

Titel:

# Schlussbericht (Teil I und Teil II) der INVENT GmbH

## HANNAH

Verbundvorhaben: Herausforderungen der industriellen Anwendung von nanomodifizierten und hybriden Werkstoffsystemen im Rotorblattleichtbau

Teilvorhaben: Methoden zur industriellen Fertigung von nanomodifizierten und hybriden Halbzeugen mit Qualitäts- und Prozesssicherung

Laufzeit: 01.03.2019 - 30.04.2023

**Beschreibung:**

Der vorliegende Sachbericht beschreibt die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse der INVENT GmbH im Verbundvorhaben HANNAH.

Der Projektzeitraum erstreckt sich vom 01.03.2019 bis 30.04.2023.

**Verteiler (alphabetisch):**

INVENT GmbH

Technische Informationsbibliothek (TIB)

Projektträger PTJ (Jülich)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Vers.	Datum:	Änderung	Seiten	Verfasser
A	20.10.2023	Ursprungsfassung	alle	OPMA

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbericht .....	4
1.1	Aufgabenstellung .....	4
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
1.4	Stand der Technik und Wissenschaft zu Beginn des Vorhabens .....	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7
2	Eingehende Darstellung .....	7
	TAP: 1.5 .....	7
	TAP: 1.6 und TAP: 5.7 .....	8
	TAP: 1.7 .....	11
	TAP: 1.8 .....	15
	TAP: 1.9 .....	18
	TAP: 1.10 .....	20
	TAP: 1.11 .....	21
	TAP: 5.8 .....	23
	TAP: 5.9 .....	27
	TAP: 5.10 .....	29
	TAP: 5.11 .....	32
	TAP 5.12 .....	36
	TAP: 3.7 & 7.8 .....	43
	TAP: 4.7 & 4.8 – Technische und wirtschaftliche Bewertung: Nano-Schiene .....	46
	TAP: 8.4 & 8.5 – Technische und wirtschaftliche Bewertung: FML-Schiene .....	49
	MS-Übersicht .....	54
	Quellen .....	57
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	59
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	59
5	Nutzen, Verwertbarkeit (fortgeschriebener Verwertungsplan) .....	59
5.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten .....	59
5.2	Wissenschaftliche / technische Erfolgsaussichten .....	60
5.3	Wissenschaftliche / technische Anschlussfähigkeit .....	61
6	Externer Fortschritt auf dem Gebiet .....	62
7	Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 5 der NKBF .....	62

 <b>INVENT</b>	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
---	--	--

## 1 Kurzbericht

### 1.1 Aufgabenstellung

Die im vorhergehenden Projekt LENAH entwickelten Materialtechnologien zeigen ein enormes Potential, um einen entscheidenden Beitrag zur Effizienzsteigerung von WEA-Turbinen leisten zu können.

Im Rahmen des Vorhabens HANNAH sollen die in LENAH entwickelten Materialtechnologien von der Entwicklungsstufe TRL-3 auf TRL-5 gebracht werden, um deren industrielle Anwendung voranzutreiben. Im Fokus steht für die nanomodifizierten und hybriden Materialsysteme die Berücksichtigung industrieller Randbedingungen in der Fertigung und im operativen Betrieb der WEA. In der Fertigung sind insbesondere Fragen der Skalierbarkeit sowie der Zeit- und Kosteneffizienz in der Produktion entscheidend. Darüber hinaus ist ein effizientes Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Rotorblattfertigung mit nanomodifizierten und hybriden Laminaten zu realisieren, um maßgebliche Kostenvorteile gegenüber aktuellen Konstruktionskonzepten zu erreichen. Um die Realisierbarkeit der industriemaßstäblichen Fertigungskonzepte zu demonstrieren, sind für jede entwickelte Materialtechnologie Komponentenversuche geplant. Ziel ist es, den Mehrwert gegenüber bislang etablierten Materialien auf Strukturebene exemplarisch zu demonstrieren. Basis hierfür sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen im Konsortium zum Werkstoffverhalten verbunden mit der Analyse von Wirk- und Schädigungsmechanismen, welche anhand von Modellierung und Simulation validiert werden und somit einen stetigen Optimierungsprozess erlauben. INVENT übernimmt in diesem Projekt die Aufgabe, Methoden zur industriellen Fertigung von nanomodifizierten und hybriden Halbzeugen mit Qualitäts- und Prozesssicherung zu erarbeiten.

### 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundvorhaben wurde initiiert, um neue Technologien zu entwickeln sowie diese auf ein höheres, anwendungsnäheres Niveau zu heben. Die wachsende Nachfrage nach leistungsfähigeren Faserkunststoffverbunden und deren effiziente Herstellung für die Windenergiebranche soll mit innovativen Lösungen begegnet werden. Hauptvoraussetzung für die Vorhabendurchführung war die Fusion der einzelnen und vor allem branchenübergreifenden Fachkompetenzen der am Projekt beteiligten Partner. Diese reichen von der experimentellen Charakterisierung der Werkstoffsysteme unter realitätsnahen Fertigungs- und Umwelteinflüssen über die Bestimmung von Prozessparametern zu Herstellungs-, Alterungs- und Einsatzbedingungen bis hin zur Weiterentwicklung von

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

computergestützten Berechnungs- und Auslegungsmethoden zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung der neuen Materialtechnologien für die Anwendung im Rotorblattleichtbau.

Für die erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens waren die Verteilung, Bearbeitung und Koordinierung der Aufgaben entsprechend den jeweiligen Kompetenzfeldern nötig, sowie ein intensiver Austausch zwischen den Partnern über die Anforderungen der jeweils branchenüblichen Werkstoffe und Prozesse hinweg. Das Konsortium wurde somit aus einer sinnvollen und erfolgsorientierten Kombination innovativer Partner gebildet. Eine weitere Grundlage bildeten die Vorarbeiten und erzielten Erkenntnisse des abgeschlossenen Verbundprojektes LENAH (BMBF: Förderkennzeichen 03SF0529B), bei dem die mechanische Leistungsfähigkeit der aktuell in Windenergieanlagen eingesetzten Faserverbundwerkstoffe durch den Einsatz von nanomodifizierten Werkstoffsystemen sowie hybriden Werkstoffen basierend auf GFK-Metall-Laminaten und GFK-CFK-Hybriden entscheidend verbessert werden konnte.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Umsetzung des Vorhabens wurde das Projekt in zwei Bereiche aufgeteilt. Zum einen das der nanomodifizierten Werkstoffsysteme (Nano) und auf der anderen Seite das der hybriden Materialsystemen, den Faser-Metall-Laminaten (FML). Darunter gliedern sich 8 aufeinander abgestimmte Teilarbeitspakete (TAP).

	Nanomodifizierte Werkstoffsysteme		Hybride Laminate	
Thematische Unterteilung	Nanomodifizierte FVK zur Gewichts- und Kostenreduktion von Rotorblättern durch verbesserte Ermüdungseigenschaften	Nanomodifizierte Klebstoffsysteme zur Verklebung von Strukturkomponenten im Rotorblatt	GFK/Stahl-Hybride in der Blattwurzel-Nabe-Anbindung	GFK/CFK-Hybride zur bereichsweisen Versteifung von Rotorblättern
Praxisrelevante Fertigungsaspekte der Werkstoffsysteme	AP 1	AP2	AP 5	AP 6
Materialverhalten unter realistischen Einsatzbedingungen				
Auslegungsmethoden innovativer Materialsysteme	AP 3		AP 7	
Rotorblattauslegung und abschließende Bewertung	AP 4		AP 8	

Abbildung 1: Übersicht zur Arbeitsplanung

Die INVENT GmbH engagierte sich anhand eines abgestimmten Arbeitsplans und der Inhalte laut Teilhabenbeschreibung. In regelmäßigen Telefonkonferenzen und Projekttreffen erfolgte ein kontinuierlicher Austausch sowie eine Konkretisierung der Inhalte. Innerhalb des

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

angesetzten Zeitrahmens (01.03.2019 - 28.02.2022) wurde das Vorhaben zwei Mal kostenneutral bis zum 30.04.2023 verlängert. Die Gründe hierfür lagen in den maßgeblichen Auswirkungen der Coronapandemie.

#### **1.4 Stand der Technik und Wissenschaft zu Beginn des Vorhabens**

Für die nanomodifizierten Werkstoffsysteme und hybriden Laminaten konnte in einem vorherigen Projekt (LENAH) nachweislich gezeigt werden, dass es sich um vielversprechende Werkstoffsysteme handelt. Das DLR wies für nanomodifizierte Verbunde eine bis zu 25%ige Steigerung der matrixdominierten Steifigkeiten und Festigkeiten im Vergleich zum unmodifizierten Verbund nach [1-4]. Auch unter zyklischer Beanspruchung konnten Steigerungen der Lebensdauer um mehrere 100% für nano-modifizierte Verbunde dargestellt werden [5,6]. Weiterhin wirken die Partikel als physische Hindernisse für einen wachsenden Riss, sodass das Risswachstum entweder gänzlich gestoppt oder auf Grund einer Rissumlenkung deutlich verlangsamt wird [7,8]. Dabei sind bei entsprechender Oberflächenvorbehandlung der Partikel kaum Einbußen hinsichtlich der Fließfähigkeit der Harze bei der Verarbeitung zu verzeichnen. All diese positiven Effekte konnten jedoch bislang nur unter Laborbedingungen dokumentiert werden. Im Rahmen des beantragten Projekts ist die Fragestellung zu klären, wie sich die verbesserten mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffsysteme von der Laborphase auf praxisrelevante Fertigungs- und Anwendungsbedingungen für WEA übertragen lassen. Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist es, den Mehrwert dieser Werkstofftechnologien für die industrielle Anwendung in der WEA-Branche im Vergleich zu derzeit etablierten Werkstoffen zu belegen. Vor diesem Hintergrund ist die komplette Entwicklungskette vom Halbzeug über die Herstellung und Prüfung des Werkstoffs bis zur Großkomponentenfertigung und -prüfung zu betrachten und zu bewerten. Die nanomodifizierten Werkstoffsysteme teilen sich in die Technologien der glasfaserverstärkten Kunststoffe und der Klebstoffe auf. Die nanomodifizierten Faserkunststoffverbunde (FKV) sollen in der Hauptform des Rotorblattes eingesetzt werden, wohingegen die modifizierten Klebstoffe zum Fügen von Strukturkomponenten im Rotorblatt dienen. Beide Werkstoffsysteme erlauben Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften, was mit einer effizienteren Materialausnutzung bzw. einer Gewichts- und Kostenreduktion von Rotorblättern einhergeht. Für die industrielle Anwendung der nanomodifizierten Werkstoffe sind in beiden Fällen jedoch Fragestellungen bezüglich der Fertigung und des Einsatzes unter realistischen Umgebungsbedingungen zu beantworten. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf die Skalierbarkeit der Dispergiertechnologie gelegt, um industrierelevante Großmengen der nanomodifizierten Harze herstellen zu können (ZEISBERG, DLR). Ebenso

 <b>INVENT</b>	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
---	--	--

sind Fragestellungen nach dem Einfluss von Umweltparametern auf die Dispersionsstabilität und die Permeabilität von Halbzeugen bei langen Fließwegen zu betrachten (DLR, INVENT). Für die hybriden Materialsysteme – GFK/Edelstahl-Laminate ist andererseits zu klären, wie sich die exzellenten Werkstoffkennwerte auf Couponebene (LENAH) in die industrielle Anwendung übertragen lassen. Verschiedene Untersuchungen belegen, dass eine Hybridisierung von Kunststoffverbunden mit Titan- oder Edelstahleinlagen eine signifikante Steigerung der statischen Festigkeiten im Vergleich zu reinen FKV-Laminaten ermöglicht. Die mechanischen Eigenschaften des Hybridlaminats werden dabei maßgeblich durch den Laminataufbau, den Metallgehalt sowie die Metallfestigkeit beeinflusst, wobei auch die Vorbehandlung der Metalleinlagen zur Steigerung der Matrix-Metall-Anbindung wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Hybridlaminats hat. [21-27]

Dabei sind vor allem effiziente Oberflächenvorbehandlungsschritte zu entwickeln, die eine gewisse Standzeitunempfindlichkeit des metallischen Halbzeugs erzeugen (DLR). Des Weiteren werden Fertigungsprozesse für GFK/Edelstahl Laminate (IWES, INVENT) entwickelt, um die industrielle Fertigung neuartiger und leistungsfähiger Rotorblätter prozesssicher zu gestalten.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt HANNAH wurde weitestgehend in guter Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern durchgeführt. Durch die branchenübergreifenden Fachkompetenzen der Projektpartner konnten alle Aufgaben mittels einer projektinternen Verteilung bearbeitet werden. Für INVENT war somit eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen nicht notwendig.

## 2 Eingehende Darstellung

Beide Materialkonzepte (Nano & FML) sollen die Ermüdungsfestigkeit von Rotorblattstrukturen erhöhen, sowie zu einer effizienteren Materialausnutzung beitragen. Zu Beginn der Arbeiten wurden dafür die Anforderungen im Konsortium definiert sowie das Anbindungskonzept herausgearbeitet, da dort das größte Potenzial liegt.

### TAP: 1.5

Für die Experimentelle Untersuchung und Bewertung der besonderen Herausforderungen, die sich in der Verarbeitung von nanomodifizierten Harzsystemen im industriellen Maßstab ergeben, wurden zunächst fertigungstechnische Aspekte der Herstellung mit den Partnern gesammelt und bewertet. Hieraus wurden geeignete Verarbeitungsempfehlungen abgeleitet, um deren Verwendung mittels Fertigungsversuchen zu prüfen (siehe TAP: 1.7). Die

Prozessparameter der durchgeführten Fertigungsversuch wurden detailliert erfasst und bilden Rotorblätter hinsichtlich eingebrachter Lasten und Kraftverläufe, besonders im Wurzelblattbereich zu analysieren die Grundlage der Verfahrensanweisung zur Verarbeitung von Dispersionsharzen.

### TAP: 1.6 und TAP: 5.7

Um ein Konzept für ermüdungssarme Rotorblattkomponenten zu entwickeln, waren in einem ersten Schritt bestehende Rotorblätter hinsichtlich eingebrachter Lasten und Kraftverläufe, besonders im Wurzelblattbereich, zu analysieren. Dazu wurde vom Projektpartner TECOSIM und IWES ein öffentlich zugängliches FEM-Modell eines Rotorblatts zur Verfügung gestellt. Auf dieses wurden repräsentative Windlasten von INVENT appliziert, um ein tieferes Verständnis des Verformungsverhaltens zu erlangen (Abbildung 2). Da sich aus der linearen Analyse an der Blattspitze große Verschiebungen von bis zu 21 m ergeben haben, wurde zusätzlich eine nichtlineare Analyse durchgeführt. Ein Vergleich der nichtlinearen zur üblichen linearen Analyse hat nur geringe Unterschiede gezeigt und es wurde folglich linear analysiert.

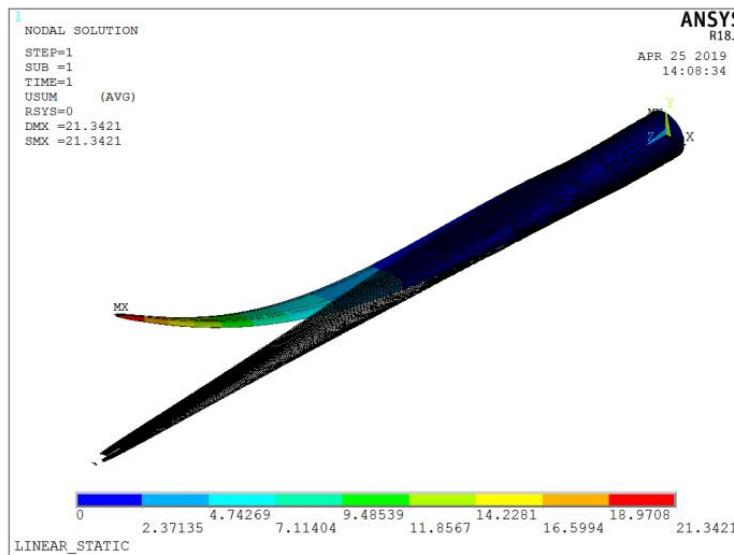


Abbildung 2: Applizierung repräsentativer Windlasten im FE-Modell

Nach der Analyse des gegebenen FE-Modells wurde ausgehend davon sowie unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik ein geometrisches CAD-Modell eines einzelnen Segmentes des Blattwurzelbereiches erstellt (Abbildung 3). Es wurden zwei Anbindungskonzepte der Blattwurzel an die Nabe herausgearbeitet, um die jeweiligen Vorzüge der beiden Materialsysteme des Projektes hervorzuheben:

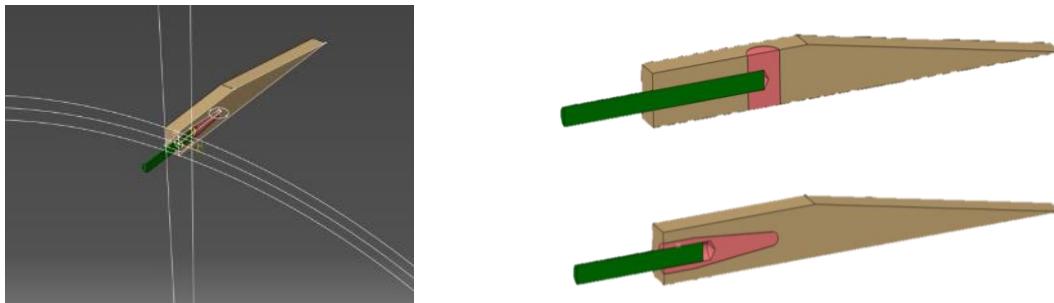


Abbildung 3: CAD-Modell des Blattwurzelsegmentes in zwei Ausführungen: inkl. Insert (rechtsunten) und inkl. Bolzen mit Quergewinde (rechtsoben)

1. Einsatz eines Bolzens, der senkrecht zur Längsachse ein durchgehendes Gewinde zur Verschraubung besitzt. Aufgrund der erhöhten Lochleibungskräfte ist dieser Lösungsansatz interessant für den Einsatz der GFK-Metall-Hybride.
2. Ein eingeklebtes Insert mit eingebrachtem Gewinde parallel zur Längsachse. Diese faserverbundgerechte Designvariante kann durch den Einsatz nanoverstärkter Materialien ermüdungssärmer ausgeführt werden.

Anzahl und Dimension der Anbindungspunkte zwischen Rotorblatt und Nabe sind dem FE-Modell und der Literatur entnommen. Nach der Finalisierung der CAD-Modelle wurden sie von INVENT hinsichtlich der zuvor ermittelten Lasten analysiert, ersichtlich in Abbildung 4 und Abbildung 5. Auf Grundlage dieser Analysen ist es möglich, Fertigungskonzepte zu entwickeln. Durch die dargestellten Bereiche hoher Belastungen können gezielt Verstärkungsmaßnahmen eingeführt werden.

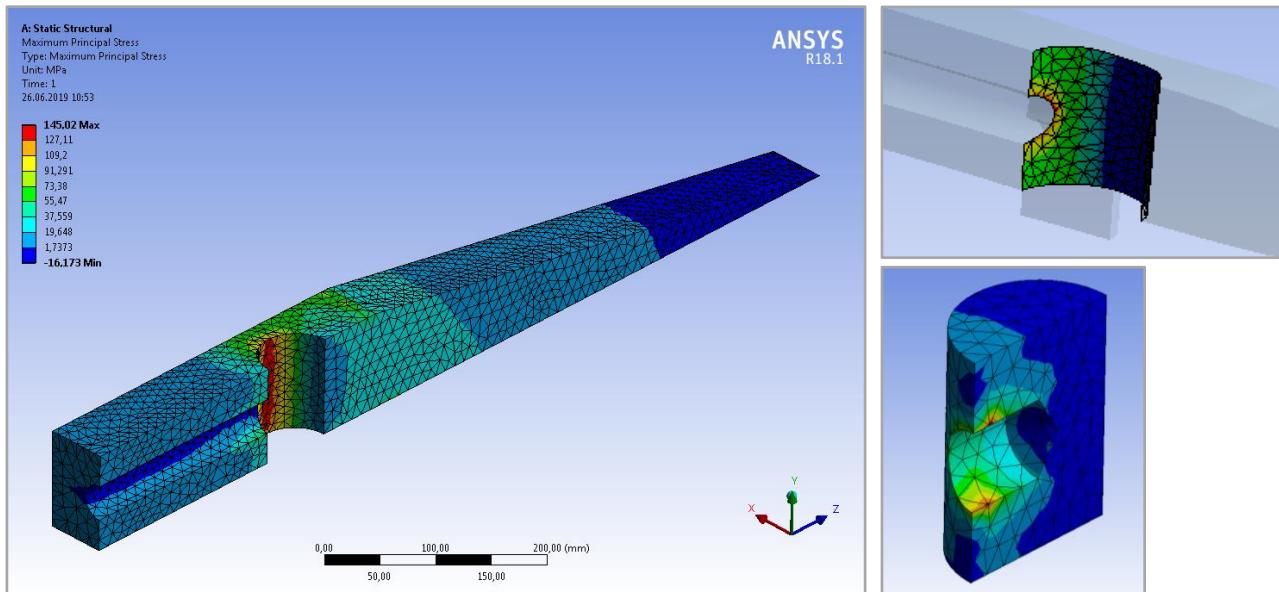


Abbildung 4: FE-Analyse Querbolzen-Variante

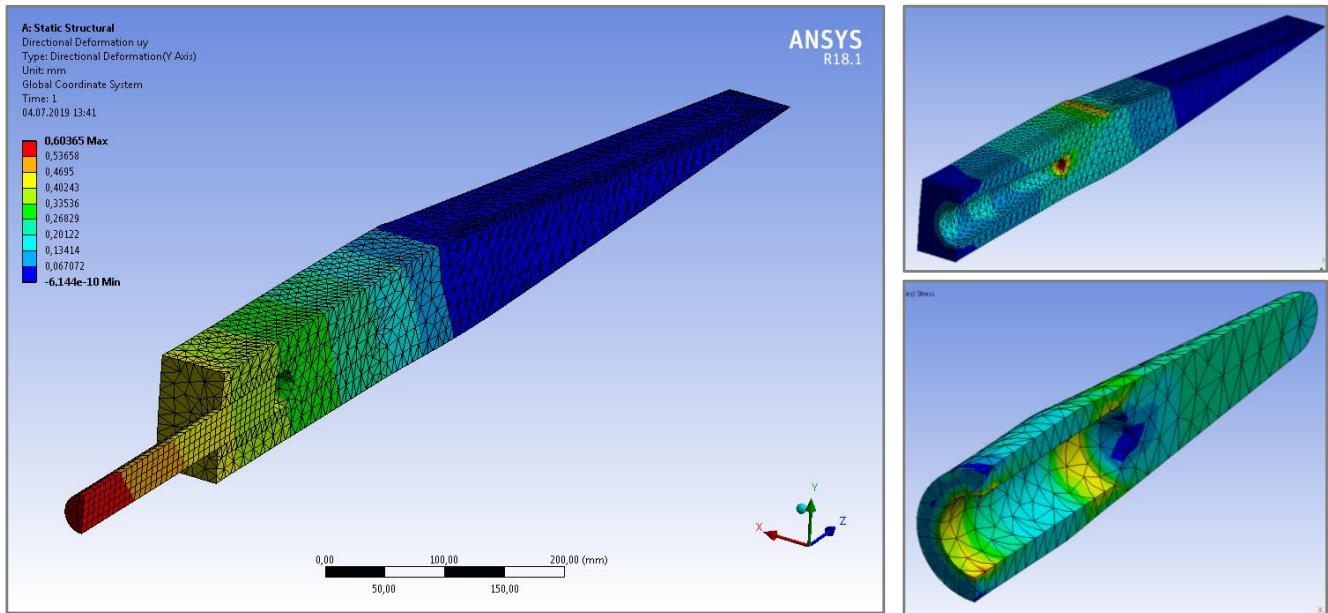


Abbildung 5: FE-Analyse Insert-Variante

Bei der Ausarbeitung dieser Konzepte spielten diverse Faktoren wie:

- Segmentierung (um eine Modulbauweise darzustellen)
- Bauraum (die Fertigung soll mit hausinternen Kapazitäten möglich sein) und
- Festigkeit (bekannte Lastfälle müssen schadensfrei eingeleitet werden können)

eine Rolle.

