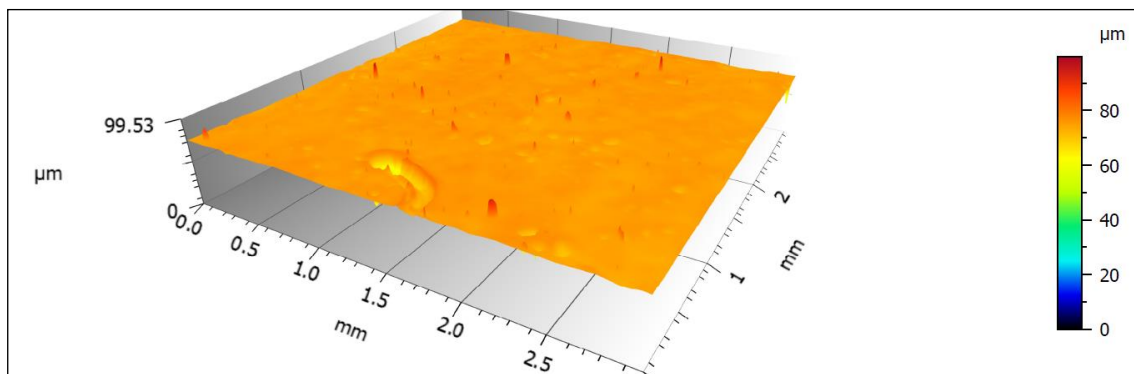


Abbildung 59: 3D-Ansichten des folierten Proben-Ausschnitts, z-Achsen 20% überhöht

Parametertabelle - Rauheit (Gauß-Filter, 0.8...		
Höhen-Parameter		
Sa	0.387	µm
Sq	0.541	µm

Tabelle 13: Rauheitswerte für einen extrahierten Teilausschnitt der folierten Probe

In nachstehender Tabelle sind die materialspezifisch aufgenommenen Sq-Oberflächenkennwerte zusammengefasst.

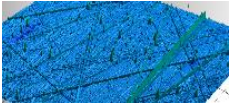
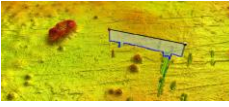

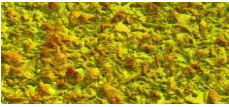
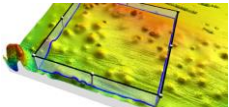
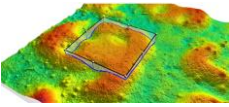
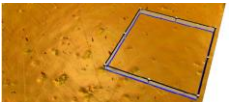
Probenbezeichnung	Sq-Wert [ $\mu\text{m}$ ]
SMC-Referenzprobe 	0,039
unbehandelte Probe 	1,810
schmirgelstrichpolierte Probe 	2,760
gestrahlte Probe 	7,011
spiegelpolierte Probe 	3,047
geätzte Probe 	5,439
folierte Probe 	0,541

Tabelle 14: Probenspezifische Sq Rauheitswerte im Überblick

Aus Tabelle 14 geht hervor, inwiefern sich die voran erläuterten Prozess- und Materialparameter auf die Oberflächengüte auswirken. Beim Vergleich der für die Oberflächencharakterisierung herangezogenen Sq-Materialkennwerte mit der SMC-Referenzprobe wurde ersichtlich, dass die folierte Probe die geringste Abweichung zur angestrebten Class-A- bzw. Referenz-Oberfläche aufweist. Dies ist weniger überraschend, da diese im Herstellungsprozess und beim Tiefziehen mit einer auf der glänzenden Lackschicht aufgetragenen Schutzfolien versehen ist und erst nach der finalen Bauteilherstellung und -bearbeitung entfernt wird. Allerdings ist die ABS-Tiefziehfolie mit bis zu 17 kg Eigengewicht und in Bezug auf die Gesamtfläche des Hochdachs sehr schwer und bietet zusätzliches Leichtbaupotential. Eine Möglichkeit

der Folien-Substitution wäre die ursprünglich vom Fraunhofer ICT fokussierte CCM Lackierung (Clear Coat Molding). Zwecks besserer Anhaftung hätte man einen, den in diesem Arbeitspaket erarbeiteten Voruntersuchungen entsprechenden, oberflächenmodifizierten Hochdachaufbau, direkt nach dessen Füge- und Pressprozess, im leicht aufgelegten Werkzeug, mit einem ebenfalls auf Polyurethan basierten Lacksystem, überflutet. Durch die nur sehr dünn aufgebraute PUR-Lackschicht bietet dies neben der Einsparung des zusätzlichen Tiefziehprozessschrittes, auch die Reduzierung von Gewicht, sowie Einsparung von Zeit und damit weiterer Kosten. Darüber hinaus besitzt die CCM-Lackschicht eine gegen Kratzer und Schrammen unempfindliche, hochglänzenden Oberfläche.

Bei genauerer Betrachtung und Messung der Oberflächenhöhenparametern wurde zudem deutlich, dass unabhängig vom Glanzgrad und der Welligkeit, durch den Einsatz unterschiedlicher und ins Werkzeug eingebrachter Oberflächenstrukturen, eine sehr differenzierende Standardabweichung der Höhenverteilung Sq-Oberflächenrauheit erzielt werden konnte. Einerseits hat dies Einfluss auf nachfolgende Beschichtungen, kann aber auch durch die so gleichmäßig abgebildete Struktur Vorteile, wie beispielsweise zur besseren Anbindung beitragen.

Auch wenn die unbehandelte Probe gegenüber der geätzten Probenoberfläche einen wesentlich niedrigeren Sq-Wert besitzt, lassen sich Faserabzeichnungen auf der geätzten Struktur nur sehr schwer erkennen. Ein weiterer Vorteil dieser Oberfläche und die Möglichkeit für den Einsatz in Bereichen, die eine glatte oder gar hochglänzende Oberfläche ausschließen und weniger empfindlich gegen Kratzer sein sollen.

Trotz der teilweise noch detektierbaren Faserabzeichnungen und Fehlstellen an den Oberflächen der Proben, die teils der Proben- und dem Werkzeugaufbau geschuldet sind, konnte durch die werkzeugseitige Oberflächenstrukturierung eine optisch hochwertige und haptische sehr angenehme Bauteiloberfläche realisiert werden.

Des Weiteren konnte durch zusätzliche Anpassung des Gaußfilters Fiber Print und auch andere Fehlstellen ersichtlich gemacht werden. Sehr deutlich zu erkennen ist dies bei der in Tabelle 13 abgebildeten Grafik der SMC Referenzprobe.

Mit den voran aufgeführten Punkten der Oberflächencharakterisierung konnte das vom Fraunhofer ICT verfolgte Ziel der Untersuchung und Reduzierung des Fiber Prints von rein faserverstärkten LFI-Bauteilen zur oberflächenbezogenen und weder nach-, noch überarbeiteten, direkten Sichtenwendung im Bereich des Interieur erreicht werden.

## AP 4002 Bauteiloptimierung

Seitens GreenIng wurden für dieses Arbeitspaket den Konsortialpartnern alle notwendigen Daten und Informationen für eine umfangreiche FEM Simulation zur Verfügung gestellt.

Das Ziel der Optimierung war die Minimierung der Masse bei gleichzeitigem Erhalt der vorgegebenen Steifigkeiten. Dabei wurden die vom Fraunhofer ICT eingebrachten konstruktiven Einschränkungen durch die Herstellungsverfahren, beispielsweise die geometrischen Randbedingungen des LFI-Materials oder die Positionierung von Inserts und Schaumkerne, aber auch die Anbindungsproblematik der unterschiedlichen Materialkombinationen berücksichtigt. Hierzu wurde das Arbeitspaket parallel zu den unter AP3000 aufgeführten Arbeitsinhalten begonnen und durch immer weiter im Detail erarbeitete Dachstrukturen, unter stetig laufenden Optimierungsschleifen und Materialanpassungen vorangetrieben. Mit in die Bauteiloptimierung eingeflossen sind zudem prozessbedingte Parameter, wie die maximal realisierbaren Schuss- und Topfzeiten der einzelnen PUR-Materialsysteme. Während diesem Prozess befanden wir uns stets in engem Austausch mit den Materialherstellern und -lieferanten.

Im Rahmen einer Topologieoptimierung des Dachs wurden sowohl zweidimensionale (2D) als auch dreidimensionale (3D) Studien durchgeführt. Während der zweidimensionale Ansatz sich auf eine Optimierung der durch eine Referenzgeometrie zur Verfügung gestellten Oberfläche als Schale beschränkt, wurde bei dem 3D Ansatz das gesamte Volumen des Dachs berücksichtigt. Es wurden in beiden Ansätzen sowohl die gegebenen Windlasten als auch Innenlasten AP2000 z.B. ausgehend von einem Staukasten, berücksichtigt. Ziel beider Optimierungen war die Identifikation von Lastpfaden in einer generischen Geometrie, um so die laufende Konstruktion zu unterstützen. Als Zielvolumen wurden hier zehn Prozent festgelegt. Die Ergebnisse der nach der Optimierung verbleibenden Struktur ist in Abbildung 60 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die oberen Gurte zur Aufnahme der Innenlasten des Staukastens und der Biegelasten. Die Windlasten werden überwiegend von den Seitenwänden aufgenommen. Die relevantesten Lastpfade sind somit ermittelt und können in der weiteren Konstruktion berücksichtigt werden.

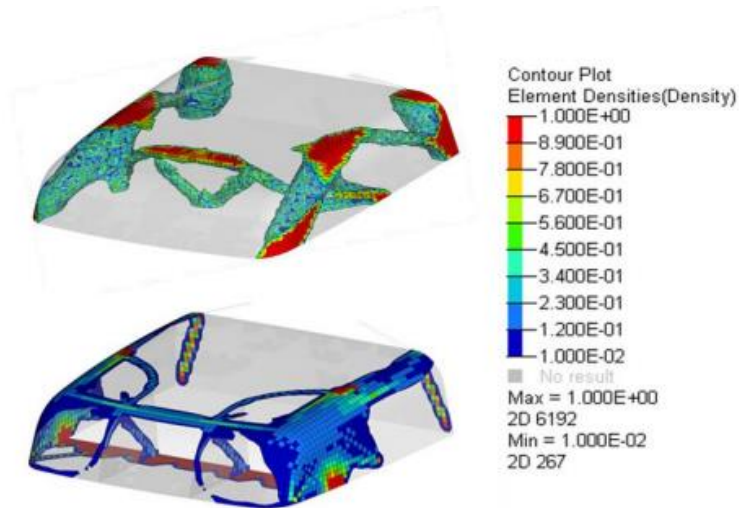


Abbildung 60: Ergebnisse der 3D (oben) und 2D (unten) Topologieoptimierungen mit einem verbleibenden Volumen von zehn Prozent.

Nach Anpassung der Konstruktion und erneuter 2D Topologieoptimierung mit einer Volumenreduktion von 30% und dem Ziel minimaler Nachgiebigkeit ergibt sich je nach zugelassener minimaler Materialstärke die in Abbildung 61 gezeigten Ergebnisse. Hierbei wurde zusätzlich der Lastfall Crash durch entsprechende Ersatzlasten nach ECE-R29 berücksichtigt. Auffallend ist der obere äußere Rahmen und der Träger an der Unterseite der Konstruktion, am Ort des Staukastens, zur Aufnahme von Biegelasten.

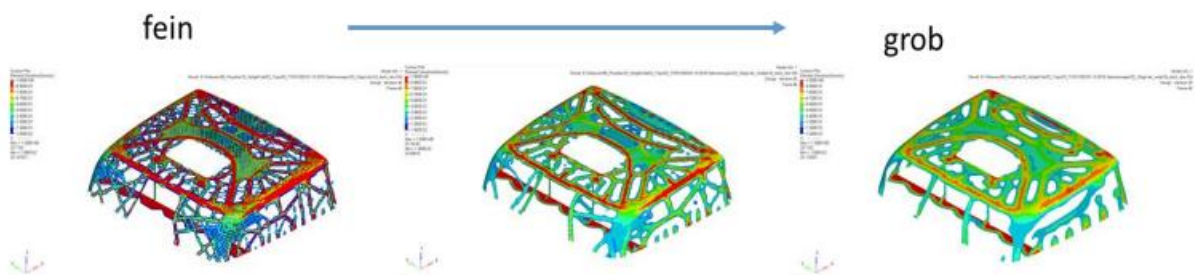


Abbildung 61: Ergebnisse einer 2D Topologieoptimierung an einer überarbeiteten Konstruktion mit unterschiedlicher Feinheit

### AP 4003 Prozesssimulation / AP 4004 Mapping und Homogenisierung / AP 4005 Struktursimulation

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes setzte sich GreenIng, intensiv mit der bevorstehenden Validierung auseinander. Aus dem Lastenheft wurden die Prüfumfänge abgeleitet. Auf deren Basis wurden die Methoden zur lastenheftgerechten Validierung ausgearbeitet und im Rahmen der geplanten Mittel auf Machbarkeit geprüft. Zur Absicherung der Herstellbarkeit wurden

Prozesssimulationen durchgeführt. Aufgrund SMC-ähnlicher Materialstrukturen und einer Prozesssimulation in Anlehnung daran konnte die Auswahl der Prozessroute und Bauweisen nochmals genauer beurteilt und ausgewertet werden. Gerade bei den Betrachtungen von Sandwichbauteilen ist es wichtig, deren Verzugsverhalten in den einzelnen Deck- und Kernschichten zu kennen. Durch die entsprechenden Voruntersuchungen konnte des Fraunhofer ICT entsprechende Kennwerte bereitstellen und so im AP4003 unterstützen.

