

## Schlussbericht (Veröffentlichung)

<b>ZE:</b> EXAKT – Advanced Technologies GmbH	<b>Förderkennzeichen:</b> 03INT504BC
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> COMP-1633 – Flame retardant FRP systems for aircraft interior applications	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2017 – 30.03.2021, inkl. einer kostenneutralen Verlängerung von 6 Monaten	
<b>Berichtszeitraum:</b> Schlussbericht	

Erstellt von: Alexander Brouschkin, Ulf Köpke

Datum: 29.10.2021

*Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03INT504BB gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.*



Unterschrift

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Inhaltsverzeichnis:

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>- 3 -</b>
1.1	Aufgabenstellung.....	- 3 -
1.2	Voraussetzungen .....	- 4 -
1.3	Planung des Vorhabens .....	- 4 -
1.3.1	Arbeitspakete .....	- 5 -
1.3.2	Meilensteine.....	- 7 -
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	- 8 -
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	- 9 -
	Literaturverzeichnis.....	- 10 -
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung der Ergebnisse</b> .....	<b>- 11 -</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	- 11 -
2.1.1	Arbeitspaket 2: Materialauswahl.....	- 11 -
2.1.2	Arbeitspaket 2: Erste Machbarkeitsversuche.....	- 13 -
2.1.3	Arbeitspaket 2: Versuche mit Nanocellulose (vertraulich).....	- 18 -
2.1.4	Arbeitspaket 5: DirectPreg-Prozesskonfiguration .....	- 18 -
2.1.5	Arbeitspaket 5: Imprägnier-Prozesskonfiguration .....	- 21 -
2.1.6	Arbeitspaket 5: Konstruktion eine Pilotanlage (vertraulich).....	- 23 -
2.1.7	Arbeitspaket 5: Prozessoptimierung an der Pilotanlage .....	- 27 -
2.1.8	Arbeitspaket 7: DirectPreg-Prozessauswertung und Optimierung .....	- 31 -
2.1.9	Arbeitspaket 6: Demonstratorbau.....	- 35 -
2.1.10	Arbeitspaket 10: Internationalisierung des Clusters „Hamburg Aviation“ .....	- 35 -
2.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	- 35 -
2.3	Notwendigkeit der geleisteten Arbeit .....	- 36 -
2.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	- 36 -
2.5	Veränderung des technologischen Status quo im Vorhabenzeitraum.....	- 36 -
2.6	Veröffentlichungen .....	- 36 -
<b>3</b>	<b>Anlage</b> .....	<b>- 38 -</b>



## 1 Kurzfassung

### 1.1 Aufgabenstellung

Die Entwicklung von neuen, innovativen flammhemmenden Faser-Kunststoff-Verbund-Leichtbauwerkstoffen für dem Einsatz im Flugzeuginnenraum und deren Herstellungstechnologien ist aus ökologischer, industrieller und sicherheitstechnischer Sicht von grundlegender Bedeutung.

Im Zuge der weltweiten Bemühungen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs und der Emission von Treibhausgasen, stehen zunehmend die Industrie und der Verkehrssektor in der Pflicht. In der Luft- und Raumfahrt und der Zulieferindustrie sollen diese Ziele vor allem durch Gewichtsreduzierung, geringeren Kraftstoffverbrauch und Effizienzsteigerung in den zugrunde liegenden Produktionsprozessen erreicht werden. Betrachtet man die Anstrengungen, die unternommen werden, um ein einziges Kilogramm in einem Flugzeug einzusparen, spiegelt dies die Notwendigkeit, aber auch die Komplexität solcher Aufgaben wieder, da hier eine Vielzahl von Themen und Anforderungen berücksichtigt werden müssen, sich aber auch ein enormes Potenzial der Kosteneinsparung im laufenden Betrieb bietet.

Eine verbreitete Methode zur Gewichtseinsparung ist die Substitution von herkömmlichen Leichtbaumaterialien (Aluminium und Titan) durch Polymere und Faserverbundwerkstoffe in Strukturbauteilen und dem Flugzeuginnenraum. Die heutzutage in Flugzeug-Innenräumen eingesetzten Faserverbund-Bauteile unterliegen strengen Anforderungen hinsichtlich ihrer FST-Eigenschaften. Als polymere Matrixmaterialien werden daher Phenolharze oder mit halogenbasierten Flammschutzmitteln modifizierte Kunststoffmaterialien eingesetzt. Diese halogenmodifizierten Materialien sowie Phenoplaste bieten einen sehr guten Flammschutz und schlechte Brennbarkeit, jedoch werden in der Verarbeitung, während des Einsatzes in der Anwendung und im Brandfall teils hochgiftige Stoffe (Halogenradikale, Phenol, Formaldehyd) freigesetzt. Die Verwendung dieser Materialien wird deshalb zunehmend durch politische Verordnungen wie z.B. die EU-Chemikalienverordnung REACH reglementiert und untersagt. Auch gestaltet sich die Verarbeitung dieser Materialien in effizienten, automatisierten Verarbeitungsprozessen aufgrund der Schadstoffexposition teilweise schwierig, sodass aufwändige manuelle Prozesse wie beispielsweise das Handlaminieren bei der Faserverbundfertigung angewendet werden müssen. Des Weiteren besitzen beispielsweise Phenoplaste reaktionsbedingt nur niedrige mechanische Eigenschaften im Vergleich zu zahlreichen anderen Kunststofftypen. Es ist daher notwendig neue flammresistente Kunststoffe sowie neue Flammschutzmittel mit der Eignung für die Modifikation von Polymeren zu entwickeln, zu testen und für die Verwendung in Luftfahrt-Anwendungen zu zertifizieren. Auch bietet dies die Gelegenheit passende, energieeffiziente und zum Zweck einer besseren Wirtschaftlichkeit automatisierbare Prozesse zu entwickeln, in denen die flammwidrigen Materialien verarbeitet werden können.

Aufgrund der typischen Struktur und Zusammensetzung aktueller Bauteile des Flugzeuginnenraums (sie bestehen z.B. aus Paneelen, Profilen, Verbindungselementen) kommen viele verschiedene Fertigungstechniken zum Einsatz. Im Zuge des Projekts werden verschiedene Herstellungsverfahren (SMC-Heißpressen, Prepreg-Imprägnierung/Heißpressen, Pultrusion) an die anspruchsvolle Herstellung FST-optimierter Flugzeug-Innenraumteile angepasst und weiterentwickelt.

Im Falle des Unterprojekts DirectPreg wird ein neuartiger Prozess zur Herstellung von Faserverbundbauteilen aus Prepregs entwickelt. Im herkömmlichen Herstellungsprozess



von Prepregs wird eine Endlosbahn aus entsprechenden Fasermaterial mit einem Harzsystem imprägniert, zwischen Trägerpapier aufgerollt, zur Erhaltung der Lagerfähigkeit eingefroren, bei Bedarf aufgetaut, in die nötige Form zugeschnitten, zu einem Laminat gestapelt und anschließend ausgehärtet. Der DirectPreg-Prozess sieht den Wegfall der Tiefkühlagerung vor, da direkt am Laminierplatz das Prepreg hergestellt wird, und verlegt das Zuschneiden in die nötige Form vor das Imprägnieren. Dadurch können die Eigenschaften der einzelnen Prepreglagen flexibel angepasst werden.

Das Ziel von DirectPreg ist die Entwicklung eines neuartigen Prozesses zur Herstellung von Faserverbundbauteilen. Wobei endkonturnah zugeschnittene trockene Halbzeuge in einer neuentwickelten Pilotanlage imprägniert werden ohne Lagerzeit direkt vor Ort verarbeitet werden können.

EXAKTs Ziele:

- Konzeptionierung, Konstruktion und technische Umsetzung einer Pilotanlage zur Realisierung der Imprägnierung von endkonturnah zugeschnittenen textilen Halbzeugen.
- Sammeln von Erfahrung und Unterstützung der Projektpartner bei der Entwicklung von FST-Harzsystemen, welche durch Dispergierung von Partikeln entstehen.

## 1.2 Voraussetzungen

EXAKT hat eine weitreichende Expertise im Bereich Entwicklung, Bau und Vertrieb von Dreiwalzwerken für diverse Anwendungen. Der Dreiwalzwerkprozess wird standardgemäß bei der Herstellung von qualitativ hochwertigen Druckpasten und -tinten für siliziumbasierende Photovoltaik, Dey Solar Cells, Sensoren, Loten und modifizierter Harzsysteme z.B. für FST oder ESD eingesetzt. Die Walzwerke sind für die zahlreichen und unterschiedlichen Märkte sehr flexibel einstellbar. Für die Anwendung als Imprägnierwalzwerk im Unterprojekt DirectPreg betritt EXAKT Neuland. Gleichzeitig ermöglicht die Prozesssteuerung des Dreiwalzwerkprozesses eine Steuerung des Imprägnierprozesses und so bessere Einblicke in die Funktionsweise des Prozesses.

Mit Hilfe der Projektpartner CompriseTec und TUHH konnte im Zuge des Projektes das nötige Verständnis für den DirectPreg-Prozess und den Imprägnierprozess im Besonderen erarbeitet werden. Das tiefe Verständnis der Anforderungen und das vorhandene Know-How der Walzwerktechnologie erlaubten es eine Pilotanlage zu entwickeln und diese in eine Produktionszelle einzubinden.

Während der Projektlaufzeit fanden zahlreiche personelle Wechsel in der Entwicklungsabteilung statt. Die Einarbeitung der neuen Mitarbeiter führte zur Verzögerung des Projektablaufs, sodass die Projektlaufzeit um 6 Monate verlängert werden musste.

Anfang 2020 begann die Covid-19 Pandemie. EXAKT musste aufgrund eines schlechten Auftragseingangs Mitarbeiter in Kurzarbeit schicken. Diese Verzögerung konnte jedoch ausgeglichen werden.

## 1.3 Planung des Vorhabens

EXAKT ist operativ beim Unterprojekt DirectPreg beteiligt. Die Allgemeine Aufgabe besteht in der Konstruktion und fertigungstechnischen Umsetzung eines Imprägnierwalzwerks. Die betreffenden Arbeitspakete sind 2.8, 2.10, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 6.2, 7.1, 7.3 und das gesamte Arbeitspaket 10. Die EXAKT betreffenden Meilensteine sind M2, M4 und M5

Im Folgendem werden die Inhalte der einzelnen Arbeitspakete und Meilensteine, an denen EXAKT beteiligt ist, beschrieben. Zusätzlich werden die Ziele des Unterprojekts DirectPreg beschrieben und die daraus resultierenden maschinebaulichen Ziele für EXAKT. Für die Beschreibung der anderen Arbeitspakete und Meilensteine wird auf die Berichte der Projektpartner CompriseTec GmbH, der technischen Universität Hamburg und der Helmut-Schmidt-Universität verwiesen.

### 1.3.1 Arbeitspakete

#### Arbeitspaket 2

Titel: Definition der Materialien, Materialentwicklung, -evaluation und -charakterisierung

DirectPreg Ziele: Auswahl und Charakterisierung von Materialien, mit welchen die in Arbeitspaket 1 ausgewählten Demonstratoren gefertigt werden können. Dabei müssen FST Anforderung bezüglich der Flammbeständigkeit, Rauchentwicklung und Toxizität erfüllt werden und die Prozessierbarkeit der Materialien gewährleistet sein.

#### Arbeitspaket 2.8

Titel: Evaluation von Fertigungseigenschaften und der Prozessierbarkeit

DirectPreg Ziele: Um die Prozessierbarkeit der ausgewählten Materialien zu gewährleisten müssen folgende Materialeigenschaften experimentell bestimmt werden.

- Reaktivität
- Viskosität
- Rheologische Eigenschaften
- Tack
- Dispergierung von Füllstoffen

Die notwendigen Arbeiten wurden an den Geräten der TUHH durchgeführt. In das Arbeitspaket fallen auch Vorversuche zur Imprägnierung von Textilien zum Test der Machbarkeit.

EXAKT Ziele: Bestimmung der Prozessgrenzen für die ausgewählten Materialien als auch die Materialdefinition für den Prozess.

#### Arbeitspaket 2.10

Titel: Charakterisierung der Komposite-Eigenschaften

DirectPreg Ziele: Die hergestellten Komposite sollen im Hinblick auf ihre thermischen und mechanischen Eigenschaften untersucht werden. Der Einfluss der Partikelmodifikation auf interlaminare Festigkeit, Zähigkeit und das thermodynamische Verhalten ist wichtig zu bestimmen, sowie das Verhalten dünnwandiger Komposite-Bauteile aufgrund derer Anfälligkeit für Feuer und Hitze.

EXAKT Ziele: Verständnis der nachgelagerten Prozesse zum Imprägnieren und Herstellung von Prepregs für Materialtests.

#### Arbeitspaket 5

Titel: Prozessentwicklung

DirectPreg Ziele: Konfiguration aller Prozessschritte für die Prepreg-Imprägnierung und das anschließende Heißpressen. Entwicklung und technische Umsetzung einer Pilotanlage eines Imprägnierwalzwerks für textile Zuschnitte.



#### Arbeitspaket 5.9

Titel: Prozesskonfiguration

DirectPreg Ziele: Konfiguration aller Prozessschritte.

1. Konfiguration der textilen Vorstufe
2. Konfiguration des Imprägnierprozesses und mögliche Funktionsintegration
3. Laminatherstellung
4. Aushärtung und Endbearbeitung

EXAKT Ziele: Prüfen der Machbarkeit des Prozesses und Erstellen eines Konzepts für ein Imprägnierwalzwerk

#### Arbeitspaket 5.10

Titel: Optimierung von Prozessparametern

DirectPreg Ziele: Zur Optimierung des gesamten Prozesses soll eine Optimierung des Prozesses hinsichtlich unterschiedlicher Eigenschaften polymerer Matrizen stattfinden.

EXAKT Ziele: Ermittlung der Prozessgrenzen für die in 5.11 entwickelten Pilotanlage und Erstellung für Einstellkarten für ausgewählte Materialien.

#### Arbeitspaket 5.11

Titel: Konstruktion einer Pilotanlage und Prozess und Anlagenoptimierung

DirectPreg Ziele: Konstruktion einer Pilotanlage anhand gesammelter Daten. Entwicklung eines Steuerungssystems mit passender Benutzeroberfläche. Technische Umsetzung der Konstruktion.

EXAKT Ziele: wie DirectPreg Ziele

#### Arbeitspaket 5.12

Titel: Prozessbewertung

DirectPreg Ziele: Zur Beurteilung des entwickelten Prozesses wird das Material im Hinblick auf Imprägnier- und Laminierqualität besonders bei hochgefüllten Polymermatrizen untersucht. Weitere wichtige Bewertungskriterien sind: Oberflächengüte der Lamine, Defekte wie Poren, Delamination etc.)

EXAKT Ziele: Überprüfen der Prozessqualität und sammeln von Verbesserungen im Hinblick auf Handling und Parametereinstellungen.

#### Arbeitspaket 6

Titel: Fertigen der Demonstratoren

DirectPreg Ziele: Fertigen eines on Arbeitspaket 1 festgelegten Demonstrators und Bewertung dessen anhand definierter Kriterien.

#### Arbeitspaket 6.2

Titel: Fertigung eines Demonstrators mit Hilfe eines Imprägnierwalzwerks und Heißpresse.

DirectPreg Ziele: Herstellung eines im Arbeitspaket 1 definierten Demonstrators mit der von EXAKT entwickelten Pilotanlage und einer Heißpresse.

### Arbeitspaket 7

Titel: Prozessauswertung und -optimierung

DirectPreg Ziele: Analyse des entwickelten Prozesses und Optimierung der einzelnen Fertigungsschritte hinsichtlich Kosten, Zykluszeit und Fertigungsqualität.

### Arbeitspaket 7.1

Titel: Evaluation der technischen Qualität

DirectPreg Ziele: Bewertung des entwickelten Prozesses hinsichtlich Zuverlässigkeit, Teilequalität und Durchlaufzeit und Identifikation von Schwächen in den einzelnen Fertigungsschritten

EXAKT Ziele: Einweisung, Bedienung und Wartung der entwickelten Pilotanlage

### Arbeitspaket 7.3

Titel: Prozessoptimierung

DirectPreg Ziele: Optimierung des entwickelten Prozesses hinsichtlich der in 7.1 und 7.2 ermittelten wirtschaftlichen Schwächen.

