Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

DATIpilot Modul 1 Innovationssprints

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Kurzbericht und Eingehende Darstellung
Öffentlich

Biobasierte Formwerkzeuge für die Faserverbundherstellung

BioForm

	Institution	Name Projektleitung	Förderkennzeichen
Identifizierung und Umsetzung eines realen Fertigungsszenarios mittels pappbasierter Werkzeuge (Koordination)	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	Marcel Andres	03DPS1139A
Herstellung pappbasierter Werkzeuge für ein reales Fertigungsszenarios	richter & heß VERPACKUNGS-SERVICE GmbH	Johannes Graf	03DPS1139B

LAUFZEIT: 01.09.2024 – 28.02.2026

Braunschweig, den 25.08.2026

Autorenschaft: Marcel Andres, Johannes Graf, Robert Prussak, Philipp Sämann

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

1 Kurzbericht 2
1.1 Ausgangslage des Vorhabens 2
1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung 2
1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele 3
1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 3
1.2 Ablauf des Vorhabens 4
1.3 Ergebnisse des Vorhabens 5
1.3.1. Wesentliche Ergebnisse 5
1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5
2 Eingehende Darstellung 6
2.1 Durchgeführter Arbeitsplan 6
2.2 Erreichte Meilensteine 17
2.3 Erreichte Ergebnisse 17
2.3.1 Erreichung der Gesamtziele 17
2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele 18
2.4 Verwertung 19
2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses 19
2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens 19
2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 20
2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit 20

1 Kurzbericht

1.1 Ausgangslage des Vorhabens

1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Gesamtziel des Innovationssprints	Ziel ist die Realisierung eines realen Fertigungsszenarios für die Faserverbundbauteilherstellung unter der Verwendung eines im Projekt gestalteten, dimensionierten und gefertigten bio-/pappbasierten Formwerkzeuges. Der Fertigungsprozess mit dem neuartigen Werkzeug soll hinsichtlich seiner Einsatztauglichkeit unter Industrierandbedingungen bewertet werden. Die gefertigten Bauteile sollen zudem hinsichtlich ihrer Qualität sowie wirtschaftlicher und ökologischer Faktoren mit aktuellen Konzepten verglichen werden.
Beitrag des Teilprojekts A	Im Teilprojekt A erfolgt zu Beginn die Identifizierung von Anwendungsbereichen für ein pappbasiertes Werkzeug unter Betrachtung der auftretenden Fertigungsrandbedingungen. Die in Teilprojekt B entwickelten und gefertigten Werkzeugmodule werden final montiert und mit einer Formschicht zu einem Gesamtwerkzeug kombiniert. Für die Formschicht werden zudem biobasierte Alternativen erprobt. In Vorversuchen erfolgt die Fertigung von einzelnen Bauteilbereichen zur Überprüfung und Erprobung der Formschicht und des Fertigungsprozesses. Abschließend erfolgt die Fertigung der finalen Demonstratorstruktur. Ziel ist die Bewertung des Fertigungsprozesses sowie der Bauteilqualität hinsichtlich der technologischen und wirtschaftlichen Eignung in einem realen Fertigungsszenarios.
Beitrag des Teilprojekts B	Im Teilprojekt B erfolgt die Dimensionierung und Konstruktion der pappbasierten Werkzeugformen. Ziel für die Gestaltung der Einzelelemente ist ein optimierter Materialeinsatz, sowie die Einhaltung der geforderten Stabilitäts- und Genauigkeitsanforderungen. Bei der Konstruktion der Werkzeugstruktur sollen zudem Strategien zur Demontage und Recycling berücksichtigt werden. Der Einsatzbereich soll durch modulare Konzepte unter Berücksichtigung der Transportrandbedingungen erweitert und erprobt werden. Die Einzelelemente werden zu Werkzeugformen / Werkzeugmodulen kombiniert. Der gesamte erfolgte Fertigungsprozess soll anschließend in einen standardisierten Prozess überführt werden.

1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele: Gesamtprojekt
• Konstruktion, Entwicklung und Fertigung von mindestens einem Formwerkzeug auf gestapelter Wellpappbasis
• Fertigung von mindestens einer Composite Komponente auf dem neuartigen Formwerkzeug unter industriellen Randbedingungen
Geplante konkrete Arbeitsziele: Teilprojekt A
• Anwendungsbereiche und potentielle Anwender für pappbasierte Werkzeuge identifiziert
• Standardisierter Prozess für die Erzeugung von Formschichten
• Formgenauigkeit und Qualität der Werkzeugoberfläche bestimmt
• Erzielbare Bauteilqualität auf pappbasierten Werkzeugen bestimmt und nachgewiesen
• Bewertung der industriellen Eignung der Werkzeuge für die Faserverbundherstellung
Geplante konkrete Arbeitsziele: Teilprojekt B
• Optimierung des Materialeinsatzes für die Werkzeugfertigung
• Standardisierter Prozess für die Herstellung der pappbasierten Werkzeugformen
• Entwicklung von Recycling- und Demontagestrategien
• Skalierbarkeit und Grenzen für den Einsatz identifiziert
• Entwicklung von modularen Ansätzen unter Betrachtung von Transportrandbedingungen

1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Stand der Wissenschaft und Technik

Für die Fertigung von Composites werden formgebende Werkzeuge benötigt, die je nach Anwendung, Losgröße, technischen Anforderungen und Fertigungsrahmenbedingungen in unterschiedlichen Materialien und Herstellungsverfahren ausgeführt werden. Bei kleinen Losgrößen machen Formwerkzeuge häufig einen signifikanten Teil der Gesamtkosten aus. Der Großteil der gefertigten Composites wird mit einseitigen Formwerkzeugen produziert, wobei die zweite Werkzeughälfte durch eine Membran ersetzt und der benötigte Differenzdruck per Vakuum und/oder Autoklav erzeugt wird.

Trotz der Kostenvorteile einseitiger Werkzeuge gegenüber geschlossenen Werkzeugen variieren die Investitionskosten stark. Einfache Werkzeuge werden von einem Urmodell abgeformt, während komplexere Werkzeuge aus metallischen Werkstoffen als Schweißkonstruktion gefertigt und anschließend konturgefräst werden. Das hohe Gewicht und die hohe Wärmekapazität metallischer Werkzeuge erschweren die Handhabung und senken die Energieeffizienz des Aushärteprozesses. Insbesondere fehlt aktuell ein günstiges, einfaches und ressourcenschonendes Verfahren für die Fertigung von Prototypen, Technologiedemonstratoren oder Kleinserien, was das Risiko erhöht, dass Werkzeug- und Fertigungskonzepte für die Serienfertigung nicht ausreichend erprobt werden können. Dies führt häufig zu Serienprozessen, die aufwendige Nacharbeit der Bauteile erfordern.

Typische Werkzeugmaterialien umfassen Stahl für langlebige Großserienproduktionen in Luft- und Raumfahrt sowie Automobilindustrie, Aluminium für kleinere bis mittelgroße Bauteile mit guter Wärmeleitfähigkeit, Epoxidformen für Prototypen und Kleinserien sowie verschiedene Kunststoffe (auch 3D-Druck) und Silikonkautschuk für Rapid Prototyping und flexible Formen. Diese aktuellen Werkzeugkonzepte sind jedoch nicht nachhaltig, da bei ihrer Herstellung große Mengen CO_2 freigesetzt werden und sie auf Basis nicht nachwachsender Rohstoffe produziert werden. Laut dem aktuellen Stand der Technik gibt es keine Formwerkzeuge, die auf modularen und zweidimensionalen Pappelementen beruhen, wodurch insbesondere für Kleinserien und Prototypen eine kostengünstige und nachhaltigere Formwerkzeuglösung erwartet wird.

Bisherige Arbeiten

Zu pappbasierten Werkzeugen konnten bereits umfassende Erkenntnisse gesammelt werden. Hierbei wurden die Randbedingungen und Anforderungen für Formwerkzeuge auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen ermittelt und eine Materialvorauswahl für Pappwerkstoffe in struktureller Anwendung getroffen. Die Grundlagen für die Umsetzung eines biobasierten Werkzeugkonzepts wurden gelegt, einschließlich Konzepten für Versteifungsstrukturen und Analy-

sen des Material- und Strukturverhaltens. In Laboruntersuchungen wurden bereits pappbasierte Werkzeuge für kleinere einfache Faserverbundbauteile realisiert. Die prinzipielle Umsetzbarkeit der Idee, klassische Werkzeugkonzepte durch pappbasierte Werkzeuge zu ersetzen, konnte mit ersten wissenschaftlichen Ergebnissen und Fertigungstests nachgewiesen werden.