Gleiches gilt für die Arbeitsinhalte von AP4004 und AP4005. Im Zuge der Materialauswahl, deren Eigenschaften und der damit verbundenen Prozesse befanden sich das KIT – FAST und das Fraunhofer ICT in enger Abstimmung, gerade hinsichtlich für die Struktursimulation relevanten Faserorientierung, der prozesstechnischen Einflüsse auf die homogene Faserverteilung und das thermomechanische Verhalten der unterschiedlich zum Einsatz gebrachten Materialkombinationen.

Um die Eigenschaften der gewählten Materialkombination prüfen und validieren zu können, wurden ein bestehendes Rahmenwerkzeug, welches am Fraunhofer ICT zur Verfügung stand, von Siebenwurst modifiziert und neue Einsätze eingebracht. Mit Hilfe dieses Werkzeuges, welches mit einer umlaufenden Tauchkante ausgestattet ist, konnten bei Fritzmeier Platten mit verschiedenen Gesamtdicken, verschiedenen Lagendicken und auch verschiedenen Materialzusammensetzungen bzw. Fasergehalten hergestellt werden. Abbildung 62 zeigt das Werkzeug im CAD, Abbildung 63 zeigt das fertige Werkzeug bei Fritzmeier auf der Anlage. Abbildung 64 zeigt Ausschnitte aus den im Projekt hergestellten Platten.

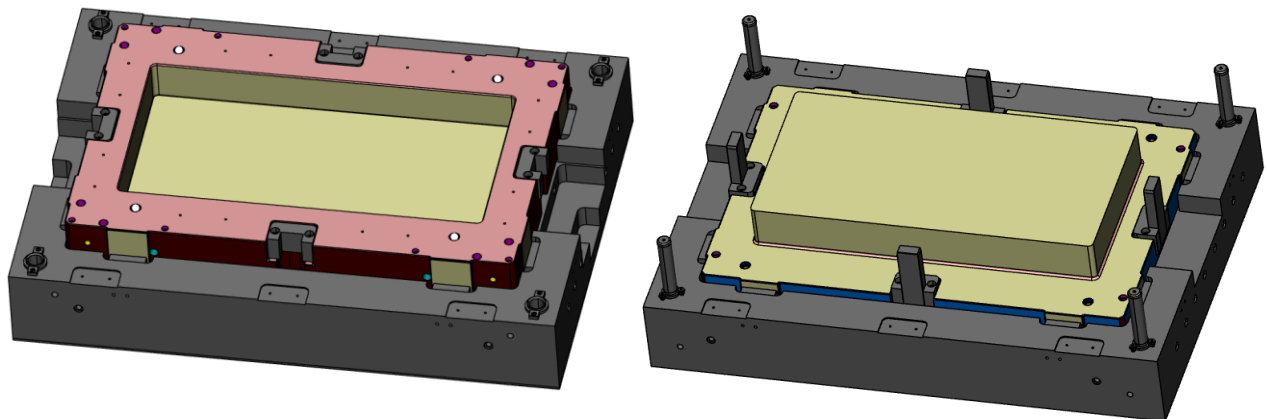


Abbildung 62: Werkzeughälften zum Pressen verschiedener Plattendicken



Abbildung 63: Bemusterung auf der Fritzmeier Composites-Anlage



Abbildung 64: Hergestellte Platten für Materialvalidierung

Im Anschluss zur ersten Plattenfertigung wurde das Werkzeug wieder zurück zu Siebenwurst versandt, um den Stempleinsatz mit verschiedenen Oberflächen zu versehen.

Die Oberflächen wurden im Projektkonsortium ausgewählt und platziert.

Ausgewählt wurden folgende 4 Oberflächengüten:

- Fläche 1:
  - 80er Schmiergelstrichpolitur
- Fläche 2:
  - Hochglanz 3 $\mu$ m
- Fläche 3:
  - Korundgestrahlt Korund F46
- Fläche 4:
  - Ledernarbung, Fa. Eschmann

Ziel war es, damit die Abzeichnung auf der LFI-Masse testen und validieren zu können, um derzeit nötige Nacharbeit der Flächen, wie kaschieren oder lackieren, überflüssig zu machen.

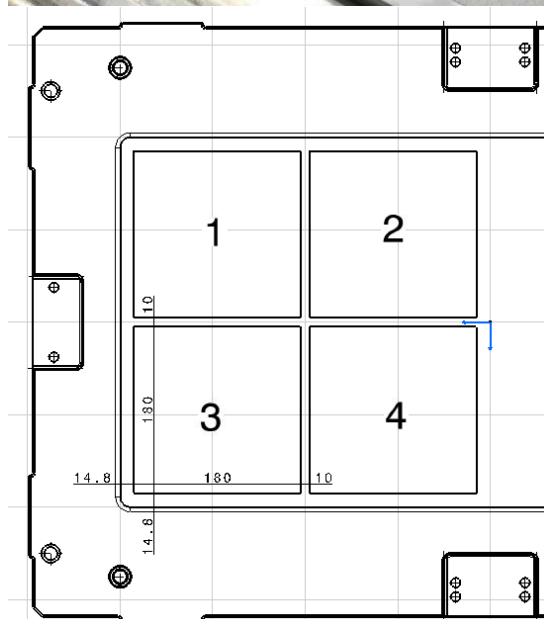
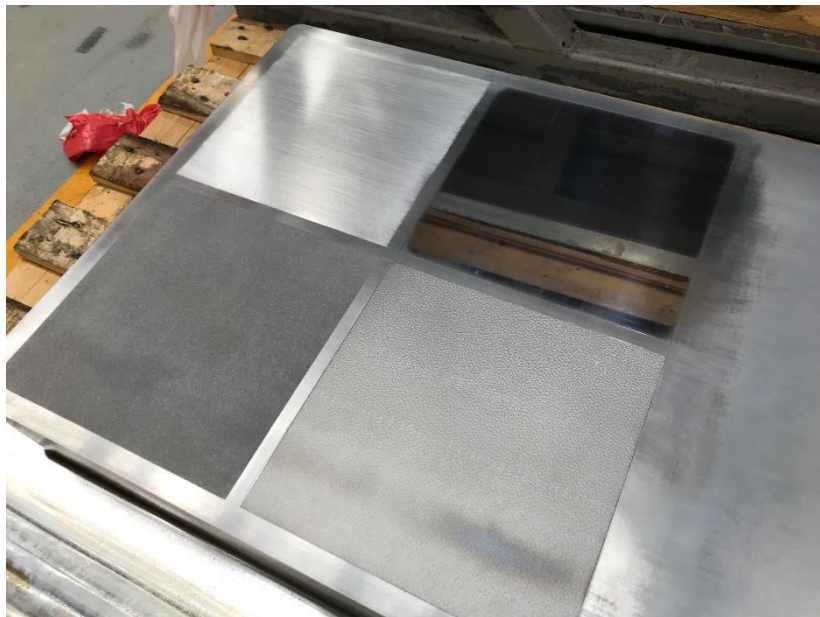


Abbildung 65: Felder mit verschiedenen Oberflächengüten



Um für Demonstrationszwecke ein LKW-Dach in kleinerem Maßstab zur Verfügung zu haben, wurde überlegt weitere Einsätze für den vorhandenen Stammrahmen zu fertigen. Dies wurde allerdings wieder verworfen, da bei einem skalieren des Daches die geringe dicke in den ange-dachten Herstellverfahren nicht mehr abbildbar gewesen wäre.

Konstruktiv wurden die Einsätze zur Veranschaulichung umgesetzt.

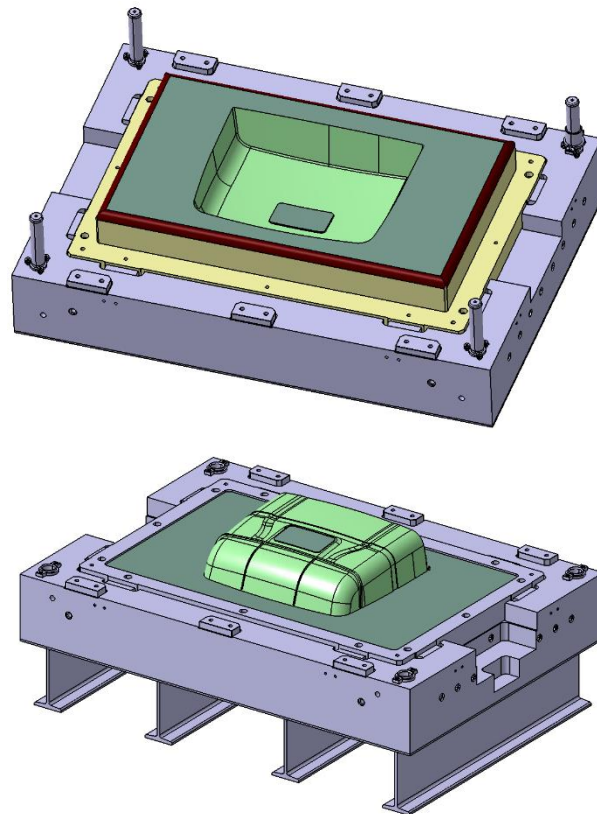


Abbildung 66: Werkzeughälften mit „Spielzeugdach“ im Maßstab 1:5

Parallel zu den Untersuchungen der Probepplatten, wurde in Abstimmung mit dem Konsortium die Konstruktion des Daches und aller nötigen Anbauteile abgeschlossen.

Die finale Abstimmung des Fertigungsverfahrens und -vorgehens, machte es nötig, dass Siebenwurst für das komplette Dach 4 Werkzeuge bereitstellen muss. Abbildung 67 zeigt die Explosionszeichnung der zu fertigenden Teile.

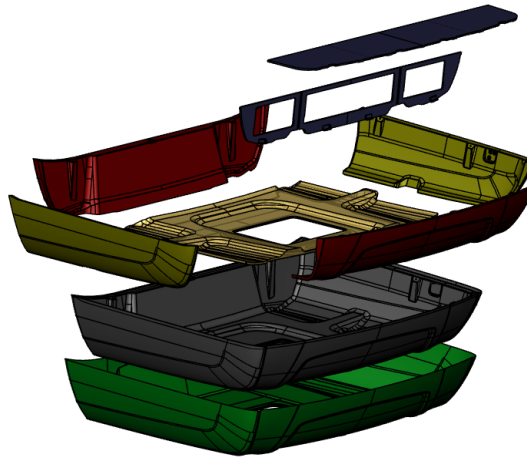


Abbildung 67: Explosionszeichnung der finalen Dachversion

So besteht das im Projekt entwickelte LKW-Hochdach aus einer tiefgezogenen, thermoplastischen Folie, einer LFI-Schicht, welche die PU-Schaumkerne umschließt. Außerdem wurden verschiedene Metalleinleger im Bauteil eingebracht und ein Staufach im Nachgang eingeschraubt bzw. verklebt.

So wurden seitens Siebenwurst ein Tiefziehwerkzeug gefertigt, drei Schaumkernwerkzeuge und ein LFI-Werkzeug, in welche die vorgefertigten Bauteile aus den anderen Werkzeugen eingelegt und verpresst werden.