EXAKT Ziele: Optimierung der Pilotanlage hinsichtlich wirtschaftlicher Schwächen.

### Arbeitspaket 10

Titel: Beitrag Zur Internationalisierung des Clusters „Hamburg Aviation“

Ziele: Präsentation der Kompetenzen verschiedener Projektpartner für andere deutsche und kanadische Projektpartner.

## **1.3.2 Meilensteine**

### Meilenstein M2: Materialfreigabe

Nach Fertigstellung der relevanten Arbeitspakete müssen passende Materialkombinationen für die Demonstratoren ausgewählt werden. Wenn kein entsprechendes Material gefunden werden kann, muss entschieden werden, ob das Projekt im Arbeitspaket 5 mit Einschränkungen weiterentwickelt wird oder nicht.

### Meilenstein M4: Prozessfreigabe

Nach Fertigstellung der relevanten Arbeitspakete muss entschieden werden, ob der entwickelte Prozess für die Fertigung des ausgewählten Demonstrators geeignet ist. Ist dies nicht der Fall muss entschieden werden, ob eine Weiterentwicklung bei den zur Verfügung gestellten zeitlichen und finanziellen Mitteln möglich ist.

### Meilenstein M5: Präsentation des Demonstrators

Der fertiggestellte Demonstrator wird mit den Testberichten zu den relevanten Eigenschaften vorgestellt.



## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Flugzeug(innen-)bauteile wie Seitenwände, Hutablagen oder Bordküchen werden hauptsächlich aus glas- oder kohlenstofffaserverstärkte Phenolharzsysteme hergestellt. Der Vorteil von Phenolharzen ist, dass sie von Haus aus schwer entflammbar und sehr billig sind. Aber die Herstellung ist sehr zeitaufwendig. Außerdem ist die Emission von Phenol und Formaldehyd bei der Herstellung und im Gebrauch gesundheitsschädlich. Schließlich sind die mechanischen Eigenschaften von Phenolsystemen gering. Leider weisen alternative moderne Harzsysteme wie Epoxid, Polyurethan oder Poly- oder Vinylesterharze keine inhärente Flammfestigkeit auf. Diese Eigenschaft könnte mit hohen Füllgraden von (meist festen) Flammenschutzmitteln kompensiert werden. Die Herstellung von GFK-Bauteilen mit hochgefüllten Harzen im üblichen Resin Transfer Moulding (RTM) ist jedoch problematisch, da eine Filterwirkung der (oft mikroskopisch kleinen) Partikel zu beobachten ist. Um wirtschaftlich wettbewerbsfähige Bauteile mit den geforderten Eigenschaften herzustellen, müssen daher neue Materialien und alternative Herstellungsverfahren gewählt und an die spezifischen Bedingungen angepasst werden.

Prepregs sind flächige, halbfertige Faser-Matrix-Materialien für die Herstellung hochwertiger Verbundwerkstoffen. Die Fasern in einem Prepreg werden mit Polymerharz imprägniert (Prepreg = vorimprägnierte Fasern) und das flächige Produkt wird in der Regel auf Spulen aufgewickelt. Nach der Imprägnierung muss das Harzmaterial seinen unausgehärteten Zustand beibehalten, weshalb das Prepreg bei -18 °C gelagert wird, um die Aushärtungsreaktion bis zur weiteren Verarbeitung des Materials zu verlangsamen. Für die Herstellung von Verbundwerkstoffteilen müssen die Prepregs aufgetaut, auf die gewünschten Abmessungen zugeschnitten, zu einem Laminat gestapelt und dann in einem Autoklav-Prozess unter Druck und erhöhter Temperatur ausgehärtet werden [LEN14].

Im Gegensatz zu z.B. Resin Transfer (RTM)-Verfahren, bei denen die Partikel herausgefiltert werden, erlaubt das Prepreg-Verfahren eine bessere Einarbeitung von Füllstoffen in das Laminat (z. B. Verbesserung der Zähigkeit, funktionelle Füllstoffe, FST Modifikatoren) aufgrund eines kurzen Fließwegs des modifizierten Harzmaterials zwischen den Fasern.

Einige Nachteile des üblichen Prepreg-Autoklav-Verfahrens sind die hohen Energiekosten bei der Lagerung, die hohen Kosten für die Prozessausrüstung und Verbrauchsmaterialien sowie eine eher geringe Produktionsrate aufgrund der langen Aushärtungszyklen. Die Aushärtung von Prepregs in einem Heißpressverfahren ist ein alternativer Ansatz mit großem Automatisierungspotenzial für die Herstellung von Verbundwerkstoffen, da weniger Zeit, Energie und Verbrauchsmaterialien aufgewendet werden [MAL15, LEN14].

Darüber hinaus entsteht bei herkömmlichen Prepreg-Verfahren eine hohe Abfallmenge, die beim Schneiden der imprägnierten Halbzeuge während der Bauteilherstellung anfällt [LEN14]. Der Abfall und die damit verbundenen Kosten können durch einen anderen Prozessablauf minimiert werden. Dieser soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes etabliert werden.

In dem vorgesehenen Verfahren werden zunächst die textilen Komponenten (z. B. Gewebe) zugeschnitten, dann wird das halbfertige Textilhalbzeug mit Harz imprägniert, zu einem Laminat gestapelt und direkt in der Heißpresse ausgehärtet. Dieser neue Ansatz bietet ein enormes Kosteneinsparungspotenzial, da nur das zu härtende Material mit Harz imprägniert wird. Außerdem können unbenutzte trockene Faserabschnitte leicht recycelt werden (z. B. als Kurzfasern), ohne dass das ungehärtete Matrixmaterial verbrannt oder aufgelöst werden muss. Die Direkthärtung macht die Notwendigkeit der Lagerung bei



niedrigen Temperaturen überflüssig und erleichtert die Formulierung von chemisch weniger komplexen Matrixmaterialien mit geringerem Bedarf an Lagerstabilität.

Vor allem für die Entwicklung neuer FST-Prepreg-Harze kann dies ein großer Vorteil im Vergleich zu konventionellen Prepreg-Harzen sein, da die Einarbeitung von FST-Modifikatoren (z. B. Phosphor Phosphorkomponenten) oft die Aushärtungsreaktion der Matrix beschleunigt, was nicht mehr nachteilig für den Herstellungsprozess wäre [XU15, MAR13]. Die Anwendung solcher Effekte für neue Prepreg-Materialien ist noch zu erforschen.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu einem herkömmlichen Prepreg-Imprägnierverfahren besteht darin, dass das vorgesehene Verfahren aufgrund der Verwendung von vorgeschrittenen Textilien die Möglichkeit bietet, sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Textilien zu verarbeiten. Ein diskontinuierlicher Prozess bietet die Möglichkeit, z.B. das Fasermaterial, das Faser-Matrix-Gewichtsverhältnis, die Imprägnierungstiefe des Harzes in das Textil und andere Parameter für jede einzelne Textilbahn zu variieren, was zu einer größeren Kontrolle über die optimale Laminatzusammensetzung und den Grad der Imprägnierung vor dem Aushärten führt [LEN14, PUT96, AHN93]. Um die Kontrolle noch weiter zu verbessern, ist es bei der diskontinuierlichen Prozessvariante möglich, die Matrix und das Füllmaterial, die in das Laminat eingearbeitet werden sollen, systematisch zu variieren. Dies ist besonders für die Auslegung von FST-Verbundwerkstoffen wichtig, da ein gutes FST-Verhalten eines Verbundsystems das Ergebnis der Eigenschaften der Materialkomponente selbst sowie der genau abgestimmten Verbundstoffzusammensetzung ist.

Gängige Prepreg-Herstellungsverfahren, bei denen es sich um kontinuierliche Prozesse handelt, bieten keine solche Flexibilität für die Materialentwicklung, insbesondere weil Prepreg-Imprägnieranlagen in der Regel eine große Arbeitsbreite von 600 mm und eine hohe Durchlaufgeschwindigkeit von mehreren Metern pro Minute haben [LEN14]. Dies behindert eine effiziente und wirtschaftliche Material- und Prozessentwicklung im kleinen Maßstab. Daher ist die Realisierung eines hochwertigen Prepreg-Produktionsprozesses mit erhöhter Flexibilität im kleinen und erschwinglichen Labormaßstab am Bedarf der Forschung orientiert und wird eine einzigartige Innovation in der Entwicklung und Produktion von FRP-Verbundwerkstoffen sein.

Technische Lösungen für die Entwicklung einer Prepreg-Imprägnieranlage im Labormaßstab sind teilweise in der Prepreg-Herstellung oder Beschichtungsindustrie vorhanden und Stand der Technik [GIE10]. Sie können durch ein Down-Scaling der Herstellungsprinzipien angepasst und genutzt werden. Für einige vorteilhafte technische Lösungen existieren verschiedene Patente [COA03, KRO15, HEX10]. Diese sind auf die Relevanz für den im Projekt zu entwickelnden Prototypen einer Imprägnieranlage zu prüfen. Eine umfassende Patentrecherche im Rahmen des Projekts muss dies klären und ob diese oder weitere Patente für den Pilotanlage anwendbar sind oder nicht.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Hamburg (TUHH) und der CompriseTec GmbH (CT) durchgeführt. Im Laufe des Projektes wurden gemeinsame Versuche und studentische Arbeiten mit den Projektpartnern umgesetzt.

Im Hinblick auf die Erstellung endkonturnaher Zuschnitte wurde im Laufe des Projektes mit der Firma ARISTO Cutting Solutions GmbH (ehemals ARISTO Graphic Systeme GmbH & Co. KG) Kontakt aufgenommen, um deren neuentwickeltes SequeFix-System für das Projekt zu nutzen.

## Literaturverzeichnis

- [LEN14] LENGSELD, H.; WOLFF-FABRIS, F.; KRÄMER, J.; LACALLE, J.; ALTSTÄDT, V.: *Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung*. ISBN: 978-3-446-43300-7, Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [MAL15] MALNATY, P.: *Prepreg compression molding makes its commercial debut*. In: Composites World (Onlinemagazin), Link: <http://www.compositesworld.com/articles/prepreg-compressionmolding-makes-its-commercial-debut>, 2015, Letzter Abruf: 16.06.2017.
- [XU15] XU, W.; WIRASAPUTRA, A.; LIU, S.; YUAN, Y.; ZHAO, J.: *Highly effective flame retarded epoxy resin cured by DOPO-based co-curing agent*. In: Polymer Degradation and Stability Nr. 122, S. 44 – 51, 2015.
- [MAR13] MARIAPPAN, T.; YOU, Z.; HAO, J.; WILKIE, C. A.: *Influence of oxidation state of phosphorus on the thermal and flammability of polyurea and epoxy resin*. In: European Polymer Journal Nr. 49, S. 3171 – 3180, 2013.
- [PUT96] PUTNAM, J. W.; HAYES, B. S.; SEFERIS, J. C.: *Prepreg process-structure-property analysis and scale-up for manufacturing and performance*. In: Journal of advanced materials Vol. 27 Nr. 4, S. 47 – 57, 1996.
- [AHN93] AHN, K. J.; SEFERIS, J. C.: *Prepreg Process Analysis*. In: Polymer Composites Vol. 14 Nr. 4, S. 349 – 360, 1993.
- [GIE10] GIESSMANN, A.: *Substrat und Textilbeschichtung – Praxiswissen für Beschichtungs- und Kaschieretechnologien*. 2. Auflage, ISBN 978-3-642-01416-1, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [COA03] COATEMA Coating Machinery GmbH: *Modulare Anordnung für das gleichzeitige und kontinuierliche Beschichten der beiden Oberflächen von bewegten Warenbahnen*. DE-Patent [DE000020301811U1], angemeldet: 05.02.2003.
- [KRO15] THIEL, R.; SCHUBERT, M.: *Verfahren und Vorrichtung zum Auftragen eines Mediums auf ein Substrat*. DE-Patent [DE102015113161A1], KROENERT GmbH & Co KG, angemeldet: 10.08.2015.
- [HEX10] ELLIS, J.; FISSET, E.; TILBROOK, D.; MACKENZIE, P.; BLANC, I.; FIORE, L.; TIZON, B.: *Process for manufacturing composite materials*. US-Patent [US 9051444 B2], Hexcel Composites Limited,



## 2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 Arbeitspaket 2: Materialauswahl

Der Hauptaspekt der Arbeiten im Arbeitspaket 2 für EXAKT war der Nachweis der Prozessierbarkeit von Materialien auf einem Walzwerk. Dies schließt die Definition von Prozessgrenzen und Materialeigenschaften ein.

Zur Bewertung der Harzsysteme wurden Bewertungskriterien wie Viskosität, Verarbeitungsdauer und Reaktivität festgelegt. Zur Bewertung der Textilien wurden die Bewertungskriterien Fasermaterial, Flächengewicht (FAW), Webung, Einzellagendicke und Feinheit (Rovinggröße) festgelegt. Die Auswahl der Harzsysteme nach FST-Aspekten wurden von der TUHH und CompriseTec durchgeführt. Diese wurden dann an der TUHH im Hinblick auf ihre Viskosität, Reaktivität und Verarbeitungsdauer bei einer konstanten Temperatur untersucht. Zu den Ergebnissen dieser Untersuchungen wird an den Bericht der TUHH verwiesen.

Für die Bewertung der Imprägnierung können verschiedene Prepreg-Eigenschaften hinzugezogen werden wie Harzmassenanteil, (voraussichtlicher) Faservolumengehalt, Harzfluss, Imprägniergrad, Tack und Lagerbarkeit. Im DirectPreg-Prozess sollen die Prepregs kurz nach der Herstellung vor Ort verarbeitet werden, sodass die Lagerbarkeit eine untergeordnete Rolle einnimmt und nicht betrachtet wurde. Um den Versuchsaufwand zu begrenzen, wurden zur Bewertung der unausgehärteten Prepregs der voraussichtliche Faservolumengehalt (FVG) und die optische Unversehrtheit als Bewertungskriterien gewählt. Der FVG wurde über Wägung vor und nach dem Imprägnieren bestimmt. Der Anteil der Luft im Prepreg wurde vernachlässigt. Zur Bestimmung der Unversehrtheit wurde eine Sichtprüfung der Einzellagen durchgeführt, um mögliche Beschädigungen wie Risse oder unimprägnierte Stellen festzustellen.

Zur Ermittlung der Materialeigenschaften für die Prozessierbarkeit mussten Machbarkeitsversuche verschiedener Imprägniermethoden (Abschnitt 2.1.2) und verschiedener Aufbaustufen eines Imprägnierwalzwerks durchgeführt werden, da eine große Abhängigkeit zwischen den Imprägniermethoden und den Imprägnierergebnissen bestand. Die Bestimmung der Grenzen der Prozessierbarkeit von Materialien konnte demnach erst nach Fertigstellung einer Pilotanlage abgeschlossen werden. Dadurch wurden der Meilenstein M2 zeitlich nach hinten geschoben und fiel mit dem Meilenstein M4 zusammen.

Die allgemeinen Voraussetzungen, die sich für das Harzsystem bezüglich der Prozessierbarkeit ergeben, ist das Erhalten einer Viskosität für einen bestimmten Zeitraum bei einer konstanten Temperatur.

Die untere Viskositätsgrenze wird durch die Tatsache festgelegt, dass das Harzsystem während der Drehung aufgrund der Gravitation nicht von den Walzen bzw. durch den Walzenspalt fließen darf. Dies schließt auch kurze betriebsbedingte Stillstände der Walzen ein. Bestimmt wird es hauptsächlich durch die Spaltweiten und die Häufigkeit von betriebsbedingten Drehpausen der Walzen.

Bei hohen Viskositäten treten höhere Betriebskräfte auf, sodass die Prepregs bei der Herstellung beschädigt werden können. Gleichzeitig kann ein hochviskoses Harz nur eine geringe Imprägniertiefe erreichen. Die hohen Betriebskräfte und die geringe Imprägniertiefe begrenzen die Viskosität nach oben hin.