Der bestehende Bauraum des vorliegenden öffentlich zugänglichen Rotorblattes wurde dabei analysiert und daraus folgende Einschränkungen mitberücksichtigt. Auf der Basis dieser Randbedingungen wurden für beide Materialsysteme (metall- sowie nanoverstärkt) je ein finales Konzept ermittelt und konstruktiv ausgearbeitet. Beide Konzepte beruhen auf den gleichen Grundabmessungen. Dies hat den Vorteil, dass bei einer späteren Produktentwicklung beide Varianten auf dem gleichen Werkzeugkonzept basieren und somit eine Kostenreduktion hinsichtlich dieser Entwicklung möglich wird.

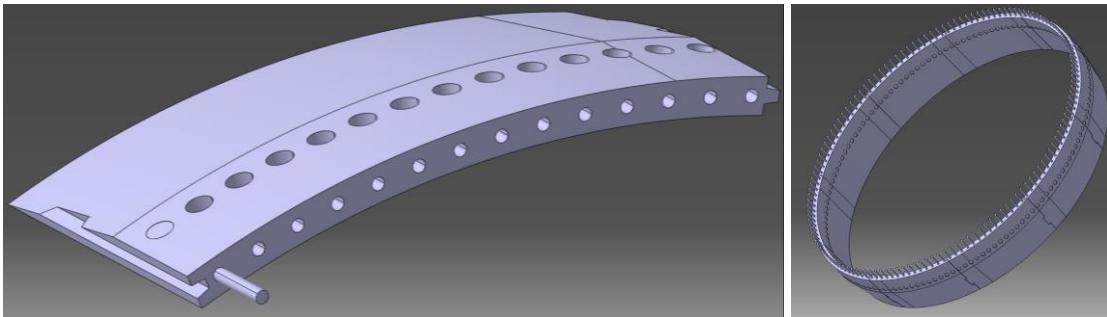


Abbildung 6: Einzelnes Segment der Variante "Querbolzen" und entsprechend aus 10 Segmenten zusammengesetzter Vollkreis

In Abbildung 6 ist das finale Konzept „Querbolzen“ ersichtlich, welches für die hybride Materialkombination mit metallischen Einlegern verwendet wird. In Abbildung 7 ist das finale Konzept „Insert“ ersichtlich, welches für die Materialkombination des nanoverstärkten Harzsystems verwendet wird. Beide CAD-Modelle wurden dem Projektpartner TECOSIM zur Verfügung gestellt, um eine numerische Analyse durchzuführen, woraus eine Optimierung des Konzeptes ermöglicht wird.

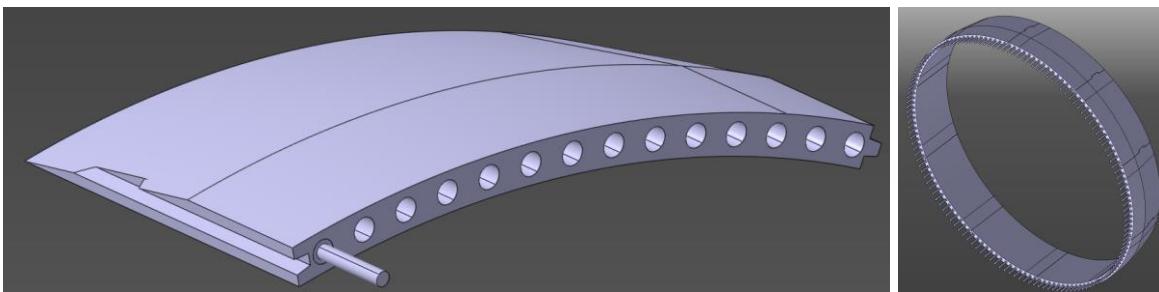


Abbildung 7: Einzelnes Segment der Variante "Insert" und entsprechend aus 10 Segmenten zusammengesetzter Vollkreis

### TAP: 1.7

TAP 1.7 bearbeitet die Entwicklung des Fertigungsprozesses für nanomodifizierte Harzsysteme unter den Randbedingungen der Rotorblattfertigung. Durch den Projektpartner ZEISBERG wurden zu Beginn eine geringe Versuchsmenge an Dispersionsharz bereitgestellt, so dass mit einem ersten Fertigungsversuch begonnen werden konnte. Untersucht wurde eine initiale Konfiguration mit 8 Lagen Triaxial-Glasgelege. Dieses Gelege wird häufig bei dicken Wandstärken in der Rotorblattfertigung verwendet. Das angelieferte Dispersionsharz war jedoch hochviskos, wodurch die Infusion langsam ablief und letztendlich abgebrochen werden musste. Nach ca. 30 min. erfolgte ein Stillstand der Fließfront bei ca. 1/5 der Längsrichtung

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

des Aufbaus. In Z-Richtung hat sich bis auf einen initialen Bereich kein Harzfluss ergeben, nur innerhalb der oberflächlich aufgelegten Fließhilfe kam ein Harzfluss zustande (Abbildung 8).



Abbildung 8: Abgebrochener erster Infusionsversuch mit Nanodispersion

Die Erfahrungswerte aus diesem Versuch wurden dem Projektkonsortium zurückgegeben und auch bestätigt. Eine detaillierte Analyse der Dispersion hinsichtlich der Homogenität der nano-Partikel, sowie rheologische Untersuchungen wurden daraufhin vorgeschlagen, um gegebenenfalls ein neues Dispersionsharz durch die Projektpartner umzusetzen.

Innerhalb eines zweiten Fertigungsversuches wurde eine Nanodispersion vom Projektpartner DLR verarbeitet. Es wurde erneut eine Konfiguration mit 8 Lagen Triaxial-Glasgelege untersucht, um eine Vergleichbarkeit mit dem initialen Fertigungsversuch herzustellen. Aufgrund des erneut hochviskosen Verhaltens dieses neuen Materials, musste durch die langsame Infusion der Versuch abgebrochen werden. Nach ca. 15 min. erfolgte ein Stillstand der Fließfront bei ca. der Hälfte der Längsrichtung des Aufbaus. In Z-Richtung hat sich bis auf einen initialen Bereich kein Harzfluss ergeben, nur innerhalb der oberflächlich aufgelegten Fließhilfe kam ein Harzfluss zustande (Abbildung 9)

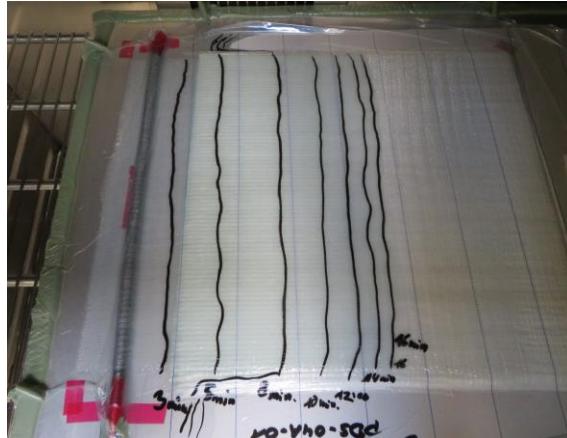


Abbildung 9: Infusionsversuch Nanodispersion des DLR mit Stillstand des Harzsystems nach 15 min.

Mit den im weiteren Projektverlauf ermittelten Erfahrungswerten und Analysen stellte der Projektpartner Zeisberg eine verbesserte Charge des Nanodispersionsharzes bereit, die optimierte Infusionseigenschaften aufweist. Mit dieser Charge ist es INVENT gelungen, einen Fertigungsversuch unter industrienahen Bedingungen durchzuführen, der eine porenfreie Platte als Ergebnis hatte (Abbildung 10). Die Infusionsdauer war annehmbar, bot jedoch Risiken besonders im Hinblick auf die zu erreichen Zieldicken. Infolgedessen wurde ein geeigneteres Basisharzsystem gewählt, um die Anfangsviskosität weiter zu senken.

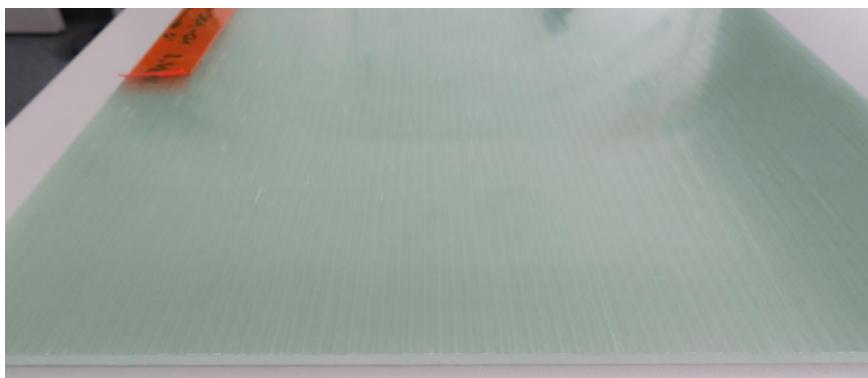


Abbildung 10: Erfolgreicher Infusionsversuch eines 10 mm dicken GFK-Laminates mit Nanodispersion

Im weiteren Vorgehen wurde dieses vom Projektpartner Zeisberg modifiziert und zur Herstellung einer 10 mm starken Laminatplatte durch INVENT verarbeitet. Entgegen den Erwartungen konnte mit der Partikel-Harz-Kombination von RIMR035c mit einem Böhmitpartikelgehalt von ca. 10 %, aufgrund einer zu hohen Mischviskosität von 250 – 300 mPas, keine vollständige Tränkung realisiert werden (Abbildung 11)

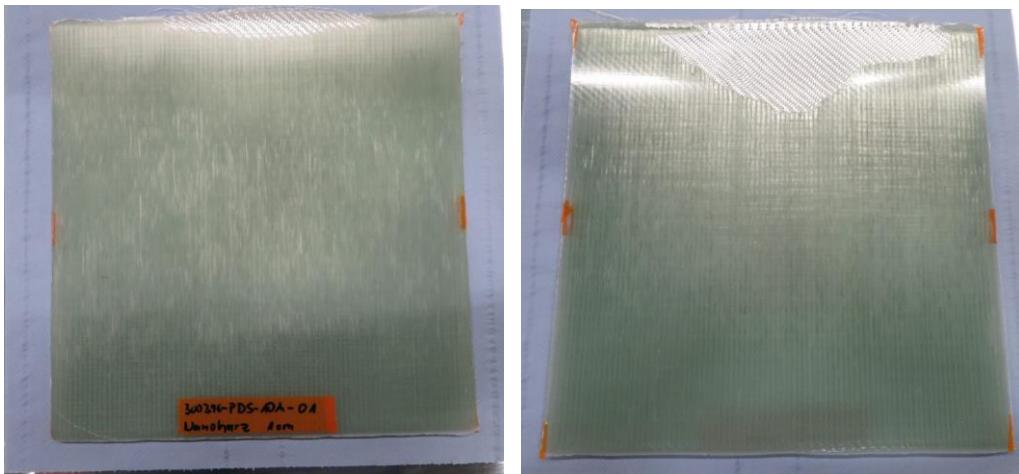


Abbildung 11: Unvollständige Tränkung eines 10 mm starken Glaslaminats mit nanomodifiziertem Harzsystem RIMR035c

Zusammen mit dem Projektpartner Zeisberg und dem DLR wurde ein weiteres nanomodifiziertes Harzsystem identifiziert. Es fand ein Wechsel auf das alternative Basisharzsystem HP-E3000GL statt, welches laut Datenblatt als EP-Harzsystem mit GL-Zulassung eine Mischviskosität von etwa 100 mPas aufweist. Der Partikelfüllgrad wurde auf Grund der Erkenntnisse zu den erforderlichen mechanischen Eigenschaften auf 15% angehoben. Zur Prüfung von Viskosität sowie Reaktivität des Systems wurden rheologische Untersuchungen bei Raumtemperatur, 40°C und 50°C am DLR veranlasst. Für alle drei Temperaturniveaus lag die Initialviskosität über 500 mPas. Dieser Wert stellt die Grenzviskosität dar, bis zu der eine Infusion theoretisch möglich ist (Abbildung 12).

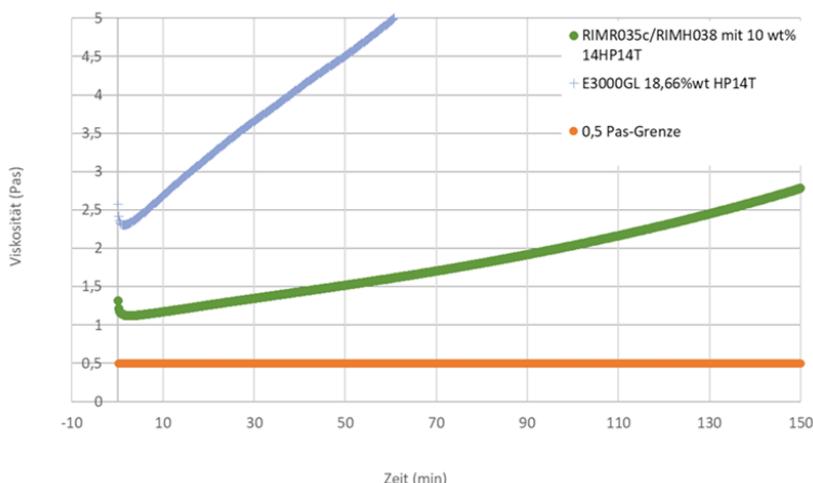


Abbildung 12: Viskositätsverläufe der nanomodifizierten Harzsysteme bei RT

 <b>INVENT</b>	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
---	--	--

Im Vergleich zum ersten nanomodifizierten Harzsystem trat keine Verbesserung hinsichtlich der Viskosität auf. Zudem zeigte sich bei höherem Partikelgehalt eine erhöhte Reaktivität und damit eine kürzere Topfzeit. Infolgedessen werden zukünftige Arbeiten mit dem Erstsystem RIMR035c durchgeführt und Anpassungen hinsichtlich der Fertigungsstrategie vorgenommen, um die möglichen Grenzen der Fertigbarkeit zu bestimmen.

Die Auswertung der gefertigten Testplatten sowie die beim DLR charakterisierten Systeme zeigten, dass für die industrielle Verarbeitung eine kontinuierliche Bereitstellung sowie angepasste thermische Vorbehandlung zwingend erforderlich ist. Kritisch gesehen wurde außerdem die geringe Lagerstabilität sowie unbeständige Mischgüte des nanomodifizierten Harzsystems. Folglich wurde im weiteren Vorgehen (TAP: 1.8) Maßnahmen zur Qualitäts- und Prozesssicherung forciert, da die hohe Viskosität der bisherigen Harzsysteme eine Skalierung nur schwer zuließ.

Parallel zur Verarbeitbarkeit wurden durch die Projektpartner die mechanischen Eigenschaften hinsichtlich der Dauerfestigkeit von Faserverbunden mit den modifizierten Harzsystemen untersucht. Hierbei zeigte sich keine signifikante Verbesserung gegenüber dem reinen Basisharzsystem.

### **TAP: 1.8**

Für den Qualitäts- und Prozesssicherungsplan der nanomodifizierten Harzsysteme wurde unter folgendes Vorgehen festgehalten:

- Spezifikation zum Umgang und Lagerung der nanomodifizierten Harzsysteme
  - o Sicherheitsunterweisungen
  - o Lagerstabilität: Tiefgekühlt bei -18°C für mehrere Monate
- Identifikation von Prozessparametern
  - o Vor der Fertigung bzgl.:
    - Bildung von Agglomeraten oder Entmischung ausschließen
    - Harz-Härter-System anrühren
    - Entgasen
  - o Während der Fertigung bzgl.
    - Tränkungsfortschritt (Viskosität, Reaktivität)
    - Verteilung der Partikel (Konzentration, Mischgüte, Auswaschen)
  - o Nachbearbeitung
- Konfiguration von Probekörper hinsichtlich notwendiger und sinnvoller mechanischer oder nicht zerstörender Prüfungen

In einem ersten Arbeitsschritt wurden mögliche Sensoriken und Messmittel recherchiert und auf ihre Eignung zur Beschreibung von Bauteilqualität und Prozesseigenschaft hin geprüft. Grundlage der Konzepterstellung bildete dabei die Korrelationsübersicht von Bauteilkriterien und Prozessmesstechnik aus dem Forschungsvorhaben iFeZ (FKZ 20W1521E) [18]. Die Zustandsüberwachung an Faserverbundbauteilen sollte dabei bereits während der Fertigung kontinuierlich erfolgen und in unzugänglichen Bereichen (z.B. auch im Autoklav) möglich sein. Aus industrieller Sicht sind weiterhin die Kriterien robuste Messung, einfache Bedienung und Kosten zu berücksichtigen. Ein besonderes Augenmerk lag in der einfachen Feststellung und Bewertung des Tränkungszustandes – vor allem für große Strukturen – sowie der Temperatur als kritischste Größe in Bezug auf das Materialverhalten nach TAP: 1.7. Das lokale Einbringen sowie die partielle Auflösung der Sensorsysteme, deren technische Beschränkungen sowie das erforderliche Expertenwissen der Sensorsysteme des Forschungsvorhaben iFeZ stellten hierbei keine passende Lösung dar. Fiber Bragg oder DEA (Dielektrische Analysatoren) benötigen direkten Kontakt zum Bauteil und liefern vorrangig lokal aufgelöste Informationen zum Harzzustand. Ultraschall-Lösungen stoßen auf Grund der hohen Dämpfung der Materialien in Kombination mit den Bauteilabmessungen an ihre Grenzen.

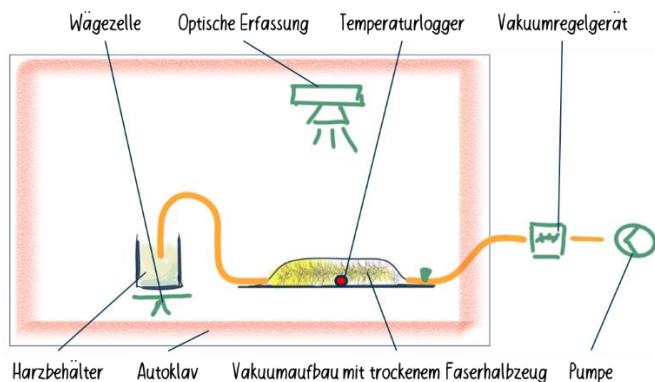


Abbildung 13: Messmittel (oben) des Prozesssicherungskonzept im Fertigungsumfeld (unten)

Folglich wurde eine Prozesszustandserfassung mit alternativen Messmitteln nach Abbildung 13: Messmittel (oben) des Prozesssicherungskonzept im Fertigungsumfeld (unten) geplant und umgesetzt. Tabelle 1 benennt die dem Messmittel zugeordneten Aufgaben.

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

Messmittel	Aufgabe
Waage	Ermittlung des globalen Tränkungsfortschrittes über das Wiegen der Harzmenge am Vorratsbehälter sowie am Bauteil
Temperaturlogger	Erfassung der Temperatur am Bauteil und Formwerkzeug
Vakuumregelgerät	Erfassung und definierte Vorgabe des maximalen und geregelt anliegenden Druckgradienten am Bauteil
Kamera	Optische Erfassung des Harzflussbildes auf der Bauteiloberseite

Tabelle 1: Messmittel und deren Aufgabe

Für die Waage stand auf Grund der gegebenen Anforderungen keine adäquate Kauflösung zur Verfügung, so dass hierfür eine Eigenentwicklung umgesetzt wurde (Abbildung 14). Diese basiert auf einer Wägezelle, welche über einen A/D-Wandler am RaspberryPi angeschlossen ist. Die Erfassung erfolgt kontinuierlich mit Hilfe eines in Python umgesetzten Messprogrammes. Dies ermöglicht außerdem eine individuelle Tarierung, Kalibrierung und Temperaturkompensation unter Berücksichtigung der jeweiligen Fertigungsrandbedingungen. Im Zuge der Inbetriebnahme wurden Kontrollmessungen mit verschiedenen Prüfgewichten der Genauigkeitsklasse OIML F2 (Feingewicht) durchgeführt, die Messgenauigkeit sowie den Einfluss von Temperatur und Messdauer zu prüfen. Die gemessenen Gewichtswerte entsprachen den Sollgewichten. Für ein 1kg-Prüfgewicht wurde über einen Messzeitraum von 3000s eine Mittelwertabweichung am gemessenen Gewichtswert von 0,23g festgestellt. Eine Kompensation hinsichtlich Temperatur oder längerer Messzeit ist daher vorerst nicht vorzusehen. Für die Qualitäts- und Prozesssicherung wurde das Waagen-Konzept um die Randbedingungen der durchgeführten Fertigungsversuche erweitert und angepasst. Hierzu zählen die Traglasterhöhung der Wägezelle, um das kontinuierliche Rühren im Harzbehälter sowie deren aktive Temperierung sicherzustellen. Außerdem wurde eine weitere Wägezelle für den Fertigungsaufbau selbst und deren Implementierung in die kontinuierliche Erfassung beider Wägezellen umgesetzt. Die Datenerfassung wurde um die automatische Auswertung der Gewichtsänderung erweitert, sowie erste Möglichkeiten zur Echtzeit-Visualisierung der Messergebnisse recherchiert. Die Prozesszustandserfassung wurde in den folgenden TAP eingesetzt und weiterentwickelt. Die während der Fertigung erfassten Daten, konnten erfolgreich in einem Qualität- und Sicherungsplan gesammelt werden, um die anspruchsvolle Herstellung von GFK mit modifizierten Harzsystemen zu gewährleisten.