Werkzeug 1 – Tiefziehwerkzeug:

Abbildung 68 zeigt die CAD-Daten des Tiefziehwerkzeuges. In diesem Tiefziehwerkzeug wird die Außenhaut für unser Demonstrator Bauteil geformt. Dazu wird die Folie erhitzt, mit einem Spanrahmen auf das Werkzeug gedrückt und per Unterdruck in die Form gezogen. Dazu sind im Werkzeug verteilt ca. 800 kleine Bohrungen mit einem Durchmesser von je 0,7mm eingebracht worden. (Abbildung 69)

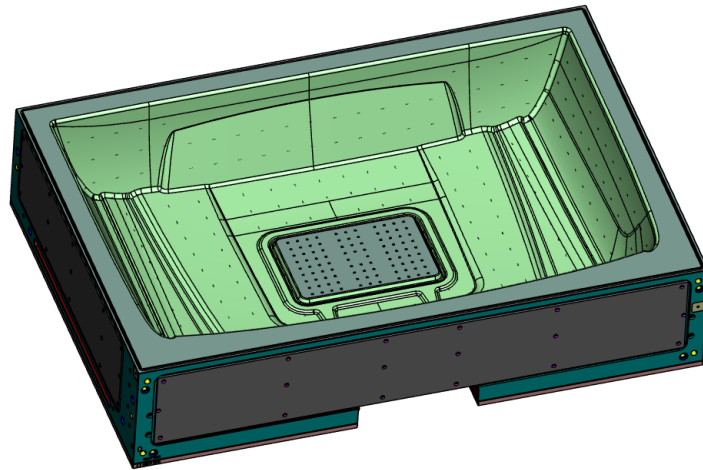


Abbildung 68: CAD-Daten des Tiefziehwerkzeuges

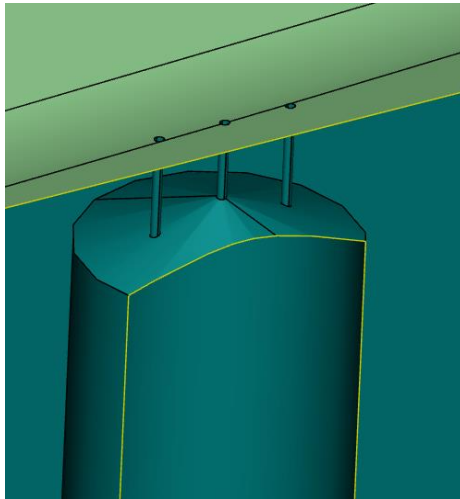


Abbildung 69: Schnitt durch 3 der über 800 Vakuumborungen im Werkzeug

Bei den ersten Bemusterungen stellte sich heraus, dass die polierte Oberfläche beim Tiefziehwerkzeug zu fein ist. Durch die glatte Werkzeugoberfläche kann die Luft nicht sauber entweichen und es bilden sich kleine Bläschen und Unebenheiten auf der Kunststoffolie. Dies ist ein bekanntes Problem bei Tiefziehwerkzeugen, welches bisher immer durch Versuche und Nacharbeit abgestellt wird. Siebenwurst hat daraufhin auf einer einfachen Platte Strahlversuche gemacht und zu Fritzmeier gesendet (Abbildung 70).

Nach Bewertung wurde das Werkzeug zurück zu Siebenwurst gesendet und sich dafür entschieden, das komplette Tiefziehwerkzeug mit Korund (K36, Abbildung 71) zu strahlen. Dies ist eine entscheidende Erkenntnis für spätere Werkzeuge, die man direkt mit dieser Oberfläche ausstatten kann, um oben genanntes Problem bereits vorab zu umgehen.

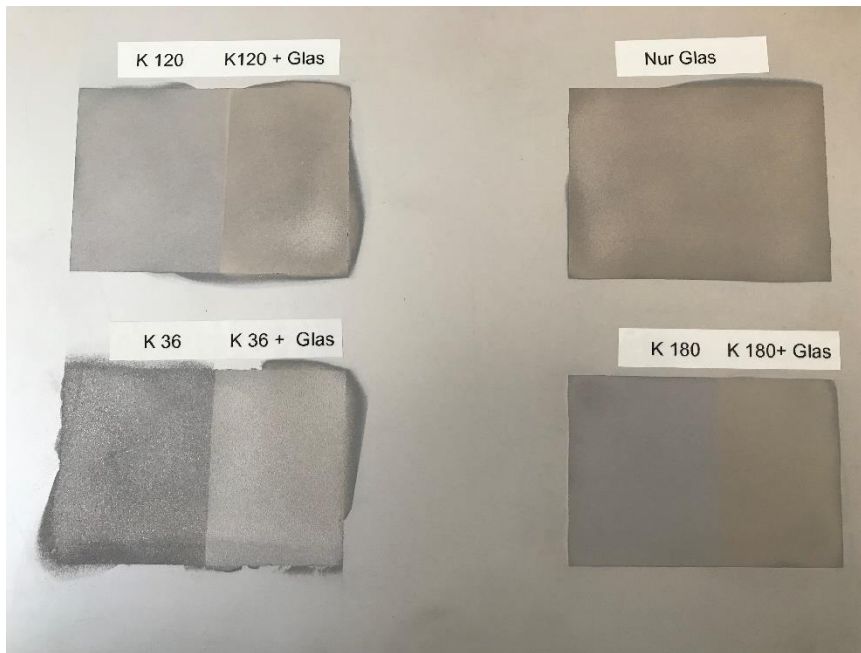


Abbildung 70: Tafel mit verschiedenen gestrahlten Feldern

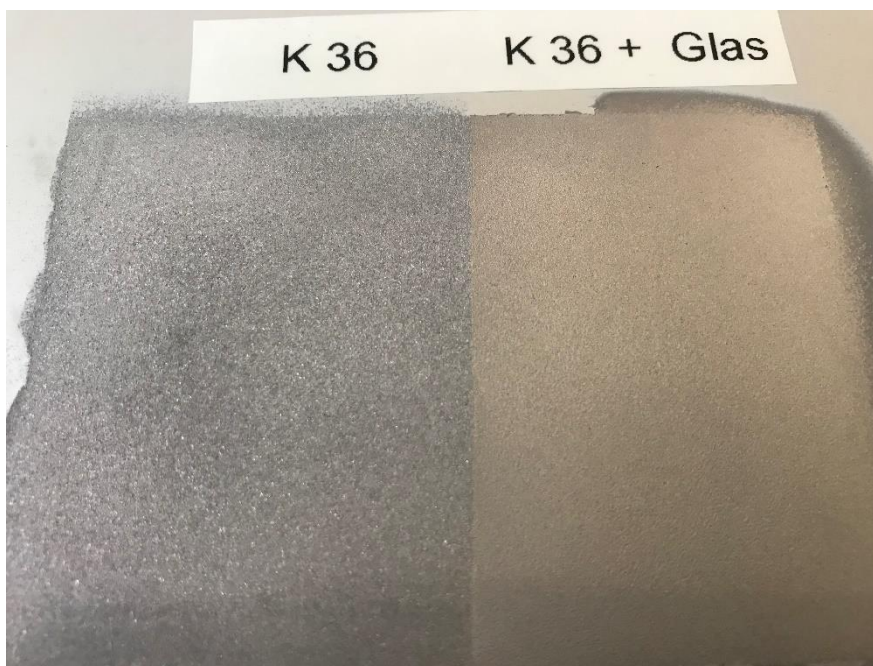


Abbildung 71: Es wurde sich entschieden, das komplette Werkzeug mit der Oberfläche K36 auszustatten



Abbildung 72: Tiefziehwerkzeug während des Strahlvorgangs

Werkzeuge 2, 3 und 4 – Schaumkernwerkzeuge:

Die Schaumkernwerkzeuge bestehen jeweils aus einer Unter- und einer Oberhälfte, welche mit einer Tauchkante zueinander abdichten. Abbildung 73 zeigt beispielhaft eines der drei gefertigten Schaumkernwerkzeuge

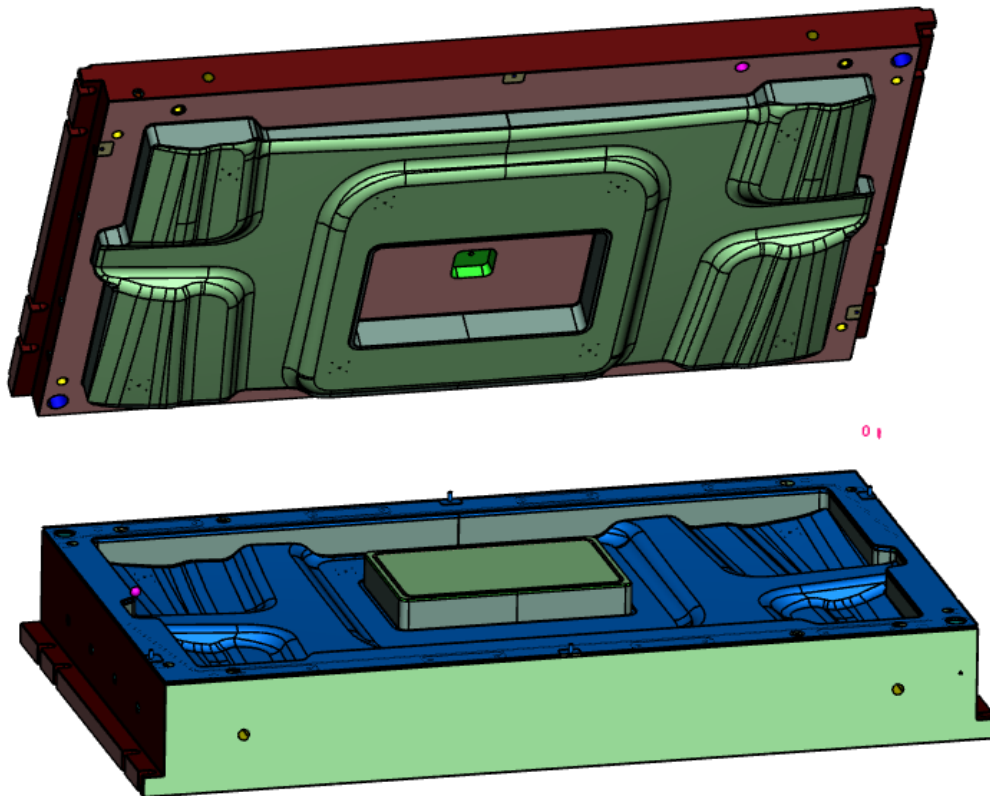


Abbildung 73: CAD-Daten des Schaumkernwerkzeuges für die Dachfläche

Diese Schaumkernwerkzeuge wurde mit Magneten und Stiften versehen, um im Schaumkern metallische Einleger einschäumen zu können. Diese sind im späteren Ablauf beim LFI-Werkzeug notwendig, um die Schaumkerne im Oberwerkzeug halten zu können.

Bild 18 zeigt einen der metallischen Einleger, die Haltestifte und den Magneten.

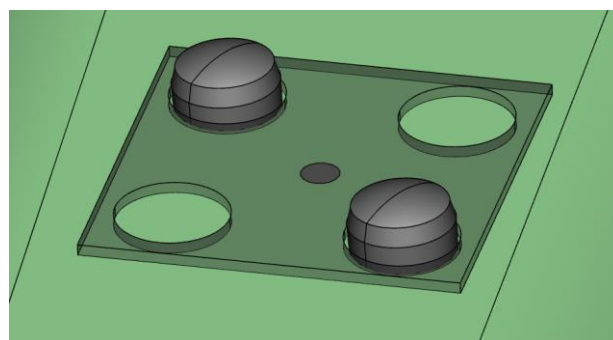


Abbildung 74: Metallplatte, welche über Stifte und Magnet im Werkzeug fixiert ist

Nachdem diese Bauteile gefertigt wurden, stellte sich heraus, dass das verwendete Schaumsystem eine größere Schwindung aufweist, als die Voruntersuchungen zeigten. Deshalb war es nicht möglich, die Schaumkerne wie geplant in das große LFI-Werkzeug

einulegen. Durch Zerschneiden der Schaumkerne konnte man erste Versuche fahren und erste komplette LKW-Dächer herstellen. Das Ergebnis war zufriedenstellend, allerdings entsprach es nicht unserem Anspruch ein perfektes Dach am Ende des Projektes vor uns zu haben.

Deshalb wurde entschieden, die Schaumkernwerkzeuge nachzuarbeiten und die komplette Kontur mit einer anderen Schwindung neu in die Werkzeuge einzubringen.

Werkzeug 5 – LFI-Werkzeug:

Nachdem die einzelnen Komponenten - die Tiefgezogene Folie und die einzelnen Schaumkerne – gefertigt sind, werden diese Komponenten in das LFI-Gesamtwerkzeug eingelegt und mittels eines Harz-Faser-Gemisches miteinander verbunden. Das dazu nötige Werkzeug wird auf der Abbildung 75 gezeigt.