Die Dauer der Verarbeitung setzt aus dem Vorwärmen des Harzes, der Imprägnierung und dem Reinigen des Walzwerks zusammen. Während dieser Zeit darf die Viskosität nicht über 200 Pas steigen, sonst wird eine Reinigung des Walzwerks unwirtschaftlich.

Die allgemeinen Voraussetzungen, die sich für das Textil bezüglich der Prozessierbarkeit ergeben, ist die Gewährleistung der Unversehrtheit des Textils und das Erreichen einer genügenden Imprägniertiefe bzw. das Übertragen einer notwendigen Harzmenge auf das Textil.

Der begrenzende Faktor für das Textil sind die mögliche Spaltweite und das Flächengewicht in Abhängigkeit vom Fasermaterial. Die Spaltweite beeinflusst die Betriebskräfte und die Menge an übertragbarem Harz an das Textil in Abhängigkeit vom Flächengewicht und Fasermaterial. Die maximale Spaltweite der Pilotanlage beträgt 1400 µm.

Im Imprägnierprozess kann das Textil nicht nur durch hohe Druckkräfte im Imprägnierspalt beschädigt werden, sondern auch durch Zugkräfte in Dickenrichtung des Textils. Diese werden durch den Tack der mit Harz beschichteten Walzen verursacht. Abbildung 1 zeigt die Beschädigungen eines einseitig querfixierten Kohlenstofffasergeleges nach dem Imprägnieren. Die nicht querfixierte Seite des Textils haftet an der Walzenoberfläche und wird vom Rest des Textils abgeschält. Eine solche Beschädigung ist zu vermeiden.

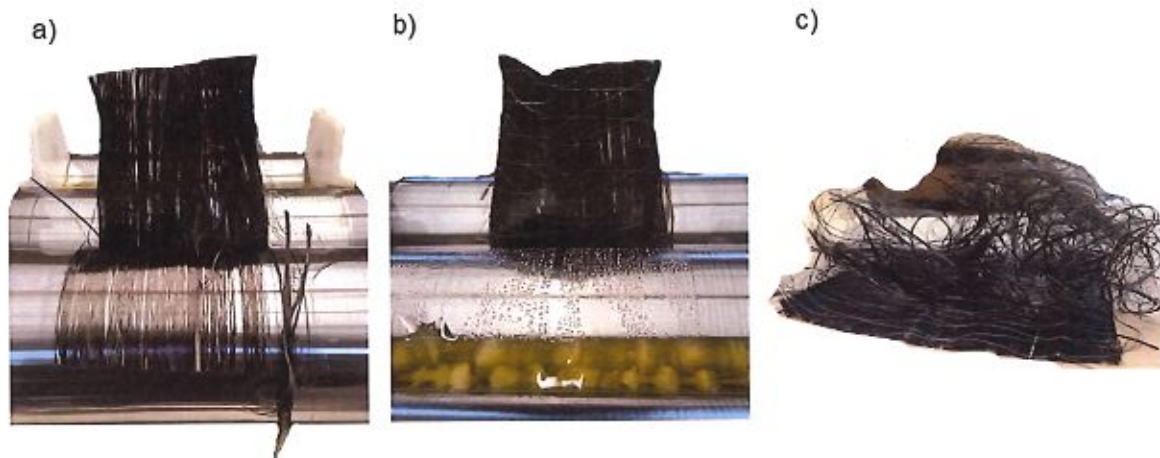


Abbildung 1: Einseitig quergebundenes Textil nach Imprägnierung a) Vorderseite, b) Rückseite, c) von der Walze gelöst

Tabelle 1: Grenzen der Prozessierbarkeit

Kriterium		Überfüllter Spalt	Zweiseitige Imprägnierung	Einseitige Imprägnierung
Harz	Viskosität	1 – 30 Pas	1 – 100 Pas	10 – 200 Pas
	Verarbeitungsdauer	5 h		
	Temperaturbereich	15 – 80 °C		
Textil	AW (G-Faser)	80 – 400 g/m <sup>2</sup>		
	AW (C-Faser)	160 – 600 g/m <sup>2</sup>		
	Webung	Gewebe, beidseitig querfixierte Gelege		
	Breite	10 – 380 mm		
	Länge	Unbegrenzt	< 330 mm	> 80 mm

Als Harzsysteme wurden im Projekt Blendur 90IK01 von Covestro und das Epikote 04332 von Hexion verwendet.



### 2.1.2 Arbeitspaket 2: Erste Machbarkeitsversuche

Für die ersten Machbarkeitsversuche wurde ein aus einem Vorgängerprojekt der TUHH zur Verfügung gestellter Anlagenprototyp (IWW-TUHH) verwendet (Abbildung 2). Die erdachten Funktionsweisen des Materialtransports bei dem Prototyp erwiesen sich als nicht ausreichend. Für die Machbarkeitsversuche wurde deswegen nur das obere Walzenpaar verwendet. Zur Einschränkung potenzieller Einflussparameter auf das Imprägnierergebnis, welches durch die Zielgrößen FVG und optische Unversehrtheit reduziert wurde, wurde mithilfe der statistischen Versuchsplanung signifikante Einflussparameter bestimmt. Als signifikant erwiesen sich die Imprägnerspaltweite, die Harzfilmdicke und die Viskosität des Harzsystems.

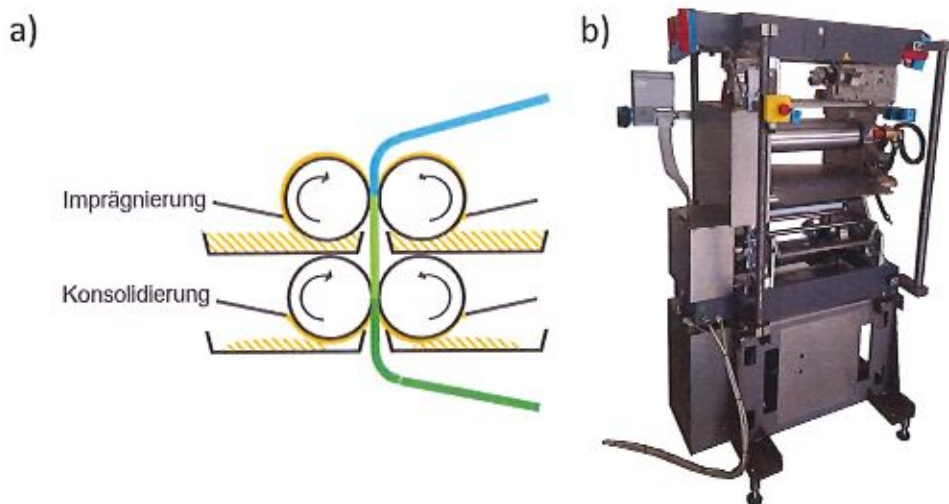


Abbildung 2: IWW-TUHH a) schematischer Funktionsaufbau, b) technische Umsetzung

In Abbildung 3 ist der Versuchsaufbau am IWW-TUHH gezeigt. Die Begrenzungsbacken zwischen den Walzen begrenzen die Breite des Harzfilmes. Dieser Harzfilm wird je nach Imprägniermethode unterschiedlich erzeugt und genutzt. Der Textilzuschnitt wird manuell leicht auf den Harzfilm gedrückt, sodass keine größeren Falten entstehen. Die Walzen werden in Bewegung versetzt. Nach einer Drehung wird der mit Harz getränkte bzw. beschichtete Textilzuschnitt manuell von der Walze abgenommen. Im Laufe der Versuche haben sich drei verschiedene Imprägniermethoden herausgebildet: überfüllter Spalt (üSP), zweiseitige Imprägnierung (zIP) und die einseitige Imprägnierung (eIP).

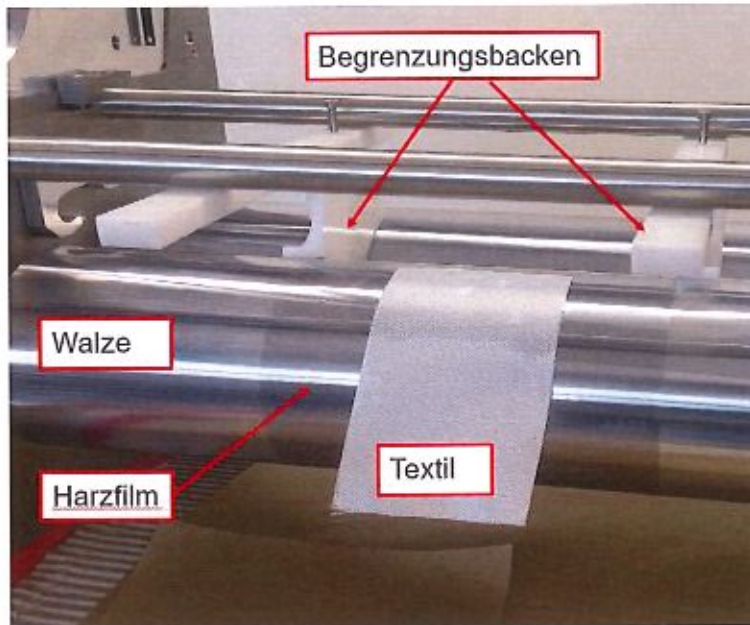


Abbildung 3: Versuchsaufbau der Machbarkeitsversuche

In Abbildung 4 ist der schematische Ablauf des üSP dargestellt. Hierbei wird die notwendige Spaltweite eingestellt, dann Harz in den Spalt gegeben, sodass sich eine Wulst ausbildet. Nach dem Ausbilden eines Harzfilmes über die gesamte Länge zwischen den Begrenzungsbacken werden die Walzen angehalten und ein Textilschnitt auf die Walze in den Harzfilm gedrückt. Anschließend werden die Walzen wieder in Drehung versetzt und das Textil durch den Spalt gezogen, wodurch das Textil mit Harz getränkt wird. Das imprägnierte Textil wird nach dem Anhalten des IWW von der Walze gelöst und verpackt.



Abbildung 4: Schematische Darstellung des überfüllten Spaltes (üSP)



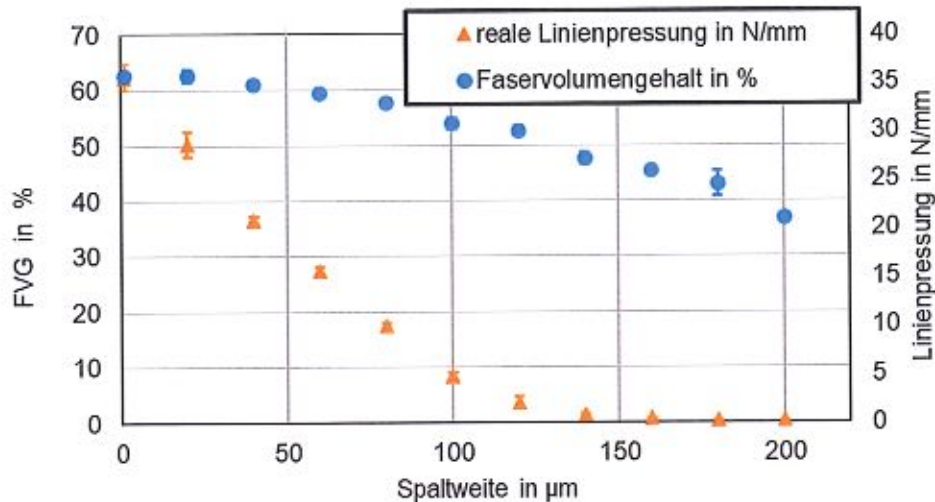


Abbildung 5: FVG und Linienpressung in Abhängigkeit von der Spaltweite bei üSP, Harzsystem: Blendur 90IK01, Viskosität: 2 Pas, Textil: Glasfaser Leinwand 168 g/m<sup>2</sup>, Umfangsgeschwindigkeit 1 m/min.

Abbildung 5 zeigt den FVG in Abhängigkeit von der Spaltweite bei üSP. Die Spaltweite ist bei üSP der einzige Einstellparameter. Der FVG kann in den Grenzen von 65 – 35 vol.% verändert werden. Die notwendige Imprägnierspaltweite kann über die CPT (cured ply thickness) gut abgeschätzt werden. Dabei entsteht selbst bei niedriger Viskosität eine sehr hohe Linienpressung bis zu 40 N/mm. Die Linienpressung nimmt mit höherer Viskosität weiter zu, was zu einer großen Belastung für das Textil einhergeht, sodass die Zuschnitte zu Rissen neigen. Die Rissanfälligkeit wird weiter durch die manuelle Handhabung der Textilien und durch das Aufstauen des Textils beim Aufprall der vordersten Kante mit der Harzwulst im Spalt erhöht. Die Imprägniermethode üSP ist deswegen nur für geringe Viskositäten zu verwenden. Ein weiteres Phänomen ist die auftretende starke Verzerrung beim manuellen Abnehmen des Zuschnittes.

$$CPT = \frac{FAW}{FVG \cdot \rho_{Faser} \cdot 10}$$

CPT: cured ply thickness in mm

FAW: Flächengewicht des Textils in g/m<sup>2</sup>

FVG: Faservolumengehalt in vol.%

$\rho_{Faser}$  Dichte des Fasermaterials in g/cm<sup>3</sup>

Abbildung 6 zeigt den schematischen Ablauf der ZIP. Im ersten Schritt wird die Spaltweite zur Bildung des Harzfilmes eingestellt. Die Spaltweite entspricht bei dieser Methode der notwendigen Harzfilmdicke. Im zweiten Schritt wird so viel Harz dem Spalt zugegeben, sodass sich eine kaum sichtbare Wulst zwischen den Walzen ausbildet. Als nächstes wird die Imprägnierspaltweite eingestellt. Nach dem manuellen Auflegen des Textils auf den Harzfilm hinter der Erhebung der aufgelösten Wulst werden die Walzen in Drehung versetzt und der textile Zuschnitt mit Harz imprägniert. Nach dem einmaligen Passieren des Spaltes wird der Zuschnitt manuell von der Walze gelöst.



Abbildung 6: Schematische Darstellung der zweiseitigen Imprägnierung (zIP)

Abbildung 7 zeigt die Abhängigkeit des FVG von der Harzfilmdicke bei gleichem Textil und gleicher Imprägnierspaltweite. Spätere Versuche haben gezeigt, dass bei der richtigen Wahl von Harzfilmdicke und Imprägnierspaltweite Faservolumengehalte zwischen 90 und 33 vol.% möglich sind. Die Wahl der Parameter für ein bestimmten FVG kann für die Imprägnierspaltweite über die CPT und für die Harzfilmdicke über die Formel  $F = \frac{FAW}{\rho_{Faser}} * \frac{1-FVG}{FVG}$  abgeschätzt werden. Die maximale Linienpressung ist mit 6,5 N/mm bei dieser Methode wesentlich geringer als bei üSP und auch ein Aufprallen des Textils auf eine Harzwulst entfällt. Diese Methode ist weniger Rissanfällig als üSP und erlaubt eine Imprägnierung bis zu einer Viskosität von 100 Pas. Auch hier bewirkt die manuelle Handhabung der Prepregs eine starke Verzerrung dieser, welche in den nachfolgenden Prozessschritten nachteilig ist. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist die Ungewissheit, an welcher Walze das Prepreg auf dem Spalt kommt.

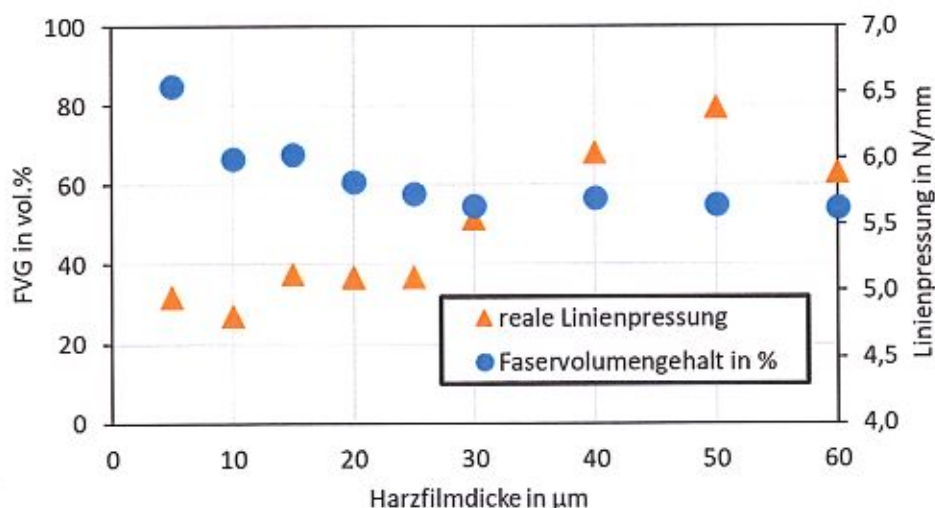


Abbildung 7: FVG und Linienpressung in Abhängigkeit der Harzfilmdicke bei zIP, Harzsystem: Blendur 90IK01, Viskosität: 10 Pas, Textil: Glasfaser Leinwand 168 g/m<sup>2</sup>, Umfangsgeschwindigkeit 1 m/min, Imprägnierspaltweite 100 µm.