Richter und Hess Verpackung verfügt über langjährige Expertise in Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von kundenspezifischen Verpackungslösungen und Pappstrukturen sowie über ein BAM-zertifiziertes Prüflabor zur Zertifizierung von Pappstrukturen für Industrie- und Gefahrgüter. Das Unternehmen besitzt einen modernen Maschinenpark für Bedrucken, Schneiden, Rillen, Stanzen und Verschließen und konnte bereits die Entwicklung eines modular aufgebauten und kostengünstigen Schalungssystems auf Basis nachwachsender Rohstoffe zur Fertigung von Betonfertigteilen durchführen.

Das Institut für Systemleichtbau des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt besitzt umfangreiche Fertigungseinrichtungen und Fertigungsexpertise für kleine Coupon-Proben bis hin zu Großstrukturen in Faserverbundbauweise sowie zahlreiche Versuchs- und Prüfstände für experimentelle Untersuchungen. Das Institut verfügt zudem über Expertise im Bereich der Auslegung, Konstruktion und Bewertung von Leichtbaustrukturen und konnte in verschiedenen Vorhaben die Umsetzung von Großstrukturen demonstrieren. Es wurden erfolgreich einseitige metallische Werkzeugkonzepte unter Berücksichtigung von prozessinduzierten Deformationen und Toleranzketten entwickelt sowie automatisierte und optimierte Prozessführungen durch umfangreiche Prozessüberwachung und Analysemethoden an Großstrukturen demonstriert.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde bewusst in sich teilweise überschneidende Arbeitspaketen organisiert, sodass ein enger und stetiger Austausch zwischen Industrie- und Forschungspartner gewährleistet werden konnte (Abbildung 1). Ausgehend von einer Usecase-Identifikationsphasen mit begleitendem Workshop konnten potentielle Zielmärkte identifiziert werden, die im Rahmen des Sprints kontaktiert werden sollten. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen wurde sich letzten Endes dazu entschieden, auf geometrisch kleinere Formwerkzeuge (wenige m²) den Fokus zu legen, sodass der Fokus auf dem Automotive-Sektor im Protypenbau gelegt wurde.

Nach der gemeinsamen Identifikation geeigneter Komponenten wurden parallele Arbeitsschritte gestartet. Während sich der Industriepartner mit der grundlegen Konstruktion und Dimensionierung des Formwerkzeuges beschäftigte, erarbeitete der Forschungspartner bereits Konzepte zur Werkzeugfertigung und setzte die Fertigungsplanung auf.

Die Fertigung selbst entstand gemeinsam, sodass papier- und composite - Know How effizient zusammengeführt werden konnte und eine materialgerechte Formwerkzeugentwicklung gewährleistet werden konnte.

Die Fertigung der Demonstratoren, die ebenfalls die Funktionserfüllung der Formwerkzeuge demonstrieren, wurde von den Composite-Experten durchgeführt.

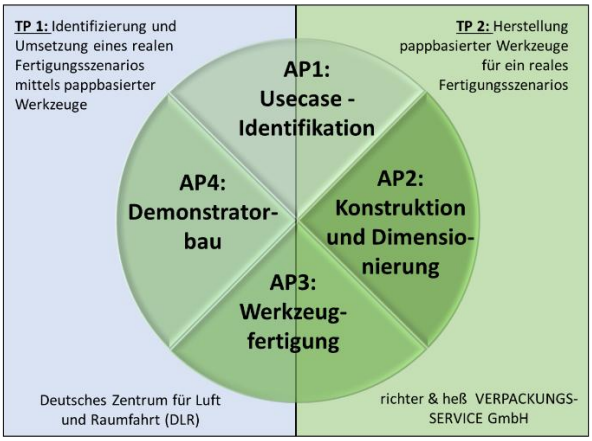

Abbildung 1: Arbeitsplan BioForm

1.3 Ergebnisse des Vorhabens

1.3.1. Wesentliche Ergebnisse

Innerhalb des Teilprojekts A wurden mehrere wissenschaftliche und technische Ergebnisse erarbeitet. Basierend auf Gesprächen mit Unternehmen der Composite-Fertigung wurde das Verständnis für marktübliche Anforderungen an Formwerkzeuge geschärft. Dazu zählen gängige Anforderungen an die geometrische Toleranz nach DIN ISO 2768-cK, Verfahren zur Verbesserung der Oberflächengüte, geforderte Prozesstemperaturen, Aspekte der alltäglichen Handhabung (Transportfähigkeit, Lagerbarkeit), Lebensdaueranforderungen sowie maximale Abformungen/Robustheit der Funktionsschichten.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Entwicklung eines standardisierten Prozesses zur Erzeugung und Applikation der Formschichten. Dafür wurden zwei Lösungspfade verfolgt:

Pfad 1 umfasste die Applikation einer epoxidbasierten Formwerkzeugpaste auf die Stirnflächen der Wellpappelemente, gefolgt von der maschinellen Nachbearbeitung mittels CNC-Fräse. Die erreichbare Qualität entspricht der herkömmlicher Formwerkzeuge und die maschinenüblichen Toleranzen werden eingehalten. Im Vergleich zum herkömmlichen Einsatz von Kunststoffblöcken lässt sich hier bereits ein wirtschaftlicher und ökologischer Mehrwert erzielen, der eine Weiterverfolgung und -entwicklung motiviert.

Pfad 2 verfolgte einen klassischen Ansatz aus dem Modellbau, bei dem die Stirnflächen manuell verspachtelt/gefüllt und anschließend auf die Sollgeometrie geschliffen wurden. Dieser Prozess führte ebenfalls zu guten Ergebnissen, ist jedoch stark von den handwerklichen Fähigkeiten des Ausführenden abhängig und nur begrenzt reproduzierbar. Diese Qualität reicht jedoch für spezifische Anwendungsbereiche wie den Modellbau, der Restauration oder den Motorflugsport oft aus.

Beide Pfade wurden in enger Zusammenarbeit mit Teilprojekt B erfolgreich für Baugruppen eines Sportwagen-Prototypen sowie eines Formel-TU-Racing-Rennwagens umgesetzt. Für größere Anwendungen (z. B. im Bootsbau) wären umfangreiche Sachmittel erforderlich gewesen, weshalb im Projekt BioForm auf eine weitere Skalierung verzichtet werden musste.

Auf allen hergestellten Formwerkzeugen konnten erfolgreich Composite-Bauteile gemäß der Qualitätsanforderungen gefertigt werden, sodass die übergeordneten Projektziele vollumfänglich erreicht wurden.

Neben den erfolgreichen Lösungen wurden im Projektverlauf auch alternative Ansätze untersucht, die sich jedoch als nicht zielführend erwiesen. Während der ersten Konstruktionsschleifen wurde befürchtet, dass das Ausrichten der einzelnen Wellpappelemente zueinander problematisch sein könnte. Infolgedessen wurden die (2D) Wellpappelemente zu einzelnen Blöcken verklebt (3D). Dieser Ansatz wurde zwar für Vorversuche weiterverfolgt, jedoch schnell wieder verworfen. Grund hierfür waren zusätzliche Prozessschritte, damit verbundene Kosten sowie Handhabungsprobleme bei größeren Modulen. Letztendlich konnte durch einfache konstruktive Maßnahmen und der gezielten Platzierung von Führungsleisten komplett auf Verklebungen verzichtet werden. Die finalen Demonstratoren bestehen daher ausschließlich aus Wellpappe, einer Holzträgerstruktur, Schrauben und der Funktionsschicht.

Der modulare Aufbau dieses Ansatzes erwies sich zusätzlich als großer Vorteil. Er ermöglicht eine nachträgliche Modifikation der Formwerkzeuge, wie exemplarisch die Verlängerung oder Verkürzung von Segmenten sowie die Anpassung von Radien oder Designdetails. Diese Nachrüstbarkeit stellt ein Novum im Vergleich zum Stand der Technik dar, bei dem jede Anpassung sonst mit erheblichem Aufwand und einer kompletten Neukonstruktion der Formwerkzeuge einhergeht.

