

# ABSCHLUSSBERICHT

Im Rahmen des Campus Carbon 4.0 für das Verbundvorhaben  
**MAI CC4 CaRinA – Carbonfaser Recyclingwerkstoffe  
für industrielle Anwendungen**

**Projektkennung:**

2-NW-1707

**Projektlaufzeit:**

1. November 2017 – 31. Oktober 2020

**Veröffentlicht am**

12. August 2021



Diese Publikation ist dauerhaft nachgewiesen im Repository der Fraunhofer-Gesellschaft unter <https://doi.org/10.24406/igcv-n-638882>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

## BETEILIGTE INDUSTRIEPARTNER

**faurecia**



**TENOWO**  
NONWOVENS



**MAI CC CaRinA**



## FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR GIEßEREI-, COMPOSITE- UND VERARBEITUNGSTECHNIK IGCV

Am Technologiezentrum 10  
86159 Augsburg

Titelbild: © rangizzz – stock.adobe.com  
Sonstige Bilder und Illustrationen  
(falls nicht anders angegeben):  
© Fraunhofer IGCV

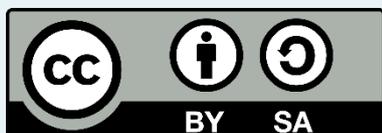
## KORRESPONDIERENDER AUTOR UND PROJEKTLEITER

Frank Manis, Fraunhofer IGCV

## AUTOREN

Georg Stegshuster, Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH  
Hannes Osburg, Tenowo GmbH  
Hannah Paulus, SGL Carbon SE  
Simon Keller, SGL Carbon SE  
Philipp Seiwald, Edag Engineering Group AG

Der Text dieser Broschüre wird freigegeben unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen, Version 3.0 Deutschland (CC BY-SA 3.0 de).



Unter der Bedingung, dass die Publikation als »Manis et al. (2021). Abschlussbericht MAI CC4 CaRinA – Carbonfaser Recyclingwerkstoffe für industrielle Anwendungen« sowie die Lizenz als »Lizenz: CC BY-SA 3.0 de« einschließlich der untenstehenden Lizenz-URL genannt werden, darf der Text dieser Broschüre vervielfältigt, weitergereicht und auf beliebige Weise genutzt werden, auch kommerziell und ebenso online wie in gedruckter oder anderer Form. Auch die Bearbeitung ist erlaubt unter der zusätzlichen Bedingung, dass das neu entstandene Werk als Bearbeitung gekennzeichnet wird und im

Falle einer Veröffentlichung unter derselben Lizenz wie diese Broschüre freigegeben wird.

Die vollständigen Lizenzbedingungen sind zu finden unter der URL <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode>

Eine vereinfachte Darstellung der durch die Lizenz gegebenen Freiheiten ist zu finden unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>



**Alle wollen  
zurück zur Natur.  
Nur keiner zu Fuß.«**

**Werner Mitsch**



---

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>AHB</b>	Außenbautbauteil
<b>CD</b>	Cross Direction
<b>CF</b>	Carbonfaser
<b>CV</b>	Variationskoeffizient
<b>DFCM</b>	Dynamic Fluid Compression Moulding
<b>FGA</b>	Fasergewichtsanteil
<b>FVG</b>	Faservolumengewicht
<b>MD</b>	Machine Direction
<b>NV</b>	Nassvlies
<b>PA</b>	Polyamid
<b>PET</b>	Polyethylenterephthalat
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PPS</b>	Polyphenylensulfid
<b>rCF</b>	Recycelte Carbonfaser
<b>RTM</b>	Resin Transfer Moulding
<b>TP</b>	Thermoplast
<b>WCM</b>	Wet Compression Moulding
<b>WPT</b>	Wetpress and Thermoforming

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ZIEL DES VORHABENS .....</b>	<b>1</b>
<b>1 HAUPTARBEITSPAKET 1: SPEZIFIKATION .....</b>	<b>2</b>
1.1 Definition und Charakterisierung der recycelten Carbonfasern .....	2
1.2 Thermoplastische Fasern und Naturfasern im Projekt .....	3
1.3 Verwendete Fasermischungen für die Vliesstoffherstellung .....	5
1.4 Definition der Prüfverfahren .....	5
1.5 Definition der Materialparameter und Vorgehen zur Simulation .....	6
1.6 Definition der Demonstratoren .....	7
<b>2 HAUPTARBEITSPAKET 2: HALBZEUGHERSTELLUNG .....</b>	<b>9</b>
2.1 Arbeitspaket: rCF-Krempelvliesherstellung .....	9
2.1.1 Arbeitspaket Verarbeitungsstudie rCF-Typen .....	9
2.1.2 Arbeitspaket Faservorbereitung - Mischung und Öffnung .....	19
2.1.3 Arbeitspaket Verfestigungsuntersuchung .....	19
2.1.4 Arbeitspaket Modifikation Krempel (Hacker) .....	19
2.1.5 Arbeitspaket: Modifikation Krempel (Faseröffnung) .....	24
2.2 Arbeitspaket: Organovliesproduktion .....	25
2.2.1 Arbeitspaket Pulverstreuer Technologie .....	26
2.2.2 Arbeitspaket: Vliesstacking .....	30
2.2.3 Arbeitspaket: Unterschiedliche NF/TP/CF-Fasermischung .....	38
2.2.4 Arbeitspaket: Untersuchung zu PET-Fasern .....	44
2.3 Arbeitspaket: Nassvliesherstellung .....	51
2.4 Arbeitspaket: Prozessbewertung .....	52
<b>3 HAUPTARBEITSPAKET 3: WEITERVERARBEITUNG .....</b>	<b>55</b>
3.1 Arbeitspaket: Duomere Verarbeitung .....	55
3.1.1 Arbeitspaket: Nasspressen .....	55
3.1.2 Arbeitspaket: RTM .....	70
3.1.3 Arbeitspaket: Verstärkung mit unidirektionalen Materialien .....	72
3.2 Arbeitspaket: Thermoplastische Verarbeitung .....	79
3.2.1 Arbeitspaket: Verarbeitungsstudie Organovliese .....	79
3.2.2 Arbeitspaket: Drapierstudie .....	92
3.2.3 Arbeitspaket: Verstärkung mit Thermoplastmaterialien .....	104
3.2.4 Arbeitspaket: Thermoformen und Spritzgießen .....	107
3.2.5 Arbeitspaket Fortsetzung AP 3.2.4 Hinterspritzen von Organoblechen .....	119
3.3 Arbeitspaket: Prozessbewertung .....	124
<b>4 HAUPTARBEITSPAKET 4: MATERIALCHARAKTERISIERUNG .....</b>	<b>129</b>
4.1 Arbeitspaket: Fasercharakterisierung .....	129
4.2 Arbeitspaket: Halbzeugcharakterisierung .....	131
4.3 Arbeitspaket: Mechanische Charakterisierung .....	134
4.4 Arbeitspaket: Akustische Charakterisierung .....	138
4.5 Arbeitspaket: Datenkonsolidierung .....	140
<b>5 HAUPTARBEITSPAKET 5: CAX INTEGRATION .....</b>	<b>145</b>
5.1 Arbeitspaket: Integration von Kennwerten in CAX-Modelle .....	145
5.2 Arbeitspaket: Case Studies .....	149



---

<b>6</b>	<b>HAUPTARBEITSPAKET 6: POTENTIALBEWERTUNG UND ANWENDUNGEN.....</b>	<b>154</b>
6.1	Arbeitspaket: Gesamtbewertung und Ableiten von Optimierungsansätzen .....	154
6.2	Arbeitspaket: Funktionsintegration durch Hinterspritzen .....	159
6.3	Arbeitspaket: Demonstratorfertigung .....	159
6.3.1	Demonstrator – SGL / Türverkleidung .....	160
6.3.2	Demonstrator – Airbus Helicopters / Hitzeschutz .....	163
6.3.3	Demonstrator – Röchling Automotive / Unterboden .....	164
6.4	Arbeitspaket: Lessons Learned .....	165
	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN AUS DEM PROJEKT .....</b>	<b>166</b>
	<b>ABSCHLUSSARBEITEN AUS DEM PROJEKT.....</b>	<b>166</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>167</b>

## ZIEL DES VORHABENS

Mit der Entwicklung serientauglicher Fertigungsmethoden ist der Einsatz carbonfaserverstärkter Kunststoffe (CFK) in den letzten Jahren stark angestiegen. Als Leichtbauwerkstoff mit hervorragender spezifischer Steifigkeit und Festigkeit wird die Bedeutung dieses Materials insbesondere im Automotive-Sektor zukünftig weiter zunehmen. Mit der zunehmenden Verwendung von CFK in Serienanwendungen gewinnt aber auch die Verwertung entstehender Abfälle zunehmend an Bedeutung. Nicht nur die zukünftig stark steigende Abfallmenge durch Bauteile am Ende ihrer Nutzungsdauer, sondern auch die heute als Produktionsverschnitt anfallenden Mengen sind von Bedeutung. Aktuell betragen Verschnittanteile industrieller Prozesse bezogen auf die eingesetzte Carbonfasermenge ca. 40 %.

Kunststoffabfälle müssen in der EU einer Verwertung zugeführt werden und dürfen nicht deponiert werden. Die energetische Verwertung durch Verbrennung ist aufgrund des hohen nicht brennbaren Faseranteils bei CFK unwirtschaftlich und zudem in bestehenden Verbrennungsanlagen technisch nicht möglich.

Eine höherwertige Verwertung von CFK-Abfällen und –verschnittresten ist zwingend erforderlich und aufgrund des Potentials der Carbonfaser und des hohen Energieaufwandes für die Produktion der Fasern geboten. Durch ein flächendeckendes, hochwertiges Recycling von CFK wird die energetische und ökonomische

Gesamtbilanz der Carbonfaser insgesamt verbessert. Die nur einfache Verwendung der kosten- und energieintensiv hergestellten Carbonfaser verschlechtert die Gesamtenergiebilanz des Werkstoffes und relativiert zum Teil die hohen, durch Leichtbau erzielbaren Einsparungen im Betrieb eines Fahrzeugs.

### Zusammenfassung der übergeordneten Projektziele:

- Generierung von Materialkarten von kommerziell verfügbarer und in Entwicklung befindlicher rCFK aus rCF-Vliesstoffen sowie einer dazugehörigen Materialdatenbank
- Implementierung von Datensätze aus der textilen Herstellung, Weiterverarbeitung und Verbundeigenschaften in die Materialdatenbank
- Bereitstellung von rCF-Materialien als gängiges Material in Software-Tools zur Materialauswahl im Produktdesign für Ingenieure, Entwickler und Designer
- Entwicklung von Verfahren für den Auftrag und Imprägnierung der rCF-Vliesstoffe mit thermoplastischen Matrices (PA 6 und PES) und Vergleich mit duromeren Systemen
- Lokale und Schichtweise Verstärkung von rCF-Vliesstoffen mit unterschiedlichen Legetechnologien

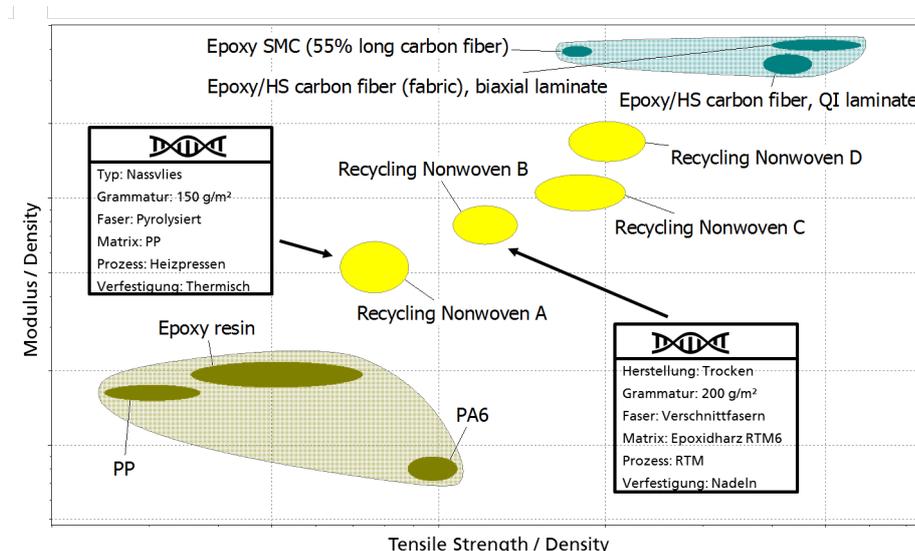


Abbildung 0.1: Ashby Chart von Harzen und Composite Materialien mit exemplarischen Einträgen (gelbe Kreise) für recycelte Werkstoffe.

# 1 HAUPTARBEITSPAKET 1: SPEZIFIKATION

Zu Beginn des Projektes werden im Rahmen mehrerer Projekttreffen die Spezifikationen der eingesetzten Materialien, Prozesse, Prozessrouten und Prüfungen sowie der benötigten Anzahl an Platten mit dem Konsortium definiert. Hierzu gehört die Definition der carbonfaserhaltigen Sekundärmaterialien, die Auswahl der Thermoplastfasern, Thermoplastpulver und -folien sowie die Auswahl der einzusetzenden Harze. Neben diesen Materialien werden die Prüfversuche, Normen und Umgebungsbedingungen der Tests definiert, um diese mit den Simulationsansätzen abzugleichen. Des Weiteren müssen die Mischungen (Faservolumengehalt) sowie die Orientierung vordefiniert werden, um einen Startpunkt die textile Versuchsplanung und Versuchsoptimierung zu geben. Aus den Spezifikationen werden die Materialmengen für die Versuchsplanung durch ITA und Tenowo abgeleitet und ausgearbeitet und Materialien in entsprechenden Mengen beim assoziierten Partner ELG bestellt.

Da das Projekt MAI CC4 CaRinA vor allem den Vergleich von unterschiedlichen Materialien und Prozesse sowie die Erstellung von Materialkarten aus diesen als Schwerpunkt hat, ist dieses Arbeitspaket ein besonders wichtiger Bestandteil des Projekts.

## 1.1 Definition und Charakterisierung der recycelten Carbonfasern

Drei Carbonfasertypen aus unterschiedlichen Abfallströmen werden im Projekt eingesetzt. Erstens eine reine Verschnittcarbonfaser der Firma Mitsubishi Advanced Materials<sup>1</sup>, Wischhafen, die aus Produktionsabfällen der Carbonfaser- oder Halbzeugherstellung stammen. Die Vorgaben für die Beschaffung der Faser sind geringe Kosten und eine Verfügbarkeit in großen Mengen. Deshalb wird die CarboNXT chopped 60.000 NP5 R beschafft, die diesen Kriterien entspricht. Die Fasermischung besteht aus zwei Verschnittfasertypen. Diese Fasern werden einfach geschnitten, woraus sich nach Messungen von Tenowo eine gemittelte Faserlänge von 62,3 mm ergibt. In einer ersten Charge sind sehr lange Faserrovings enthalten (VCF1x). In einer zweiten Charge werden die Fasern weshalb dreifach geschnitten (VCF3x). Eine letzte Charge erreicht bei einmaligem Schneidprozess eine enge Faserlängenverteilung (VCF1x\_eng). Die resultierenden gemessenen Faserlängen sind in Tabelle 1.2 aufgelistet.

Der zweite Fasertyp ist eine pyrolierte Carbonfasern der Firma ELG Carbon Fibre Ltd., Coseley, GB mit der Bezeichnung SM45R in einer Schnittlänge von 60 bis 100 mm. Das R steht für eine thermisch entschlichtete Faser. Für diese Faser kann die Faserlänge selbst nachgemessen werden, wobei sich ein Mittelwert von 110,3 mm messen lässt (Tabelle 1.1.1).

Der dritte Fasertyp stammt aus der Produktion von Airbus, die Teil des erweiterten Konsortiums sind. Die Faser wird dazu von der Firma ELG Carbon Fibre Ltd., Coseley, GB, pyroliert. Die zukünftigen Materialströme werden vor allem durch Prepreg und EoL-Waste dominiert. Somit sind durch die Wahl dieser drei Carbonfasertypen alle relevanten Sekundärström abgedeckt. Der M21E-Prepregverschnitt von Airbus aus der Türherstellung des A350 wird verwendet. Dieser Abfall besteht aus einer Hexcel IM-Faser und einer Epoxidmatrix. Dieser Abfall wird zu ELG verschickt und dort die Fasern thermisch von der Matrix getrennt. Die Fasern erhalten daraufhin die Bezeichnung IM56-P 30/60, was auf die IM-Faser und darauf, dass sie eine Prepregfaser war, hindeutet. Die Angabe 30 – 60 mm steht für die Längenverteilung nach der Zerkleinerung bei ELG. Diese Fasern werden ausschließlich in Vliesprodukten von ELG eingesetzt.

Um die Fasern zu bewerten werden am Fraunhofer IGCV, in HAP 4: Materialcharakterisierung, mittels des FAVI-MAT+, Einzelfaserzugversuche nach ASTM D3822 an jeweils mindestens 20 Filamenten durchgeführt. Hieraus wird der Durchmesser, die Festigkeit und Steifigkeit bestimmt. Diese Daten sind ebenfalls in Tabelle 1.1.1 angeführt.

<sup>1</sup> Ehemals carboNXT GmbH. Vertrieb der Fasern über Marubeni International (Europe) GmbH – Hamburg Branch. Im Folgenden als MCAM abgekürzt.

Tabelle 1.1.1: Fasereigenschaften der im Projekt genutzten sekundären Carbonfasern. Mechanische Kennwerte dargestellt anhand von Messungen des Fraunhofer IGCV / ITA.

Bezeichnung	Lieferant	Kategorie	Zugfestigkeit / GPa	Steifigkeit / GPa	Nominelle Faserlänge (Hersteller)	Gemesene Faserlänge / mm	Kommentar
<b>VCF1x</b>	MCAM	HT-Faser / Beschlichtet	3,56	240	60 mm	62,3 ± 41,4	Blend aus 2 Fasern, einfach geschnitten,
<b>VCF1x_eng</b>	MCAM	HT-Faser / Beschlichtet	3,56	240	60 mm	52 ± 15,5	Blend aus 2 Fasern, einfach geschnitten, bessere Schneideinheit
<b>VCF3x</b>	MCAM	HT-Faser / Beschlichtet	3,56	240	60 mm	38,5 ± 15,9	Blend aus 2 Fasern, dreifach geschnitten
<b>PCF_IM</b>	Airbus / ELG	IM56 Pyrolysiert	6,07	297	30 - 60 mm	Keine Messung	Prepregwaste, in ELG Vliesen enthalten
<b>PCF</b>	ELG	SM45 Pyrolysiert	4,05	284	60 – 100 mm	110,3 ± 72,9	Thermisch Entschlichtet, ELG Faser für ITA/Tenowo Vliesstoffe

## 1.2 Thermoplastische Fasern und Naturfasern im Projekt

Neben der Carbonfasern kommen verschiebende thermoplastische Fasern und Naturfasern zum Einsatz. Nach Diskussion mit Partnern wird sich auf Polypropylen (PP), Polyamid 6 (PA6), Polyethylenterephthalat (PET) und Polyphenylensulfid (PPS) geeinigt. Bei der Auswahl von PP werden unterschiedliche MAPP-Derivate mit 4%, 7% und 10% aufgepropfter Maleinsäure bei Asota bestellt und diese gesondert charakterisiert. Hierzu gehört die Durchführung von Einzelfaser Pull-Out Tests zur Bestimmung der Anbindung der recycelten Carbonfaser an die unterschiedlichen PP-Matrizen (siehe Abbildung 1.2.1). Auf Basis dieser Untersuchungen wird die 4%-MAPP Variante als Standard PP für das Projekt ausgewählt da diese eine guter Kompromiss aus Performance- und Kostensteigerung darstellt.

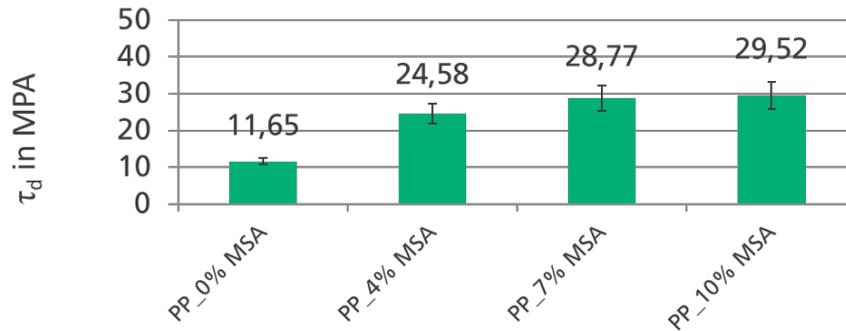


Abbildung 1.2.1: Ergebnisse der Einzelfaser Pull-Out Versuche der ELG PCV SM45R Faser an die unterschiedliche PP-Varianten mit verschiedenen MA-Gehalten.

Die Eigenschaften der Fasern die von ITA und Tenowo verwendet werden sind in Tabelle 1.2.1 aufgelistet.

Tabelle 1.2.1: Verwendete Thermoplast- und Naturfasern und deren Eigenschaften, welche von Tenowo und ITA verwendet werden.

Bezeichnung	Fasertyp / Hersteller	Schnittlänge	Titer	Bogenzahl
P300_EMS	Chemiestapelfaser von EMS Chemie	40 mm	1,7 dtex	8 Bögen/cm
P301_EMS	Chemiestapelfaser von EMS Chemie	60 mm	6,7 dtex	6 Bögen/cm
PP_4%_ASO (Typ FC703)	Chemiestapelfaser von Asota mit 4 % Haftvermittler	60 mm	2,2 dtex	5,7 Bögen/cm
PP_0%_ASO (Typ F8141)	Chemiestapelfaser von Asota	50 mm	2,4 dtex	5,7 Bögen/cm
PET_1_TRE	Chemiestapelfaser der Trevira GmbH, Bobingen	60 mm	6,7 dtex	4 Bögen/cm
PET_2_TRE		60 mm	3,3 dtex	5 Bögen/cm
PET_3_TRE		60 mm	3,3 dtex	6 Bögen/cm
PET_4_TRE		38 mm	1,7 dtex	6 Bögen/cm
FLA_LIN (Lintex XL50R)	Flachsfaser der Firma Lintex	50 mm	65-145 dtex	keine

Tabelle 1.2.2: Verwendete Thermoplastfasern (PP, PA6 und PPS) und deren Eigenschaften, welche von ELG verwendet werden.

Bezeichnung	Fasertyp/Hersteller	Schnittlänge	Titer	Bogenzahl
P300_EMS	Chemiestapelfaser von EMS Chemie	40 mm	1,7 dtex	8 Bögen/cm
PP_5%_ASO (2863-MA1001)	Chemiestapelfaser von Asota mit 5 % Haftvermittler	60 mm	3,3 dtex	5,7 Bögen/cm
S904_EMS	Chemiestapelfaser von EMS Chemie	80 mm	7,7 dtex	6,5 Bögen/cm

### 1.3 Verwendete Fasermischungen für die Vliesstoffherstellung

Zwei hochfeste Carbonfasern, aus dem Bereich der Verschnittcarbonfasern und der pyrolysierten Carbonfasern sowie eine Mischung aus pyrolysierten Carbonfasern mit der Polyamid6-Faser vom Typ P300 werden für die Untersuchung des Einflusses der Verarbeitung mit der Krempel verwendet.

Tabelle 1.3.1: Fasermischungen für die Untersuchung der Steuergrößen der Vliesstofflinie

Fasermischung	Bezeichnung
100 Gew.-% Marubeni	Verschnittcarbonfasern
100 Gew.-% Carbiso C SM45R	Pyrolysierte Carbonfaser
40 Gew.-% Carbiso C SM45R, 60 Gew.-% P300	Fasermischung aus pyrolysierten Carbonfasern und einer Polyamid 6-Faser

Die Vliesstoffe die für die Weiterverarbeitung hergestellt werden bestehen aus den Fasermischungen die in Tabelle 1.3.2 dargestellt sind.

Tabelle 1.3.2: Fasermischungen für die Vliesstoffe zur Weiterverarbeitung.

Bezeichnung des Vliesstoffes	Carbonfasertyp	Carbonfaserteil [Gew.-%]	Thermoplastfaser	Thermoplastfaseranteil [Gew.-%]
V100_Iso_ITA_1	VCF3x	100	-	-
V100_Iso_ITA_1.1	VCF1x	100	-	-
V100_Ori_TEN	VCF3x	100	-	-
V40_PA60_Iso_ITA	VCF3x	40	P300_EMS	60
V40_PA60_Iso_ITA	VCF1x	40	P300_EMS	60
V51_PA49_Ori_TEN	VCF3x	51	P300_EMS	49
V45_PP55_Iso_ITA	VCF3x	45	PP_4%_ASO	55
P100_Iso_ITA	PCF	100	-	-
P100_Ori_ITA	PCF	100	-	-
P40_PA60_Iso_ITA	PCF	40	P300_EMS	60
P51_PA49_Ori_TEN	PCF	51	P300_EMS	49
P36_PET64	PCF	36	PET_1_TRE	64
V40_PA60_Ori_TEN_Maliwatt	VCF3x	40	P300_EMS	60
P45_MAPP55_ELG	PCF_IM	45	PP_4%_ASO	55
P39_PPS61_Ori_ELG	PCF_IM	39	S904_EMS	61
P40_PA60_Ori_ELG	PCF_IM	40	P300_EMS	60
P100_Ori_ELG	PCF_IM	100	-	-

Zudem werden für einzelne Versuchsreihen verschiedene weitere Materialkombinationen verwendet, die an den entsprechenden Stellen eingeführt werden.

### 1.4 Definition der Prüfverfahren

Für die Erstellung der Materialkarten durch die Firma EDAG und zur Bewertung und Optimierung der Materialien werden einige Prüfverfahren vom Konsortium als Standardverfahren definiert. So wird der 4 Punkte-Biegeversuche nach DIN EN ISO 14125 als eine der zentralen Tests zum Vergleich der Materialien standardisiert. Auf den von SGL und Fraunhofer IGCV hergestellten Platten können hier in einer Platte 10 Probekörper in 0°/-45°/+45° und 90°

herausgeschnitten werden und sich somit der Herstellungsaufwand minimiert werden. An vielen Materialien werden weiterhin Zugversuche nach DIN EN ISO 527 durchgeführt. Hierfür werden für thermoplastische Materialien jeweils eine Platte pro Raumrichtung erstellt und die entsprechenden Probekörper entnommen. Für duromerische Platten können aufgrund der größeren Werkzeuggeometrie alle Proben aus einer Platte entnommen werden. Zur Komplettierung der Materialkarten werden besonders interessante Materialien außerdem in 4 mm dicken Platten hergestellt, um an ihnen Druckversuche durchzuführen.

## 1.5 Definition der Materialparameter und Vorgehen zur Simulation

Als Ausgangspunkt zur Ermittlung der Materialparameter wird die klassische Materialkennwertbestimmung bei Faserverbundwerkstoffen gewählt. Für die Abbildung der Eigenschaften in der FEM-Berechnung sind die klassischen elastischen Materialparameter wie der E-Modul in Faserrichtung  $E_1$ , quer zur Faserrichtung  $E_2$  und der Schubmodul  $G_{12}$  essentiell. Neben der Beschreibung des elastischen Verhaltens sind zudem Aussagen hinsichtlich der Bauteilschädigung und des Versagens relevant. Daher spielen die Festigkeitskennwerte in Faserrichtung unter Zug- und Druckbelastung sowie die Schubfestigkeit eine wichtige Rolle. Aus den entsprechenden Zug-, Druck- und Schubversuchen resultieren auch die Kennwerte für die Querkontraktionszahlen und die kritischen Dehnungen. Im Projektkonsortium hat man sich festgelegt, dass alle Kennwerte und Daten unter den Randbedingungen des Normalklimas ermittelt werden. Die Versuchsdurchführung wird derart ausgeführt, dass ausschließlich statische Belastungen vorliegen. Dehnratenabhängigkeiten werden nicht berücksichtigt.

Tabelle 1.5.1: Initiale Versuche für Charakterisierung der Materialparameter von rCF-Vlies.

Test	Materialeigenschaft
Faservolumengehalt	
Faserlänge (minimal, maximal, durchschnittlich) vor und nach dem Krempelprozess)	
Zugversuch in Prozessrichtung	$E_{1+}$ , $\nu_{12+}$ , $X_{1+}$ , $\epsilon_{1+}$
Zugversuch unter 45° zur Prozessrichtung	
Zugversuch unter 90° zur Prozessrichtung	$E_{2+}$ , $\nu_{21+}$ , $X_{2+}$ , $\epsilon_{2+}$

Der Faservolumengehalt und die Faserlänge gehören zu den wichtigsten Größen im Faserverbund. In der FEM-Simulation lässt sich der Faservolumengehalt auf der Mikroebene als separate Faserstränge abbilden. Die Diskretisierung der tatsächlichen Faserlänge der einzelnen Fasern, welche entscheidenden Einfluss in der Simulation hat, ist mit klassischen Modellierungsmethoden unmöglich. Daher ist eine annähernde Abbildung mittels einer Faserlängen-Verteilungsfunktion ratsam. Zum anfänglichen Zeitpunkt liegen noch keine Informationen über die Homogenität der Vliese vor, auch existieren noch keine Aussagen zu den Faserlängen im Halbzeug. Aus diesem Grund werden zu Beginn des Projektes Recherchen zur Faserverteilung hinsichtlich Homogenität und Länge angestoßen. Zudem wird eine CT Untersuchung der Vliese in Auftrag gegeben. Die Ergebnisse und der Einfluss auf die Homogenität und die Faserverteilung wird im Arbeitspaket 4.2 Halbzeug Charakterisierung detailliert aufgezeigt. Für die Bestimmungen der Zugfestigkeiten in den unterschiedlichen Richtungen, vgl. Abbildung 1.5.1, soll zum einen der Anisotropiegrad im rCF-Vlies untersucht und zum anderen die Homogenität des Materials bestimmt werden.

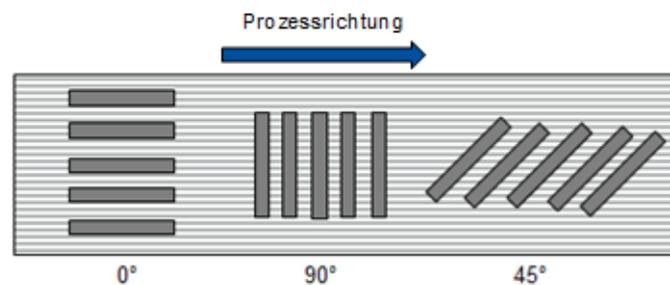


Abbildung 1.5.1: Entnahmerichtung der Proben für die initialen Versuche.

Es zeigt sich, dass ein Schubversuch nicht ohne weiteres an vliesbasierten Materialien umsetzbar ist. Aus den Zugversuchen unter 45° und den CT Scans kann jedoch festgestellt werden, dass Schubversuche erstmals nicht nötig sind, da sich eine makroskopische Homogenität innerhalb des Vliesstoffes aufzeigen lässt. Der 3-Punkt-Biegeversuch dient zur Validation zur Ergebnisse.

Tabelle 1.5.2: Weiterführende Versuche zur Charakterisierung der Materialkennwerte.

Test	Material Property
Druckversuch in Prozessrichtung [0°]	$E_{1-}, \nu_{12-}, X_{1-}, \epsilon_{1-}$
Druckversuch quer zur Prozessrichtung [45°/90°]	$E_{2-}, \nu_{21-}, X_{2-}, \epsilon_{2-}$
Schubversuch in 0/45/90	$G_{12}, S,$
3-Punkt-Biegung	$E_{1f}$ und $\sigma_{f,max}$

Für die Festlegung der Datenvorlagen und der Formate kann für die initialen Versuche eine solverunabhängige Datenvorlage generiert werden. Hierbei wird berücksichtigt, welcher Solver welche spezifischen Materialkennwerte und in welchem Format benötigt. Bei den Recherchen kann keine spezielle Materialformulierung für Vliesstoffe oder Nonwoven-fabrics ermittelt werden, so dass die Inputdaten basierend auf den Versuchen implementiert werden. Ein Solver bietet im Allgemeinen unterschiedliche Möglichkeiten Faserverbundstoffe abzubilden. Da es u.a. ein primäres Ziel des Projekts ist, das Materialverhalten in der CAE abzubilden und keine Solverstudien durchzuführen, wird der Solver Abaqus für die Berechnungen festgelegt. Im Arbeitspaket 6.1 werden weitere Optimierungspotenziale aufgezeigt, so dass andere Solver auch die entsprechenden Berechnungen anstellen könnten.