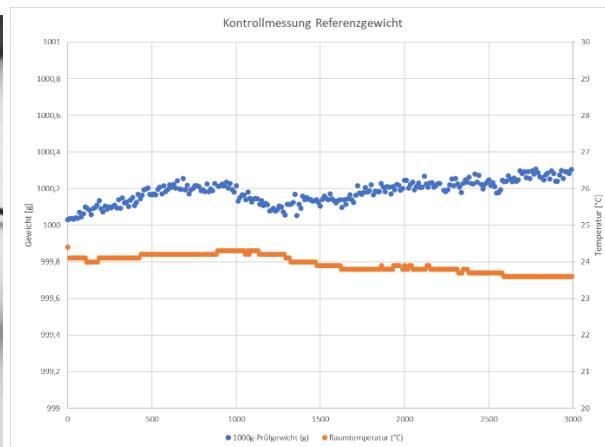
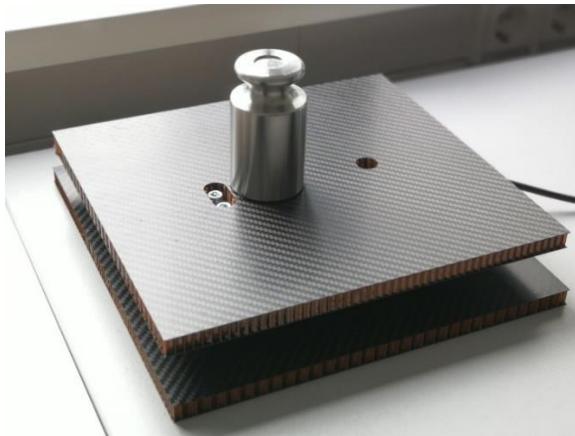


Abbildung 14: Plattformwaage mit Prüfgewicht und montierter Wägezelle (links); Datenerfassung zur Referenzmessung mit 1000g-Prüfgewicht inkl. Temperatur (rechts)

### TAP: 1.9

Für die Überprüfung der erarbeiteten QS-Maßnahmen nach TAP 1.8 und gefertigten Probenkörper nach TAP 1.7 wird in TAP 1.9 das bei INVENT bereits in Serie angewandte NDT-Verfahren auf Basis der Ultraschall-Prüfung herangezogen. Die Ergebnisse dienen der Evaluierung der Bauteilqualität innerhalb des definierten Prozesssicherungskonzept, so dass eine qualitative Bewertung der Tränkung hinsichtlich Fehlstellenidentifikation und Bauteilgüte erfolgen kann.

Auf Grund der hohen Dämpfungseigenschaften der Glasfaser in Kombination mit der gestiegenen Dicke des Demonstrators konnten hierbei keine verlässlichen Aussagen zur Bauteilqualität getroffen werden. Bekannt ist, dass weitere NDT-Technologien in der Windkraftindustrie für dickwandige Bauteile zu Verfügung stehen, die im Kontext der Nanomodifikation jedoch nicht weiterverfolgt wurden.

Als alternative Maßnahme zur qualitativen Bewertung der Tränkung hinsichtlich Fehlstellenidentifikation und Bauteilgüte wurde mit dem DLR die Möglichkeit zur Korrelation von Tränkungsversuch und Fließsimulation besprochen. Ziel sollte es hierbei sein, Füllzeiten und Volumenströme sowie die 3D-Visualisierung der Fließfront bzw. mögliche Zusammenflüsse und damit Einschlüsse im Laminat simulativ zu bestimmen und mit den Realwerten abzugleichen. Die in den Versuchen von INVENT verwendeten Parameter und ermittelten Daten wurden dem DLR als Eingangsgröße (Spezifikation) und Messergebnisse der Demonstratorfertigung aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Die Abbildung der Tränkung mittels FE-Simulation auf Basis RTM-Worx ist möglich und wurde durch das DLR für die Bestimmung der Lochmuster (TAP: 5.8) bereits eingesetzt. Innerhalb der Projektlaufzeit war es dem DLR jedoch nicht mehr möglich die finalen Berechnungen mit den INVENT-Daten

durchzuführen, so dass eine Korrelation zwischen erfassten Daten der Messmittel und der Simulationen nicht stattfinden konnte. Seitens INVENT wird jedoch beim Einsatz von Prozesssimulationen auf Basis realer Messdaten ein großes Potential gesehen, so dass auch nach Projektende auf diesem Gebiet weitere Anstrengungen unternommen werden. Gegenüber bekannten NDT-Messverfahren stellt dies eine einfache, kostengünstige und ausreichend genaue Variante dar, um besonders bei großen und komplexeren Strukturen einen ersten Blick ins Bauteil zu bekommen. Erst in einem zweiten Schritt, wenn Auffälligkeiten oder Abweichungen auftreten, kann lokal nachgeprüft werden.

Darüber hinaus hat die Evaluierung der verfügbaren Prüfverfahren ergeben, dass folgende mechanischen Untersuchungen relevant sind:

- Interlaminare Scherfestigkeit (ILSS)
- Biegeprüfung
- Zugprüfung

Um den Randbedingungen der Qualitätssicherung des Harzsystems gerecht zu werden, erfolgte im TAP 1.9 die Prüfung der Materialbereitstellung und -verarbeitung mittels Speedmixer. Neben der Abbildung eines industrienahen Prozesses sollte die minimal notwendige Mischdauer unter der Prämisse: niedrige Anfangsviskosität und lange Offenzeit des Mischansatzes bestimmt werden. Hierzu wurden 500g Reinharz mit Farbpartikeln versetzt und die Durchmischung beurteilt. In einer zweiten Stufe wurde dem System der farblich modifizierte Härter zugegeben. Die optische Auswertung der Mischreihen zeigte, dass nach 30s eine ausreichend homogene Masse vorlag.



Abbildung 15: Untersuchung zur Verarbeitung nanomodifizierter Harzsysteme mittels Speedmixer:  
Bestimmung von Mischdauer und -güte sowie Reaktivität

Das Einbringen zusätzlicher Energie beim Mischen sowie die Reaktivität des Gemisches wurde über das Aufzeichnen der Probentemperaturen überwacht. Für die Prüfung der Mischgüte wurden mögliche Verfahren und Messgeräte recherchiert und deren Eignung in Zusammenarbeit mit dem DLR besprochen. Hierbei stellte sich heraus, dass während des

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

Anmischens keine (kontinuierliche) Messung erfolgen kann. Lediglich die Probenentnahme und parallele Messung mit Hilfe einer Scheibenzentrifuge oder eines Laborrefraktometer stehen zur Verfügung. Ersteres beruht auf der Partikelgrößenbestimmung, letzteres auf der Messung des Brechungsindexes im Verhältnis zum nicht modifizierten System. Beide können jedoch keine gesicherte Aussage zur Mischgüte – also der Verteilung im Harzsystem treffen. Lediglich die Konzentration, also der Anteil an Partikeln pro Probe kann identifiziert werden. Die Bestimmung für den Verbund im Nachgang kann mittels Elektrodenmikroskopie erfolgen. Für die Veraschung ist ein Reinharzbereich ohne Faserhalbzeug erforderlich. Im Zuge der industriellen Anwendung wurde die Prüfung der Mischung über Dichtemessungen durchgeführt. Gegenüber dem Referenzsystem konnten jedoch keine Abweichungen für die unterschiedlich lang angerührten Proben festgestellt werden.

### **TAP: 1.10**

Für die strukturelle Integration der nanomodifizierten Halbzeuge in TAP 1.10 wurde die Anwendung der Methodiken auf eine skalierte Struktur unter realitätsnahen Fertigungsrandbedingungen übertragen und angewendet. Aus den gesammelten Ergebnissen (TAP 1.7 – 1.9) war es in diesem Zusammenhang erforderlich, die thermischen Randbedingungen sowie das thermische Verhalten von Formwerkzeug und Aufbau zu berücksichtigen. Hier herrscht eine Vielfalt an Möglichkeiten bezüglich Material, Geometrie und Fertigungstechnologie.

Ziel ist es, den thermalen Zustand hinsichtlich erforderlicher Energie, Aufheizzeiten sowie Temperaturverteilung im Bauteil zu beschreiben und daraus den Aufbau zur Prozessgestaltung zu optimieren und die Technologiewahl zu erleichtern.

Für eine angepasste Prozessgestaltung und Technologiewahl wurde daher ein 3-stufiges Vorgehen (analytisch, numerisch: 2D, 3D) erarbeitet, um den Zustand hinsichtlich erforderlicher Energie, Aufheizzeiten sowie Temperaturverteilung im Bauteil zu berücksichtigen.

Die parametrisch aufgebaute Thermalsimulation ermöglichte es abschließend, verschiedene Konfigurationen und geometrische Versuchsaufbauten im Vorfeld zu beschreiben – ohne eine vorherige Messung im Ofen durchführen zu müssen. Hierbei wurden die Möglichkeiten des bei INVENT vorhandenen Programmsystems ANSYS verwendet.

Bezogen auf die komplexeren Anwendungsfälle der Demonstratorgeometrien konnte das Thermalverhalten der Faserverbundbauteile beim Herstellungsprozess im Vorfeld vereinfacht simulativ abgebildet werden. Berücksichtigung fand dies z.B. beim effizienten Temperieren: Hier konnte durch das Vorhalten der maximal notwendigen Aufheizzeit auf unnötige

Haltezeiten verzichtet werden, um die Durchwärmung am Bauteil für die anschließende Tränkung sicher zu stellen. Weiterhin konnte auf die aufwendige Ausrüstung der Aufbauten mit Thermoelementen im Inneren verzichtet sowie das Risiko von Undichtigkeiten durch Leitungsführung minimiert werden.

### TAP: 1.11

Die Arbeiten in TAP 1.11 konzentrierten sich auf die Untersuchung und Anwendung der Halbzeugvorbereitung "nanomodifiziertes Harz" im industriellen Maßstab. Nach erfolgreicher Überprüfung der Harzqualität im Speedmixer in TAP 1.9 wurde zur Bestimmung einer möglichen Filterwirkung (Auswaschen von Nanopartikeln am Faserhalbzeug während der Tränkung) die Bauteilhöhe von 90mm als Stufenkeil ausgeführt. Dies ermöglicht Verfahrenskontrollproben in Form von Reinharz auf unterschiedlichen Bauteilhöhen zu integrieren (Abb. 15).

Der umzusetzende Demonstrator mit einer Grundfläche von 300mm x 500mm orientiert sich ebenfalls an den Ergebnissen der erfolgreich durchgeföhrten Fertigungsversuche für den FML-Demonstrator und übernimmt daher die Bauteilmaße und das Tränkungskonzept.

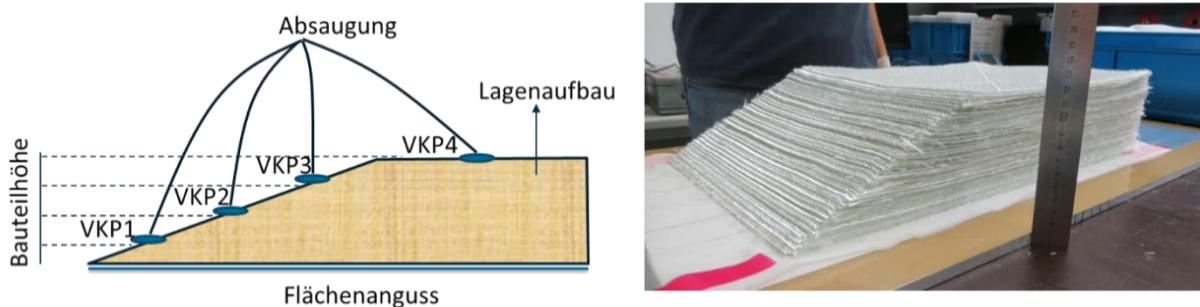


Abbildung 16: Konzept zur Integration von Verfahrenskontrollproben (links); umgesetzter Stufenkeil am Glasfaserpreform (rechts)

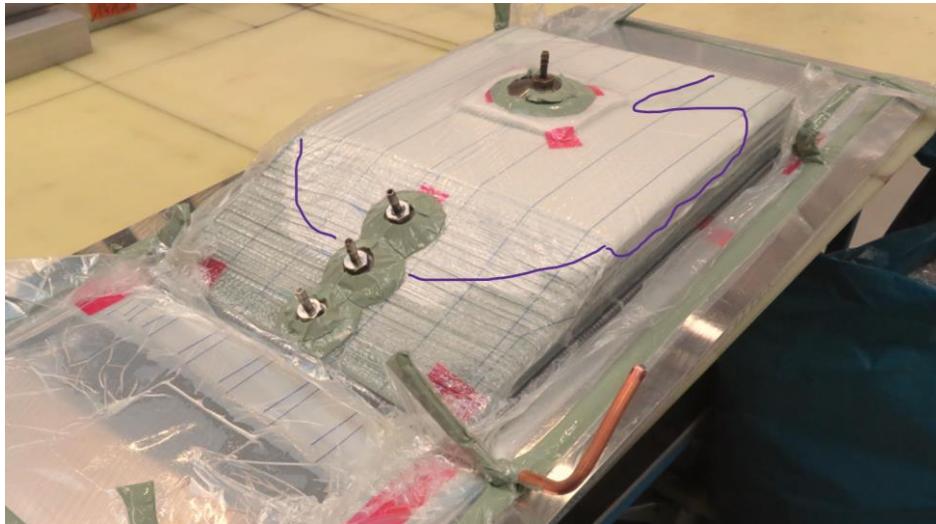


Abbildung 17: finaler Tränkungsfortschritt (lila) für das nanomodifizierte Harzsystem am Stufenkeil

Die Versuchsdurchführung wurde durch die entwickelten Messmittel des Prozesssicherungskonzept im Fertigungsumfeld nach TAP: 1.8 begleitet. Die ausgewerteten Messdaten zum Versuch zeigt Abbildung 18. Während der Verarbeitung wurde eine konstante und ausreichend hohe Temperatur von  $52^{\circ}\text{C} \pm 2\text{K}$  im Versuchsaufbau bereitgestellt. Die thermischen Randbedingungen stellen einerseits die erforderliche niedrige Initialviskosität sicher und verhindern andererseits einen zu schnellen Viskositätsanstieg in Folge von Exothermie. Weiterhin zeigte sich durch den gewählten Ringanguss ein schneller Tränkungsfortschritt zu Versuchsbeginn. Die Temperaturkontrolle im Harzbehälter steigt ab ca. 2000s deutlich über  $60^{\circ}\text{C}$  an, was auf eine exotherme Reaktion schließen lässt. Daraus resultierte ein massiver Viskositätsanstieg im Behälter und ein Vernetzen des Harzes in der Angussleitung. Am horizontal abflachenden Verlauf des Probengewichtes mit einem Gradienten von 7 g/min ist das Erliegen des Füllvorganges abzulesen. Aus der Differenz zwischen geflossener Harzmenge und dem Harz-Sollgewicht ist das Bauteil maximal zu 46% gefüllt. Die Kontrollmessung am ausgehärteten und entformten Bauteil bestätigte diesen Wert. Die Ursachenanalyse hat im Nachgang ergeben, dass eine Vorvernetzung bereits durch das Vorwärmen des nanomodifizierten Reinharzes, ohne Härterzugabe, stattfindet. Aus dem gefertigten Demonstrator konnten zwei Angussstutzen entnommen und dem DLR zur Prüfung einer möglichen Filterung der Nanopartikel durch das Faserhalbzeug zur Verfügung gestellt werden.

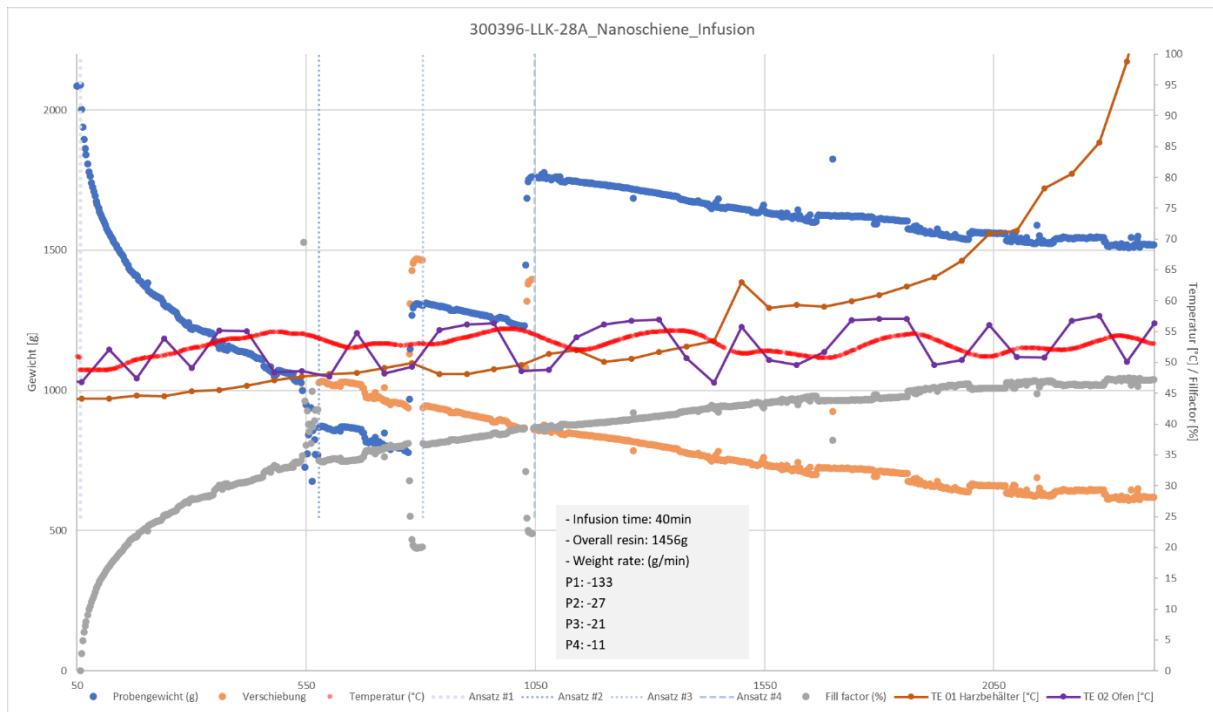


Abbildung 18: Ausgewertete Messdaten zum Fertigungsversuch Infusion Nanoharzsystem auf Basis der umgesetzten Prozess- und Qualitätssicherungsmethoden.

### TAP: 5.8

Innerhalb von AP 5.8 wurden Fertigungsversuche für die hybride Materialklasse mit metallischen Einlegern durchgeführt und die grundlegenden Technologien zur Fertigung erarbeitet. Untersucht wurde, ob und wie schnell großflächige Faser-Metall-Laminate mit Harz infusioniert werden können. Zudem wurde der Einfluss der Laminatdicke betrachtet. Im ersten Durchgang wurden vier verschiedene Konfigurationen von insgesamt 3 bis 15 Lagen untersucht, diese Konfigurationen sind in Abbildung 19 ersichtlich. Aus dieser Versuchsreihe lassen sich verschiedene Punkte schlussfolgern:

- Auf der Unterseite ist das Harz deutlich schneller als auf der Oberseite durch das Material geflossen.
- Durch die metallische Sperrsicht konnte keine Verbindung von unterer zu oberer Seite hergestellt werden. Eine Fließhilfe auf der Oberseite ist somit sinnvoll
- Durch die metallischen Einleger wird der komplette Aufbau schneller durchtränkt als ein Aufbau nur aus Glasfaserlagen
- Die Infusionsdauer ist für eine seriennahe Fertigung deutlich zu lang. Eine Infusion längs der Komponente ist in diesem Aufbau nicht anzustreben

Aufbau	1	2	3	4
				
<b>Faserlagen</b>	2	4	8	8
<b>Metalllagen</b>	1	3	7	0
<b>Dicke theoretisch</b>	2,25 mm	4,75 mm	9,75 mm	8 mm
<b>Breite</b>	305 mm	305 mm	305 mm	305 mm
<b>Länge</b>	1000 mm	1000 mm	1000 mm	1000 mm

Abbildung 19: Fertigungsversuche FML-Hybride (erste Prüfschleife)

In Abbildung 20 sind die Fließfronten der hybriden Aufbauten 2 und 3 sowie dem Referenzaubau 4 nach 56 Minuten gegenübergestellt. Um die Infusionsdauer zu verkürzen, wurde die anschließende Infusionskampagne mittels gelochter Metalleinleger durchgeführt. So kann Harzfluss in Längs- und Dickenrichtung stattfinden und unter Verwendung von Fließhilfen auf der Laminatoberfläche der Fließweg des Harzes im Laminat effektiv verkürzt werden. Es wurden verschiedene Lochbilder bei gleichbleibendem prinzipiellem Lagenaufbau untersucht. In Abbildung 21 ist eine Prinzipdarstellung der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Lochmuster abgebildet.