1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund der Natur des Projektes ist eine Zusammenarbeit mit weiteren Stellen notwendig gewesen, um Use-Cases für die Formwerkzeuge abzuleiten. Basierend auf der Use-Case Identifikationsphase wurden Unternehmen aus dem Automotive/Prototypen Bereich für die Geometrievorgaben gesucht. Die geplanten Kontakte zu maritimen Industriepartnern konnte ebenfalls initiiert werden. Die Umsetzung eines Demonstrators im Boots- und Schiffsbau war innerhalb des Sprints nicht möglich.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Durchgeführter Arbeitsplan

Arbeitspaket	Partner	abgeschlossen	nicht abgeschlossen	nicht durchgeführt
1.1 Marktanalyse unter Beachtung von Fertigungsrandbedingungen	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	☒	☐	☐
1.2 Auswahl der zu fertigenden Baugruppe	richter & heß Verpackungsservice GmbH	☒	☐	☐
2.1 Materialauswahl und Erprobung	richter & heß Verpackungsservice GmbH	☒	☐	☐
2.2 Konstruktion der Werkzeugelemente	richter & heß Verpackungsservice GmbH	☒	☐	☐
3.1 Fertigungsplanung und Dokumentation	richter & heß Verpackungsservice GmbH	☒	☐	☐
3.2 Zuschnitt und Montage	richter & heß Verpackungsservice GmbH	☒	☐	☐
3.3 Endmontage und Fertigungsvorbereitung	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	☒	☐	☐
4.1 Bauteilfertigung	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	☒	☐	☐
4.2 Qualitätsbeurteilung	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	☒	☒	☐
4.3 Wirschaftlichkeitsbetrachtung	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	☐	☒	☐

Arbeitspaket 1 Use-Case Identifikation

Zu Beginn des Projekts wurde eine Marktstudie mit dem Ziel der Use-Case-Identifikation unter Beachtung branchenspezifischer Fertigungsanforderungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie wurden mehrere Methoden eingesetzt, u. a. ein Entscheider-Nutzen-Canvas zur Erfassung der Anforderungen zukünftiger Anwender sowie eine Stakeholderanalyse auf Branchenebene.

Auf Grundlage dieser Analyse erfolgte eine Priorisierung der Zielmärkte für die zugrunde liegende Innovation. Aus Umsetzungs- und Budgetsicht wurde der Fokus in BioForm dabei auf kleinere Formwerkzeuge mit wenigen Quadratmetern Werkzeugfläche im Prototypenbau der Automobilbranche beschränkt. Eine Besonderheit dieser Branche ist, dass eine umfassende Nachbearbeitung der Composite-Bauteile bereits eingeplant ist und die Anforderungen an die Werkzeugoberflächen vergleichsweise gering sind. Im Sinne der Risikominimierung wurde dies als weiterer Vorteil berücksichtigt.

Im Rahmen der Marktanalyse wurden zudem weitere potenzielle Zielmärkte identifiziert, wie etwa der Boots- und Schiffsbau, die Luft- und Raumfahrt oder der Orthesen- und Prothesenbau. Diese wurden im Projekt BioForm nicht weiterverfolgt.

Im Rahmen der in AP1 durchgeführten Arbeiten wurden die Grundlagen für die zu fertigenden Demonstrator-Werkzeuge geschaffen. Die in Abbildung 2 schematisch dargestellte Technologie zur Herstellung von Formwerkzeugen mittels Wellpappe wurde bereits zuvor im Labormaßstab validiert und sollte im nächsten Schritt anhand großskaliger Demonstratoren unter realen Fertigungsbedingungen erprobt werden.

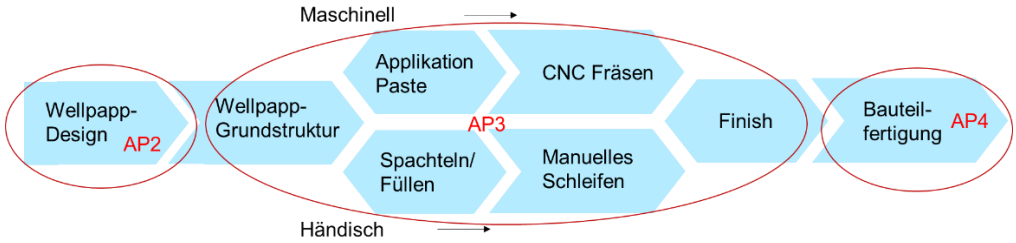

Abbildung 2: Technologie zur Herstellung von Bauteilen mittels Wellpapp-Toolings

Konturgeschnittene 2D-Elemente aus Wellpappe werden auf Block gestapelt und ergeben eine 3D-Form. Anschließend werden applikationsspezifische Funktions- und Oberflächenschichten aufgebracht. Die Beauftragung kann sowohl maschinell als auch händisch erfolgen. Die Gesamtkonstruktion kombiniert diese Wellpappblöcke als Füllelemente mit einer Holzrahmenbauweise.

Es werden zwei Anwendungsfälle mit unterschiedlicher Komplexität und zu Grunde liegender Beschichtungstechnologie definiert:

Anwendung 1: Sportwagen-Prototyp / Showcar

- Technologie: Manuelle Applikation der Formschicht
- Zu fertigende Baugruppen: Heckflügel, Heckklappe

Anwendung 2: Formel-TU-Racing Rennwagen

- Technologie: Maschinelle Applikation der Formschicht
- Zu fertigende Baugruppen: Fahrzeugnase (Nose Cone), Seitenkästen (Sidepods), Unterboden (Floor)

Für die Auslegung der Werkzeuge wurden folgende spezifischen Anforderungen an die Bauteile definiert:

- **Geometrische Genauigkeit:** Einhaltung relevanter DIN-Normen für Werkzeugbau (DIN ISO 2768-cK)
- **Oberflächengüte:** Schruppen und Schlichten auf Endmaß, Schleifen auf P160/P320, optional Polierpaste verwenden
- **Prozesstemperatur:** Max. 80 °C (kompatibel mit niedrigtemperaturhärtenden Systemen)
- **Handhabung:** Transportfähig mit Hubwagen/LKW, mobil einsetzbar
- **Lebensdauer:** Min. 1 Jahr Lagerfähigkeit, mind. 5 Abformungen pro Werkzeug

Arbeitspaket 2 Konstruktion und Dimensionierung

Ausgehend von den CAD-Daten der Zielbauteile wurde in AP2 mithilfe geeigneter Methoden das finale Werkzeugdesign abgeleitet. Dieses besteht aus einzelnen Wellpapp- und Holzzuschnitten. Bei der Konstruktion der Werkzeuge wurden die spezifischen Materialeigenschaften und konstruktiven Gegebenheiten von Wellpappe und Holz berücksichtigt. Die Arbeitsschritte reichten von der digitalen Vorbereitung bis zur Erstellung der Fertigungsunterlagen und lassen sich wie folgt gliedern:

(1) Konstruktion
(2) Materialauswahl
(3) Trägerstruktur und Blockbildung
(4) Zerlegung / Slicing
(5) Fertigungsunterlagen

Am Bespiel der Heckklappe des Sportwagen Prototypen soll der im Projekt entwickelte Prozess zur systematischen Erstellung der Wellpapp-Formwerkzeuge aufgezeigt werden:

Konstruktion

Die Konstruktion umfasst die Generierung des Negativwerkzeugs auf Basis der bereitgestellten CAD-Daten der Bauteile einschließlich aller erforderlichen Formzuschläge. Hierzu zählen ein ausreichend dimensionierter Unterbau zur Gewährleistung der erforderlichen Stabilität, Zuschläge für einen bei der späteren Bauteilfertigung benötigten Formrand zum Siegeln und Abdichten sowie konstruktive Elemente für das Handling der Werkzeuge.

Materialauswahl

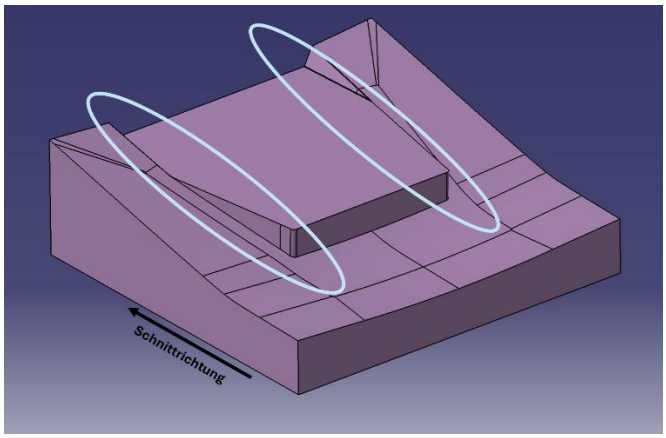

Abbildung 3 Formwerkzeug mit Schnittrichtung und identifizierten kritischen Konturübergängen

Die Materialauswahl umfasst die für die Wellpapp-Formelemente sowie für Holzanschläge und -stege eingesetzten Materialien. Da die Wahl der Wellpappstärke maßgeblich von der Krümmung und der Konturänderung abhängt, wird zunächst die Schnittrichtung festgelegt. Anschließend werden die Bereiche mit starken Konturänderungen quer zur Schnittrichtung identifiziert. Kritische Bereiche mit ausgeprägten Konturänderungen werden mit dünnen einwelligen Pappen ausgeführt. Die übrigen Bereiche werden aus dicken dreiwelligen Pappen gefertigt.