## 1.6 Definition der Demonstratoren

Am Ende des Projektes sollen aus unterschiedlichen definierten Materialien mehrere Demonstratoren gebaut werden. Diese sollen auch zum Teil getestet werden, um den die Simulationsansätze mit realen Tests zu validieren. Zum anderen sollen diese Demonstratoren mit realen Fertigungsverfahren hergestellt werden und komplexe Geometrien und somit auch Umformgrade aufzeigen. Im Rahmen von mehreren Workshops innerhalb des Konsortiums werden mehrere Bauteile gescreent und diskutiert. Schlussendlich hat sich das Konsortium auf die in Abbildung 1.6.1 gezeigten Demonstratoren geeinigt. Diese bilden unterschiedliche Anwendungsfälle ab (Automotive, Luftfahrt, generisch) und werden mittels unterschiedlichen Routen und Materialien hergestellt. Das Bauteil „Hutprofil“ und „Türverkleidung“ werden für die Validierung der Simulation genutzt und ebenfalls mechanisch charakterisiert. Die Triebwerkverkleidung wird in Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner Airbus Helicopters gebaut, der Unterboden mit dem assoziierten Partner Röchling.

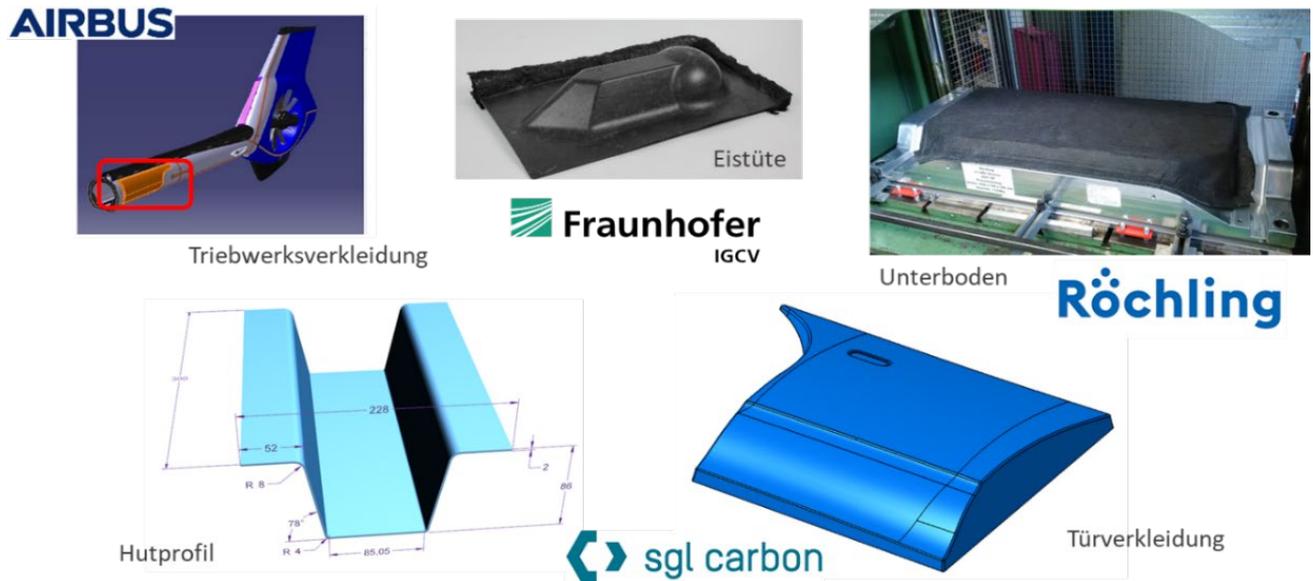


Abbildung 1.6.1: Unterschiedliche Demonstratoren welche durch das Konsortium ausgewählt werden um reale Fertigungsverfahren und Geometrien abzubilden.

Werkzeug	Demonstator	Attraktivität	Umsetzbarkeit	Prüfbar	Machen?
IGCV	MAI Qfast	Mittel	Gut	Teilweise	Nein
IGCV	Eistüte	Hoch	Gut	Teilweise	Ja
SGL	Türmodul	Hoch	Gut	Ja	Ja
SGL	Hutprofil	Hoch	Gut	Ja	Ja
CarbonTT	Bodenplatte	Niedrig	Mittel	ja	Nein
Airbus	H/C	Ausschnitt aus Triebwerksverkleidung interessant → H/C Verkleidung umsetzen			
Airbus	TW-Verkleidung				
Airbus	Clips				
ITA	Tankdeckel	Gering	Gut	Ja	Nein

Abbildung 1.6.2 : Auswahl der Demonstratoren als Ergebnis eines Projektworkshops am 16.04.2019 in München.

## 2 HAUPTARBEITSPAKET 2: HALBZEUGHERSTELLUNG

Das Hauptarbeitspaket 2 unterteilt sich in die Arbeitspakete 2.1 rCF-Krempelvliesherstellung, Arbeitspakete 2.2 Organovliesproduktion, Arbeitspakete 2.3 Nassvliesherstellung und Arbeitspakete 2.4 Prozessbewertung. Das Arbeitspaket 2.1 rCF-Krempelvliesherstellung beinhaltet Untersuchungen zur Vliesstoffherstellung mit recycelten Carbonfasern und zu der Florabnahme mit einem Walzenabzug, der bisher nicht bei carbonfaserverarbeitenden Krempel eingesetzt wird. Die Herstellung von Carbon-Thermoplast-Vliesstoffen mit verschiedenen Einbringungsarten der thermoplastischen Komponente sowie die Untersuchung von Naturfasermischungen und der Einfluss von Eigenschaften und Material der Thermoplastfaser sind Gegenstand des Arbeitspaketes 2.2 Organovliesproduktion. In Arbeitspaket 2.3 werden Nassvliese aus Carbonfasern untersucht und AP2.4 fasst das Hauptarbeitspaket mit einer Bewertung zusammen.

### 2.1 Arbeitspaket: rCF-Krempelvliesherstellung

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist, die Untersuchung des Verarbeitungsverhaltens rezyklierter Carbonfasern sowie deren Mischungen mit Thermoplastfasern. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 2.1.1 den geplanten Ergebnissen gegenübergestellt. Das Arbeitspaket wird von den Projektpartnern Tenowo, Fraunhofer IGCV und ITA maßgeblich in enger Zusammenarbeit bearbeitet.

Tabelle 2.1.1: Gegenüberstellung erzielter Ergebnisse zur ursprünglichen Planung für das Arbeitspaket 2.1

Arbeitspaket	Ursprüngliche geplante Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse
2.1.1	Verarbeitungsstudie rCF-Typen	Drei verschiedene Carbonfasertypen werden verarbeitet und Modelle für deren Verarbeitung erstellt. Dabei werden auch die Faservorbereitung und die Verfestigung mituntersucht.
2.1.2	Faservorbereitung - Mischung und Öffnung	Die Untersuchung findet in AP 2.1.1 statt.
2.1.3	Verfestigungsuntersuchung	Die Untersuchung findet in AP 2.1.1 statt.
2.1.4	Modifikation Krempel (Hacker)	Ein Walzenabzug wird an der Krempel installiert und erfolgreich für die Carbonvliesstoffherstellung eingesetzt.
2.1.5	Modifikation Krempel (Faseröffnung)	Öffnungsszenarien werden eingeschätzt.

#### 2.1.1 Arbeitspaket Verarbeitungsstudie rCF-Typen

Die Anforderungen an einen Carbonfaservliesstoff für den Einsatz in einem Compositewerkstoff stellen die Ausgangsbasis für die Untersuchung der Vliesstoffherstellung dar. Dazu werden die qualitätsrelevanten Steuergrößen der Anlage identifiziert.

Die Zieleigenschaften beziehen sich auf den carbonfaservliesstoffverstärkten Kunststoff. Dieser soll hohe mechanische Werte bei möglichst geringem Gewicht aufweisen. Für den industriellen Einsatz müssen die Schwankungen der Festigkeitswerte möglichst gering sein. Daraus lassen sich drei Anforderungen an das zu fertigende Halbzeug ableiten:

- Hohe Gleichmäßigkeit
- Geringe Fasereinkürzung
- Hohe Faserausrichtung

### *Hohe Gleichmäßigkeit*

Um möglichst hohe mechanische Werte im Composite zu erzielen, ist eine optimale Faser-Matrix-Haftung anzustreben. Die Matrix sollte alle Verstärkungsfasern möglichst vollständig ummanteln, um eine hohe Kohäsion der beiden Komponenten zu realisieren. Ebenso ist es von großer Bedeutung, dass die Verstärkungsfaser über den gesamten Werkstoff gut verteilt vorliegt. Eine gleichmäßige Verteilung der Fasern im Vlies ist damit ein Qualitätsmerkmal. Die Gleichmäßigkeit wird anhand der mit dem Erwartungswert normierten Standardabweichung des Flächengewichts quantifiziert. Dieser Wert wird auch Variationskoeffizient genannt und CV abgekürzt.

### *Geringe Fasereinkürzung*

Die höchste Faserbelastung tritt vermutlich bei der Vliesbildung auf. Die Parameter des Krempelprozesses sind entscheidend für die Einkürzung der Fasern. Die spezifische Belastung der Verstärkungsfaser wird zudem durch die Wahl der thermoplastischen Fasern und deren Mischungsanteil beeinflusst.

### *Hohe Faserausrichtung*

Auch die Ausrichtung bzw. Orientierung der Fasern im Vliesstoff beeinflusst die mechanischen Werte des damit verstärkten Composites. Die Fasern können parallel zur Produktionsrichtung in „Machine Direction“ (MD) oder orthogonal in „Cross Direction“ (CD) ausgerichtet sein. Das Verhältnis aller Fasern die in MD oder CD im Vliesstoff vorliegen gibt somit Auskunft über die Gesamtfaserausrichtung des Vliesstoffes. Meist wird eine hohe Faserausrichtung angestrebt, um lastpfadgerechte Konstruktionen zu ermöglichen und den Faservolumengehalt durch eine höhere Packungsdichte zu erhöhen.

Aus den Anforderungen ergeben sich folgende Zielgrößen für die Vliesstoffherstellung:

- Geringe Fasereinkürzung: hohe Faserlänge
- Hohe Gleichmäßigkeit: geringer Variationskoeffizient
- Hohe Faserausrichtung: hohes MD/CD-Verhältnis

Aus den Zielgrößen leiten sich die Qualitätsmerkmale ab, die untersucht werden:

- Vliesgleichmäßigkeit
- Durchmischung
- Biegefestigkeit- und Steifigkeit
- Orientierung

Die Vliesgleichmäßigkeit, ausgedrückt durch den CV-Wert. Der CV-Wert ist der Quotient aus der Standardabweichung einer Messreihe (längs (MD) und quer (CD)) geteilt durch den Mittelwert der jeweiligen Messreihe. Dafür werden 5 Flächengewichtsmessungen (100 cm<sup>2</sup> Ronde ausgestochen mit Rondenstecher) in Querrichtung des gefertigten Vliesstoffes entnommen. Die Probenentnahme wird alle 3 Meter wiederholt bis 5 Messreihen in Längsrichtung absolviert sind. Insgesamt werden damit 25 Ronden pro Material geschnitten. Anhand der Messwerte wird der Variationskoeffizient des Flächengewichts bestimmt.

Die Durchmischung wird für Vliesstoffe aus der Carbon-Thermoplast-Fasermischung entnommen, (nur für TP Vliesvarianten) ausgedrückt durch den CV Wert des Carbonanteils im Vlies. Dafür werden die zuvor entnommenen Ronden der Flächengewichtsmessungen im Pyrolyseofen des Fraunhofer IGCV verascht, sodass nur der Carbonfaseranteil übrigbleibt. Da dieselben Probekörper wie für die Vliesgleichmäßigkeitsmessungen verwendet werden, erlaubt dies die Messung des Gewichtsanteils der Carbonfasern. Der ermittelte CV-I-Wert ist der Quotient der Standardabweichung des Carbonfasermassenanteils einer Messreihe (längs (MD) und quer (CD)) geteilt durch den Mittelwert der jeweiligen Messreihe. Der CV-I-Wert ist ein Maß für die Durchmischung und Gleichmäßigkeit der Verteilung der Carbonfasern innerhalb des TP-Vliesstoffes. Aufgrund der Kapazität im Pyrolyseofen wird beginnende mit der ersten Ronde einer Querreihe jede zweite Ronde verascht. In der Länge werden die ersten 4 Reihen betrachtet. Insgesamt werden für einen Versuch 16 Ronden verascht.

Die Biegefestigkeit und das Biegemodul, ermittelt aus mechanischen Biegeversuchen in 0°, +/-45°, 90°. Aus den produzierten Vliesstoffen werden Platten mit 350 mm x 350 mm x 2 mm Dicke am Fraunhofer IGCV variotherm konsolidiert. Aus den Platten werden je Richtung 10 Prüfkörper mit den Maßen 40 mm (Länge) x 15 mm (Breite) x 2 mm (Dicke) geschnitten. Je 7 gültige Proben werden nach DIN EN ISO 14125 im 4 Punkt-Biegeversuch geprüft. Für Screeningversuche werden je Platte 14 Prüfungen durchgeführt.



Die Orientierung, ausgegeben als Polardiagramm der untersuchten Vliesstoffe erstellt aus den mechanischen Kennwerten in 0°, +/-45°, 90° Richtung der Biegeprüfkörper. Die vier generierten Datenpunkte werden verwendet um ein Polardiagramm der Vliesstoffe zu erstellen. Dies soll zum einen ermöglichen einen genaueren Wert für die Orientierung des Materials als das MD/CD Verhältnis bereitzustellen. Zum anderen wird erwartet, dass dadurch die Faserschädigung der Materialien einschätzbar ist. Da bei gleicher Orientierung innerhalb des Vliesstoffes der festigkeitsreduzierende Faktor hauptsächlich die Faserschädigung bzw. -einkürzung ist.

### 2.1.1.1 Auswahl der Faktoren

Als Steuergrößen werden Maschineneinstellungen bezeichnet, die gezielt variierbar sind [Kle16, SBH17]. Die wichtigsten Steuergrößen werden anhand einer Experteneinschätzung für eine detaillierte Untersuchung ausgewählt. Der Einfluss der Steuergrößen auf die vorgestellten Qualitätsmerkmale der Vliesstoffe wird mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung bestimmt. 29 übergeordnete Steuergrößen werden an der Vliesstofflinie, bestehend aus Faservorbereitung, Vliesbildung und Vliesverfestigung, identifiziert. [Ste21]

Die Steuergrößen, die im statistischen Versuchsplan untersucht werden, heißen Faktoren. Die Faktoren mit der größten Wahrscheinlichkeit auf einen signifikanten Einfluss auf die Qualitätsmerkmale, bestimmt durch Experten, werden untersucht. Das Nutzen-zu-Aufwand-Verhältnis soll dabei möglichst groß sein. Dazu werden die Faktoren in den Kategorien Relevanz und Aufwand von Experten bewertet. Die Relevanz stellt ein Maß für die Wahrscheinlichkeit einer signifikanten Auswirkung auf die Qualitätsmerkmale dar. Der Aufwand hingegen beschreibt den zeitlichen Aufwand, um eine Stufenänderung eines Faktors zu bewirken. Die Kategorien unterteilen sich in vier Stufen und Die Tabelle 2.1.1.1 listet die verwendete Bewertungsskala auf. [Ste21]

Tabelle 2.1.1.2: Bewertungsskala der Steuergrößen [Ste21].

Skala	Relevanz	Aufwand
0	Vernachlässigbare Auswirkungen auf die Qualitätsmerkmale	Unvertretbar hoher Aufwand
1	Geringe Auswirkungen auf die Qualitätsmerkmale	Hoher Aufwand
2	Mittlere Auswirkungen auf die Qualitätsmerkmale	Mittlerer Aufwand
3	Starke Auswirkungen auf die Qualitätsmerkmale	Niedriger Aufwand

Die Ergebnisse der Expertenbefragung sind in Tabelle 2.1.1.2 dargestellt und anhand der Kategorien Relevanz und Aufwand sortiert. Die unterstrichenen Steuergrößen werden im Detail untersucht. [Ste21]

Tabelle 2.1.1.3: Bewertung der Faktoren [Ste21].

	Steuergrößen	Relevanz	Aufwand
Faservor- bereitung	<u>Öffnungszyklen</u>	2,25	1,75
	Avivageauftrag	1,75	3,00
	Walzengeschwindigkeiten	1,75	1,50
	Abstände der Walzen	1,75	1,50
	Luftströme	1,50	3,00
Speiser	Walzenabstände	2,00	1,25
	Walzengeschwindigkeiten	1,75	3,00
	Rüttelwandfrequenz	1,00	3,00
	Oberschachtdruck	1,00	3,00
	<u>Massenstrom, Florgewicht</u>	2,00	2,75
Band- waage	Verzüge	1,00	3,00
Krempel	Anzahl der Arbeitselemente	3,00	0,50
	Garniturtypen	3,00	0,25
	<u>Abstände der Walzen und Mulden</u>	2,75	1,00
	<u>Walzengeschwindigkeiten</u>	2,50	3,00
	Anzahl Abnehmer	2,50	0,75
	Hackerhubzahl	1,00	2,75
Leger	<u>Profiling (CV1-System)</u>	1,75	2,25
	Verzüge	1,25	2,75
	Legergeschwindigkeit	1,00	3,00
	Lagenanzahl	1,00	2,75
	Abstände der Bänder	1,00	2,50
	Überlappung der Florkanten	0,50	2,75
Nadel- maschine	Nadeltype	2,50	0,75
	<u>Verzüge</u>	2,25	2,75
	<u>Einstichdichte</u>	2,25	3,00
	Einstichtiefe	2,25	2,75
	Nadelbild	2,00	0,75
	Grundgeschwindigkeit	0,75	3,00

Die Steuergröße **Walzengeschwindigkeiten** unterteilt sich in drei einzelne Walzengeschwindigkeiten. Der Tambour-Arbeiter-Abstand wird zudem als wichtiger Einfluss beim Faserübergang an der Kardierstelle zwischen Tambour und Arbeiter variiert [BK12a]. Tabelle 2.1.1.3 listet die Faktoren auf. [Ste21]

Tabelle 2.1.1.4: Ausgewählte Steuergrößen und daraus abgeleitete Faktoren [Ste21]

Steuergröße	Faktor [Einheit]
Öffnungszyklen	Öffnungszyklen [Anzahl]
Massenstrom	Florgewicht [g/m <sup>2</sup> ]
Abstände der Walzen und Mulden	Tambour-Arbeiter-Abstand [mm]
	Tambourgeschwindigkeit [m/min]
Walzengeschwindigkeiten	Arbeitergeschwindigkeit [m/min]
	Wendergeschwindigkeit [m/min]
Profiling (CV1-System)	Verzug des CV1-Systems [%]
Einstichdichte	Einstichdichte [ES/cm <sup>2</sup> ]
Verzüge	Verzug der Nadelmaschine [%]

Steuergrößen die nicht geändert werden bleiben für die Versuchsdurchführung konstant und werden fortan als Parameter bezeichnet. Die Faktoren variieren zwischen zwei Stufen, die von der verwendeten Fasermischung abhängig sind und in Vorversuchen ermittelt werden.

Dabei zeigt sich, dass zwei Öffnungszyklen bei der Verarbeitung von pyrolysierten Carbonfasern und Verschnittcarbonfasern keinen kontinuierlichen Anlagenbetrieb ermöglichen. Die Öffnungszyklen werden bei diesen Untersuchungen konstant gehalten. [Ste21]

### 2.1.1.2 Faktorstufen der drei Fasermischungen [Ste21]

Die Tabelle 2.1.1.4 und Tabelle 2.1.1.5 zeigt die verwendeten Faktorstufen.

Tabelle 2.1.1.5: Untere- und obere Einstellung der Faktoren für die Verarbeitung von Verschnittcarbonfasern und pyrolysierte Carbonfasern [Ste21]

Faktor	Verschnittcarbonfasern		Pyrolysierte Carbonfasern	
	Untere Stufe	Obere Stufe	Untere Stufe	Obere Stufe
Florgewicht [g/m <sup>2</sup> ]	10	20	10	20
Abstand Arbeiter zu Tambour [mm]	0,6	1,0	0,6	1,0
Tambourgeschwindigkeit [m/min]	800	1300	800	1300
Arbeitergeschwindigkeit [m/min]	15	50	15	50
Wendergeschwindigkeit [m/min]	70	150	70	150
Verzug des CV1-Systems [%]	0	15	0	30
Einstiche pro cm <sup>2</sup> [ES/cm <sup>2</sup> ]	40	80	40	80
Verzug der Nadelmaschine [%]	20	50	35	70

Tabelle 2.1.1.6: Untere- und obere Einstellung der Faktoren für die Fasermischung aus pyrolysierten Carbonfasern und Polyamid6-Fasern [Ste21]

Faktor	Untere Stufe	Obere Stufe
Öffnungszyklen [-]	1	2
Abstand Arbeiter zu Tambour [mm]	0,6	1,0
Florgewicht [g/m <sup>2</sup> ]	10	20
Tambourgeschwindigkeit [m/min]	700	1350
Arbeitergeschwindigkeit [m/min]	15	50
Wendergeschwindigkeit [m/min]	70	150
Verzug des CV1-Systems [%]	0	30
Einstiche pro cm <sup>2</sup> [ES/cm <sup>2</sup> ]	40	120
Verzug der Nadelmaschine [%]	35	100

Die Stufen der Faktoren werden in 12 Versuche je Fasermischung in einem Screening-Versuchsplan nach dem Plackett-Burman-Design variiert. Dabei werden Vliesstoffe und anschließend Verbundwerkstoffe hergestellt. Die Ergebnisse der untersuchten Qualitätsparameter fließen in Regressionsanalysen ein. Dabei werden die signifikanten Einflüsse sowie die dazugehörigen Effektstärken bestimmt, die eine Aussage über die Stärke der Auswirkung ermöglichen. [Ste21]

### 2.1.1.3 Einflüsse auf die Verarbeitung der Verschnittcarbonfasern, Auszug aus der Dissertation von Georg Stegschuster [Ste21]

Die Messungen des Variationskoeffizienten des Flächengewichts  $CV_{FG}$  werden an den Vliesstoffen durchgeführt. Das Biegesteifigkeits- und Biegefestigkeitsverhältnis  $O_E$  und  $O_{90}$  sowie die Biegesteifigkeit- und -festigkeit in  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -Richtung ( $E_{0^\circ}$ ,  $E_{90^\circ}$ ,  $\sigma_{0^\circ}$ ,  $\sigma_{90^\circ}$ ) werden an Faserverbundprobekörpern ermittelt. [Ste21]

Der Variationskoeffizient des Flächengewichts der hergestellten Vliesstoffe  $CV_{FG}$  liegt durchschnittlich bei 22 % und schwankt von 9 % bis zu 36 %. Der Elastizitätsmodul liegt, normiert auf 30 % Faservolumengehalt, zwischen 12,7 GPa und 19,9 GPa. Die Biegefestigkeit, ebenfalls normiert auf 30 %, beträgt zwischen 276 MPa bis 385 MPa. Die Vliesstoffe lassen sich kaum orientieren, was an den geringen Maximalwerten für die Biegesteifigkeit von 1,24 und für die Biegefestigkeit von 1,31 erkennbar ist. Diese Werte gelten als isotrop. Die Ergebnisse der Untersuchung fließen in eine Regressionsanalyse für die statistische Auswertung ein. Zwischen den verwendeten Datensätzen und den erstellten Regressionsgleichungen besteht nach Cohen für den Variationskoeffizienten des Flächengewichts sowie für die Biegesteifigkeit und -festigkeit in  $90^\circ$ -Richtung eine mittlere Korrelation [Coh13]. Die Biegesteifigkeit  $E_{0^\circ}$  und das Biegesteifigkeitsverhältnis zeigen eine geringe Korrelation [Coh13]. Für die Biegefestigkeit und das Festigkeitsverhältnis ergibt sich nach Cohen keine Korrelation für die Datensätzen [Coh13]. Eine Vorhersage von Qualitätsmerkmalen ist aufgrund der geringen Werte zwischen 7 % und 51 % nicht möglich. [Ste21] Die signifikanten Faktoren werden auf dem Konfidenzniveau von 99 % bestimmt und die Effektstärken bei einer Erhöhung sind in Tabelle 2.1.1.6 aufgelistet. [Ste21]

Tabelle 2.1.1.7: Zusammenfassung der Effekte der signifikanten Faktoren auf die Qualitätsmerkmale bei einer Stufenerhöhung [Ste21]

Qualitätsmerkmal	$CV_{FG}$ [%]	$E_{0^\circ}$ [GPa]	$E_{90^\circ}$ [GPa]	$O_E$ [%]	$\sigma_{0^\circ}$ [MPa]	$\sigma_{90^\circ}$ [MPa]	$O_{90}$ [%]
Regressionsgleichungs-Mittelwert	14,1	14,1	15,4	1,09	321	349	1,10
Faktoren	Florgewicht			-0,03			-0,02
	Tambour-Arbeiter-Abstand	-3,1		0,03		7	
	Tambourgeschwindigkeit	-3,1	0,63	0,97		16	0,04
	Arbeitergeschwindigkeit	2,9		0,87	0,06	11	0,02
	Wendergeschwindigkeit		0,35		-0,05		-0,03
	Verzug des CV1-Systems		-0,37	-0,57			
	Einstichdichte	-2,2		0,51			
	Verzug der Nadelmaschine	4,5			-0,02	11	-0,05

Variationskoeffizienten des Flächengewichts  $CV_{FG}$ , Biegesteifigkeit in  $0^\circ$ -Richtung  $E_{0^\circ}$ , Biegesteifigkeit in  $90^\circ$ -Richtung  $E_{90^\circ}$ , Biegesteifigkeitsverhältnis  $O_E$ , Biegefestigkeit in  $0^\circ$ -Richtung  $\sigma_{0^\circ}$ , Biegefestigkeit in  $90^\circ$ -Richtung  $\sigma_{90^\circ}$ , Biegefestigkeitsverhältnis  $O_{90}$ .

Der Variationskoeffizienten des Flächengewichts beschreibt die Verarbeitung von Verschnittcarbonfasern bezüglich der Flächengewichtsgleichmäßigkeit. Diese unterscheidet sich deutlich von bisherigen Erkenntnissen. Lediglich zwei von fünf signifikanten Prozessparametern der Krempelanlage folgen gängigen Hypothesen aus der Literatur. Eine niedrige Arbeitergeschwindigkeit von 15 m/min), ein hoher Tambour-Arbeiter-Abstand von 1 mm sowie eine hohe Einstichdichte von 80 ES/cm<sup>2</sup> erzielen bei der Verarbeitung von Verschnittcarbonfasern den geringsten Variationskoeffizienten des Flächengewichts  $CV_{FG}$ . [Ste21]

Die Tambourgeschwindigkeit stellt für die Biegesteifigkeit in 0°-Richtung sowie der Biegesteifigkeit und Biegefestigkeit in 90°-Richtung den wichtigsten Faktor für die Verarbeitung dar. Die Gesamtsteifigkeit des Verbundes steigt dabei mit zunehmender Tambourgeschwindigkeit an. Als Ursache dafür wird die mittlere Verweilzeit der Carbonfasern in der Krempel identifiziert. Diese reduziert sich, sodass die Fasern trotz einer höheren mechanischen Belastung insgesamt geschont und gleichzeitig besser ausgerichtet werden. [Ste21]

Die Wendergeschwindigkeit ist ein weiterer Faktor mit hohem Einfluss für eine schonende Verarbeitung der Verschnittcarbonfasern. Eine Wendergeschwindigkeit von 150 m/min (hohe Faktorstufe) führt zu einer Reduktion des Geschwindigkeitsgradienten zum Tambour, der eine Oberflächengeschwindigkeit von 800 m/min beziehungsweise 1300 m/min aufweist. Folglich werden die Carbonfasern weniger stark Ausgerichtet und geschädigt. Dadurch nehmen das Biegesteifigkeits- und das Biegefestigkeitsverhältnis signifikant zu. [Ste21]

### 2.1.1.4 Einflüsse auf die Verarbeitung der pyrolysierten Carbonfasern, Auszug aus der Dissertation von Georg Stegshuster [Ste21]

Die Messungen des Variationskoeffizienten des Flächengewichts  $CV_{FG}$  werden an den Vliesstoffen durchgeführt. Das Biegesteifigkeits- und Biegefestigkeitsverhältnis  $O_E$  und  $O_{90}$  sowie die Biegesteifigkeit- und -festigkeit in 0°- und 90°-Richtung ( $E_{0^\circ}$ ,  $E_{90^\circ}$ ,  $\sigma_{0^\circ}$ ,  $\sigma_{90^\circ}$ ) werden an Faserverbundprobekörpern ermittelt. [Ste21] Der Variationskoeffizient des Flächengewichts der hergestellten Vliesstoffe  $CV_{FG}$  liegt durchschnittlich bei 17 %. Die Vliesstoffe aus pyrolysierten Carbonfasern sind damit gleichmäßiger als die Vliesstoffe aus Verschnittcarbonfasern. Der Wert bewegt sich zwischen 11 % und 25 %. Die Biegesteifigkeit beträgt, normiert auf 30 % Faservolumengehalt, 16,09 GPa bis 22,11 GPa. Die Festigkeit liegt bei 266 MPa bis 375 MPa. Das Steifigkeitsverhältnis von 90° zu 0° erzielt einen Maximalwert von 0,85. Das Festigkeitsverhältnis hat einen Maximalwert von 0,79. Die mechanischen Kennwerte der 0°-Richtungen sind damit für beide Verhältnisse stärker ausgeprägt. Ähnlich zu der Verarbeitung der Verschnittcarbonfasern erreicht die Ausrichtung der Vliesstoffe aus pyrolysierten Carbonfasern nur einen isotropen Zustand. [Ste21]

Die Ergebnisse der Untersuchung fließen in eine Regressionsanalyse für die statistische Auswertung ein. Dabei erreichen die verwendeten Datensätzen des Variationskoeffizienten des Flächengewichts, der Biegesteifigkeit in 90°-Richtung und des Biegesteifigkeitsverhältnisses mittlere Korrelationen nach Cohen [Coh13]. Die Biegesteifigkeit und -festigkeit in 0°-Richtung  $E_{0^\circ}$  und  $\sigma_{0^\circ}$ , die Biegefestigkeit in 90°-Richtung  $\sigma_{90^\circ}$  und das Biegefestigkeitsverhältnis zeigen eine schwache Korrelation nach Cohen [Coh13]. Die Werte der Prognosefähigkeit der Modelle liegen zwischen 9 % und 53 % und sind damit für verlässliche Vorhersagen zu gering. Signifikante Faktoren werden auf dem Konfidenzniveau von 99 % bestimmt und deren Einfluss bei einer Stufenänderung listet Tabelle 2.1.1.7 auf. [Ste21]

Tabelle 2.1.1.8: Zusammenfassung der Effekte der signifikanten Faktoren auf die Qualitätsmerkmale bei einer Stufenerhöhung [Ste21]

Qualitätsmerkmal	$CV_{FG}$ [%]	$E_{0^\circ}$ [GPa]	$E_{90^\circ}$ [GPa]	$O_E$ [%]	$\sigma_{0^\circ}$ [MPa]	$\sigma_{90^\circ}$ [MPa]	$O_{90}$ [%]	
Regressionsgleichungs-Mittelwert	11,2	19,1	19,5	1,03	317	317	1,01	
Faktoren	Florgewicht	-3,0	-0,73	-0,02	8		-0,04	
	Tambour-Arbeiter-Abstand	-1,5	0,64	0,04				
	Tambourgeschwindigkeit			-1,11	-0,05		-28	-0,07
	Arbeitergeschwindigkeit	1,6			-0,02			
	Wendergeschwindigkeit			0,69	0,07	-13		0,05
	Verzug des CV1-Systems	1,5	-0,73		0,05			0,02
	Einstichdichte							
	Verzug der Nadelmaschine							

Variationskoeffizienten des Flächengewichts  $CV_{FG}$ , Biegesteifigkeit in 0°-Richtung  $E_{0^\circ}$ , Biegesteifigkeit in 90°-Richtung  $E_{90^\circ}$ , Biegesteifigkeitsverhältnis  $O_E$ , Biegefestigkeit in 0°-Richtung  $\sigma_{0^\circ}$ , Biegefestigkeit in 90°-Richtung  $\sigma_{90^\circ}$ , Biegefestigkeitsverhältnis  $O_{90}$ .