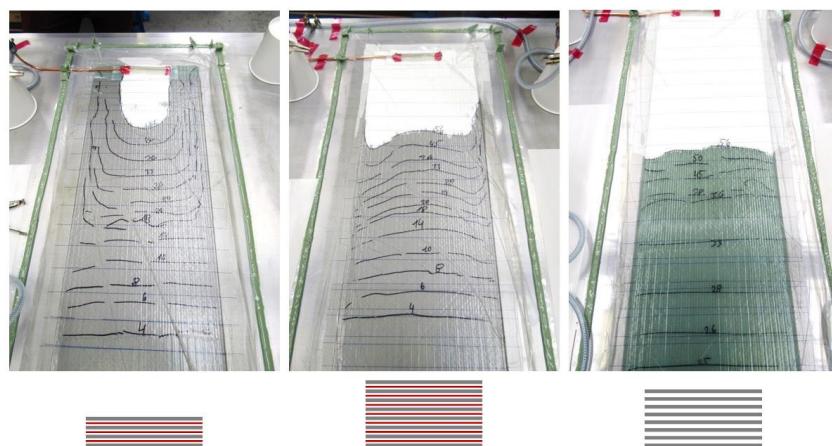


Abbildung 20: Fließfront unterschiedlicher FML-Aufbauten zum gleichen Zeitpunkt

Aufbau	1	2	3	4	5
<b>Metallblech: Lochabstand</b>	5 mm	5 mm	15 mm	25 mm	25 mm
<b>Metallblech: Lochgröße</b>	0,5 mm	1,5 mm	1 mm	0,5 mm	1,5 mm
<b>Faserlagen</b>	8	8	8	8	8
<b>Metalllagen</b>	7	7	7	7	7
<b>Dicke theoretisch</b>	9,75 mm				
<b>Breite</b>	305 mm				
<b>Länge</b>	405 mm				
<b>Geschätzte Harzmenge</b>	0,65 l				

Abbildung 21: Fertigungsversuche FML mit unterschiedlichen Lochmustern.

In Abbildung 22 sind exemplarisch die drei erfolgreichsten Versuchsergebnisse dargestellt, indem hier die Fließfronten von drei unterschiedlichen Konfigurationen nach 10 Minuten aufgeführt sind. Alle drei Konfigurationen haben den gleichen Faser-Metall-Aufbau, jedoch verschiedene Lochbilder. Bei der Konfiguration mit Lochabstand 25 mm und Lochdurchmesser 0,5 mm wurde die kürzeste Infusionsdauer aufgezeichnet. Nach den Infusionsversuchen wurden Schnittbilder der Testplatten erstellt. Abbildung 23 zeigt das Schnittbild der beschriebenen Testplatte mit der kürzesten Infusionsdauer. Es zeigt sich ein homogenes und porenfreies Bild. Aufgrund des Schnittbildes, der kurzen Infusionsdauer sowie der Möglichkeit zur Hochskalierung in Dickenrichtung, wurde dieses Verfahren als ideal für die zukünftigen Tätigkeiten in anschließenden TAPs definiert.

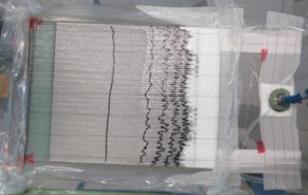
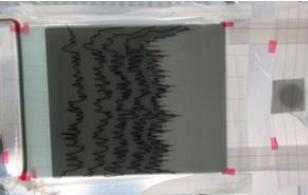
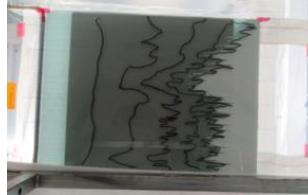
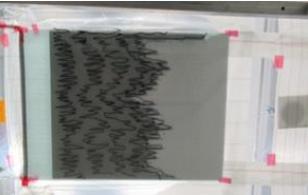
	Lochabstand: 15 mm Lochdurchmesser: 1 mm	Lochabstand: 25 mm Lochdurchmesser: 0,5 mm	Lochabstand: 25 mm Lochdurchmesser: 1,5 mm
Oberseite			
Unterseite			

Abbildung 22: Fließfront der FML mit unterschiedlich perforierten Metallfolien nach 10 min.

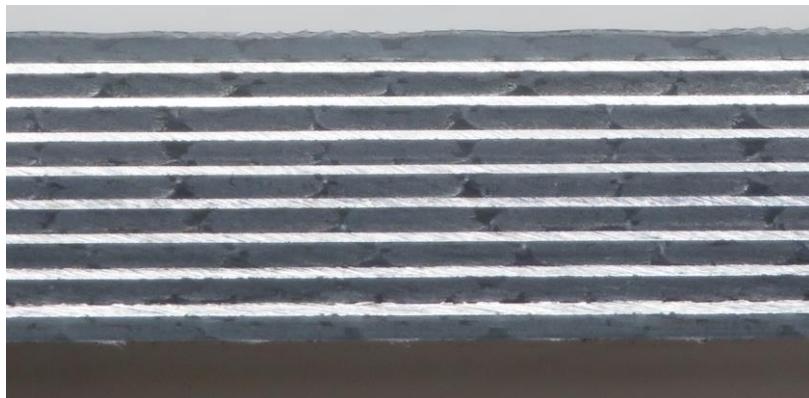


Abbildung 23: Schnittbild der Testplatte mit der kürzesten Infusionsdauer (Lochabstand: 25 mm und Lochdurchmesser: 0,5 mm)

Parallel zu den praktischen Versuchen bei INVENT bildete das DLR die Lochmusterkombinationen über eine Parameterstudie durch die Software RTM-Worx als Fließsimulation ab. Die Ergebnisse spiegelten dabei die gemessenen Fließwege und -zeiten wider. Des Weiteren konnte das über Versuchsreihen identifizierte, optimale Verhältnis von Lochabstand zu Lochdurchmesser für eine prozesssichere, d.h. fehlstellenfreie Tränkung simulativ bestätigt werden (Abbildung 24). Tiefergehende Erkenntnisse die sich aus den Zusammenhängen der Größen von Material und Geometrie sowie der Wechselwirkungen im Prozess ergeben, sind beim Projektpartner DLR nachzulesen.

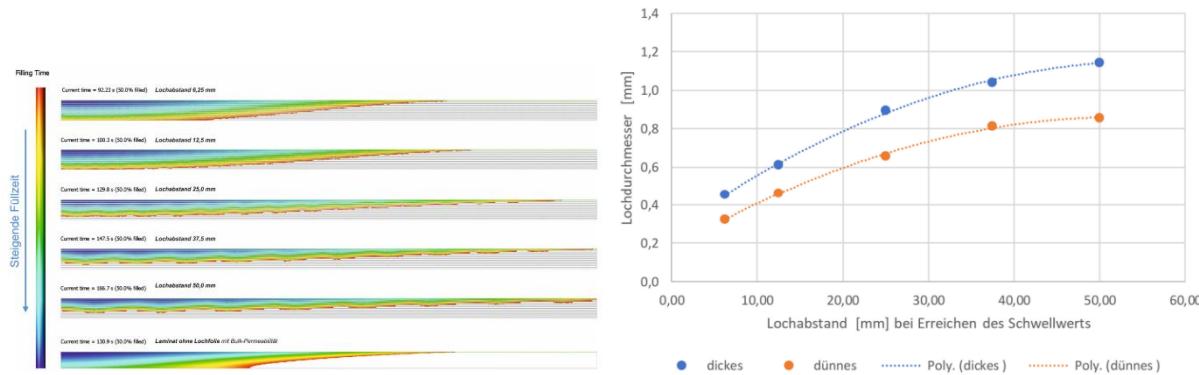


Abbildung 24: Bestätigung der praktischen Versuchsreihen sowie Bestimmung des optimalen Lochdurchmessers über dem Lochabstand mittels Fließsimulation beim Projektpartner DLR

### TAP: 5.9

Innerhalb TAP 5.9 wurden die Randbedingungen einer industriellen Fertigung vertieft untersucht. Im Fokus lag dabei die ganzheitliche Fertigungskette von FML-Komponenten aus Sicht eines industriellen Anwenders. Aus dieser Analyse herausstechende Einflüsse sind:

Kriterium	Ergebnis
Transport	Aus Kapazitätsgründen muss eine Vorlaufzeit von min. 7 Tagen ermöglicht werden
Lagerung	Die Mindesthaltbarkeit imprägnierter Metallfolien sollte mittels Kühlzellen und/oder Vakuum und/oder Schutzgasatmosphäre verlängert werden
Technologie	Aus Kapazitäts- und Kostengründen ist eine (Groß-) Serienfertigung mittels Autoklav zu vermeiden. Eine Infusion und Aushärtung bei Atmosphärendruck sind vorzuziehen.
Nachhaltigkeit	Die Wärmeeinbringung sollte in einem (Durchlauf-)Ofen oder durch beheizbare Formwerkzeuge erfolgen. Im Optimalfall ist ein kaltaushärtendes Harzsystem zu verwenden.

Darüber hinaus wurde die Fertigungskapazität zur Erstellung von Lochblechen analysiert. Durch die hohen Wandstärken bei der Fertigung von Rotorblattkomponenten werden zahlreiche Metallfolien verwendet. Um die in TAP 5.7 ermittelte Notwendigkeit von Lochblechen unter Berücksichtigung der Fertigungskosten gewährleisten zu können, muss eine zeitgleiche Fertigung mehrerer Lochbleche realisiert werden. Dazu wurde eine

Vorrichtung konstruiert und hergestellt, die die zeitgleiche zerspanende Bearbeitung von mehreren Lochblechen ermöglicht (Abbildung 25). Dies geschieht entweder zugeschnitten auf ein kleines Format oder um größere Komponenten zu fertigen als Endlosblech.

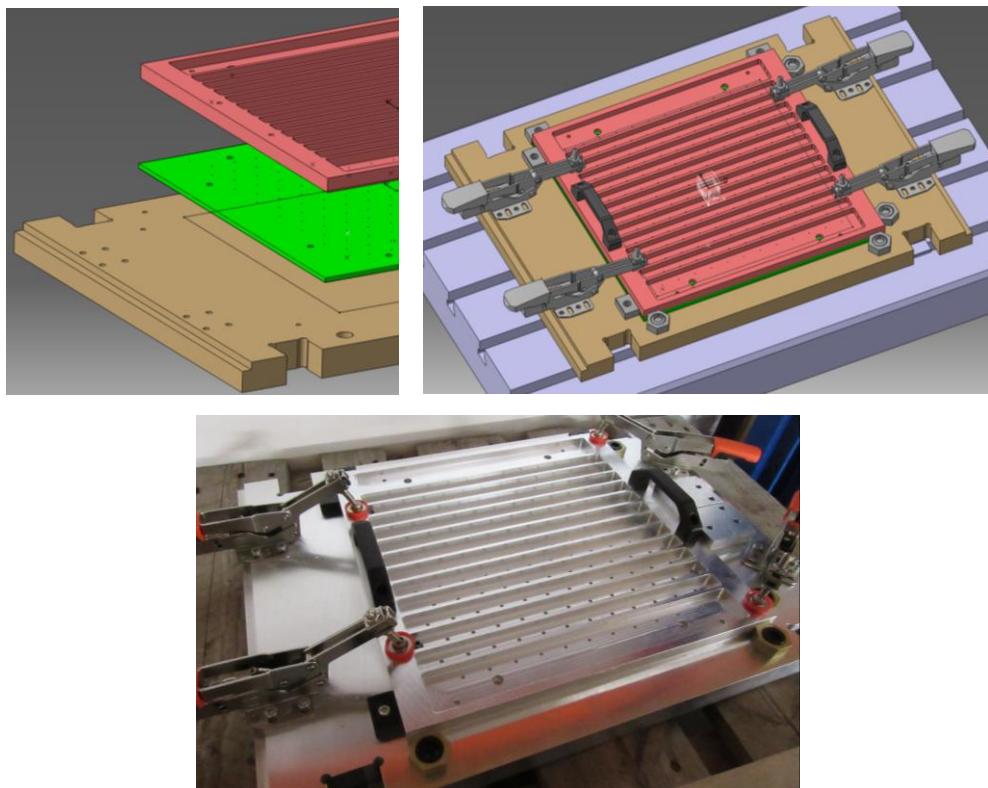


Abbildung 25: Vorrichtung zur gleichzeitigen Fertigung mehrerer Lochbleche

Mehrere dieser Bleche wurden gefertigt und dem Projektpartner DLR übergeben, damit eine Sol-Gel-Behandlung durchgeführt werden kann, die für eine ausreichende Anbindung von Metall- zu Faserlagen zwingend notwendig ist. Mit den so vorbehandelten Blechen konnte eine erstmalige Infusion einer dickwandigen Platte (Wandstärke 10 mm) durchgeführt werden. Die Infusion verlief prinzipiell erfolgreich. Innerhalb eines angemessenen Zeitraumes von 12 Minuten konnte der Aufbau vollständig getränkt werden. Während der Aushärtung ist es allerdings zu Lufteinschlüssen, vermutlich aufgrund eines nachträglichen Entgasens des Harzsystems gekommen (Abbildung 26).

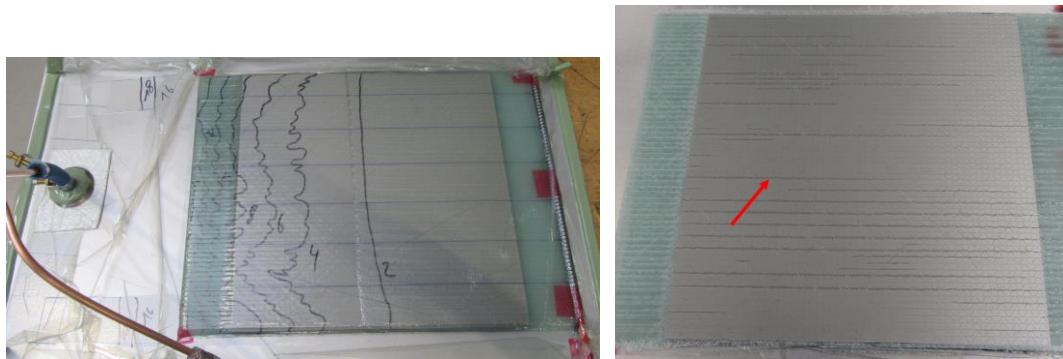


Abbildung 26: Infusion der FML mit Sol-Gel behandelten Metallfolien und sichtbare Lufteinschlüsse nach Entformen auf der Unterseite

In weiteren Schritten wurde die Wandstärke erhöht, um die Randbedingungen der Rotorblattfertigung und damit die Herausforderungen auf den Fertigungsaufbau zu übertragen. Entsprechend konnte ein flaches Laminat mit einer Wandstärke von 30 mm serientauglich unter Qualitätsanforderungen hergestellt werden und dem Projektpartner Fraunhofer IWES für weitere Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Um ein Baukastensystem für FML-Einleger (TAP 7.8) generieren zu können, ist es von grundlegender Bedeutung, vereinheitlichte Fertigungsmethoden für unterschiedlich gestaltete Rotorblätter zu erhalten. Aus diesem Grund wurden innerhalb der Prozessentwicklung Faser-Metall-Lamine in verschiedenen Aufbauten und Wandstärken (10 mm, 30 mm sowie 100 mm) gefertigt. Durch systematisches Vorgehen konnte eine Fertigungsmethode entwickelt und generalisiert werden, durch die alle Lamine umgesetzt wurden (Abbildung 27).

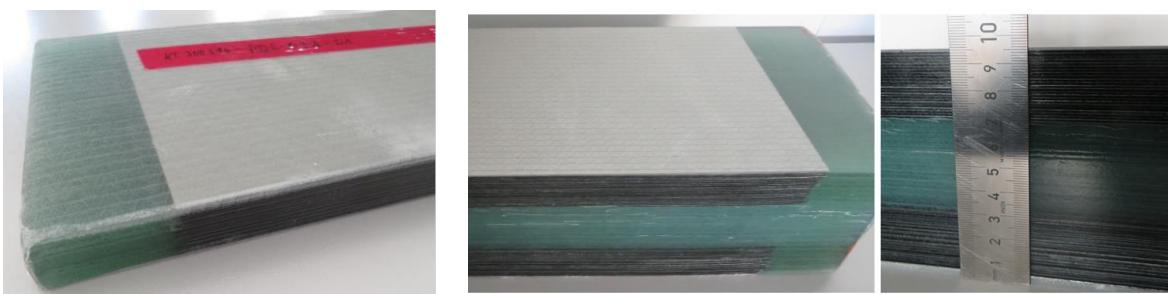


Abbildung 27: FML-Probekörper mit einer Wandstärke von 30 mm (links) und mit 96 mm (rechts)

### TAP: 5.10

TAP 5.10 fokussierte sich auf die Dokumentation von Fertigungsabläufen zu den Halbzeugen (intern und extern), anzuwendender Prozessparameter sowie dem Aufbau eines fertigungsbegleitenden Qualitätssicherungskonzept für die Erstellung der Prüfkörper. Basierend auf den definierten Qualitäts- und Prüfplänen wurden geeignete NDT-

	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
---	--	--

Prüfverfahren (non-destructive testing) identifiziert und mittels Prüfkörpern hinsichtlich der Eignung untersucht.

Als Maßnahme für die Überwachung der Lagerstabilität aktivierter Bleche erfolgte die Bearbeitung zusammen mit dem DLR, um ein besseres Prozessverständnis zu erhalten und den korrekten Umgang mit den Blechen zu erlernen (Abbildung 28).



Abbildung 28: Sandstrahlen (links) und Trocknung der Sol-Gel-behandelten Metallfolien (rechts) für den 3D-Demonstrator

Die optimale Lagerung unter Vakuum bei Raumtemperatur wurde mit den bei INVENT vorhandenen Technologien laut Vorgabe umgesetzt und dokumentiert. Daraus im seriennahen Prozess gefertigte Funktionsmuster, wurden für mechanische Tests dem DLR und Fraunhofer zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die umzusetzenden Lagerbedingungen und Handhabungsanforderungen den Vorgaben entsprachen. Ein Einfluss auf deren Performance wurde nicht identifiziert. Die Lagerstabilität auf Couponbasis unter industriellen Umgebungsbedingungen konnte damit verifiziert werden. Eine Lagerung von Sol-Gel-behandelten Metallfolien ist somit für mindestens 4 Wochen möglich und entspricht den Anforderungen eines KMU.

Zum Abschluss dieses Arbeitspaketes wurden außerdem zerstörungsfreie Prüftechniken evaluiert, um der Hybridisierung Rechnung zu tragen. Eine ausgiebige Recherche und Diskussion mit Experten vom Fraunhofer WKI hat ergeben, dass diverse Prüfmethoden zielführend sind, um hybride Laminate zerstörungsfrei zu testen. Diese lauten im Einzelnen:

- Ultraschall-Impuls-Echo UT (Reflexionsverfahren)
- Phased Array Ultraschallprüfung (Durchschallung)
- (X-Ray) Röntgen-Computertomographie
- Thermographie

 <b>INVENT</b>	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
---	--	--

Als Ergebnis wurde das X-Ray CT-Verfahren als die vielversprechendste NDT-Technologie definiert. Diese Technologie steht INVENT allerdings nicht zur Verfügung, weshalb eine CT-Untersuchung eines FML-Probekörpers beauftragt wurde. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass dieses Verfahren gewünschte Aussagen einer nicht zerstörenden Prüfung zulässt. Es wurde bewusst ein Probekörper mit Ablösungserscheinungen ausgewählt. Diese Fehlstellen konnten mit dem CT-Scan nachgewiesen werden (Abbildung 29). Die gute Analysefähigkeit zeigt in dieser Abbildung der Ausschnitt rechts oben, hier sind die 0,5 mm-Löcher in den Metalleinlegern ersichtlich. In der Ansicht rechts unten sind die Faser-Einzellagen sowie Metallfolien zu sehen.

Vor dem Hintergrund der industriellen Anwendung wurden dem Projektpartner TECOSIM die Rohdaten zur Verfügung gestellt, um eine automatisierte Auswertung in Kombination mit Machine Learning zu prüfen. Als Herausforderung stellte sich die Menge und Art der CT-Scan-Daten dar. Um kleinste Schäden (Poren) im Bauteil zu identifizieren, ist eine hohe Auflösung erforderlich. Diese wiederum ist abhängig von der Entfernung zum Messobjekt, so dass sich folgender restriktiver Zusammenhang ergibt:

- Großes Objekt → große Entfernung → geringe Auflösung
- Hohe Auflösung → geringe Entfernung → kleines Objekt

Es stellte sich außerdem heraus, dass die Metalllagen gegenüber dem Verbundmaterial stark strahlen, so dass die Grenzschicht von Metalllage und GFK schlecht aufzulösen ist. Poren, unter Vorgabe einer charakteristischen Erkennungsgrenze, können lediglich unter Kenntnis der Anwesenheit lokal bestimmt werden. Eine automatisierte Auswertung zu Fehlstellen im GFK und die korrekte Anbindung zwischen hybriden Schichten kann daher zum jetzigen Zeitpunkt nicht getroffen werden.

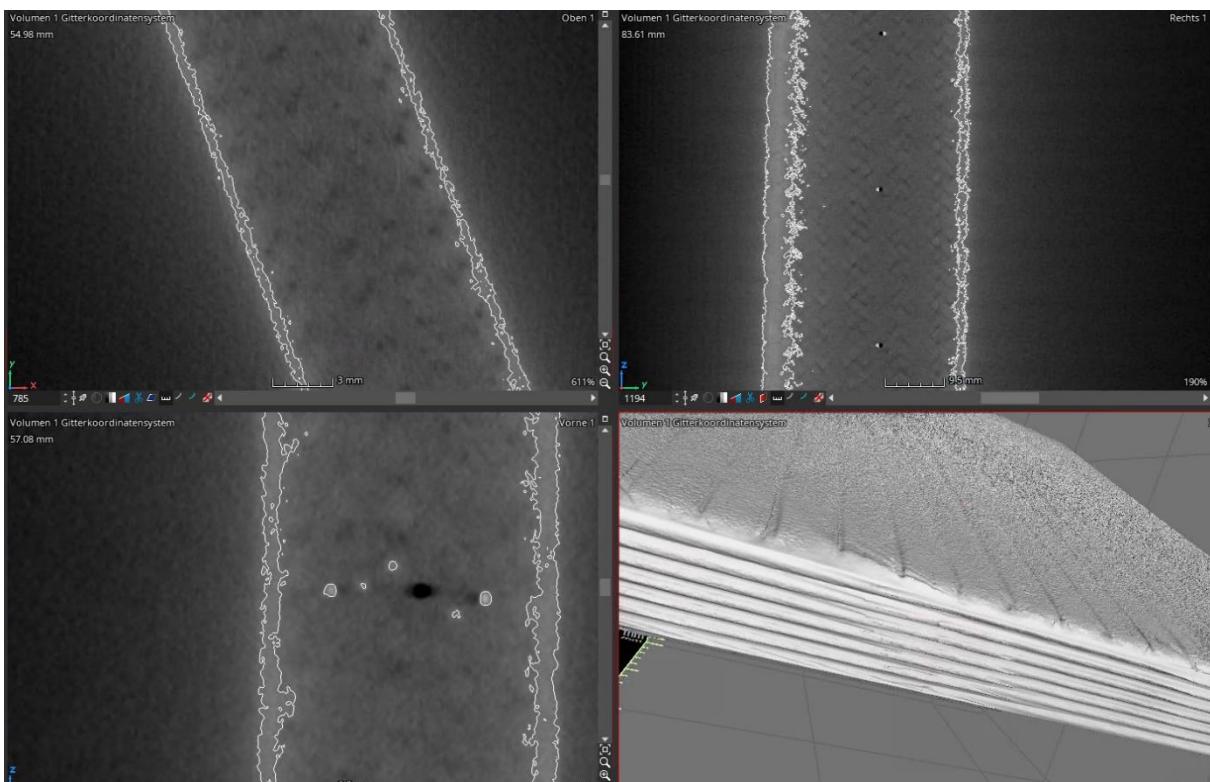


Abbildung 29: CT-Scan einer hybriden FML-Platte

### TAP: 5.11

Ziel des Arbeitspaketes ist es, die in TAP: 1.6 und TAP: 5.7 erarbeiteten Hybridkonzepte der Blattwurzel hinsichtlich ihrer ganzheitlichen Umsetzbarkeit im Rotorblatt zu prüfen. In einem ersten Schritt wurden hierzu Varianten der Integrationsmöglichkeiten in Bezug auf den Fertigungsablauf aufgestellt und geprüft (Abbildung 30).