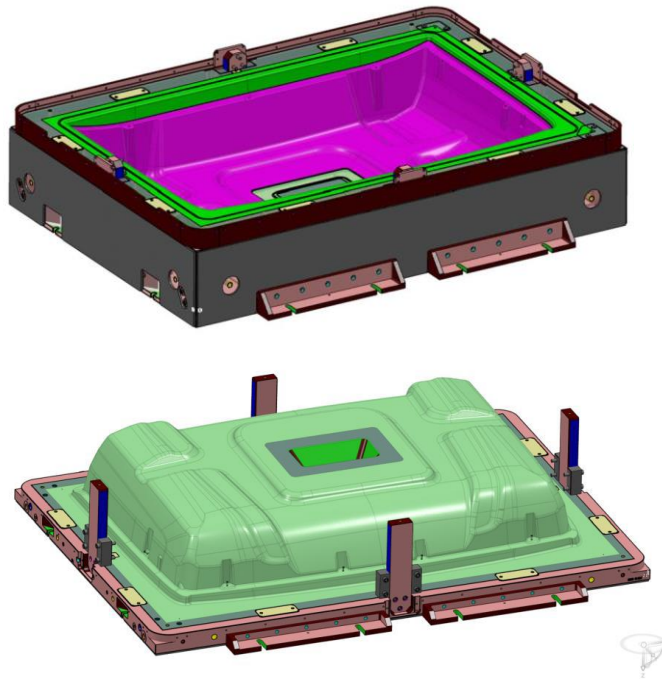


Abbildung 75: CAD-Stand des LFI-Werkzeuges

In dieses Werkzeug wird die bereits tiefgezogene Folie unten eingelegt. Die vorgefertigten Schaumkerne werden über die Magnete am Oberwerkzeug gehalten. Die Abbildungen 76 und 77 zeigen die auskonstruierten CAD-Daten.

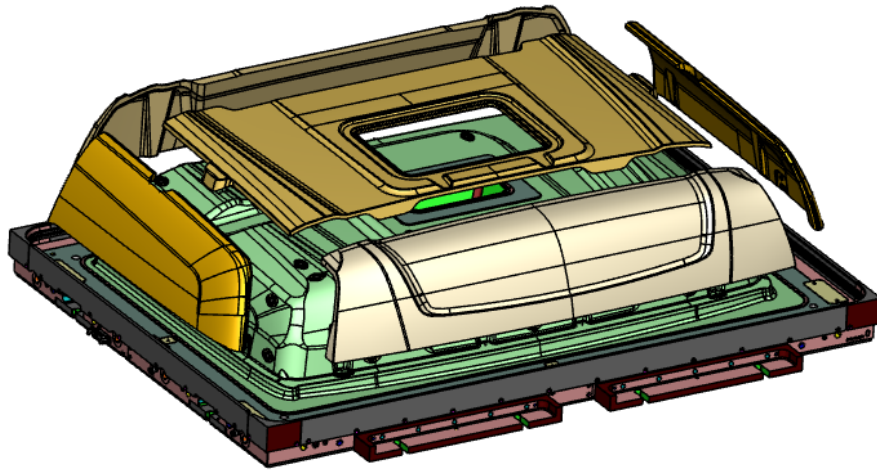


Abbildung 76: Oberwerkzeug (Stempel) inkl. Schaumkerne (gelb), welche über Magnete gehalten werden

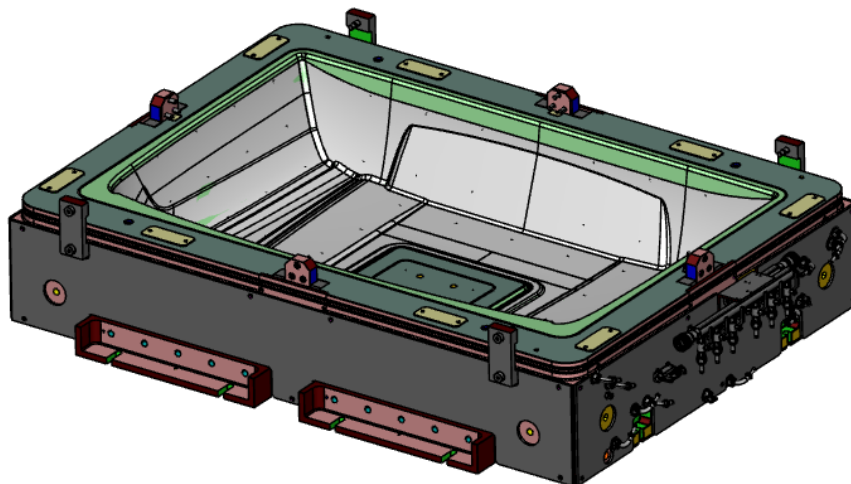


Abbildung 77: Unterwerkzeug (Wanne) inkl. eingelegter, tiefgezogener Folie (weiß)

Im Anschluss sind noch einige Bilder aus der Fertigung der Werkzeuge zu sehen.





Abbildung 78: Die Formhälften eines der Schaumkernwerkzeuge nach der Politur



Abbildung 79: beiden Werkzeughälften des LFI-Gesamtwerkzeuges



Abbildung 80: zeigt die Formhälfte des Tiefziehwerkzeug

Bilder der fertigen Dächer können Sie den Berichten der anderen Projektteilnehmer entnehmen, welche die Dächer gefertigt und getestet haben.

Eine Formfüllstudie der im SMC-Prozess gefertigten Außenhülle des Dachs wurde mit der Software Autodesk Moldflow® durchgeführt. Insbesondere wurden hier die resultierenden Faserorientierungen während und nach dem Fließen des Materials in der Kavität untersucht. Exemplarisch ist eine solche Faserorientierungsverteilung in Abbildung 82 zu sehen. Da eine Außenhaut aus SMC-Material vom Konsortium zugunsten eines LFI-Bauteils, vgl. AP3004 und AP3005, im Laufe des Projektes ausgeschlossen wurde, blieben weitere Erkenntnisse in diesem AP aus.

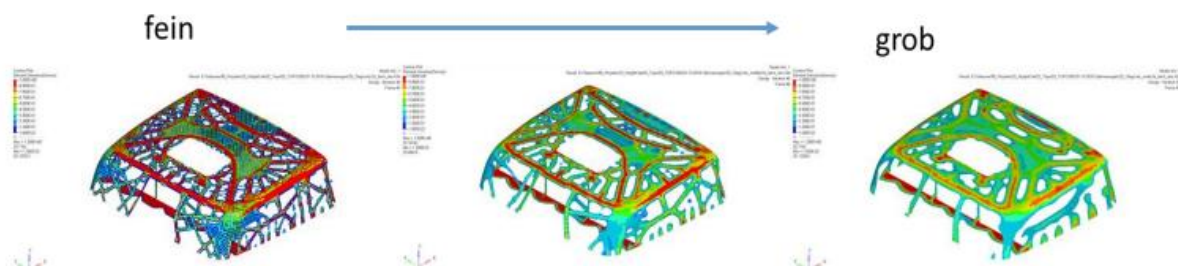


Abbildung 81: Ergebnisse einer 2D Topologieoptimierung an einer überarbeiteten Konstruktion mit unterschiedlicher Feinheit

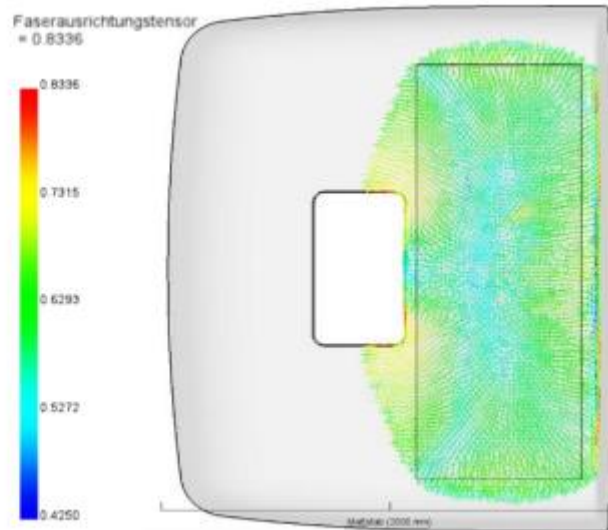


Abbildung 82: Resultierende Faserorientierung während des Pressvorgangs in der Außenhaut der Konstruktion dargestellt als Komponenten des Faserorientierungstensors

Die Struktursimulation soll der Auslegung und Validierung der Konstruktion des Gesamtdaches dienen. Hierbei wurden zwei statische Lastfälle und eine Modalanalyse herangezogen. Die statischen Lastfälle sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

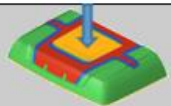
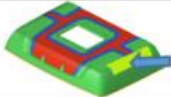
Lastfall	Skizze	Belastung durch Flächenlast
oben		10t
seitlich		1.5t

Tabelle 15: Zusammenfassung der simulierten statischen Lastfälle

Ausgewertet werden die statischen Simulationen zum einen bezüglich ihres Versagensindex nach Hashin. Des Weiteren sind für die strukturelle Integrität des Daches die auftretenden Schubspannungen zwischen Deckschicht und Schaumkern des Dachs von Interesse. Hierzu wird die maximal auftretende Schubspannung im Grundlaminat, im aufgedickten Teil mit dickerem Schaumkern und im Übergang dieser beiden Bereiche analysiert. Des Weiteren darf eine maximale Durchbiegung des Daches nicht überschritten werden. Die Lage der einzelnen Bereiche ist in Abbildung 83 und in Tabelle 16 dargestellt.

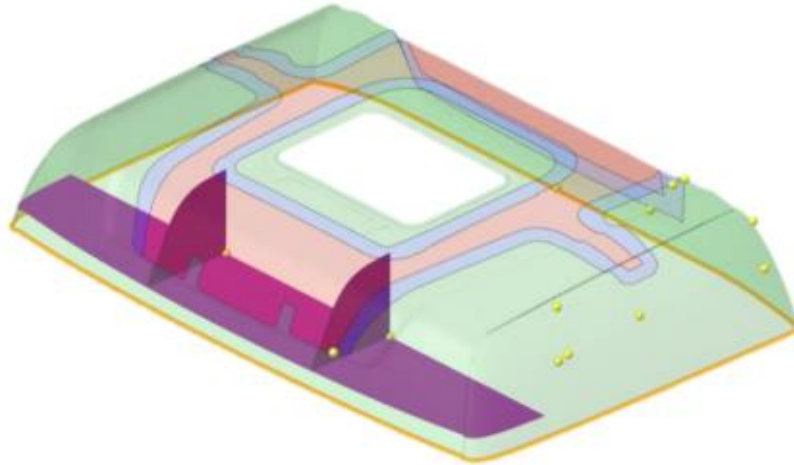


Abbildung 83: Dachkonstruktion unterteilt in verschiedene Bereiche je nach verwendetem Materialsystem. Die verwendeten Materialsysteme sind in Tabelle 2 zugeordnet

Bereich	Material	Farbe
Einspannung	-	Yellow
Grundlaminat	[2 mm LFI, 20 mm PU, 2 mm LFI]	Green
Übergangsbereich	[2 mm LFI, 30 mm Schaum, 2 mm LFI]	Light Blue
Verstärkter Bereich	[2 mm LFI, 40 mm Schaum, 2 mm LFI]	Light Red
Staukasten	[0.5 mm LFI, 5 mm PU]	Purple

Tabelle 16: Bereiche der Dachkonstruktion in Abbildung 83 unterteilt nach Materialsystem. Die Spalte Farbe bezieht sich auf die in Abbildung 83 verwendete farbliche Darstellung der einzelnen Bereiche

Bereich Material Farbe  
 Einspannung - Grundlaminat [2 mm LFI, 20 mm PU, 2 mm LFI]  
 Übergangsbereich [2 mm LFI, 30 mm Schaum, 2 mm LFI]  
 Verstärkter Bereich [2 mm LFI, 40 mm Schaum, 2 mm LFI]  
 Staukasten [0.5 mm LFI, 5 mm PU]

Im Falle des statischen Lastfalls mit der oben am Dach angreifenden Flächenlast, konnten so kritische Bereiche identifiziert werden, in denen Versagen laut dem Versagenkriterium nach Hashin eintritt. Die betroffenen Bereiche sind in Abbildung 84 gezeigt. Diese befinden sich in der Peripherie der Dachluke und wurden im weiteren Konstruktionsprozess verstärkt. Die maximalen Schubdehnungen in den unterschiedlichen Bereichen des Schaumkerns wurden nicht überschritten. Bei einer seitlich angreifenden Seitenlast laut Tabelle 15 konnten keine versagenskritischen Bereiche identifiziert werden. Auch die Schubdehnungen im Schaumkern lagen unterhalb der zulässigen maximalen Schubdehnungen.

