



# Joining with predictable Damage Tolerance

LuFo VI-1

---

Abschlussbericht der INVENT GmbH

300405-TB-05

---

|                     |  |
|---------------------|--|
| Due date            | : 30-09-2024                               |
| Nature              | : Abschlussbericht                         |
| Status              | : approved                                 |
| Responsible partner | : INVENT GmbH                              |
| Author (s)          | : Jan Baucke, Stefan Steeger (INVENT GmbH) |

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Revision table

| Issue | Date       | Modifications |
|-------|------------|---------------|
| A     | 14-08-2024 | Erstversion   |

## Glossary

|     |                                      |
|-----|--------------------------------------|
| HAP | Hauptarbeitspaket (Main-Workpackage) |
| AP  | Arbeitspaket (Workpackage)           |
| OEM | Original Equipment Manufacturer      |
| KMU | Kleine und mittlere Unternehmen      |

## Abstract & Conclusions

Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse der INVENT GmbH im Verbundvorhaben JoinDT.

Der Bericht bildet den Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.06.2024 ab.

## A.1 Table of contents

|     |  |    |
|-----|--|----|
| A.1 | Table of contents .....  | 3  |
| 1   | Aufgabenstellung.....  | 4  |
| 2   | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....           | 4  |
| 3   | Planung und Ablauf des Vorhabens .....                                       | 5  |
| 4   | Wissenschaftlichem und technischem Stand zu Beginn des Vorhabens .....       | 5  |
| 5   | Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....                                      | 7  |
| 6   | Erzielte Ergebnisse im Einzelnen .....                                       | 8  |
| 7   | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....                      | 19 |
| 8   | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....                 | 19 |
| 9   | Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses..... | 19 |
| 10  | Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....            | 20 |
| 11  | Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen .....                              | 21 |

## 1 Aufgabenstellung

Hauptentwicklungsziel des INVENT Teilvorhabens ist die fertigungstechnische Integration und Optimierung von Rissstoppelemente in Strukturverklebungen (Duroplast) und geschweißten Verbindungen (Thermoplast). Dies beinhaltet die Entwicklung und Beschreibung der dazu notwendigen Prozesse und Prozessparameter sowie die Herstellung entsprechende Prüfkörper und Teststrukturen. Die Umsetzung erfolgt bei INVENT schwerpunktmäßig auf Element-Ebene, wobei beispielsweise Wide Single Lap Shear-Probekörper gefertigt werden, in denen die einzelnen Konzepte der Rissstoppmethodik (Initialschädigung, Ermüdungsrisswachstum, Rissstopperelemente und Restfestigkeit) im Zusammenspiel getestet werden können. Dem voraus gehen Versuche auf Coupon-Ebene zur Untersuchung der Konzepte auf Einzelebene. Die Versuche sollen nicht nur zur Validierung der Funktionalität der einzelnen Konzepte dienen und den Abgleich zwischen Simulation und realen physischen Tests ermöglichen, sondern dienen auch der Validierung einer wirtschaftlichen fertigungstechnische Umsetzbarkeit. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die erarbeiteten Rissstoppoptimierungen auch in eine spätere industrielle Umsetzung gebracht werden können. Dazu dienen im Wesentlichen die Konstruktionsrichtlinien, die sich an den fertigungstechnischen Umständen genauso orientieren werden wie an den Randbedingungen, die sich durch die Möglichkeit einer späteren Zertifizierbarkeit ergeben.

Als Ergebnis soll auf Basis einer Schadentoleranten Auslegung, die durch Rissstoppermechanismen ermöglicht wird, die Fertigung gewichts- und kostenreduzierte Faserverbundstrukturen ermöglicht werden. Betrachtungsschwerpunkt von INVENT liegt dabei auf der Ebene eines Zulieferer-KMUs, was Stückzahlen, Komplexität und Größe der Strukturen betrifft. Somit ergibt sich für JoinDT ein vielfältiges technisches Spektrum, da neben den Spezifika der drei Sparten des OEMs Airbus auch die eines Zuliefererbetriebs in die Entwicklung einfließen. Ergebnis der Arbeiten sollen Designrichtlinien für die Gestaltung rissstoppoptimierter Verklebungen bzw. Schweissverbindungen sein, die möglichst so generisch sind, dass sie materialunabhängig angewendet werden können. Hierbei sollten sowohl Großstrukturen als auch kleine Komponenten berücksichtigt werden. Die Konstruktionsrichtlinien werden neben der Simulationssystematik ein Bestandteil der JoinDT Auslegungsmethodik sein. INVENT ist dabei hauptverantwortlich für die ist die Fertigung von Probekörpern und Funktionsmustern.

## 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die INVENT GmbH entwickelt, realisiert und vermarktet seit 1996 maßgeschneiderte Faserverbundtechnologien für hochwertige technische Bauteile und bietet als international ausgerichtetes Unternehmen geschlossene Konzepte von der Werkstoffauswahl, Konstruktion, Gestaltung und Berechnung über die Konzeption der Fertigungstechnologie bis zur Serienreife. Ein Standbein der INVENT GmbH ist ihr qualifiziertes Know-how-Angebot auf dem Gebiet der Fertigung und Qualitätssicherung von Leichtbaustrukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) für Anwendungen in Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau, Fahrzeugbau sowie in anderen Branchen. Die INVENT GmbH kann mit ihren ca.

120 hochqualifizierten Mitarbeitern und einem modernen Maschinenpark als Tier-1 Luftfahrtzulieferer die komplette CFK-Produktionskette vom Formenbau und der Materialkonfektionierung über verschiedenste Herstelltechnologien bis zur Qualitätssicherung und Prüfung abdecken. Vergangene nationale und EU-weite FuE-Projekte haben zu einem Kompetenzgewinn geführt, der nun erfolgreich für die Bearbeitung des hier geplanten Vorhabens eingesetzt werden kann. Die INVENT GmbH hat ein nach EN 9100:2018 zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem und ist Nadcap akkreditiert für den Bereich Composites.

### **3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Konsortium des Verbundvorhabens JoinDT bestand aus Partnern unterschiedlicher Spezialisierung und war auch im Personal interdisziplinär zusammengesetzt. Partner waren das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Institut für Systemleichtbau), das Fraunhofer IFAM, die Universität Stuttgart (Institut für Flugzeugbau) und die HAW Hamburg als wissenschaftliche Einrichtungen sowie die Unternehmen Airbus Aerostructures, Airbus Helicopters, Airbus Defence & Space und Wölfel. Assoziierte Partner, Unterauftragnehmer oder ein projektbegleitender Ausschuss waren nicht involviert. Durch die Zusammensetzung der individuellen Kompetenzen konnte von der Simulation der Rissinitiierung und des Risswachstums, über die Fertigungsverfahren der Prüfstrukturen und der Rissstoppelemente und Validierung der Schadensmechaniken im Prüfstand die komplette Wertschöpfungskette im erforderlichen großen Umfang durch das Konsortium abgedeckt und mittels hoher Kompetenz der beteiligten Partner wegweisende Fortschritte im Bereich strukturellen Kleben und Schadensvorhersage mittels simulativer Methoden erlangt werden. Die Koordination des Verbundes erfolgte durch Airbus Aerostructures und die Arbeiten auf Basis eines Kooperationsvertrags, eines abgestimmten Arbeitsplans und der Inhalte der Teilvorhabenbeschreibungen. In Telefonkonferenzen und Projekttreffen (Präsenz und virtuell) wurde dieser Rahmen regelmäßig verfeinert und abgestimmt. Die INVENT GmbH übernahm im Verbundvorhaben vorwiegend Aufgaben, die die Herstellung der Prüfkörper und Demonstratoren aus CFK betrafen. Die einzelnen Arbeitspakete und eine definierte Verteilung der Verantwortlichkeiten ergaben sich durch die Kompetenzfelder der jeweiligen Projektpartner. Das Verbundvorhaben wurde in Hauptarbeitspaketen strukturiert, wobei wichtige Zwischenergebnisse durch Meilensteine abgeschlossen wurden. Die Zusammenarbeit zwischen den Partnern gestaltete sich konstruktiv, wurde durch regelmäßige Telefonkonferenzen und Projekttreffen unterstützt und erlangte durch die vorliegende Konstellation eine hervorzuhebende Qualität, die sich in den umfangreichen umgesetzten Probenprogrammen und den vielversprechenden Testergebnissen zeigt. Im Projektverlauf kam es bedingt durch die COVID19-Pandemie zu Verzögerungen, die durch eine kostenneutrale Verlängerung zum Teil kompensiert werden konnten. Des Weiteren wurden einige geplante Präsenztreffen in dieser Phase in digitaler Form abgehalten. Durch die hervorragende Zusammenarbeit der Projektpartner konnte das Projekt bis zum Abschluss ohne inhaltliche Qualitätseinbußen durchgeführt werden. Das Gesamtvorhaben wurde nach einer Laufzeitverlängerung zum 30.06.2024 abgeschlossen.