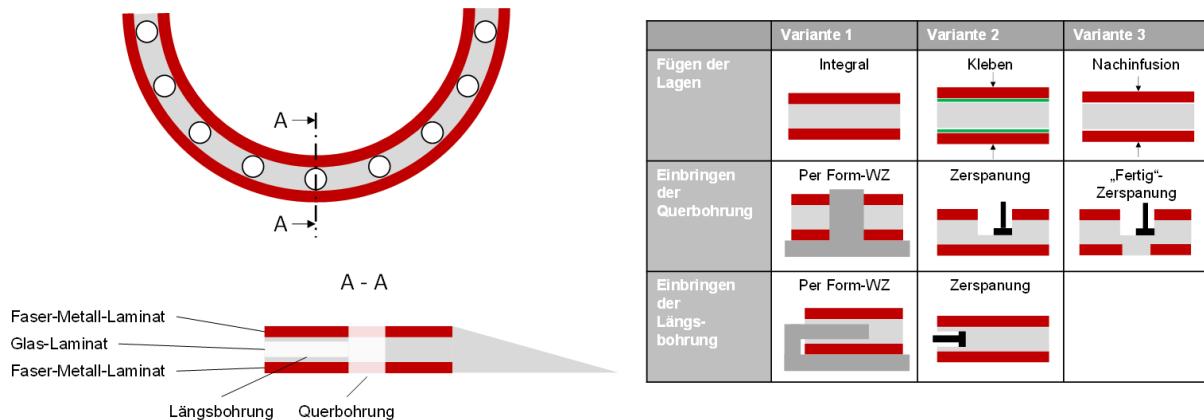


Abbildung 30: Evaluierung der Möglichkeiten zur Nachbearbeitung für die Integration der FML-Einleger

Darauf aufbauend wurden die Möglichkeiten zur Nachbearbeitung betrachtet. Diese sind notwendig, da entsprechende Löcher zum Einsatz der vorgesehenen Quergewindemutter sowie zur Führung der einzusetzenden Schraube ermöglicht werden müssen. Wichtig ist das Längsloch, welches in einem reinen GFK-Bereich realisiert werden muss, da ein Loch dieser Länge nicht wirtschaftlich in ein hybrides Laminat eingebracht werden kann. Somit werden die hybriden Bereiche als zwei äußere Gurte dargestellt. Hier kenntlich gemacht durch die roten Bereiche in der Skizze. Die Möglichkeiten dieser Ausführung umfassen die Infusion aller Einzellagen in einem Durchgang, als Nachinfusion der Gurte oder durch ergänzendes Kleben dieser. Die Generierung der Bohrungen kann durch ein Formwerkzeug geschehen oder durch eine direkte Zerspanung erfolgen.

Die Integrationsvarianten sowie mögliche Nachbearbeitungsverfahren von FML-Komponenten in industrienahen Dimensionen wurden im Konsortium abschließend diskutiert, um die strukturelle Integration zwischen Rotorblatt und Narbe zu gewährleisten.

Für die Erarbeitung möglicher Werkzeuge und zugehöriger Parameter der Zerspanung wurden vorerst Bohrungen mit einem Durchmesser von 40 mm an den gefertigten FML-Funktionsmustern eingebracht. Zu erwartende Herausforderungen ergaben sich hierbei durch die unterschiedlichen Eigenschaften der im Wechsel geschichteten Faser-Metall-Lagen:

- Festigkeiten
- Wärmeausdehnungskoeffizient
- Wärmeleitung
- kein Kühlmitteleinsatz

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die Bohrergebnisse. Der reine GFK-Bereich stellte keine Herausforderung dar, solange ein homogenes Material, d.h. eine ausreichende Tränkung des Halbzeuges vorherrschte. Im Bereich unvollständiger Tränkung führten

trockene Fasern zum Ausfransen und Herausreißen von weiterem Material der Einzellagen, mit Schädigung von Bauteil und Unterbrechung des Zerspanungsprozesses aufgrund von Aufwickeln um das Werkzeug.



Abbildung 31: Aufspannung und mechanische Bearbeitung des FML-Demonstrators (links) und gefertigte Längs- und Querbohrungen (rechts)

Für den FML-Bereich musste mit reduziertem Vorschub sowie häufigem Werkzeugwechsel gearbeitet werden. Die Schnittkante zeigte an sich keine Besonderheiten. Das Ablösen der obersten Glas- und Metalllage lag ursächlich am Einsatz von unbehandelten Blechen. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Bearbeitung von hybrider FVK-Material bis 100mm möglich ist, sowie eine Skalierung für den finalen Demonstrator mit einem Durchmesser bis zu 72 mm als realistisch erscheint.



Abbildung 32: Schnittbild der 40 mm-FML-Querbohrung (links) sowie durch das Bohren ausgerissene Glasfaserrovings einer Längsbohrung (rechts)

Die Testschnitte an Probekörpern zeigten aber auch, dass eine spanende Bearbeitung mittels Säge und Fräse zeitintensiv ist und einen hohen Werkzeugverschleiß mit sich bringt.  
Seite 34 von 62

 <b>INVENT</b>	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
---	--	--

Verbunden mit den hohen Toleranzanforderungen seitens der Querbolzenanbindung sind die anvisierten Bauteildicken mit bis zu 100 mm technologisch aufwendig und wirtschaftlich nicht sinnvoll darstellbar.

Eine Bearbeitung hybrider Verbunde mittels Wasserstrahlschneiden wurde von Projektpartnern bislang nur bis 30 mm dargestellt und müsste für die im Projekt hergestellten Wandstärken erprobt werden.

Im Zuge der Untersuchungen wurden mögliche Alternativen recherchiert und am Anwendungsfall bewertet, um die erhöhten Aufwände beim Werkzeugverschleiß sowie der Zerspanung selbst zu reduzieren. Neben der Wahl verschiedener mechanischer Schneidwerkzeuge, wurden weitere Verfahren zur nachträglichen Herstellung von Löchern in Betracht gezogen, um eine wirtschaftlichere Umsetzung im Industriemaßstab sicherzustellen [10-15]. Als Ergebnis wurde die Nachbearbeitung um eine 2-stufige Variante erweitert: In einer ersten Stufe soll mittels Wasserstrahls das Vorschneiden auf Rohmaß erfolgen. Durch eine Grobbearbeitung sollen so der zeitliche Aufwand sowie Verschleiß reduziert werden. In der zweiten Stufe erfolgt dann die mechanische Bearbeitung auf Endmaß, um Oberflächengüte, Passung sowie die Entfernung möglicher Kontaminationen sicherzustellen. Damit erfolgte die Bewertung des Verfahrens hinsichtlich Generierung einer Bohrung und dessen Kompatibilität mit FVK. In den ersten Untersuchungen wurden die verfahrensabhängigen Durchmesser der Rohbohrung bestimmen, die Prozessparameter sowie der Verlauf des Wasserstrahlgangs bei 100 mm Materialstärke sowie weitere Besonderheiten des Wasserstahlschneidens, z.B. den Einfluss von Fehlstellen in Bezug auf den Strahlengang und die Schnittqualität. Eine Abweichung im Strahlengang durch Fehlstellen (ungetränkte Bereiche) konnte nicht festgestellt werden.

Als erstes Ergebnis konnte festgehalten werden, dass mittels Wasserstrahlschneiden ein grober Vorschritt möglich ist. Da Wasser beim Schneiden nachläuft, bilden sich Riffeln und Riefen im Schnittbild aus. Außerdem ist eine Strahlabweichung beim Schneiden in Dickenrichtung zu berücksichtigen (Abbildung 33). Die Dimensionsprüfung ergab, dass Nenndurchmesser im Toleranzbereich von 0,1 mm gefertigt werden können. Je nach Oberflächenanforderung (Passung) ist zum Erreichen der Endkontur im zweiten Schritt auf das mechanische Zerspanen zurückzugreifen.

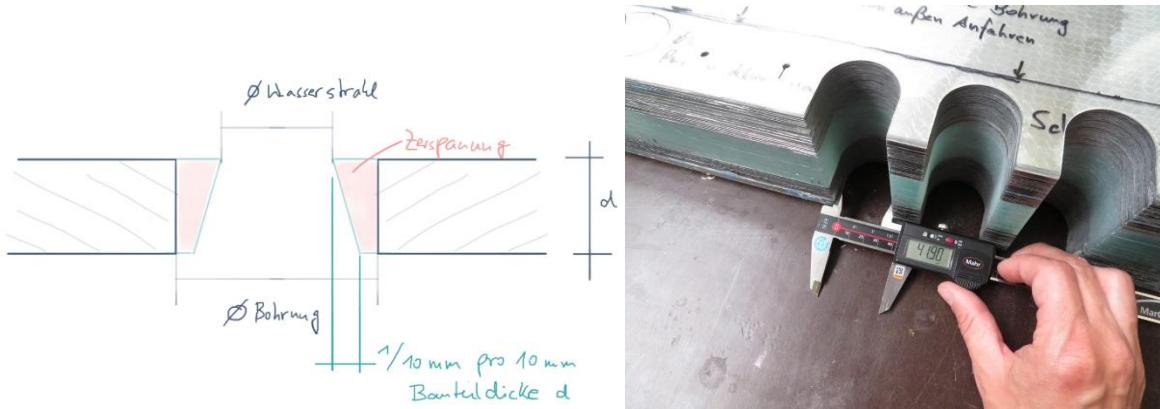


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Strahlabweichung beim Wasserstrahlschneiden (links) und Identifizierung von Schnittparametern beim seitlichen Anfahren (rechts)

Am gekrümmten FML-Funktionsmuster wurde der zweistufige Nachbearbeitungsprozess exemplarisch umgesetzt. Sowohl die durchgehende Querbohrung als auch die als Sackloch ausgeführte Längsbohrung wurde Wasserstrahl geschnitten. In der zweiten und finalen Bearbeitungsstufe folgte seitens INVENT die Bearbeitung auf Endkontur (Abbildung 34).



Abbildung 34: Zerspanung wasserstrahlgeschnittener Bohrung auf Endkontur

Gegenüber den Vorversuchen konnte mit einem Werkzeug in einem Bearbeitungsgang sowohl das Schruppen als auch Schlichten erfolgen. Die Maschinenlaufzeiten konnten für die hybride Bohrung um Faktor 3 reduziert werden. Für den reinen GFK-Bereich der Längsbohrung konnte der Bearbeitungsschritt Schruppen komplett entfallen.

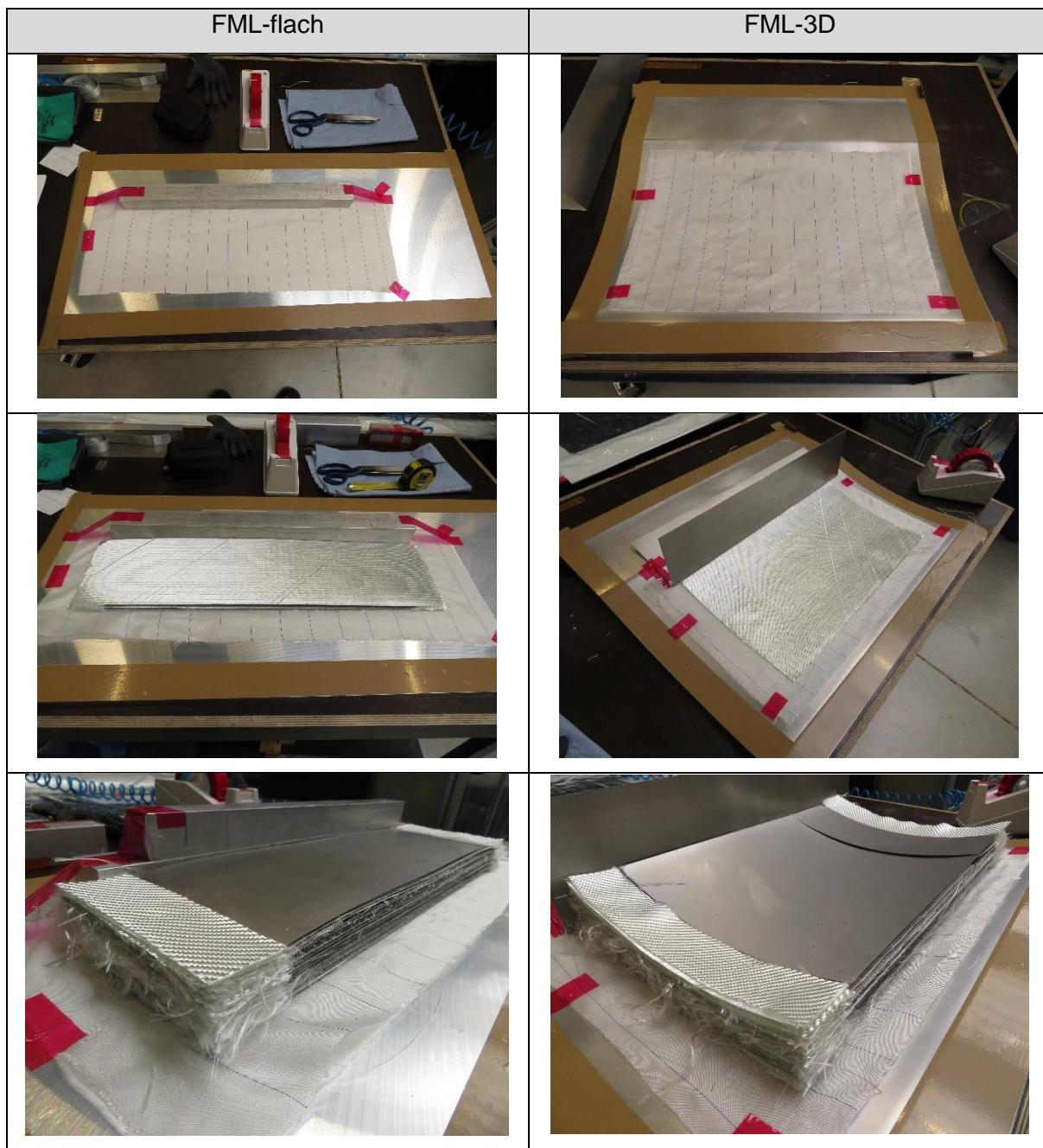
## TAP 5.12

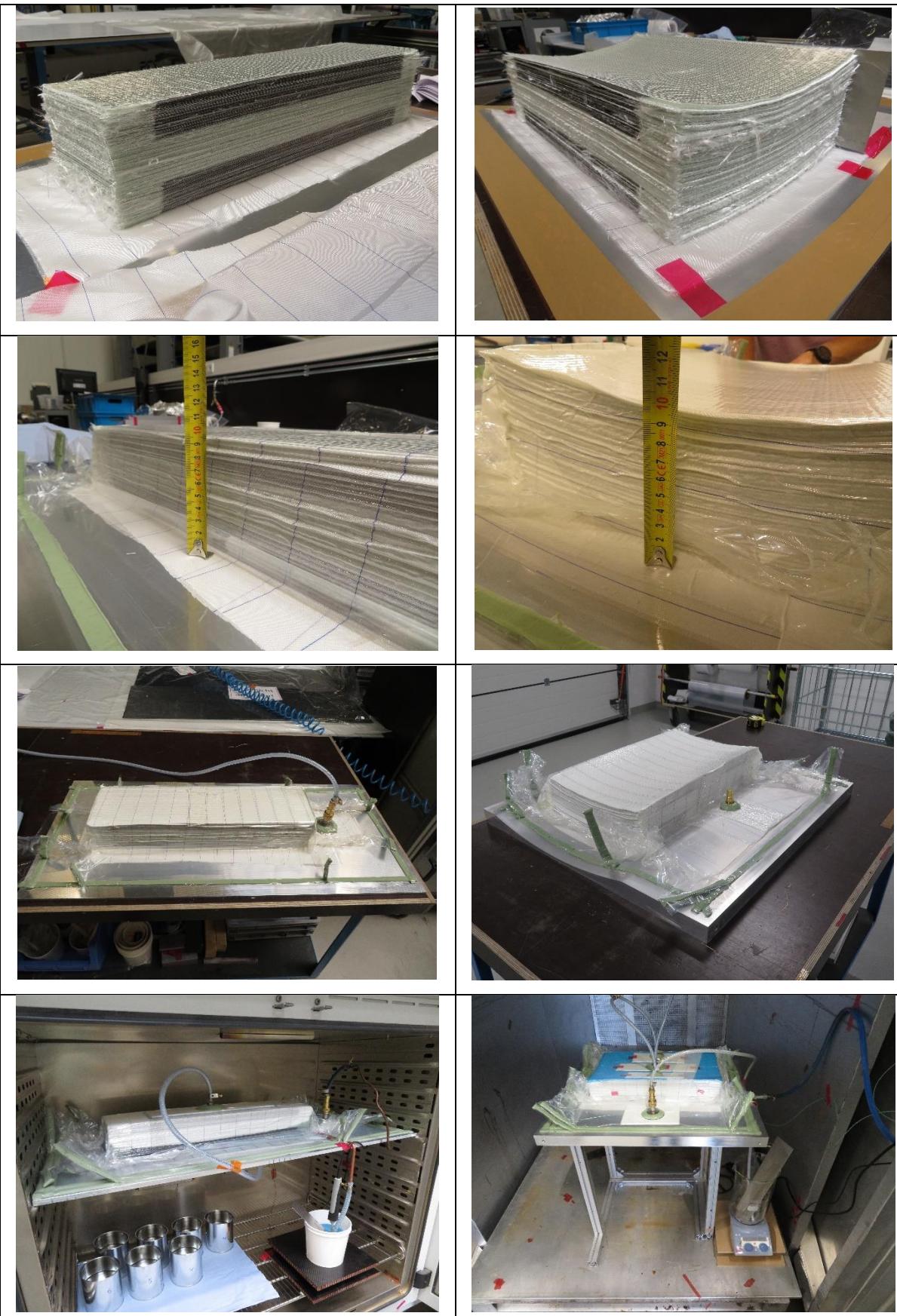
In TAP 5.12 wurden die Erkenntnisse der durchgeführten Tränkungsversuche zum Ringanguss und Materialcharakterisierungen auf Coupon-Level in das finale Seite 36 von 62

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

Fertigungskonzept überführt, sowie die erforderlichen Prozessparameter abgeleitet. Ziel war es hierbei die Skalierungsmethoden und deren Umsetzung mittels bauteilnaher Proben zu verifizieren. Ebenfalls angepasst und implementiert wurden dazu die Prozess- und Qualitäts-sicherungsmethoden der Nano-Schiene aus TAP 1.8. Nachdem Probenkörper mit 10 mm und 30 mm Wandstärke erfolgreich gefertigt wurden (TAP 5.9), fand eine weitere Skalierung auf 100 mm bei einer Grundfläche von 580x150 mm<sup>2</sup> statt (Demonstrator FML-flach). In Anlehnung an den Blattwurzelbereich und zur Erhöhung der Komplexität wurde weiterhin eine gekrümmte Struktur ausgewählt. Bei ebenfalls 100 mm Wandstärke wurde die Grundfläche auf 500x300 mm<sup>2</sup> vergrößert. Darüber hinaus wurde ein Radius von ca. 750 mm berücksichtigt (Demonstrator FML-3D). Nach der Auswahl bzw. Eignungsuntersuchung eines geeigneten Formwerkzeuges, der Übertragung und Skalierung der Erkenntnisse von AP 5.9 bis AP 5.11, erfolgte die Spezifikation, Herstellung und Vorbehandlung der Metallfolien (Lochen, Zuschneiden, Sandstrahlen und Sol-Gel-Behandlung) für die finalen FML-Halbzeugkomponenten.

Die nachfolgende Bilderserie zeigt exemplarisch den Aufbau der Bauteile: Ablage Faserhalbzeug und Metallfolien | Infusionsstrategie | Vakuumaufbau | Umsetzung der Fertigungsversuche | Entformen für die beiden bauteilnahen Proben FML-flach und FML-3D.







Die erfolgreiche Umsetzung der bauteilähnlichen Modelle basierte hierbei auf einem iterativen Vorgehen bei Steigerung der Komplexität. Zudem wurden die Prozesssicherungsmethoden der Anwendung umgesetzt. Die parallel zum Fertigungsversuch stattfindende Datenaufzeichnung stellte sicher, dass während der Durchführung der aktuelle Füllstand, die fortschreitende Reaktivität als auch der anliegende Differenzdruck bekannt waren. Die nachfolgende Auswertung lieferte wiederum Informationen zum zeitlichen Verlauf und damit zum Harzfluss auf Basis des berechneten Gewichtsgradienten, der Tränkungszeit und der Gesamtharzmenge.

Abbildung 35 zeigt die ausgewerteten Messdaten für den Fertigungsversuch FML-flach. Hieraus konnte für folgende Versuche geschlussfolgert werden, ob das Tränkungskonzept anwendbar ist, welche Harzmenge zu welchem Zeitraum zur Verfügung gestellt werden muss und nach welcher Zeit die Tränkung abgeschlossen sein muss, bevor der kritische Viskositätswert von 500 mPas erreicht wird.