Fünf Qualitätsmerkmale werden signifikant durch das Florgewicht beeinflusst. Dies ist die höchste Anzahl unter den untersuchten Faktoren, jedoch ist die Effektstärke jeweils gering. Einerseits liegen die Ursachen für den Einfluss liegen in der Verbesserung der Gleichmäßigkeit und der bewirkten Faserschonung durch eine Florgewichtserhöhung. Andererseits ist die verbesserte Faserausrichtung bei gleichzeitiger Florgewichtsreduktion ein Grund. [Ste21] Die Tambour- und Wendergeschwindigkeit sind die Faktoren mit dem größten Effekt. Insbesondere die mechanischen Eigenschaften werden dadurch beeinflusst. Dem liegt die Geschwindigkeitsreduktion des Tambours zugrunde, die aufgrund der erhöhten Reibkoeffizienten zwischen pyrolysierten Carbonfasern und der Garnitur gelingt. Auf diese Weise kann die Faserausrichtung bei geringerer Faserschädigung erreicht werden. Hierbei ist anzumerken, dass Die Wendergeschwindigkeit dabei einen stärkeren Einfluss auf die Faserausrichtung aufweist. [Ste21]

Die Faserlänge der pyrolysierten Carbonfasern übersteigt einen kritischen Wert bei der Faserübergabe vom Arbeiter auf den Wender. Liegt der Wert unter der kritischen Länge, werden Carbonfasern durch die Garnituren des Wenders gestaucht und somit die Faserausrichtung verringert. Der Übergabewinkel für die pyrolysierten Carbonfasern ist deshalb günstiger und die Faserausrichtung wird besser übertragen und erhalten. Die Biegesteifigkeit  $E_{90^\circ}$  nimmt deshalb zu. [Ste21]

Die Verarbeitung pyrolysierter Carbonfasern weicht deutlich von der bekannten Theorie aus der Literatur ab. Die Qualitätsmerkmale von Vliesstoff und Faserverbundwerkstoff werden im gewählten Einstellungsbereich durch den Nadelmaschinenverzug sowie die Einstichdichte nicht signifikant beeinflusst. Sowohl die Faserschädigung durch die Einstichdichte als auch die Umorientierung durch den Verzug der Nadelmaschine sind damit nicht signifikant. Vermutlich führen die reduzierte Faser-Faser-Reibung sowie eine gegenseitige Überlagerung der Faktoren in der Nadelmaschine zu diesem Ergebnis.

Zwischen den pyrolysierten Carbonfasern und den Garnituren ist der Reibkoeffizient im Vergleich zu Verschnittcarbonfasern erhöht. Bei der Verarbeitung muss diesem Umstand durch angepasste Maschineneinstellungen Rechnung getragen werden. Insbesondere eine niedrige Tambourgeschwindigkeit von 800 m/min sowie ein Tambour-Arbeiter-Abstand von 1 mm sind dafür geeignete Einstellungen. Ein niedriges Florgewicht von 10 g/m<sup>2</sup>, eine hohe Wendergeschwindigkeit von 150 m/min und ein hoher Verzug des CV1-Systems von 30 % erzielen gesteigerte Biegesteifigkeits- und Biegefestigkeitsverhältnis im Verbund bei der Verarbeitung pyrolysierter Carbonfasern. [Ste21]

### 2.1.1.5 Einflüsse auf die Verarbeitung der Carbon-Thermoplast-Fasermischung, Auszug aus der Dissertation von Georg Stegshuster [Ste21]

Die Messungen des Variationskoeffizienten des Flächengewichts  $CV_{FG}$  werden an den Vliesstoffen durchgeführt. Das Biegesteifigkeits- und Biegefestigkeitsverhältnis  $O_E$  und  $O_B$  sowie die Biegesteifigkeit- und -festigkeit in 0°- und 90°-Richtung ( $E_{0^\circ}$ ,  $E_{90^\circ}$ ,  $\sigma_{0^\circ}$ ,  $\sigma_{90^\circ}$ ) werden an Faserverbundprobekörpern ermittelt. [Ste21]

Der Variationskoeffizient des Flächengewichts der hergestellten Vliesstoffe  $CV_{FG}$  liegt durchschnittlich bei 10 % und schwankt zwischen 5 % und 16 %. Erwartungsgemäß werden bei der Verarbeitung der Fasermischung deutlich gleichmäßigere Vliesstoffe erzielt als bei der Verarbeitung reiner Carbonfasern. Der Elastizitätsmodul beträgt, normiert auf 30 % Faservolumengehalt, zwischen 11,7 GPa bis 28,8 GPa. Die Festigkeit liegt zwischen 239 MPa und 416 MPa. Das Steifigkeitsverhältnis reicht von 1,04 bis 2,03 und Festigkeitsverhältnis von 1,07 bis 1,64. [Ste21] Eine Regressionsanalyse wird mit den Ergebnissen der Untersuchungen durchgeführt um die Faktoren zu bewerten. Eine mittlere Korrelation erreichen der Einordnung nach Cohen folgend, der Variationskoeffizienten des Flächengewichts, die Sollwertabweichung des Carbonfasermassenanteils  $\Delta_{CFA}$  und die Abweichung des Faservolumengehalts  $\Delta_{FVG}$  [Coh13]. Sowohl die Regressionsgleichungen der mechanischen Kennwerte und der Verhältnisse als auch das Modell für den Faservolumengehalt weisen eine starke Korrelation nach Cohen auf [Coh13]. Die Prognosefähigkeit dieser Modelle liegt bei Werten von über 70 %. Dies ermöglicht verlässliche Vorhersagen zu erzielbaren Qualitätsparametern. [Ste21]

Auf dem Konfidenzniveau von 99 % werden die signifikanten Faktoren ermittelt. Tabelle 2.1.1.8 listet die signifikanten Faktoren und deren Auswirkungen auf den Variationskoeffizienten des Flächengewichts, die Sollwertabweichung des Carbonfasermassenanteils  $\Delta_{CFA}$ , die Abweichung des Faservolumengehalts  $\Delta_{FVG}$  und den Faservolumengehalt auf. Für die Biegesteifigkeitswerte und für die Biegefestigkeitswerte sind die signifikanten Faktoren und deren Auswirkungen in Tabelle 2.1.1.9 dargestellt. [Ste21]

Tabelle 2.1.1.9: Zusammenfassung der Effekte der signifikanten Faktoren auf die Qualitätsmerkmale bei einer Stufenerhöhung [Ste21]

Qualitätsmerkmal	CV <sub>FG</sub> [%]	Δ <sub>CFA</sub> [%]	Δ <sub>FVG</sub> [%]	FVG [%]	
Regressionsgleichungs-Mittelwert	9,9	6,1	2,4	29,1	
Faktoren	Öffnungszyklen		2,7		
	Florgewicht	-3,4		0,8	
	Tambour-Arbeiter-Abstand				
	Tambourgeschwindigkeit		-0,8		
	Arbeitergeschwindigkeit	-1,8			
	Wendergeschwindigkeit		-0,7	-0,8	
	Verzug des CV1-Systems				1,4
	Einstichdichte		-1,0		
	Verzug der Nadelmaschine	2,5	1,4		1,0

Variationskoeffizienten des Flächengewichts **CV<sub>FG</sub>**, Abweichung des Carbonfasermassenanteils **Δ<sub>CFA</sub>**, Abweichung des Faservolumengehalts **Δ<sub>FVG</sub>**, Faservolumengehalt **FVG**

Neun von zehn untersuchten Qualitätsmerkmalen werden signifikant durch den Verzug der Nadelmaschine beeinflusst. Dieser ist der stärkste Einflussfaktor für die Verarbeitung von Fasermischung aus pyrolysierten Carbonfasern und Polyamid6-Fasern. Die thermoplastischen Fasern sind die wichtigste Ursache für die deutliche Auswirkung des Verzugs der Nadelmaschine. Die TP-Fasern ziehen die Carbonfasern bei einer Richtungsänderung durch Verzug mit sich. Der Verzug von 20 % bis 100 % erreicht damit in der Nadelmaschine einen eindeutigen Effekt sowohl auf die Faserausrichtung als auch auf die Gleichmäßigkeit der Vliesstoffe. Im Vergleich zur Verarbeitung reiner Carbonfaservliesstoffe ist der Einfluss wesentlich stärker ausgeprägt. [Ste21]

Tabelle 2.1.1.10: Zusammenfassung der Effekte der signifikanten Faktoren auf die Biegesteifigkeiten und die Biegefestigkeit bei einer Stufenerhöhung [Ste21]

Qualitätsmerkmal	E <sub>0°</sub> [GPa]	E <sub>90°</sub> [GPa]	O <sub>E</sub> [%]	σ <sub>0°</sub> [MPa]	σ <sub>90°</sub> [MPa]	O <sub>σ</sub> [%]	
Regressionsgleichungs-mittelwert	15,4	22,0	1,46	282	364	1,31	
Faktoren	Öffnungszyklen	1,07		0,08	13		0,05
	Florgewicht	0,40	1,07	0,07	9	11	0,02
	Tambour-Arbeiter-Abstand			0,10	-8	-8	0,06
	Tambourgeschwindigkeit		0,73		-11		
	Arbeitergeschwindigkeit	-0,51		0,11			0,06
	Wendergeschwindigkeit	-1,27		0,14	-18		0,11
	Verzug des CV1-Systems		-0,83			-8	-0,02
	Einstichdichte		0,70	-0,12	10	9	-0,07
	Verzug der Nadelmaschine	0,63	-2,20	-0,10	6	-27	-0,06

Biegesteifigkeit in 0°-Richtung **E<sub>0°</sub>**, Biegesteifigkeit in 90°-Richtung **E<sub>90°</sub>**, Biegesteifigkeitsverhältnis **O<sub>E</sub>**, Biegefestigkeit in 0°-Richtung **σ<sub>0°</sub>**, Biegefestigkeit in 90°-Richtung **σ<sub>90°</sub>**, Biegefestigkeitsverhältnis **O<sub>σ</sub>**.

Das Florgewicht ist der zweithäufigste Faktor, der bei acht Qualitätsmerkmalen einen signifikanten Einfluss aufweist. Wird das Florgewicht auf 20 g/m<sup>2</sup> erhöht, verbessert sich die Flächengleichmäßigkeit bei sinkender Durchmischungsgüte. Außerdem nimmt Die Faserschädigung aufgrund des hohen Florgewichts von 20 g/m<sup>2</sup> ab. Dies belegt der Anstieg sämtlicher mechanischer Qualitätsmerkmale. [Ste21]

Die Wendergeschwindigkeit ist der dritthäufigste Faktor, der bei sieben der zehn Qualitätsmerkmale einen signifikanten Einfluss hat. Die Faserausrichtung und Durchmischungsgüte nehmen durch eine höhere Geschwindigkeit der Wenderwalzen zu. Zudem wird auch die Sollwertabweichung des Carbonfasermassenanteils  $\Delta_{CFA}$  und die Abweichung des Faservolumengehalts  $\Delta_{FVG}$  verbessert. [Ste21]

Sechs Qualitätsmerkmale werden signifikant durch die Einstichdichte beeinflusst. Dabei halten sich die Faserschädigung und die Umorientierung der Carbonfasern aus der x-y-Ebene durch die Vernadelung mit dem steigenden Widerstand gegen Delamination durch in z-Richtung umorientierte Carbonfasern die Waage. Einerseits sinkt dadurch die Faserausrichtung an sich, wie die Abnahme des Steifigkeitsverhältnisses belegt. Andererseits steigen die mechanischen Kennwerte insgesamt jedoch an. [Ste21]

Fünf Qualitätsmerkmalen werden signifikant durch den Faktor Öffnungszyklen beeinflusst. Wider Erwarten führt die Anzahl der Öffnungszyklen zu einer Verschlechterung der Durchmischung. Die Bildung von Nissen durch die PA6-Fasern beim Öffnungsprozess ist ursächlich hierfür. Der Faktor bewirkt eine Reduktion der Faserschädigung und zeigt dadurch eine Erhöhung der Biegesteifigkeit  $E_{0^\circ}$  und der Biegefestigkeit  $\sigma_{0^\circ}$ . Die Faserausrichtung wird verbessert. [Ste21]

Die Einflüsse bei der Erhöhung des jeweiligen Faktors auf alle betrachteten Qualitätsmerkmale sind in Tabelle 2.1.1.10 zusammengefasst. [Ste21]

Tabelle 2.1.1.11: Zusammenfassung der Faktoreinflüsse bei der Verarbeitung [Ste21]

Faktoren	Verschnitt-carbonfasern	Pyrolysierte Carbonfasern	Carbon-Thermoplast-Fasermischung
Öffnungszyklen			++
Florgewicht	0	0	++
Tambour-Arbeiter-Abstand	+	+	0
Tambourgeschwindigkeit	++	--	0
Arbeitergeschwindigkeit	+	-	+
Wendergeschwindigkeit	0	+	++
Verzug des CV1-Systems	0	0	0
Einstichdichte	+	0	0
Verzug der Nadelmaschine	-	0	--

Zusammenfassung der Einflüsse bei Erhöhung des jeweiligen Faktors  
++ (sehr positiv), + (positiv), 0 (ausgeglichen), - (negativ), -- (sehr negativ)

Keiner der Faktoren aus den erstellten Modellen zeigt eine durchgängig positiv oder negativ Wirkung bei der Verarbeitung der drei Fasermischungen. Nur der Verzug des CV1-Systems weist durchweg den gleichen, einen ausgeglichenen Einfluss auf die Qualitätsmerkmale auf. Auf jede Fasermischung reagieren die Faktoren der Anlage unterschiedlich. Die erarbeitete Methodik zur effizienten Bestimmung von Modellen bei geringstmöglichem Versuchsaufwand ist vor diesem Hintergrund umso bedeutender. [Ste21]

## 2.1.2 Arbeitspaket Faservorbereitung - Mischung und Öffnung

Siehe Arbeitspaket 2.1.1.

## 2.1.3 Arbeitspaket Verfestigungsuntersuchung

Siehe Arbeitspaket 2.1.1.

## 2.1.4 Arbeitspaket Modifikation Krempel (Hacker)

Das Arbeitspaket wird nur das ITA Augsburg bearbeitet. Der in der Krempel entstandene Faserflor wird anschließend durch den Einsatz eines Hackers von der Abnehmerwalze gelöst und dem Kreuzleger übergeben. Der Hacker gleicht einem sich schnell auf- und abwärts bewegenden Kamm. Durch die Bewegung wird ein Luftstrom erzeugt, welcher den Flor vom Abnehmer löst. Hierbei berührt der Hacker den Flor theoretisch nicht. Hohe Florflächengewichte ( $> 40 \text{ g/m}^2$ ), scharfe Abnehmergarnituren und/ oder zu langsame Auf- und Abwärtsbewegungen des Hackers können jedoch zu einem direkten Kontakt führen. Das bedeutet, dass der Flor nicht durch den entstehenden Luftstrom, sondern durch den mechanischen Eingriff vom Abnehmer gelöst wird. Dieser Umstand kann die Gleichmäßigkeit des Flors und die Orientierung der Fasern negativ beeinflussen.

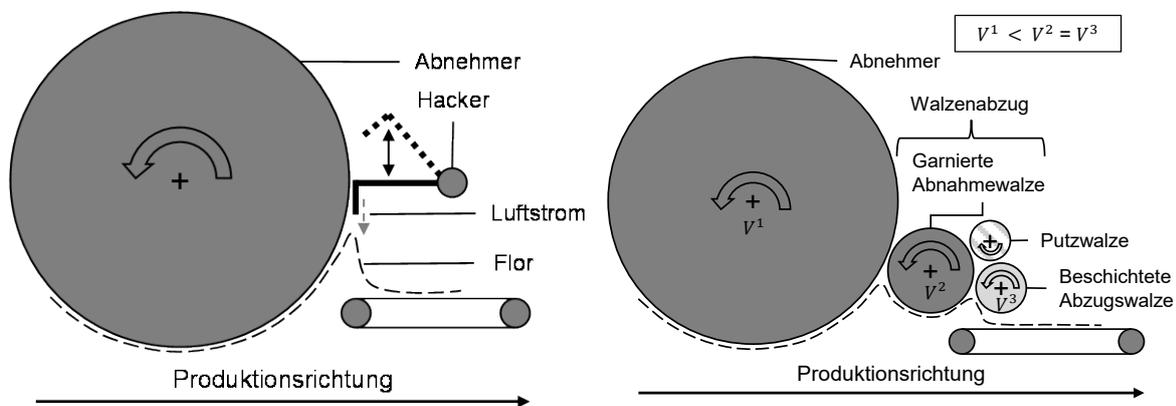


Abbildung 2.1.1: Funktionsweise des Hackers (links) und der walzenbasierten Vliesabnahme (rechts).

Neben dem Hacker kann der Flor durch den Einsatz eines sog. Walzenabzugs vom Abnehmer gelöst werden. Der Walzenabzug besteht aus einer garnierten Abnahmewalze sowie einer gummierten Abzugswalze. Um ein Wickeln des Flors um die Abnahmewalze zu verhindern und somit den Dauerbetrieb zu ermöglichen, ist zusätzlich eine Putzwalze installiert.

Zur Entnahme des Flors wird der Kreuzleger des ITA Augsburg durch eine Bänderweiterung durch den Leger geführt und anschließend mit einer schützenden Papierzwischenlage auf eine Papphülse aufgewickelt, wie in der folgenden Abbildung dargestellt ist.

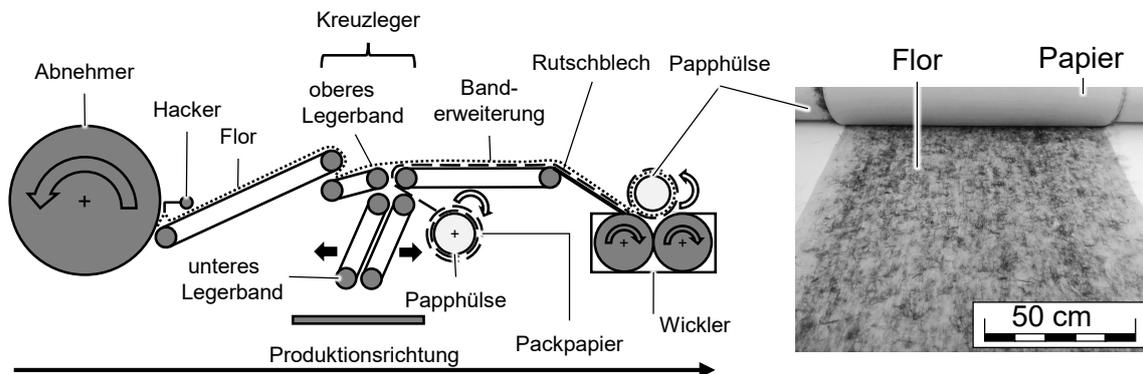


Abbildung 2.1.4.2: Florentnahme (links) und Floraufwicklung auf Papphülse (rechts).

Die Änderung der Maschinenparameter wird ausgehend von einem Referenzversuch, sowohl mit dem Hacker als auch mit dem Walzenabzug durchgeführt. Dadurch können Einflüsse auf die Qualität des Flors entweder auf die Variation der Parameter oder auf das unterschiedliche Abnahmesystem zurückgeführt werden. Versuche mit dem Hacker werden als Versuchsreihe 1 und Versuche mit dem Walzenabzug als Versuchsreihe 2 bezeichnet.

Tabelle 2.1.4.12: Verwendete Materialien für die Versuche

Ver-suchs-reihe	Ver-suchs-punkt	Bezeichnung (CF*)	Bezeichnung (TP*)	MV* [Gew.%*] (CF:TP)	Verbrauch [kg]
1	1-7	CNXT NP5 R	P300 (PA6*)	40:60	15
1	8	CNXT NP5 R	P301 (PA6)	40:60	5
1	9	CNXT NP5 R	P300 (PA6)	10:90	5
1	10	CNXT NP5 R	P300 (PA6)	50:50	5
1	11	CNXT NP5 R	P300 (PA6)	70:30	5
1	12	CNXT NP5 R	P300 (PA6)	90:10	5
2	1-29	CNXT NP5 R	P300 (PA6)	40:60	30
2	30	CNXT NP5 R	P301 (PA6)	40:60	5
2	32	CNXT NP5 R	TREVIRA 290 (PET*)	40:60	5
2	33	SM45R-3/10	P300 (PA6)	40:60	5

\* mit MV = Mischungsverhältnis; CF = Carbonfaser; TP = Thermoplastische Faser;  
PA6 = Polyamid 6; PET = Polyethylenterephthalat; Gew.-% = Gewichtsprozent

Aus der Literatur ist bekannt (Kardentechnologie), dass die Fasern zu 50 – 60 % als Schlepphäkchen vorhanden sind, zu 20-30 % als Leithäkchen und zu ca. 20-30 % als parallel angeordnet sind [. Die Analyse der Flormaterialien zeigt für Carbonfasern ein anderes Bild. Leithäkchen treten zu ca. 1 % auf und Schlepphäkchen zu 14 %. Die restlichen Carbonfasern liegen in anderer Form vor. Die Ausprägungen sind in Abbildung 2.1.4.3 dargestellt.

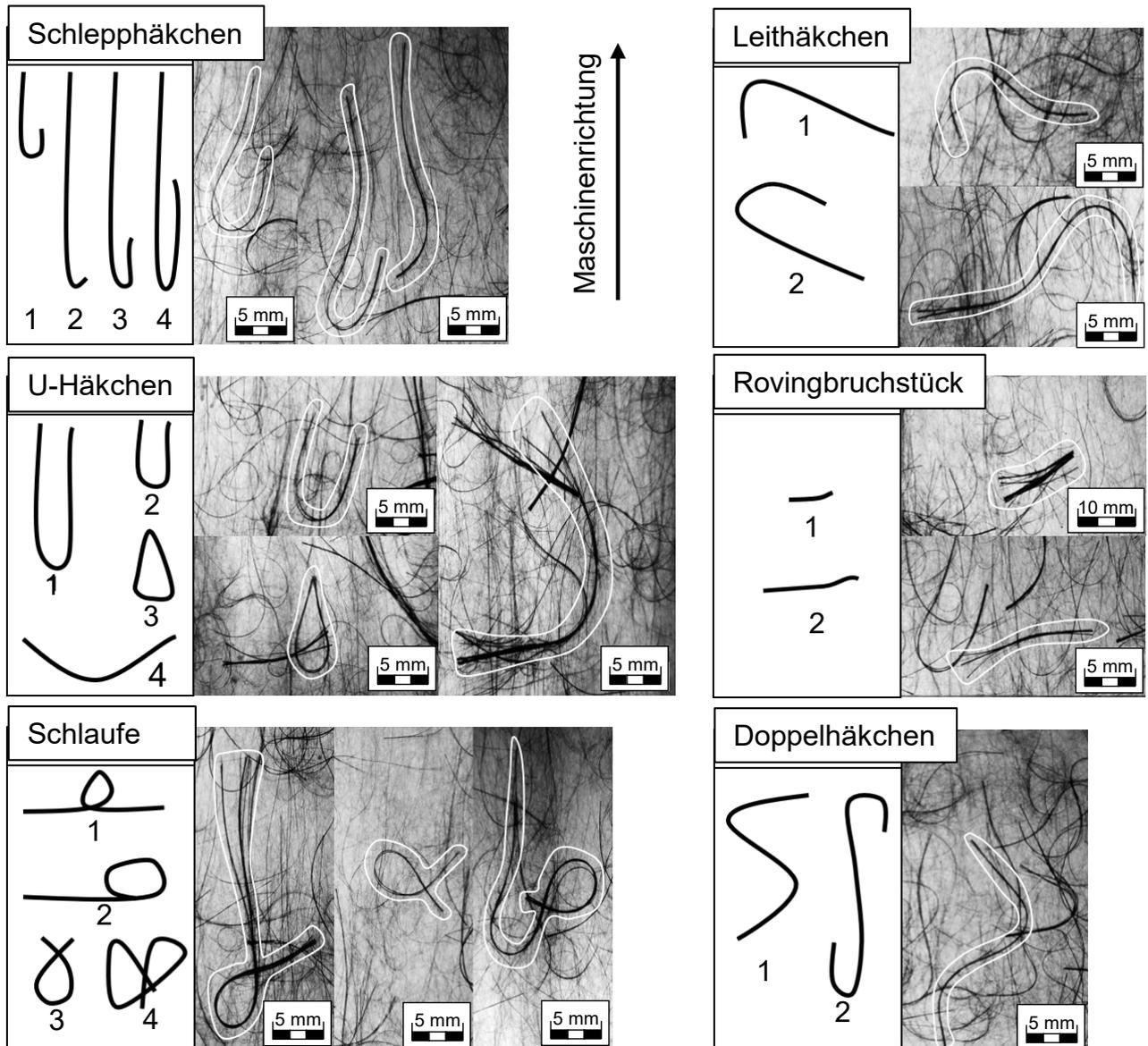


Abbildung 2.1.4.2: Ausprägungen von Carbonfaserovingen im Flor [Ste21].

Im Krempelflor werden sechs Ausprägungen für die Carbonfaserovinge definiert: Leithäkchen, Schlepphäkchen, U-Häkchen, Doppelhäkchen, Schlaufen und Rovingbruchstücke. Die häufigste Form der Ausprägung im Flor sind entgegen der Erkenntnisse aus der Literatur nicht U-Häkchen (27,1 %) sondern Schlaufen (36,9 %). 74 % der U-Häkchen liegen mit der Öffnung in Produktionsrichtung. Die optische Analyse von 10 Krempelfloren aus einer Produktionscharge zeigen, dass die Verteilung der Ausprägungen höchst gleichmäßig vorliegt, wie eine maximale Standardabweichung von weniger als 3 % belegt.

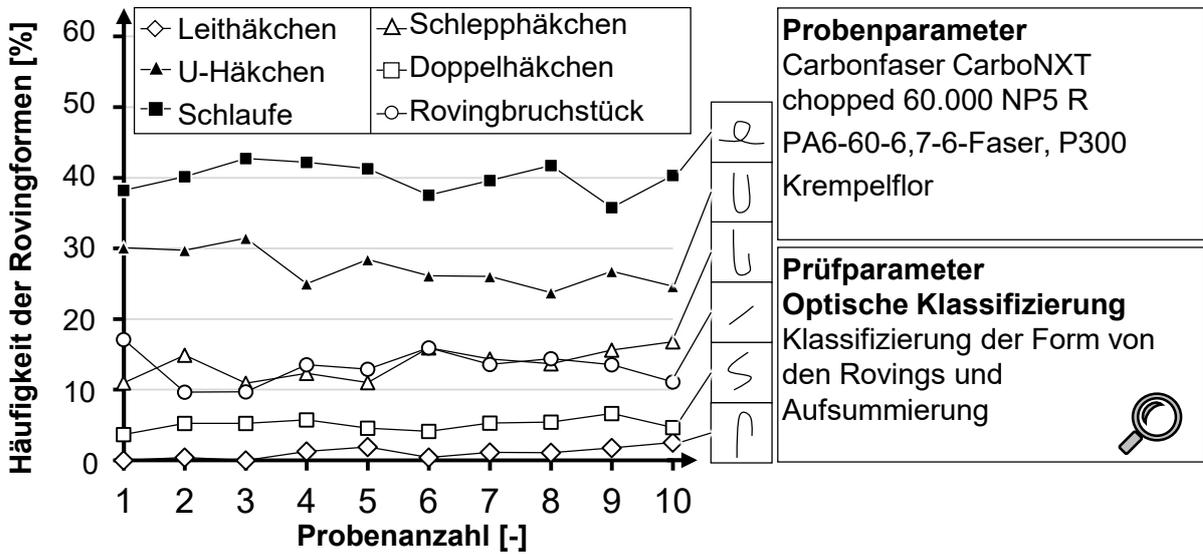


Abbildung 2.1.4.3: Häufigkeit der Erscheinungsformen der Carbonfaserrovings [Ste21].

Die optische Analyse weiterer Flore, die mit variierenden Maschineneinstellungen hergestellt werden, zeigt, dass die relativen Häufigkeiten der Ausprägungen ähnlich bleiben (Abbildung 2.1.4.5). Pro Versuchsreihe werden nur jeweils 2 Krempelflore optisch analysiert, sodass auf eine statistische Prüfung der Signifikanz verzichtet wird.

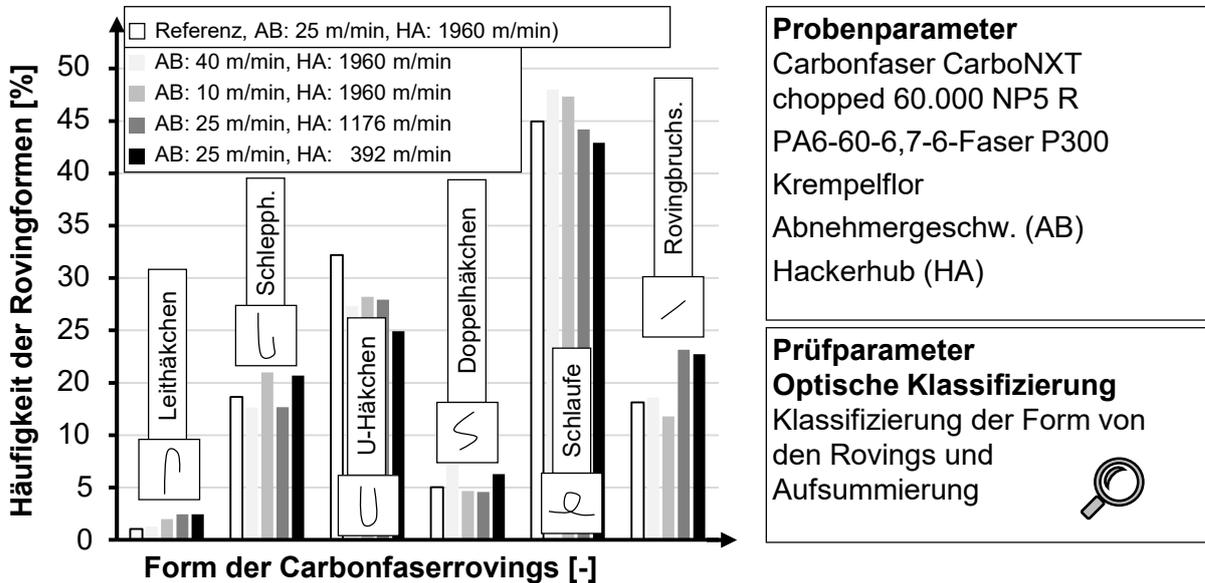


Abbildung 2.1.4.5: Einfluss der Abnehmer- und Hackergeschwindigkeit [Ste21].

Die Maschineneinstellungen zeigen keine drastische Änderung der Ausprägungen der Carbonfasern. Abbildung 2.1.4.5 zeigt die deutlichsten Abweichungen der 35 untersuchten Maschineneinstellungsvariationen.

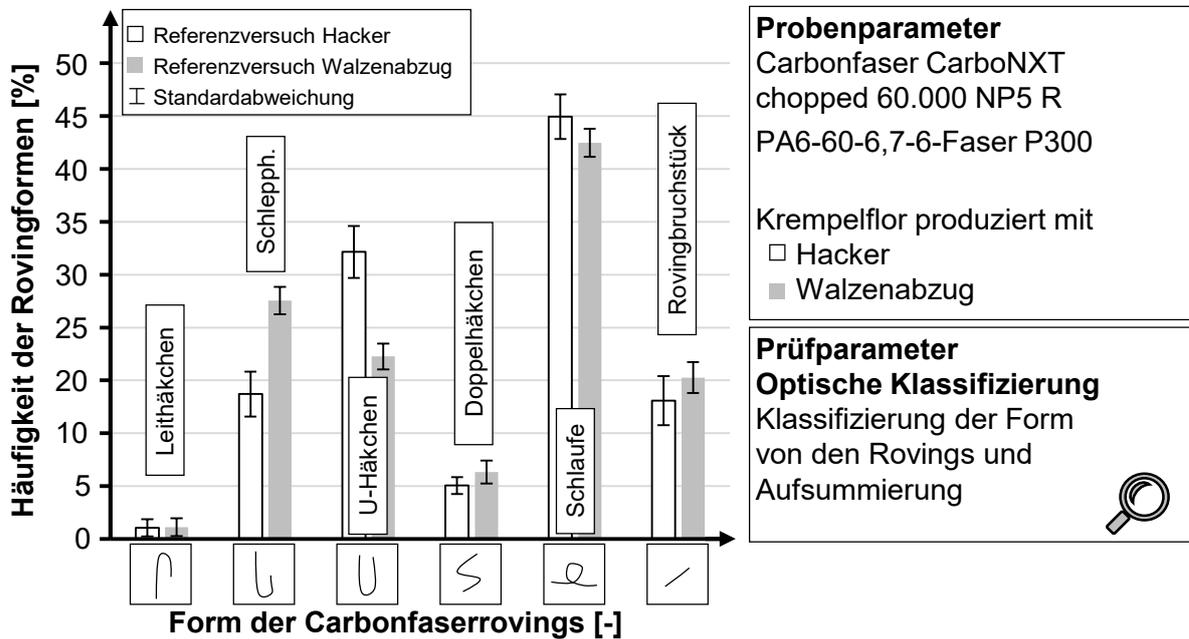


Abbildung 2.1.4.4: Vergleich der Ausprägungen der Rovings bei der Verarbeitung mit Hacker und Walzenabzug [Ste21].