### **4 Wissenschaftlichem und technischem Stand zu Beginn des Vorhabens**

Der Stand der Technik bezogen auf das Gesamtvorhaben ergibt sich im Wesentlichen aus dem Kontext der Verbundvorhabensbeschreibung und ist im Folgenden kurz zusammengefasst: Bezogen auf die Gesamtkosten einer Flugzeugzelle werden ca. 23 % der Kosten für die Montage aufgewendet. Für das Fügen von Faserverbundstrukturen hat die Klebetechnologie, und in zunehmendem Maße auch die Schweißtechnologie für Thermoplaste, eine wichtige Bedeutung, um primär Kosten aber auch Gewicht zu sparen. Dies gilt sowohl für die Entwicklung neuer Luftfahrzeuge (Lfz) als auch für die Instandhaltung der Lfz-Flotten durch geklebte Reparaturen. Von Seiten der Zulassung ist die Zertifizierung von strukturellen Klebungen in Hauptlastpfaden hoch reglementiert und aktuell an drei Richtlinien des FAA Dokumentes AC20-107B geknüpft:

| #    | Richtlinien FAA  | Stand der Technik  |
|------|--|--|
| i)   | Durch das größte mögliche Versagen einer geklebten Verbindung darf die zugelassene Grenzlast einer Struktur nicht unterschritten werden. Dies muss durch analytische Verfahren oder mechanische Prüfung oder beides gewährleistet werden. Das Versagen einer jeden Klebung über das kritische Maß hinaus ist durch „Design Features“ zu begrenzen. | zusätzliche Vernietung; Anwendung nur für sogenannte „Low-Loadtransfer“ Verbindungen wie z.B. Stringer/Haut oder Doppler |
| ii)  | Jede kritische Klebung muss vor dem Einsatz zum Nachweis mit der Grenzlast belastet werden   | nicht praktikabel bzw. unwirtschaftlich  |
| iii) | Reproduzierbare und zuverlässige zerstörungsfreie Prüfverfahren müssen die Festigkeit der Klebung nachweisen.  | Technologie mittel- bis langfristig nicht verfügbar  |

Die Einführung dieser Kriterien resultiert aus verschiedenen, vergangenen Vorfällen in der Luftfahrtindustrie. Hierbei handelte es sich um systematische und zufällige Fehler im Fertigungsprozess. Auf Grund des teilweisen fehlenden wissenschaftlichen Hintergrunds bezüglich der Sensibilität einer adhäsiven Verbindung kam es zu Klebungen mit verringerter adhäsiver Anbindung und somit verringerter Tragfähigkeit, sogenannten Weakbonds. Dies hat eine Verbreitung der Klebetechnologie im Flugzeugbau trotz ihres hohen Potentials für die Entwicklung neuer Luftfahrtstrukturen als auch für die Instandhaltung der Lfz-Flotten stark eingeschränkt. Insgesamt lassen sich die Hemmnisse bei der Verwendung von Klebeverbindungen in folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Hohe Unsicherheiten bei der Analyse und Berechnung von Klebeverbindungen
2. Die hohe Komplexität des Verklebeprozesses und die resultierenden Fehlermöglichkeiten

3. Die geringe Schadenstoleranz und oft Totalversagen von Klebeschichten
4. Initiale Schäden können durch zerstörungsfreie Prüfungen nicht detektiert werden.

Der hier beschriebene Stand der Technik deckt sich mit der Praxis in unterschiedlichen Industriebereichen bei INVENT. Als Hersteller von Faserverbundbauteilen für Luft- und Raumfahrtanwendungen bildet das Kleben einen zentralen Prozess. Dabei werden Verklebungen sowohl bei der Verbindung von Faserverbundbauteilen als auch bei der Verbindung von metallischen Bauteilen mit Faserverbundbauteilen eingesetzt. Die Qualität einer Verklebung hängt neben dem eigentlichen Klebeprozess von verschiedenen Begleitprozessen wie zum Beispiel Oberflächenvorbereitung, Mischansatz und Härtung ab. Daneben haben Klebstofftyp, Umweltbedingungen und spezifizierte Verarbeitungsparameter einen Einfluss auf den Prozess, der somit kleberspezifisch ist. Aufgrund der Herstellungskomplexität ist das Vorgehen in der Praxis oft wie oben beschrieben:

- Kritische Verklebungen im Raumfahrtbereich werden im Rahmen von „Proofload Tests“ bis zu einer definierten Grenzlast belastet und somit nachgewiesen. Parallel dazu werden Ultraschall Scans durchgeführt, die allerdings nicht alle potentiellen Fehlstellen (z.B. „Kissing Bonds“ etc.) feststellen können. In der Regel ist eine 100% - Prüfung aller Teile gefordert, was einen hohen technischen Aufwand bedeutet.
- Im Luftfahrtbereich werden für hochbelastet Verbindung oft von vornherein Nieten, bzw. Bolzen verwendet. Verklebungen kommen nur im Bereich geringer Lasten bzw. unkritischer Lastpfade zum Einsatz und werden teilweise zusätzlich verstärkt.
- Auch Reparaturmaßnahmen durch z. B. das definierte Vorbehandeln geschädigter Bereiche und das nachfolgende Aufkleben von Reparaturpatches erfolgt ausschließlich in Bereichen geringer struktureller Belastung.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Vorhabens fand die Zusammenarbeit auf Ebene des Konsortiums statt. Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen wurde auf Grund der vollständigen Abdeckung der Aktivitäten durch das Konsortium nicht notwendig.

## 6 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

Im Folgenden werden die Arbeiten geordnet nach Arbeitspaketen beschrieben.

### AP 1.1 Struktur und Bauteilanforderungen

In diesem Arbeitspaket wurden Materialien, Prozesse, Umweltbedingungen und Testbauteile definiert. INVENT hat dabei Beiträge zur Berücksichtigung der Fertigungsbedingungen eines Luftfahrtzulieferer-KMUs geliefert. Darüber hinaus wurde in Zusammenarbeit mit den Airbus OEMs ein Dokument zur Definition der Fertigungsprozesse, Materialien sowie der Hilfsstoffe und deren Verwendung aufgesetzt. So wird sichergestellt, dass bei der Probenfertigung vergleichbare Randbedingungen herrschen und die Testergebnisse konsistent sind.