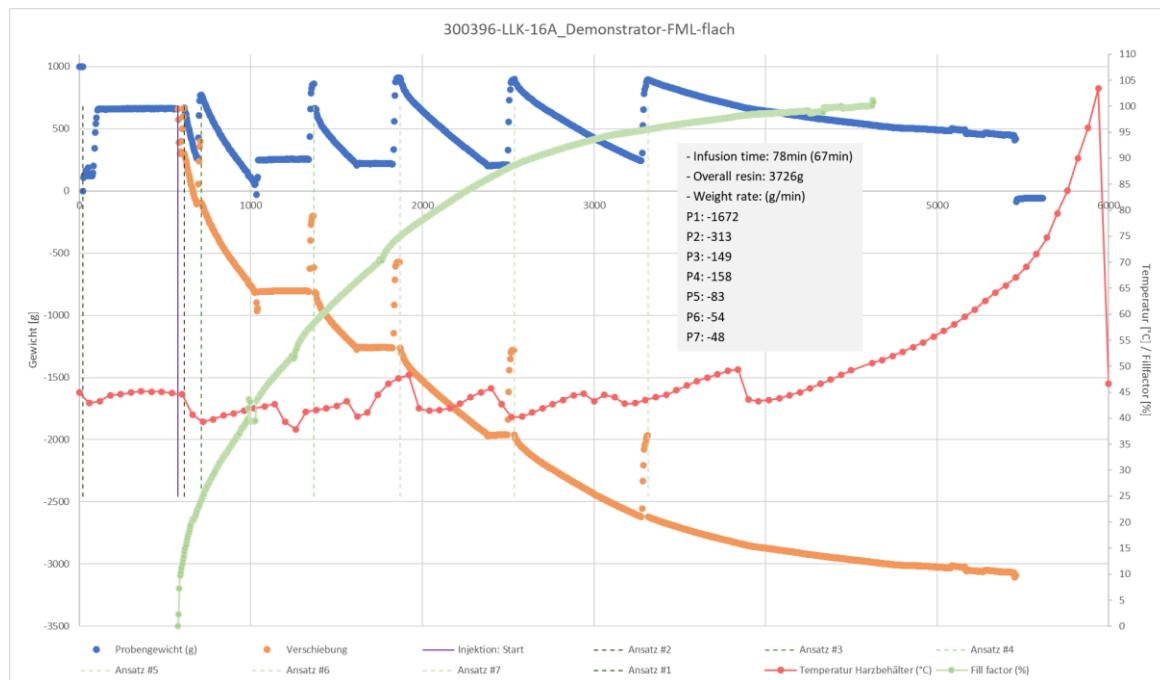


Abbildung 35: Ausgewertete Messdaten zum Fertigungsversuch FML-flach auf Basis der umgesetzten Prozess- und Qualitätssicherungsmethoden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit Hilfe der sensorisch begleiteten Fertigung iterativ die idealen Fertigungsstrategien identifiziert werden konnten. Weiter konnten die bauteilnahmen Proben erfolgreich umgesetzt wurden. Die anschließende Analyse bestätigte zudem die erfassten Messdaten und lieferte Aussagen zu gefertigten Bauteilqualität hinsichtlich Geometrie, deren Genauigkeit und dem Faservolumengehalt. Die Bauteile wurden hierzu einer optischen Vermessung mit dem GOM System ATOS am DLR unterzogen (Abbildung 36) und gegenüber den CAD-Daten abgeglichen.

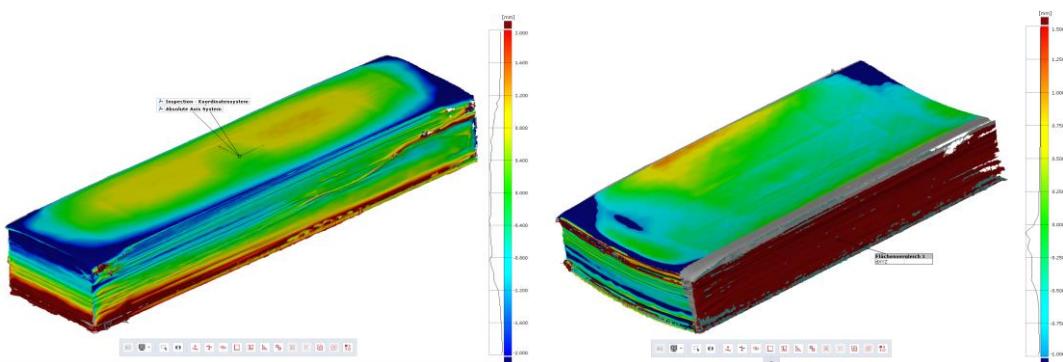


Abbildung 36: 3D-Geometrievermessung der bauteilnahen Proben mit GOM ATOS. Die Abbildungen zeigen farbskalierte die Abweichung der gefertigten Strukturen gegenüber dem CAD-Modell

Tabelle 2 stellt die erfassten Größen für die bauteilähnlichen Proben sowie deren Sollwerte gegenüber und zeigt damit ebenfalls die Skalierbarkeit des Fertigungskonzeptes.

Kriterium / Bauteil	FML-flach	FML-3D
Soll-Gewicht (g)	20192	34339
Ist-Gewicht (g)	20215	34400
Abweichung (g)	23	61
Abweichung (%)	0,1	0,2
Soll-FVG (%)	55	55
FVG kalkuliert (%)	55,69	56,14
Soll-Bauteildicke (mm)	90,297	90,297
Abweichung zum CAD (mm)	< ± 0,8	< ± 0,5

Tabelle 2: Soll-Ist-Gegenüberstellung der Bauteilkennwerte für FML-flach und FML-3D

Darüber hinaus konnte final die Herstellung im industriellen Maßstab unter allen im Projekt bezogenen gesammelten Informationen bestätigt werden. INVENT ist damit in der Lage das erarbeitete FML-Konzept umzusetzen und entsprechend TRL-5 für FML im Handlungsfeld von Windkraftanlagen zu erreichen.

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

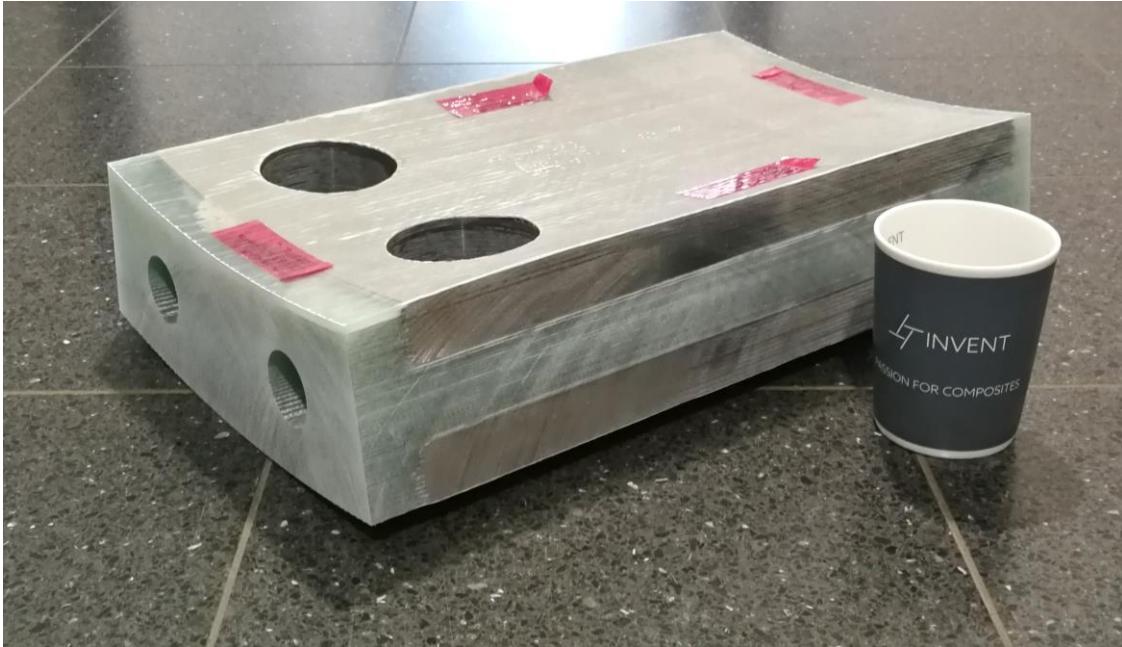


Abbildung 37: 3D-FML-Funktionsmuster mit eingebrachten Integrationsschnittstellen für Quer- und Längsbolzen

### TAP: 3.7 & 7.8

Für die globale Betrachtung wurden die bauteilspezifischen Parameter zur Entwicklung eines allgemeinen Baukastensystems für einheitliche Fertigungsmethoden unterschiedlich belasteter und damit geometrisch und strukturmechanisch variierender Rotorblätter erarbeitet. Damit sind die erarbeiteten Technologien der Windkraftindustrie allgemein zugänglich.

Bei der Analyse unterschiedlicher Rotorblätter wurde im Laufe der Projektbearbeitung die Rotorblattwurzel als vielversprechender Bereich zum Einsatz identifiziert.

Dies berücksichtigte vorrangig die Variation lastabhängiger Anpassungen im Lagenaufbau sowie die Wandstärkenvariation. Dieses wurde um die Erkenntnisse hybrider Bauteilaufbauten und deren Anbindungen erweitert (AP 5). In Anlehnung an den gewählten Kreisquerschnitt sowie die industriellen Randbedingungen aus TAP 1.5 wurde hierzu eine Aufteilung der Blattwurzel in Segmente vorgenommen und in einem ersten Schritt hinsichtlich Anzahl, Handling, Positionierung sowie der Ausgestaltung der Fügestelle betrachtet.

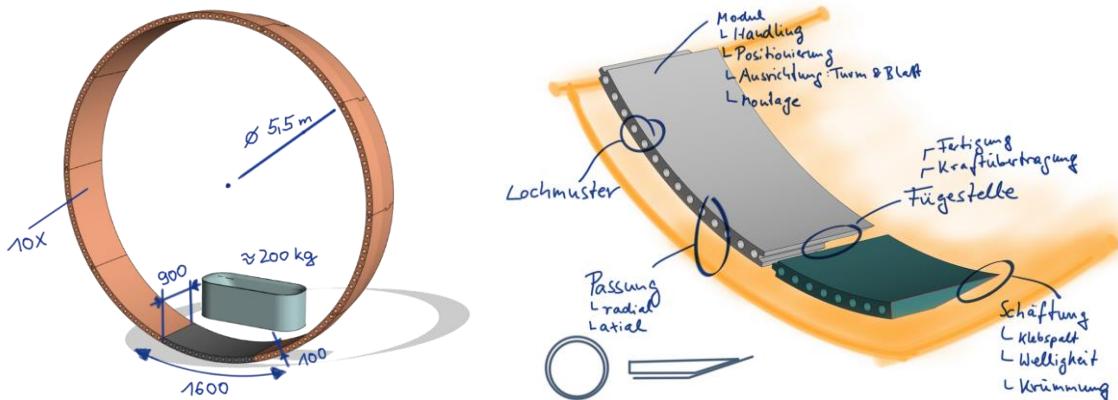


Abbildung 38: Abschätzungen zur Segmentierung des Blattwurzelanschlusses (links) sowie Erarbeitung Fertigungstechnischer Randbedingungen bei der Modularisierung & Anbindung zum Blatt im Toleranzfeld (rechts)

Im Fokus lag hierbei die fertigungstechnische Realisierung der Modulschnittstelle und die Anbindung zum Blatt im vorgegebenen Toleranzfeld des Kreisringes. Diese setzt sich aus der Bauteilfertigung selbst, der Modulmontage sowie der Anbindung zum Turm über das vorhandene Lochmuster zusammen. Bereits industriell umgesetzte Lösungen wurden gesammelt und analysiert. Lösungen seitens der Preformerstellung sind durch den RapidRoot 3-D Preform von 3TEX Inc. bekannt, welcher als 8 mm-Stack in Rollenform bereitgestellt werden kann. Neben verbessertem Handling sprechen einfache Drapierbarkeit und schnelle Tränkung in Dickenrichtung für einen Einsatz [16]. Eine Einbindung von Metallfolien ist hingegen nicht umsetzbar. Des Weiteren werden Blattwurzelanbindungen vom Typ „FIT“ und „Blade Root Connection“ der Firma We4Ce angeboten [17]. Diese ermöglichen das Einbringen von Anschlusspunkten in bereits gefertigte Blätter durch nachträgliches Setzen von Buchsen als auch vorgefertigte Subkomponenten als Buchsen-Einleger bei der Blattherstellung. Letztere zeigt sich ebenfalls als nicht kompatibel mit dem FML-Ansatz.



Abbildung 39: Modularer Blattwurzelanschlüsse von We4Ce aus GFK: nachträgliche FIT-Buchse (links) und eingelegte Subkomponente (rechts)

Auf Grund der gezeigten Inkompatibilität der Lösungen für den FML-Ansatz, wurde in Anlehnung an den Kreisquerschnitt der Blattwurzel der Ansatz zur Aufteilung in Segmente vorgenommen und hinsichtlich der allgemeinen Implementierbarkeit geprüft. Für die nanopartikelmodifizierten Harzsysteme sind die Konzepte der modularen Halbzeuge und deren Anbindung grundsätzlich geeignet. Als hinderlich erweist sich hierbei lediglich das Harzsystem selbst durch eine zu hohe Initialviskosität.

Für die Verallgemeinerung der Technologien und Übertragbarkeit auf unterschiedliche Rotorblätter erfolgten Recherchen hinsichtlich allgemeiner FVK-Bauweisen sowie der Möglichkeit unterschiedliche Bauteiltopografien zu berücksichtigen [30]. Für die Umsetzung im Produktentstehungsprozess (PEP) eignet sich hierbei die Methodik des modularen Konstruierens. Es wird hierbei nach dem Baukastenprinzip in vorgefertigten Bestandteilen, den Modulen gebaut. Die Vorteile liegen in verkürzten Bauzeiten, kostengünstigerer Serienfertigung der Einzelteile, sowie deren potenziell einfacherer Abbau und deren Wiederverwertung. In einem ersten Schritt wurden die Wechselwirkungen der Entwicklung und Konstruktion mit vorhergehenden und nachfolgenden Prozessschritten analysiert (Abbildung 40).

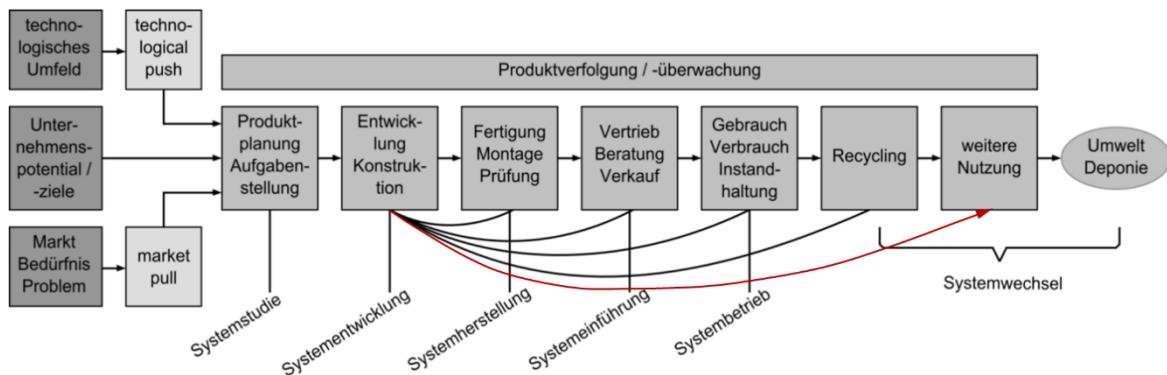


Abbildung 40: Produktentstehungsprozess und zu berücksichtigende Prozessschritte

Für die Einlegevarianten stand dabei im Fokus auf verfügbare Fügeverfahren sowie deren montagegerechte Gestaltung zu achten. Die übergreifende Anwendbarkeit leitet sich hierbei aus gemeinsamen Anforderungen ab. Zu berücksichtigen sind:

- Wirkflächen
  - Anschlussflächen
  - Lastfall
  - Fügeflächen

	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
---	--	--

- Bereiche, die geometrischen Einschränkungen unterliegen, sollten nicht getrennt werden

Die sich daraus ergebenden Vor- und Nachteile fasst folgende Tabelle zusammen:

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- bessere Wiederverwendbarkeit</li> <li>- bessere Wiederverwertbarkeit</li> <li>- besser reparierbar</li> <li>- kleinere Teile           <ul style="list-style-type: none"> <li>o Transport, Lagerung</li> <li>o Serienfertigung möglich</li> <li>o verkürzte Bauzeit der einzelnen Module</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mehr Teile           <ul style="list-style-type: none"> <li>o größerer Montageaufwand</li> <li>o höheres Gewicht</li> <li>o mehr Fügestellen</li> </ul> </li> <li>- eventuelle Kerbwirkung</li> <li>- schlechteres Materialverhalten</li> </ul>

Durch das gekrümmte 3D-Funktionsmuster konnte das finale FML-Konzept mittels bauteilnaher Probe dargestellt werden.

#### **TAP: 4.7 & 4.8 – Technische und wirtschaftliche Bewertung: Nano-Schiene**

Innerhalb des Pfades der nanomodifizierter Werkstoffsysteme lagen die Schwerpunkte seitens INVENT in der Eignungsprüfung nanomodifizierter Harzsysteme bei Faserverbundstrukturen zur Gewichts- und Kostenreduktion durch verbesserte Ermüdungseigenschaften. Seitens der Projektpartner konnten etwaige Verbesserungen durch eine Modifikation des Harzsystems nicht nachgewiesen werden. Unabhängig davon erfolgte die Entwicklung eines Fertigungsprozesses für nanomodifizierte strukturelle Halbzeuge unter den Randbedingungen der Rotorblattfertigung. Gemeinsam mit den Partnern erfolgt eine Materialcharakterisierung zu prozessrelevanten Größen, deren Prüfung auf Couponebene sowie die Umsetzung von Qualitäts- und Prozesssicherungsmaßnahmen. Mit der Materialbeistellung des nanomodifizierten Harzsystems im gefrorenen Zustand wurde zur Vorbereitung sowie deren Mischung auf einen Zentrifugalmischer zurückgegriffen. Dadurch konnte eine ausreichend schnelle und homogene Mischung des Harz-Härter-Systems im Kleinstmengenbereich für den Tränkungsvorgang umgesetzt werden. Als fertigungsbegleitende Prozess- und Bauteilqualitätskontrolle für den Tränkungsprozess wurden Messmittel identifiziert und erfolgreich bereitgestellt, die eine kontinuierliche Erfassung der kritischen Größen Temperatur und Vakuum sowie geflossene Harzmenge unter Fertigungsrandbedingungen bis 80°C ermöglichen. Es erfolgte der Aufbau mehrerer Wägezellen sowie die softwaretechnische

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

Umsetzung zur automatisierten Aufzeichnung und Auswertung der Fertigungsversuche. Für die Analyse der Mischgüte, der Partikelkonzentration sowie Auswaschung wurden den Versuchsaufbauten Proben entnommen und den Partner bereitgestellt. Der Einfluss von Formwerkzeug und Temperiertechnologie auf das Thermalverhalten wurde mit Hilfe einer transienten FE-Simulation untersucht. Das hierfür aufgebaute parametrisierte Modell berücksichtigt dabei die Abbildung der Interaktion von Formwerkzeugmaterial, Bauteilgeometrie und Wärmeübertragung.

Die Anwendung und Überprüfung der erzielten Teilergebnisse fand in der Umsetzung des bauteilnahen Funktionsmusters statt. Durch die unzureichende Topfzeit des Harzsystems konnte jedoch keine vollständige Tränkung erreicht werden.

Für eine industrielle Anwendung und deren Skalierung muss für die Verarbeitung auf eine 2K-Misch- und Dosieranlage zurückgegriffen werden. Hierdurch kann kontinuierlich Material gemischt und gefördert werden.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigte, dass die Materialkosten des Nanoharzsystem um 70% höher sind. Die Kostensteigerung resultiert jedoch nicht ausschließlich aus der Nanomodifikation heraus. 40% der Kosten liegen ursächlich in der Verwendung eines niedrigviskoserem, aber auch teurerem Harzsystems, welches gewählt wurde, um die Verarbeitung zu ermöglichen.

Neben den eigenen zuvor beschriebenen Ergebnissen wurden im Bereich nanomodifizierte Werkstoffe auch bei den anderen Projektpartnern viele Erkenntnisse und Ergebnisse erzielt, die im Folgenden zusammengefasst werden sollen, um eine gemeinsame Bewertung der Wertschöpfungskette und Beurteilung der Wirtschaftlichkeit vorzunehmen.

Die im Forschungsprojekt entwickelten Simulationsmethoden zur Analyse der multiphysikalischen Phänomene (ISD) konnten erfolgreich auf die nanomodifizierten Werkstoffe angewendet und mittels experimenteller Ergebnisse validiert werden. Auch die von TECOSIM entwickelten Detailmodelle zeigten sehr gute Übereinstimmungen mit den Tests und konnten das strukturmechanische Verhalten sehr gut wiedergeben. Für den Gesamtbewertungsprozess fehlt allerdings der Abgleich mit Versuchsdaten, was allerdings auch nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes war. Bezüglich der numerischen Analysen lässt sich sagen, dass diese im Rahmen des Projektes HANNAH weiterentwickelt und erfolgreich validiert werden konnten.

Für die Entwicklung eines Nano-Harz-Herstellungsprozesses wurden verschiedene Wege untersucht und Details optimiert. In diesem Zusammenhang hat Fa. Zeisberg eine Pilotanlage im Labormaßstab erfolgreich entwickelt und aufgebaut, so dass größere Mengen von nanomodifiziertem Harz hergestellt werden können. Das Knowhow für die Auswahl der

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

geeigneten Dispersionsstrategie und die Übertragung auf einen industriellen Upscaling-Prozess steht jetzt zur Verfügung. Die im HANNAH-Forschungsprojekt untersuchten nanomodifizierten Harze sind jedoch schwerer zu verarbeiten als die Standardharze. Zu Beginn der Fertigungsversuche war nicht klar, woher diese Schwierigkeiten resultieren, da sie in dieser Ausprägung im Vorgängerprojekt LENAH nicht aufgetreten waren. Die Untersuchungen des DLR führten schließlich zu angepassten Fertigungsparametern, die eine Verarbeitung der Materialien durch die Partner INVENT und IWES ermöglichen. Diese veränderten Fertigungsparameter sowie die höheren Materialkosten verteuern aber die Herstellung des nanomodifizierten Harzes.