Abbildung 2.1.4.6 zeigt das Ergebnis des Vergleichs zwischen Hacker und Walzenabzug. Signifikante Unterschiede auf einem Konfidenzniveau von 5 % zwischen den Häufigkeiten der Ausprägungsformen der Rovings bestehen bei den Schlepphäkchen und U-Häkchen. Der Wechsel des Abnahmesystems führt zu einer signifikanten Erhöhung der Schlepphäkchen zu Lasten der U-Häkchen. Die Änderung der Häufigkeiten ist auf den Einbau des Walzenabzugs zurückzuführen, der eine zusätzliche Übergabestelle darstellt. Der Mechanismus ist in Abbildung 2.1.7 veranschaulicht.

Die Garnitur des Walzenabzugs zieht die auf dem Abnehmer liegenden Fasern aus dessen Garnitur und übergibt diese dem Zuführband. Die Zahnspitzen der Garnitur erfassen dabei vorrangig thermoplastische Fasern. Die Carbonfasern werden im Vergleich dazu durch Faser-Faser-Reibung mitgezogen. Die Verschiebung der Ausprägungen vom U-Häkchen zur Schlaufe basiert vermutlich auf dem Fasertransport an dieser Stelle. Die thermoplastischen Fasern richten die Carbonfasern durch die zusätzliche Verzugsstelle vermehrt aus, sodass der Anteil an wenig orientierten U-Häkchen sinkt und der Anteil an stark ausgerichtete Schlepphäkchen steigt. Aufgrund der besseren Orientierung der Carbonfaser sowie der Möglichkeit gezielt auf die Faserausrichtung und Struktur des Vliesstoffes Einfluss zu nehmen ist der Walzenabzug für die Verarbeitung von Carbonfasern das zu bevorzugende Abnahmesystem.

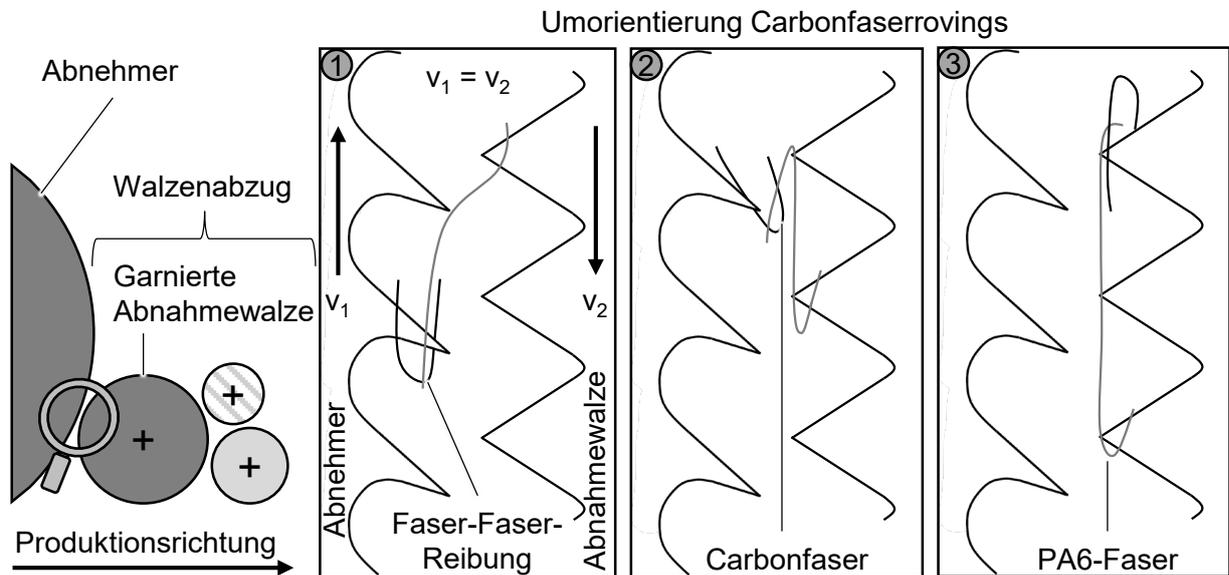


Abbildung 2.1.4.5: Mechanismus der Umorientierung durch den Walzenabzug.

## 2.1.5 Arbeitspaket: Modifikation Krempel (Faseröffnung)

Untersuchungen mit verschiedenen Fasermaterialien zeigen, dass die Faseröffnung sowohl auf das verwendete Material als auch auf die gewünschten Eigenschaften des Endprodukts abgestimmt werden müssen. Eine Pauschale Einstellungsempfehlung kann auf der Grundlage der Untersuchungen nicht gegeben werden. Allgemein werden folgende Zusammenhänge aus den Versuchsdurchführungen abgeleitet, die in Tabelle 2.1.5.1 aufgelistet sind.

Tabelle 2.1.5.13: Empfehlungen für die Faseröffnung bei verschiedenen Carbonfasertypen

Fasermischung	Erwünschte Orientierung	Öffnungsgrad
100% pyrolysierte CF	Orientiert	Keine zusätzliche Öffnung anwenden
100% pyrolysierte CF	Isotrop	Keine zusätzliche Öffnung anwenden
100% Verschnitt CF	Orientiert	So gering wie möglich
100% Verschnitt CF	Isotrop	So gering wie möglich
40% CF, 60% TP Mischung	Orientiert	Voröffnung sinnvoll
40% CF, 60% TP Mischung	Isotrop	Voröffnung sinnvoll

Die Verarbeitung reiner pyrolysierte Carbonfasern führt zu einer starken Beanspruchung der Fasern. Eine zusätzliche Öffnung bewirkt bereits vor der Krempel eine deutliche Fasereinkürzung. Damit ist keine stabile Verarbeitung auf der Anlage mehr möglich. Reine Verschnittcarbonfasern benötigen nur ein Minimum an Öffnung, um eine gute Verarbeitung zu garantieren. Eine Durchmischung ist bei diesen Fasern nicht notwendig und somit dient die Faservorbereitung lediglich der Vorlage eines gleichmäßig dosierten Massenstroms. Dieser ist auch bei minimaler Öffnung erreichbar. Für Carbon-Thermoplast-Fasermischungen spielt die Öffnung eine wesentliche Rolle. Die Durchmischung zwischen Thermoplast- und Carbonfasern wird verbessert und in der Folge sinkt die Faserschädigung. Zudem verbessert sich die Gleichmäßigkeit des Faservolumengehalts bei einem Einsatz im Composite.

## 2.2 Arbeitspaket: Organovliesproduktion

In diesem Arbeitspaket werden unterschiedliche Herstellverfahren für Organovliesstoffe – rCF-Vliesstoffe mit bereits eingemischter thermoplastischer Komponente – untersucht. Neben der Prozessuntersuchung des Krempelprozesses werden in diesem Arbeitspunkt die unterschiedlichen Organovliesstoffe für die nachfolgenden Untersuchungen zu den verschiedenen Weiterverarbeitungsverfahren hergestellt. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 2.2.1 den geplanten Ergebnissen gegenübergestellt. In diesem Arbeitspaket sind die Partner Faurecia, Tenowo, Fraunhofer IGCV und Trevira in enger Zusammenarbeit tätig.

Tabelle 2.2.1: Gegenüberstellung erzielter Ergebnisse zur ursprünglichen Planung für das Arbeitspaket 2.2

Arbeitspaket	Ursprüngliche geplante Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse
2.2	Herstellung Weiterverarbeitungsvliesstoffe	Weiterverarbeitungsvliesstoffe für die anderen Partner des Projektes werden produziert.
2.2.1	Pulverstreutechnologie	Die Pulverstreutechnologie wird für die Verarbeitung von Vliesstoffen angewandt.
2.2.2	Vliesstacking	Das Vliesstacking wird untersucht und industriell angewandt. Die Verfahrensvarianten zur Einbringung von Thermoplast in Vliesstoffe werden miteinander verglichen.
2.2.3	Untersuchung zu NF/TP/CF Fasermischungen	Natur-Thermoplast-Carbon-Fasermischungen werden untersucht und deren Potentiale aufgezeigt.
2.2.4	Untersuchungen zu PET-Fasern	Der Einsatz von PET-Fasern und deren Eigenschaften bei der Verarbeitung von Carbonfaservliesstoffen wird erfolgreich untersucht

Die Projektpartner Tenowo, ELG und ITA stellen für die Weiterverarbeitung durch die Projektpartner verschiedene Vliesstoffe her, die in Tabelle 2.2.2 aufgelistet sind.

Tabelle 2.2.2: Hergestellte Vliese aus HAP 2 (ohne Vorversuche) für die Partner SGL, Fraunhofer IGCV und Huntsman zur Weiterverarbeitung (Infiltration und Verpressen)

Produzent	Bezeichnung	Vliestyp / -nummer	Lauflänge [m]
ITA	V100_Iso_ITA	1	140
ITA	V100_Iso_ITA	1.1	20
Tenowo	V100_Ori_TEN	2	170
ITA	V40_PA60_Iso_ITA	3	220
ITA	V40_PA60_Iso_ITA	3.1	30
Tenowo	V51_PA49_Ori_TEN	4	90
ITA	V45_PP55_Iso_ITA	5	60
ITA	P100_Iso_ITA	6	100
ITA	P100_Ori_ITA	7	0
ITA	P40_PA60_Iso_ITA	8	110
Tenowo	P51_PA49_Ori_TEN	9	90
ITA	P36_PET64	10	30
Tenowo	V40_PA60_Ori_TEN_Maliwatt	11	60
ELG	P45_MAPP55_ELG	12	120
ELG	P39_PPS61_Ori_ELG	13	60
ELG	P40_PA60_Ori_ELG	14	60
ELG	P100_Ori_ELG	15	270

## 2.2.1 Arbeitspaket Pulverstreuer Technologie

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Untersuchung der Eignung der Pulverstreuer-Technologie für die Herstellung von Organovliesen. Gemeinsam mit der Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH, Rötz, welche für diese Arbeiten von der Firma Faurecia unterbeauftragt wird, und dem ITA werden zunächst Untersuchungen zum Einstreuen und thermischen Aktivieren auf dem Faserflor durchgeführt. Diese Versuche werden im Technikum Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH durchgeführt. Im weiteren Verlauf sollte der Einsatz der Pulverstreu-Technologie in der Vliesanlage des ITA untersucht werden. Die Kosten und der Aufwand für die Integration eines Pulverstreuers in die Vliesstofflinie der Dilo Systems GmbH gestalteten sich jedoch wesentlich zu hoch für die im Projekt vorgesehenen Mittel. Deshalb erfolgt die Validierung des Pulverstreuens ausschließlich durch Versuche bei der Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH, Rötz.

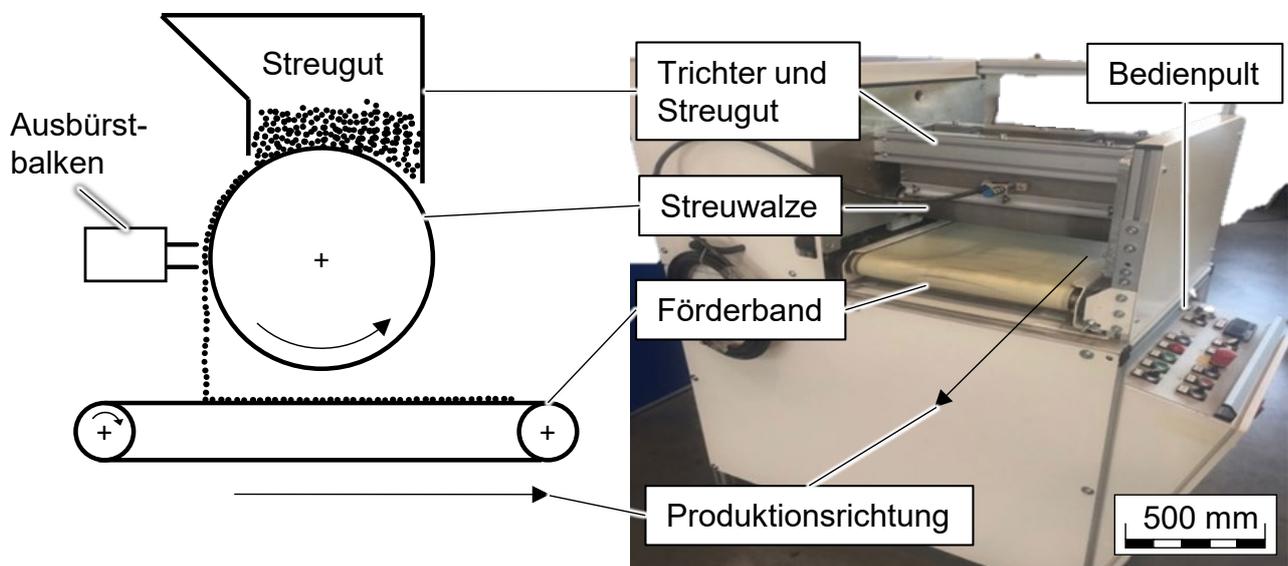


Abbildung 2.2.1.1: Prinzipskizze eines Pulverstreuers (links) und Labor-Pulverstreuer der Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH in Rötz.

In Abbildung 2.2.1.1 ist eine Prinzipskizze eines Pulverstreuers dargestellt sowie ein Labor-Pulverstreuer der Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH. Das Streugut wird kontinuierlich auf der sich drehenden Streuwalze verteilt. Mithilfe des Ausbürstbalkens wird das Streugut aus der Streuwalze herausgebürstet und fällt gleichmäßig auf das zu beschichtende Material.

Als Pulver kommt der Thermoplast Grilon A28 von der der EMS Chemie AG, Dormat/Ems (Schweiz), zum Einsatz. Die Korngrößenverteilung zeigt folgende Tabelle.

Tabelle 2.2.1.3 Korngrößenverteilung von Ultramid B53 und Griltech A 28

Korngrößenanteil in %	BASF Ultramid B53	Griltech A 28
D%	<Mikrometer	<Mikrometer
D10	103	116
D50	283	199
D95	395	348

Mit Hilfe der Firma Maschinenfabrik Meyer GmbH, Rötz, erfolgt die industrielle Prüfung der Matrixeinbringung mit einem PA6 Pulver auf ein 100% rCF-Flor. Dabei werden zwei Einbringungsmethoden *flachbettkaschiert* und *IR-Feld teilkonsolidiert* untersucht. Abbildung 2.2.1.2 zeigt den Versuchsaufbau bestehend aus Pulverstreuer, IR-Feld und Flachbettkaschiermaschine. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die einzelnen Maschinen (IR-Feld, Flachbettkaschiermaschine) nur für den jeweiligen Versuch in Betrieb genommen werden und nie zusammen im Einsatz sind.

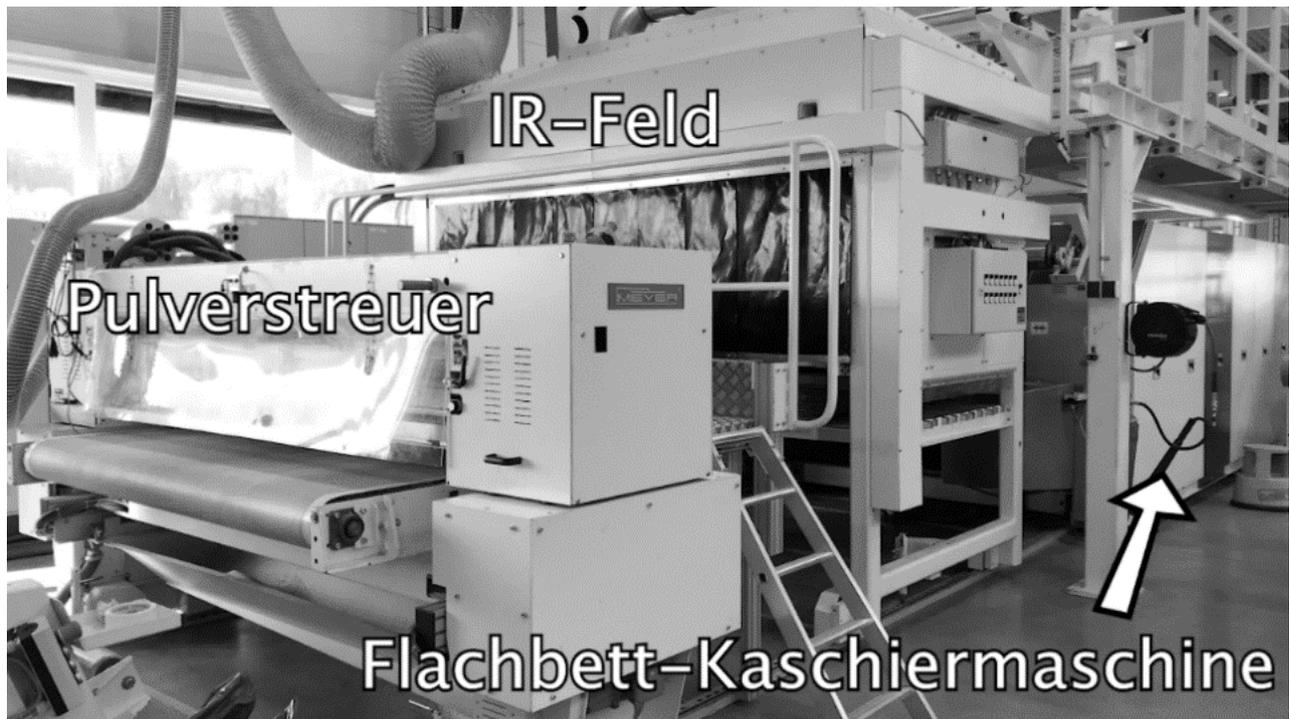


Abbildung 2.2.1.2: Versuchsaufbau der Matrixeinbringungsvariante „Pulverstreuen“ der Firma Maschinenfabrik MEYER, Rötz.

Der Flor ist auf ein nicht feuerfestes Papier gewickelt und wird deshalb mit Hilfe eines Wicklers auf ein PTFE beschichtetes Papier abgerollt und dem Pulverstreuer zugeführt. Der Pulverstreuer ist bei beiden Einbringungsvarianten vorgeschaltet. Die mit einem speziellen Nadelbelag versehene Streuwalze ermöglicht, mit Hilfe eines exakt einstellbaren Ausbürstbalkens ein homogenes und gleichmäßiges Streuergebnis. Dabei kann die Arbeitsbreite flexibel zwischen 50 mm und 5000 mm angepasst werden. Zusätzlich ist ein Auftragsgewicht von 3 g/m<sup>2</sup> bis 2000 g/m<sup>2</sup> stufenlos einstellbar [Mey19].

Der reine rCF-Flor (ca. 65 g/m<sup>2</sup>) wird mit einer Auftragsmenge von 97,7 g/m<sup>2</sup> PA6 Pulver bestreut, um einen Faser volumengehalt von 30 % einzustellen. Anschließend erfolgt das Aufschmelzen mittels Wärmeeintrag durch ein Infrarot-Feld oder die Heizzone der Flachbettkaschiermaschine, deren Flächenpressung für die Imprägnierung verantwortlich ist. Die Verfestigung findet durch das Abkühlen an Luft (Pulver IR) oder in der Kühlzone der Flachbettkaschiermaschine (Pulver FK) statt.

## Aufheizen und Imprägnieren mit der Flachbettkaschiermaschine (Pulver FK)

Mit Hilfe eines übergreifenden Transportbandes wird der bestreute Flor aus dem Pulverstreuer in die Flachbettkaschiermaschine eingespeist. Es stehen bei der Flachbettkaschiermaschine der Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH, RötZ, drei Heizzonen, ein Kalandersowie zwei Kühlzonen zur Verfügung. Zudem ist der Spalt der Heizung flexibel einstellbar. Mit folgenden Parametern wird der Versuch durchgeführt:

Tabelle 2.2.1.4: Heizparameter für die Herstellung pulverbestreuter Vliesstoffe

Parameter	Werte
Heizzone 1:	240 °C
Heizzone 2:	245 °C
Heizzone 3:	250 °C
Kühlzone 1:	26 °C
Kühlzone 2:	19 °C
Druck:	20 N/cm <sup>2</sup>
Geschwindigkeit: 2 m/min	2 m/min
Heizungsspalthöhe	0,5 mm

Der schematische Aufbau der Flachbettkaschiermaschine ist in Abbildung 2.2.1.3 dargestellt. Nach dem Einspeisen durchläuft das zu konsolidierende Material zunächst die Heizzonen, die durch eine Rampenschaltung eine maximale Temperatur von 250 °C erreichen. Anschließend wird durch den Kalanders Druck auf das erhitzte Flor-Matrix-Material ausgeübt. Dies hat zur Folge, dass die nun aufgeschmolzene Matrix in das faserige Flächentextil eingebracht wird. Es folgt das Abkühlen des Materials durch die Kühlzonen.

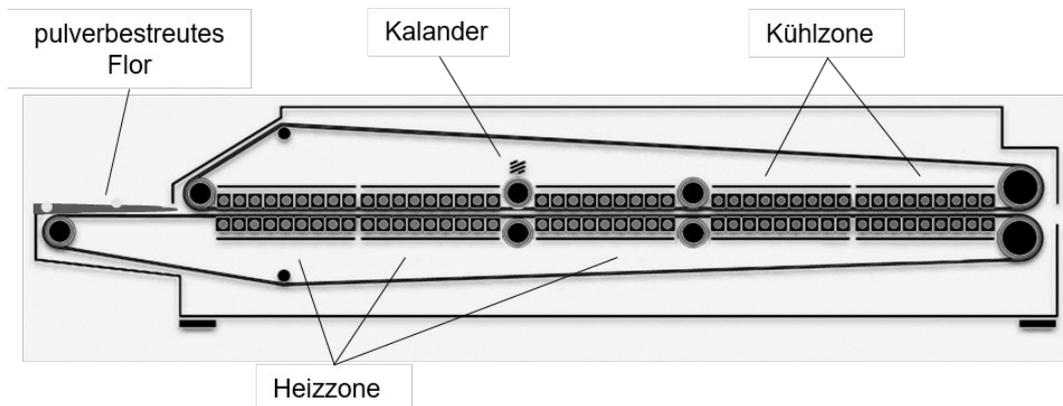


Abbildung 2.2.1.3: Schematische Darstellung der Flachbettkaschiermaschine von MEYER, RötZ [Mey19].

Die folienähnliche Struktur des daraus resultierenden Materials ist in Abbildung 2.2.1.4 dargestellt. Das oberflächlich aufgebraachte PA6 ist durch den Druck des Kalanders vollständig in den Flor eingebracht. Die faserige Oberfläche des reinen rCF-Flors wird fast vollständig geschlossen. Die noch leicht trockene Oberfläche deutet jedoch auch auf eine nicht vollständige Imprägnierung des Flors hin.

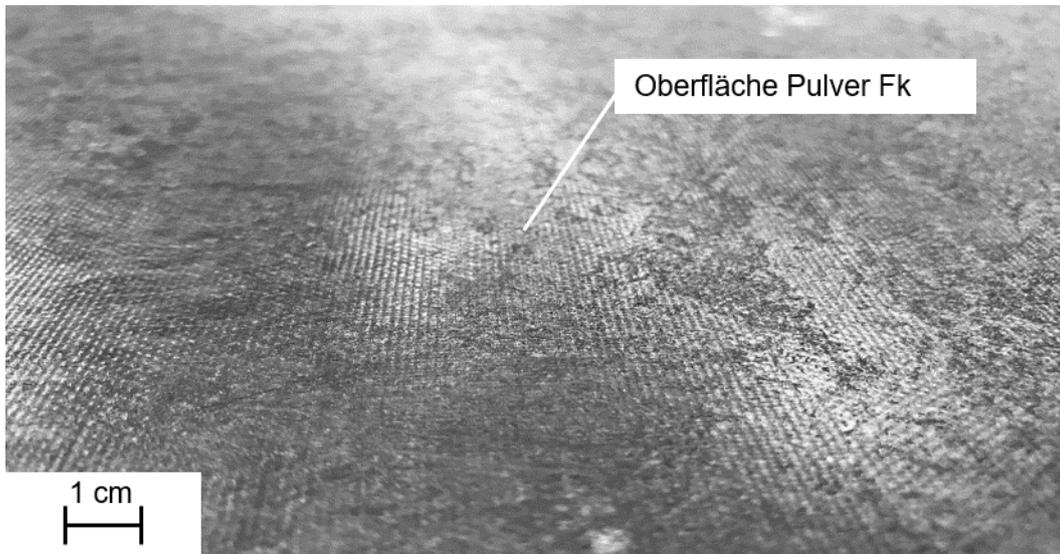


Abbildung 2.2.1.4: Oberfläche des Pulver flachbettkaschierten Materials.

#### Aufheizen mit einem Infrarot-Feld und Imprägnieren mit der Flachbettkaschiermaschine (Pulver *Infrarot teilkonsolidiert*)

Bei der Einbringungsvariante Pulver *Infrarot teilkonsolidiert* wird mit Hilfe des Pulverstreuers das PA6 Pulver zunächst homogen auf dem Carbonfaserflor aufgetragen, bevor es anschließend das Infrarot-Heizfeld durchläuft. Abbildung 2.2.1.5 zeigt den schematischen Aufbau des verwendeten Infrarot-Heizfeldes. Das zu konsolidierende Material wird nur oberseitig durch das Infrarot-Heizfeld beheizt. Bei dieser Variante der Matrixeinbringung erfährt das Material keine Druckeinwirkung, sondern wird lediglich durch die Strahlungswärme mit 180 °C beheizt. Eine Erhöhung der Temperatur führt zum Verbrennen der Matrix.

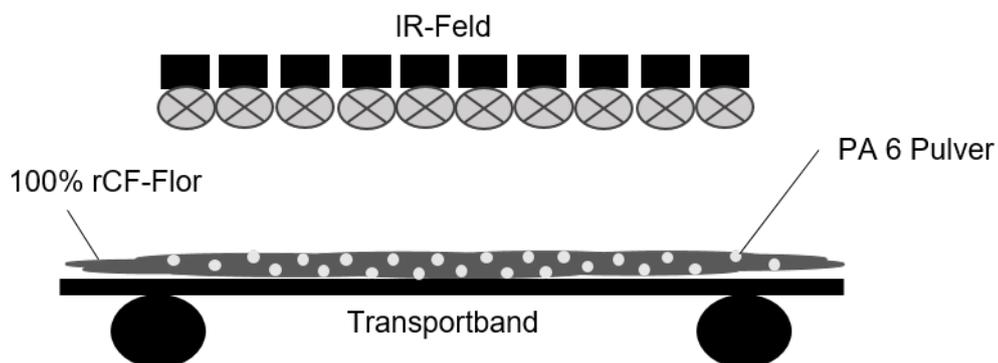


Abbildung 2.2.1.5: Schematischer Aufbau des Infrarot-Heizfeldes.

Abbildung 2.2.1.6 zeigt, dass die einzelnen Körner des PA6 Pulvers lediglich aufgeschmolzen werden und nach der Abkühlung ihre tropfenförmige Gestalt behalten. Die Matrix ist somit nur auf das textile Flächengebilde aufgebracht. Die Oberfläche des daraus entstandenen Materials ist weitestgehend geöffnet und kann ohne weiteres für den Transport zusammengerollt werden.

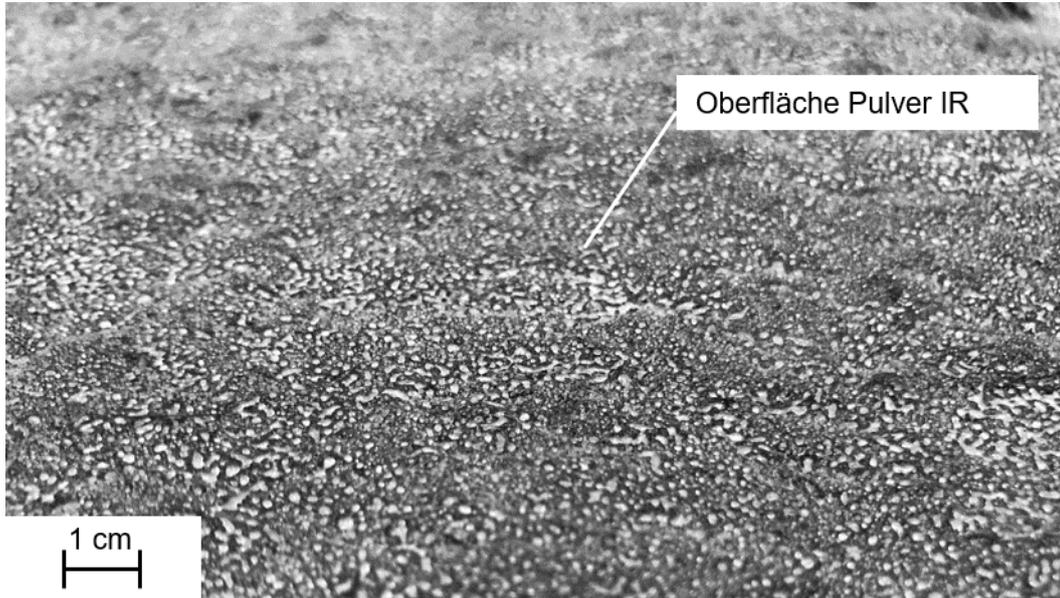


Abbildung 2.2.1.6: Oberfläche des Pulver Infrarot teilkonsolidierten Materials.

### Störgrößen

Die Teilkonsolidierung des PA6 Pulvers auf dem reinen rCF-Flor mittels IR-Feld stellt ohne Rauchabzug ein erhebliches Problem dar. Durch die Strahlungswärme des Infrarot-Heizfeldes entsteht eine starke Rauchentwicklung beim Aufschmelzen des PA-Pulvers. Demnach müssen für diese Art der Einbringung ein Rauchabzug sowie ein feuerfestes Substrat für den Durchlauf des bestreuten Flors vorgesehen werden. Des Weiteren sind eine Degradation des Polymers sowie ein Masseverlust durch die Oxidation nicht ausgeschlossen.

## 2.2.2 Arbeitspaket: Vliesstacking

Ziel dieses AP ist die Untersuchung der Eignung des Vliesstacking für die Herstellung von Organovliesen. Das Vliesstacking wird auf zwei Arten untersucht, einerseits durch die Herstellung von gestapeltem Vliesstoff in der Anlage und andererseits außerhalb der Anlage in händischen Versuchen. Ein Vliesstack ist ein mehrlagiger Aufbau aus reinem Carbonfaserflor oder -vliesstoff und thermoplastischem Flor oder Vliesstoff. Abbildung 2.2.2.1 veranschaulicht den händischen Aufbau eines Stacks. Eine Hilfskonstruktion aus Karton wird zur passgenauen Stapelung der einzelnen Schichten verwendet.

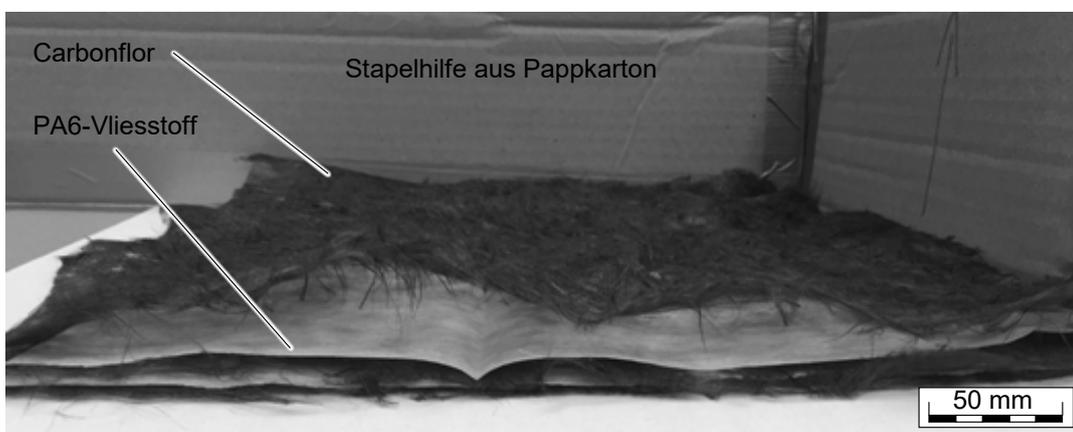


Abbildung 2.2.2.7: Aufbau aus Carbonfaserflor und PA6-Vliesstoff.

Die Carbonflore für die Vliesstacks werden bei Tenowo aus der recycelten Carbonfaser vom Typ CarboNXT Chopped 60.000 NP5 R (VCF3x) der Firma CarboNXT GmbH, Wischhafen hergestellt. Der Einfluss der Stapelreihenfolge auf die mechanischen Kennwerte wird zudem detailliert untersucht. Dazu werden vier Stacks mit unterschiedlichen Schichtungen händisch gestapelt. Die Erwartung ist, dass mit einer feineren Schichtung eine bessere Konsolidierung und damit bessere mechanische Werte erreicht werden. Die Stapelreihenfolge sowie das Schlibbild des Schichtaufbaus 2 sind in Abbildung 2.2.2.2 dargestellt.