Trägerstruktur und Blockbildung

Für die Herstellung der Formwerkzeuge wird zunächst eine tragende Holzstruktur benötigt. Die Holzrahmenbauweise mit definierten Anschlägen und Stegen bildet dabei die Grundlage für die erforderliche Stabilität, Maßhaltigkeit und geometrische Genauigkeit der Werkzeuge.

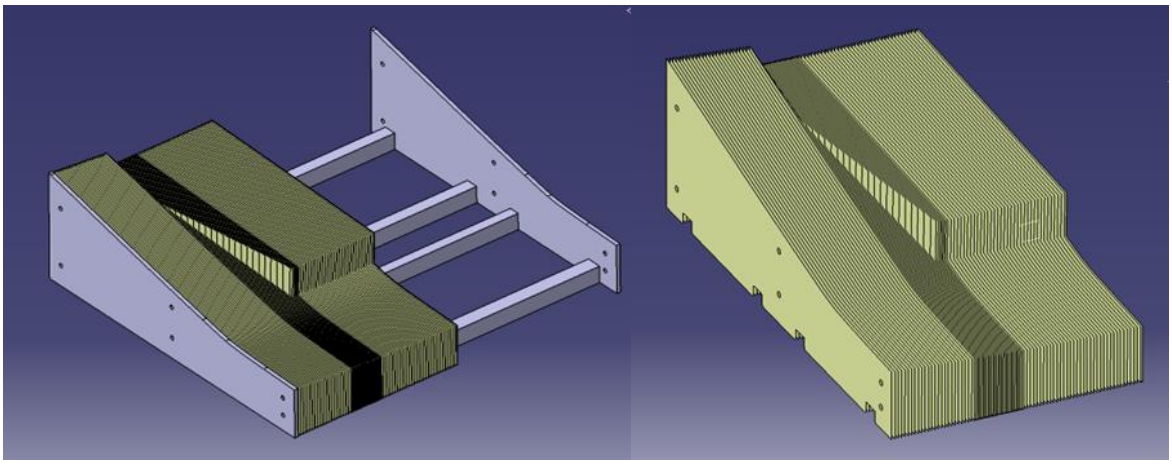

Abbildung 4 Trägerstruktur mit eingelegten Wellpappzuschnitten (links) Wellpappzuschnitte mit Führungselementen (rechts)

Die exakte Ausrichtung der Werkzeuge erfolgt durch das Aufstellen auf einer zuvor hergestellten, ebenen und waagerechten Grundplatte bzw. Bodenfläche. Durch das Anzeichnen der jeweiligen Werkzeuggrundflächen auf dieser Referenzfläche können die Positionierung, Ausrichtung und die globalen Abmessungen der Werkzeuge überprüft und bei Bedarf korrigiert werden.

Slicing

Das Slicing beschreibt die Zerlegung der 3D-Formen in einzelne Wellpappzuschnitte, um stapelbare 2D-Elemente entsprechend der jeweiligen Wellpappensorte und -stärke zu erzeugen. Für das Slicing werden die erforderlichen Wellpappenparameter benötigt, die direkt im Konstruktionsprogramm abgefragt werden. Die Erzeugung der Schnitte erfolgt anschließend automatisiert anhand definierter Routinen und Algorithmen. Im einem weiteren Prozessschritt erfolgt der Export der Schnittdaten. Für jeden Schnitt wird automatisiert mittels ebenfalls im CAD integrierter Routinen eine DXF erzeugt.

Fertigungsunterlagen

Die Fertigungsunterlagen umfassen alle nötigen Informationen für die Erstellung für die Gesamtkonstruktion:

1. Schnittdaten für Holz und Wellpappe (.dxf).
2. Aufbauzeichnung für den Rahmen und die Wellpappstruktur.
3. Spezifikationen zur Oberflächenbehandlung (Schichtdickenauftrag, geforderte Rauigkeiten).

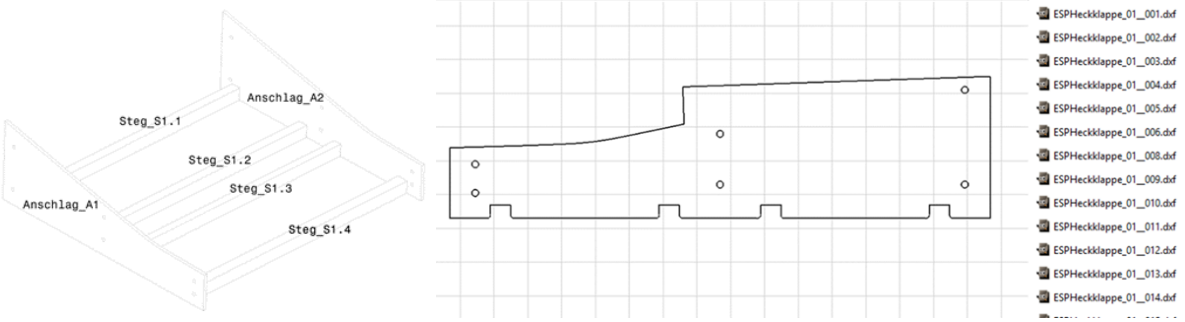

Abbildung 5 Aufbauzeichnung für den Holzrahmen und beispielhafte Schnittdatei für die Wellpappstruktur des Heckklappenwerkzeugs

Die vorgestellte Prozesskette konnte im Laufe des Projekts kontinuierlich optimiert und weiterentwickelt werden. Anhand verschiedener Anwendungsfälle konnten die entwickelten Methoden zudem erfolgreich

hinsichtlich ihrer Robustheit und Reproduzierbarkeit geprüft werden. Darüber hinaus konnten geeignete Konstruktionsmethoden ermittelt und gefestigt werden, die eine effiziente Erstellung von Werkzeugen ermöglichen.

Die Datenpakete und Fertigungsunterlagen konnten somit vollständig und in nutzbarer Form für den Industriepartner erstellt und übergeben werden.

Arbeitspaket 3 Werkzeugfertigung

In AP3 erfolgt anschließend die Fertigung der Formwerkzeuge, bestehend aus einer Wellpappgrundstruktur und einer Formschicht. Die Formschicht bildet den Übergang zwischen der formgebenden Pappstruktur und dem Bauteil. Sie muss vakuumdicht ausgeführt sein, um die Fertigung der Faserverbundstrukturen zu ermöglichen, und ist zudem maßgeblich für die Oberflächenqualität der gefertigten Bauteile.

Im Rahmen des Projekts konnte sich dabei der folgende Prozessablauf etablieren und erfolgreich anwenden lassen:

(1) Datenaufbereitung

(2) Strukturerstellung

(3) Aufbau und Montage

(4) Aufbringen der Formschicht

(5) Finish

Datenaufbereitung

Zu Beginn erfolgt die Überprüfung und gegebenenfalls Bereinigung der übergebenen .dxf-Dateien. Anschließend erfolgt das Nesting der Schnitte auf das jeweilige Bogenmaß der Wellpappen- und Holzstrukturen. Darauf aufbauend werden CNC-gerechte Fertigungsdateien mit individuellen Beschriftungen der Elemente und einer eindeutigen Linienkennung erstellt.

Strukturerstellung

Die Strukturerstellung umfasst das Fräsen der Holzrahmen und das Schneiden der Wellpappelemente.

Aufbau

Beim Aufbau werden zuerst die Holzanschläge und Stege zur Trägerstrukturverbunden. Im Anschluss werden die Wellpappelemente in die erstellte Holzstruktur gestapelt.