Die Auswahl der Materialien und Prozesse ist abgeschlossen, wird aber im Projektverlauf fortlaufend überprüft und gegebenenfalls an neue Erkenntnisse angepasst.

### AP 1.2 Simulationsmethodik und Simulationsumgebung

In diesem Arbeitspaket wurde die Simulationsumgebung, Schnittstellen und die grundlegende Methodik definiert. INVENT hat dabei den Partnern Zuarbeiten zu den beim fertigen Luftfahrtzulieferer-KMUs vorherrschenden Randbedingungen bezüglich Schnittstellen und Simulationsumgebung geliefert.

### AP 1.3 Zertifizierung und Zulassung

INVENT unterstützt in diesem Arbeitspaket die OEMs bei der Entwicklung eines Zulassungskonzeptes für die angestrebte Nachweisführung durch Bewertung aus Sicht eines Luftfahrtzulieferer-KMUs.

### AP 2.1 bis 2.4

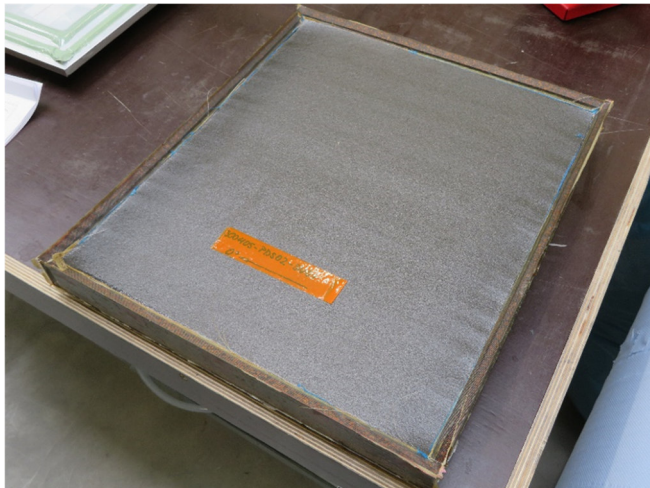
In den Arbeitspaketen 2.1 bis 2.4 übernimmt INVENT Fertigungsaufgaben für Probenprogramme zur Validierung der entwickelten Simulationsmethoden auf Coupon-Ebene. Da die Fertigungstätigkeiten und die Probenprogramme sich teilweise nicht einem bestimmten Arbeitspaket zuordnen lassen, sondern Arbeitspaketübergreifend stattfinden, werden die vier Arbeitspakete „AP 2.1 Initialschädigung“, „AP 2.2 Rissausbreitung“, „AP 2.3 Riss-Stopp-Elemente“ und „AP 2.4 Restfestigkeit“ im Folgenden gesammelt betrachtet. Dies gilt insbesondere für die bisher prävalenten Tätigkeiten wie Materialbeschaffung, Versuchsplanung und Materialcharakterisierung.

INVENT hat als Partner mit dem stärksten Fertigungsschwerpunkt Koordinationsaufgaben bezüglich Materialbeschaffung- und Verteilung, sowie der Versuchsplanung übernommen. Zudem wurden im Laufe des Vorhabens diverse Prüfkörper hergestellt. Diese werden im Folgenden näher vorgestellt.

## Probekörperfertigung

Die Partner Universität Stuttgart und Airbus Defense and Space haben federführend ein Probenprogramm aufgesetzt, welches den Einfluss der Oberflächenbehandlung auf die adhäsiv gefügten Verbindungen beleuchten soll. Dabei werden Parameter wie die Oberflächenbeschaffenheit nach der Aushärtung (Abreißgewebe vs. Trennfolie) sowie verschiedene Oberflächenvorbereitungsverfahren (z. B. Schleifen, Plasmabehandlung etc.) miteinander verglichen. INVENT hat zu diesem Zweck bisher insgesamt 6 große Platten mit verschiedenen Dicken, Laminataufbauten und Oberflächenbeschaffenheiten hergestellt und vorkonfektioniert. Diese wurden anschließend der Universität Stuttgart für die anschließenden Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Zur Materialcharakterisierung des Faserverbundmaterials, im speziellen der Bestimmung der Reibbeiwerte unter Schubbelastung, wurden ARCAN-Probekörper hergestellt. Hierfür hat INVENT eine ca. 30 mm starke Platte hergestellt und auf Fehler untersucht. Die Platte wurde dem Partner DLR für die Durchführung der Versuche zur Verfügung gestellt.



Laminat für ARCAN-Probekörper

Es wurden von INVENT Fertigungsaufgaben für mehrere Probenprogramme übernommen. Dafür wurden Halbzeugplatten für folgende Proben hergestellt:

- WSLS Proben
- Gestufte MCLS Proben
- Stepped Scarfed CAI Proben

Die Proben wurden gemäß den Vorgaben des Projektpartners Airbus Defense and Space hinsichtlich Lagenaufbau und Abmessungen gefertigt. Die nachfolgende mechanische Bearbeitung und das Fügen der Probenhälften erfolgte bei dem Projektpartner Airbus Operations in Stade. Für den Fügevorgang wurde die erforderliche Menge des Klebefilms mitgeliefert.

### WSLS Proben

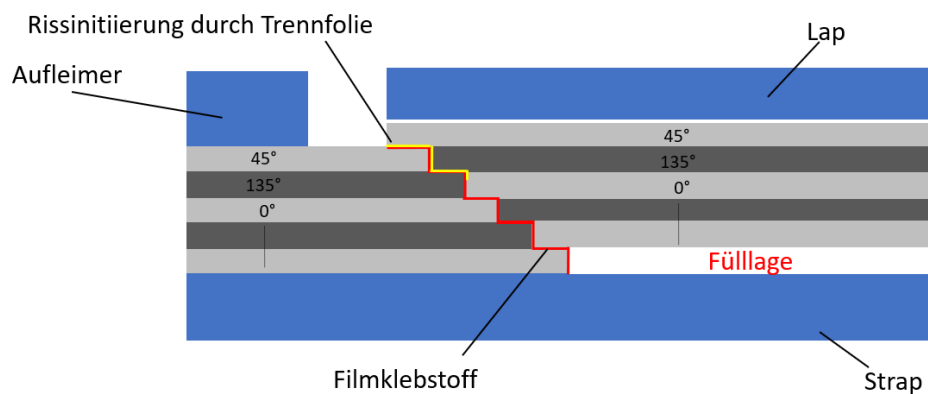
Die gefertigten Wide Single Lap Shear Proben dienen der Untersuchung der adhäsiven Verbindung bei Scherbelastung zur Validierung der simulativen Ergebnisse. Es wurden aus 8 Laminaten 48 Probenhälften in vier Batches gefertigt und an Airbus Operations geliefert. Zwei dieser Probenhälften sind exemplarisch in der folgenden Abbildung gezeigt.



WSLS Probekörper-Hälften

### MCLS Proben

Mit den Modified Cracked Lap Shear Proben wird das Verhalten der betrachteten Fügeverbindungen bei Vorschädigung untersucht. Die Rissinitiierung erfolgt hierbei durch das Einbringen einer künstlichen Fehlstelle in Form eines definiert abgelegten Trennfolienzuschnitts. Ein Querschnitt der Probe ist in der der folgenden Abbildung gezeigt.