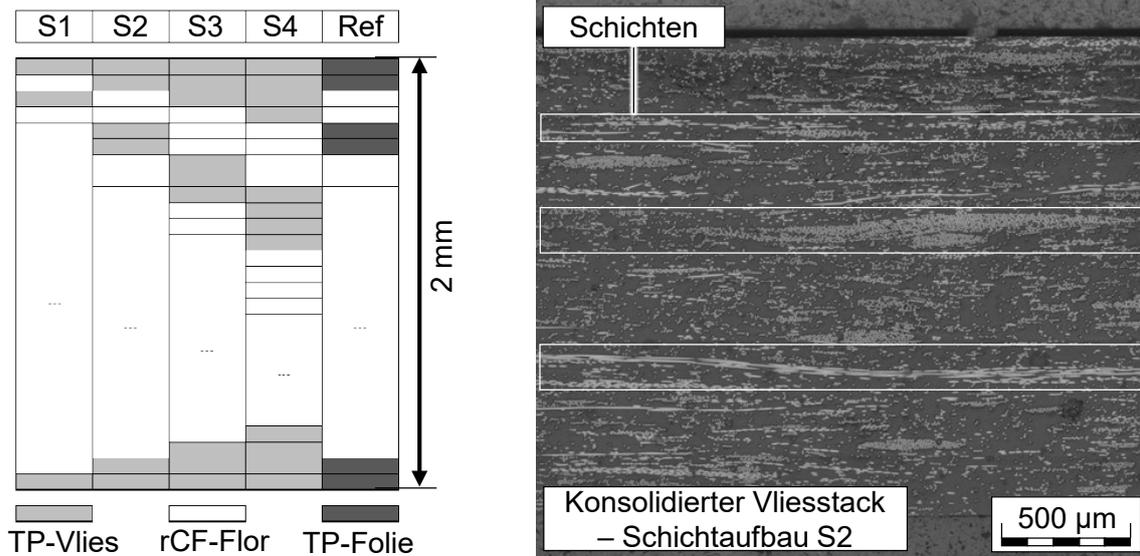


Abbildung 2.2.2.8: Stapelreihenfolge der vier verschiedenen Schichtungen und der Referenz aus Folie (links) und Schlibbild des konsolidierten Vliesstacks mit Schichtaufbau 2 (S2).

Die Vliesstoffe aus den Produktionsversuchen dienen zur Herstellung von Platten, die am Fraunhofer IGCV zunächst verpresst und anschließend mechanisch bewertet werden. Abbildung 2.2.2.3 zeigt einen Vliesstack vor dem Verpressen im Presswerkzeug.

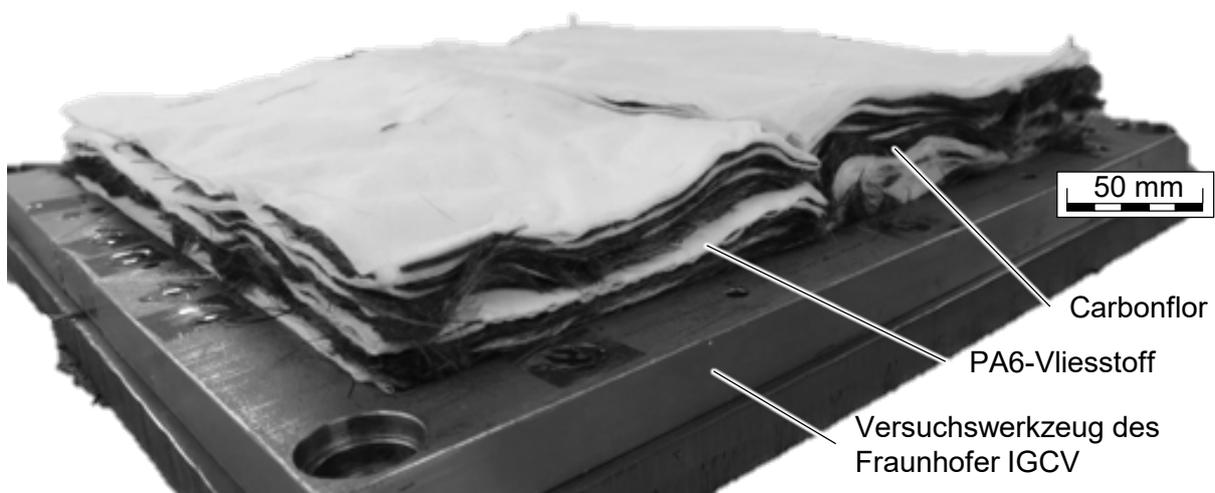
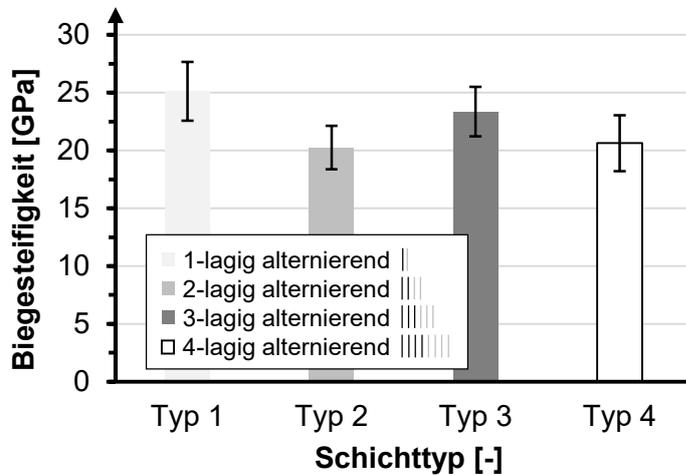


Abbildung 2.2.2.9: Verarbeitung der Vliesstacks zu Faserverbundplatten im Heißpressverfahren.

Die mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Schichtaufbauten werden im 4-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125 am Fraunhofer IGCV ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.2.2.4 und Abbildung 2.2.2.5 dargestellt.



**Probenparameter**

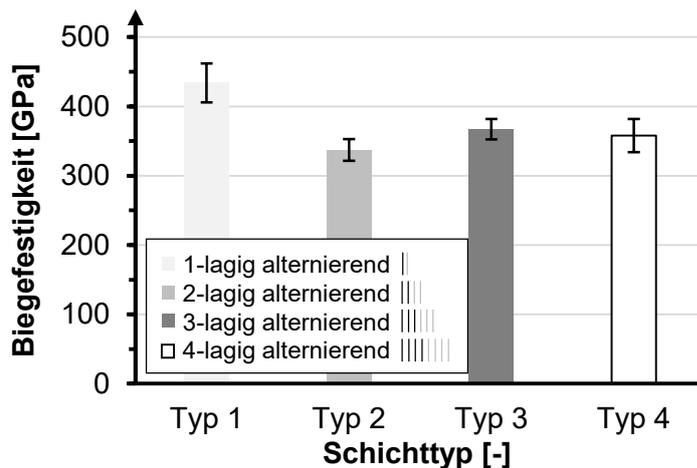
Carbonfaser CarboNXT  
chopped 60.000 NP5 R  
Vliesstoff PA6-Faser Type P300  
Vier Schichttypen

**Prüfparameter**

**4-Punkt-Biegeprüfung**  
DIN EN 14125-3  
10 Prüfungen in MD-Richtung



Abbildung 2.2.2.10: Biegesteifigkeit der vier unterschiedlichen Schichttypen.



**Probenparameter**

Carbonfaser CarboNXT  
chopped 60.000 NP5 R  
Vliesstoff PA6-Faser Type P300  
Vier Schichttypen

**Prüfparameter**

**4-Punkt-Biegeprüfung**  
DIN EN 14125-3  
10 Prüfungen in MD-Richtung

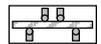


Abbildung 2.2.2.11: Biegespannung der vier unterschiedlichen Schichttypen.

Der Druck wird während der Versuche variiert, jedoch kann anhand von Schlibfbildern festgestellt werden, dass die Konsolidierungsqualität aller Proben ähnlich gut ist. Aus den mechanischen Ergebnissen wird deshalb geschlossen, dass ein feiner Stackaufbau zu höheren mechanischen Kennwerten eines gestapelten Vliesstoffes führt. Das Ergebnis deckt sich mit den Erwartungen. Für die weiteren Untersuchungen wird deshalb der Schichttyp 1 verwendet, sofern dies möglich ist.

Tenowo hat das Vliesstacking erfolgreich im industriellen Maßstab realisiert. Dabei wird wie folgt vorgegangen: Nach der Krempel wird das Faserflor auf dem einlaufenden Legerband (Zuführband) abgelegt, um anschließend einen Lagenaufbau zu erreichen. Bis hierher entspricht dies dem normalen Herstellungsprozess. Um nun eine thermoplastische Zusatzlage zwischen die Florlagen zu bekommen, wird unter dem zuführenden Legerband eine Rolle mit thermisch verfestigtem PA6 Vliesstoff mit einem Flächengewicht von 26 g/m<sup>2</sup> zugeführt. Anschließend wird der Vliesstoff zusammen mit dem Carbonfaserflor abgelegt. Dadurch wird eine Vliesvorlage erzeugt, welche anschließen für die direkte Weiterverarbeitung geeignet ist. Zu beobachten ist hier ein noch ungenügender Lagenabschluss sowie Verschiebungen im Randbereich der Vlieslage. Die Ränder sind daher noch nicht optimal. Auch die Breite der Florlage und die Breite der zulaufenden Vliesstofflage sind noch nicht aufeinander abgestimmt, so dass

es breitere Vliesstoffabschnitte innerhalb der Vliesablage gibt. Bei der Ablage selbst kommt es zur Faltenbildungen und Aufschiebungen, da die beiden Lagen (Flor und Vliesstoff) sehr unterschiedliches Verhalten in Hinblick auf deren Verzugseigenschaften und Festigkeiten aufweisen.

Prinzipiell hat das Verfahren funktioniert. Allerdings ist noch ein geeigneter Trägerzulauf erforderlich, der sowohl eine exakte Warenbahnführung als auch eine Steuerung der Warenbahnspannung erlaubt. Mit einigen Feineinstellungen der Geschwindigkeiten bei der Warenführung innerhalb des Legers ist es durchaus realistisch weitere Qualitätsverbesserungen zu erreichen.

### Vergleich der Einbringungsarten von thermoplastischem Material

Für eine abschließende Betrachtung werden die Arbeitspakete 2.2.1 und 2.2.2 gemeinsam betrachtet. In Abbildung 2.2.2.6 sind zur linken ein bepulverter rCF-Flor und zur rechten der industriell gefertigter Vliesstack von Tenowo dargestellt.



Abbildung 2.2.2.12: Pulverbestreutes rCF-Flor (links) und Vliesstacking (rechts) mit PA6 Material.

Tenowo hat das Vliesstacking erfolgreich im industriellen Maßstab auf ihrem Leger hergestellt. Dieser Vliesstack weist eine geschlossene Oberfläche auf. Damit auch der Einfluss einer fasrigen Oberflächenstruktur untersucht werden kann, wird am ITA zusätzlich ein Stack aus PA6-Vliesstoff rCF-Flor hergestellt. Von der offenen Oberfläche werden bessere mechanische Kennwerte erwartet. Als Referenz dient ein Stack aus recycelten Carbonfasern und PA6-Folien aus dem gleichen Material des Pulvers und der PA6-Fasern der EMS Chemie AG, Dormat/Ems, Schweiz.

### Herstellung des Referenzmaterials im etablierten Folienstacking Verfahren (Folienstack)

Folienstacking ist für die Herstellung von Organoblechen aus Neufasern ein etabliertes Verfahren und dient deshalb zur Herstellung von Referenzmustern zur Validierung der Eigenschaften der alternativen Einbringungsarten von Thermoplast. Die Parameter des Folienstacks sind in Tabelle 2.2.2.1 aufgeführt. Aufgrund des Flächengewichts des Flors von 30 g/m<sup>2</sup> ergibt sich eine Anzahl von 36 Lagen rCF-Flor und 28 Lagen Folie als Matrix. Die verwendete PA6 Folie weist eine sehr geringe Schwankung des Flächengewichts auf.

Tabelle 2.2.2.5: Lagenanzahl und Gewicht des Folienstacks.

Lagenanzahl rCF-Flor	Lagenanzahl PA6-Folie	$m_{real,F}$ [g]	$m_{real,M}$ [g]
36	28	184,1	132,7

In Abbildung 2.2.2.8 ist der reale sowie der schematische Aufbau des rCF-Flor/Folien-Stacks dargestellt.

— Matrix    — 100% rCF-Flor    .... Symmetrieachse



Abbildung 2.2.2.13: Aufbau des rCF-Flor/Folien-Stacks bestehend aus 36 rCF-Flor und 26 Folienlagen.

### Herstellung des Stacks aus rCF-Flor- und PA6-Vliesstoff mit einer faserigen Oberflächenstruktur (Vliesstack mit offenporiger Oberfläche)

Das Flächengewicht des Flors beträgt hierbei 56,6 g/m<sup>2</sup>. Die Lagenanzahl wird deshalb auf 20 Lagen rC-Flor und 18 Lagen PA6-Vliesstoff festgelegt und in einem symmetrischen Stackaufbau aufeinander gestapelt.

Tabelle 2.2.6: Lagenanzahl und Gewicht des rCF-Flor/PA6-Vliesstoff-Stacks mit einer faserigen Oberflächenstruktur.

Lagenanzahl rCF-Flor	Lagenanzahl PA6-Vliesstoff	$m_{real,F}$ [g]	$m_{real,M}$ [g]
21	18	203,6	112,8

Abbildung 2.2.2.8 zeigt den fertigen rCF-Flor/PA6-Vliesstoff-Stacks mit einer faserigen Oberflächenstruktur und die schematische Darstellung der Schichten. Die gewünschten Maße von 345 mm x 345 mm werden aufgrund des hohen Volumens des Stacks, trotz der Verwendung einer Schneidschablone, überschritten.

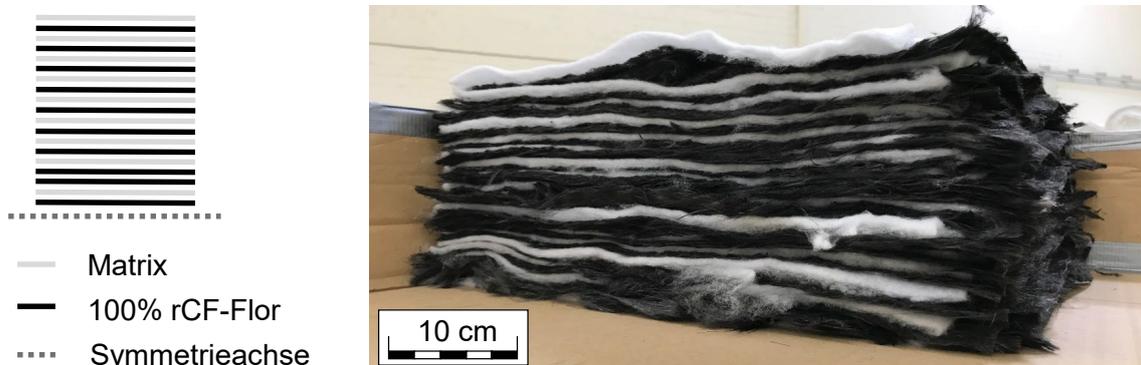


Abbildung 2.2.2.14: Aufbau des rCF-Flor/PA6-Vliesstoff-Stacks mit einer faserigen Oberflächenstruktur bestehend aus 18 Lagen PA6-Vliesstoff und 20 Lagen rCF-Flor.

## Herstellung des Stacks aus bepulvertem und flachbettkaschiertem rCF-Flor (Pulver Flachbettkaschiert)

PA6- Pulver wird auf rCF-Flor gestreut und mit Hilfe einer Doppelbandpresse in den rCF-Flor eingebracht. Für eine 2 mm dicke Platte werden 18 Lagen benötigt. Tabelle 2.2.2.3 zeigt die Lagenanzahl und Gewicht des Stacks.

Tabelle 2.2.2.7: Lagenanzahl und Gewicht des Stacks aus bepulvertem und flachbettkaschiertem rCF-Flor.

Pulver flachbettkaschiertes rCF-Flor	$m_{real,F,M}$ [g]
18	341,3

Auf Grund der bereits erwähnten Oberflächenbeschaffenheit ist das Handling beim Zuschnitt und Stackaufbau hervorragend. Wie Abbildung 2.2.2.9 zeigt ist der Lagenaufbau im Vergleich zu dem Stack aus rCF-Flor- und PA6-Vliesstoff sowie dem Stack aus rCF-Flor/PA6-Vliesstoff-Stacks mit einer faserigen Oberflächenstruktur um ein vielfaches kleiner. Da die Faser-Matrixkomponenten bereits stoffschlüssig miteinander verbunden sind, droht beim Transport kein Verrutschen des symmetrischen Aufbaus. Zusätzlich erweisen sich die geringe Höhe und die scharfen Schnittkanten als Vorteil beim späteren Einlegen in das Konsolidierungswerkzeug.

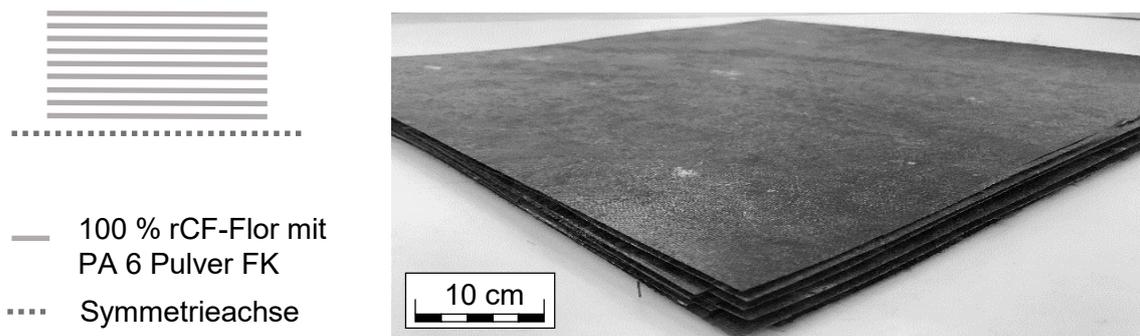


Abbildung 2.2.2.15: Aufbau des Stacks aus 18 Lagen bepulvertem und flachbettkaschiertem rCF-Flor.

## Herstellung des Stacks aus bepulvertem und Infrarot-teilkonsolidiertem rCF-Flor (Pulver Infrarot teilkonsolidiert)

Für die Herstellung des rCF-Flors wird dieses mit PA6-Pulver bestreut und anschließend wird Wärme durch ein Infrarot-Heizfeld eingebracht. Das Pulver schmilzt auf und erkaltet anschließend an der Luft, wodurch der rCF-Vliesstoff teilkonsolidiert wird. Der Stackaufbau besteht aus 19 Lagen des bepulverten und Infrarot-teilkonsolidierten rCF-Flors. Die Tabelle 2.2.2.4 listet die Parameter auf.

Tabelle 2.2.2.8: Lagenanzahl und Gewicht des Stacks aus bepulvertem und Infrarot-teilkonsolidiertem rCF-Flor

Pulver Infrarot teilkonsolidiert	$m_{real,F,M}$ [g]
19	325,4

Das Handling des Stacks ist aufgrund der offenen Oberfläche (siehe Abbildung 2.2.2.10) ähnlich zu dem des rCF-Flor/PA6-Vliesstoff-Stacks. Anders als bei der folienähnlichen Struktur des bepulverten und flachbettkaschierten rCF-Flors sind die Schnittkanten, trotz größter Sorgfalt, leicht ausgefranst. Jedoch erleichtert auch hier die bereits aufgebrachte und haftende Matrix den Prozess des Stapelns.



Abbildung 2.2.2.16: Aufbau des Stacks aus bepulvertem und Infrarot-teilkonsolidiertem rCF-Flor.

### Stack aus rCF-Flor und PA6-Vliesstoff hergestellt im Legeverfahren von Tenowo (Vliesstack Leger)

Bei dem von Tenowo produzierten Stack handelt es sich um einen bereits im Kreuzleger hergestellten und leicht vernadelten Stackaufbau aus rCF-Flor und PA6-Vliesstoff. Der verwendete PA6-Vliesstoff ist thermobondiert und weist eine geschlossene Oberfläche auf. Der Faservolumengehalt ist dadurch festgelegt. Auf Grund des hohen Flächengewichtes der einzelnen Lagen, die aus 10 Doppellagen aus Carbonfaserflor und PA6-Vliesstoff bestehen, wird das Idealgewicht deutlich überschritten. Tabelle 2.2.2.5: Lagenanzahl und Gewicht des im Leger hergestellten Stacks bieten einen Überblick über die Lagenanzahl und das erzielte Gewicht.

Tabelle 2.2.2.9: Lagenanzahl und Gewicht des im Leger hergestellten Stacks

rCF-Florlagen	PA6-Vliesstofflagen	$m_{real,F}$ [g]	$m_{real,M}$ [g]
4 x 10 Doppellagen	4 x 10 Doppellagen	95,2	289,0

In Abbildung 2.2.2.11 ist dargestellt, dass der Stack aufgrund der Herstellung im Leger mit anschließender Vernadelung gut zusammenhält und komprimiert ist. Durch die leichte Vernadelung des Materials ist das Handling beim Zuschnitt sowie bei der Herstellung des Stacks ähnlich gut wie mit dem bepulverten und flachbettkaschierten rCF-Flor. Auch hier droht beim Transport kein Verutschen der symmetrischen Schichtung.

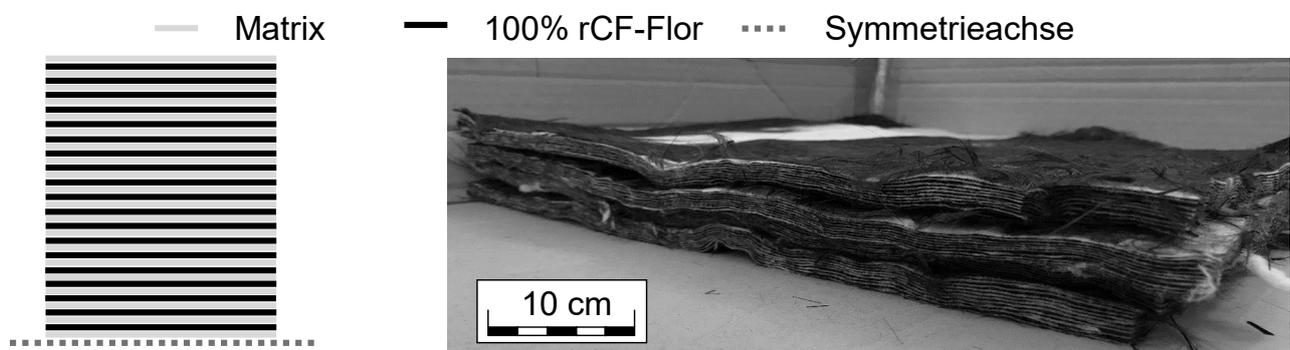


Abbildung 2.2.2.17: Aufbau des Stacks hergestellt im Leger bei Tenowo, bestehend aus 40 Doppellagen rCF-Flor und 40 Doppellagen PA6-Vliesstoff mit geschlossener Oberfläche.

## Vergleich der mechanischen Kennwerte unterschiedlicher Imprägnierverfahren von Thermoplast in rCF-Vliesstoff oder rCF-Flor

Nachdem die Matrix in das Verstärkungstextil eingebracht bzw. aufgebracht wird, erfolgt das vollständige Konsolidieren im variothermen Verfahren bei 285 °C und 40 bar Druck bei einer Zykluszeit von 80 Minuten zu einem Organoblech. Die Faserverbundplatten werden am Fraunhofer IGCV hergestellt und anschließend mechanische Prüfungen im 4-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Die Faservolumenanteile werden nach DIN EN ISO 1183 bestimmt und sind in Tabelle 2.2.2.6 aufgelistet.

Tabelle 2.2.2.10: Faservolumenanteil der hergestellten Stacks

Parameter	Folienstack (Referenz)	Pulver Flachbettkaschiert	Pulver Infrarot-teilkonsolidiertem	Vliesstack Leger	Vliesstack mit offenporiger Oberfläche
Faservolumenanteil [%]	36,8	34,8	33,7	43,8	34,7

Die Abbildung 2.2.2.12 zeigt die mechanischen Kennwerte der verschiedenen Einbringungsarten der thermoplastischen Matrix. Der Folienstack dient als etabliertes Referenzverfahren und zudem ist ein Carbon-Thermoplast-Vliesstoff aus Arbeitspaket 2.1 zum Vergleich dargestellt. Die Ergebnisse sind auf einen Faservolumenanteil von 30 % normiert. Die Prüfungen erfolgen in MD (machine direction) und CD (cross direction) der Platten. Die stärkste Faserausrichtung wird im Folienstacking erreicht. Die Biegesteifigkeit beträgt im Mittel 18,3 GPa. Die bepulverten Carbonfaserflore erreichen marginal niedrigere Steifigkeiten von 17,5 GPa (Pulver Flachbettkaschiert) und 17,8 GPa (Pulver Infrarot teilkonsolidiert). Der industriell von Tenowo hergestellte Vliesstack erreicht mit 18,7 GPa die höchste mittlere Steifigkeit unter den alternativen Einbringungsverfahren. Damit übertrifft das Vliesstacking auch die Referenz aus gestapelter PA6-Folie und Carbonfaserflor.

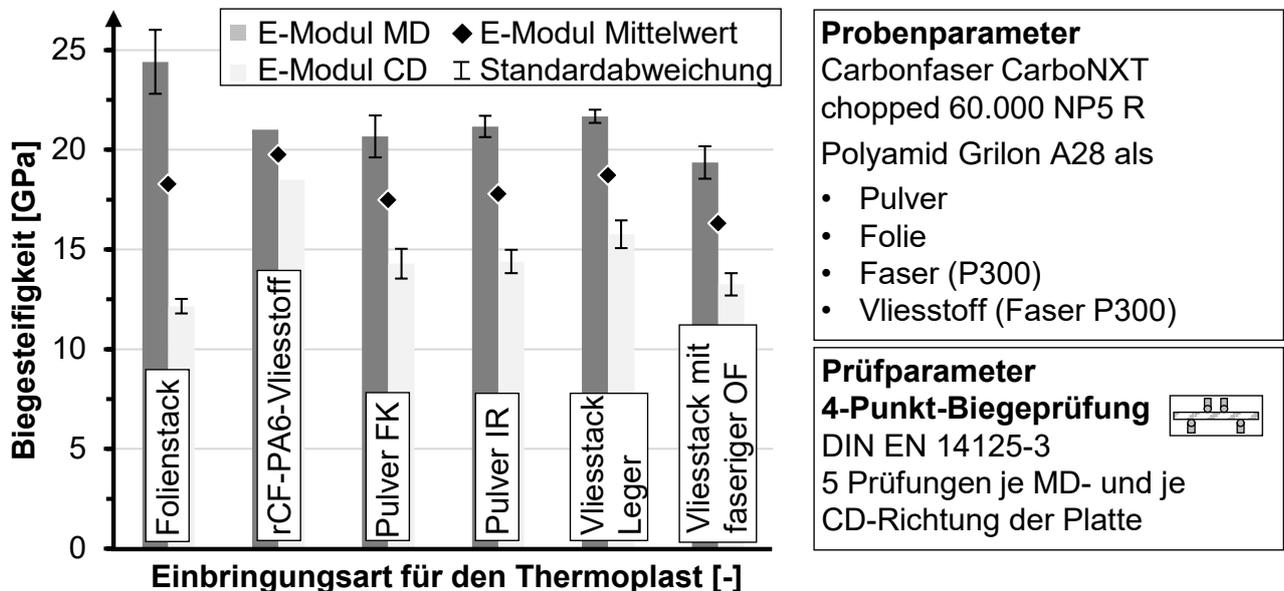


Abbildung 2.2.2.18: Biegesteifigkeit der Faserverbundplatten mit unterschiedlicher Einbringungsart der thermoplastischen Matrix (FK = Flachbettkaschiert, IR=Infrarot-teilkonsolidiert, OF=Oberfläche).

In die Gesamtbewertung der alternativen Imprägnierverfahren fließen zudem das Handling der Materialien, der Matrixverlust bei der Verarbeitung, die erreichte Konsolidierungsqualität und die Biegefestigkeit ein. Die Werte werden mit dem Referenzverfahren des Folienstackings abgeglichen.

Ein Wert  $\alpha_i$  wird dem jeweiligen Vergleich zugeordnet und die Summe nach Gleichung 2.1 gebildet. Ist die Gesamtbewertung  $G < 0$  stellt die Matrixeinbringungsart keine Alternative zum in der Industrie etablierten Folienstacking-Verfahren dar. Ist die Gesamtbewertung  $G > 0$  so weist die Einbringungsart Vorteile gegenüber dem Folienstacking auf.

Tabelle 2.2.2.11: Bewertungsschema zur Ermittlung der Gesamtbewertung

Bewertung	++	+	○	-	--
Wert $\alpha_i$ [-]	2	1	0	-1	-2

$$G = \sum \alpha_i \quad (2.1)$$

Tabelle 2.2.2.12: Gesamtfazit zur Bewertung der alternativen Thermoplasteinbringung

Bewertungskriterien	Folienstack (Referenz)	Pulver Flachbettka-schiert	Pulver Infrarot-teilkonsolidiert	Vliesstack Leger	Vliesstack mit offenporiger Oberfläche
Handling des Stacks	schlecht	++	++	++	+
Matrixverlust	gering	--	--	++	-
Konsolidierungsqualität	schlecht	+	+	++	+
Biegesteifigkeit <sub>Mittelwert</sub>	18,3 GPa	-	○	+	--
Biegefestigkeit <sub>MDFlor</sub>	443,6 MPa	--	-	○	-
<b>Gesamtbewertung G [-]</b>		<b>-2</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>-1</b>

Der im Leger hergestellte Vliesstack erreicht mit 7 Punkten den ersten Platz und weist deutliche Vorteile bei der Verarbeitbarkeit, dem Matrixverlust und der Konsolidierqualität auf. Das Pulverstreuen in Kombination mit einer Infrarot-Teilkonsolidierung stellt eine gleichwertige Alternative zum Folienstacking dar. Das Handling ist dabei deutlich verbessert, jedoch tritt eine große Menge Matrix aufgrund der geringeren Viskosität des Pulvers aus. Hierbei ist insbesondere der hohe Matrixverlust beim Verpressen durch das niedrig viskosere PA6-Pulver ein Nachteil, der durch entsprechende Wahl des Materials auch noch weiter verbessert werden kann. Die Konsolidierqualität übersteigt bei allen Einbringungsarten das Folienstacking-Verfahren. Die offene Vliesstoffoberfläche bewirkt, dass sich Luft einschließen einfach entweichen können. Dies ist auch bei geschlossener Oberfläche, wie den thermobondierten Vliesstoffen, die beim industriellen Vliesstack eingesetzt werden, zu beobachten. Mechanisch unterscheiden sich die Imprägnierverfahren kaum und diese sind mit Mischvliesstoffen aus der klassischen Vliesstoffherstellung vergleichbar.

### 2.2.3 Arbeitspaket: Unterschiedliche NF/TP/CF-Fasermischung

Das Ziel des AP ist es, verschiedene Fasermischungen und den Einfluss auf wichtige Vlies- und Verbundeigenschaften zu validieren. In systematischen Versuchen werden am ITA Vliesstoffe hergestellt. Variiert werden dabei die Mischungsverhältnisse der Komponenten rCF, TP und Naturfasern. Die Vliese dienen der Untersuchung von Orientierung und Faserschädigung. Dazu werden Probekörper für eine mechanische Charakterisierung am Fraunhofer IGCV hergestellt.

Die recycelten Carbonfasern sind vom Typ CarboNXT Chopped 60.000 NP5 R (VCF3x) der Firma CarboNXT GmbH, Wischhafen. Die Flachfasern (Verstärkungsfasern) sind vom Typ LinTex® XL 50 F der Firma Linum SCEA, ND Gravenchon, Frankreich, und die PP-Fasern vom Typ ASOTA FH100N\_2.2/ 50 (thermoplastische Matrix) stammen von der Firma IFG Asota GmbH, Linz, Österreich. Ein Überblick der wichtigsten Fasereigenschaften ist in Tabelle 2.2.3.1 dargestellt.

Tabelle 2.2.3.13: Fasereigenschaften der NF/CF/PP-Mischvliesstoffe.