Abbildung 8 zeigt die Vorgehensweise der einseitigen Imprägnierung (eIP). Der Ablauf der eIP am IWW-TUHH gleicht im Ablauf der zIP mit dem Zusatz, dass für die Bildung der Harzfilmdicke die doppelte Spaltweite eingestellt wird und das Harz nach dem Einstellen der Harzfilmdicke von einer Walze abgerakelt wird.





Abbildung 8: Schematische Darstellung der einseitigen Imprägnierung (eIP) am IWW TUHH

Gegenüber den anderen Imprägniermethoden verläuft die eIP größtenteils kraftlos, sodass die Rissanfälligkeit der Methode sehr gering ist. Dies wird auch durch Tatsache begünstigt, dass für die eIP deutlich höhere Imprägnierspaltweiten notwendig sind (Meist mit Faktor 2). Dennoch können die gebräuchlichsten FVG im Bereich 40 – 60 vol.% erreicht werden.

Anders als die zIP braucht die eIP nur 2 statt 3 Spalte, sodass diese Imprägniermethode mit einer 3 Walzenkonstruktion eines EXAKT-Seriengeräts realisiert werden kann. Abbildung 9 zeigt die Vorgehensweise der Imprägnierung am Dreiwalzwerk. Zuerst werden die notwendigen Spaltweiten für Imprägnierung (Spalt 2) und Harzfilmbildung (Spalt 1) eingestellt. Anschließend wird Spalt 1 mit Harz gefüllt. Der Zuschnitt wird von unten auf Walze 2 in den Harzfilm gedrückt. Die Walzen in Drehung versetzt, sodass der Zuschnitt durch den Spalt 2 nach oben gefördert und imprägniert wird. Zum Schluss wird der Zuschnitt von der Walze per Hand entfernt.



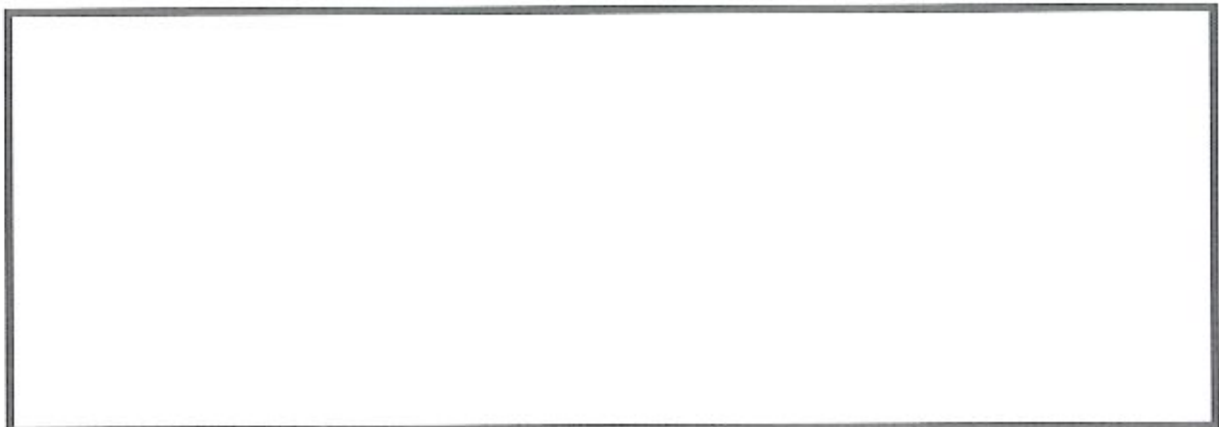
Abbildung 9: Schematische Darstellung der einseitigen Imprägnierung (eIP) an Dreiwalzwerk

Tabelle 2 führt die Bewertung der Imprägniermethoden nach wichtigen Imprägnierparametern auf. Im Allgemeinen haben üSP und zIP die besseren Eigenschaften bei der Imprägniergüte und die Steuerung der Imprägnierparameter lässt sich am leichtesten nachvollziehen. Im Hinblick auf die optische Unversehrtheit der Prepregs ist eIP aufgrund geringer Betriebskräfte den anderen Verfahren überlegen.

Tabella 2: Bewertung der unterschiedlichen Imprägniermethoden

Kriterium	Überfüllter Spalt	Zweiseitige Imprägnierung	Einseitige Imprägnierung
Kräfte	Hoch	Gering	Sehr gering
Spaltweite	Niedrig	Mittel	Groß
Imprägnierung	Max.	Einstellbar	Einseitig einstellbar
Bedecken der Fasern	Beidseitig	Beidseitig	Einseitig
Steuerung	Spaltweite	Spaltweite & Harzfilmdicke	Spaltweite & Harzfilmdicke
Viskosität	Gering (<30 Pas)	Mittel (<100 Pas)	Hoch (>10 Pas)
Verzug	Hoch	z.T. hoch	Sehr gering
Harz-Recycling	vollständig	Ggf. vollständig	Schwierig

### 2.1.3 Arbeitspaket 2: Versuche mit Nanocellulose (vertraulich)



### 2.1.4 Arbeitspaket 5: DirectPreg-Prozesskonfiguration

Die konventionelle Arbeit mit Prepregs beinhaltet die folgenden Schritte:

1. Gelege-/ Gewebeherstellung
2. Produktion von Harzfilm auf Trägerpapier
3. Imprägnierung von Endlosbahnen
4. Zuschnitt in schmalere Bahnen
5. Lagerung und Transport bei -18°C
6. Zuschneiden in endkonturnahe Formen
7. Manueller Lay-Up
8. Aushärtungsverfahren (z.B. Heizpresse)



Der entscheidende Unterschied bei DirectPreg ist die Änderung der Reihenfolge des Zuschnittes in endkonturnahe Formen und der Imprägnierung. Dadurch ergibt sich die folgende Reihenfolge:

1. Gelege-/ Gewebeherstellung
2. Zuschnitt in endkonturnahe Formen
3. Imprägnierung
4. Manuelles Lay-Up
5. Aushärtungsverfahren (z.B. Heizpresse)

Mit dem direkten Zuschnitt der Gelege/Gewebe in endkonturnahe Formen entfällt der alte Schritt 6. Dadurch dass die hergestellten Prepregs nach einer kurzen Lagerzeit von maximal wenigen Stunden direkt verarbeitet werden, entfällt die Lagerung und Transport mit der aufwendigen Tiefkühllogistik. Diese Änderungen machen den Prozess schlanker.

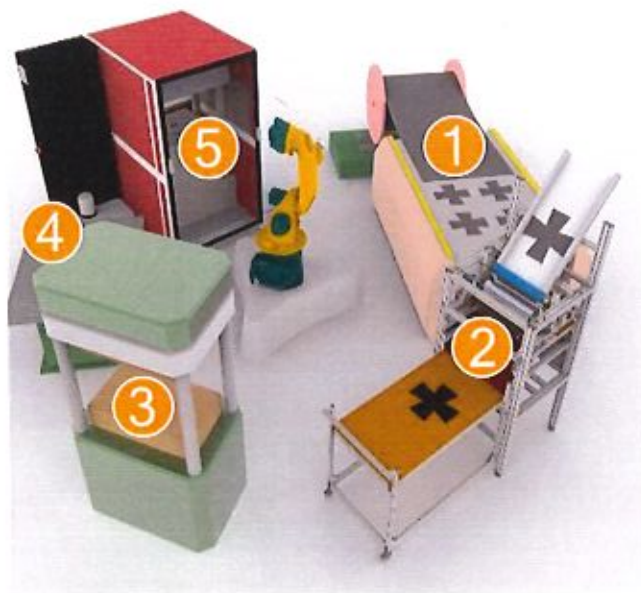


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer DirectPreg-Fertigungszelle

Abbildung 10 zeigt den Ablauf einer idealisierten DirectPreg Zelle. Im ersten Schritt wird das Textil endkonturnah zugeschnitten und im zweiten Schritt imprägniert. An der dritten Station wird das Textil für die weitere Verarbeitung bei Raumtemperatur zwischengelagert. Bei der vierten Station erfolgt der manuelle Lay-Up. Station fünf zeigt eine mögliche automatische Bestückung einer Presse mit einem Industrieroboter.

Die neuen Prozessschritte, wie der Zuschnitt von trockenen, textilen Formen und die Imprägnierung dieser stellt den Prozess vor neue Herausforderungen.

Abbildung 11 a) zeigt einen unbehandelten textilen Zuschnitt nach der Imprägnierung im Walzwerk. Ganze Faserbündel wurden an den Rändern aus dem Textil gelöst. Die herausgelösten Fasern oder Faserbündel verbleiben dabei im Harz und kontaminieren dieses. Um diese Phänomene zu verhindern, wurden die Zuschnitte vorbehandelt.

Für eine manuelle Lösung wurde auf die Ränder der Formen Haargel appliziert. Nach dem Trocknen des Haargels wurden die Formen ausgeschnitten. Eine industrielle Lösung stellte ARISTO Cutting Solutions GmbH (ehemals ARISO Graphic Systeme GmbH & Co. KG) mit deren neuentwickelten System SequeFix zur Verfügung (Abbildung 12). Die bebinderten Zuschnitte wiesen kein Ausfransen oder Faserverluste auf. (Abbildung 11 b)



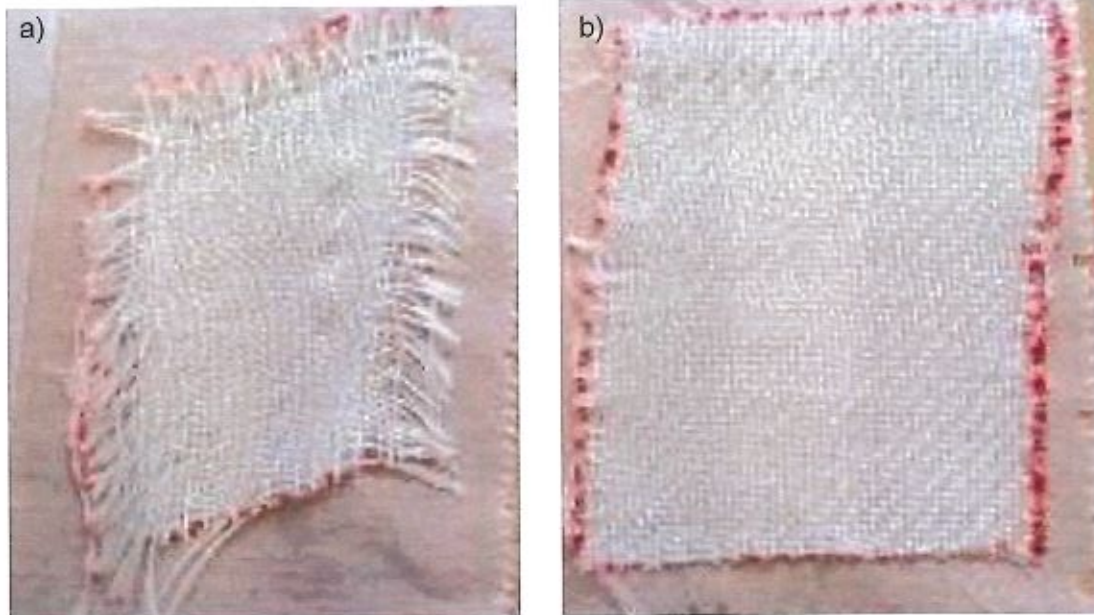


Abbildung 11: Textile Zuschnitte nach der Imprägnierung a) Textiler Zuschnitt ohne Befiederung, b) Textiler Zuschnitt mit Haargel befidert

Bei der Imprägnierung sind die hohen rissverursachenden Betriebskräfte und die starke Verzerrung der Lagen bei der manuellen Handhabung ein wesentliches Problem. Auf die Ausführung des Imprägnierwalzwerks wird in einem anderen Abschnitt des Berichtes näher eingegangen.

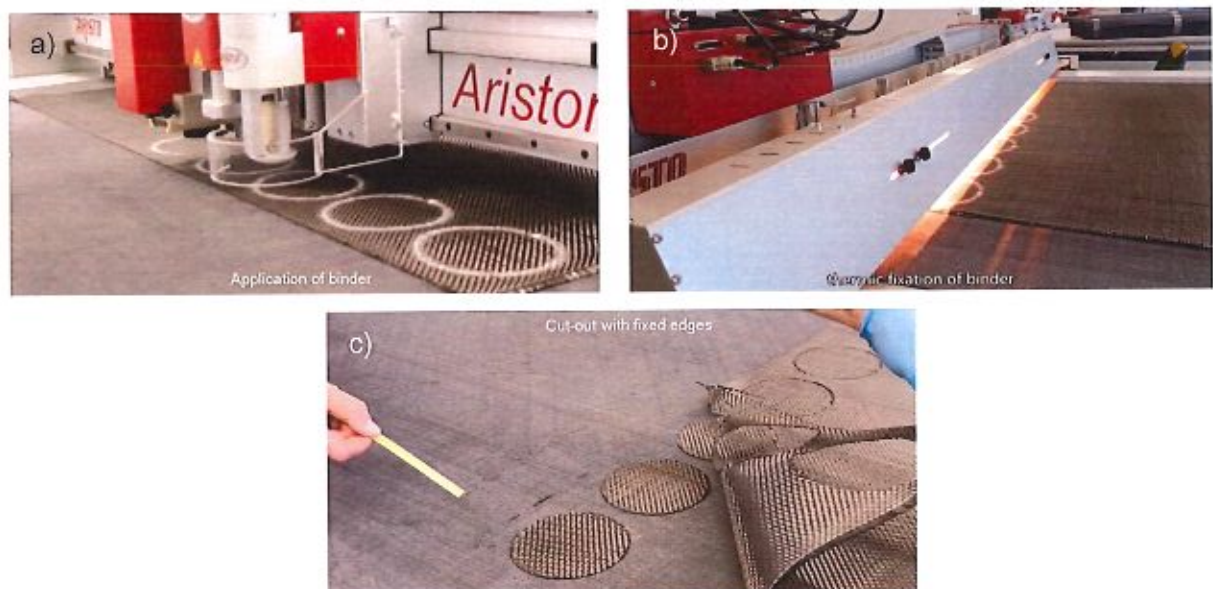


Abbildung 12: SequeFix-Verfahren in Bildern [ARISTO] a) Applikation des pulverförmigen Binders, b) thermisches Verschmelzen des Binders mittels Infrarotlampe, c) befiderte Zuschnitte (vertraulich)

Für den Lay-Up muss bei der Imprägnierung eine gute Handhabung der Lagen gewährleistet werden. Eine gute Handhabung zeichnet sich bei Prepregs durch einen gut eingestellten Tack, FVG und Verzug aus. Das Prepreg muss auch eine gewisse Steifigkeit aufweisen, damit es komfortabel verlegt werden kann. Der Tack definiert wie gut die Lage an anderen Lagen oder am Werkzeug haftet und wie gut eine Korrektur der Lagen vorgenommen werden kann. Das FVG muss niedriger als nötig eingestellt werden, da Harz an Werkzeugen und Handschuhen zurückbleibt.



Für das Aushärtungsverfahren müssen Luftschlüsse vermieden werden, damit im fertigen Verbundbauteil weniger Poren zurückbleiben.

### 2.1.5 Arbeitspaket 5: Imprägnier-Prozesskonfiguration

In diesem Abschnitt wird auf die wesentlichen Anforderungen an die Funktionen eines Imprägnierwalzwerks eingegangen.