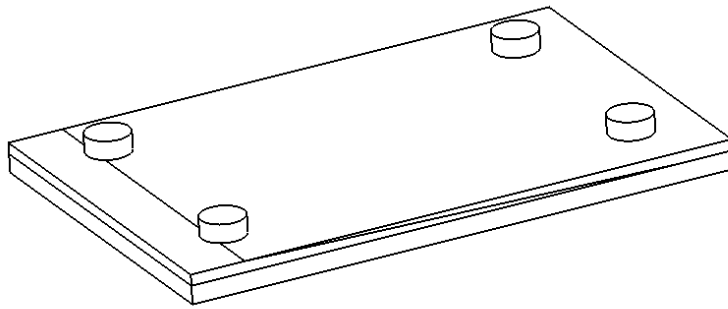


Querschnitt MCLS-Probe

Es wurden für 24 Proben drei Halbzeugplatten hergestellt, aus denen ebenfalls die nötigen Aufleimer sowie Lap und Strap-Platten hergestellt wurden.

### CAI Proben

Es wurden CAI und EN6066 Proben gefertigt. Die Compression After Impact Proben werden genutzt, um das Verhalten der Klebeverbindungen nach einer stoßartigen Belastung zu untersuchen. Der Aufbau entspricht hierbei dem der weiter oben gezeigten MSLS Proben. Der Probekörper ist schematisch in der folgenden Abbildung gezeigt.

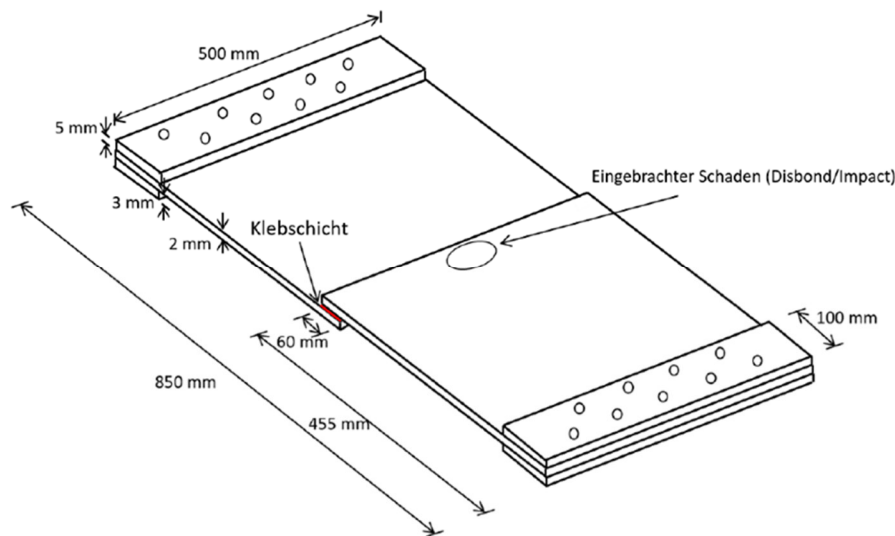


Probekörper CAI-Proben

Die Fertigstellung fand bei Airbus Defence und Space zur Vervollständigung der Probekörper mit anschließender Versuchsdurchführung statt.

### WSLS-CAI Proben

Es wurden 3 große Grundplatten für die Herstellung von 15 WSLS-CAI Proben hergestellt. Die Proben verfügen über den gleichen Lagenaufbau wie die schon zuvor bei INVENT erstellten WSLS-Laminat. Der Unterschied ist hier die erneute Prüfung der Probe nach vorhergehendem Impact (CAI) auf die Verklebung. Der Probekörper sowie die nachträglich eingebrachte Schadensstelle (Disbond) sind schematisch in der folgenden Abbildung gezeigt.



Probekörper WSLs-CAI-Probe

## AP 2.6

Die Versuchsergebnisse sind validiert und aus den gewonnenen Erkenntnissen sind Konstruktionsrichtlinien für HAP 3 abgeleitet. Diese führten in die Definitions- und Designphase für den Demonstrator des HAP 3.

### Materialbeschaffung

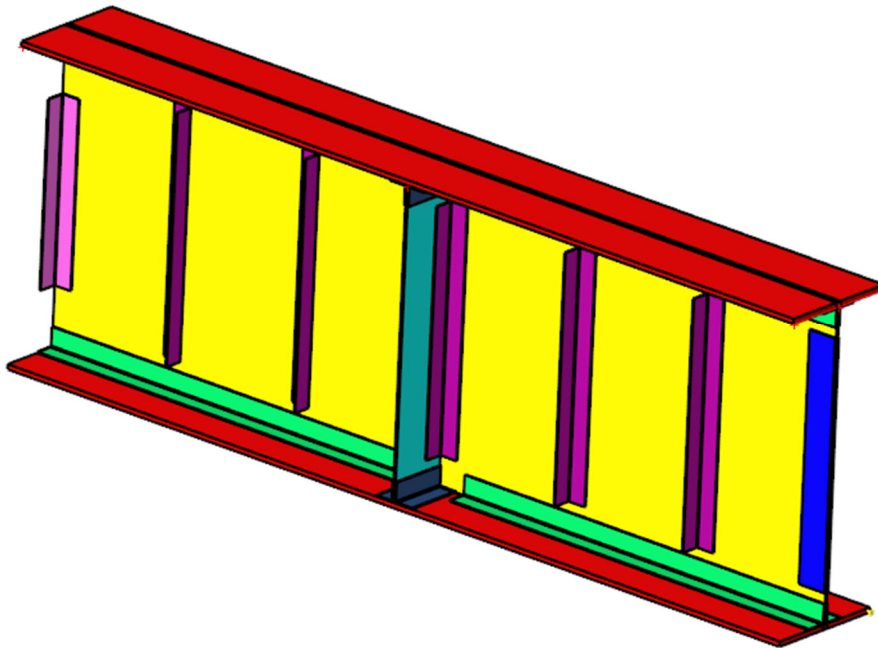
Voraussetzung für die Fertigung ist die Verfügbarkeit der Materialien und Hilfsstoffe. Nach Definition der Prozesse und Materialien in AP 1.1 wurde die Materialbeschaffung organisiert. Aufgrund der teilweise geringen Materialbedarfe der Partner und der im Vergleich zu den Bedarfen hohen Mindestabnahmemengen übernimmt INVENT zentral die Aufgabe der Beschaffung und Verteilung von Prepreg und Filmklebstoff innerhalb der Lagerzeiten der Materialien. Auch die Hilfsstoffe wie Abreißgewebe und Trennfolie wurden definiert, beschafft und an Projektpartner verteilt.

### Versuchsplanung

Im Projekt übernehmen mehrere Partner Fertigungsaufgaben zur Herstellung von Probekörpern. So stellen die Forschungspartner Probekörper zur Validierung ihrer Simulationsmodelle her. Zusätzlich werden Probekörper- und Halbzeugfertigung im Sinne effizienterer Abläufe und konsistenter Prozesse teilweise zentral, insbesondere durch INVENT, durchgeführt. Um arbeitspaketübergreifende Aktivitäten wie Materialcharakterisierung im Konsortium zu verteilen und Dopplungen zu vermeiden, sowie zu zentralisierende Aufgaben zu identifizieren wurde von INVENT eine Testmatrix eingeführt und federführend verwaltet. In dieser sind alle Probenprogramme der Partner mit den wichtigsten Randbedingungen wie Geometrie, Menge, Prüfverfahren etc. zusammengefasst. Auf Basis dieser wurden die Fertigungsaufgaben im Konsortium verteilt.