Abbildung 6 links: Stapeln der Wellpappe in Holzrahmen (Vorversuch) rechts: finales Werkzeug

Formschicht

Für die Erstellung der Formschicht erfolgt entweder der händische Auftrag einer Spachtelmasse oder die maschinelle Applikation einer Paste. Bei der maschinellen Bepastung wird eine vergleichsweise dicke Materialschicht aufgebracht. Im Gegensatz dazu entsteht beim händischen Spachteln lediglich ein sehr dünner Materialauftrag.

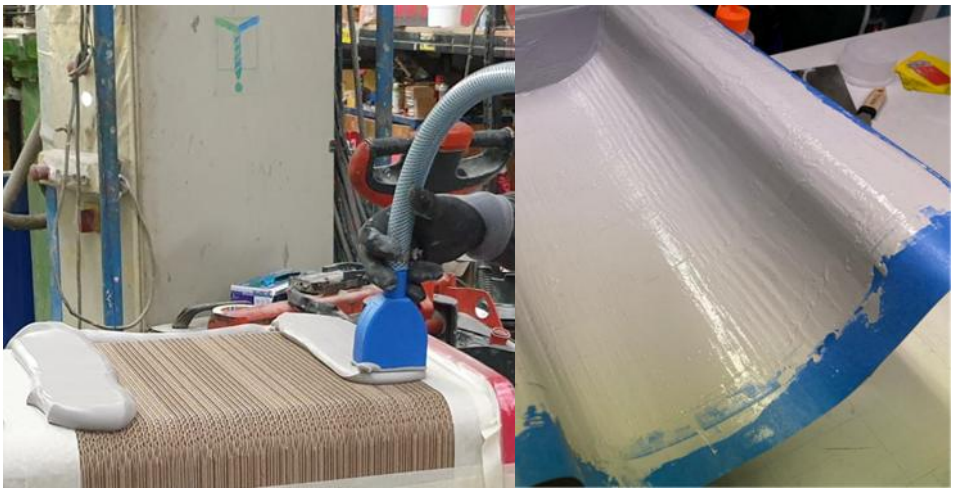

Abbildung 7 links: Bepastungsprozess rechts: händisch aufgetragene Spachtelschicht (Vorversuche)

Abbildung 7 zeigt beide Verfahren anhand von Vorversuchen, die im Rahmen der Technologieentwicklung durchgeführt wurden.

Finish

Für die beschichteten Oberflächen erfolgt zunächst ein Fräsvorgang, bei dem die Dicke der Formschicht auf das erforderliche Nennmaß gebracht wird. Dieser umfasst das Grobfräsen sowie das anschließende Schruppen und Schlichten auf das geforderte Endmaß. Daran schließt sich ein Schleif- bzw. Polierprozess an, um die finale Oberflächengüte einzustellen.

Abbildung 8 links: gespachtelt und geschliffene Werkzeugoberfläche rechts: Lackierte und polierte finale Werkzeugoberfläche für Heckklappenwerkzeug

Bei den händisch gespachtelten Oberflächen entfällt der Fräsvorgang. Die aufgebrachte dünne Schicht wird stattdessen direkt durch Schleif- und Polierprozesse nachbearbeitet. Für die Erzielung einer hohen Oberflächenqualität müssen diese Arbeitsschritte gegebenenfalls mehrfach wiederholt werden.

Zur quantitativen Bewertung der Prozessgüte wurde eine optische 3D-Vermessung durchgeführt. Hier wurden die beiden Technologiepfade (Händisch vs. Maschinell) direkt miteinander verglichen. Die Vermessung bestätigte, dass manuelle Verfahren trotz höherer Streuung durch geschultes Schleifen nachjustiert werden konnten. Der maschinelle Pfad liefert reproduzierbarere Ergebnisse, erfordert jedoch höhere Investitionen

in CNC-Infrastruktur. Beide Verfahren liefern potentiale Anwendungsfelder und sind für die Bauteilfertigung relevant.

Ein zentraler Erfolgsfaktor des BioForm-Projekts ist die Kreislauffähigkeit der Werkzeuge Daher wurden zusätzliche folgende Strategien zur Verbesserung der Recylcingfähigkeit der Werkzeuge entwickelt und erprobt:

- Vermeidung von Verklebungen: Das Gesamtkonstrukt (Rahmen + Wellpappe) ist durchgängig verschraubt bzw. lösbar gestaltet.
- Formschicht-Recycling: Die aufgetragene Formschicht kann vom Untergrund abgezogen werden.
- Demontage: Optional können im Randbereich Perforationen in die Wellpappe eingebracht werden, um das Abtrennen der Formschicht und den Ausbau der Wellpappe zu erleichtern.

Verschiedene Werkzeuge mit unterschiedlichen Geometrien und Randbedingungen konnten im Rahmen des Projekts erfolgreich erstellt werden. Dabei wurden die in AP1 definierten Anforderungen eingehalten, sodass die gefertigten Werkzeuge für die Herstellung der Bauteile (AP4) freigegeben werden konnten.

Arbeitspaket 4 Bauteilfertigung

Nachfolgend wird die Fertigung der Bauteile auf den eingangs beschriebenen dafür gefertigten Formwerkzeugen beschrieben.

Anwendung 1: Sportwagen-Prototyp / Showcar

Bauteil: Heckflügel

Im Rahmen der Prototypenfertigung für einen Sportwagen wurde ein Formwerkzeug für den Heckflügel in integraler Bauweise realisiert. Die Bauteilgeometrie ist gestreckt, schlank und länglich, was für die Formkonstruktion besondere Anforderungen an Stabilität und Handhabung während des Laminierprozesses mit sich bringt.

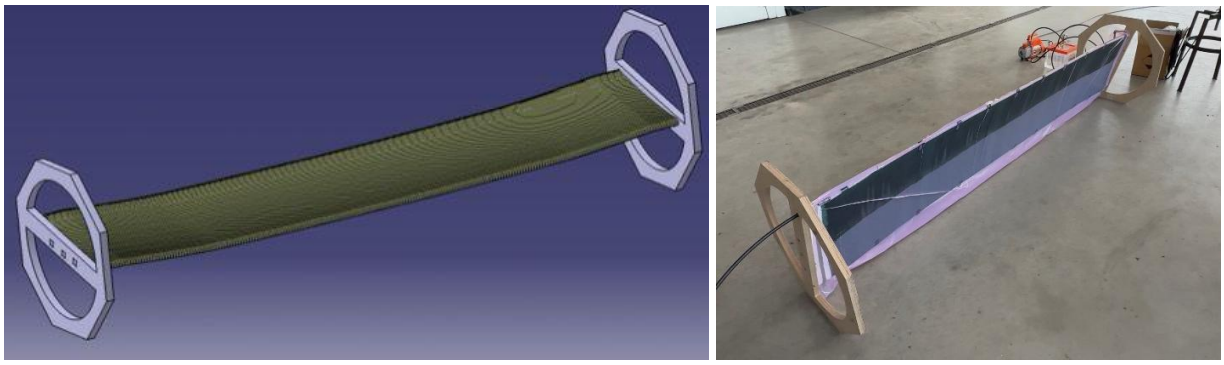

Abbildung 9 Heckflügel im CAD inkl. temporärer Stirnplatten (links) und während der Fertigung (rechts)

Geometrische Grundlage

Als Basis diente die Originalgeometrie des Heckflügels stirnseitig wurde eine achteckige Form gezielt gewählt: Beim umfassenden Laminieren über den gesamten Umfang muss die Form für die einzelnen Lagen und Zwischenschritte immer wieder gedreht werden. Eine achteckige Kontur erlaubt es, die Form in mehreren definierten Positionen stabil abzulegen, statt sie ausschließlich um 90°-Schritte drehen zu können. Dadurch wird das Handling der Lagen beim Laminieren deutlich vereinfacht, da auch Zwischenpositionen genutzt werden können.

Fertigungsprinzip: Wellpappe-Kernform (Lost-Core-Ansatz)

Anders als bei einer klassischen Formbauweise mit zwei Halbschalen, die separat laminiert und anschließend verklebt werden, wurde hier ein durchgängiges Umlaminieren einer Wellpappe-Kernform gewählt.

Auf die Wellpappe wurde zunächst eine Trennfolie aufgebracht und anschließend umlaufend laminiert mit CFK. Ein dichter Vakuumaufbau wurde aufgebracht, um unter Druck den Zielfaservolumengehalt aus Stabilitätsgründen zu erreichen.