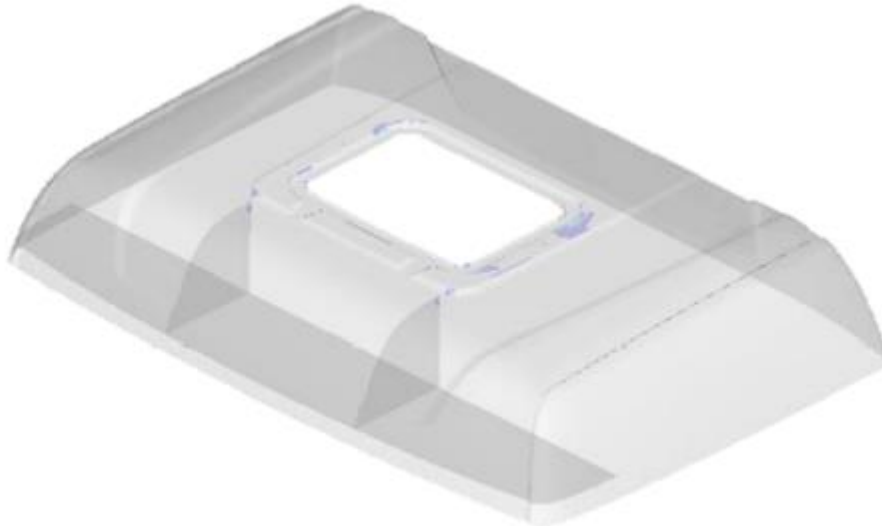


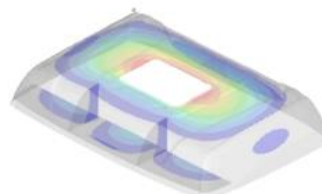
Abbildung 84: Versagenskritische Bereiche, in denen das Versagenskriterium nach Hashin überschritten wird

Die betroffenen Bereiche sind farbig gekennzeichnet. In Bezug auf das dynamische Verhalten der Konstruktion wurde eine numerische Modalanalyse durchgeführt. Die ersten vier Eigenmoden bei einer Einspannung des unteren Rand des Daches, wie in Abbildung 83 gezeigt, sind in Abbildung 85 zu sehen.

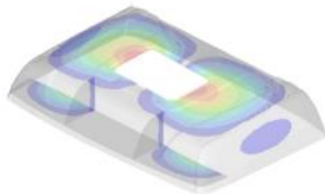
Mode 1:  $f = 92.66 \text{ Hz}$



Mode 2:  $f = 98.78 \text{ Hz}$



Mode 3:  $f = 108.84 \text{ Hz}$



Mode 4:  $f = 110.84 \text{ Hz}$

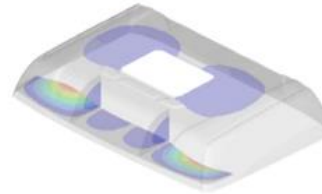


Abbildung 85: Die ersten vier Eigenmoden der eingespannten

Die kleinste Eigenfrequenz liegt somit unter der im Lastenheft geforderten Frequenz von 20 Hz.

## **AP 5 Demonstratoraufbau**

Die Schwerpunkte dieses Arbeitspakets liegen auf der Umsetzung der erarbeiteten Ergebnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen in die Konzeption und Gestaltung eines Demonstratorbauteils.

### **AP 5001 Werkzeugkonzeption / AP 5002 Werkzeugbau / AP 5003 Bauteilabmusterung**

Die Abmusterung ist nach Fertigstellung der Werkzeuge im Hause Fritzmeier erfolgt.

Bei der Befundung stellte sich heraus, dass die LFI-Materialdicken sehr stark variierten. Ursache hierfür war die Schwindung der Schaumkerne, welche zu LFI-Materialanhäufungen und somit zu Mehrgewicht geführt haben. Zusätzlich wurden die Kosten durch vermehrten Materialeinsatz erhöht. Dies widerspricht dem Projektziel und war die Motivation für eine erneute Abmusterung mit angepasstem Werkzeug. Aus diesen Gründen war im AP 5 eine weitere Entwicklungsschleife erforderlich. Das Werkzeugkonzept wurde konstruktiv überarbeitet und das Werkzeug nachgesetzt um die Schwindung der Schaumkerne zu berücksichtigen. Die Kosten für die Werkzeugänderung wurden nach Absprache mit dem Projektträger unter den Projektpartnern verteilt. Nach der Überarbeitung der Werkzeuge war eine erneute Abmusterung für Dezember 2020 geplant. Aufgrund einer verkürzten Aushärtezeit musste der Prozess abgebrochen werden. Nach Rücksprache mit dem Materiallieferant wurden ein Materialzusatz zur Verzögerung der Aushärtezeit beschafft. Aufgrund kapazitiver Fertigungsengpässe auf den Serienanlagen der Projektpartner wurde die Abmusterung mit dem neu eingestellten Material für das Quartal 1/2021 geplant und war in KW 12 abgeschlossen.

Leider konnten weder GreenIng, noch die an den Arbeitspaketen teilhabenden Partner die Bauteilabmusterungen im Technikum von Fritzmeier Composite begleiten. Zur Dokumentation wurden Videos der Fertigungsprozesse sowie Bilder der hergestellten Bauteile bereitgestellt.

Hinsichtlich des Demonstratorhochdachaufbaus musste ein für die Serienproduktion fähiges, reproduzierbares Fertigungs- und Werkzeugkonzept erarbeitet werden. Dabei mussten material- und prozessspezifische Eigenschaften berücksichtigt werden. Hierzu erfolgte eine enge Abstimmung des Fraunhofer ICT mit dem Werkzeugbauer Siebenwurst.

Die im Arbeitspaket AP5001 durch das Fraunhofer ICT und Siebenwurst angestrebten Untersuchungen zur Fiber-Print-Reduzierung bzw. -Retuschierung wurden, wie bereits oben erläutert, aufgrund kostentechnischer Aspekte geändert. Die Ergebnisse der Kennwertabsicherung sind in AP4001 zusammengefasst.

In den wöchentlich durchgeführten Regelkonferenzen, wie auch in Einzelabstimmungsterminen wurden weitere prozess- und fertigungstechnische Details zur Herstellung der Demonstratoren besprochen. Darunter auch die funktionsintegrierte Querverstrebung des Daches zur Staufachmontage und deren kunststoffgerechten Umsetzung. Hier war das Fraunhofer ICT

stets in engem Kontakt mit den werkzeugauslegenden und konstruierenden Partnern Siebenwurst, GreenIng und dem KIT – FAST.

Die Abmusterung und Fertigung der für die Querverstrebung notwendigen Pultrusionsprofile mit einem zuvor von Siebenwurst erstellten Profil-Werkzeug war einst auf der Pultrusionsanlage des Fraunhofer ICT geplant. Jedoch führten die oben bereits erwähnten kostentechnische Änderungen im Projekt und unterschiedlich priorisierte Arbeitsinhalte dazu, dass das hierfür geplante Budget für den finalen Demonstratorbau verwendet wurde und kein maßfertiges Pultrusions-Profil-Werkzeug bereitgestellt werden konnte. Mit Fokus auf zukünftige Umweltvorschriften und -auflagen, kunststoffgerechte sowie sortenreine Recyclierung bzw. Materialaufbereitung gingen die Bemühungen des Fraunhofer ICT dahin, dass die zur Versteifung einzubringenden Profile auf Basis einer PUR-Matrix hergestellt werden sollten. So wie die PUR-basierten Sandwichdeck- und schaumkernschichten der einzelnen Staufachblenden, -klappen und einzelnen Dachstrukturen. Leider konnte sich das Konsortium hier aufgrund der auseinandergelassenen Meinungen nicht einigen, weshalb wir zwangsläufig auf kommerziell erhältliche Pultrusionsprofile auf Basis von kohlenstofffaserverstärktem Epoxydharz zurückgriffen. Aufgrund der seit Jahren am ICT aufgestellte Pultrusionstechnik und Marktübersicht war klar, dass die für das Projekt notwendigen Profilgeometrien mit spezifischen Maßen nicht verfügbar sind. Dies führte im weiteren Verlauf des Projektes dazu, dass unterschiedliche Profile zugeschnitten, auf Maß konfektioniert und verklebt werden mussten. Zur Verklebung diente ein flexibler PUR-Abdicht- und Montagekleber, welcher auch den Erschütterungen im Fahrerhaus Stand hält und dessen Charakterisierungen hinsichtlich Adhäsion bereits aus dem geförderten Vorprojekt MultiKab vorliegen. Dieser sollte ebenso zur Verklebung und Abdichtung der LFI-Staufachfront dienen.

Aufgrund kapazitiver Fertigungsengpässe auf den Serienanlagen der Projektpartner wurden zwecks zeitsparender, aber leider kostentreibender Gründe und entgegen dem vom Fraunhofer ICT verfolgten Fokus der Nachhaltigkeit, die Staufachfronten nicht als LFI-Sandwich ausgeführt, sondern durch zugekaufte Aluminium-Sandwich-Platten ersetzt. Die Staukastenau sparungen wurden nachträglich eingebracht und durch den Modellbau von Siebenwurst versiegelt. Nähere Informationen hierzu sind den von den Projektpartnern eingereichten Berichten zu entnehmen.

Das Arbeitspaket AP5002 beinhaltete neben der gemeinsamen Ausarbeitung eines Konzeptes für das Demonstratorhochdach, basierend auf AP5001, die eigentliche Werkzeugkonstruktion. Siebenwurst war für die Konstruktion des Werkzeuges verantwortlich. Hierbei galt es verschiedene Parameter zu berücksichtigen, um den zu realisierenden Demonstrator sowohl kostengünstig als auch flexibel fertigen zu können und allen Anforderungen des Lastenhefts aus AP1000 gerecht zu werden. Zudem wurden dabei die Fragestellungen der

funktionsintegrierten Einlege Teile und Verstärkungen bzw. Fixierungselemente betrachtet. Hier konnte das Fraunhofer ICT entsprechend unterstützen und tätig werden.



Abbildung 86: Aus dem Konzept überführte, bei Siebenwurst gefertigte Patrize des Demonstratorwerkzeugs



Abbildung 87: Bei Siebenwurst gefertigte Matrize des Demonstratorwerkzeugs



AP5003, die Bauteilabmusterung, erforderte eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer ICT und Fritzmeier Composite. Diese musterten die unterschiedlichen Materialsysteme bei sich im Technikum ab. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der reproduzierbaren Einbringung der Verstärkungs-, Anbindungs- und Leichtbaustrukturen in den Verbund, sowie auf den Material- und Maschinenparameter.

Angesichts der für die Demonstratorabmusterung benötigten Rühl Puromer PUR-System-Komponenten agierte das Fraunhofer ICT als direkter Ansprechpartner zur Materialanpassung und Systemkonfigurierung zwischen Rühl Puromer und Fritzmeier Composite. Mit den in den Vorversuchen ermittelten Materialkennwerten und Topf- bzw. Ruhezeiten der dort eingesetzten Systemkombination Rühl puropreg 569 IT und Rühl puronate 900, wie auch in Anbetracht der anstehenden Werkzeuggrößen, war die vom Fraunhofer ICT vorgeschlagenen Materialabstimmung ein Polyurethan-System mit dem Polyol-Zusatz „LL“. Eine In-Hausbezeichnung von Rühl für Schäume mit verändertem Reaktionsverhalten. In diesem Fall mit verlängerter Ruhezeit (statt 90 s → 230 s). Damit sollte gewährleistet werden, dass ausreichend Zeit zwischen dem ersten LFI-Eintrag, dem Einlegen und Ausrichten der Kernschäume, wie auch Inserts und dem zweiten LFI-Eintrag ist. Die mechanischen Materialkennwerte blieben dabei unverändert.

Im Verlauf der Demonstratorabmusterung und den dafür benötigten Rühl Puromer PUR-System-Komponenten gab es seitens Fritzmeier Composite Anpassungsbedarf. Diese baten das Fraunhofer ICT um Unterstützung bei der Abstimmung in direkter Zusammenarbeit mit Rühl Puromer. Nach Rücksprache mit Rühl wurde vermutet, dass es aufgrund der längeren Lagerhaltung zum Abbau von Einzelkomponenten im PUR-System kam, welche für die offene Verarbeitungszeit im Prozess zuständig waren. Eine weitere Möglichkeit war, dass es beim Materialwechsel und Spülen der LFI-Anlage zum Eintrag von Fremdmaterial kam, welches ebenfalls das Rühl-PUR-System dahingehend beeinflusst, dass die Topf- und Systemzeiten nicht mehr passten. Rühl Puromer sendete entsprechende Einzelkomponenten zur Anpassung des Systems an Fritzmeier Composite und gab entsprechende Dosieranweisungen. Leider ohne Erfolg. Das System schien nicht mehr einsetzbar zu sein und musste ersetzt werden. Die daraufhin mit neuem Material gefahrenen Demonstratorabmusterungen verliefen erfolgreich.