### HAP 3

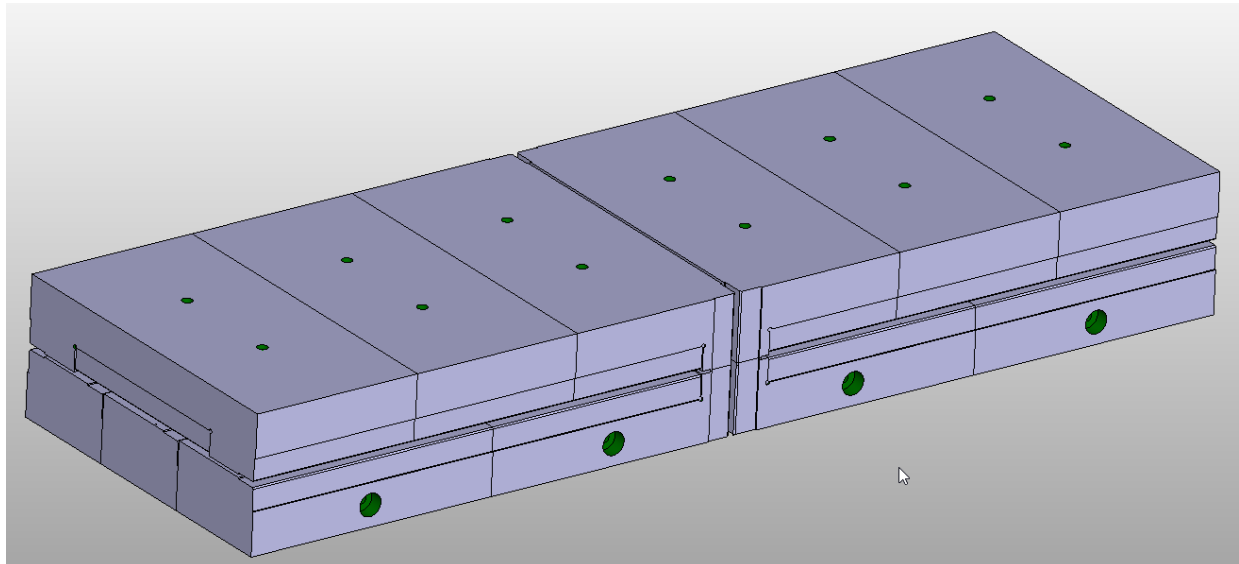
Es wurde mit dem Partner Airbus Defense und Space ein Probekörper entwickelt der die bisherigen Erkenntnisse die im Laufe des Projekts ermittelt wurden auf eine größere Struktur zu übertragen und zu testen. Das Design sowie die Auslegung erfolgte bei ADS unter Berücksichtigung seitens INVENT vorgeschlagener Details hinsichtlich der Herstellung. Das Ergebnis ist eine Trägerstruktur mit aufgetragenen Versteifungselementen.



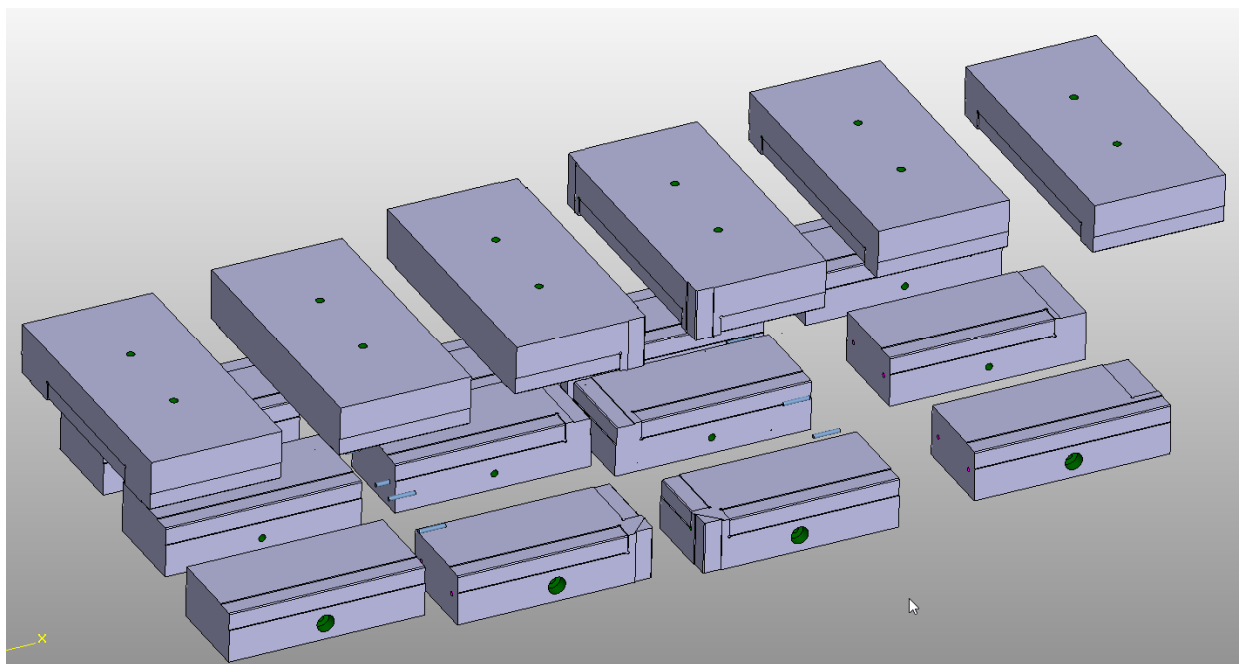
#### Prüfstruktur HAP 3: Trägerstruktur aus CFK Platten und Winkeln

Nach der Festlegung des Designs wurde bei INVENT ein Werkzeugkonzept entwickelt, um das Fügen der Einzelbauteile zu ermöglichen. Das Werkzeug stellt sicher, dass alle Einzelbauteile an der vorgesehenen Stelle fixiert werden können. Das Werkzeug wird während des manuellen Verklebeprozesses nach und nach geschlossen und montiert und erst nach dem Aushärten des Klebstoffs im Autoklaven wieder demontiert und gelöst. Durch die Materialauswahl des Klebstoffs ist ein Aushärtezyklus unter Vakuum, Druck und Temperatur erforderlich. Daher stellen sich sowohl an das Design als auch an das verwendete Material des Werkzeuges mehrere Anforderungen. Die wesentlichen sind einerseits die Temperaturbeständigkeit bei der Aushärtetemperatur von 125°C und zum anderen eine geeignete Oberflächenbehandlung um nach dem Aushärten des Klebstoffs ein Anhaften der Bauteile an dem Werkzeug auszuschließen. Für die Materialauswahl wurden daher diverse Vorversuche durchgeführt. Hauptaugenmerk bei diesen Vorversuchen war die Entformbarkeit. Es konnte eine geeignete Materialkombination identifiziert werden, die zum einen eine leichte Montierbarkeit durch geringes Gewicht gewährleistet und sich zum anderen gut von der verklebten Struktur löst. Das Werkzeug besteht aus diversen Einzelteilen, die über Aufnahmen für die Bauteile der Prüfstruktur verfügen. Diese Aufnahmen sind so konstruiert, dass zudem zwischen den Bauteilen der Struktur der Klebspalt korrekt eingestellt wird. Wenn das Werkzeug inklusive aller Bauteile der Prüfstruktur montiert ist, kann es durch einen Vakuumaufbau der das Werkzeug vollständig umschließt,

kompaktiert werden. Durch die Konstruktion des Werkzeuges wird sichergestellt das die Bauteile der Prüfstruktur an der korrekten Position gehalten werden und trotzdem ausreichend Anpresdruck an ihren jeweiligen Fügepartner erhalten.