Nach dem Laminieren und der Entformung wurden am fertigen Heckflügel stirnseitig die hölzernen Adapterplatten entfernt und zwei metallische Stirnplatten angebracht. Diese sind:

- entsprechend der aerodynamischen Vorgaben und Sicherheitsvorgaben mit der tragenden Struktur des Spoilers (den Holzstreben) verbunden,
- außenflächig mit der CFK-Außenhülle verklebt, sodass eine Ablösung der Stirnplatten von der Außenhaut ausgeschlossen ist.

Ergebnis

Die Bauteiloberfläche zeigt sich nach der Fertigung glatt und homogen: keine Lufteinschlüsse, keine Poren, eine ebene, hochwertige Oberflächenqualität. Der fertige Heckflügel wurde anschließend am Fahrzeug montiert.

Abbildung 10 Heckflügel mit auffallend glatter Oberfläche final am Fahrzeug montiert

Zusammenfassung

Für den Prototypen-Heckflügel wurde ein einteiliges Formwerkzeug auf Basis einer Wellpappe-Kernform realisiert. Statt zweier zu verklebender Halbschalen wurde eine durchgängig umlaminierte Kernform gewählt, die aus 432 einzeln nummerierten, mittels Plotter geschnittenen Wellpappe-Zuschnitten (216 je Seite) auf drei Holzstreben aufgebaut wurde. Die achteckigen Stirnplatten der Form ermöglichten ein stabiles, mehrpositionales Ablegen der Form während des umlaufenden Laminierprozesses und erleichterten so das Handling der Lagen. Die Originalgeometrie wurde seitlich für den notwendigen Vakuumaufbau erweitert. Am fertigen Bauteil wurden zusätzlich zwei metallische Stirnplatten montiert, die sowohl mit der tragenden Holzstruktur als auch mit der CFK-Außenhülle verbunden sind. Das Ergebnis ist eine glatte, porenfreie und homogene Bauteiloberfläche.

Bauteil: Heckklappe

Laminataufbau

Auf die vorbereitete Form wurde im Vakuumaufbau ein CFK-Bauteil mit mehreren Lagen laminiert. Der Lagenaufbau wurde quasi-isotrop gewählt, um einem möglichen Verzug entgegenzuwirken – dies war insbesondere aufgrund der Kombination aus geringer Wanddicke und vergleichsweise großer Bauteilgröße relevant.

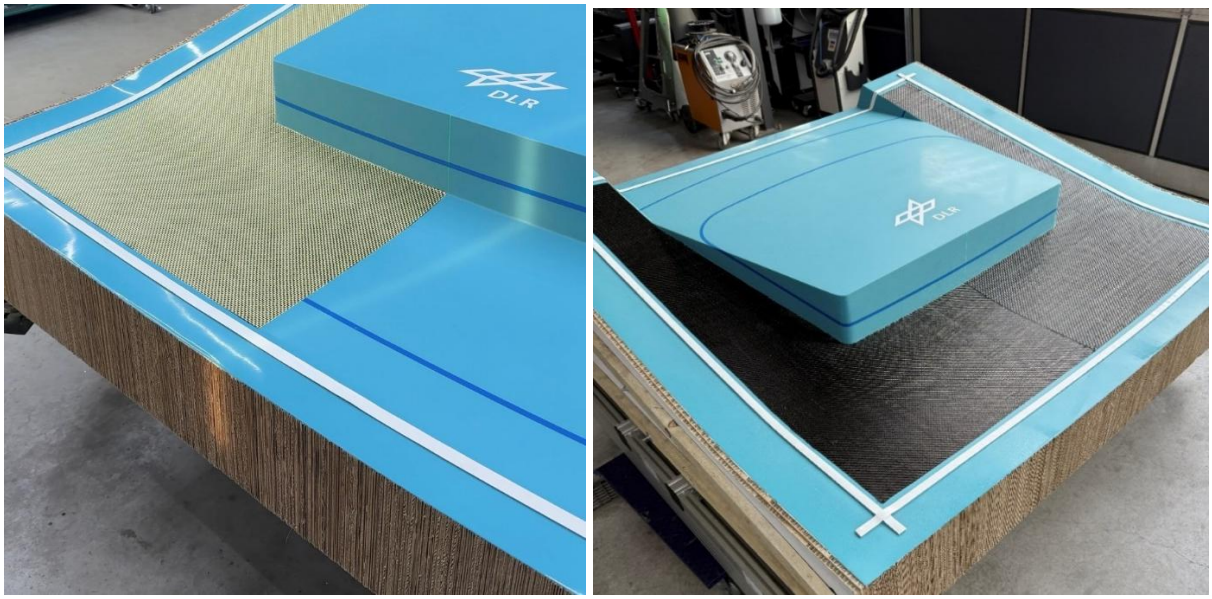

Abbildung 11 Schrittweise werden die Zuschnitte des Laminataufbaus auf dem Formwerkzeug platziert

Besonders im Bereich der inneren Aussparung weist die Heckklappe einen deutlichen Sprung in der Kontur auf. In diesem Bereich mussten die einzelnen Lagen entsprechend zugeschnitten werden, um der Kontur exakt folgen zu können. Dies ist gut gelungen und die Lagen folgen dem Konturversatz sauber.

Besäumen und Einpassen

Nach Laminierung und Aushärtung wurde das CFK-Bauteil entsprechend der Türumgebungsstruktur besäumt, d. h. die Ränder wurden zugeschnitten, damit das Bauteil in die Umgebungsstruktur eingepasst werden konnte.

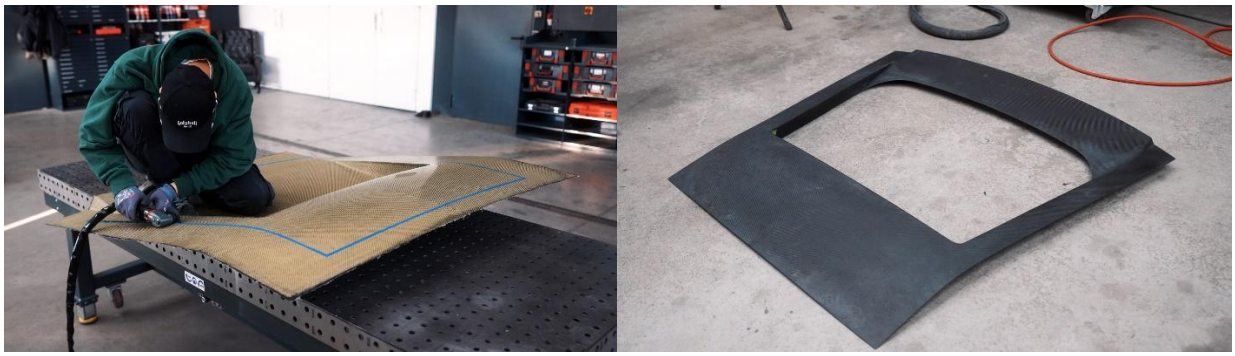

Abbildung 12 Besäumen des ausgehärteten Teils zum Einpassen im Gesamtfahrzeug

Innerhalb der Aussparung wurden anschließend die Aufnahmen für den Acrylglasstreifen eingesetzt. Diese Aufnahmen sind zwar Teil des fertigen Bauteils am Fahrzeug, jedoch nicht Teil der hier beschriebenen Form, da die Kontur des Acrylglasstreifens von der Wellpappform abweicht. Die Fertigung im Sinne des hier betrachteten Formwerkzeugs endet entsprechend mit dem eingepassten, besäumten CFK-Bauteil.

Ergebnis

Die gewählte Bauweise hat sich bewährt: Das Bauteil fügt sich passgenau in die Umgebungsstruktur ein. Dies ist bemerkenswert, da die Umgebungsstruktur aus einem anderen Werkstoff (Metall) besteht und die Heckklappe zudem Sprünge und Kanten aufweist, was die Einpassung zusätzlich erschwert. Die resultierenden Spaltmaße sind durchgehend sauber und gleichmäßig.