Nach der Analyse der Imprägnierung mit dem IWW-TUHH wurden wesentliche Nachteile dieser technischen Ausführung deutlich:

- Manuelles Auflegen der Lagen auf die Walze
- Manuelles Abnehmen der Lagen von der Walze
- Hohe Linienpressung
- Hohe Rissanfälligkeit
- Umständliche Umsetzung von vorteilhaften Imprägniermethoden

Um diese Nachteile zu eliminieren wurde beschlossen, dass der gesamte Imprägnierprozess ohne manuelle Handhabung der Textilie stattfinden soll. Die Interaktion des Bedieners mit dem Gerät soll sich auf die Auflage des Zuschnittes auf ein Förderband und die Abnahme des Prepregs von einem weiteren Förderband beschränken.

Die definierten Grundfunktionen des Imprägnierprozesses sind:

1. Textil beschädigungsfrei aufbringen
2. Definierten kontinuierlichen Harzfilm aufbringen
3. Imprägnierung mit Prozesskontrolle
4. Imprägniertes Textil beschädigungsfrei abnehmen
5. Überschüssiges Harz abnehmen (u.U.)

Um die Machbarkeit von möglichen Konstruktionen zu überprüfen, wurde ein kleines Entwicklungswalzwerk mit provisorischen Lösungen jeder Grundfunktion ausgestattet und im kleinen Maßstab getestet. Die so produzierten Prepregs wurden im Hinblick auf FVG und optische Unversehrtheit bewertet.

Im Unterschied zum IWW-TUHH wurde ein neues Konzept zum Textilmanagement überlegt und eine andere Imprägniermethode verwendet. Der entscheidende Unterschied ist das Weglassen der Konsolidierung. Die Vorversuche haben gezeigt, dass die Konsolidierung mit blanken Walzen die Einstellungen der Imprägnierwalzen zu nichte macht. Eine Konsolidierung ist erst beim mit Trägerpapier verpacktem Prepreg sinnvoll.

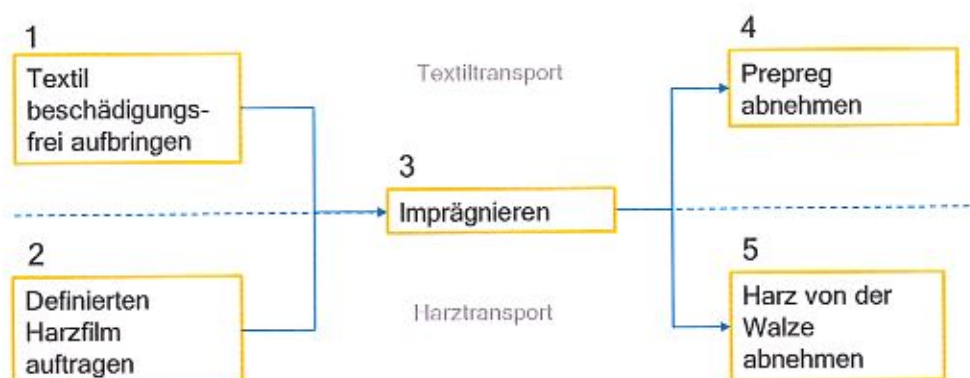


Abbildung 13: Zeitlicher Ablauf der Grundfunktionen

Abbildung 13 zeigt den zeitlichen Ablauf der 5 Grundfunktionen. Es werden zwei verschiedene Stoffsysteme transportiert (Textil/ Prepreg und Harz). Das Textil wird dem Walzwerk beschädigungsfrei zugeführt, im Walzwerk imprägniert und anschließend wird das Prepreg von der Walze des Walzwerks abgenommen. Das Harz muss in der vollen Arbeitsbreite und definierter Dicke der Imprägnierzone zugeführt werden, wo es mit dem Textil vermengt wird. Das Harz muss dann entweder dem System wiederzugeführt werden oder aus dem System entfernt werden. Abbildung 14 zeigt die Grundfunktionen des IWWs in Einzelfunktionen aufgeteilt.

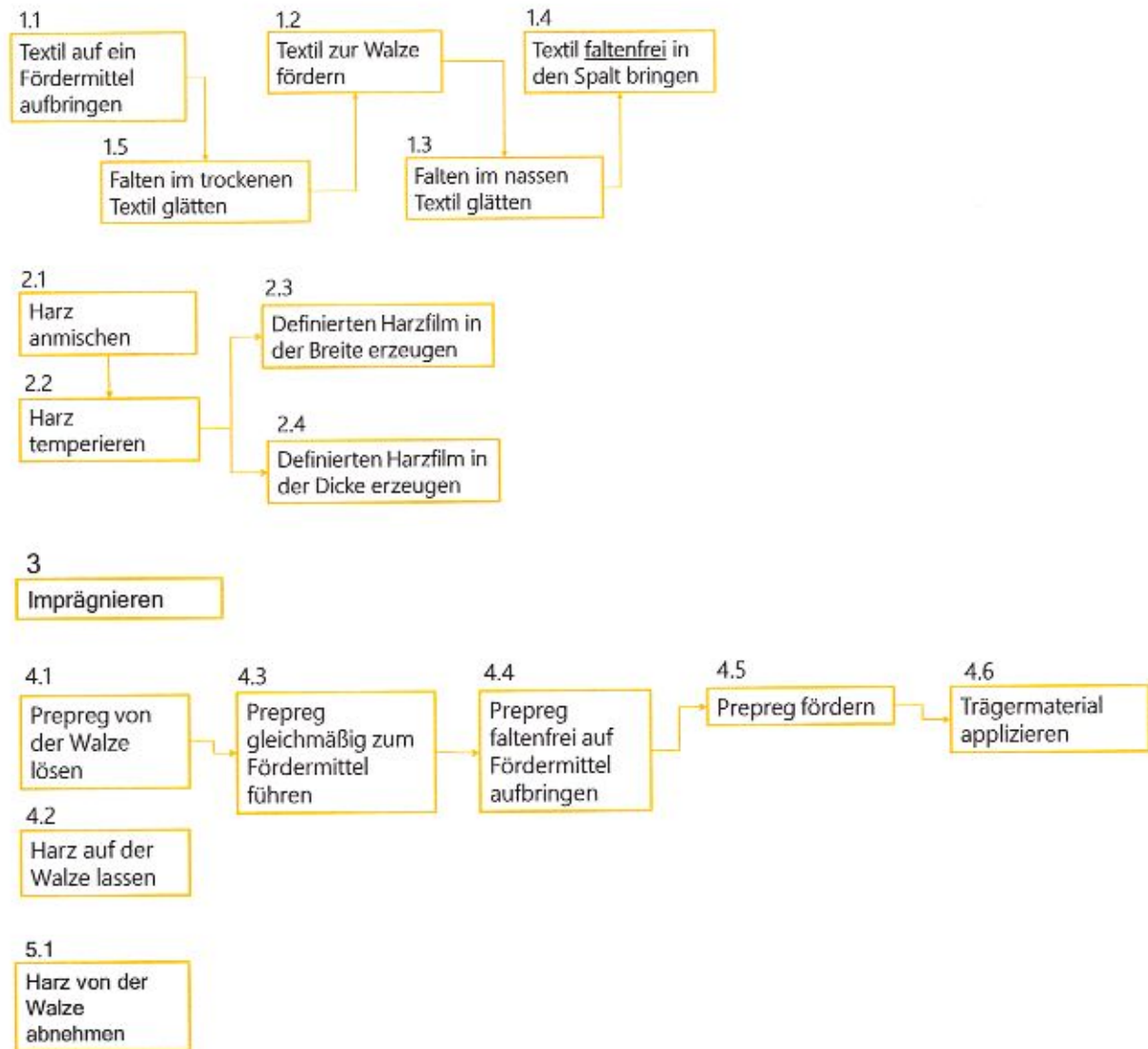


Abbildung 14: Funktionaler Aufbau der Einzelfunktionen nach Grundfunktion

Als Basis für die Umsetzung des Konzeptes wurde ein Dreiwalzwerk der Serie 120EH-450 ausgewählt. In Abbildung 15 ist das schematische Konzept des Imprägnierwalzwerks mit einer Dreiwalzenausführung dargestellt. Der Zuschnitt wird auf einem Förderband (1) zum rechten Spalt (3), dem Imprägnierspalt, zugeführt. Im linken Spalt (2), dem Harzfilm-Spalt wird die Harzfilmdicke eingestellt und durch die Walzendrehung der mittleren Walze zum Imprägnierspalt (3) zugeführt. Im Imprägnierspalt (3) wird der Zuschnitt imprägniert. Der imprägnierte Zuschnitt wird, auf der mit Harz benetzten Walze haftend, weitergefördert und mit einem speziellen Abnehmer (4) von der Walze gelöst, ohne das Harz von der Walze zu lösen und aus der Imprägnierzone über ein Förderband gefördert. Bei der Imprägnierung



können Harzreste auf der rechten Walze zurückbleiben. Diese werden mit einem Harzabnehmer (5) von der Walze gelöst und in einem Behälter gesammelt.

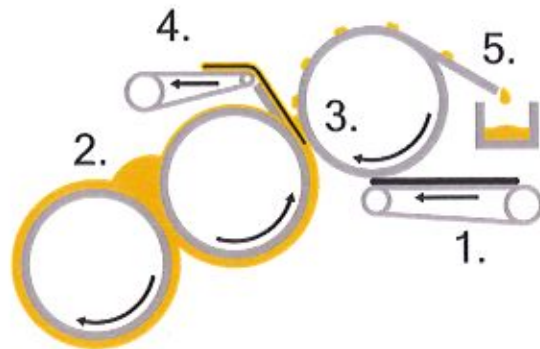


Abbildung 15: Schematisches Konzept des Imprägnierwalzwerkes

Die Größe der Zuschnitte beschränkt sich damit auf eine maximale Breite von 380 mm, da eine Walzenbreite von 400 mm zur Verfügung steht. Die Länge der Zuschnitte wird lediglich durch die Geschicklichkeit des Anwenders und die Länge des Zuführtisches beschränkt, welcher für eine Zuschnittlänge von 400 mm ausgelegt wurde. Diese Geometrien wurden so gewählt, sodass aus den Laminaten normgerechte Proben zur Laminat-Charakterisierung hergestellt werden können. Kleinere Proben z.B. zum Überprüfen der Machbarkeit der Materialkombination können mit kleineren Zuschnitten, geringerer Arbeitsbreite und sehr geringen Materialmengen ausgeführt werden, was die Anlage für die Materialentwicklung prädestiniert.

Studien zeigten, dass die Arbeitsbreite von 400 mm für viele Industrieanwendungen nicht ausreichend ist. Eine größere Arbeitsbreite wurde aus Kosten- und Zeitgründen im Projekt nicht weiterverfolgt.

### 2.1.6 Arbeitspaket 5: Konstruktion eine Pilotanlage (vertraulich)

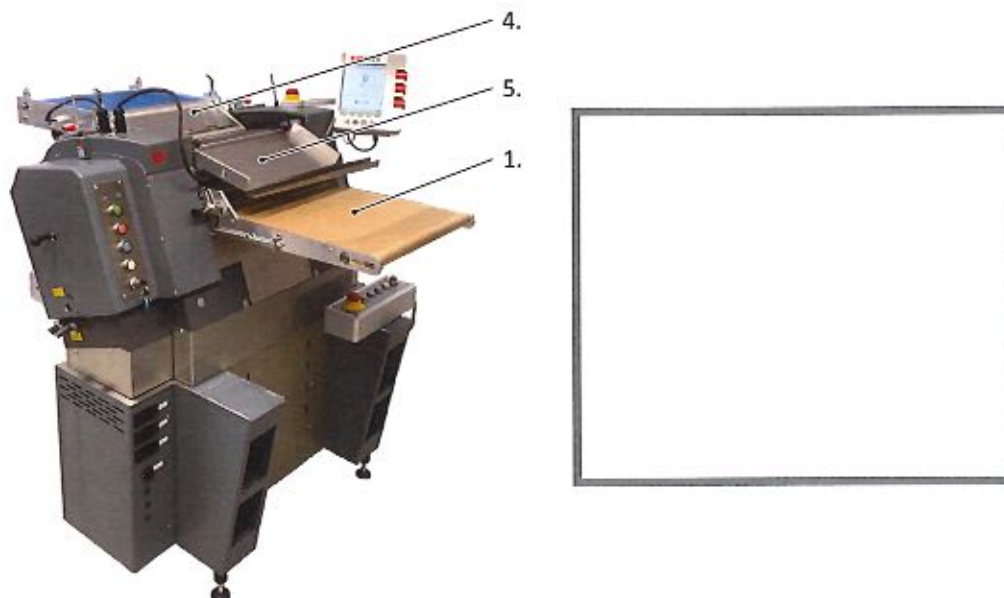


Abbildung 16: Konstruktive Umsetzung des Imprägnierwalzwerkes mit den Grundfunktionen. Funktionen 2 und 3 sind verdeckt (links), Entwicklungsanlage zum Testen der Funktionen (rechts).

Dieser Abschnitt behandelt die konstruktionstechnische Umsetzung der einzelnen Grundfunktionen des Imprägnierwalzwerks und deren Optimierungen.

Viele der beschriebenen Funktionen wurden in einem Vorversuch auf einer kleinen umgebauten Entwicklungsanlage untersucht (Abbildung 16 rechts).

Textil beschädigungsfrei aufbringen

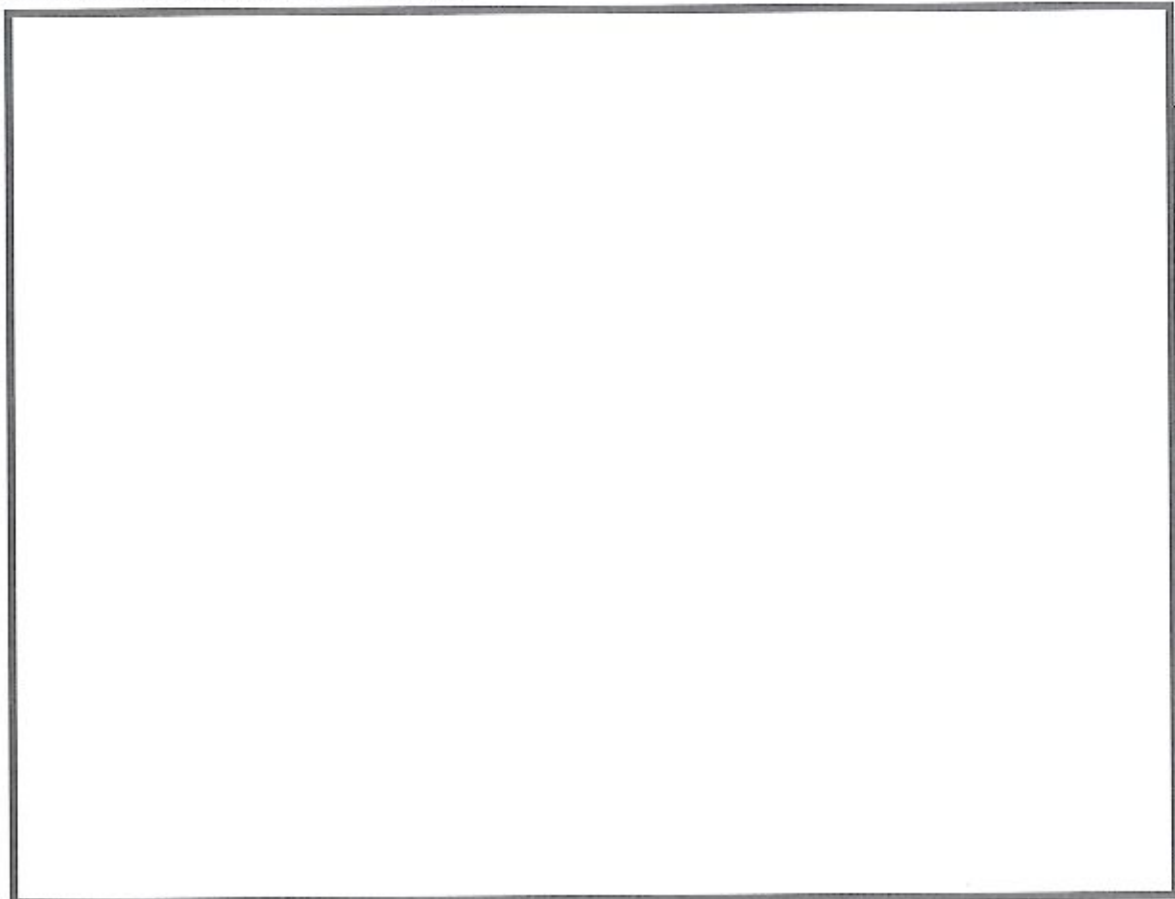


Abbildung 17: Zuführgitter am Ende des Zuführförderbandes

Durch das Gitter wird die Mindestlänge von möglichen Zuschnitten auf 80 mm erhöht.