**Prüfstruktur HAP 3: Montagewerkzeug im geschlossenen Zustand**

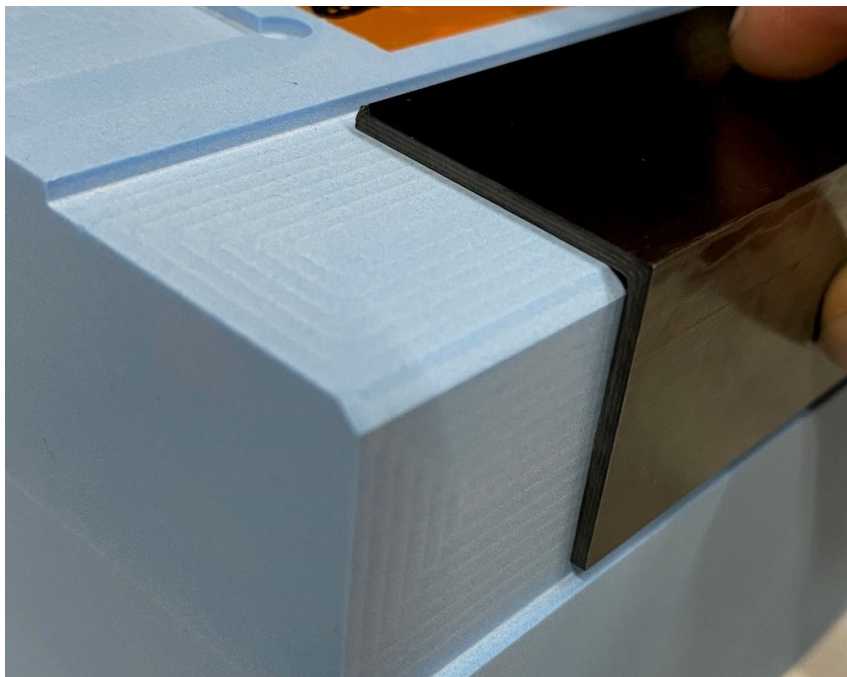


**Prüfstruktur HAP 3: Montagewerkzeug im demontierten Zustand**

Nach dem erfolgreichen Abschluss der Materialauswahl und des Designs wurde das Werkzeug bei INVENT hergestellt. Dafür wurde das Ursprungsmaterial des Werkzeuges durch CNC-Zerspanung verarbeitet und abschließend auf Geometrieabweichungen untersucht.

Die Herstellung der Einzelbauteile der Prüfstruktur sowie deren Montage und Prüfung wurde parallel vorbereitet. Die Lamine der Einzelbauteile wurden aus größeren Halbzeugplatten vereinzelt. Durch die unterschiedlichen Materialstärken der verschiedenen Bauteile mussten drei separate Halbzeugplatten aufgebaut werden. Die Zuschnitte der Platten wurden CNC gesteuert zugeschnitten und beschriftet. Die Ablage der Lamine erfolgte händisch. Um eine möglichst hohe Übereinstimmung der Prüfstruktur mit den vorangegangenen Prüfkörpern zu erzielen wurden sämtliche Produktionsparameter wie z.B. Vakuumbreite, Autoklavdruck und -temperatur während der Aushärtung sowie die Dauer und die Heizrate der Temperaturführung übernommen.

Neben den plattenförmigen Bauteilen besteht die Prüfstruktur in HAP 3 aus rechtwinkligen Bauteilen die im Zusammenbau die Verbindung zwischen den Bauteilen herstellen. Diese Winkel wurden auf einem speziellen, zweiteiligen Winkelwerkzeug hergestellt, um die hohe Fertigungsgenauigkeit zu erreichen. Die hohe Fertigungsgenauigkeit ist deswegen besonders wichtig, um die korrekten Klebspaltbreite für den Filmklebstoff zu erzielen. Bei Abweichungen kann ansonsten eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs und somit eine korrekte Verklebung nicht sichergestellt werden. Die wichtigsten Faktoren sind hierbei die Rechtwinkligkeit des Bauteils als auch die gleichbleibende Materialstärke. Die Passgenauigkeit der hergestellten Winkel ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

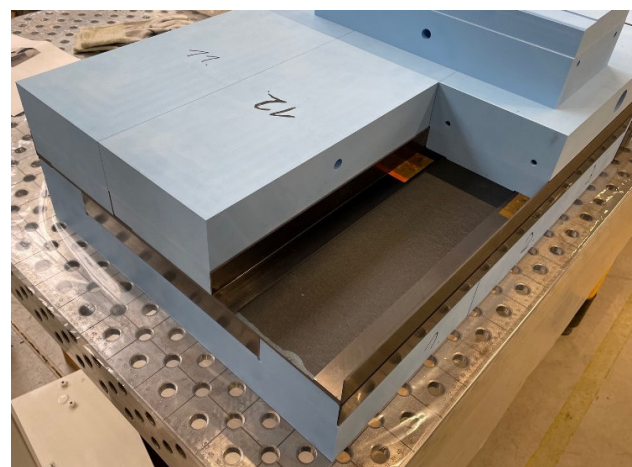
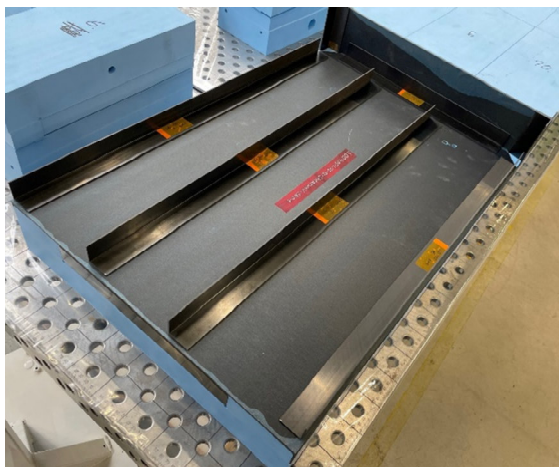


**Prüfstruktur HAP 3: Winkelbauteil auf Montagewerkzeug**

Für die Montage der Bauteile zur fertigen Prüfkörperstruktur wurde zuerst das Werkzeug vorbereitet. Hierzu wurden die Oberflächen aller Formklötze mit einer speziellen Beschichtung versiegelt. Diese Beschichtung verhindert ein Eindringen des niedrigviskosen Klebstoffs in die Poren des Werkstoffs und somit ein ungewolltes Verkleben des Bauteils mit dem Fügwerkzeug. Anschließend wurde das Werkzeug mit einem Trennmittel behandelt.

Für die Verkleben der Struktur mussten zudem sämtliche Oberflächen der Bauteile die als Klebeflächen dienen korrekt vorbehandelt werden. Hierbei wurde das identische Verfahren angewendet, dass auch schon bei sämtlichen vorangegangenen Proben zum Einsatz kam.

Nach der Vorbereitung des Werkzeugs sowie der Klebeflächen, konnten die Bauteile schrittweise in das Fügewerkzeug eingelegt werden. Vorab wurde eine optimierte Ablagesequenz ermittelt. Die einzelnen Bauteile werden beim Zusammenbau an die vorgesehene Position gebracht. Durch die Aussparungen im Werkzeug ist eine korrekte Positionierung vorgegeben. Die Werkzeugklötze müssen lediglich an ihren Außenkanten bündig ausgerichtet werden. Nach Einlegen der Einzelbauteile wird auf die Klebeflächen der Klebefilm aufgebracht. Dies geschieht händisch, äquivalent zu der Ablage von Prepreg im Laminierprozess. In den nachfolgenden Abbildungen sind die eingelegten Bauteile während des Zusammenbaus gezeigt.