Eigenschaft	Recycelte Carbonfasern (VCF3x)	Flachfasern (FLA_LIN)	Polypropylenfasern (PP_4%_ASO)
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,8	1,5	0,9
Zugsteifigkeit [GPa]	240,8	30	1,5
Zugfestigkeit [MPa]	3560	500	33
Bruchdehnung [%]	1,62	2	43,7
Länge [mm]	60	> 50	49,37
Durchmesser [µm]	6,95	100 - 150	18
Titer [dtex]	0,68	120 - 270	2,41
Temperaturbeständigkeit	Zersetzung ab 3500 °C	Zersetzung ab 230 °C	Schmelzpunkt 165 - 175 °C
Feuchteaufnahme [%]	0	10 - 11	0

Die PP-Fasern sind mit Maleinsäure als Haftvermittler versetzt, um die Faser-Matrix-Haftung zu verbessern. Um den Einfluss der Naturfasern zu untersuchen, werden Vliesstoffe mit unterschiedlichem Flachfaseranteil produziert. Insgesamt werden fünf Vliesstoffe mit variierenden Anteilen der recycelten Carbonfasern und Naturfasern hergestellt (Tabelle 2.2.3.2). Der Verstärkungsfaservolumenanteil (= rCF + NF) soll insgesamt 30 % betragen. Die Mischungsverhältnisse werden in Faservolumenprozent und nicht in Gewichtsprozent aufgeteilt, da der Faservolumengehalt eine gängige und wissenschaftlich sinnvollere Größe für den Vergleich der mechanischen Kennwerte bei FVK darstellt. Der exakte Faservolumengehalt der rCF-Naturfaser-Mischungen kann aufgrund des dreikomponentigen Verbundsystems nicht mit nach dem archimedischen Prinzip bestimmt werden. Daher wird der ideale Wert angenommen.

Tabelle 2.2.3.14: Mischungsanteile und theoretischer Faservolumengehalt der Varianten.

Bezeichnung der Varianten	Faservolumengehalt [%]		
	recycelte Carbonfasern	Flachfasern	Polypropylenfasern
Var0	30	0	70
Var1	20	10	70
Var2	15	15	70
Var3	10	20	70
Var4	0	30	70

Eine Referenzmischung ohne Naturfaseranteil (Var0) wird hergestellt. Durch stufenweise Erhöhung des Naturfaseranteils von 0 % auf 30 % kann dessen Einfluss untersucht werden. Die letzte Mischung (Var4) ist eine reine NF/PP-Mischung. Die Weiterverarbeitung der produzierten Vliesstoffe zu einem Verbundwerkstoff erfolgt mit dem Heißpressverfahren bei 190°C.

Je nach eingestellter Heiztemperatur sowie Heiz- und Kühlgeschwindigkeit der Presse ergeben sich Zyklen von etwa 60 Minuten für die Verbundherstellung. Zu Beginn wird die Presse mit einem niedrigeren Druck von 50 kN geschlossen. Der eigentliche Verarbeitungsdruck wird erst aufgebracht, wenn die Temperatur im Vliesstoffpaket über 190 °C erreicht hat. Zu diesem Zeitpunkt ist die PP-Matrix vollständig aufgeschmolzen. Das hat den Vorteil, dass Kraftspitzen in den Faserberührungspunkten vermieden werden und es zu einem homogenen Druckaufbau im Werkzeug kommt [Ode02]. Nachdem die Platte abgekühlt ist, kann sie dem Werkzeug entnommen werden. Die wichtigsten Parameter beim Pressen sind die Einstellung der Temperatur und des Drucks. Folgende Abbildung 2.2.3.1 veranschaulicht die Grenzen der Temperatur- und Druckeinstellung.

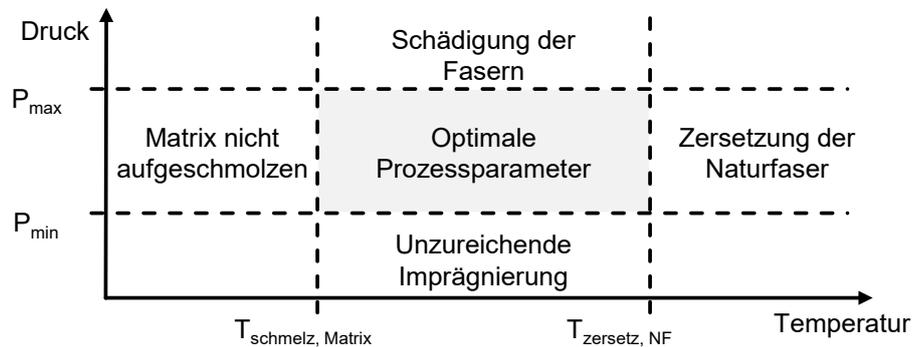


Abbildung 2.2.3.19: Grenzen der Prozessführung nach [Ode02].

Die thermische Zersetzung der Flachfasern beginnt ab 230 °C. Ein Festigkeitsverlust der Fasern tritt bereits ab 180 °C auf. In einem Vorversuch wies die Platte bei 180 °C noch trockene Stellen auf, weshalb die Temperatur bei allen Versuchen auf 190 °C eingestellt wird.

Tabelle 2.2.3.15: Auflistung der Prozessparameter für die Verarbeitung von Naturfasern/PP-Mischungen.

Variante	Heiztemperatur [°C]	Druck [bar]	Druck [kN]
Var0	190	60	735
Var1	190	50	613
Var2	190	40	490
Var3	190	30	368
Var4	190	20	245

Um einer Faserschädigung entgegenzuwirken und um für eine gute Imprägnierung zu sorgen, wird der Druck von 20 bis 60 bar variiert. Umso größer der Naturfaseranteil ist, desto weniger Druck wird aufgewendet. In Abbildung 2.2.3.2 sind Teile der konsolidierten Platten zu sehen.

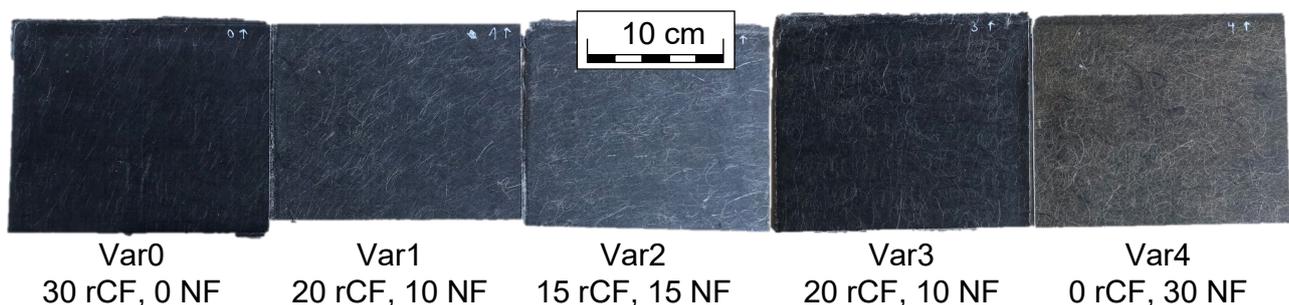


Abbildung 2.2.3.20: Vergleich der konsolidierten Platten in Abhängigkeit von dem Faservolumengehalt.

Ein deutlicher, farblicher Unterschied zwischen Var0 (= schwarz) und Var4 (= goldbraun) ist erkennbar. Optisch scheinen die Verbundplatten vollständig konsolidiert, sie weisen keine trockenen Stellen auf.

Abbildung 2.2.3.3 zeigt einen Überblick der Schlißbilder in  $CD_N$ . Der Rückgang des CF-Anteils ist sehr gut erkennbar. In Var4, der eigentlich reinen NF-Mischung, sind vereinzelt Carbonfasern zu erkennen. Optisch können keine großen Unterschiede zwischen  $MD_N$  und  $CD_N$  ausgemacht werden, weshalb die Schlißbilder nur in einer Richtung gezeigt werden.

Die Konsolidierung der Platten wird als gut bewertet, da in allen Variationen weder großen Poren noch Risse erkennbar sind. Vor allem Var0, die reine rCF-Mischung, ist sehr gut konsolidiert. Erst ab 200facher Vergrößerung können in den Schliffbildern ab Var1 vereinzelt Poren gefunden werden, diese sind jedoch höchstens 100 µm groß. Eine exemplarische Pore ist in Abbildung 2.2.3.4 rechts zu sehen.

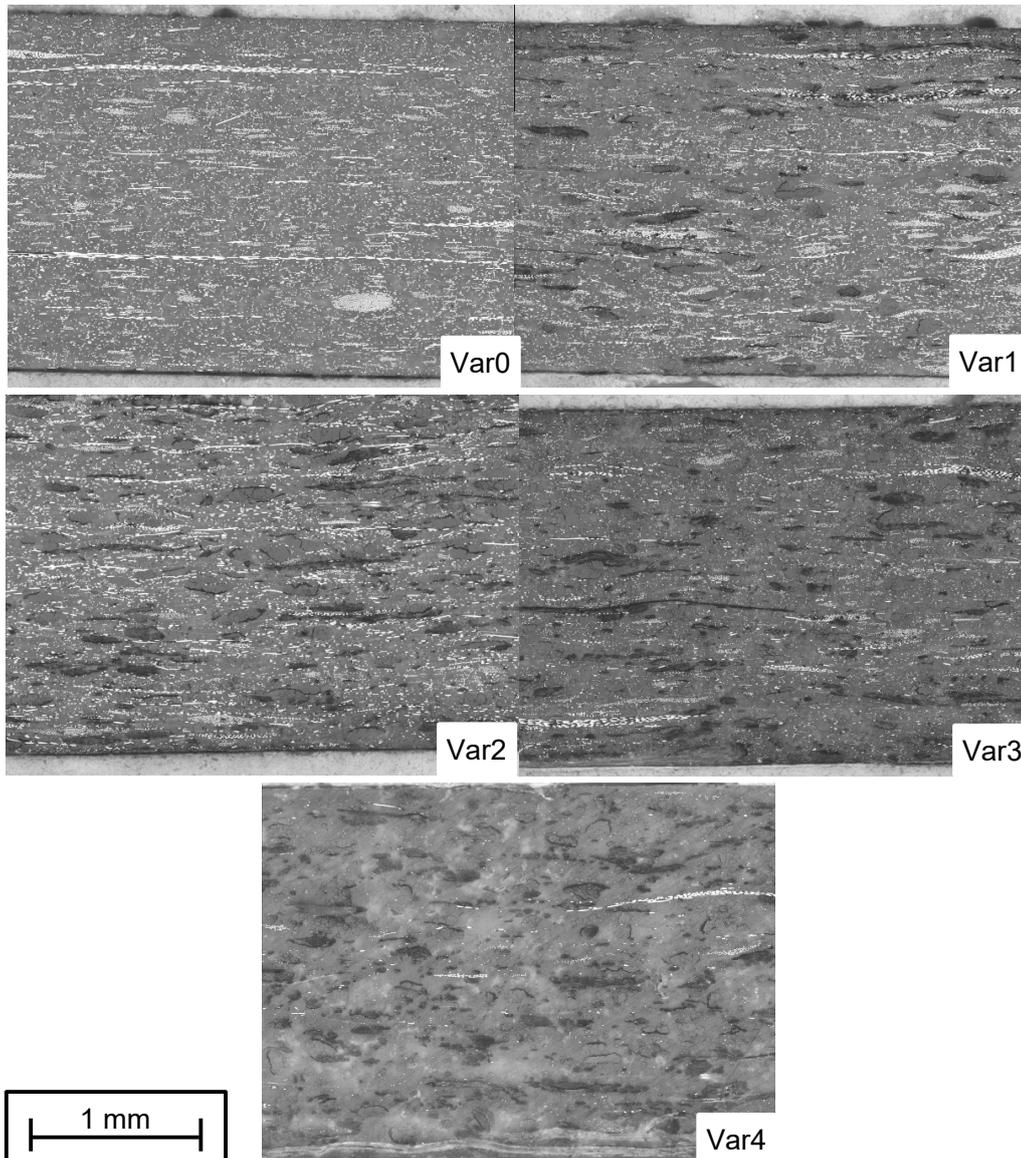


Abbildung 2.2.3.21: Vergleich der Konsolidierungsqualität unterschiedlicher Naturfaseranteile.

Matrixarme Bereiche treten mit steigendem Naturfaseranteil ab Var1 auf. Jedoch ist diese Fehlstelle selten. An diesen Stellen werden die Fasern in der Mitte eines Carbonfaser-Rovings nicht vollständig von der PP-Matrix benetzt. Dies kann durch einen zu geringen Druck beim Pressvorgang verursacht werden. Zusammenfassend wird die Konsolidierungsqualität aller Platten als gut bewertet.

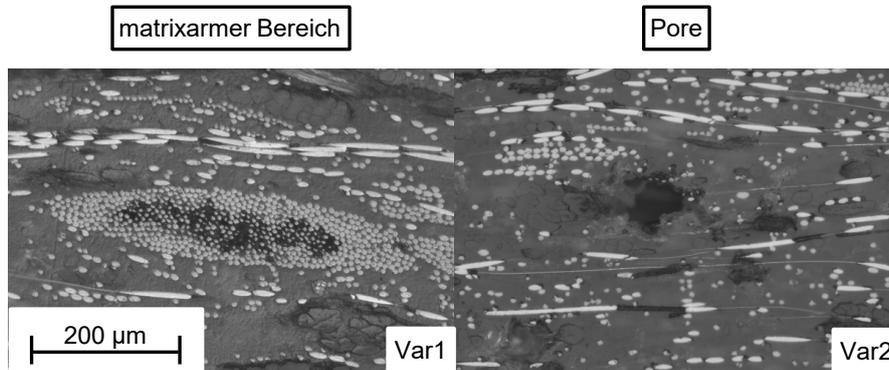


Abbildung 2.2.3.22: Matrixarmer Bereich und Pore - 200fache Vergrößerung.

Im Folgenden werden die mechanischen Kennwerte der Carbon-Flachs-PP-Faserverbundplatten analysiert. Zunächst werden die Werte des Biegemoduls genauer betrachtet (Abbildung 2.2.3.5).

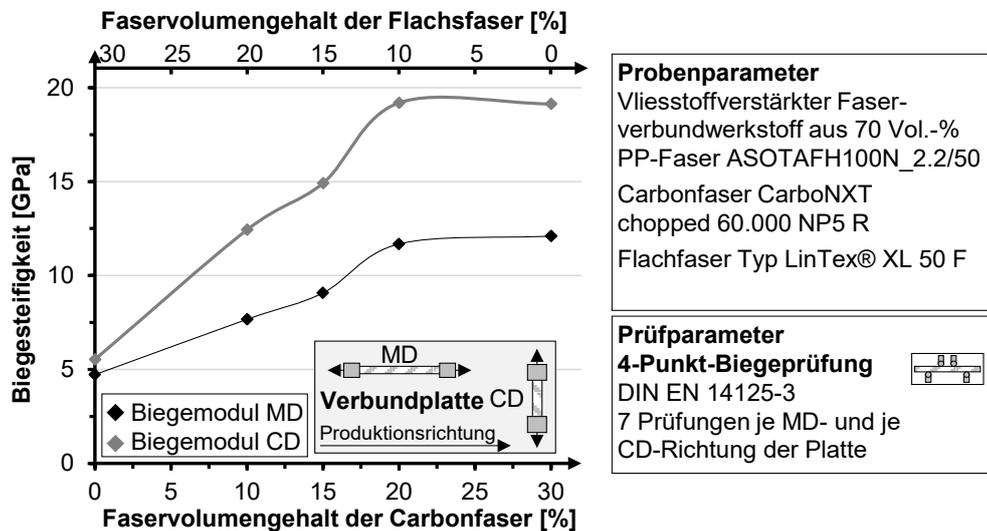


Abbildung 2.2.3.23: Biegesteifigkeit der Carbon-Flachs-PP-Faserverbundplatten.

Erwartungsgemäß sinkt der Biegemodul mit Substitution der Carbonfasern durch Naturfasern ab, da sie einen geringeren E-Modul als die Carbonfasern besitzen ( $NF = 30 \text{ GPa}$ ,  $rCF = 240 \text{ GPa}$ ). Auffällig sind die sehr ähnlichen Steifigkeiten bei Var0 und Var1. Der FVG von Var1 ist vermutlich höher, da bei der Vliesherstellung weniger Naturfasern abgesaugt werden. Des Weiteren kann argumentiert werden, dass die groben Naturfasern die feinen Carbonfasern besser im Vliesstoff halten. Bei Zugabe von geringen Mengen Naturfasern (Var0  $\rightarrow$  Var1) führt dieser positive Effekt zu einem Biegemodul, der dem der reinen CF-Mischung ähnlich ist. In Abbildung 2.2.3.6 sind die Biegefestigkeiten aufgetragen.

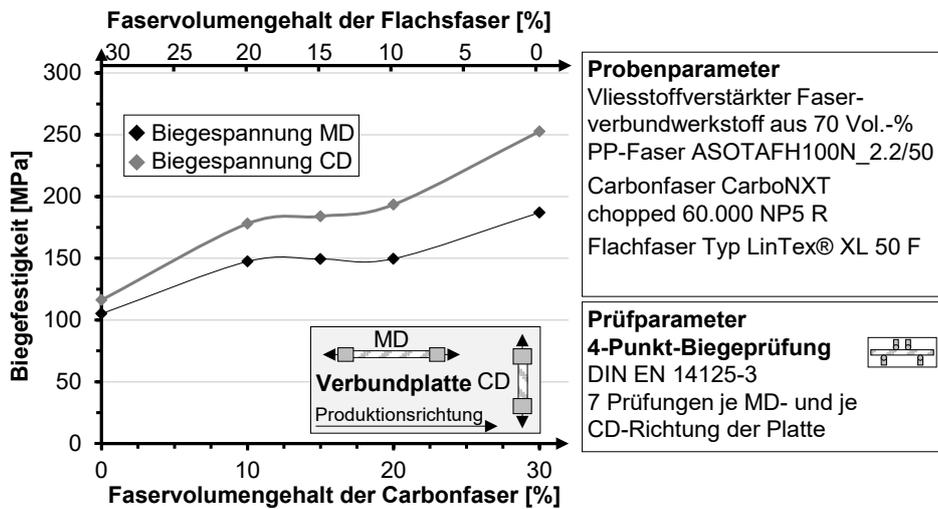


Abbildung 2.2.3.24: Biegefestigkeit der Carbon-Flachs-PP-Faserverbundplatten.

Die Biegefestigkeiten sinken mit zunehmendem Flachsfaserteil ab. Bei den Carbon-Flachs-PP-Fasermischungen (Var1 bis Var3) fällt auf, dass die Festigkeiten fast gleichbleibend sind. Da Biegeversuche durchgeführt werden, ist eine Betrachtung von sowohl Druck- als auch Zugspannungen notwendig. Der Probekörper wird an der Oberseite auf Druck und an der Unterseite auf Zug beansprucht. Die Druckfestigkeiten von Fasern steigen mit größerem Durchmesser an, da sie weniger knickgefährdet sind [RHB16]. Da Flachsfasern einen wesentlich größeren Durchmesser als Carbonfasern besitzen ( $150 \mu\text{m} \gg 7 \mu\text{m}$ ), könnte dies zu einem besseren Biegeverhalten auf der Druckseite des Verbundes führen. Im Gegensatz dazu ist die Zugfestigkeit der Carbonfasern wesentlich höher als die der Flachsfasern ( $4000 \text{ MPa} \gg 500 \text{ MPa}$ ). Durch das unterschiedliche Verhalten der Fasern auf Zug- und Druckseite des Probekörpers sind vermutlich die gleichbleibenden Biegefestigkeiten von Var1 bis Var3 zu erklären. Der Rückgang der Zugfestigkeit aufgrund des geringeren Carbonfaseranteils wird vermutlich durch den höheren Knickwiderstand der Naturfasern teilweise kompensiert. Allerdings kann aufgrund der Mischung und Zersetzung der Naturfasern bei der FVG-Bestimmung kein exakter FVG bestimmt werden. Somit unterliegen diese Ergebnisse auch einer großen Unschärfe.

Folgende Abbildung 2.2.3.7 zeigt das MD/CD-Verhältnis des Biegemoduls und der Biegefestigkeit der verschiedenen Fasermischungen. Zur Berechnung werden die Werte aus Abbildung 2.2.3.5 und Abbildung 2.2.3.6 herangezogen.

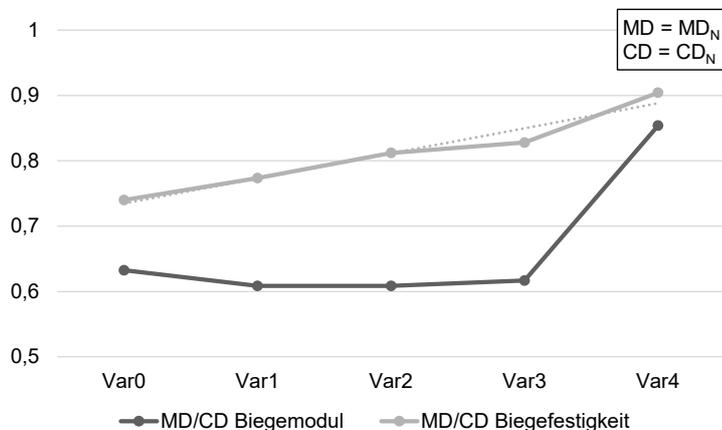


Abbildung 2.2.3.25: MD/CD-Verhältnis der Carbon-Flachs-PP-Faserverbundplatten.

Wie zu erwarten, sind alle Werte des MD/CD-Verhältnisses kleiner als 1. Die Vliesstoffe weisen eine stärkere Faserausrichtung in der CD-Richtung auf. Die hochorientierten Flore der Krempel werden durch den Leger, um  $90^\circ$  gedreht und damit auch die Faserausrichtung. Je näher das MD/CD-Verhältnis an der Zahl 1 liegt, desto isotroper sind die mechanischen Eigenschaften der konsolidierten Vliesstoffe. In Abbildung 2.2.3.7 ist erkennbar, dass die Isotropie des Verbundes mit steigendem Naturfaseranteil erhöht. Die Kardierleistung der Krempel wird durch die groben Fasern eingeschränkt und die Fasern werden weniger ausgerichtet.

Bei der Biegefestigkeit steigt das MD/CD-Verhältnis beziehungsweise sinkt der Unterschied zwischen MD und CD annähernd linear. Beide Werte der reinen NF-Mischung (Var4) sind im Vergleich zu den anderen Varianten die höchsten. Somit ist diese Mischung am wenigsten orientiert. Daher kann die Aussage getroffen werden, dass mit der Zugabe von Carbonfasern die Orientierung im Vliesstoff steigt.

Ein weiterer Aspekt ist die Untersuchung des Bruchdehnungsverhaltens der Faserverbunde. Die Bruchdehnung der Carbonfaser liegt bei etwa 1,8 % und die der Flachfaser bei 2 %. Die Dehnung des Verbundes ist dominiert durch die Bruchdehnung der Verstärkungsfasern. In Abbildung 2.2.3.8 sind die Dehnungswerte bei den maximalen Biegespannungen der Proben aufgetragen.

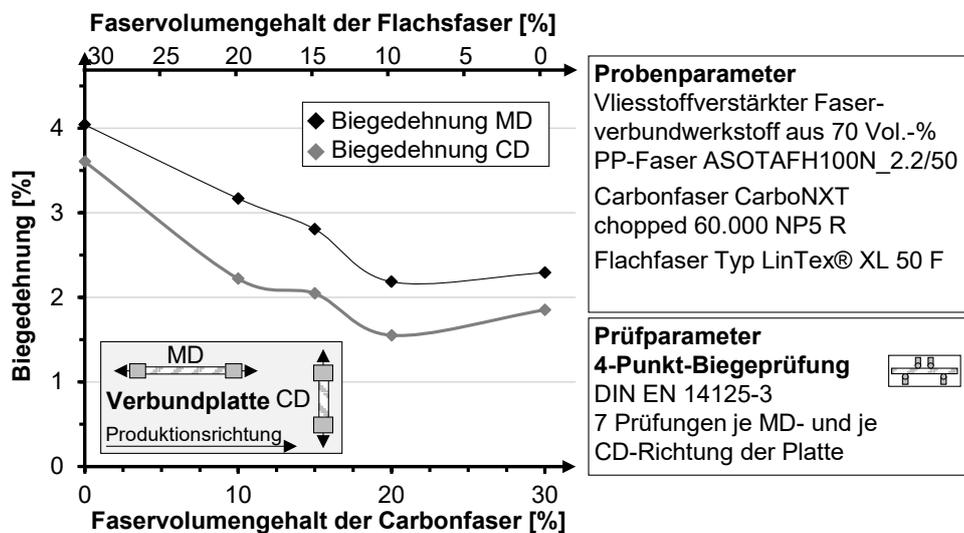


Abbildung 2.2.3.26: Biegedehnung der der Carbon-Flachs-PP-Faserverbundplatten.

Die Dehnung nimmt mit steigendem Naturfaseranteil zu. In CD-Richtung sind die Dehnungen geringer als in der MD-Richtung. Die Probekörper werden elastischer, da Naturfasern eine höhere Bruchspannung aufweisen. Zudem brechen Naturfasern nicht spröde. In MD-Richtung sind die Proben dehnbarer, da entlang dieser Richtung weniger Verstärkungsfasern verlaufen

Zusammenfassend bilden die Naturfasern in geringen Mengen eine sinnvolle Ergänzung von Carbon-Thermoplast-Fasermischungen. Durch die Zugabe kleiner NF-Anteile werden ähnliche Steifigkeiten erzielt. Die günstigere NF weisen hier ein Potential zur Kostenreduktion auf. Zudem verbessern sich die Dehnungseigenschaften und der Widerstand gegen Druckbelastungen steigt. Diese Kennwerte werden jedoch durch eine geringere Faserausrichtung erkauft. Für den Einsatz der Naturfasern ist deshalb die Endanwendung von entscheidender Bedeutung.

## 2.2.4 Arbeitspaket: Untersuchung zu PET-Fasern

Polyethylenterephthalat (PET) ist als Matrixmaterial für faserverstärkte Kunststoffe bisher nur wenig verbreitet. PET bietet jedoch eine breite Variabilität in ihren Eigenschaften, insbesondere in Faserform. Außerdem ist es sehr günstig und es gibt eine hohe Verfügbarkeit von Sekundär PET auf dem Markt. Aus diesem Grund wird im Projekt die Eignung von PET als Matrixwerkstoff detailliert untersucht. Das ITA wählt dazu verschiedene PET-Fasern mit unterschiedlichen textilen Eigenschaften, wie der Faserfeinheit, der Feinheit und der Kräuselung aus. Vier PET-Fasern werden vom assoziierten Partner Trevira GmbH, Bobingen, für die Versuchsdurchführung zur Verfügung gestellt. Die Fasereigenschaften sind in Tabelle 2.2.4.1 aufgeführt. Die Ergebnisse dieses Kapitels sind in der Veröffentlichung [Man21] veröffentlicht worden.

Tabelle 2.2.4.16: Parameter der zur Verfügung gestellten PET-Fasern

Fasereigenschaften	PET-60-6,7-4	PET-60-3,3-5	PET-60-3,3-6	PET-38-1,7-6
Faserlänge [mm]	60	60	60	38
Faserfeinheit [dtex]	6,7	3,3	3,3	1,7
Kräuselung [B/cm]	4	5	6	6

Die Versuchsdurchführung erfolgt mit der Kompaktvliesanlage der Firma Dilo Systems GmbH am ITA. Auf der einen Seite wird der Einfluss der PET-Fasereigenschaften auf das Verarbeitungsverhalten untersucht und auf der anderen Seite die mechanischen Eigenschaften und Potentiale der PET-Fasern als Matrixkomponente analysiert.

### Einfluss auf das Verarbeitungsverhalten

Für die Vliesstoffherstellung sind eine hohe Produktivität, eine geringe Faserschädigung und eine hohe Flächen-gleichmäßigkeit von entscheidender Bedeutung. Diese Parameter werden anhand der Anzahl der Florabrisse bei der Produktion, der mittleren Carbonfaserlänge sowie dem Variationskoeffizienten des Flächengewichts bewertet. Fünf Fasermischungen werden für die Untersuchung des Verarbeitungseinflusses zu Vliesstoff verarbeitet. Vier Mischungen mit den einzelnen PET-Fasern und zusätzlich eine reine rCF-Mischung. Der Gewichtsanteil von Matrix- und Verstärkungsfaser wird auf 10 Gew.-% Matrix zu 90 Gew.-% Carbonfasern festgelegt. 10 Gew.-% sind nach Einschätzung von Experten die Mindestmenge, um einen Einfluss auf das Verarbeitungsverhalten der Mischungen durch die PET-Fasern festzustellen. Tabelle 2.2.4.2 listet die verwendeten Fasermischungen und deren Bezeichnung auf.

Tabelle 2.2.4.17: Fasermischungen, Mengenverhältnisse und eingesetzte Fasermasse der PET-Versuchsreihe.

Bezeichnung	Anteil TP:CF [wt%]	Gew. PET-Fasern [kg]	Gewicht rCF [kg]
90 wt.%rCF_10wt%PET-60-6,7-4*	10:90	1,5	13,5
90 wt.%rCF_10wt%PET-60-3,3-5*	10:90	1,5	13,5
90 wt.%rCF_10wt%PET-60-3,3-5*	10:90	1,5	13,5
90 wt.%rCF_10wt%PET-38-1,7-6*	10:90	1,5	13,5
100 wt.%rCF	0:100	0	15

\*TP-Faserbezeichnung: Polymertyp – Faserlänge [mm] – Feinheit [dtex] – Kräuselung [Bögen/cm]

### Bewertung der Produktivität in Abhängigkeit von den PET-Fasereigenschaften

Im Zuge der Produktivitätsmessung werden Florabrisse während der Versuchsdurchführung gezählt. Die Florabrisse sind eine wichtige Messgröße, da diese oft Auslöser für Produktionsstopps sind. Ein Florabritt ist durch eine lokale Dünnstelle im Flor charakterisiert, wodurch der zusammenhängende Flor an dieser Stelle aufreißt. Die Anlage wird an einem anspruchsvollen Arbeitspunkt gefahren, sodass eine Bewertung über die Florabrisse möglich wird, die im Optimalfall bei der Verarbeitung gar nicht auftreten. Tabelle 4.1 listet die Florabrisse bei der Verarbeitung der Fasermasse auf.

Tabelle 2.2.4.18: Anzahl gezählter halber und ganzer Florabrisse in allen Teilversuchen

Parameter	Recycelte Carbonfaser in Mischung mit			
	PET-60-6,7-4	PET-60-3,3-5	PET-60-3,3-6	PET-38-1,7-6
Eingesetzte PET-Faser				
Anzahl gezählter Florabrisse	11	5	15	30

TP-Faserbezeichnung: Polymertyp – Faserlänge [mm] – Feinheit [dtex] – Kräuselung [Bögen/cm]

Die Messung zeigt, dass beim Einsatz der PET-60-3,3-5 mit 11 Abrissen während der Produktion die geringste Auswirkung auf die Produktion zu beobachten ist. Die PET-38-1,7-6 hingegen bewirkt mit 30 Florabrissen sogar eine höhere Fehlerquote als die Verarbeitung reiner Carbonfasern mit 28 Abrissen aufweist. Die Untersuchungen

zeigen, dass die kombinierte Erhöhung der Faserlänge und -feinheit bei gleichzeitiger Verringerung der Kräuselung eine Verbesserung der Produktivität bewirkt.

### Bewertung der Carbonfaserlänge in Abhängigkeit von den PET-Fasereigenschaften

Die mittlere Carbonfaserlänge wird nach DIN 53808-1 im Zwei-Pinzetten-Verfahren ermittelt. Dazu werden jeweils 200 Messungen an den Carbonfasern im Flor durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Stapelschaudiagramm in Abbildung 2.2.4.1 dargestellt. Die Stapelschaulinie gibt den prozentualen Anteil der Fasern an, die kürzer beziehungsweise länger als eine abgelesene Faserlänge sind. Die Verarbeitung weist auf die Carbonfaserlänge immer einen negativen Effekt auf.