Definierten kontinuierlichen Harzfilm aufbringen

Die Harzfilmbildung erfolgt über einen Spalt zwischen zwei sich mit gleicher Geschwindigkeit drehenden Walzen, schematisch in Abbildung 15 Grundfunktion 2 dargestellt. Dabei wird die durch den Harzfilm-Spalt erzeugte Schichtdicke in zwei Harzfilme auf die Walzen aufgerissen. Beim Aufreißen bilden sich auf dem Harzfilm Berge, Täler und über den Harzfilmen Fäden aus. Der sich ergebende Harzfilm ist unregelmäßig, aber von der Harzfilmdicke gleichmäßig im Verhältnis 1:1 zwischen den Walzen aufgeteilt.

Bei hoher Harzviskosität bilden sich beim aufreißenden des Harzfilms lange Fäden, die die Anlage als auch die Peripherie verdrecken. Es wurde eine Harzauffangwanne unter den Harzfilmspalt und Bleche angebracht, die die Harzfäden auffangen. Diese dienen gleichzeitig der Sicherheit, da sie ein Hineingreifen in Einzugsspalte verhindern.

Das Walzwerk besitzt keine Harzrückführung vom Harzabnehmer in den Harzfilmspalt. Eine Rückführung des Harzes kann bei Unterbrechung des Prozesses vom Harzabnehmer in den Spalt manuell durchgeführt werden. Die Fassungsmenge des Harzfilm-Spaltetes beträgt ca. 500 g.



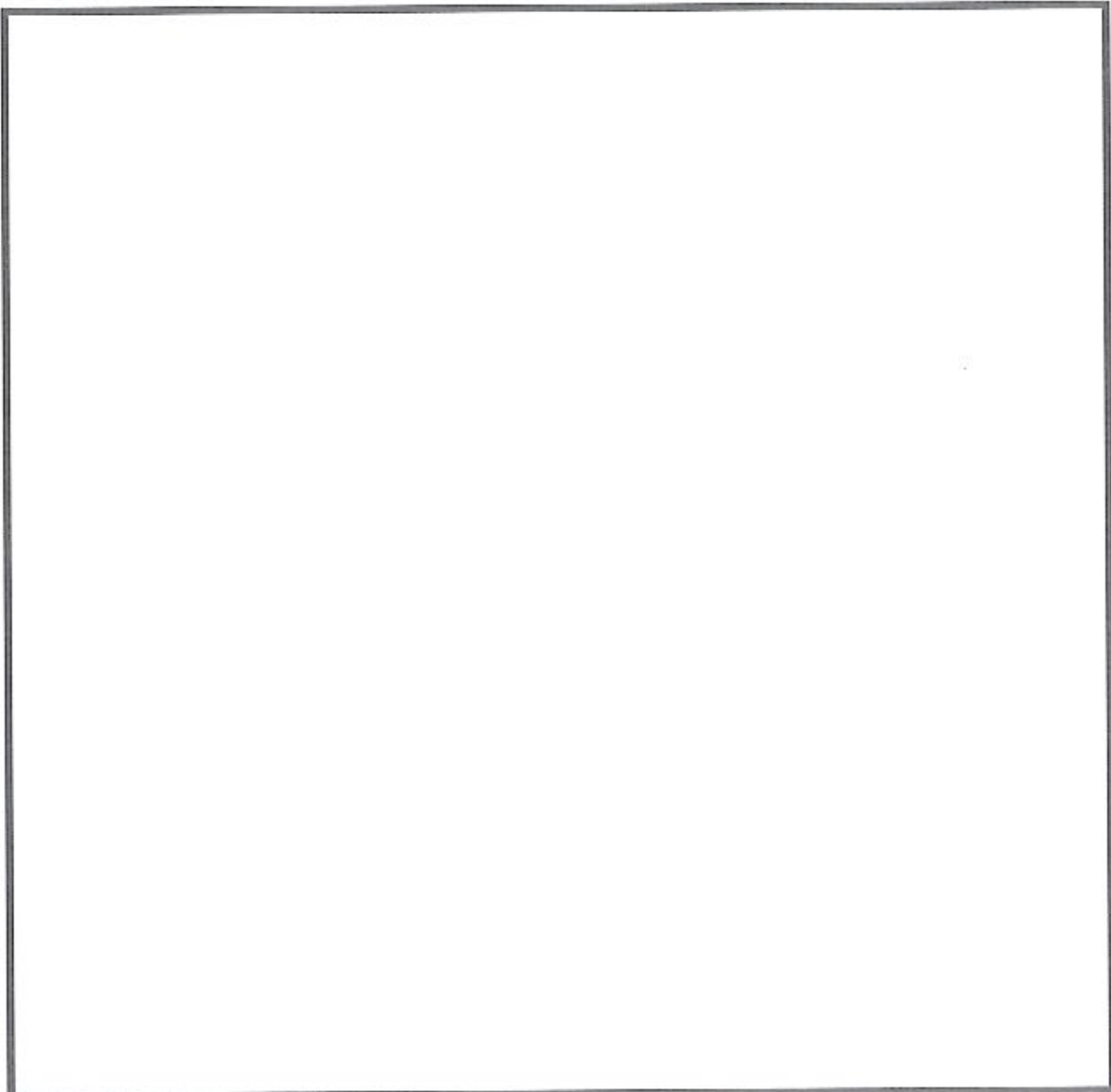
Bei hohen Harzviskositäten wird das Harz auch auf die Walze 3 übertragen, an der es vom Harzabnehmer aus den Harzkreislauf entnommen wird. Dies setzt bei einer Viskosität von 90 Pas und einem Spaltweitenverhältnis (Harzfilmspalt : Imprägnerspalt) von 1:5 ein. Der Effekt wird durch höhere Viskosität, höhere Liniengeschwindigkeit und höheres Spaltverhältnis (1:3 oder 1:1) verstärkt. Bei einer Viskosität von 100 Pas, einer mittleren Liniengeschwindigkeit von 5 m/min und einem Spaltverhältnis von 1:1 läuft der 400 ml fassende Harzfilmspalt innerhalb von 90 Sekunden leer. Bei einem Spaltverhältnis von 1:2 kann dies schon auf 90-120 Minuten erhöht werden.

Weiterhin ist festgestellt worden, dass durch die Linienpressung im Harzfilmspalt Rückschlüsse auf die Harzviskosität gezogen werden können. Dadurch ist ein Monitoring der Produktionsparameter bei der Imprägnierung möglich

#### Imprägnierung

Als Imprägniermethode wurde eIP gewählt. Die Gründe für die Entscheidung sind die geringere Rissanfälligkeit und dadurch eine bessere Prozessstabilität gegenüber anderen Imprägniermethoden. Die Beschränkung bezüglich der Imprägniertiefe wurde gegenüber der Prozessstabilität als eine mäßige Einschränkung beachtet.

#### Imprägniertes Textil beschädigungsfrei abnehmen



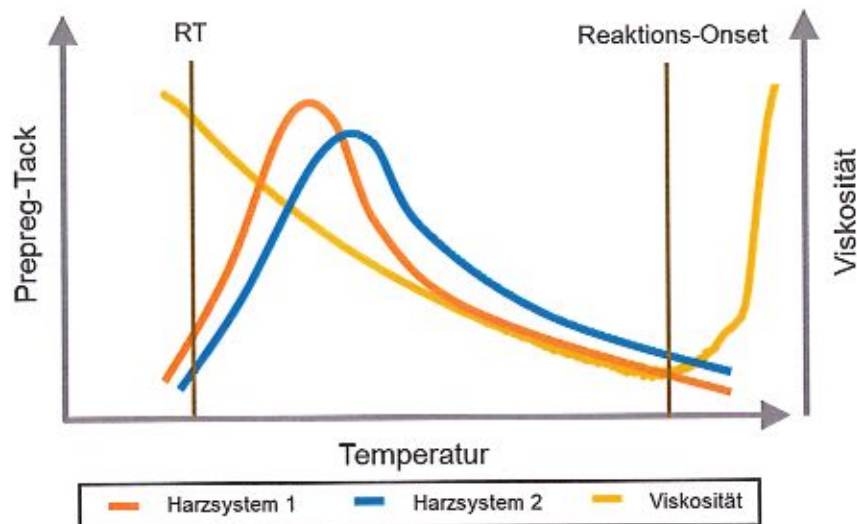
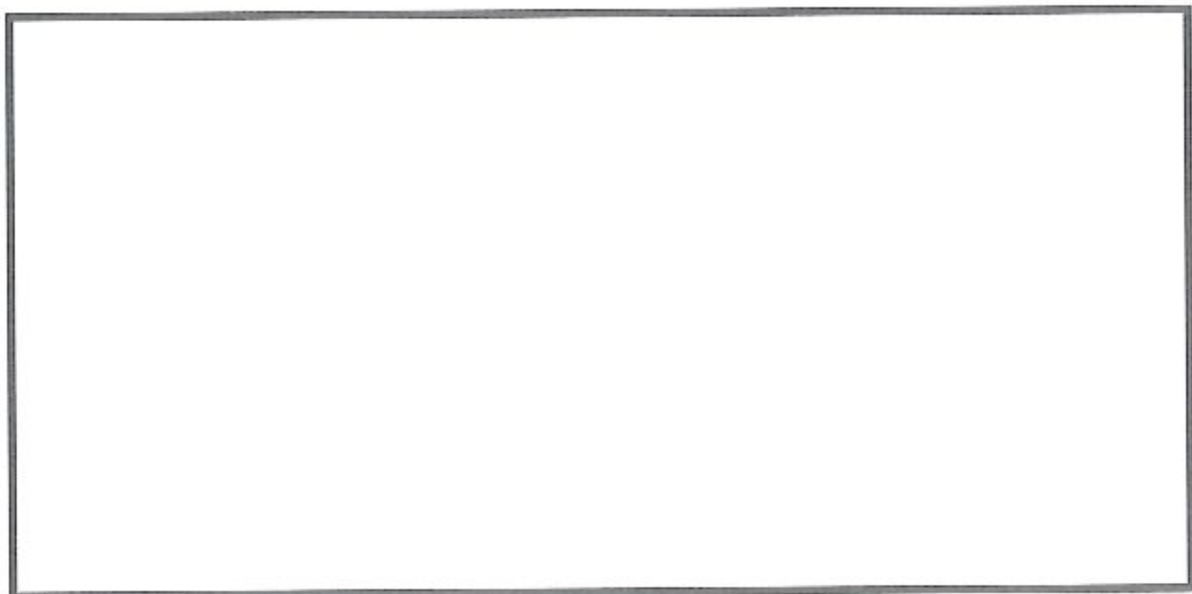


Abbildung 19: Abhängigkeit der Viskosität und des Prepreg-Tacks von der Temperatur



### Überschüssiges Harz abnehmen

Zur Lösung dieser Grundfunktion wurde ein serienmäßiger Abnehmer der Dreiwälzwerke genommen. Damit auch sehr hohe Viskositäten von den Walzen abgenommen werden können, wurde eine Temperierung des Abnehmers umgesetzt. Die umgesetzte Lösung ist in Abbildung 16 (5) dargestellt.



### 2.1.7 Arbeitspaket 5: Prozessoptimierung an der Pilotanlage

#### DirectPreg-Prozess

Zur Erprobung der Pilotanlage wurde eine komplexe Geometrie zum gleichzeitigen Testen der Grenzen der Geometriekomplexität und der Funktionsfähigkeit entwickelt. Diese wurde mit Hilfe der Bebindungs- und Schneidtechnik der Firma ARISTO Cutting Solutions GmbH zugeschnitten (Abbildung 21).

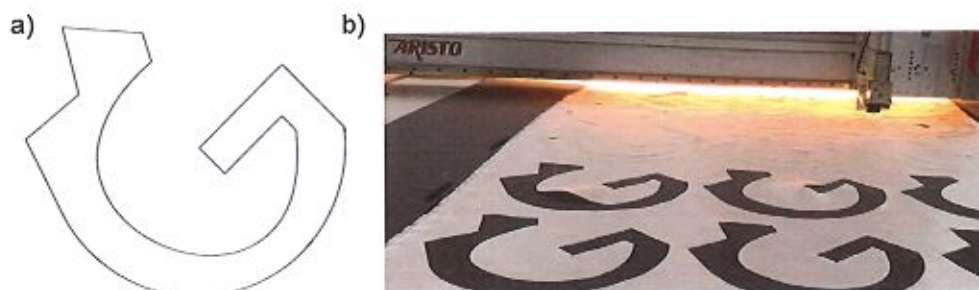


Abbildung 21: a) Komplexe Schnitt- und Imprägniergeometrie, b) Bebindungs- und Zuschnittprozess bei Aristo Graphic Systeme

Diese wurde auf dem IWW-PRO (Abbildung 31) imprägniert, wobei alle fünf Grundfunktionen getestet wurden. Abbildung 22 zeigt die Gegenüberstellung der schematischen Darstellung der Grundfunktionen und der realen Umsetzung dieser in der Pilotanlage (IWW-PRO). Grundsätzlich erfüllten alle Grundfunktionen ihren Zweck.

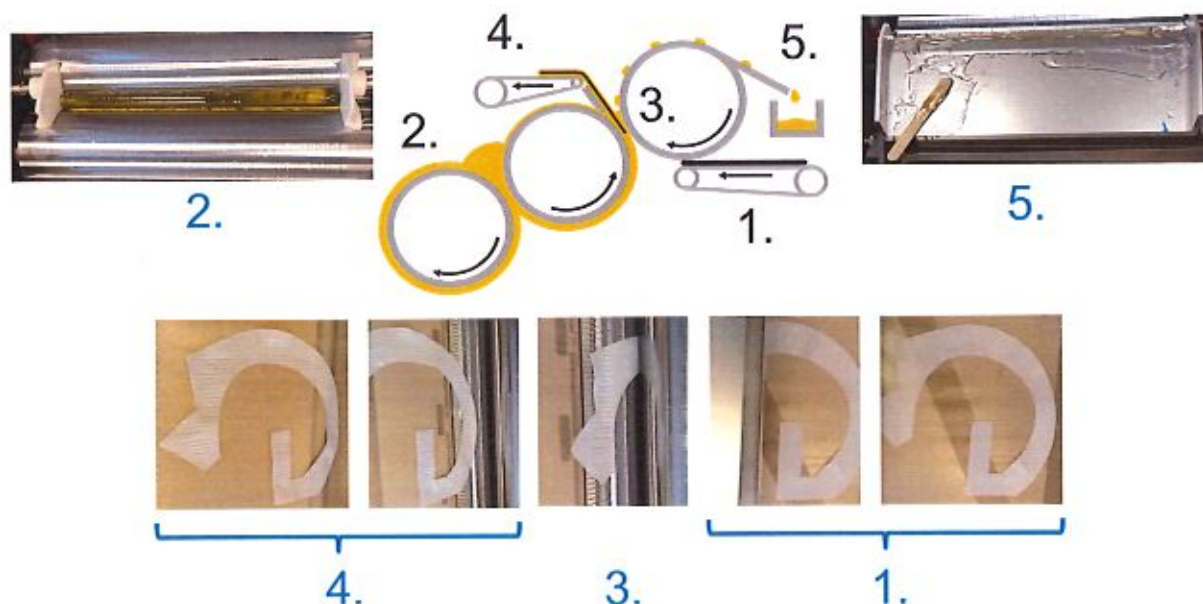


Abbildung 22: Schematisches Bild der Grundfunktionen (schwarze Schrift) und reale Umsetzung (blaue Schrift)

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern CompriseTec und TUHH wurden die so hergestellten Prepreg-Lagen in einer Heizpresse verpresst, getempert und die Kanten besäumt. Das Ergebnis ist in Abbildung 23 dargestellt.