**Prüfstruktur HAP 3: Zusammenbau mit Montagewerkzeug**

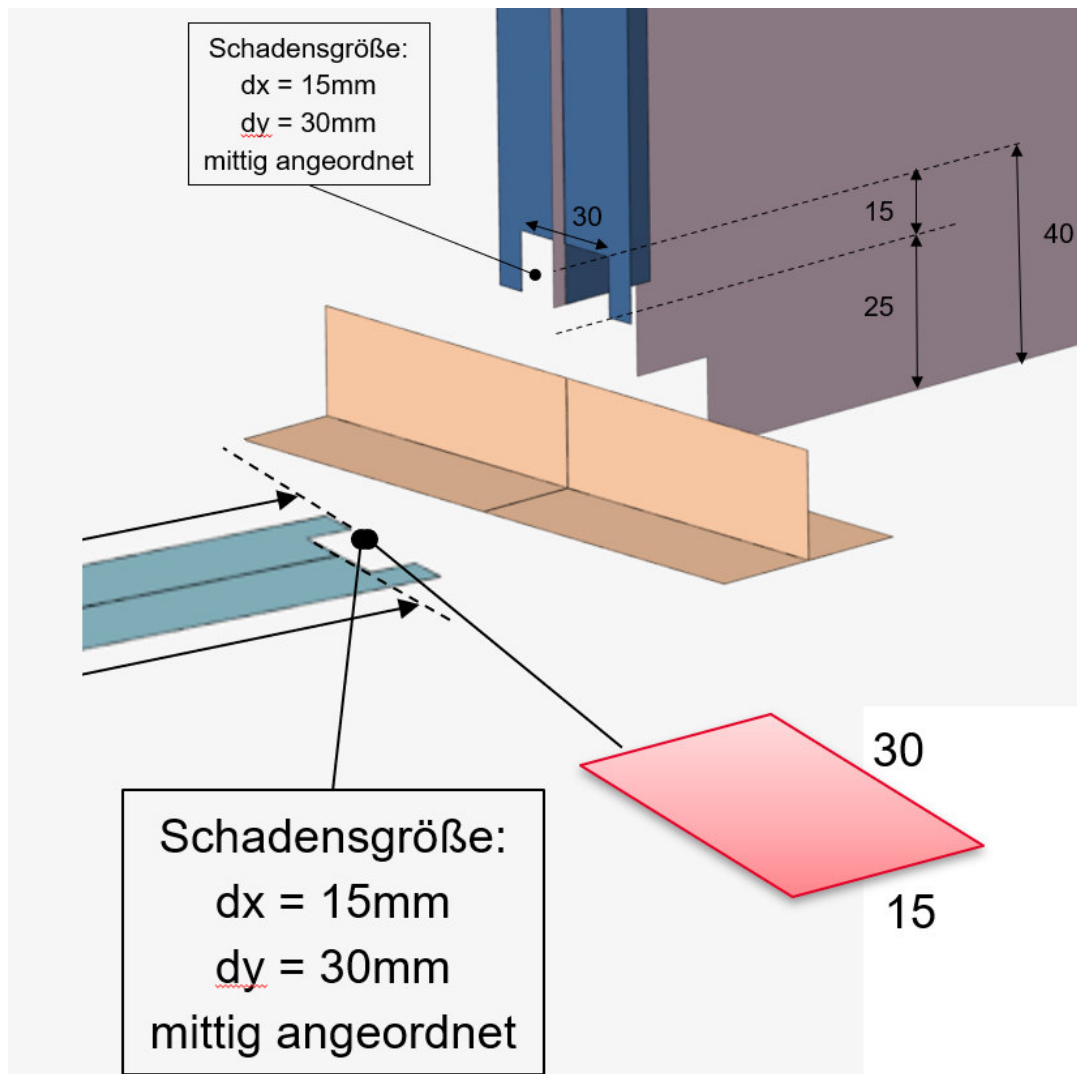
Nach dem Zusammenbau wird das Werkzeug mit einem Vakuumaufbau versehen. Die Aushärtung des Filmklebstoffs erfolgt durch einen Autoklavprozess. In diesem Prozess wird neben der vorgesehenen Härtetemperatur auch ein zusätzlicher Druck aufgebracht um den notwendigen Anpressdruck der Bauteile zueinander zu gewährleisten.

Nach dem Härtezyklus kann der Vakuumaufbau entfernt werden und die Werkzeugklötze werden nacheinander von der nun verklebten Struktur abgenommen. Die fertige Prüfstruktur ist in der folgenden Abbildung zu sehen.



**Prüfstruktur HAP 3**

Ab der zweiten Prüfstruktur ist an mehreren Stellen der Verklebung eine künstliche Vorschädigung eingebracht. Hierzu wird ein Trennfolienzuschnitt lokal zwischen Klebefilm und Bauteil positioniert. Dadurch wird die Anbindung der Fügepartner unterdrückt. Unter Belastung tritt an dieser Stelle die Rissinitiierung ein. Dieses Vorgehen wurde schon bei den vorangegangenen Probekörpern z.B. der WSLs umgesetzt. In der folgenden Abbildung ist die Position der künstlichen Vorschädigungen gezeigt.



Prüfstruktur HAP 3: Künstliche Vorschädigungen ab SN02

Die Prüfstrukturen sind für die mechanische Prüfung an das WIWeB gesendet worden. Die dort ermittelten Ergebnisse dienen dem Partner Airbus Defence und Space zum Abgleich mit dem vorhergesagten mechanischen Verhalten. Es sind im Rahmen von JoinDT mehrere Varianten von Prüfstrukturen mit und ohne künstlichen Fehlstellen zur Verfügung gestellt worden.

## 7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

|   | <b>Position</b>     | <b>Gesamtnachkalkulation</b> |
|---|---------------------|------------------------------|
| 1 | 0813 Material       | 15.303,72 €                  |
| 2 | 0837 Personalkosten | 516.755,14 €                 |
| 3 | 0838 Reisekosten    | 1.211,72 €                   |
|   | <b>Gesamt</b>       | <b>533.270,58 €</b>          |

## 8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Erreichung der Projektziele waren somit anspruchsvolle und umfangreiche Probenprogramme von entscheidender Bedeutung. Diese anspruchsvollen Ziele des Verbundprojektes beinhalteten ein hohes technologisches und wirtschaftliches Risiko. Die damit verbundene Fertigung war zudem mit finanziellen Risiken verbunden. Die weiterhin geplante Umsetzung der Projektergebnisse innerhalb einer angestrebten Industrialisierungsphase ist weiterhin ebenfalls mit einem nicht vernachlässigbaren finanziellen Aufwand verbunden. Die allein auf Eigenmittel gestützte In-House Entwicklung ist für ein Unternehmen mit der Größe der INVENT GmbH nicht finanzierbar, so dass das Entwicklungsvorhaben einer zusätzlichen Förderung bedurfte. Alle Projektpartner brachten Know-How im jeweiligen Arbeitsgebiet ein und unterstützten damit eine von hoher Dynamik geprägte Zusammenarbeit, die die realisierte, komplexe Erprobungskampagne erst möglich machte. Durch das Projekt wurde ein erheblicher Technologievorsprung im Bereich der simulativen Nachweisführung und Schadensvorhersage beim strukturellen Kleben in Flugzeugstrukturen erarbeitet und somit die Grundlagen für den zukünftigen Einsatz dieser Technologie geschaffen. Zusätzlich wurden damit die Grundlagen zur Schaffung von neuen Absatzmärkten und Arbeitsplätzen durch eine maßgebliche Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit gelegt. Die erreichten Projektergebnisse leisten aufgrund ihres innovativen Charakters einen erheblichen Beitrag zum technisch-wissenschaftlichen Fortschritt im Bereich des Flugzeugbaus. Dadurch bieten sich neuartige Ansätze zum Design zukünftiger Luftfahrtbauteile und -strukturen. Das Arbeitsprogramm umfasste äußerst anspruchsvolle Forschungsaufgaben sowie methodische und technologische Entwicklungen in einem beträchtlichen Umfang. Zu deren Erreichung wurde das veranschlagte Kostenbudget vollständig benötigt.