Weitere numerische und experimentelle Untersuchungen bezüglich der Degradation der mechanischen Eigenschaften infolge von Feuchtigkeit und Temperatur zeigen, dass diese zum Teil durch die Partikelmodifikation im statischen Bereich ausgeglichen werden können (DLR). Außerdem ist experimentell zu beobachten, dass der Diffusionskoeffizient des nanomodifizierten Systems niedriger ist. Atomistische Simulationen seitens des ISD verdeutlichen, dass dies vor allem an den Hydroxyl-Gruppen des Böhmitpartikels liegt, welche zu Wasserstoffbrückenbindungen mit den Wassermolekülen führen und dementsprechend zu einer Verlangsamung der Diffusion. Der Einfluss auf die zyklischen Eigenschaften unter Hot-Wet-Bedingungen ist technisch schwer zu untersuchen. Eine Aussage darüber kann deshalb zu diesem Zeitpunkt nicht getroffen werden.

Es sollte erwähnt werden, dass die nähere Betrachtung des Fatigue-Verhaltens der nanomodifizierten Werkstoffe zu einer schlechteren Leistung des Systems im Vergleich zum Standardharz (ohne Partikeln) in dem für Windkraftrotorblätter wesentlichen Bereich (> zehn Millionen Zyklen) führt. Ähnliche Aussagen lassen sich auch für die nanomodifizierten Klebstoffe treffen.

Anhand der experimentellen Untersuchungen ergaben sich im Rahmen des Projektes mehrere Herausforderungen. Eine Herausforderung bestand in der Herstellung homogener, fein dispergierter Suspensionen. Darüber hinaus wird durch die eingesetzten Partikel die Viskosität des Harzes stark erhöht, welches sich wiederum auf die Infusionierbarkeit auswirkt. Ein weiterer Punkt ist, dass die untersuchten Nanoharze zwar im Low-Cycle-Fatigue-Bereich (LCF) deutlich besser sind, im High-Cycle-Fatigue-Bereich (HCF) jedoch unterhalb der Referenz liegen. Ein möglicher Grund ist, dass die Bruchdehnung durch die Anwesenheit der Partikel anteilig reduziert wird. Die Stellschrauben mit denen primär der Einfluss der Füllstoffe gesteuert wird sind Füllstoffgehalt, Partikelgröße und Oberflächenbeschaffenheit. Während Füllstoffgehalt und Partikelgröße mechanische und rheologische Eigenschaften beeinflussen, kann eine Modifikation der Partikelloberfläche eine Stabilisierung der Partikel bewirken,

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

Agglomerationseffekte abschwächen und die Infusionierbarkeit deutlich verbessern. Wird das untersuchte Materialsystem hinsichtlich dieser Aspekte optimiert, ist der Einsatz im Windenergiesektor immer noch vielversprechend. Darüber hinaus könnte auch der Einsatz eines Harzes mit einer höheren Bruchdehnung oder der Einsatz von Partikeln mit angepasstem Eigenschaftsprofil Lösungsansätze darstellen. Zudem könnten Toughener als dritte Phase eingesetzt werden, um dem negativen Effekt der Partikel auf die Bruchdehnung entgegenzuwirken. In zukünftigen Arbeiten sollte als erster Schritt eine Abschätzung der Eignung von Füllstoffen anhand von Vorversuchen erfolgen. Für den Einsatz in Windenergieanlagen sollte zunächst der Einfluss der Partikel auf die Viskosität ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann schnell ein maximal realisierbarer Füllstoffgehalt ermittelt werden. Mit diesem Füllstoffgehalt sollten anschließend Untersuchungen zur Bestimmung der Lebensdauer im High-Cycle-Fatigue-Bereich durchgeführt werden. Wenn der Füllstoff eine Erhöhung der Lebensdauer in diesem Bereich ermöglicht, kann eine Anwendung in Windenergieanlagen gewinnbringend sein. Für das in diesem Projekt untersuchte Materialsystem trifft dies zwar nicht zu, jedoch ist das Materialsystem durchaus für alternative Anwendungen interessant, in denen niedrigere Zyklen Zahlen gefordert sind. Eine Möglichkeit wäre die Anwendung in Wickelprozessen zur Herstellung von Drucktanks für die Automobilbranche. Eine weitere Anwendung ist die Herstellung von Prepregs zur Erzeugung von lasttragenden Strukturen im Automobil- und Luftfahrtsektor. Denkbar wäre ebenfalls der Einsatz für Kleinteilserien im Privat- und Sportbereich.

#### **TAP: 8.4 & 8.5 – Technische und wirtschaftliche Bewertung: FML-Schiene**

Innerhalb des Pfades der hybriden Werkstoffsysteme lagen die Schwerpunkte seitens INVENT in der Eignungsprüfung von GFK-Stahl-Hybriden als Hochlasteinleger für die Blattwurzel-Nabe-Anbindung.

In einem ersten Schritt wurden Rotorblätter hinsichtlich eingebrachter Lasten und Kraftverläufe, besonders im Wurzelblattbereich analysiert. Basierend aus den Verformungszuständen und auftretenden Beanspruchungen der INVENT seitig durchgeföhrten linearen und nichtlinearen FE-Simulationen wurden Anbindungskonzepte abgeleitet und als Einzelsegment hinsichtlich der Verstärkungseignung bei dynamischen Lasten im Blattwurzelbereich umgesetzt und bewertet. Aus der Simulation konnte gezeigt werden, das Belastungsspitzen durch eine lokale Materialkombination abgemindert werden können. Aus den geometrischen Randbedingungen der Segmentierung, sowie dem hybriden Lagenaufbau wurden mögliche Konzepte zur Herstellung abgeleitet. Als besondere Herausforderungen wurde hierbei die Segmentierung, deren Grundabmessung und der

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

Einfluss der Faser-Metall-Kombination seitens des Preforms gesehen. Aus diesem Grund wurde ein Versuchsplan aufgestellt, der entlang aller Teilprozessschritte ein iteratives Vorgehen hinsichtlich relevanter Größen erlaubt. Ebenfalls implementiert wurde ein Konzept zur Hochskalierung, um die Prozessrandbedingungen auf größere Bauteile und höhere Stückzahlen übertragen zu können. Für die quantitative Bewertung erfolgte der Aufbau geeigneter insitu Prozess- und Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie eine erweiterte Dokumentation in Anlehnung an eine vereinfachte LCA-Analyse.

Die Tränkung von Faser-Metall-Laminaten hat sowohl prozesssicher, d.h. fehlstellenfrei, als auch schnell zu erfolgen. Hierfür wurden mögliche Perforationen der Metallbleche untersucht. Dabei konnte ein ideales Verhältnis von Lochdurchmesser zu Lochabstand erfolgreich abgeleitet werden, um die Infusionsdauer zu minimieren. Die Bauteildicke sowie deren geometrische Komplexität (Krümmung) wurde an Testaufbauten von 10 mm bis 100 mm Dicke erfolgreich skaliert und somit ein Baukastensystem für eine vereinheitlichte Fertigungsmethode in Form einer Verfahrensanweisung erfolgreich umgesetzt werden.

Es wurden außerdem Möglichkeiten zur industriellen Umsetzbarkeit der Metalllagen recherchiert. Als besonders zielführend hinsichtlich Kosten-Nutzen-Aufwand erwies sich die Bearbeitung mittels Laser, die sogleich eine Endlosverarbeitung von der Rolle ermöglicht.

Um den Einfluss von Blechvorbehandlung sowie Fertigung auf das Anbindungsverhalten hybrider Strukturen zu bewerten, wurden Couponproben mit unterschiedlich behandelten Blechen gefertigt und den Partnern zur Prüfung bereitgestellt. Ein Einfluss auf die Fertigung selbst konnte dabei nicht festgestellt werden. Bei der Nachbearbeitung des ausgehärteten Laminates hingegen zeigten sich Ablösungerscheinungen auf Grund fehlender Haftung zwischen den Lagen.

Als eine faserverbundgerechte und effiziente Ausführung zur Anbindung des Blattanschlussbereiches bei hybriden Halbzeugen wurde die Bolzenanbindung identifiziert. Im Zuge dessen wurden verschiedene Integrationsmethoden konzeptioniert, auf ihre Fertigbarkeit hin überprüft sowie an einem 100 mm-Mockup mit T-Bolzenverbindung validiert. Die technische und wirtschaftliche Analyse zeigte, dass zum Einbringen der Bohrungen für monolithische und hybride Struktur ein mehrstufiger Prozess aus verschiedenen Fertigungsverfahren zielführend ist.

Im Zuge der Qualitätssicherung konnten an Schliffproben und CT-Aufnahmen die positiven Bauteileigenschaften nachgewiesen werden. Die Auswertung der erfassten Prozess- und Bauteilgrößen in Bezug auf die geforderten Sollwerte bestätigte zudem die Baueilintegrität und die Übertragbarkeit des Fertigungskonzept für den industriellen Maßstab.

Basierend auf den Auslegungen von TECOSIM an einem 86 m Blatt kann durch den Einsatz von FM-Laminaten im Wurzelbereich das Blattgewicht um 1% gesenkt werden. Gleichzeitig verursacht dies Mehrkosten in Höhe von 7%. Die reine Gewichtseinsparung im Wurzelbereich bzw. Blatt ist hierbei aber nicht die avisierte Zielgröße. Vielmehr sind die damit einhergehenden Sekundäreffekte zu beachten. So reduziert sich die Wandstärke des Wurzeleinlegers durch den Einsatz von FM-Laminaten um 20% und führt zu einem geringeren Blattwurzeldurchmesser, in dessen Folge die Nabe deutlich kompakter ausgeführt und dessen Masse (Gussbauteil) minimiert werden kann. In gleicher Weise betroffen sind hiervon die Verbindungselemente, welche in ihrer Dimensionierung bzw. Anzahl verringert, werden können. Weitere positive Folgen finden sich beim Transport sowie Aufbau der Anlagen.

Bei der leistungsfähigeren Ausführung des Wurzeleinlegers als hybride FML-Variante, wird ein Anteil von 30gew.-% an Metalllagen angenommen. Hierdurch reduziert sich der Anteil des Faserhalbzeug um weitere 10%. Demgegenüber stehen aktuell jedoch um den Faktor 20 höhere Kosten bei den erforderlichen Metalllagen (~100€/kg, inkl. Präparation und Zuschnitt) im Vergleich zu den Materialkosten des reinen FVK-Verbundes (~5€/kg). Im Kostenvergleich machen die Metalllagen so 90% der Gesamtmaterialkosten aus.

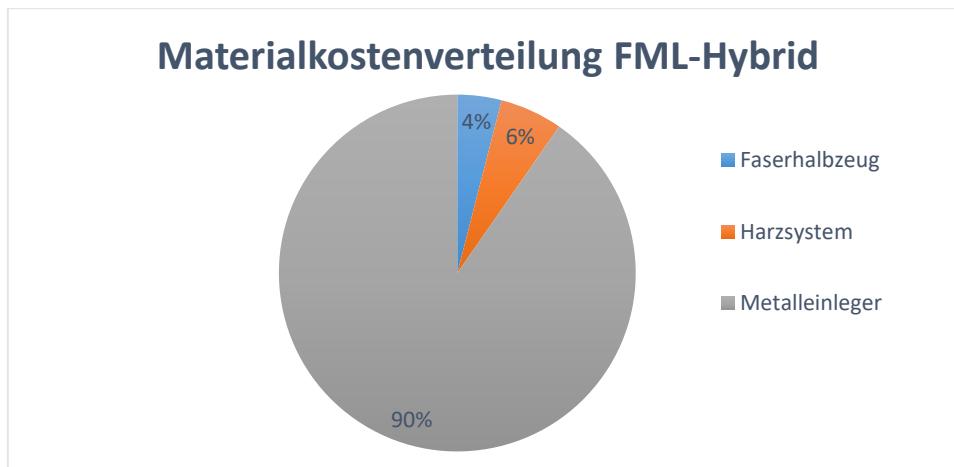


Abbildung 41: Auswertung der Materialkostenverteilung für den segmentierten Blattwurzeleinleger in FML-Hybrid-Ausführung

Die Kosten für den FML-Hybriden Wurzeleinleger liegen damit um den Faktor 6 bis 7 höher als bei der Referenz (reine GFK-Bauweise). Eine detaillierte Aufschlüsselung zu den Einzelkosten findet sich beim Projektpartner DLR, die sich vorrangig mit der Vorbehandlung, Lagerung und Handhabung der Metalllagen beschäftigt haben. Für das Einbringen der Bohrungen in die Metalllagen wurde innerhalb des Projektes auf das zerspanende Bohren zurückgegriffen. Dies ermöglichte eine Anfertigung bei INVENT, die aus der Bestimmung der

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

optimalen Prozessparameter für die anschließenden Versuchsreihen und Iterationen der Tränkung resultierten. Am Markt stehen für das Einbringen der finalen Lochgeometrie automatisierte und hochindustrialisierte Verfahren, wie etwa das Laserbohren oder Stanzen zur Verfügung. Die Kosten durch die spanende Bearbeitung können hierdurch mindestens halbiert werden. Des Weiteren konnte für die Vorbehandlung ein alternatives Reinigungs- und Auftragsverfahren identifiziert werden, welches durch einen hohen Grad an Automatisierung und vereinfachte Lackbeschichtung die Kosten der Metalllagen um den Faktor 10 reduziert. Diese materialseitige Kostensenkung führt dazu, dass die Mehrkosten des hybriden Wurzeleinleger gegenüber der Referenz sich auf den Faktor 1,4 verringert.

Zu vernachlässigen sind demgegenüber die Arbeitskosten. Hier heben sich die Aufwände der Teilprozessschritte untereinander auf. So werden Mehraufwände bei Lagerung, Handling und Ablegen für zwei verschiedene Materialtypen: Faserhalzeug und Metallfolie durch einen geringeren Cutter Bedarf, sowie vorkonfektionierte Halbzeug in Form zugeschnittener, gelochter und beschichteter Metalllagen ausgeglichen. Für Verbrauchsmaterialien und Tätigkeiten bei Vakuumaufbau und Tränkung ergibt sich durch den Materialwechsel kein Unterschied. Durch die von INVENT erarbeiteten Strategien und Technologien zur Tränkung, Aushärtung sowie der Prozess- und Qualitätssicherung wurde der Nachweis erbracht, dass bei hybriden Materialaufbauten der zeitliche Fertigungsaufbau identisch ist. Im Bereich der mechanischen Nachbearbeitung (Zuschnitt und Zerspanung) steigt durch die Metalllagen der zeitliche Aufwand um Faktor 5. Wie im Projekt nachgewiesen, kann dies jedoch durch den Einsatz des Wasserstrahlschneidens in einem mehrstufigen Prozess kompensiert werden.

Neben den zuvor beschriebenen Ergebnissen wurden im Bereich hybrider Laminate auch bei den anderen Projektpartnern viele Erkenntnisse und Ergebnisse erzielt, die im Folgenden zusammengefasst werden, um eine gemeinsame Bewertung der Wertschöpfungskette und Beurteilung der Wirtschaftlichkeit vorzunehmen.

Die im Verbundprojekt entwickelten Methoden zur Simulation des Lebensdauerschädigungsverhaltens (ISD) konnten erfolgreich auf die hybriden Laminate (CFK-GFK, GFK-Metall) angewendet und mittels experimenteller Tests (IWES und DLR) validiert werden. Auch die von TECOSIM entwickelten FML-Detailmodelle zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den Testergebnissen der Partner. Die Materialmodelle erlauben somit das strukturmechanische Verhalten sehr gut zu beschreiben. Folglich stehen jetzt für die Auslegung von Faserverbundstruktur aus hybriden Materialien leistungsfähige Modelle zur Verfügung, die ein zeitnahe und kosteneffizientes Strukturdesign mit lokaler Hybridisierung ermöglichen.

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

Die Herstellung von dicken GFK-Metall-Hybridlaminaten, wie sie im Rotorblattwurzelbereich eingesetzt werden sollen, stellt spezielle Anforderungen an den Fertigungsprozess. Für die schnelle Infusion über die Bauteildicke sind perforierte Metallfolien in Kombination mit einem wirkungsvollen Angusskonzept erforderlich. Im Rahmen umfangreicher Vorversuche und Optimierungsschritte konnten bei der INVENT die Prozessparameter für ein ideales Lochbild der Metallfolien sowie zugehöriger Angussstrategien ermittelt werden. Das DLR hat hierzu ein Infusionsmodell entwickelt und experimentell validiert, so dass der Infusionsprozess in Abhängigkeit der Lochbilder besser verstanden wird. Dadurch ist es gelungen GFK-Metall-Hybrid-Bauteile mit großen Laminatdicken, wie sie im Segmentierungsbereich großer Blätter oder im Wurzelbereich von Rotorblättern auftreten, herzustellen. Anhand ausgewählter Demonstratoren konnte INVENT die Einsatzfähigkeit der Fertigungstechnologie erfolgreich nachweisen.

Darüber hinaus ist es dem DLR gelungen die Prozessschritte zur Oberflächenvorbehandlung der Metallfolien zu optimieren, so dass die Fertigungseffizienz gesteigert wird. Insbesondere die Laserablation bietet im Vergleich zum bisher etablierten Sandstrahlprozess ein großes Potenzial. Des Weiteren konnte für die Lagerstabilität der Oberflächenvorbehandlung (Sol-Gel) der Nachweis erbracht werden, dass diese für den industriellen Einsatz völlig ausreichend ist (Lagerstabilität: > fünf Monate). Auch die Untersuchung von variierenden Umwelteinflüssen (Temperatur und Feuchtigkeit) auf die statischen Lochleibungskennwerte von GFK-Metall-Laminaten zeigten, dass die Hybridlaminate ihre Vorteile gegenüber den monolithischen FKV behaupten oder sogar ausbauen. Allerdings zeigten zyklische Lochleibungsversuche an Komponenten unter Normalbedingungen am IWES, dass FML-Proben auf Strukturebene vermutlich eine etwas geringere Leistungsfähigkeit haben als das GFK-Referenzmaterial. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den vom DLR im Vorgängerprojekt LENAH durchgeführten Tests. Die genauen Mechanismen hierzu sind nicht bekannt und konnten innerhalb dieses Projektes nicht näher analysiert werden. Hier bedarf es zusätzlicher Detailuntersuchungen, um die Wirkmechanismen und Einflussfaktoren besser zu verstehen. Das IWES hat zudem intensiv den Einfluss von Schäftsverbindungen an CFK-GFK Hybriden analysiert. Der Einfluss verschiedener geometrischer Parameter konnte auf Couponebene untersucht, bewertet und anschließend Verbesserungsmaßnahmen hinsichtlich der Fertigung als auch der Geometrie auf Komponentenebene erfolgreich abgesichert werden. Hierbei konnte der negative Einfluss von Stufenabsätzen durch nicht auf null geschliffene Schäfte, die zunehmende Festigkeit mit dem höheren Schäftsverhältnis als auch der sehr positive Effekt von Deck- bzw. Zwischenlagen auf die Streuung der statischen Ergebnisse wie auch auf die Fatigue-Resistenz nachgewiesen werden.

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Materialentwicklung, zu den Verfahrenstechniken und den Auslegungsmodellen der hybriden Laminate (CFK-GFK und GFK-Metall) führen zu einer grundlegend positiven Kosten-Nutzen-Analyse für den industriellen Einsatz. Eine umfassende Bewertung ist an dieser Stelle aber schwer durchführbar. Ursache dafür ist die Komplexität des Systems (Windenergieanlage), sich gegenseitig beeinflussende Designentscheidungen und unbekannte oder schwer quantifizierbare Kostengrößen (Personal, Anlagen, Energie etc.).

Die vielfältigen Eigenschaftsverbesserungen der Hybridlaminate im Vergleich zum Referenzwerkstoff eröffnen Verwertungsperspektiven in der Windindustrie. Mögliche Einschränkungen würden sich ergeben, wenn die leicht reduzierten Ermüdungseigenschaften an Komponenten sich in zukünftigen Untersuchungen bestätigen. Weitergehende Untersuchungen zum Verständnis der Mechanismen und zur Materialoptimierung sind erforderlich. Auch über den Windenergiesektor hinaus lassen sich zahlreiche Verwertungsperspektiven finden, z.B. als Strukturauteil und als Drucktank im Automobilbau, der Luftfahrt und dem Schienenverkehr sowie im Sondermaschinenbau (Druckerrollen) und als Brandschutzmaterial (Verringerung von Durchbrand). Des Weiteren sind Anwendungsbereiche interessant, in denen FKV derzeit noch in „getrennter“ Bauweise eingesetzt werden. Denkbar sind FML-Hybride als Anbindungsvarianten, um GFK-Strukturen einfacher, z.B. an Beton oder Stahl, anzubinden.

## MS-Übersicht

Im Folgenden sind die Meilensteine, die der INVENT GmbH direkt zugeordnet sind, aufgeführt. Trotz der im Projektverlauf erfahrenen Widrigkeiten, konnten innerhalb der kostenneutralen Verlängerung alle Meilensteine erfolgreich erreicht werden. Die Darstellung der MS laut Tabelle, sowie die inhaltliche Beschreibung der Arbeiten machen den zeitlich erreichten Fortschritt deutlich.