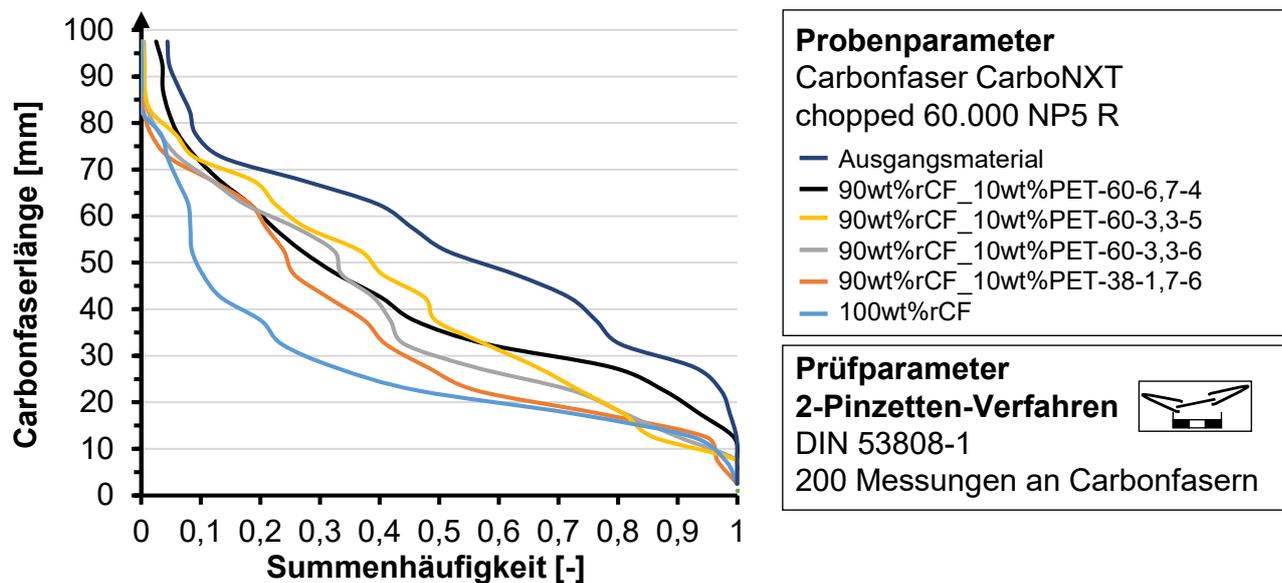


Abbildung 2.2.4.27: Stapelschauliniendiagramm der Faserlänge von Carbonfasern nach der Verarbeitung gemessen am Flor.

Wie in der Abbildung ersichtlich wird, ist bereits der Zusatz von nur 10 Gew.-% thermoplastischen Fasern für die Schonung der Carbonfasern von enormer Relevanz. Die mittlere Carbonfaserlängen sind in Tabelle 2.2.4.4 aufgelistet.

Tabelle 2.2.4.19: Ergebnisse der Faserlängenmessung, mittlere Faserlängen je Teilversuch.

Bezeichnung der Fasermischung	Carbonfaserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]	Variationskoeffizient [%]
Ausgangsmaterial	51,1	18,3	36
90wt%rCF_10wt%PET-60-6,7-4	39,7	19,9	50
90wt%rCF_10wt%PET-60-3,3-5	38,8	22,7	59
90wt%rCF_10wt%PET-60-3,3-6	35,4	21,5	61
90wt%rCF_10wt%PET-38-1,7-6	32,1	21,1	66
100wt%rCF	24,9	16,8	68

Der Vergleich der Faserparameter zeigt, dass die Erhöhung der Feinheit und Länge sowie die Verringerung der Kräuselung zu einer Abnahme der Faserschädigung führen. Die Fasermischung mit der PET-60-6,7-4 weist mit 39,7 mm die höchste mittlere Carbonfaserlänge auf und zudem den geringsten Variationskoeffizienten. Die kurze

und feine PET-38-1,7-6 führt hingegen zu einer Reduktion der Faserlänge auf 32,1 mm bei einem Variationskoeffizienten von 66 %.

### Bewertung der Flächengewichtsgleichmäßigkeit in Abhängigkeit von den PET-Fasereigenschaften

Die Entnahme von Proben aus dem Vliesstoff zur Bestimmung der Abweichung der Flächenmasse erfolgt nach der Norm DIN EN 29073-1. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.2.4.6 gezeigt.

Tabelle 2.2.4.20: Ergebnisse der Flächengewichtsgleichmäßigkeit.

Parameter	Recycelte Carbonfaser in Mischung mit				
	PET-60-6,7-4	PET-60-3,3-5	PET-60-3,3-6	PET-38-1,7-6	
Eingesetzte PET-Faser					
Mittleres Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	241,0	238,5	239,0	238,1	244,7
Standardabweichung [g/m <sup>2</sup> ]	29,8	35,8	30,2	44,5	35,7
Variationskoeffizient [%]	12,4	15,0	12,7	18,7	14,6

Auffällig ist vor allem die Konstanz des mittleren Flächengewichts, hier ergibt sich eine maximale Abweichung von lediglich ca. 6,5 g/m<sup>2</sup>. Allerdings weicht dieses bei den vier Versuchen mit zusätzlichen TP-Fasern ca. 10g/m<sup>2</sup> vom Zielwert 250 g/m<sup>2</sup> ab. Der Versuch mit reinen Carbonfasern weist eine andere Lagenanzahl auf. Der Variationskoeffizient muss deshalb auf die Lagenanzahl n normiert werden, die einen vergleichmäßigen Effekt auf das Flächengewicht nach der Gleichung 2.2 bewirkt.

$$CV_n = \sqrt{n} \times CV_v \quad (2.2)$$

Die normierten Variationskoeffizienten sind in Tabelle 2.2.4.6 dargestellt.

Tabelle 2.2.4.21: Variationskoeffizient CVz einer einzelnen Florlage

Parameter	Recycelte Carbonfaser in Mischung mit				
	PET-60-6,7-4	PET-60-3,3-5	PET-60-3,3-6	PET-38-1,7-6	
Eingesetzte PET-Faser					
Florlagenzahl	20	20	20	20	36
Normierter Variationskoeffizient CV <sub>n</sub> [%]	55,3	67,1	56,6	83,5	87,6

Der Variationskoeffizient der reinen Carbonfasermischung liegt demnach am höchsten. Die beste Flächengewichtsgleichmäßigkeit weist die Faser PET-60-6,7-4 auf. Eine grobe, lange PET-Faser mit geringer Kräuselung ist für eine hohe Gleichmäßigkeit im Vliesstoff förderlich.

### Bewertung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den PET-Fasereigenschaften

Die optimalen Eigenschaften aus dem vorhergehenden Kapitel für die PET-Fasern sind eine große Faserlänge von 60 mm eine grobe Feinheit von 6,7 dtex und eine geringe Kräuselung von 4 Bögen/cm. PET-Fasern und PA6-Fasern mit diesen günstigen Fasereigenschaften werden eingesetzt um Vliesstoffe herzustellen. Die Vliesstoffe werden zu Faserverbundplatten verarbeitet und die Fasereigenschaften und der Einfluss des Materials werden miteinander verglichen.

Bei den verwendeten Materialien handelt es sich um pyrolysierte und geschnittene Carbonfasern der Firma ELG Carbon Fibre Ltd., Coseley (Vereinigtes Königreich), zwei PA6 Fasern (P300 und P301) der Firma EMS-CHEMIE AG, Domat/Ems (Schweiz) und PET Fasern (T290) der Firma Trevira GmbH, Bobingen. Drei Vliesstoffe werden auf diese Weise produziert. rCF-P300, rCF-P301 und rCF-PET. Ein Faservolumengehalt (FVG) von jeweils 30 % rCF wird angestrebt (vgl. Tabelle 2.2.4.7).

Tabelle 2.2.4.22: Mischungen und deren angestrebter Faservolumengehalt.

Bezeichnung	Kurzform	Faservolumengehalt [%]	
		Recycelte Carbonfaser	Matrixfaser
30wt%PCF_70wt%PA6_P300	PCF-P300	30	70
30wt%PCF_70wt%PA6_P301	PCF-P301	30	70
36wt%PCF_66wt%PET_T290	PCF-T290	30	70

Die Herstellung des Faserverbundwerkstoffes am Fraunhofer IGCV beinhaltet das Aufschmelzen der thermoplastischen Matrix unter Druck und das Konsolidieren zu einer 2 mm dünnen Platte. Die Zykluszeit beträgt ca. 80 Minuten. Vor dem Pressvorgang werden die quadratischen Vlieszuschnitte im Ofen für mind. 1 h bei 80°C getrocknet. Das Presswerkzeug wird auf 70 °C temperiert. 12 Lagen zugeschnittener Vliesstoff wird in das Presswerkzeug eingelegt und ein Thermolement für die exakte Temperaturführung angeschlossen. Das Presswerkzeug schließt mit 4 bar Druck und die Form wird mit 10 K/min auf 285 °C aufgeheizt. Bei Erreichen der Solltemperatur von 285°C wird der Druck auf 50 bar erhöht und die Abkühlung des Presswerkzeugs startet mit 10 K/min. Ist die Werkzeugtemperatur auf 70°C gesunken, öffnet das Presswerkzeug die konsolidierte Platte wird entnommen. Der Faservolumengehalt wird in Anlehnung an DIN CEN/TS 15405 nach dem archimedischen Prinzip bestimmt und die Ergebnisse sind in Tabelle 2.2.4.8 aufgelistet.

Tabelle 2.2.4.23: Ergebnisse der Messungen des FVG.

Bezeichnung	Mittelwert des FVG [%]	Standardabweichung [%]
30wt%PCF_70wt%PA6_P300	31,1	2,0
30wt%PCF_70wt%PA6_P301	32,8	1,9
36wt%PCF_66wt%PET_T290	29,9	1,9

Die mechanischen Eigenschaften werden im 4-Punkt-Biegeversuch bestimmt. Die Ergebnisse der Biegesteifigkeit und Biegespannung sind in den Abbildung 2.2.4.2 und Abbildung 2.2.4.3 dargestellt.

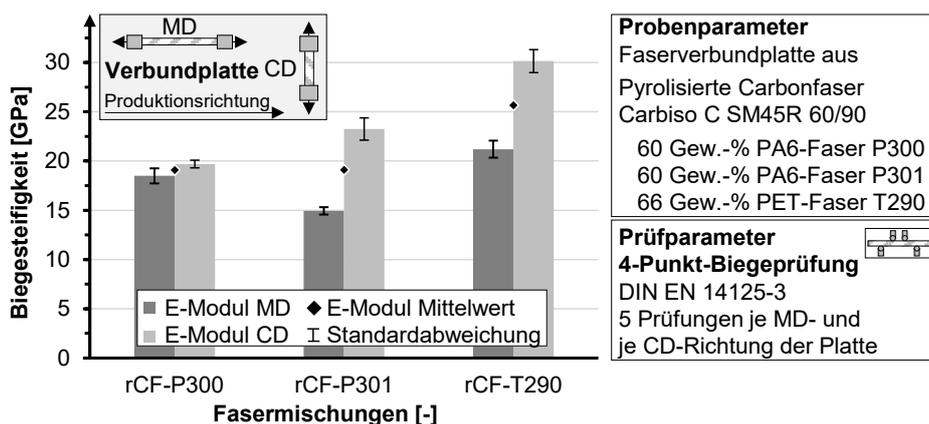


Abbildung 2.2.4.28: Biegesteifigkeit in Abhängigkeit von den Faser- und Matrixeigenschaften.

Die mittlere Biegesteifigkeit ändert sich durch die Fasereigenschaften nicht und verbleibt auf dem gleichen Niveau. Die Faserausrichtung steigt hingegen deutlich an, wie die hohen Werte der rCF-P301-Faserverbundplatte und der rCF-T290-Verbundplatte in CD-Richtung belegen. Die Ausrichtung ist zudem ähnlich hoch, sodass davon ausgegangen wird, dass die textilen Eigenschaften der Fasern zu einer besseren Ausrichtung beitragen. Der Einsatz der PET-Matrix erhöht die Steifigkeit um 34,4 % auf im Mittel 25,7 GPa.

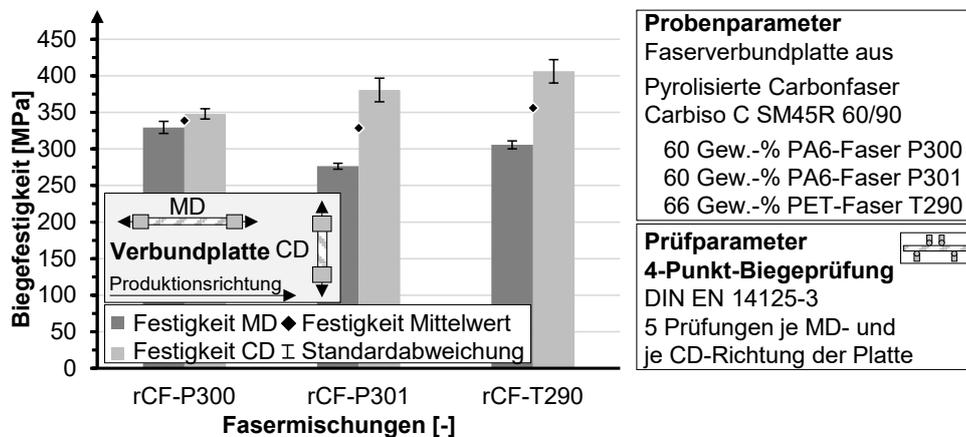


Abbildung 2.2.4.29: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von den Faser- und Matrixeigenschaften.

Die guten mechanischen Eigenschaften der PET-Matrix könnten auf die verbesserte Faser-Matrix Haftung zurückzuführen sein. Vor allem ist jedoch die Steifigkeit der PET-Matrix deutlich höher, als die der PA6-Matrix. Diese hohen Eigenschaften beeinflussen auch die makroskopischen Eigenschaften der Composite-Struktur. Weiterhin ist vor allem auf die geringere Bruchdehnung von PET hinzuweisen, welche ebenfalls eine Wirkung im Composite hat und die Bruchdehnung der Vliesstoffe reduziert. Die gemittelte Biegefestigkeit der PET-Materialien weist einen Wert von 355 MPa auf gegenüber von 336 MPa der P300-PA6 Probe. Die Steifigkeit kann von 19,5 GPa auf 25,6 GPa angehoben werden.

### Einsatz der sekundär PET-Fasern

Als Randuntersuchung wird im Projekt CaRiNA auch der Einfluss von rPET auf die mechanischen Eigenschaften mit untersucht. Dazu wird von der Firma Johns Manville in Bobingen anfallendes PET Pulver aus der Produktion gesammelt und ans Fraunhofer IGCV geliefert. Dieses Material ist in unterschiedlichen Größenverteilungen vorhanden und wird händisch von den Mitarbeitern des Fraunhofer auf die Vlieszuschnitte gestreut. Für einen ersten Versuch wird das feinste Pulver genommen und auf ein 250 g/m<sup>2</sup> Vlies gestreut. Dieses Vorgehen wird auf 4 Lagen händisch wiederholt, welche anschließend mit den Standardparametern für PET-Fasern am Fraunhofer IGCV verpresst werden. Die so hergestellten Platten werden am Fraunhofer IGCV geprüft. Die Kennwerte sind in Abbildung 2.2.4.4 zu dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass das rPET leicht niedrigere Werte als das PET aus Neufasern aufweist. So ist die Festigkeit in 70 bzw. 100 MPa niedriger als bei der Neuware. Gründe hierfür sind die ungleiche Korngrößenverteilung, der händische Auftrag sowie eine größere Anzahl an Fehlern bei der Infiltration. Dies wird auch nochmal über die größere Standardabweichung von 5% bis 12% deutlich. Die nachträglich durchgeführten Schliffbilder (Abbildung 2.2.4.5) hingegen zeigen eine sehr gute Imprägnierung an der Stelle des Schliffes.

Die Steifigkeiten zeigen fast identische Werte zwischen rPET und vPET. Die Werte für rPET liegen sogar leicht über denen von PET. Dies zeigt, dass die generelle Anbindung und mechanische Wechselwirkung auch mit rPET gegeben ist. Somit müssen in einem nächsten Schritt vor allem die Infiltrierbarkeit und die Qualität der Platten verbessert werden. Weitere Versuche mit unterschiedlichen FVG und Vliesen sollten durchgeführt werden, um die Eignung von rPET noch besser zu evaluieren. Durch die große Verfügbarkeit, den günstigen Rohstoff und den Aspekt der Ressourcenschonung ist dies jedoch eine sehr vielversprechende Materialkombination.

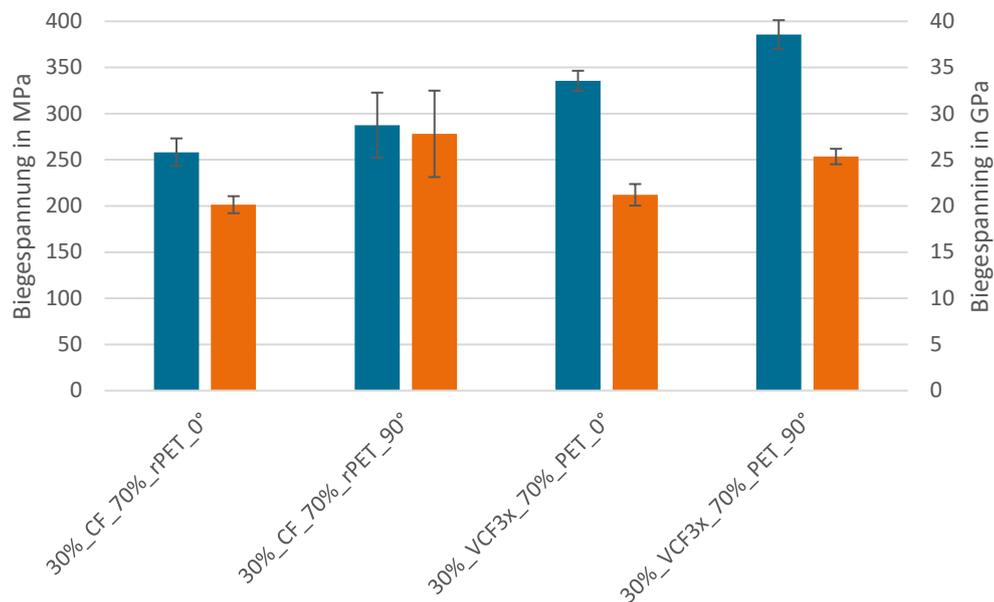


Abbildung 2.2.4.30: Biegeeigenschaften von 30% vPET und 30% rPET im Vergleich.

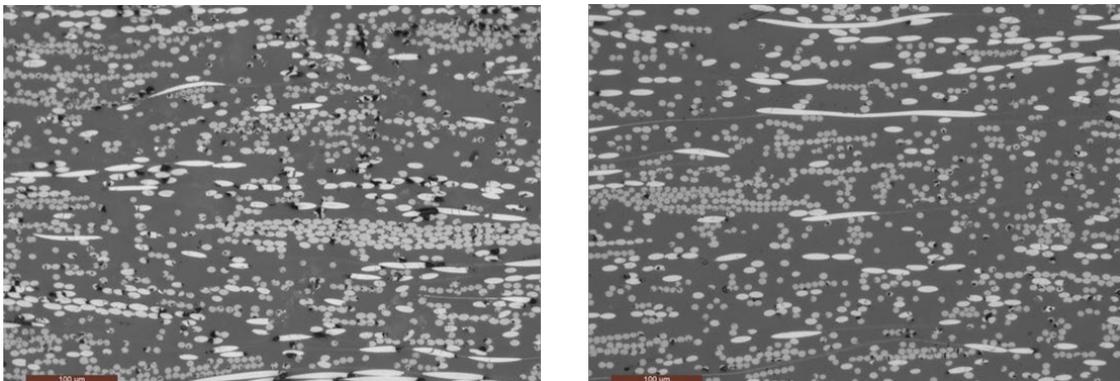


Abbildung 2.2.4.31: Schliffbilder von 30% rPET in 0° (links) und in 90° (rechts)..

### Fazit zum Einsatz der PET-Fasern

PET-Fasern bilden eine mechanisch starke Alternative zu den wesentlich verbreiteteren PA6-Fasern. Die Steifigkeitswerte erreichen aufgrund der reduzierten Dehnung der Matrix ca. 34 % höhere Werte und liegen im Maximum bei 30,2 GPa in der höher ausgerichteten CD-Richtung. Das Material weist damit ein hohes Leichtbaupotential auf. Zudem ist die Wahl der textilen Fasereigenschaften ein entscheidendes Kriterium für die Faserausrichtung, die Flächengewichtsgleichmäßigkeit, die Produktivität und die Faserlänge. Lange, Grobe und wenig gekräuselte Thermoplastfasern erreichen bei der Verarbeitung eine Verbesserung dieser vier Merkmale. Auch der Einsatz von sekundärem PET zeigt ein überraschend hohes Potential.

## 2.3 Arbeitspaket: Nassvliesherstellung

Ziel des Projektes CaRinA ist die Beschaffung, Bewertung und mechanische Charakterisierung von kommerziellen Nassvliesen welche in strukturellen Leichtbauanwendungen eingesetzt werden können. Dazu wird vom Fraunhofer IGCV eine Recherche über mögliche Produzenten von Nassvliesen aus recycelten Carbonfasern durchgeführt. Hierbei wird international nach Produzenten für Nassvliese gesucht und mehrere technische Workshops durchgeführt. In der gewünschten Menge und mit den definierten Spezifikationen ist es schwierig vergleichbare kommerzielle Vliese zu beschaffen. Vor allem die Verarbeitbarkeit von Faserlängenverteilungen stellt die Nassvlieshersteller vor große Probleme. Schlussendlich wird sich für zwei Hersteller ausgesprochen, Awa Paper & Technological Company Inc., Japan, und Marubeni Europe plc (über MCAM).

Es werden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt. Zum einen werden zwei Vliese aus nahezu 100% (r)CF bestellt und zum anderen ein Mischvlies aus (r)CF und PA6. Die Carbonfaser hierfür stammt aus dem Zuschnitt von Rovings und kann somit nicht als wirklich Recyclingfaser benannt werden. Dem Wunsch recycelte Fasern zu verwenden können die meisten Hersteller nicht ohne größeren Aufwände nachkommen, wodurch sich ein zukünftiger Forschungsaufwand abzeichnet. Als Grammatur wird 100 g/m<sup>2</sup> gewählt, welche im Komfortbereich der Nassvliesherstellung liegt. Hierbei kann ergänzt werden, dass Nassvliese bis etwa 200 g/m<sup>2</sup> gut hergestellt werden können aber auch mit sehr geringen Flächengewichten. Zum Vergleich mit den Trockenvliesen wird ein FVG von 30% angestrebt. Beide Varianten besitzen einen 5% Anteil an Binder (PVOH), welcher die Fasern leicht verklebt. Dies stellt die Stabilität und den Zusammenhang der kurzen Fasern während des Transportes und der Verarbeitung sicher, kann aber auch negative Auswirkungen auf die Infiltration, die Anbindung und die Drapierbarkeit haben.

Tabelle 2.3.1: Auflistung der im Projekt beschafften Nassvliese und deren Zusammensetzung.

	Lieferant	CF-Anteil (vol.-%)	Faserlänge	CF-Fasertyp	TP - Faser	Binderanteil	Grammatur
NV1	Awa Paper	100%	6 mm	ELG Carbiso	-	5%	100 g/m <sup>2</sup>
NV2	Awa Paper	30%	6 mm	ELG Carbiso	PA6 (Toray)	5%	100 g/m <sup>2</sup>
NV3	Marubeni	100%	6 mm	T-700 Faser	-	8%	100 g/m <sup>2</sup>



Abbildung 2.3.1: Kommerzielle Nassvliese. Links: 30% PA6/rCF Nassvlies der Firma AWA Paper, rechts: 100% rCF Nassvlies der Firma Marubeni.

Die bestellten Nassvliese werden in die Versuchsmatrix mit aufgenommen und im Arbeitspaket 3 „Weiterverarbeitung“ in verschiedenen Prozessen mit bewertet. Hierbei werden die 100% Varianten mit Nasspress- und RTM-Verfahren und die Mischvliese mit Heißpressverfahren verarbeitet. Weiterhin werden beide Materialtypen für die Bewertung der Drapierbarkeit mit einbezogen.

## 2.4 Arbeitspaket: Prozessbewertung

Tabelle 2.4.1: Gegenüberstellung erzielter Ergebnisse zur ursprünglichen Planung für das Arbeitspaket 2.4

Arbeitspaket	Ursprüngliche geplante Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse
2.4	Bewertung der Prozesse der Halbzeugherstellung. Gegenüberstellung zentraler Parameter, Produktion von Weiterverarbeitungsvliesstoff.	Benchmark zwischen Tenowo und ITA Krempelvliesstoffanlage. Validierung der erarbeiteten Modelle an industriellen Anlagen. Prüfung der Übertragbarkeit der Modelle. Einschätzung zu Stärken und Schwächen der untersuchten Vliesstoffverfahren. Produktion von Weiterverarbeitungsvliesstoffen (siehe Tabelle 1.3.2)

Wichtige Faktoren der Krempel und deren Einfluss auf Composites-Eigenschaften sind untersucht und geben Aufschluss über die Schlüsselparameter des Prozesses. Aufgrund der Vielzahl der Einstellparameter innerhalb der Krempel sind die Einstellungen für jeden herzustellenden Vliesstoff individuell neu zu bewerten und anhand der Ergebnisse einzustellen. Mithilfe der untersuchten Parameter ist die Krempelanlagen für die Mischungen aus Verschnittcarbonfasern, pyrolysierten Carbonfasern und Carbon-Thermoplast-Fasermischungen einstellbar. Die Qualität der Einstellung wird in einem abschließenden Benchmark-Versuch zwischen den Krempelvliesstoffanlagen von Tenowo und am ITA validiert.

### Benchmark Tenowo – ITA und Validierung der ITA Modelle

Ein Vergleich zwischen den Anlagen von Tenowo und des ITA wird durchgeführt. Dabei werden auch die erstellten Modelle aus dem Arbeitspaket 2.1.1 validiert. Dazu erfolgt die Verarbeitung einer Fasermischung aus 40 Gew.-% VCF1x\_eng vom Typ CarboNXT Chopped 60.000 NP5 R (VCF3x) der Firma CarboNXT GmbH, Wischhafen, und 60 Gew.-% PA6 vom Typ P300 der Firma EMS-CHEMIE AG, Domat/Ems (Schweiz). Die Fasermischung wird am ITA vorbereitet, sodass der Einfluss der unterschiedlichen Faservorbereitungen negiert wird. Zudem werden Parameter aus den Modellen für die definierte Anlageneinstellung am ITA berechnet. Zwei Arbeitspunkte für je einen isotropen und für einen ausgerichteten Vliesstoff werden erzeugt. Die Parameter zur Herstellung eines orientierten Vliesstoffes sind in Tabelle 2.4.2 dargestellt.

Tabelle 2.4.2: Maschineneinstellungen zur Herstellung eines orientierten Vliesstoffes.

Maschineneinstellungen	Modellwert	Maschineneinstellung für einen orientierten Vliesstoff
Öffnungszyklus	-1	Einfacher Öffnungszyklus
Florgewicht [g/m <sup>2</sup> ]	1	20 g/m <sup>2</sup>
Abstand Arbeiter zu Tambour [mm]	-1	0,6 mm zwischen Arbeiter und Tambour
Tambourgeschwindigkeit [m/min]	-0,36	800 m/min
Arbeitergeschwindigkeit [m/min]	1	50 m/min
Wendergeschwindigkeit [m/min]	1	150 m/min
Verzug des CV1-Systems [%]	-1	Profilierungssystem entfällt: CV1 auf 0
Einstiche pro cm <sup>2</sup> [ES/cm <sup>2</sup> ]	1	120 Einstiche/cm <sup>2</sup> , einseitige Vernadelung
Verzug der Nadelmaschine [%]	-1	35 %

Die Parameter zur Herstellung eines isotropen Vliesstoffes sind in Tabelle 2.4.3 dargestellt.

Tabelle 2.4.3: Maschineneinstellungen zur Herstellung eines isotropen Vliesstoffes

Maschineneinstellungen	Modellwert	Maschineneinstellung für einen isotropen Vliesstoff
Öffnungszyklus	1	Doppelter Öffnungszyklus
Florgewicht [g/m <sup>2</sup> ]	0,11	16 g/m <sup>2</sup>
Abstand Arbeiter zu Tambour [mm]	-1	0,6 mm zwischen Arbeiter und Tambour
Tambourgeschwindigkeit [m/min]	-1	700 m/min
Arbeitergeschwindigkeit [m/min]	-1	15 m /min
Wendergeschwindigkeit [m/min]	-1	70 m/min
Verzug des CV1-Systems [%]	-1	Profilierungssystem entfällt: CV1 auf 0
Einstiche pro cm <sup>2</sup> [ES/cm <sup>2</sup> ]	0,22	90 Einstiche/cm <sup>2</sup> , einseitige Vernadelung
Verzug der Nadelmaschine [%]	1	100 %

Die Vliesstoffe werden anhand der Vorgaben bei den Projektpartnern hergestellt und anschließend am Fraunhofer IGCV zu Faserverbundwerkstoffplatten verpresst. Die Zykluszeit beträgt ca. 80 Minuten. Vor dem Pressvorgang werden die quadratischen Vlieszuschnitte im Ofen für mind. 1 h bei 80°C getrocknet. Das Presswerkzeug wird auf 70 °C temperiert. 12 Lagen zugeschnittener Vliesstoff wird in das Presswerkzeug eingelegt und ein Thermoelemente für die exakte Temperaturführung angeschlossen. Das Presswerkzeug schließt mit 4 bar Druck und die Form wird mit 10 K/min auf 285 °C aufgeheizt. Bei Erreichen der Solltemperatur von 285°C wird der Druck auf 50 bar erhöht und die Abkühlung des Presswerkzeugs startet mit 10 K/min. Ist die Werkzeugtemperatur auf 70°C gesunken, öffnet das Presswerkzeug die konsolidierte Platte wird entnommen. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 2.4.1 dargestellt. Die isotropen Einstellungen der Vliesstofflinien erzielen bei Tenowo ein isotropes Vliesstoff und damit eine hohe Übereinstimmung mit dem Modell. Das MD/CD-Verhältnis der Vliesstoffe liegt bei 1,1. Insbesondere die Werte in 45°- und 135°-Richtung bestätigen die sehr gleichmäßige Faserausrichtung in alle Raumrichtungen. Die mittlere Steifigkeit liegt bei 20,2 GPa. Der isotrope Vliesstoff, der auf der Anlage des ITA produziert wird erreicht ein MD/CD-Verhältnis von 0,82. Die Faserausrichtung ist hier deutlich in die MD-Richtung verschoben. Auch hier belegen die Steifigkeiten in 45°- und 135°-Richtung, dass insgesamt ein relativ isotroper Vliesstoff hergestellt wird. Die Steifigkeit beträgt im Mittel 21,3 GPa.

Die Produktion eines isotropen Vliesstoffes geht bei beiden Anlagen mit einem Verlust an Steifigkeit einher. Die Einstellungen sind für die Faserausrichtung aggressiver gewählt und belasten die Carbonfasern mehr. Die Steifigkeitsreduktion wird daher auf die verringerte Faserlänge zurückgeführt. Die MD/CD-Werte der Vliesstoffe, die mit der Anlage von Tenowo verarbeitet werden, steigen auf 1,2. Von einem orientierten Vliesstoff würden jedoch höhere MD/CD-Verhältnisse von mindestens 1,5 oder höher erwartet werden. Zudem sind die Biegesteifigkeiten in 45°- und 135°-Richtung ebenfalls auf demselben Steifigkeitsniveau von ca. 15,6 GP.

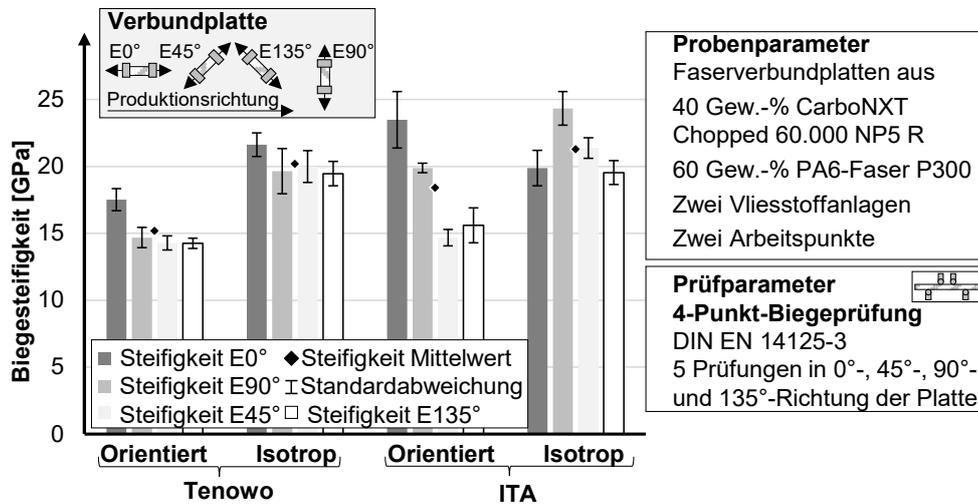


Abbildung 2.4.1: Benchmark zwischen der Vliesstofflinie von Tenowo und ITA anhand zweier Arbeitspunkte.