## 9 Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

Als Tier-1 Zulieferer für Faserverbundbauteile und -strukturen in der Luftfahrtindustrie und in der Luftfahrt gut vernetztes Unternehmen bieten sich INVENT ideale Marktzugangsmöglichkeiten für den Einsatz von strukturellen Klebungen und Risstopperelementen, welche für zukünftige Flugzeuggenerationen benötigt

werden. Die Anwendung dieser Technologien bei neuen Flugzeugmustern sowie die Modernisierung bestehender Flotten sieht INVENT als eines der in der mittleren bis längeren Zukunft eintretenden Potentiale. Hier sieht sich INVENT vor allem als Hersteller von Neuteilen, die bereits bei der Fertigung mit der neuen Technologie ausgestattet bzw. zusammengebaut werden.

Für INVENT stellt die Durchführung des Projektes JoinDT einen wichtigen Schritt zur Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung der eigenen Kompetenzen und zur Sicherung und Eröffnung von Absatzmöglichkeiten in der Luftfahrtindustrie dar. Für den Einsatz von strukturellen Klebeverbindungen mit und ohne Rissstopptechnologien stehen, wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in selbstentwickelten Faserverbundprodukten oder durch Zulieferung als OEM-Komponenten in Aussicht. Es wird davon ausgegangen, dass die zivile Erstverwertung der Ergebnisse ca. 2-6 Jahre nach Projektende zuerst vorrangig in eigenentwickelten Bauteilen am Standort Braunschweig in Deutschland erfolgen wird.

Durch die mit den Projektpartnern über das Projekt hinaus fortgeführte Zusammenarbeit mit Ziel der Produktentwicklung, Luftfahrtzulassung und Serieneinführung kann INVENT das Marktsegment im Bereich der Strukturbauteile aus Faserverbundwerkstoffen auch in Zukunft für neuartige und moderne Flugzeugstrukturen sichern, da in diesen Strukturen perspektivisch immer häufiger neue Technologien wie das strukturelle Kleben ohne zusätzliche Verschraubung zum Einsatz kommen werden. Der Zeithorizont für diese Verwertungsperspektive liegt bei 5-10 Jahren. INVENT beabsichtigt in der Phase der wirtschaftlichen Verwertung, diese Komponenten zu fertigen und seine Position als zuverlässiger und hochtechnologischer Zulieferer zu sichern und auszubauen. Gemeinsame Weiterentwicklungen auf Basis der erlangten Erkenntnisse und die Überführung auf andere Anwendungsfälle soll in diesem Rahmen ebenfalls stattfinden. Darüber werden die Ergebnisse auch weiterhin gemeinsam mit den industriellen und wissenschaftlichen Partnern weiterentwickelt und verwertet, beispielsweise bei anschließenden Forschungsprojekten, assoziierten Industrieaufträgen oder abgeleiteten Anwendungsentwicklungen. Hier wird auch eine Zusammenarbeit mit weiteren wissenschaftlichen Einrichtungen angestrebt. INVENT will dabei die Rolle des Industriepartners zur Entwicklung von Fertigungstechnologien und effizienter Integrationsmethodik einnehmen, um sich darauffolgend als Lieferant für Endanwender zu etablieren.

## **10 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Im Kontext der strukturellen Klebetechniken und der Zulassung in primären Luftfahrtstrukturen mit und ohne den Einsatz von Rissstoppelementen sind keine weiteren Fortschritte bei anderen Stellen außerhalb des Konsortium bekannt geworden.

## **11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen**

Das JoinDT-Vorhaben wurde seitens der INVENT GmbH in Socialmediabeiträgen (LinkedIn) genannt. Das Konsortium strebt über den Projektabschluss hinaus eine enge Zusammenarbeit an.

## Berichtsblatt

|  |  |  |
|--|--|--|
| <b>1. ISBN oder ISSN</b>   | <b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b><br>Schlussbericht |  |
| <b>3. Titel</b><br>Schlußbericht zu JoinDT, öffentlicher Auszug  |  |  |
| <b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b><br>Jan Baucke<br>Stefan Steeger  | <b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b><br>30.06.2024                           |  |
|  | <b>6. Veröffentlichungsdatum</b><br>24.09.2024                                 |  |
|  | <b>7. Form der Publikation</b><br>Sonstiges                                    |  |
| <b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b><br>INVENT Innovative Verbundwerkstoffe Realisation und Vermarktung neuer<br>Technologien GmbH  | <b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b><br>300405-TB-05 A Auszug          |  |
|  | <b>10. Förderkennzeichen</b><br>20W1918E                                       |  |
|  | <b>11. Seitenzahl</b><br>13  |  |
| <b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b><br>BMWK   | <b>13. Literaturangaben</b>  |  |
|  | <b>14. Tabellen</b><br>1   |  |
|  | <b>15. Abbildungen</b><br>12   |  |
| <b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b>   |  |  |
| <b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b>   |  |  |
| <b>18. Kurzfassung</b><br>Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse der INVENT GmbH im Verbundvorhaben JoinDT.<br><br>Der Bericht bildet den Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.06.2024 ab. |  |  |
| <b>19. Schlagwörter</b><br>Simulation und Prüfung von Klebeverbindungen  |  |  |
| <b>20. Verlag</b>  | <b>21. Preis</b>   |  |

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2431355-4

## Document control sheet

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>1. ISBN or ISSN</b>  | <b>2. type of document (e.g. report, publication)</b><br>Veröffentlichung (Publikation) |  |
| <b>3. title</b><br>Schlußbericht zu JoinDT, öffentlicher Auszug   |   |  |
| <b>4. author(s) (family name, first name(s))</b><br>Jan Baucke<br>Stefan Steeger  | <b>5. end of project</b><br>30.06.2024  |  |
|   | <b>6. publication date</b><br>24.09.2024  |  |
|   | <b>7. form of publication</b><br>Sonstiges  |  |
| <b>8. performing organization(s) name, address</b><br>INVENT Innovative Verbundwerkstoffe Realisation und Vermarktung neuer Technologien GmbH   | <b>9. originators report no.</b><br>300405-TB-05 A Auszug                               |  |
|   | <b>10. reference no.</b><br>20W1918E  |  |
|   | <b>11. no. of pages</b><br>13   |  |
| <b>12. sponsoring agency (name, address)</b><br>BMWK  | <b>13. no. of references</b>  |  |
|   | <b>14. no. of tables</b><br>1   |  |
|   | <b>15. no. of figures</b><br>12   |  |
| <b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b>  |   |  |
| <b>17. presented at (title, place, date)</b>  |   |  |
| <b>18. abstract</b><br>Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse der INVENT GmbH im Verbundvorhaben JoinDT.<br><br>Der Bericht bildet den Zeitraum vom 01.03.2020 bis 30.06.2024 ab. |   |  |
| <b>19. keywords</b><br>Simulation und Prüfung von Klebeverbindungen   |   |  |
| <b>20. publisher</b>  | <b>21. price</b>  |  |

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2437042-4