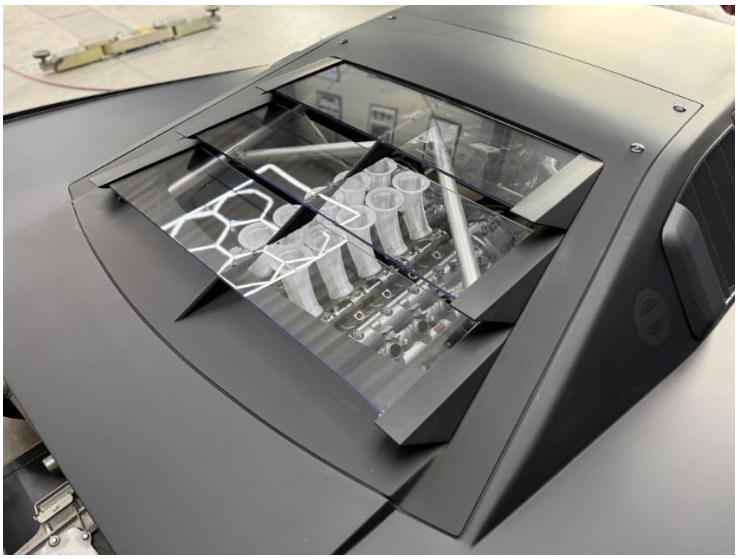

Abbildung 13 Finales Bauteil montiert mit Acrylglaseinsatz gibt den Blick auf die Maschine frei

Anwendung 2: Formula Student Rennwagen

Zu fertigende Baugruppen: Seitenkästen (Sidepods), Unterboden (Floor).

Neben den Bauteilen für den Sportwagen-Prototyp wurden im Rahmen des Projekts auch Formwerkzeuge für ein Formel-Rennwagen gefertigt. Laminiert wurden davon die beiden Seitenkästen sowie der Unterboden. Aufgrund des begrenzten Platzes in diesem Bericht werden diese Bauteile nicht im gleichen Detailgrad beschrieben wie Heckflügel und Heckklappe.

Bauteile: Seitenkästen und Unterboden

Aus Platzgründen werden beim Unterboden und den Seitenkästen nur die Formwerkzeuge bis zum laminierfertigen Zustand gezeigt:

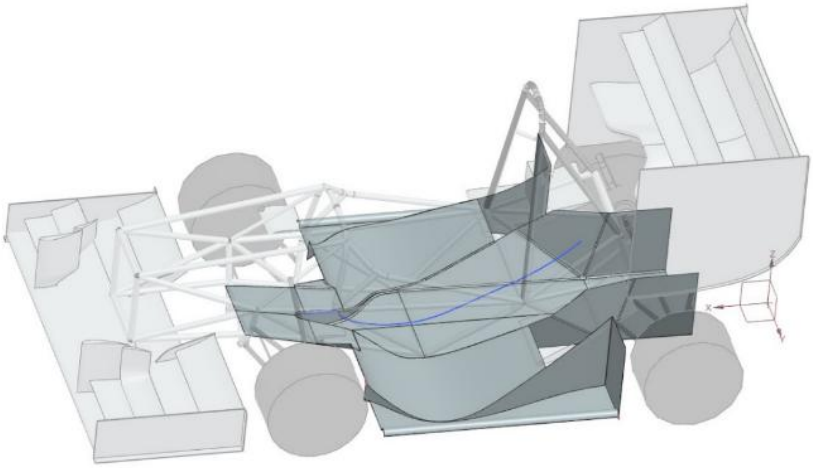

Abbildung 14 CAD des Autos mit Zielgeometrie des Unterbodens und der Seitenkästen

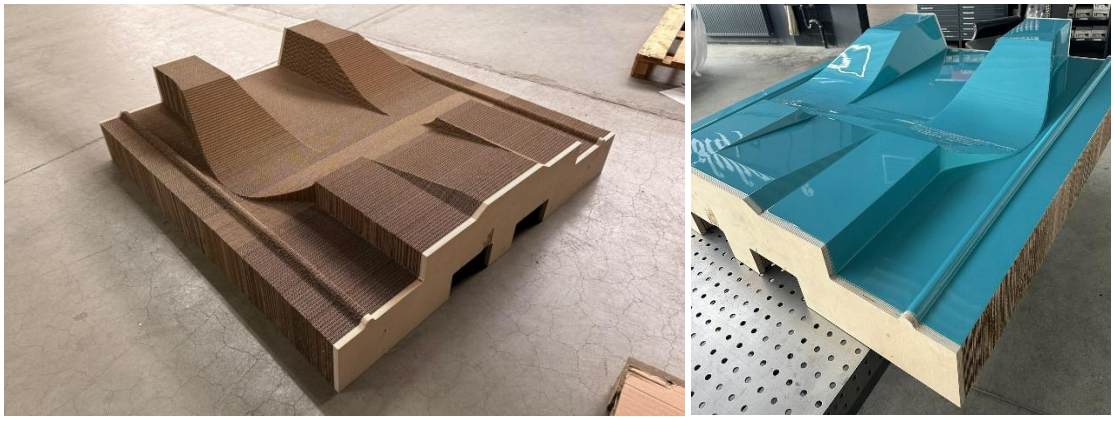

Abbildung 15 Formwerkzeug des Unterbodens vormontiert (links) und für Fertigung vorbereitet (rechts)

Abbildung 16 Pappstruktur der Seitenkästen (links) sowie nach manueller Applikation der glättenden und dichtenden Formschicht (rechts)

Übergreifendes Fazit:

Die Fertigung auf den entwickelten Wellpappformwerkzeugen hat sich entgegen anfänglicher Zweifel in allen untersuchten Anwendungen bewährt. Trotz unterschiedlicher Bauteilgeometrien und Fertigungsverfahren konnten die Bauteile mit allenfalls minimalem Nacharbeitsaufwand hergestellt und erfolgreich in die jeweiligen Fahrzeuge integriert werden, wobei insbesondere die hohen Anforderungen an die Formtreue und die erzielten Spaltmaße die Leistungsfähigkeit der Technologie bestätigten. Damit wurde eine belastbare Grundlage geschaffen, die Wellpappformtechnologie künftig gezielt weiterzuentwickeln und für weitere Anwendungen zu erschließen.

2.2 Erreichte Meilensteine

Meilensteine Gesamtprojekt

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Fertigstellung der Werkzeugform	M3	09/25	09/25	
Definition des Fertigungsszenarios	M1	12/24	12/24	

Meilensteine Teilprojekt A

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Realisierung eines Demonstratorbauteils	M4	01/26	01/26	

Meilensteine Teilprojekt B

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Gestaltung und Dimensionierung der Werkzeugform abgeschlossen	M2	04/25	04/25	

2.3 Erreichte Ergebnisse

2.3.1 Erreichung der Gesamtziele

Gesamtziel des Innovationssprints	Ziel ist die Realisierung eines realen Fertigungsszenarios für die Faserverbundbauteilherstellung unter der Verwendung eines im Projekt gestalteten, dimensionierten und gefertigten bio-/pappbasierten Formwerkzeuges. Der Fertigungsprozess mit dem neuartigen Werkzeug soll hinsichtlich seiner Einsatztauglichkeit unter Industrierandbedingungen bewertet werden. Die gefertigten Bauteile sollen zudem hinsichtlich ihrer Qualität sowie wirtschaftlicher und ökologischer Faktoren mit aktuellen Konzepten verglichen werden.	Das Gesamtziel des Innovationssprints wurde erreicht. Die Umsetzung der Formwerkzeuge erfolgte an verschiedenen Komponenten aus dem Automotive und Protypenbereich. Die anschließende Fertigung der Composite-Teile wurde von Dritten durchgeführt. Die Rückmeldungen bei der Arbeit mit den entwickelten Formwerkzeugen sind positiv. Wirtschaftlich ist die Technologie konkurrenzfähig und aus ökologischer Sicht vorteilhaft gegenüber dem Stand der Technik.
Beitrag des Teilprojekts A	Im Teilprojekt A erfolgt zu Beginn die Identifizierung von Anwendungsbereichen für ein pappbasiertes Werkzeug unter Betrachtung der auftretenden Fertigungsrandbedingungen. Die in Teilprojekt B entwickelten und gefertigten Werkzeugmodule werden final montiert und mit einer Formschicht zu einem Gesamtwerkzeug kombiniert.	Die übergeordneten Ziele des Teilprojektes A für den Erfolg des Gesamtprojektes konnten umfassend erreicht werden. Die Erprobung alternativer biobasierter Formschichten wurde durchgeführt. Es konnte jedoch im Laufe des Projektes keine Funktionsschicht identifiziert und erfolgreich erprobt werden, die den Ansprüchen der einzelnen