TAP	Beschreibung Meilenstein / Vorgegebenes Ziel	Erreichtes Ergebnis
1.6, 1.7, 1.8	Erarbeitung eines Konzepts für ermüdungsarme nanomodifizierte strukturelle Halbzeuge im Rotorblatt abgeschlossen	<b>Meilenstein erreicht</b>  Festgestellt im Zwischenbericht 03 (1. HJ 2020)
	Entwicklung eines Fertigungsprozesses für nanomodifizierte strukturelle Halbzeuge unter den Randbedingungen der Rotorblattfertigung abgeschlossen	<b>Meilenstein erreicht</b>  Festgestellt im Zwischenbericht 08 (2. HJ 2022)
1.9, 1.10	Materialprüfung auf Couponebene zur Qualitäts- und Prozesssicherung abgeschlossen	<b>Meilenstein erreicht</b>  Festgestellt im Zwischenbericht 08 (2. HJ 2022)
	Analyse des Rotorblatts bezüglich geeigneter Integrationsschnittstellen abgeschlossen	<b>Meilenstein erreicht</b>  Im ersten Quartal 2023
3.7	Analyse verschiedener Rotorblätter, insbesondere der dynamisch stark beanspruchten Bereiche abgeschlossen.	<b>Meilenstein erreicht</b>  Im ersten Quartal 2023
	Herausarbeiten der Unterschiede und branchentypischer Gemeinsamkeiten abgeschlossen.	<b>Meilenstein erreicht</b>  Im ersten Quartal 2023
4.7, 4.8	Technische und wirtschaftliche Bewertung	<b>Meilenstein erreicht</b>  Festgestellt im Abschlussbericht

		<b>Meilenstein erreicht</b> Festgestellt im Zwischenbericht 03 (1. HJ 2020)
5.6, 5.7, 5.8, 5.9	Erarbeitung eines Konzeptes zur Herstellung von vorimprägnierten GFK-Metall-Hybrid-Einlegern zur Verbesserung der Lagerfähigkeit abgeschlossen.	<b>Meilenstein erreicht</b> Festgestellt im Zwischenbericht 03 (1. HJ 2020)
5.10, 5.11, 5.12, 5.13	Entwicklung und Durchführung eines fertigungsbegleitenden Qualitäts- und Prozesssicherungs-konzeptes inklusive Materialprüfung auf Couponebene abgeschlossen	<b>Meilenstein erreicht</b> Festgestellt im Zwischenbericht 06 (2. HJ 2021)
7.8	Analyse des Rotorblatts bezüglich geeigneter Integrations-Schnittstellen, z.B. Materialübergänge, Werkzeugtrennebenen, Lasteinleitungspunkte etc. abgeschlossen.	<b>Meilenstein erreicht</b> Festgestellt im Zwischenbericht 08 (2. HJ 2022)
8.4, 8.5	Analyse verschiedener Rotorblätter, insbesondere der stark beanspruchten Bereiche abgeschlossen.	<b>Meilenstein erreicht</b> Im ersten Quartal 2023
	Herausarbeiten der Unterschiede und branchentypischer Gemeinsamkeiten abgeschlossen.	<b>Meilenstein erreicht</b> Im ersten Quartal 2023
	Technische und wirtschaftliche Bewertung	<b>Meilenstein erreicht</b> Festgestellt im Abschlussbericht

Tabelle 3: Bilanzierung der Meilensteine

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

## Quellen

- [1] C. Arlt, DLR Forschungsbericht 2010-10, ISSN 1434-8454, 2011
- [2] C. Arlt et al., in: Adaptive, Tolerant and Efficient Composite Structures - Research Topics in Aerospace, M. Wiedemann, M. Sinapius (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 49-58, 2012
- [3] W. Exner et al., Composites Science and Technology, 72(10), 1153-1159, 2012
- [4] T. Mahrholz et al., Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 40(3), 235-243, 2009
- [5] C. M. Munjanuatha et al., Composites Science and Technology, 70, 193-199, 2010
- [6] L. Böger et al., Composites: Part A, 41, 1419-1424, 2010
- [7] M. T. Demirici et al., Composites Part B, 119, 114-124, 2017
- [8] S. A. Ngah et al., Composites: Part A, 80, 292-303, 2016
- [9] Beyland2021 - Hybrid materials and conical bolts for high-strength bolted joints, Lutz Beyland et al., WTBM 2021
- [10] IPT2021 - Anwenderrichtlinie: Scherschneiden von Faserverbundwerkstoffen FVK, 2021
- [11] Rose2016 – Kantenversiegelung, Remote-Laser-geschnittener Faserkunststoffverbunde, Fraunhofer IWS Jahresbericht, 2016
- [12] Fürst2015 - EFFIZIENTE LASERMATERIALBEARBEITUNG VON FASER-KUNSTSTOFF-VERBUNDEN, Fraunhofer IWS Jahresbericht, 2015
- [13] Hufschmied2022 - Wirtschaftliche Zerspanung von CFK mit nanokristallin diamantbeschichteten Werkzeugen, Pressemitteilung Hufschmied, 2022
- [14] IFAM2016 - Hochdruck-Abrasiv- und Rein-Wasserstrahlschneiden von FVK sowie Leichtbaukomponenten, Fraunhofer IFAM, 2016
- [15] Stahlkontor2022 - <https://www.stahlkontor.com/leistungen/schneiden/>, abgerufen: 11.06.2022
- [16] RapidRoot2011 - <https://www.compositesworld.com/articles/3-d-preforms-fast-efficient-blade-root-manufacture>, abgerufen: 02.03.2022
- [17] We4Ce2021 - <https://www.we4ce.eu/en/turnkeysolutions/we4ce-blade-root-connection>, abgerufen: 05.03.2022
- [18] iFeZ2020 - Schlussbericht zum Teilvorhaben Sensorintegriertes Multifunktionswerkzeug zur Prozessoptimierung (SiMP) im Verbundprojekt iFeZ - Intelligentes Formwerkzeug der Zukunft LuFo V-2: 06/2016 – 12/2019: Förderkennzeichen 20W1521E, Braunschweig, 2020

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

- [21] Y. Shan, K. Liao, International Journal of Fatigue 24, 847–859, 2002.
- [22] R. Alderliesten, Fatigue and fracture of fibre metal laminates, 2017, Springer.
- [23] A. Fink, DLR-Forschungsbericht 2010-14, Köln, ISSN 1434-8454, 2010
- [24] M. Ostapiuk et al., Composite Interfaces, 21(4), 309-318, 2014.
- [25] D. Stefaniak et al., ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials, Venice, 2012.
- [26] B. Kolesnikov et al., Journal of Composite Strucutres, vol. 83 no. 4, p. 368-380,2008.
- [27] A. Fink et al., Composites Science and Technology, 70, 305-317, 2010
- [28] J. Haunerding, T. Mahrholz et al.: Composites Science and Technology, 2018 (in progress)
- [29] D. Stefaniak, Improving residual strength of unidirectionally reinforced plastic laminates by metal layering, Doctoral-thesis, Technische Univ. Braunschweig, Germany, 2017.
- [30] M. Peeters, The Concept of Segmented Wind Turbine Blades:A Review, Energies 2017, 10, 1112: doi:10.3390/en10081112; www.mdpi.com

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

### 3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Den größten Umfang haben die Personalkosten eingenommen. Fremdleistungen und Material stellten in diesem Vorhaben den geringeren Anteil dar.

### 4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund des neuartigen Ansatzes FVK-Bauteile für die industrielle Anwendung des Rotorblattleichtbau mit modifizierten Werkstoffsystem zu kombinieren oder als Hybridmaterial auszuführen, bedurfte es eines erheblichen finanziellen Aufwandes für die vorwettbewerbliche Entwicklung. Das Vorhaben war mit hohem technischem und unternehmerischem Risiko versehen, da die Entwicklung, Skalierung und Prüfung der beiden Systeme für den Anwendungsfall kein typisches Einsatzszenario seitens der industriellen Umgebung bei INVENT darstellt. Neben der Abhängigkeit von in der Entwicklung befindlichen Dienstleistungen und Materialien sind überdies hinaus praxisrelevante Fertigungsaspekte und die in Wechselwirkung stehenden Materialverhalten unter realitätsnahen Einsatzbedingungen abzubilden. Die Funktionalität des fertigungstechnischen Gesamtsystems hängt zudem in sehr komplexer Weise von den Einzelkomponenten und -prozessen ab.

Die allein auf Eigenmittel gestützte In-House Entwicklung war dadurch für ein Unternehmen mit der Größe der INVENT GmbH nicht möglich, so dass das Entwicklungsvorhaben einer zusätzlichen Förderung bedurfte. Durch das Projekt wurde ein Technologievorsprung erarbeitet. Zusätzlich wurde damit eine anwendungsbezogene, industrielle Grundlage geschaffen. Die erreichten Projektergebnisse leisten aufgrund ihres innovativen Charakters einen Beitrag zum technisch-wissenschaftlichen Fortschritt. Zu deren Erreichung wurde das veranschlagte Kostenbudget vollständig ausgeschöpft.

### 5 Nutzen, Verwertbarkeit (fortgeschriebener Verwertungsplan)

#### 5.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Mit der Förderung des Projektvorhabens HANNAH durch den Projektträger Jülich (PtJ) konnte das Konsortium die Herausforderungen bei der industriellen Anwendung von nanomodifizierten und hybriden Werkstoffsystem im Rotorblattleichtbau erfolgreich bearbeiten.

Das Hauptziel im Projekt konnte mit der Erarbeitung von industrieller Fertigung von nanomodifizierten und hybriden Halbzeugen mit Qualitäts- und Prozesssicherung im Projektverlauf erreicht werden. Das leistungsbezogene Gewicht konnte besonders in der Materialklasse der FML nachgewiesen werden und ist ein bedeutender Schritt für den Einsatz

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

dieser Technologie in der Windenergiebranche. Die anwendungsorientierte Entwicklung und Erprobung geeigneter Werkstoffe hat dazu beigetragen, dass sich die Entwicklungsmöglichkeiten der INVENT GmbH für die zukünftigen Anwendungen in diesem Markt erhöhen werden.

Dadurch, dass die Konzepte sowohl für die metallischen Einleger als auch für das nanoverstärkte Harzsystem auf die technischen Kapazitäten der INVENT GmbH beruhen, ist eine seriennahe Fortführung der Entwicklung der Segmentbauweise möglich. Die Bauweise beider Konzepte beruhen auf den gleichen Grundabmessungen. Somit ist auch hinsichtlich des Aspektes von Investitionen für eine anschließende Produktentwicklung eine kostengünstige Verwertung der Projektergebnisse in beiden Bauweisen grundlegend möglich.

Eine kurzfristiges Verwertungsziel soll durch die Fortführung der Arbeiten mit dem Ziel des Erreichens eines höheren technologischen Reifegrades erreicht werden. Hierzu werden momentan Abstimmungen zu Folgeaktivitäten durchgeführt. Ein Nachfolgeprojekt, welches sich mit der Zustandsüberwachung von Fügestellen an Rotorblättern befasst, konnte bereits aus dem Projektkonsortium heraus akquiriert werden, so dass eine gute Basis für die weitere Zusammenarbeit besteht und weitere technische Aspekte erarbeitet werden können.

Mittelfristiges Verwertungsziel ist die Verbesserung der Wettbewerbsposition durch Kompetenzgewinn. Durch die erarbeiteten neuartigen Fertigungstechnologien konnten neue Erkenntnisse gewonnen werden, die für zukünftige Aktivitäten genutzt werden können. Konkret benannt werden können diese Aktivitäten derzeit noch nicht, jedoch zeichnet sich in jüngster Vergangenheit ab, dass die durch unsere Kunden angefragten Bauteile an Größe und Komplexität zunehmen. Beispielsweise wurden aus den Bereichen Luftfahrt, Raumfahrt und allgemeiner Industrie jeweils flächige und rohrartige Strukturen angefragt, die sich durch große Durchmesser (1.800 mm und mehr), große Betriebsdrücke (bis zu 600 bar), extreme Temperaturanforderungen, hohe Belastbarkeit und/oder weitere Aspekte auszeichnen.

Als langfristige Zielsetzung wird die Etablierung der nanomodifizierten Werkstoffe und GFK-Metallhybride in bestehende und neue Produkte und die Erschließung der Windenergiebranche als neuen Markt angestrebt, wodurch wir uns eine Erweiterung des Produktpportfolios erwarten.

## 5.2 Wissenschaftliche / technische Erfolgsaussichten

Auch wenn das leistungsbezogene Gewicht bei den nanopartikelverstärkten Materialsystemen nicht nachgewiesen werden konnte, so ist der Erkenntnisgewinn der Infusionen mit Nanoharzsystemen als strategisch wichtig anzusehen. Mittels der durchgeföhrten Analysen

 INVENT	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
--	--	--

und Versuche ist es INVENT möglich diese qualitätssicher bis zu einer Wandstärke von 3 cm und mehr zu verarbeiten und einzusetzen. Limitierender Faktor ist aktuell die Verfügbarkeit geeigneter Anlagentechnik für eine kontinuierliche Bereitstellung und in-situ Verarbeitung der modifizierten Harzsysteme. Diese vorausgesetzt ist eine weitere Skalierung möglich, um sie der Windkraftindustrie zu Verfügung zu stellen.

Darüber hinaus sind die entwickelten Infusionskonzepte entscheidend, um auch Großkomponenten effizient zu fertigen. Im Projekt wurden hierfür Prozessmesstechniken entwickelt sowie weitere Qualitäts- und Prozesssicherungsmaßnahmen identifiziert, um Fertigbarkeit und Bauteilqualität von großen bzw. dickwandigen Komponenten und deren Skalierung nachzuweisen. Die geschickte Kombination von erfassten Sensordaten und bereitgestellter Simulationsmethoden der Projektpartner ermöglichte hierdurch die Bewertung der entwickelten Prozesse und Technologien hinsichtlich ihrer grundlegenden Eignung, Übertragbarkeit und Skalierbarkeit. Dadurch kann die INVENT abschließend ihr Angebotsportfolios in der Windenergiebranche erweitern. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse auch für Anwendungen in den bereits bedienten Branchen genutzt werden, beispielsweise bei der Fertigung besonders großer Strukturen für die Luft- und Raumfahrt.

### 5.3 Wissenschaftliche / technische Anschlussfähigkeit

Die enge Verzahnung der Forschungspartner mit den Industriepartnern stellt eine praxisrelevante Entwicklung sicher und gewährleistet eine vollständige Abwicklung der Prozesskette. Zum jetzigen Stand sind für spätere Ausbaustufen und Erweiterungen zusätzliche Partner nötig, um die Kosten zu senken. Darüber hinaus können die im Vorhaben entwickelten Materialien, Verfahrenstechniken und Auslegemethoden auch auf andere Industriezweige wie Verkehr oder Luftfahrt übertragen werden, in denen die Projektpartner ebenfalls aktiv sind.

Durch die geplante sowie bereits erfolgreich erfolgte Akquise von Nachfolgeprojekten mit den im Konsortium vertretenen Partnern kann die Zusammenarbeit intensiviert werden. Zusätzlich konnte das Interesse auch auf europäischer Ebene adressiert werden, sodass INVENT unter anderem an der Weiterentwicklung der Modularität von Windkraftanlagen arbeitet und die hier gewonnenen Erkenntnisse umsetzen kann.

Die Firma INVENT plant weiterhin, die Etablierung als Spezialist für Hochleistungszuliefererprodukte fortzuführen. Hierbei strebt INVENT nicht nur die Erarbeitung leistungsfähigerer Halbzeuge als Zulieferprodukt in dem Marktsegment der Windenergie an. Vielversprechend ist auch, die neu erarbeiteten Verfahren und Technologien in andere Geschäftsfelder zu übertragen. In der Luft- und Raumfahrt, den Kerngeschäftsfeldern von

 <b>INVENT</b>	<b>Sachbericht: HANNAH</b> <b>Förderkennzeichen: 0324345D</b>	Dok-Nr.: 300396-AB-01 Datum: 23.11.2023 Verfasser: OPMA Version.: A
---	--	--

INVENT, sind im Bereich neuartiger und hochbelasteter Strukturen viele Fragen noch nicht abschließend beantwortet. Weitere industrielle Anknüpfungen werden deshalb im Bereich der robusten Leichtbaustrukturen für den Anlagenbau nach Projektende verfolgt. Somit erschließt sich INVENT einerseits den Zugang zu einem neuen Marktsegment und stützt andererseits die auszubildende Wertschöpfungs- und Zuliefererkette.

Es wurden keine Erfindungen oder Schutzanmeldungen vom Zuwendungsempfänger angemeldet.

## 6 Externer Fortschritt auf dem Gebiet

Im Bearbeitungszeitraum fand die Teilnahme an verschiedenen Veranstaltungen und Konferenzen, wie etwa dem Composite United e.V. zum Thema „Disruptive manufacturing of large-scale composites“ statt. Relevante F&E-Ergebnisse von Seiten Dritter sind hieraus im Berichtszeitraum nicht bekannt geworden.

## 7 Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 5 der NKBF

Seitens des Teilvorhabens wurden die Ergebnisse nicht eigenständig durch die INVENT GmbH publiziert. Allerdings konnte die INVENT GmbH mit ihren Arbeiten einen Beitrag zum 2022 durch den Projektpartner IWES eingereichten Paper: „Experimental validation of a residual stress hypothesis for bond lines in thick adhesive joints“ zur ECCM20 leisten.

Die Präsentation der Ergebnisse soll weiterführend über Messen (WindEnergy Hamburg, Hannover Messe) einem breiten Publikum zugänglich gemacht werden. Bei der INVENT GmbH liegen für potenzielle Anwender und Interessenten alle Funktionsmuster sowie erzeugte Prozesstechnologien und Qualitätssicherungsmethoden bereit.

# Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b> Nicht anwendbar	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht
<b>3. Titel</b> Abschlussbericht der INVENT GmbH zum Verbundprojekt HANNAH Akronym:HANNAH Verbundvorhaben: Herausforderungen der industriellen Anwendung von nanomodifizierten und hybriden Werkstoffsystemen im Rotorblattleichtbau Teilvorhaben: Methoden zur industriellen Fertigung von nanomodifizierten und hybriden Halbzeugen mit Qualitäts- und Prozesssicherung	
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Opitz, Mark Wonneberger, Mai	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 30.04.2023
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b> 27.10.2023
	<b>7. Form der Publikation</b> Sonstiges
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> INVENT Innovative Verbundwerkstoffe Realisation und Vermarktung neuer Technologien GmbH Christian-Pommer-Straße 47 38112 Braunschweig	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b> 300396-AB
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 0324345D
	<b>11. Seitenzahl</b> 62
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	<b>13. Literaturangaben</b> 30
	<b>14. Tabellen</b> 3
	<b>15. Abbildungen</b> 41
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b> Keine Angaben	
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b> Nicht anwendbar	
<b>18. Kurzfassung</b> Im Projekt HANNAH wurden die in LENAH entwickelten Werkstofftechnologien vom Entwicklungsstadium TRL-3 auf TRL-5 angehoben, um ihre industrielle Anwendung voranzutreiben. Basierend auf den bereits durchgeführten experimentellen Konzeptnachweisen war das Ziel, die Technologien in relevanten, industrienahen Umgebungen zu validieren. Für die nanomodifizierten und hybriden Materialsysteme lag der Fokus auf industriellen Randbedingungen in der Produktion und im betrieblichen Einsatz von Windkraftanlagen. In der Fertigung waren insbesondere Fragen der Skalierbarkeit, Zeit- und Kosteneffizienz in der Produktion entscheidend. Im Betrieb hingegen galt es, den Einfluss von Bewitterung und Alterung auf die statischen und zyklischen Eigenschaften der neuen Werkstoffsysteme zu untersuchen. Darüber hinaus war ein effizientes KostenNutzen-Verhältnis für die Rotorblatterstellung mit nano-modifizierten oder hybriden Laminaten wichtig, um signifikante Kostenvorteile gegenüber aktuellen Designkonzepten zu erzielen. Um die Machbarkeit der entworfenen Fertigungskonzepte im industriellen Maßstab nachzuweisen, wurden für jede entwickelte Werkstofftechnologie Bauteilversuche durchgeführt. Diese Tests konnten auch durch ein realistisches Belastungsszenario charakterisiert werden. Darüber hinaus wurden unter Nutzung des Fertigungs-Know-hows neuartige Konzepte zur Segmentierung von Rotorblattwurzeln entwickelt. Neben dem Wissenstransfer über die Einsatzmöglichkeiten von nano-modifizierten und hybriden Werkstoffsystemen (FML - Faser-Metall-Laminate) für Rotorblätter von Windkraftanlagen wurden neue Marktsegmente für die Industriepartner identifiziert.	
<b>19. Schlagwörter</b> Windenergie, Rotorblatt, FVK, Fertigung, Fiber Metal Laminate, FML, Nanopartikel, Prozesskontrolle	
<b>20. Verlag</b> Nicht anwendbar	<b>21. Preis</b> Nicht anwendbar

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2141717-7

## Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b> Not applicable	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)	
<b>3. title</b> Abschlussbericht der INVENT GmbH zum Verbundprojekt HANNAH Akronym: HANNAH Verbundprojekt: Herausforderungen der industriellen Anwendung von nanomodifizierten und hybriden Werkstoffsystemen im Rotorblattleichtbau Teilprojekt: Methoden zur industriellen Fertigung von nanomodifizierten und hybriden Halbzeugen mit Qualitäts- und Prozesssicherung		
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Opitz, Mark Wonneberger, Mai	<b>5. end of project</b> 30.04.2023	<b>6. publication date</b> 27.10.2023
<b>7. form of publication</b> Document Control Sheet		
<b>8. performing organization(s) name, address</b> INVENT Innovative Verbundwerkstoffe Realisation und Vermarktung neuer Technologien GmbH Christian-Pommer-Straße 47 38112 Braunschweig	<b>9. originators report no.</b> 300396-AB	<b>10. reference no.</b> 0324345D
<b>11. no. of pages</b> 62		
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	<b>13. no. of references</b> 30	<b>14. no. of tables</b> 3
<b>15. no. of figures</b> 41		
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b> Not applicable		
<b>17. presented at (title, place, date)</b> Not applicable		
<b>18. abstract</b> In the HANNAH project, the material technologies developed in LENAH were brought from the TRL-3 development stage to TRL-5 in order to advance their industrial application. Based on the experimental proofs of concept already carried out, the aim was to validate the technologies in relevant, industry-oriented environments. For the nano-modified and hybrid material systems, the focus was on industrial boundary conditions in the production and operational use of wind turbines. In manufacturing, questions of scalability, time and cost efficiency in production were particularly decisive. In operation, on the other hand, the influence of weathering and aging on the static and cyclic properties of the new material systems had to be investigated. In addition, an efficient cost-benefit ratio for rotor blade production with nano-modified or hybrid laminates was important to achieve significant cost advantages over current design concepts. To demonstrate the feasibility of the manufacturing concepts designed on an industrial scale, component tests were carried out for each material technology developed. These tests could also be characterised by a realistic loading scenario. In addition, novel concepts for the segmentation of rotor blade roots were developed using the manufacturing expertise. In addition to the transfer of knowledge on the potential uses of nano-modified and hybrid material systems (FML - fibre-metal laminates) for wind turbine rotor blades, new market segments were identified for the industrial partners.		
<b>19. keywords</b> Hybrid materials, wind turbines, nano-resin systems, fibre-metal laminates, FML, production process, process control		
<b>20. publisher</b> Not applicable	<b>21. price</b> Not applicable	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2141724-6