Die gesammelten Erfahrungen in diesem Arbeitspaket wurden dokumentiert und auf den finalen Demonstrator übertragen. Die Übertragung bzw. der Transfer und die Prozessanpassungen wurden im Technikum von Fritzmeier Composite untersucht und durch das in AP6004 beschriebene Arbeitsziel demonstriert bzw. abgesichert.

Es konnten jedoch weder das Fraunhofer ICT, noch die an den Arbeitspaketen teilhabenden Partner die Bauteilabmusterungen im Technikum von Fritzmeier Composite begleiten. Die Unterstützung und Teilnahme beschränkten sich lediglich auf während der Abmusterungen geführte Web-Konferenz und Video-Telefonate. Dies war einerseits der Laufzeitverlängerung mit

sehr häufig verschobenen Versuchszeiträumen, andererseits der im letzten Jahr des Projektes herrschenden Pandemie geschuldet. Zur Dokumentation wurden Videos der Fertigungsprozesse sowie Bilder der hergestellten Bauteile bereitgestellt.

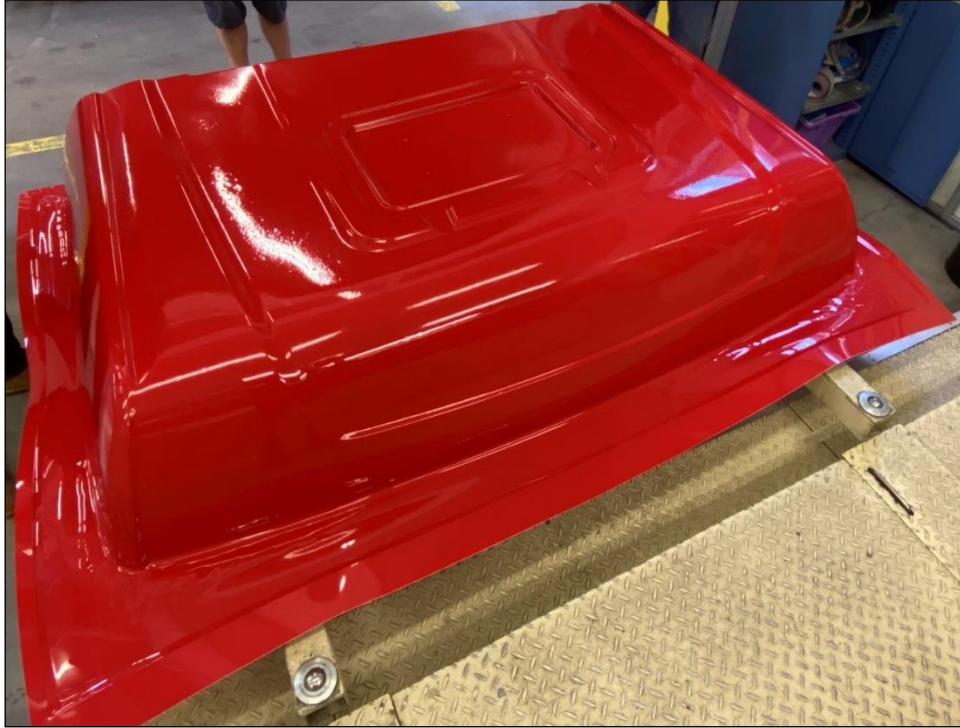


Abbildung 88: Im Tiefziehprozess vorgefertigte ABS-Außenhaut

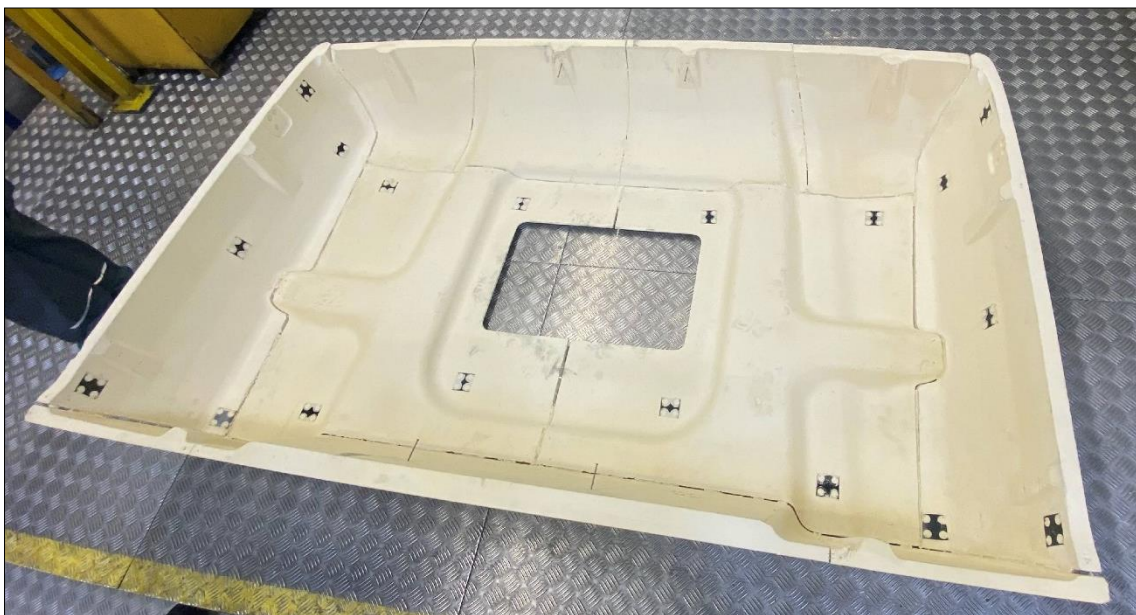


Abbildung 89: Fünf einzeln vorgefertigte und zwecks vereinfachtem Prozesshandling, zu einem Einleger gefügter Schaumkern



Abbildung 90: Im Werkzeug eingelegte ABS-Tiefziehfolie mit darauf eingetragenen und verpresstem LFI sowie darin integriertem Schaumkerneinleger



Abbildung 91: Querschnitt durch ein gefertigtes Demonstratorbauteil

Mit Hilfe des in Abbildung 91 dargestellten Querschnitts durch einen der gefertigten Demonstratoren gehen die simulativ nachgewiesenen und entsprechend ausgelegten Strukturverstärkungen durch lokal eingebrachte Dickensprünge im Sandwichaufbau gut hervor.



Abbildung 92: Hochdach-Demonstrator „HylightCab“ bei der Vermessung

Abbildung 92 zeigt das bei Fritzmeier Composite durch Fräsen überarbeitete und zur Vermessung vorbereitete Demonstratorbauteil - HylightCab Hochdach.

### **AP 6 Validierung**

Im Bereich der Validierung wurden Versuche durchgeführt, um zu überprüfen, ob die allgemeinen Anforderungen aus AP1000 durch das Bauteil, die Lasteinleitungen und Werkstoffverbindungen erfüllt werden. Die Versuche wurden für die Demonstratorgeometrie ausgelegt, um die Simulation für die weitere Bewertung zu qualifizieren.

### **AP 6001 Konzipierung der Versuche / AP 6002 Prüfstands Aufbau / AP 6003 Nachweis der Kennwerte aus Anforderungskatalog**

Im Rahmen der Validierung hat GreenIng eine LKW-Kabine beschafft, auf der die Prototypen des Leichtbauhochdachs montiert werden konnten. Die Kabine dient der Absicherung der Anforderungen an die Festigkeit des Daches sowie der praktischen Erprobung der Montierbarkeit. Die Festigkeit des Kabinendachs wird gemäß den in der ECE R-29 relevanten Lastfällen geprüft. Die Prüfung zielt im Wesentlichen auf dem Insassenschutz ab, welcher nur in Kombination mit einer geeigneten Kabine realistisch erprobt und anschließend validiert werden kann. Das Hochdach der ersten Abmusterung wurde einem realitätsnahen Witterungstest unterzogen. Das Ergebnis hierbei, welches in Abbildung 93 dargestellt ist, war, dass bereits nach kurzer Zeit erste Veränderungen bezüglich der Farbbeständigkeit der Deckfolie des Prototyps sichtbar wurden, welche sich unter anderem auf die andauernde UV-Bestrahlung und weitere Witterungseinflüsse zurückführen lassen.



Abbildung 93: Auswirkungen von Witterungseinflüssen auf den Prototyp der ersten Abmusterung

Durch eine Anpassung der ABS-Folie bei den Prototypen der zweiten Abmusterung wurde die UV-Beständigkeit weiter verbessert. Aufgrund der verspäteten Herstellung dieser Abmusterung konnten im Projektverlauf keine weiteren Tests diesbezüglich durchgeführt werden.

Bezüglich der Montage wurde geprüft, ob die Klebefläche mit der Kabine abschließt und die vorgesehenen Anschraubpunkte an den Entformungsschrägen der Dachinnenseite mit der Stahlblechkonstruktion übereinstimmen. Hierfür wurde die angeschaffte Kabine als Referenz genutzt und sowohl die Passgenauigkeit der Klebeflächen visuell überprüft, als auch die Positionierung der Anschraubpunkte. Bereits die Prototypen der ersten Abmusterungen hatten eine gute Passgenauigkeit bezüglich der oben angesprochenen Punkte. Auch ein Prototyp der zweiten Abmusterung wurde dem Prüfdurchlauf unterzogen und betreffend Montagefähigkeit und Passform auf den zugrunde liegenden Kabinentyp näher betrachtet. Auch hier war bezüglich der Passgenauigkeit nichts zu bemängeln. Alle vorhandenen Überstände wurden auf Symmetrie geprüft und mit den zugrundeliegenden CAD-Daten verglichen. Abbildung 94 zeigt die Referenzkabine mit einem Prototyp der 2. Abmusterung im Zuge der ersten Validierungsschleife.



Abbildung 94: Validierung Passgenauigkeit Hochdach

Abbildung 95 zeigt die Innenansicht des Hochdachs und beispielhaft die relevanten Anschraubpunkte und Entformungsschrägen. In beiden Bereichen war eine Übereinstimmung des Leichtbaudachs zur Referenzkabine gegeben und somit die Passform an der Schnittstelle zur Kabine bestätigt.



Abbildung 95: Validierung Dachinnenseite

In einem zweiten Schritt wurde die Passform und Montagefähigkeit der Staukästen zum Leichtbaudach überprüft. Auch hier hat eine erste Untersuchung eine Bestätigung der grundlegenden Passform ergeben. Aufgrund des noch fehlenden Pultrusionsprofils konnte eine finale Überprüfung der Passform sowie die Montage der Staukästen noch nicht durchgeführt werden.

In Bezug auf die Oberflächengüte der Prototypen hat eine visuelle Überprüfung stattgefunden. Hierbei hat sich gezeigt, dass bereits die erste Abmusterung eine hohe Oberflächenqualität aufgrund der Deckschicht aus ABS-Folie aufweist. Alle im Lastenheft definierten Anforderungen zum Thema Oberflächenbeschaffenheit wie beispielsweise Oberflächenfehler, Trenngate, Rippenzeichnung oder Welligkeiten in der Struktur haben bezogen auf die Außenfläche überzeugt. Die Innenfläche des Hochdachs zeigt, wie in Abbildung 95 ersichtlich, die Struktur der LFI-Schicht. Während sich hier beim Prototyp der ersten Abmusterung noch deutliche Löcher in der Oberfläche gezeigt haben, die auf eine ungleichmäßige Verteilung der PU-Matrix zurückzuführen sind, wurde dies bei dem Prototyp der zweiten Abmusterung nicht mehr erfasst. Allerdings war hier in wenigen kleinen Bereichen eine lokale Nachbearbeitung im Rahmen der Abmusterung ersichtlich. Dennoch zeigt die Struktur der Innenfläche keine groben Ungleichmäßigkeiten, sondern eine dem Verfahren entsprechende gleichmäßige Verteilung der Fasern.