	Für die Formschicht werden zudem biobasierte Alternativen erprobt. In Vorversuchen erfolgt die Fertigung von einzelnen Bauteilbereichen zur Überprüfung und Erprobung der Formschicht und des Fertigungsprozesses. Abschließend erfolgt die Fertigung der finalen Demonstratorstruktur. Ziel ist die Bewertung des Fertigungsprozesses sowie der Bauteilqualität hinsichtlich der technologischen und wirtschaftlichen Eignung in einem realen Fertigungsszenarios.	Branchen genügt. Die Erprobung neuer Funktionsschichten wird Thema zukünftiger Untersuchungen sein, um das ökologische Potential weiter zu heben.
Beitrag des Teilprojekts B	Im Teilprojekt B erfolgt die Dimensionierung und Konstruktion der pappbasierten Werkzeugformen. Ziel für die Gestaltung der Einzelelemente ist ein optimierter Materialeinsatz, sowie die Einhaltung der geforderten Stabilitäts- und Genauigkeitsanforderungen. Bei der Konstruktion der Werkzeugstruktur sollen zudem Strategien zur Demontage und Recycling berücksichtigt werden. Der Einsatzbereich soll durch modulare Konzepte unter Berücksichtigung der Transportrandbedingungen erweitert und erprobt werden. Die Einzelelemente werden zu Werkzeugformen / Werkzeugmodulen kombiniert. Der gesamte erfolgte Fertigungsprozess soll anschließend in einen standardisierten Prozess überführt werden.	Die übergeordneten Ziele des Teilprojektes B für den Erfolg des Gesamtprojektes konnten umfassend erreicht werden. Die Dimensionierung und Konstruktion unterschiedlicher Formwerkzeuge und Konzepte wurde an Realwerkzeugen gezeigt. Die Werkzeuge sind transportierbar und genügen den Anforderungen hinsichtlich Robustheit der Dritten. Der Prozess zur Fertigung der Formwerkzeuge ist Reproduzierbar und dahingehend standardisiert, dass der Aufbau auch durch Dritte umgesetzt werden kann.

2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele: Gesamtprojekt	**Erfüllung**
Konstruktion, Entwicklung und Fertigung von mindestens einem Formwerkzeug auf gestapelter Wellpappbasis	Mehrere Formwerkzeuge wurden konstruiert, gefertigt und erprobt.
Fertigung von mindestens einer Composite Komponente auf dem neuartigen Formwerkzeug unter industriellen Randbedingungen	Auf allen Formwerkzeugen wurden Composites erfolgreich gefertigt. Die Durchführung geschah durch Dritte, um deren Randbedingungen zu beachten.
Geplante konkrete Arbeitsziel: Teilprojekt A	**Erfüllung**
Anwendungsbereiche und potentielle Anwender für pappbasierte Werkzeuge identifiziert	Marktstudie inkl. Entscheider-Nutzen Canvas sowie Stakeholderanalyse auf Branchenebene liegt vor. Zielmärkte identifiziert.
Standardisierter Prozess für die Erzeugung von Formschichten	Zwei Technologiepfade zur standardisierten Applikation der Formschichten erprobt und erfolgreich umgesetzt.
Formgenauigkeit und Qualität der Werkzeugoberfläche bestimmt	Teilweise erfüllt. Die Composite-Komponenten wurden in dazugehörige Baugruppen integriert.

	Die Toleranzen wurden erfüllt. Weitere Qualitätsbewertung hinsichtlich z.B. Welligkeiten in der Fläche mittels optischer Messtechnik im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt, da Probleme mit dem Messsystem auftragen. Messungen werden im Nachgang zum Projekt durchgeführt. Optische Kontrolle deutet auf ausreichende Qualität hin.
Erzielbare Bauteilqualität auf pappbasierten Werkzeugen bestimmt und nachgewiesen	Baugruppen konnten erfolgreich mit engem Spaltmaß gebaut werden. Wellpappformwerkzeuge zeigen keine Schäden/Verformungen nach dem Abformen der Composites.
Bewertung der industriellen Eignung der Werkzeuge für die Faserverbundherstellung	Industriepartner sind mit den Werkzeugen zufrieden. Keine Probleme identifiziert.
Geplante konkrete Arbeitsziele: Teilprojekt B	**Erfüllung**
Optimierung des Materialeinsatzes für die Werkzeugfertigung	Materialoptimierter Zuschnitt mittels Nesting-Algorithmen erfolgreich demonstriert. Leichtbaugerechtes Design der Werkzeuge führt zu zusätzlicher Materialeinsparung.
Standardisierter Prozess für die Herstellung der pappbasierten Werkzeugformen	Prozess an mehreren Formwerkzeugen demonstriert.
Entwicklung von Recycling- und Demontagestrategien	Durch den Verzicht auf Verklebungen und weiteren Fremdstoffen ist zum End of Life eine Wertstoffentsorgung/Altpapier oder die thermische Verwertung möglich. Sondermüll entfällt.
Skalierbarkeit und Grenzen für den Einsatz identifiziert	Teilweise Erfüllung. Formwerkzeuge mit unterschiedlichen geometrischen Anforderungen wurden umgesetzt. Eine finale Aussage zu den Grenzen der Skalierbarkeit ist nicht möglich. Der Umsetzung größerer Formwerkzeuge (bspw. 20m oder mehr) steht aus Konstruktionssicht nichts entgegen.
Entwicklung von modularen Ansätzen unter Betrachtung von Transportrandbedingungen	Teilweise Erfüllung. Block Ansatz bei der Entwicklung der Heckklappe gezeigt. Der wirkliche Mehrwert des Ansatzes kann erst bei sehr großen Formwerkzeugen mit mehreren m³ gezeigt werden. Thema zukünftiger Untersuchungen.

2.4 Verwertung

2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Gemeinsame Verwertungsstrategie

Durch die enge Kooperation auf Forschungseinrichtung und Industriepartner sowie potentiellen Dritten sind nach Projektende die notwendigen nächsten Schritte bekannt, die für eine Markteinführung der pappbasierten Formwerkzeuge benötigt werden. Durch eine schutzrechtliche Absicherung der Erkenntnisse, die für einen gewinnbringenden Technologietransfer durch die beteiligten Partner und entsprechend geeigneter Lizenzmodelle notwendig ist, wird die Basis für eine weiterführende gemeinsame Arbeit zwischen den beteiligten Partnern und entsprechenden weiteren Industriepartnern im Anschluss an BioForm angestrebt.

2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens

Zum Beginn des Projektes und zum Pitch konnte das Konzept des Stapelns von 2D-Wellpappelementen und einer Funktionsschicht lediglich an einem kubischen Demonstrator (ca. 40cm³) gezeigt werden. Im Rahmen des Projektes konnte eine erhebliche Skalierung des Ansatzes und ein standardisierter Prozess zur Formwerkzeugherstellung unter

Beachtung industrieller Rahmenbedingungen umgesetzt werden. Die Applikation und insbesondere die mechanische Bearbeitung der Oberfläche zur Gewährleistung von Maschinentoleranzen konnte erstmals erfolgreich gezeigt und demonstriert werden.

Aktivitäten Dritter, die sich mit dem Ansatz des Stapelns der 2D-Wellpappelemente beschäftigen, sind nicht bekannt.

2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Messen/Konferenzen:

- Nachhaltige Formwerkzeuge; DLR-Wissenschaftstag – Nachhaltigkeit und Ressourceneffizient durch Systemleichtbau, Braunschweig Q4/24
- BioTools-Formwerkzeug; Smart Rail Convention; Q3/25

Populärwissenschaftliche Beiträge:

- Ein Formwerkzeug aus Pappe? Das geht! *Ein Formwerkzeug aus Pappe? Das geht!*
- Mit nachhaltigen Formwerkzeugen zu schnellen Erfolgen *Pappformwerkzeug für TUC-Rennauto*

Geplante Veröffentlichungen:

- JEC 2027 Composite Messe in Paris
- boot 2027 – Bootsmesse und Wassersportmesse in Düsseldorf

2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Da es sich um eine erstmalige Überprüfung der Eignung der Fertigungswerkzeuge in großem Maßstab und unter Industriebedingungen handelt und es zu unerwarteten Herausforderungen kommen kann, ist das wirtschaftliche Risiko der Umsetzung sehr hoch. Durch die DatiPilot Förderung konnte dieses Risiko signifikant verringert werden und das Potential von BioForm angemessen erprobt und untersucht werden. Die Förderung ermöglichte den Fokus und die Umsetzung unterschiedlicher Formwerkzeuge sowie einen stetigen Austausch zwischen Industrie- und Forschungspartner. Ohne die Förderung wäre eine Umsetzung und Zusammenarbeit in diesem Umfang und mit der Geschwindigkeit nicht möglich gewesen.