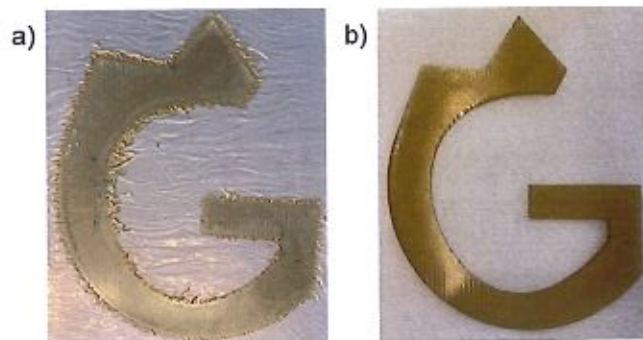


Abbildung 23: DirectPreg-Laminat aus komplexer Geometrie a) frisch aus der Heizpresse, b) getempert und besäumt

### Untersuchung der Imprägnierung

Als Qualitätsziel der Imprägnierentwicklung wurde die optische Unversehrtheit und ein FVG-Bereich zwischen 40 und 60 vol.% für die einzelnen imprägnierten Zuschnitte festgelegt. Die optische Unversehrtheit konnte durch die Wahl einer schonenden Imprägniermethode und der Automatisierung des Textilhandlings schon bei der Konzeptfindung und der Konstruktion optimiert werden.

Für die Optimierung des FVG wurde mittels statistischer Versuchsplanung Einstellkarten des FVG für verschiedenste Harz und Textil Kombinationen erstellt. Von Projektpartner TUHH wurden ähnliche Untersuchungen am IWW-TUHH und anderen Imprägniermethoden durchgeführt. Für die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird auf den Bericht der TUHH verwiesen.

Abbildung 24 a) zeigt eine exemplarische Einstellkarte für eIP. Zur Erstellung wurde ein zentralzusammengesetzter Versuchsplan mit zwei Einflussgrößen, Imprägnierspaltweite und Harzfilmdicke, gefahren. Abbildung 25 zeigt beispielhaft einen zentralzusammengesetzten Versuchsplan mit drei Einflussgrößen. Die Grundstruktur bildet eine vollfaktorieller Versuchsplan (Würfel), das Zentrum in der Mitte des Würfels und ein Stern, der außerhalb des Würfels herausragt. Die Einstellkarte (Abbildung 24 a) zeigt mit den unterschiedlich gefärbten Flächen, die Übergänge zwischen den verschiedenen FVG-Bereichen. Die Einstellkarte zeigt den gesamten geprüften Bereich, während das blaue Rechteck den statistisch relevanten Bereich eingrenzt. Die für den von EXAKT entwickelten Prototypen erstellte Einstellkarten, basieren auf den von der TUHH für ihr Imprägnierwalzwerk erstellten Einstellkarten. Die Einstellkarte wurde in Form von einer Excel-Liste umgesetzt. Diese umfasst die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Versuches.

Bei der in Abbildung 24 a) gezeigten Imprägnierung ist die signifikanteste Steuergröße die Imprägnierspaltweite, während eine Änderung der Harzfilmdicke kaum eine Änderung des FVG bewirkt, da die Höhenlinien meist horizontal verlaufen. Abbildung 24 b) zeigt eine Einstellkarte für die dieselbe Materialkombination mit höheren Imprägnierspaltweiten. Hier ist die Signifikanz der Einflussgrößen umgedreht. Da die Höhenlinien größtenteils vertikal verlaufen ist die Imprägnierspaltweite weniger signifikant als die Harzfilmdicke. Bei sehr hohen Imprägnierspaltweiten flachen die Höhenlinien in eine horizontale Richtung ab, was darauf zurückzuführen ist, dass die Imprägnierspaltweite zu groß ist und Textil und Harz keinen optimalen Kontakt aufweisen.



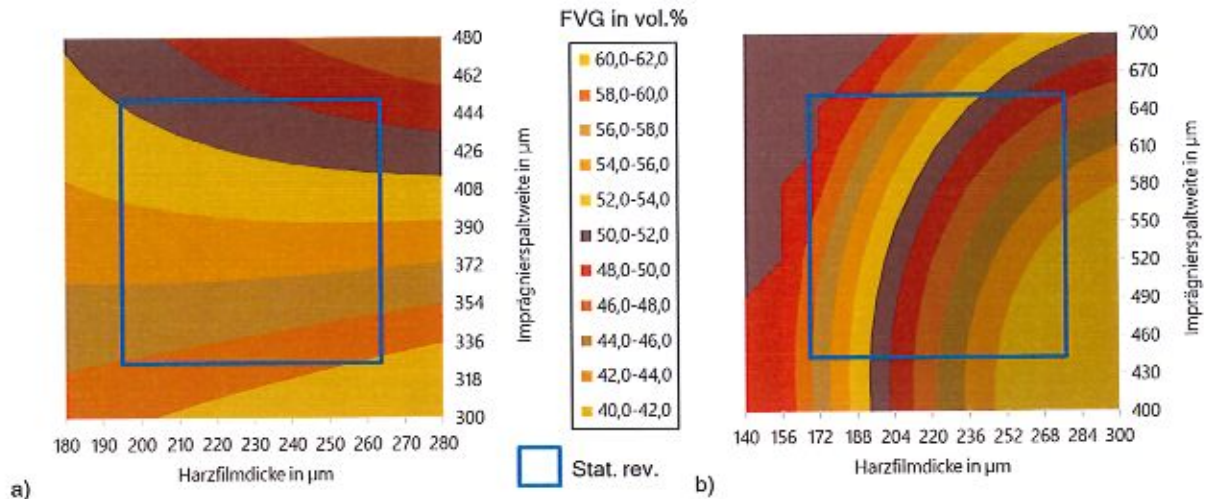


Abbildung 24: Faservolumengehalt in Abhängigkeit der Spaltweiten mit Blendur 90IK01 und Kohlenstofffasertextil in Körperwebung  $245\text{g/m}^2$  a) Harzfilm-/Imprägnierspaltverhältnis im Schnitt: 1:0,9 , b) Harzfilm-/Imprägnierspaltverhältnis im Schnitt: 1: 1,3

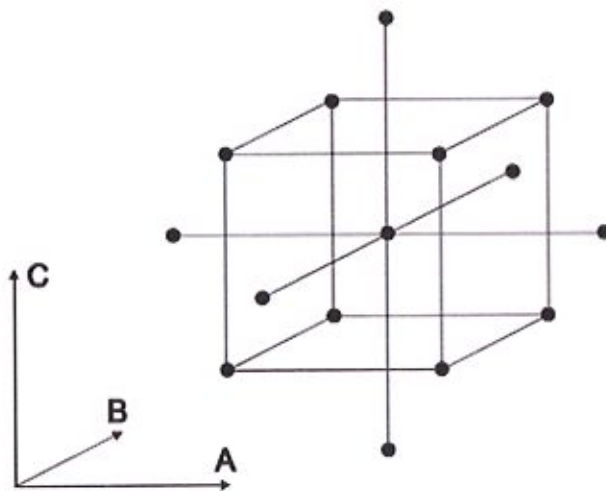


Abbildung 25: Beispiel eines zentralzusammengesetzter Versuchsplan mit 3 Einflussgrößen

Aufgrund der Konstruktion wurde bei Viskositäten über 90 Pas Harz über die Mittelwalze auf die dritte Walze übertragen. Das Harz auf der dritten Walze wird aus dem Prozess entfernt und kann nur manuell zurückgeführt werden. Bei ungünstig gewählten Spaltverhältnissen zwischen Harzfilm- und Imprägnierspalt kann das Harzreservoir im Harzfilmspalt, welches eine Fassungs menge von 500 g hat, innerhalb weniger Minuten leerlaufen. Um solche Prozessunterbrechungen zu verringern, muss stets gewährleistet sein, dass der Imprägnierspalt größer eingestellt ist als der Harzfilm-Spalt. Abbildung 24 zeigt die Auswirkung dieser Regel auf den FVG.

Monitoring der Prozessparameter

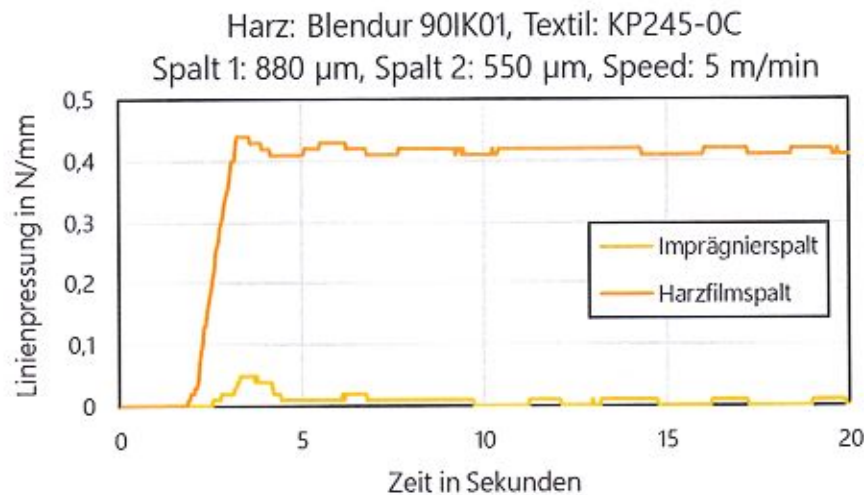


Abbildung 26: Signal der Linienpressung

Die deutlich höhere Spaltweite des Imprägnierspalt führt dazu, dass kaum ein Messsignal im Imprägnierspalt detektiert wird. Abbildung 26 zeigt den Verlauf der Linienpressung in beiden Spalten während der Imprägnierung. Im Harzfilmspalt herrscht eine konstante Linienpressung von ca. 0,4 N/mm. Mit diesem Messwert und der Kenntnis der Arbeitsbreite und Walzendurchmesser kann auf die Viskosität des Harzes geschlossen werden.

Im Imprägnierspalt gibt es einen kleinen Ausschlag von 0,05 N/mm bei 3,5 s, welcher mit dem Einfahren des Textils in den Spalt zusammenhängen könnte. Der Rest des Signals ist das typische mechanische Rauschen des Walzwerks. Große Falten und Beschädigungen können dennoch gut detektiert werden. Von der Linienpressung kann dabei nicht auf den FVG des Prepregs geschlossen werden.

Mit der Linienpressung im Imprägnierspalt können Defekte bei der Imprägnierung detektiert werden. Abbildung 27 zeigt einen solchen Signalverlauf bei der Detektion eines Risses. Falten, die nicht vollständig imprägniert werden, können ebenso über eine erhöhte Linienpressung im Imprägnierspalt detektiert werden.

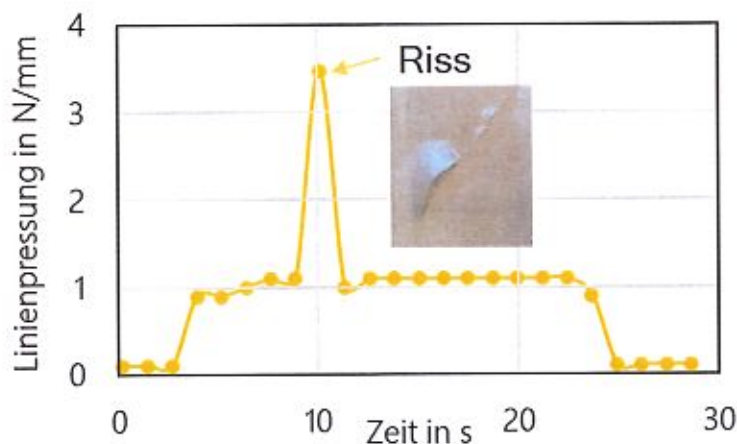


Abbildung 27: Linienpressung Imprägnierspalt bei Rissdetektion



### 2.1.8 Arbeitspaket 7: DirectPreg-Prozessauswertung und Optimierung

#### Laminatgüte: Porengehalt

In einer von TUHH und CT durchgeführten studentischen Arbeit wurde der Einfluss der Imprägniermethode im Wechselspiel mit der Aushärtemethode untersucht. Dabei wurde die Aushärtemethoden Autoklav, Heißpresse und Wärmekammer und die Imprägniermethoden üSP und ZIP untersucht. In Zusammenarbeit von EXAKT und TUHH wurde eIP ergänzt. Dabei wurde die gleiche Vorgehensweise der studentischen Arbeit bei der Herstellung und Auswertung der Lamine verwendet.

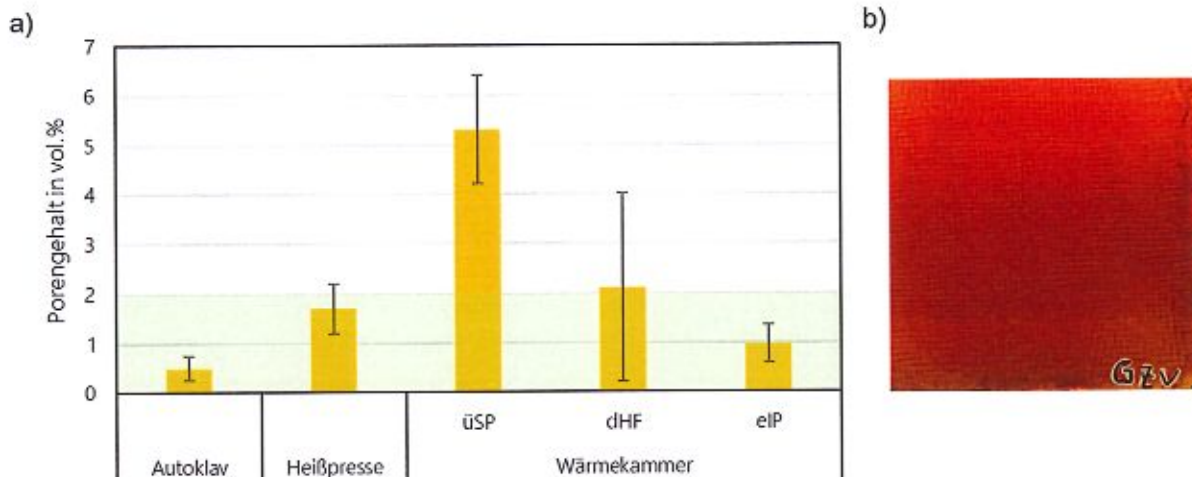


Abbildung 28: a) Porengehalt in Abhängigkeit von Aushärte- und Imprägniermethode b) mittels eIP und Wärmekammer hergestelltes Laminat

Abbildung 28 a) zeigt den Porengehalt der Lamine in Abhängigkeit des Aushärteverfahrens und der Imprägniermethode. Der grün markierte Bereich zeigt dabei den als annehmbar definierten Bereich von 2 vol.%. Die ermittelten Werte stammen aus der von TUHH und CT durchgeführten Arbeit, lediglich der Wert der einseitigen Imprägnierung (eIP) ist neu. Abbildung 28 b) zeigt einen Ausschnitt aus dem mittels eIP und Wärmekammer hergestellten Laminats.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass die eIP deutlich niedrigeren Porengehalt erzeugt als die anderen Imprägniermethoden, was überrascht, da die eIP das Textil eher beschichtet, statt es zu tränken wie die anderen beiden Imprägniermethoden. Wahrscheinlich entstehen durch die eIP beim Lay-Up-Luftkanäle, durch die Luft im nachfolgenden Prozesse besser entweichen kann. Durch die eIP können auch in der Wärmekammer Lamine unter der 2 vol.% Porengehalt hergestellt werden.