Die mechanische Überprüfung des Prototyps der zweiten Abmusterung bzgl. der Materialkennwerte im Nachgang an die Versuche zur Herstellung des Demonstratoraufbaus durch GreenIng und das Fraunhofer ICT konnte aufgrund der erst zum Projektende hin gelieferten Hochdächer nicht erfolgen. Schließlich fehlte noch die Integration der Staufächer, samt Klappen und Querverstrebung. Es war so leider nicht möglich den Demonstrator bis zum Ende des Projektes (31.03.2021) fertigzustellen und einem Belastungstest zu unterziehen. Dennoch konnte am 25.08.2021 das Hochdach mit einem Gewicht von 1,3 Tonnen belastet werden. Da es zu diesem Zeitpunkt, weder mit der Kabine verklebt, noch verschraubt war und nur aufgelegt werden konnte, wurde von einer höheren Belastung abgesehen, um Beschädigungen aufgrund nicht beanspruchungsgerechter Verbindung mit der Kabine zu vermeiden. Schon diese erste Belastung zeigte, dass das Hochdach wie erwartet über eine hohe Steifigkeit verfügt. GreenIng und das Fraunhofer ICT haben sich bereit erklärt, eigeninitiativ nach Projektende noch weitere Hochdachprüfungen durchzuführen. Für die finale Endmontage wurde ein Teil der gefertigten Hochdachdemonstratoren an das Fraunhofer ICT geliefert. Gemeinsam mit dem Fraunhofer ICT wurden die Einzelkomponenten der Staufächer sowie die zusätzlich verstärkenden Fachtrennwände und das Pultrusionsprofil verklebt und mit den, im Hochdachaufbau integrierten, Metall-Insert Elementen verbunden.

Dieses Arbeitspaket beinhaltete die Erfassung der mechanischen und thermischen Anforderungen an den Hochdachaufbau. Diese wurden durch GreenIng und das KIT – FAST in Vergleichslasten umgerechnet. Das Fraunhofer ICT brachte sich hierbei in die konzeptionelle Umsetzung der Versuchsapparaturen ein.

### **AP6002 Prüfstands Aufbau**

Zwecks der für später anvisierten Hochdachprüfungen, den in vorangehenden Arbeitspaketen konzipierten Versuchsständen und dem damit verbundenen Versuchs- bzw. Messaufbau hat das Fraunhofer ICT die Firma GreenIng bei der Umsetzung begleitet und bei der Erstellung der Prüfabläufe beratend zur Verfügung gestanden. Wie aus AP6003 hervorgeht, kommt der Prüfstandaufbau erst nach Ende der Projektlaufzeit zum Einsatz. Dieser umfasst neben den lasteinleitenden Strukturen auch den Messaufbau und die Erstellung von Prüfabläufen.

### **AP6003 Nachweis der Kennwerte aus Anforderungskatalog**

Basierend auf den Versuchsdurchführungen und Dokumentationen konnte bereits vor der Demonstratorabmusterung ein Teil der im Anforderungskatalog festgelegten Materialkennwerte nachgewiesen werden. Die Prüfprotokolle dienten dabei als Referenz für die Simulation und konnten so die effektive Nutzung der Versuchsdaten sicherstellen.

Eine direkte Vergleichsprüfung der festgelegten Materialkennwerte im Nachgang an die Versuche zur Herstellung des Demonstratoraufbaus durch die Firma GreenIng, das KIT – FAST und das Fraunhofer ICT konnte aufgrund der erst zum Projektende hin gelieferten Hochdächer nicht erfolgen. Schließlich fehlten die noch zu integrierenden Staufächer, samt Klappen und Querverstrebung. Es war so leider nicht möglich den Demonstrator bis zum Ende des Projektes fertigzustellen und einem Belastungstest zu unterziehen. Jedoch waren das Fraunhofer ICT und GreenIng bereits in enger Abstimmung und haben sich bereiterklärt, die noch ausstehende Hochdachprüfung nach Projektende gemeinsam am Fraunhofer ICT durchzuführen, um das Projekt damit ergänzend abzuschließen. Für die finale Endmontage wurde ein Teil der gefertigten Hochdachdemonstratoren ans Fraunhofer ICT geliefert. Gemeinsam mit GreenIng wurden die Einzelkomponenten der Staufächer sowie die zusätzlich verstärkenden Fachtrennwände und Pultrusionsprofile verklebt und mit den im Hochdachaufbau integrierten Insertelementen verbunden. Nachstehend sind die einzelnen Montageschritte dokumentiert.





Abbildung 96: Hochdach-Demonstrator „HylightCab“ zur Anpassung und Sichtung

Abbildung 96 zeigt einen der beiden ersten ans Fraunhofer ICT gelieferten Hochdach-Demonstratoren, der aufgrund materieller Fehlstellen und noch nicht auf Endmaß gefräster Konturen zur ersten Staufachanpassung herangezogen wurde.

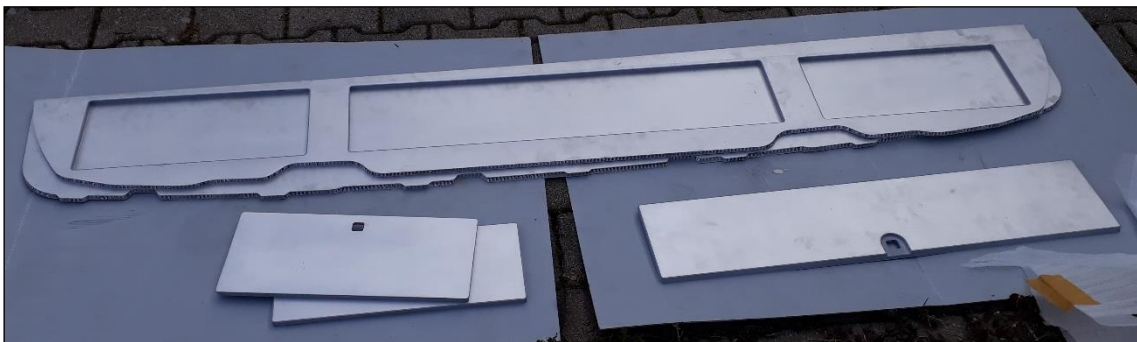


Abbildung 97: Aluminium-Sandwich-Komponenten der Staufächer des „HylightCab“ Hochdach-Demonstrators

Die in Abbildung 97 dargestellten, gefrästen und teils versiegelten Sandwich-Komponenten mit Aluminium-Deckschicht, wie auch Aluminium-Wabenkern des Staufachkastens wurden vom Projektpartner Siebenwurst überarbeitet und anschließend dem Fraunhofer ICT zur Verfügung gestellt. Leider wurden diese bereits vor der letzten Werkzeuganpassung gefertigt, wodurch deren Konturen nicht mehr exakt der des Demonstrators entsprach. Durch aufwendiges Anpassen und Fräsen konnten wir die Bauteile schließlich wieder integrieren und weiterverwenden. Dabei unterstützt wurde das Fraunhofer ICT von GreenIng.



Abbildung 98: Verklebung und Anpassung der Staufach-Sandwichpanelen mit dem Pultrusionsprofil

Abbildung 98 und 99 zeigen jeweils die weiterführenden Arbeiten im Zusammenhang mit der Staufachintegration ins Hochdach. In Abbildung 98 erfolgt die Ausrichtung, Verklebung und Anpassung der Staufach-Sandwichpanelen mit dem zusätzlich querversteifenden Pultrusionsprofil, welches über ins Dach montierte Steck-Klebe-Verbindungen eingebracht wird.

Abbildung 99 präsentiert die der Innenkontur des Hochdachs angepasste Staufachfront mit in die Dachfront eingelassenen Steckverbindungen. Abhängig von den jeweiligen Fügeelementen wurde das komplette Staufach und die angrenzenden Bauteile mit speziellem Karosserie- und Verbundklebstoff der Firma Henkel, die sich auf Anfragen des Fraunhofer ICT bereit erklärte das Projekt im finalen Schritt bis hin zum Demonstrator zu unterstützen, verklebt und abgedichtet.

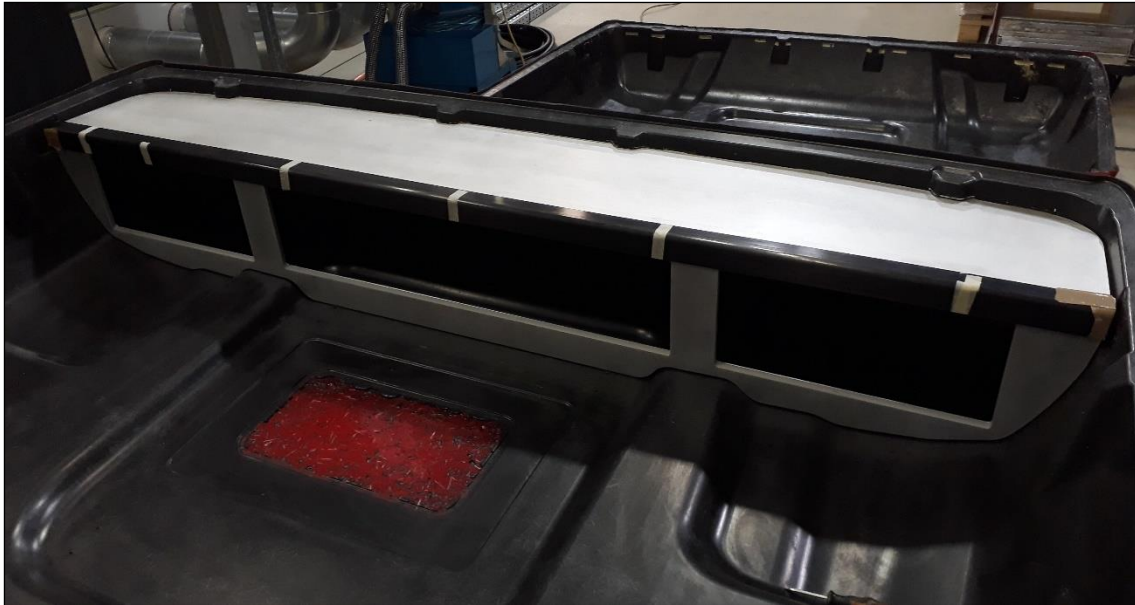


Abbildung 99: Hochdach-Demonstrator mit eingepasstem Staufachsystem

Die folgenden Abbildungen zeigen den mit GreenIng am Fraunhofer ICT aufgebauten Demonstrator-Prüfstand. Die hierfür benötigte Fahrerhauskabine im Rohbau wurde durch GreenIng zur Verfügung gestellt. Nach deren Anlieferung erfolgten zunächst die Ausrichtung und Unterbauung mit Holzträgern und Stahlplatten zwecks flächiger Kraftverteilung. Um ein unbeabsichtigtes Wegrutschen bei von oben senkrecht auf das Dach wirkender Belastung zu verhindern, wurde die Kabine zudem über in den Boden eingelassene Bolzenanker und Schwerlastzurrgurte gesichert und verspannt. Abbildung 100 zeigt die Kabinenrohbaurahmenstruktur beim Ausrichten und Positionieren links, sowie rechts das lediglich aufgesetzte, nicht verschraubte und verklebte Hochdach.



Abbildung 100: Kabinenrohbaurahmenstruktur links und aufgesetzter Hochdach-Demonstrator rechts



Abbildung 101: Prüfstands Aufbau mit aufgesetztem Demonstrator



Abbildung 102: Frontsicht des Hochdach-Demonstrators



Abbildung 103: „HylightCab“-Demonstrator mit ausgefräster Luke für das Ausstelldach

Die nähere Betrachtung zeigte, dass der überarbeitete Hochdachdemonstrator sehr passgenau hergestellt werden konnte und trotzdem noch ausreichend Spiel für eventuell auftretende Fertigungstoleranzen eingeräumt wurde. Wie in Abbildung 104 dargestellt, sind die Dachverschraubungen baugleich zu aktuell im Feld verbauten Hochdächern bzw. Kabinenrahmenstrukturen. Eine bequeme und schnelle Erreichbarkeit sowie der direkte Austausch der Hochdachaufbauvariante konnten somit gewährleistet werden. Auch für die Abdichtung und Verklebung des Dachaufsatzes mit der Fahrerhauskabine ist ausreichend Platz vorgesehen und vorhanden.



Abbildung 104: Prüfstands Aufbau „HylightCab“ mit Prüfungsgewicht, passgenauer Dachverschraubung und Abdichtungsflächen



Abbildung 105: Hochdach-Demonstrator „HylightCab“ mit aufgelegtem Prüfgewicht und Innenansicht

Wie bereits in vorangehenden Arbeitspaketen erläutert, konnte der Demonstrator bis zum Einreichen des Abschlussberichtes leider nicht komplett geprüft werden. Aus diesem Grund entschieden wir uns, lediglich den auf die Fahrerhauskabinen aufgelegten, weder verklebten, noch verschraubten HylightCab Hochdach-Demonstrator mit einem vorläufigen Prüfgewicht von 1.205kg zu belasten. Ersichtlich ist dies anhand der Differenz und dem Vergleich der beiden Kranwaagenanzeigen aus Abbildung 104 und 105. Zum Vergleich, dies entspricht nahezu dem Gewicht eines aktuellen VW Golf oder Opel Astra. Weder die während der Prüfung akustisch wahrnehmbaren, noch die nachfolgend optischen Prüfungen ergaben, dass es bislang zu Rissbildungen, Delaminationen oder sonstigem Materialversagen kam. Die gesamte Kraft konnte über die lokal variierenden Sandwichstrukturen und integrierten, vorab simulierten und



geometrisch materialspezifisch angepassten Strukturversteifungen aufgenommen und abgefangen werden.

Die bislang ermittelten Kenngrößen wurden im Nachgang zur Prüfung mit den beteiligten Projektpartnern besprochen und diskutiert.

Die finale Demonstratorprüfung mit flächiger Belastung von bis zu 7.375kg und vollständig verklebtem, sowie umlaufend verschraubtem Kabinenhochdachaufbau erfolgt in den nächsten Wochen am Fraunhofer ICT.

### **AP6004 Transfer aus Technikum in Großserienanlage**

Im Rahmen von Technikumsversuchen wurden Demonstratorbauteile mit der erarbeiteten Multi-Material-Bauweise gefertigt. Jene Hochdächer wurden zur Validierung der erreichten und geforderten Bauteileigenschaften herangezogen. Diese, wie auch die vom Fraunhofer ICT in den Arbeitspaketen AP2005 und AP4001 erarbeiteten Ergebnisse wurden mit den beteiligten Projektpartnern, mitunter auch der Materiallieferant Rühl Puomer, ausgetauscht und abgestimmt. Die sich daraus ergebenden Materialanpassungen des LFI-Deckschicht- und Schaumkernsystems wurden somit kontinuierlich verbessert und schließlich erfolgreich auf der Großserien- bzw. Produktionsanlage von Fritzmeier Composite abgemustert. Wie vorangehend bereits geschildert, konnte eine persönliche Teilnahme -und Versuchsbegleitung vor Ort leider nicht ermöglicht werden. Jedoch zeigten sich unsere stetigen Bemühungen durch die erfolgreiche System- und Prozessanpassung, vor allem aber durch die damit final angefertigten Demonstrator-Hochdachaufbauten.

## **4 Darstellung der Verwertung und Veröffentlichungen**

### **4.1 Verwertung**

Das erarbeitete Fachwissen wurde durch Publikationen, auf Konferenzen und auf Messen einer breiten Industrie- und Forschungslandschaft zugänglich gemacht. Jedoch konnten aufgrund der im letzten Projektjahr einschränkenden COVID-19-Pandemie Präsenzveranstaltungen und Kundentermine nur via Web-Veranstaltungen wahrgenommen werden.

Teilweise brachten die im Projekt beleuchteten Themenschwerpunkte weitere Fragestellungen mit Blick auf Material, Bauweise und Prozesstechnik zum Vorschein. Die Bemühungen gehen in Richtung weiterführender Systemintegration, sowie die Übertragung des Leichtbaukonzeptes auf ans Hochdach angrenzende Kabinenstrukturen und -verkleidungen. Zudem bilden die im Verbundprojekt evaluierten Werkstoffeigenschaften erneut die Grundlage für weitere wissenschaftliche Forschungsschwerpunkte. Des Weiteren zeigte die erfolgreiche Umsetzung der

Multimaterialbauweise, dass durch die Erschließung des Leichtbaupotenzials für Nutzfahrzeuge, einschließlich der Konzeption der dafür notwendigen Füge-technologien und unterstützenden Simulationsmethoden, wertvolles wettbewerbsrelevantes Wissen generiert wurde. Die mit dem Projekt erzielten Forschungsarbeiten konnten den im Antrag geschilderten Stand der Technik ausweiten und ergänzen, so dass diese mittel- bis langfristig zur Realisierung neuer Fahrzeugkabinenkonzepte führt. Die Forschungsergebnisse stärken die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Industrie nachhaltig. Somit hat das Projekt eine breite industrielle Hebelwirkung für die Leichtbaukompetenz der deutschen Nutzfahrzeughersteller und deren Technologiepartner.

Für die Firma GreenIng stellt das in HylightCab erworbene Know-how eine Voraussetzung für die Akquise von Kundenprojekten im Bereich des funktionsintegrierten Leichtbaus dar. Die Resonanz aus bereits geführten Gesprächen mit potenziellen Kunden hat gezeigt, dass der funktionsintegrierte Leichtbau auch im Bereich der Elektrifizierung eine große Rolle spielt. Ein Ansatz ist die Reduzierung des Batteriegehäusegewichts mit den erforschten Leichtbauansätzen. Damit bilden die Arbeiten in HylightCab eine solide Grundlage für weitere Kundenprojekte rund um das Thema effizienter Leichtbau, wodurch die Firma GreenIng in diesem Bereich wirtschaftlich erfolgreich sein kann.

Die im Projekt entwickelten Materialmodelle können in Folgeprojekten am KIT-FAST genutzt und weiterentwickelt werden. So ließen sich die Modelle beispielsweise auch auf Recyclingvliese anwenden.

## 4.2 Veröffentlichungen

Die Inhalte von HylightCab werden genutzt, um die Erfahrungen im Bereich struktureller Leichtbau und Multi-Material-Design, auf Seminaren und Kongressen darzustellen. Diese Art der Veröffentlichungen stellen einen guten Weg dar, das erlangte Know-how einem breiten Publikum und potenziellen Kunden zu präsentieren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens entstanden während sowie nach der offiziellen Projektlaufzeit nachfolgende Veröffentlichungen:

Florian Wafzig, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT; Oleg Saburow, KIT – FAST; „HYLIGHTCAB – HYBRIDE LEICHTBAUTECHNOLOGIE FÜR NUTZFAHRZEUGKABINEN“; AVK Composites Report 2-2020, Themenschwerpunkt "Transport", de/en;

Die zweite Ausgabe des Magazins erschien am 10. November 2020 als gedruckte Version und wiederum als E-Magazin:

[https://www.unserebroschuere.de/AVK\\_Composite2\\_2020/WebView/](https://www.unserebroschuere.de/AVK_Composite2_2020/WebView/)

Des Weiteren entstand nachstehender Fach-Vortrag:

Florian Wafzig, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT; Oleg Saburow, KIT – FAST; „Leichtbau für die Nutzfahrzeugkabine: Das BMWi-Projekt HylightCab“; Vortrag „FSK Tag Leichtigkeit PUR“, 29.-30. April 2020, Pfinztal

Aufgrund der noch anhaltenden Pandemie in Deutschland wurde die am Fraunhofer ICT geplante Fachtagung „FSK Tag Leichtigkeit PUR“ abgesagt und auf einen späteren Zeitraum verschoben. Der Vortrag konnte somit leider nicht präsentiert werden. Sobald die Veranstaltung nachgeholt wird, beabsichtigen wir den Vortrag erneut einzureichen. Über einen neuen Termin der Veranstaltung informiert der FSK e.V. im Frühjahr 2021.

Mit Blick auf das hohe Leichtbaupotential bewarb sich das Fraunhofer ICT zudem, stellvertretend für das gesamte Projektkonsortium, auf nachfolgende Ausschreibung:

AVK-Innovationspreis 2021, Kategorie: „Innovative Produkte bzw. Anwendungen“

Leider kam unsere Innovation nicht in die engere Wahl. Unsere Projekt- und Forschungsarbeiten werden trotzdem in der AVK Innovationspreisbroschüre mit einem Kurztext in Deutsch und Englisch abgedruckt. Die Broschüre wird am Abend der Preisverleihung (23. November 2021) verteilt und während des JEC Forums Dach (23. - 24. November 2021) ausgelegt.

Von GreenIng werden die Inhalte von HylightCab genutzt, um die Erfahrungen im Bereich struktureller Leichtbau und Multi-Material-Design, auf Seminaren und Kongressen darzustellen. Diese Art der Veröffentlichungen stellen einen guten Weg dar, das erlangte Know-how einem breiten Publikum und potenziellen Kunden zu präsentieren.

Die im Projekt entwickelten Simulationsmodelle für Composite-Bauteile stehen für Lehrveranstaltungen des KIT-FAST als anschauliche virtuelle Beispiele zur Verfügung. So kann den Studierenden auch ein Einblick in die industrielle Praxis und die dort herrschenden Herausforderungen beim Multi-Material-Design gegeben werden

## 5 Zusammenfassung

Zusammenfassend war die Projektarbeit und die daraus resultierenden Ergebnisse ein voller Erfolg. Durch die kostenneutrale Projektverlängerung wurde es ermöglicht, dass zum Projektende Belastungsversuche mit dem innovativen Leichtbaudach durchgeführt werden konnten. Die Projektpartner planen ein Projektabschlusstreffen, um die Ergebnisse reflektieren und über mögliche Anschlussaktivitäten diskutieren zu können.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  Multimaterialsysteme für gewichts- und kostenoptimierte Nutzfahrzeugkabinen - Hybrid lightweight Technology for Truck Cabins („HylightCab“)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Dr.-Ing. Uwe Kehn Timo Reuter	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2021
	6. Veröffentlichungsdatum 30.09.2021
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) - GreenIng GmbH & Co. KG Bahnhofstraße 109, 71397 Leutenbach - Chr. Karl Siebenwurst GmbH & Co KG Industriestraße 31, 92345 Dietfurt - Fritzmeier Composite GmbH & Co. KG Heimatweg 84, 83052 Bruckmühl - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Institutsteil Leichtbautechnologie Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe - Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie Joseph-von-Fraunhofer Str. 7, 76327 Pfinztal-Berghausen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19117014A
	11. Seitenzahl 99
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 16
	15. Abbildungen 105
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung  Ziel des beantragten Forschungsvorhabens war die Konzeption einer leichten Kabinenstruktur für ein Nutzfahrzeug im schweren Verteiler- und Fernverkehr. Es wurde ein materialhybrider Einsatz von faserverstärkten Kunststoffbauteilen im Zusammenspiel mit metallischen Bauteilen in den höchstbelasteten Bereichen einer Kabine adressiert. Hierfür wurde eine potentielle Gewichtsersparnis bei einem Einsatz eines funktionsintegrierten Leichtbaukonzepts erforscht. Im Speziellen wurde ein Nutzfahrzeug Hochdach im Multi-Material-Design entwickelt. Die angewendete Sandwichstruktur aus PUR-Schaum und LFI-Glasfaser erzielte durch ein innovatives Konstruktions- und Fertigungskonzept eine Reduzierung des Bauteilgewichts um ca. 40% bei gleichbleibender Stabilität und Beständigkeit.	
19. Schlagwörter Multi-Material-Design, Funktionsintegrierter Leichtbau, Sandwichbauweise, Nutzfahrzeug-Hochdach	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title  Multimaterial systems for weight- and cost-optimized cabins of commercial vehicles – Hybrid lightweight Technology for Truck Cabins (“HylightCab”)	
4. author(s) (family name, first name(s))  Dr.-Ing. Uwe Kehn Timo Reuter	5. end of project 31.03.2021
	6. publication date 30.09.2021
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) -GreenIng GmbH & Co. KG Bahnhofstraße 109, 71397 Leutenbach - Chr. Karl Siebenwurst GmbH & Co KG Industriestraße 31, 92345 Dietfurt - Fritzmeier Composite GmbH & Co. KG Heimatweg 84, 83052 Bruckmühl - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Institutsteil Leichtbautechnologie Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe - Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie Joseph-von-Fraunhofer Str. 7, 76327 Pfinztal-Berghausen	9. originator's report no.
	10. reference no. 19I17014A
	11. no. of pages 99
12. sponsoring agency (name, address)  Federal Ministry of Education and Research (BMBF)	13. no. of references
	14. no. of tables 16
	15. no. of figures 105
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract  The aim of the project was the conception of an innovative and lightweight cabin structure for heavy duty commercial vehicles. The main focus was on the roof of the cabin. Therefor the efficient lightweight structure was implemented by a sandwich construction in a multi material design. This material mix consist of the combination of a fiber composite material with a PUR foam and additional metall inserts for connection requirements. This innovative concept leads to a reduction of round about 40% component weight by the same stability and strength.	
19. keywords Lightweight, function-integrated, Multi-Material-Design, Commercial Vehicle Cabin, Sandwich Construction,	
20. publisher	21. price