#### Laminatgüte: mechanische Eigenschaften

Ähnlich wurden die mechanischen Eigenschaften der aus den Prepregs hergestellten Lamine untersucht. Es wurden Prepregs aus Blendur 90IK01 und einem UD-Glasfasergewebe hergestellt und anschließend auf der Heißpresse der TUHH zu Laminaten verpresst. Lamine hatten optisch eine sehr gute Qualität auf der einen und eine mittlere auf der anderen Seite. Dies ist mit der einseitigen Imprägnierung erklärbar. Eine Optimierung der Viskosität zum Presszeitpunkt kann diesen Umstand verbessern. Jedoch sind die gemessenen Ergebnisse dadurch nur ein Richtwert, da durch eine Optimierung des Gesamtprozesses die ILSS-Messwerte nochmals verbessert werden könnten.

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse der ILSS-Messungen. Bis auf die Messwerte unter DP-Heißpresse stammen die Messwerte aus einer studentischen Arbeit der TUHH. Dennoch ist zu erkennen, dass das Laminat DP-Heißpresse höhere interlaminae Scherfestigkeiten aufweist als DP-Autoklav und RTM. Der Unterschied zum DP-Autoklav ist mit der besseren optischen Qualität und somit einem niedrigeren Porengehalt zu erklären. Der Unterschied zum RTM Laminat lässt sich nicht mit der optischen Qualität und geringerem Porengehalt erklären, da das RTM Laminat eine höhere optische Qualität als auch einen niedrigeren Porengehalt hatte. Der geringfügig bessere Wert lässt sich mit deutlich höherem Druck bei der Laminatherstellung erklären, wodurch Fasern und Harz eine stärkere Anbindung ausbilden.

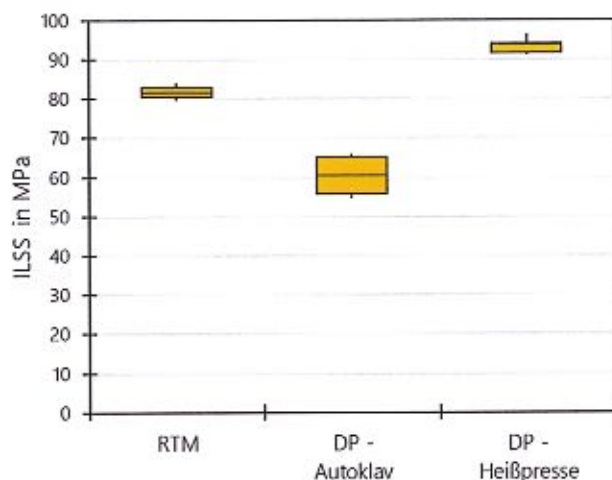


Abbildung 29: ILSS-Ergebnisse bei RTM und DP

Abschließend lässt sich sagen, dass mit DirectPreg und angepassten Herstellungsparametern ähnlich gute Lamine herstellen lassen, wie mit herkömmlichen Verfahren.

#### Wirtschaftliche Aspekte des DirectPreg-Prozesses

Eine wirtschaftliche Betrachtung des Imprägnierprozesses konnte im Vorhabenzeitraum leider nicht anhand eines Demonstrators stattfinden, da ein Termin zum Bau eines Demonstrators aufgrund der COVID-19 Pandemie nicht im Vorhabenzeitraum stattfinden konnte. Stattdessen wurde eine Betrachtung anhand der durchgeführten Versuche erhoben.

Zur einfachen Verständlichkeit wurde der Imprägnierprozess in Temperieren & Einrichten, Imprägnieren, Handhabung der imprägnierten Zuschnitte und Reinigen aufgeteilt. Der Punkt Verpacken ist bei einer direkten Verwendung der Prepregs nach der Imprägnierung nicht Bestandteil des Prozesses.

Abbildung 30 zeigt den prozentualen Anteil der einzelnen Prozessschritte im Laufe eines 8 h Arbeitstages. Vor der Optimierung waren die Prozessschritte Verpacken und Imprägnieren zusammengelegt worden. Die Diagramme zeigen, dass vor der Optimierung 50 % der Arbeitszeit für das Reinigen des Walzwerks während und nach dem Imprägnierprozess eingesetzt wurde. Die produktive Arbeitszeit, in diesem Fall das Imprägnieren, nahm vor der Optimierung nur 16 % der Arbeitszeit ein.

Bei der Optimierung wurde vor allem die Reinigungsfähigkeit des Walzwerks verbessert. Dies wurde durch Auffang- und Ableitbleche für Harzreste bewerkstelligt. Diese Bleche verhinderten, das Harz im Laufe des Prozesses auf bewegende Teile wie Förderbänder



gelangt, und das Harz im ganzen Anlagenbereich verschmieren. Zur leichten Handhabung wurden die Prepregs auf Trägerpapier abgelegt, welches mit einem Fördermechanismus versehen, das Förderband am Prepreg-Abnehmer ersetzte, in dem es sich von einer Endlosrolle abrollte und zur weiteren Handhabung zuschneiden lässt.

Nach der Optimierung (Abbildung 30 b) nahmen die Anteile der Reinigung sehr stark ab. Die Reinigung während der Arbeit am Walzwerk beschränkt sich derzeit auf das gelegentliche Reinigen des Prepreg-Abnehmers, um ein Aushärten des Harzsystems auf diesem zu verhindern. Dadurch konnte der Anteil produktiver Arbeitszeit von 16 % auf 55 % verdreifacht werden. Ebenso konnte das Temperieren und Einrichten parallelisiert werden, sodass sich die Zeit dieses Arbeitsschrittes von 24 % auf 15 % reduzieren ließ.

Die Zykluszeit für die Imprägnierung eines 380 x 400 mm Zuschnittes beträgt bei einer Fördergeschwindigkeit von 5 m/min 120 s und 87 s, wenn das Verpacken aus prozesstechnischen Gründen entfallen kann.

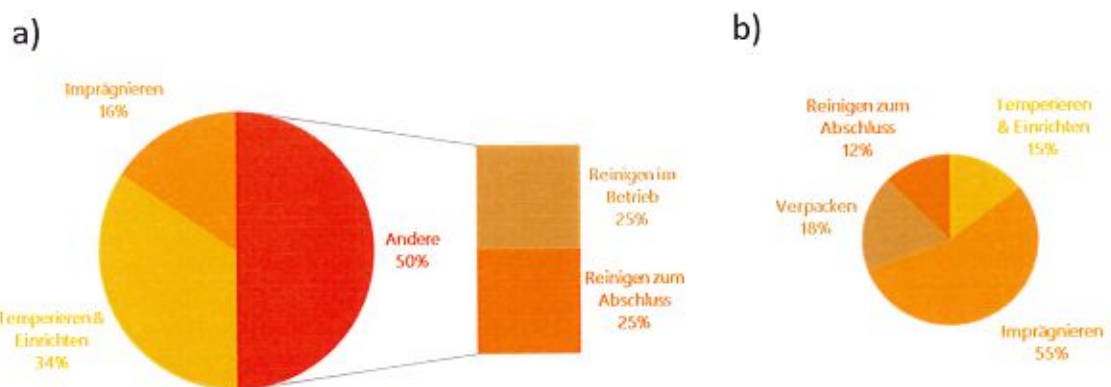


Abbildung 30: Prozentualer Zeitverbrauch im Tagesverlauf a) vor der Optimierung b) nach der Optimierung

Imprägnierwalzwerk: Kurzzusammenfassung



Abbildung 31: IWW-PRO

Das IWW-PRO ist Teil eines neuartigen Prozesses zur Herstellung von Faserverbundbauteilen. Es können Zuschnitte technischer Textilie verschiedener Formen zielgenau mit Harz beschichtet bzw. imprägniert werden. Durch die kleine mobile Anlage und geringe Materialmengen können Prepregs zeitnah und in flexibler Menge unmittelbar vor der Weiterverarbeitung hergestellt werden, sodass eine aufwändige Tiefkühllogistik

entfällt. Durch die Spalteinstellung kann der FVG präzise eingestellt und überwacht werden. Ebenso können die Unversehrtheit der Prepregs und die Viskosität des Harzsystems aufgezeichnet und überwacht werden.

Das IWW-PRO kann aufgrund der geringen Materialmengen und der hohen Flexibilität bei Textil und Harzauswahl im R&D-Bereich und mit einigen Einschränkungen im Produktionsbereich eingesetzt werden.

Tabelle 3: Technische Daten des IWW-PRO

<b>IWW 450 - DirectPreg</b>			
<b>Dimension</b>		<b>Harzsysteme</b>	
Aufstellfläche (BxT)	1080 x 1400 mm	Lösungsmittel	keins
Empfohlene Ausstellfläche (BxT)	2000 x 3500 mm	Viskosität	1 – 200 Pas
Höhe	1350 mm	WetPrep	1 – 80 Pas
Arbeitshöhe	950 / 1100 mm	Prepreg	80 – 200 Pas
Arbeitsbreite	400 mm	Verarbeitungsdauer bei konst. T	5 h
Gewicht	ca. 370 kg		
<b>Temperierung</b>		<b>Textil</b>	
Wasseranschluss Zulauf	10 mm	Werkstoff	Bisher C und G-Faser
Wasseranschluss Rücklauf	13 mm	Grammatur	80 – 600 g/m <sup>2</sup>
Vorlauftemperatur max.	80 °C	- Kohlenstofffaser	80 – 400 g/m <sup>2</sup>
Textilabnehmer	max. 110 °C	- Glasfaser	160 – 600 g/m <sup>2</sup>
Harzabnehmer	80 °C	Gewebe	Alle
Umgebungstemperatur	10 – 40 °C	Gelege	beidseitig querfixiert
<b>Elektrischer Anschluss</b>		<b>Textilgröße</b>	
Spannung / Frequenz	3 x 380-420 V / 50 -60 Hz	Breite	10 – 380 mm
Leistung	1700 W	Länge	80 – 2000* mm

### Meilensteine

Mit dem Erreichen der Meilensteine M2 und M4 scheidet EXAKT aus dem Vorhaben aus. Mit einer erfolgreichen Materialdefinition und der Umsetzung der Konstruktion hat EXAKT seine Verpflichtungen im Vorhaben erfüllt. Die Projektpartner werden bei ihren letzten Arbeitspaketen außerhalb des Vorhabenszeitraum unterstützt.



### 2.1.9 Arbeitspaket 6: Demonstratorbau

Ein Termin zur Herstellung eines Demonstrators wurde nach dem offiziellen Ende des Projektlaufzeit für EXAKT durchgeführt. EXAKT unterstützte den Projektpartner CompriseTec bei der Bedienung des IWW-PRO. Für die Ergebnisse dieses Termins wird auf Bericht von CompriseTec verwiesen.

### 2.1.10 Arbeitspaket 10: Internationalisierung des Clusters „Hamburg Aviation“

Im Rahmen des Projektes wurden Projekttreffen in Montreal und Hamburg durchgeführt. Bei denen die ansässigen Flugzeughersteller Bombardier und Airbus besucht und über das Projektvorhaben informiert wurden. Ein reger Informationsaustausch zwischen den Projektpartnern fand in regelmäßigen Projekttreffen statt.

Im Februar 2020 wurde das DirectPreg Verfahren von der TUHH und EXAKT Advanced Technologies GmbH beim 57 HH Aviation Forum vorgestellt.



Abbildung 32: Gruppenbild der Teilnehmer 57 HH Aviation Forums: von links nach rechts: Ulf Köpke (EXAKT), Björn Riecken (CT), Johanna Roestel (ehem. CT), Jesper Buck (HSU), Prof. Dr. Bodo Fiedler (TUHH)

Leider entfaltete sich die COVID-19 Pandemie genau zum Zeitpunkt der ersten präsentablen Ergebnisse, sodass die Internationalisierungsmaßnahmen nicht im geplanten Maßstab umgesetzt werden konnten.

## 2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die geplanten Selbstkosten des Projektes konnten eingehalten werden. Der Hauptanteil der Kosten lag im Bereich der Personalkosten, die um ca. 13% überschritten wurden, jedoch durch geringere Ausgaben bei den anderen geplanten Positionen ausgeglichen werden konnten. Bedingt durch die Corona-Pandemie, konnten Einsparungen bei den Reisekosten erzielt werden. Ebenso konnten bei den Materialkosten eingespart werden, da eine bereits bei EXAKT vorhandene Maschine für die Zwecke im Projekt umgebaut werden



konnte und es nicht nötig war, eine komplett neue Maschine aufzubauen. Lediglich die Bauteile für die Nebenfunktionen, wie z.B. die Textilzufuhr und den Textilabnehmer mussten neu konstruiert, gefertigt und montiert werden.

### 2.3 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Der DirectPreg-Prozess wurde parallel mit dem Prototype eines Imprägnierwalzwerkes entwickelt. Dabei hat sich gezeigt, dass es hierfür notwendig war, ein Höchstmaß an dem Verständnis von dem Gesamtprozess zu erlangen. Hierzu gehören auch die Rohstoffe und deren Charakterisierung. Dadurch war es möglich ein Verständnis von den Zusammenhängen im Imprägnierprozess zwischen den verwendeten Rohstoffen und den Prozessparametern der Maschine zu erhalten. Die Zusammenhänge des gesamten Systems konnten dadurch verstanden werden, wodurch die Grundlage für die nächsten innovativen Schritte bei der Weiterentwicklung des DirectPreg-Prozesses gelegt sind.

### 2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Schon im Vorhabenzeitraum führte EXAKT eine Befragung des eigenen Kunden- und Vertriebsnetzwerk durch, um die Verwertungsmöglichkeiten des Imprägnierwalzwerkes abzuschätzen. Die Befragung zeigte ein hohes Interesse am DirectPreg-Prozess.

Der DirectPreg-Prozess überzeugte durch ein hohes Innovationspotenzial bezüglich Anlagen,- Material-, Prozess- und innovativer Bauteileentwicklung. Die mobile Anlage des Imprägnierwalzwerkes erlaubt eine flexible Auswahl des Einsatzortes. Weiterhin birgt die Materialflexibilität ein hohes Potential an Zielmärkten für weitere Materialentwicklung. Die Variation der Prepeg-Eigenschaften ermöglicht eine gezielte Prozessentwicklung der nachgelagerten Prozesse für unterschiedliche Anwendungen. Auch die Reparaturbranche, welche nicht verwendete Prepregs häufig wegen des Verfallsdatums entsorgen muss, ist ein mögliches Einsatzgebiet für den Prozess.

EXAKTs weiteres Vorgehen sieht vor, den Bekanntheitsgrad des Prozesses zu erhöhen. Dafür werden Kunden gesucht, denen das Walzwerk vorgestellt werden kann. Um den Kunden den Einstieg zu erleichtern, werden Versuchsdurchführungen zur Material- und Prozessentwicklung in Kooperation mit dem Projektpartner CompriseTec angeboten.

Ein potenzielles Einsatzgebiet sieht EXAKT beim Upscaling des Imprägnierprozesses vom Imprägnierwalzwerk auf die konventionellen Prepreg-Anlagen.



### 2.5 Veränderung des technologischen Status quo im Vorhabenzeitraum

Im Vorhabenzeitraum sind keine Veröffentlichungen oder Patente bekannt geworden, die dem Vorhaben widersprechen. Die Erteilung eines Patentes für den entwickelten Prozess sichert diese Aussage zusätzlich ab.

### 2.6 Veröffentlichungen

Im Laufe des Vorhabenzeitraums wurde bezüglich DirectPreg eine Veröffentlichung auf der SAMPE Europe 2020 in Amsterdam veröffentlicht.



Am 29.07.2021 wurde ein Patent unter dem Namen „Herstellung von Prepregs für ein Faserverbundbauteil“ unter der Kennziffer: DE 10 2020 102 015 A1 vom DPMA veröffentlicht. Es handelt sich um ein Patent der Firmen CompriseTec und EXAKT zum Schutz des DirectPreg-Prozesses und des Imprägnierwalzwerkes.

Eine Veröffentlichung ist in Form eines Vortrages auf dem nächsten Jahreskongress des Netzwerkes NanoCarbon im Februar 2022 geplant.

Weitere Veröffentlichung mit den Projektpartnern sind geplant. Für weitere Informationen wird auf die Berichte der Projektpartner TUHH und CompriseTec verwiesen.

### **3 Anlage**

- Erfolgskontrollbericht (vertraulicher Teil, der nicht veröffentlicht wird)
- „Kurzfassung“ (Berichtsblatt/ Document Control Sheet)
- Zahlenmäßiger Nachweis