Die orientierten Vliesstoffe, die auf der Anlage des ITA produziert werden erreichen einen MD/CD-Wert von 1,18. Auch dieser Wert ist zu niedrig, um von einem orientierten Vliesstoff zu sprechen. Jedoch sinken die Biegesteifigkeiten in 45°- und 135°-Richtung deutlich ab. Die Ursache wird in stark ausgerichteten Carbonfasern in 0°- und 90°-Richtung vermutet. In 45°- und 135°-Richtung liegen weniger Fasern. Diesbezüglich gelingt eine Faserausrichtung.

Die Einstellung von isotropen Vliesstoffen gelingt auf beiden Anlagen und ist direkt übertragbar. Die Einstellung zur Produktion eines ausgerichteten Vliesstoffes funktioniert nicht. Hierbei wird auf der Anlage von Tenowo lediglich eine hohe Faserschädigung in das Material eingebracht, wie die sinkenden Steifigkeitswerte belegen. Auch bei der Anlage des ITA, die nach der Modellerstellung im weiteren Projektverlauf verschiedene Umbauten durchlaufen hat, gelingt keine eindeutige Orientierung der Carbonfaservliesstoffe. Aufgrund der geringen Biegesteifigkeiten in 45°- und 135°-Richtung ist jedoch von einer höheren Faserausrichtung gegenüber den isotropen Einstellungen auszugehen.

Für eine abschließende Bewertung der Übertragbarkeit der Einstellungen sind weitere Versuche mit unterschiedlichen Parametervariationen notwendig.

## Fazit zum Hauptarbeitspaket 2

Allgemein lässt sich für die Verarbeitung von Carbonfasern auf Krempelanlagen zum jetzigen Zeitpunkt festhalten, dass die Schwankungen der Flächengewichtsgleichmäßigkeit und des Faservolumengehalts für industrielle Zwecke oft zu hoch sind. Flächengewichte schwanken um ca. 10 % und der Faservolumengehalt um ca. 5 %. Die Verbesserung der Durchmischung und die Erhöhung der Gleichmäßigkeit sind wichtige Kriterien, die in weiteren Arbeiten gelöst werden müssen.

Die Einbringung von thermoplastischen Materialien funktioniert. Die Einbringungsarten unterscheiden sich bei den mechanischen Kennwerten kaum.

Der Einsatz von PET-Fasern zeigt deutliche Potentiale der Werkstoffkombination. Vergleichsweise hohe Steifigkeiten können mit dem PET-Material realisiert werden. Dazu kann gezeigt werden, dass die Fasereigenschaften eine weitere wichtige Einflussgröße auf die Herstellung von rCF-Vliesstoffen darstellt. Mit den Eigenschaften lassen sich die Faserausrichtung und das Laufverhalten der Krempelanlage beeinflussen.



### 3 HAUPTARBEITSPAKET 3: WEITERVERARBEITUNG

Im Hauptarbeitspaket 3 war die enge Kooperation des ITA mit dem Partner Borscheid und Wenig vorgesehen. Nach dessen Ausscheiden aus dem Projekt wird der Arbeitsplan angepasst. Die Anpassungen gestalten sich wie im Folgenden beschrieben:

Geänderter Arbeitsplan und Aufwand des ITA in HAP3 & HAP6. Arbeiten, die ganz übernommen werden, sind **fett** markiert. Arbeiten, die teilweise übernommen werden und sich etwas weniger anwendungsspezifisch gestalten, sind **grau** markiert. Inhalte, die entfallen, sind durchgestrichen dargestellt.

Tabelle 3.4: Gegenüberstellung erzielter Ergebnisse zur ursprünglichen Planung für das Arbeitspaket

HAP	Angepasster Arbeitsinhalt	Erzielte Ergebnisse
3.2.1	Untersuchungen hinsichtlich der Maschinenparameter (Temperatur, Druck, Verweilzeit) und dem Handling <b>Ermittlung grundlegender Daten zu Verdichtung, Abkühl- und Konsolidierungsverhalten in elementaren Pressversuchen (einfache Geometrie, ohne Umspritzen) als Datenbasis.</b>	Untersuchungen durchgeführt und Prozessfenster erfolgreich identifiziert.
3.2.4	<del>Handling vorgeheizter Organovliesstoffe mit Einlegen in horizontales Werkzeug</del> <del>Handling vorgeheizter Organovliesstoffe mit Einlegen (fixieren) in vertikales Werkzeug</del> Ermittlung geeigneter Spritzgussparameter <del>Lokal unterschiedliche Temperierung des Werkzeugs</del> Bewertung der Verstärkungswirkung durch Einleger aus rCF-Organovlies, ohne Herstellung von Demonstratorprobekörpern und Prüfung der mech. Eigenschaften	Vorgeheizte Orgnaovliesstoffe werden anhand der erarbeiteten Prozessroute vorkonsolidiert, gehandelt und verpresst. Mit geeigneten Spritzgussparametern werden Strukturen an ein generisches Bauteil angespritzt. Damit werden grundlegenden Möglichkeiten des Thermoformens und Hinterspritzens aufgezeigt.

#### 3.1 Arbeitspaket: Duromere Verarbeitung

##### 3.1.1 Arbeitspaket: Nasspressen

Das Nasspressen ist ein gut geeignetes Verfahren für die Infiltration von rCF-Vliesstoffen mit einer Duromeren Matrix. Im Gegensatz zum klassischen RTM Verfahren, wird hier das Vlies in Z-Richtung infiltriert, nachdem das Harz auf der Oberfläche verteilt wird. Der Harzauftrag kann sowohl manuell wie auch automatisiert erfolgen. Durch die hohe Permeabilität der Vliesstoffe in z-Richtung kann das niederviskose duromere Harz das Vlies gut tränken und somit eine gute Qualität erreicht werden. Durch eine Infiltration in Dickenrichtung werden auch nur geringe Zugkräfte in x-y-Richtung auf die Vliesstoffe übertragen, so dass eine Verschiebung der Fasern oder ein mögliches Zerreißen des Vlieses unwahrscheinlicher ist. Aus diesen Gründen wird das Nasspressen für das Projekt CaRinA mit ausgewählt. Vor allem die Partner SGL Carbon und Fraunhofer IGCV forschen innerhalb des Projektes auf diesem Bereich. Zusätzlich werden Materialien vom assoziierten Partner Huntsman zur Verfügung gestellt sowie auch der Huntsman interne DFCM Prozess analysiert. Als Standardharz wird sich auf das Huntsman Araldite® LY3585 / Aradur® 3475 Harz verständigt. Das Harz besitzt eine Viskosität von 6500 -9000 mPas bei 25°C, der Härter 5-40 mPas, bestimmt unter ISO 12058-1. Das Harz wird in den Teilen 100:21 (nach Gewicht) miteinander vermischt.

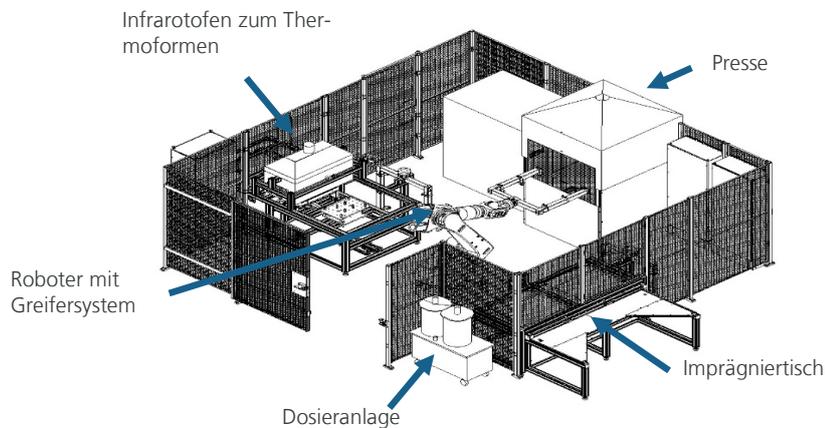


Abbildung 3.1.1.1: Automatisierte Nasspresszelle bei der SGL Carbon in Meitingen.

Erste Voruntersuchungen zum Nasspressen werden bei der SGL Carbon in Meitingen durchgeführt. Es wird eine Zieldicke von 2 mm für die Platten angestrebt, da diese Platten später beim Fraunhofer IGCV geprüft werden sollen. Um dies zu erreichen werden 4 bis 5 Lagen des Vliesstoffes vorbereitet. Als Vliesstoff wird sowohl das 100% Vlies des ITA, Tenowo sowie auch von ELG verwendet. Die Vliestypen sind 1, 2, 6 und 15. Der Harzauftrag erfolgt auf 2 Stacks, welche anschließend mit einem Roboter übereinander gestapelt werden und gemeinsam in die Presse eingelegt werden. Als Trennmittel wird die Chemikalie von Chemtrend mit dem Namen Chemlease R&B EZ genutzt. Als Aushärtedauer wird 2 min und als Pressendruck 250 bar eingestellt. Das Werkzeug wird auf 130°C beheizt. Im nächsten Schritt werden die Materialien für den Material- und Prozessvergleich infiltriert und anschließend am Fraunhofer IGCV zur Probekörperherstellung vorbereitet.

### Anlagenlayout und Hardware

Bei der Anlage handelt es sich um eine multifunktionale Roboterzelle, die neben dem Nasspressen auch für das Umformen von thermoplastischen Materialien verwendet werden kann. Hierfür ist, wie in Abbildung 3.1.1.1 zu sehen, ein Infrarotofen integriert. Für die in AP 3.1.1 durchgeführten Versuche werden allerdings nur die Dosieranlage, der Imprägniertisch, der Roboter mit Greifersystem und die Presse verwendet. Den Mittelpunkt der Anlage bildet ein Industrieroboter der zentral angeordnet ist und somit die gesamte Anlage bedienen kann. Die Dosieranlage kann die Komponente A (Harz) als auch die Komponente B (Härter) unterschiedlich vorwärmen und fördert die voreingestellten Mengen der einzelnen Komponenten zum Dosierkopf. Das Erwärmen hat eine Verringerung der Matrixviskosität zur Folge, was einen positiven Einfluss auf die Durchtränkung des Vlieses hat. Das Mischungsverhältnis ist frei einstellbar. Der Imprägniertisch (Abbildung 3.1.1.2) ist linear verschiebbar und ermöglicht das manuelle Stapeln der zu imprägnierenden Lagen außerhalb des Sicherheitszauns. Um einen zweischichtigen Matrixauftrag durchzuführen, kann der Materialstapel (engl. Stack) geteilt und auf die dafür vorgesehenen Blechauflagen positioniert werden.



Abbildung 3.1.1.2: Imprägniertisch für den Harzauftrag bei der SGL Carbon in Meitingen.

Der Dosierkopf, wird vom Roboter geführt und ist mit den zwei Behältern der Dosieranlage verbunden. Die zwei Komponenten werden zum Dosierkopf gefördert und durch eine Mischdüse auf den vorbereiteten Stack aufgetragen. Der Dosierkopf, wird vom Roboter geführt und ist mit den zwei Behältern der Dosieranlage verbunden. Die zwei Komponenten werden zum Dosierkopf gefördert und durch eine Mischdüse auf den vorbereiteten Stack aufgetragen. Das Greifersystem, ist eine Eigenkonstruktion und arbeitet mit Hilfe von pneumatischen Greifern, um die mit der Matrix getränkten Vlies-Stacks anzuheben, zu stapeln, zu transportieren und in die Presse zu legen.

Mit der Oberkolbenpresse der Firma Langzauner (Abbildung 3.1.1.3) sind Schließdrücke bis zu 1370 kN möglich. Die Schließgeschwindigkeit ist frei zwischen 3 mm/s und 70 mm/s steuerbar. Die gesamte Pressenfläche beträgt 800 mm x 600 mm. Die maximale Öffnungsweite der Presse beträgt 500 mm. Die beiden Pressflächen können mit einem Thermoöl bis zu 280°C erhitzt werden. Über dieses Heizsystem werden die an die Pressenflächen montierten Nasspress- und Thermoformwerkzeuge beheizt.



Abbildung 3.1.1.3: Langzauner Presse bei der SGL Carbon in Meitingen.

### Nasspressversuche - Plattenwerkzeug

Folgende Parameter und Einstellungen (Tabelle 3.1.1.1) werden auf Basis der oben beschriebenen Vorversuche als Grundlage für alle weiteren Nasspressversuche festgelegt. Zusätzlich zu den Platten mit Standardlagenaufbau (FVG = 30 %, Dicke = 2 mm), wird für jedes Material eine Platte mit einem höheren und einem niedrigeren FVG hergestellt. Um einen hohen FVG zu erzielen, wird eine zusätzliche Lage Vlies mit verpresst. Für einen niedrigeren FVG werden die Abstandhalter von 2 mm auf 4 mm erhöht. Aus den 2 mm-Platten werden Prüfkörper zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften hergestellt. Die dickeren 4 mm-Platten dienen allein der Untersuchung der Prozessierbarkeit dieser Vliese.

Tabelle 3.1.1.1: Steckbrief der Parameter zur Herstellung von Nasspressplatten von SGL Carbon.

	Standard	Hoher FVG	Niedriger FVG
Harzsystem		Huntsman XB3582	
Härter		Huntsman Aradur AD 3475	
Externes Trennmittel		Huntsman - Mould Release QZ 66	
Temperatur Harz		80 °C	
Temperatur Härter		Raumtemperatur	
Zuschnitte		550 x 550 mm	
Angestrebter FVG	30 %	>30 %	<30 %
SOLL-Gewicht trocken	330 g	>330 g	<330 g
Stacking		Geteilter Lagenaufbau und Harzauftrag	
Eingestellte Pressentemperatur		130 °C	
Tatsächliche Werkzeugtemperatur		120 °C	
SOLL-Dicke = Maß Abstandhalter	2 mm	2 mm	4 mm
Einzustellender Pressendruck		250 bar	
Resultierender Druck auf Fläche		Ca. 32 bar	
Aushärtedauer		3 min	

Folgende Materialien werden für diese Nasspressversuche verwendet:

Hersteller	Materialbezeichnung	Faser-Typ	Versuchsnummer
Tenowo	Zetacomp Probe 5746 (#2)	Verschnitt	D-1.x
ITA	Vliestyp 1 (#1)	Verschnitt	D-2.x
ELG	Carbiso M IM56L-250 (#15)	Pyro-AHD	D-3.x
ITA	Vliestyp 6 (#6)	Pyrolysiert	D-4.x

Nach dem Zuschneiden der Vliesrollen, werden alle Lagen einzeln gewogen. Das gemessene Gewicht wird auf einen Quadratmeter hochgerechnet und die Schwankungen der Flächengewichte im folgenden Diagramm (Abbildung 3.1.1.4) dargestellt. Im Diagramm sind zusätzlich die Mittelwerte der einzelnen Vliestypen als gestrichelte Linien eingezeichnet.

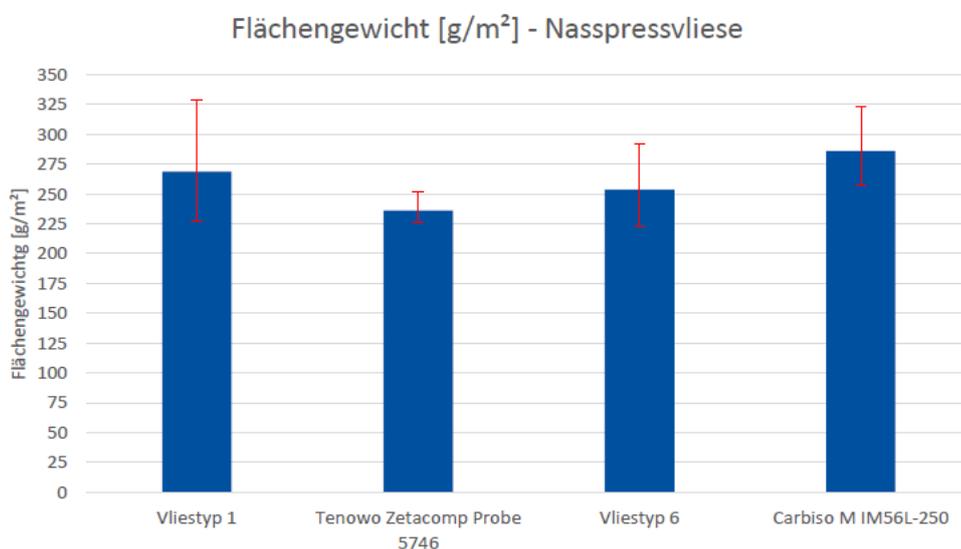


Abbildung 3.1.1.4: Flächengewichts der Vliese für die Nasspressversuche der SGL Carbon.

Es ist bei allen Vliestypen (mit Ausnahme von Vliestyp 2) eine hohe Schwankung des Flächengewichts innerhalb einer Rolle zu erkennen. Die numerische Auswertung der Flächengewichte ist in Tabelle 3.1.2 detaillierter aufgelistet. Am stärksten schwankt das Gewicht bei Vliestyp 1. Hier beträgt der relative Fehler bezogen auf den Mittelwert 22,3 %.

Tabelle 3.1.1.2: Abweichung der Flächengewichte der Vliestoffe für der Nasspressversuche.

Material	Mittelwert	Min. Wert	Max. Wert	Abs Fehler	Rel. Fehler
Vliestyp 1	268,6 g/m <sup>2</sup>	227,8 g/m <sup>2</sup>	328,6 g/m <sup>2</sup>	60,0 g/m <sup>2</sup>	22,3 %
Zetacomp Probe 5746	235,8 g/m <sup>2</sup>	226,4 g/m <sup>2</sup>	252,2 g/m <sup>2</sup>	16,6 g/m <sup>2</sup>	7,0 %
Vliestyp 6	253,6 g/m <sup>2</sup>	223,1 g/m <sup>2</sup>	291,9 g/m <sup>2</sup>	38,3 g/m <sup>2</sup>	15,1 %
Carbiso M IM56L-250	286,1 g/m <sup>2</sup>	256,9 g/m <sup>2</sup>	323,0 g/m <sup>2</sup>	36,9 g/m <sup>2</sup>	12,9 %

Insgesamt werden 23 Prüfplatten mit den rCF-Vliesen nassgepresst. Die Eckdaten und Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 3.1.1.3 zusammengefasst. Das beste Resultat liefert das Material „Zetacomp Probe 5746“ der Firma Tenowo. Mit diesen Vliesen werden 4 Nasspressplatten (D-1.1 – D-1.4) mit den Standardparametern erfolgreich hergestellt und die angestrebten 2 mm erreicht. Allein das angestrebte Fasergewicht von 330 g muss auf 348 – 363 g erhöht werden. Dieses Fasergewicht ergibt bei einer Fläche von 550 mm x 550 mm ein Stack-Flächengewicht von 1150 – 1200 g/m<sup>2</sup>. Bei den ersten zwei Versuchen mit den 4 mm – Abstandhaltern (D-1.5 + D-1.6) werden die Fasern der Vliese durch den Harzfluss beim Pressvorgang Pressvorgang (Abbildung 3.1.1.5). Es sind deutliche Reinharzbereiche zu erkennen.

Tabelle 3.1.1.3: Versuchsmatrix der Nasspressversuche mit Auswertung.

Material	Versuchsbezeichnung	SOLL-Gewicht	IST-Gewicht	SOLL-Dicke	IST-Dicke	iO / niO
Tenowo - Zetacomp Probe 5746	D-1.1 – D.1.4	330 g	358 g	2,00 mm	2,09 mm	100 %
	D-1.5 + D-1.6	330 g	362 g	4,00 mm	3,51 mm	0 %
	D.1.7 – D-1.9	330 g	355 g	4,00 mm	3,80 mm	67 %
ITA - Vliestyp 1	D-2.1 + D-2.2	330 g	329 g	2,00 mm	2,22 mm	50 %
	D-2.3	>330 g	412 g	2,00 mm	2,50 mm	0 %
	D-2.4	330 g	330 g	4,00 mm	3,58 mm	0 %
ELG - Carbiso M IM56L-250	D-3.1 + D-3.2	330 g	336 g	2,00 mm	2,25 mm	0 %
	D-3.3	>330 g	446 g	2,00 mm	2,88 mm	0 %
	D-3.4 + D-3.5	330 g	358 g	4,00 mm	3,60 mm	0 %
ITA - Vliestyp 3	D-4.1 + D-4.2	330 g	303 g	2,00 mm	2,25 mm	0 %
	D-4.3	>330 g	385 g	2,00 mm	2,77 mm	0 %
	D-4.4	330 g	299 g	4,00 mm	3,55 mm	0 %

Um zu überprüfen, ob dieses Ausschusskriterium am Prozess oder am Material liegt, stellt Tenowo eine weitere Rolle des gleichen Materials mit denselben Parametern her und die Versuche werden zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt (D-1.7 – D-1.9). Bei diesen Platten können keine Reinharzbereiche festgestellt werden. Lediglich eine einzelne Platte fiel zu dünn aus. Bei den anderen drei Materialien wird die gewünschte Bauteildicke bei keinem Pressprogramm erreicht.

Nach den Nasspressversuchen kann eindeutig festgestellt werden, dass das Material „Zetacomp Probe 5746“ der Firma Tenowo sich am besten für das Nasspressverfahren eignet. Es weist die geringste Flächengewichts-Schwankung innerhalb einer Rolle auf. Die Vliese reißen nicht beim Transport zur Presse und verschwimmen nicht beim Pressvorgang. Die ausgehärteten Platten sind komplett durchtränkt, weisen keine Trocken- oder Fehlstellen auf und die Plattendicke liegt innerhalb der vorausgesetzten Toleranz von  $2\text{ mm} \pm 10\%$ . Aus diesem Grund werden alle nachfolgenden Versuche in AP 3.1 „Duomere Verarbeitung“ mit diesem Material durchgeführt.

### Nasspressversuche Hutprofilwerkzeug

Für das Nasspressen von dreidimensionalen Körpern wird ein Hutprofilwerkzeug verwendet. Die Geometrie (Abbildung 3.1.1.6) hat eine Höhe von 85 mm und eine projizierte Fläche von  $200\text{ mm} \times 228\text{ mm}$  ( $456\text{ cm}^2$ ). Im eingebauten Zustand (Abbildung 3.1.1.6) ist der Abstand, aufgrund des begrenzten Pressflächenabstandes von 500 mm, der beiden Werkzeughälften sehr gering. Um eine Kollision zwischen Roboter/Greifer und Werkzeug/Presse zu vermeiden, ist eine präzise Programmierung des Einlegeprozesses erforderlich. Die resultierende Dicke des Hutprofils wird durch vier Zylinder eingestellt.



Abbildung 3.1.1.5: 4 mm Nasspressplatte mit Reinharzbereichen.

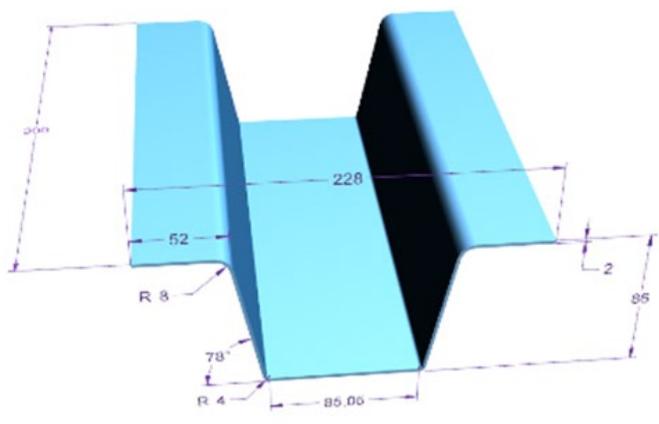


Abbildung 3.1.1.6: Hutprofil und Hutprofilwerkzeug (rechts) für die CAx-Integration und Validierung bei EDAG.

Mit dem bereits beschriebenen Hutprofilwerkzeug werden nun trockene rCF-Vliese zu Hutprofilen nassgepresst. Diese Versuche finden wie die Plattenversuche in der WPT-Zelle statt. Mit diesen Versuchen soll untersucht werden, ob sich die Vliese zum Herstellen von dreidimensionalen Geometrien eignen. Zusätzlich können die mechanischen Eigenschaften der ebenen Platten, mit denen der dreidimensionalen Hutprofile verglichen werden. Zur Herstellung der Hutprofile wird das Vliesmaterial „Zetacomp Probe 5746“ der Firma Tenowo und „Carbiso M IM56L-250“ der Firma ELG in Kombination mit demselben Harz-Härter-System verwendet.

Da das Hutprofilwerkzeug ein höheres Volumen bzw. Masse als das Plattenwerkzeug besitzt, wird bei diesen Versuchen eine Pressentemperatur von 140 °C gewählt. Mit dieser Einstellung wird die angestrebte Temperatur von 120 °C an der Werkzeugoberfläche erreicht. Außerdem wird Aushärtedauer von 6 Minuten festgelegt. Dieses Werkzeug verfügt über keinen umlaufenden Harzkanal. Aus diesem Grund besteht die Gefahr, bei zu hoher Harzmenge die Presse durch auslaufendes Harz zu verschmutzen. Um dies zu vermeiden wird zu Beginn der Versuchsreihe eine geringere Austragsmenge von 80 kg/min eingestellt. Es soll mit dem gleichen Stack-Flächengewicht wie bei den Plattenversuchen (1150 – 1200 g/m<sup>2</sup>) gearbeitet werden. Da die abgewickelte Fläche des Hutprofils aber kleiner, als die der Platten (550 x 550 mm) ist, muss das Stack-Gewicht angepasst werden. Für die Hutprofilversuche werden die Vliese auf das Maß 450 x 325 mm zugeschnitten. Somit ergibt sich bei einem Stack-Flächengewicht von 1150 – 1200 g/m<sup>2</sup> und ein benötigtes Stack-Gewicht von ca. 168 – 175 g.

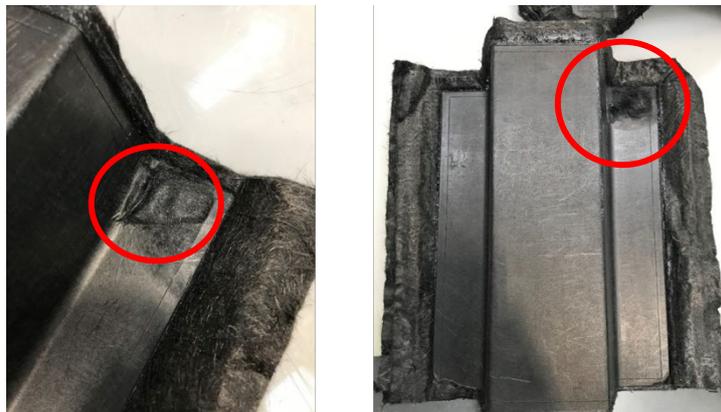


Abbildung 3.1.1.7: D-9.2 Fehlstelle (links), D-11.3 Fehlstelle (rechts).

Ein Fehler der regelmäßig auftritt, ist eine kleine unkonsolidierte Stelle (Abbildung 3.1.1.7) am, rechten hinteren Eck (Abbildung 3.1.1.7) des Hutprofiles (rote Markierung). Es wird versucht diese Fehlstelle durch Variieren des Harzauftrages, der Einwirk- und Presszeit, der Pressentemperatur und der Abstandhalter zu beheben. Trotz allen Lösungsversuchen taucht der Fehler bei beiden Materialien regelmäßig auf.

Bei den Tenowo-Vliesen variiert das Stack-Flächengewicht der Platten, die innerhalb der Toleranz von 2 mm  $\pm 10\%$  lagen, zwischen 1019 und 1169 g/m<sup>2</sup>, was ziemlich genau dem Ziel von 1150 – 1200 g/m<sup>2</sup> entspricht. Lediglich die Lagen von D-9.8 haben ein höheres Flächengewicht, sodass dieses Hutprofil aus vier anstatt fünf Lagen gestackt wird. Hier liegt das Stack-Flächengewicht bei 978 g/m<sup>2</sup>. Die Platte hat aber trotzdem eine Dicke von 2,00 mm. Allgemein ist eine deutliche Abhängigkeit zwischen dem Stack-Gewicht und der Hutprofilstärke zu beobachten.

Das ELG-Vlies hat ein deutlich höheres Flächengewicht, sodass zum Erreichen des benötigten Gewichtes nur drei Lagen notwendig sind. Im Vergleich zu den Tenowo-Vliesen, wird bei diesen Versuchen mit einem etwas geringeren Stack-Gewicht gearbeitet, um die gewünschten 2,00 mm zu erreichen. Zudem wird versucht, durch Erhöhung des Abstandes der Werkzeugflächen, die Fehlstelle an der hinteren rechten Ecke zu beseitigen. Diese Anpassung haben jedoch keinen Einfluss auf das Endergebnis. Insgesamt werden jeweils drei der hergestellten Hutprofile zum Fraunhofer IGCV geschickt, um damit 3-Punkt-Biegeversuche durchzuführen.

### Nasspressversuche – DFCM Versuche mit Huntsman

Neben den Versuchen an der Nasspressanlage von SGL werden beim assoziierten Partner Huntsman Versuche am Dynamic Fluid Compression Moulding (DFCM) durchgeführt. Diese Variante des Nasspressens zeichnet sich dadurch aus, dass vor dem Schließen des Werkzeuges ein Vakuum auf das imprägnierte Vlies appliziert wird und dieses somit faserschonend verdichtet und infiltriert wird. Anschließend wird mit der heißen Werkzeugoberfläche auf die Enddicke gefahren. Für diese Versuche werden im ersten Schritt ein Material von Tenowo und ein Material von ELG eingesetzt. Für beide Materialien werden 2 mm und 4 mm Platten hergestellt. Für die 2 mm Platten wird eine Variante mit hohem FVG (6 Lagen, ca. 36 %) und eine Variante mit niedrigem FVG (5 Lagen, ca. 30 %) gewählt.

Die Versuche mit einem FVG von 30% zeigen eine gute Infiltrationsqualität. Bei einem 6 lagigen Aufbau wird keine gute Plattenqualität erzeugt und die Carbonfasern zeichnen sich auf der Oberfläche der Platte ab, was auf trockene Stellen im Vlies deutet.

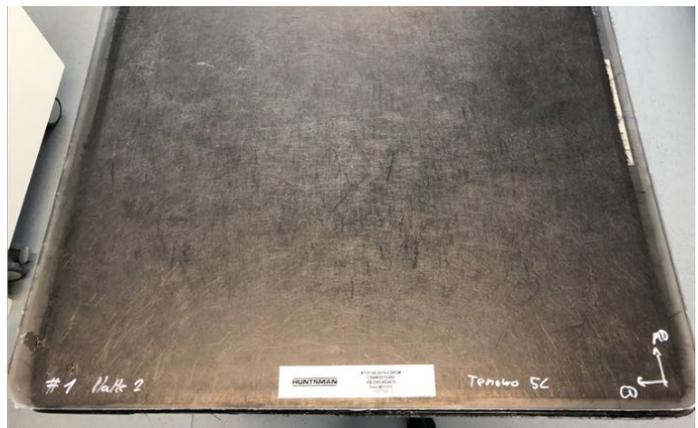


Abbildung 3.1.1.8: Presse zum Nasspressen bei Huntsman nach dem DFCM-Verfahren (Bild links) und fertige Platte aus 5 Lagen Tenowo Vliesstoff (Bild rechts).



Tabelle 3.1.1.4: Steckbrief der Nasspressplatten von Huntsman.

<b>Verfahren</b>	Nasspressen (DFCM)
<b>Harz</b>	Huntsman XB3585
<b>Härter</b>	AD3475
<b>Druck</b>	62,5 bar
<b>Trennmittel</b>	Chemlease 255
<b>Vakuumszeit</b>	30 Sekunden
<b>Werkzeugtemperatur</b>	115 °C
<b>Lagenanzahl</b>	5, 6 und 10 Lagen
<b>Härtezeit</b>	2 Minuten
<b>Vliestypen</b>	Tenowo #2 und ELG #15

Im späteren Verlauf des Projektes werden die Versuche noch einmal mit einem hochreaktiven Harz von Huntsman durchgeführt (Araldite® LY 3031/ Aradur® 3032). Hierfür wird von Tenowo ein neues Material gefertigt und zur Verfügung gestellt (Zeta-comp 5746, Marubeni 1-fach geschnitten, S074 Faser). Ziel der Versuche ist es, die Zykluszeit der DFCM Versuche zu optimieren. Es werden Platten mit einer Aushärtezeit von 30, 60 und 90 Sekunden hergestellt. Neben den Materialien von Tenowo wird auch das Nassvlies von AWA Paper genutzt, um die Platten herzustellen. Die Platten mit sehr kurzen Zykluszeiten zeigen

einen starken Faserabdruck an der Oberfläche der Platten und einen dumpfen Klang gegenüber den Platten welche mit einer Härtezeit von 2 Minuten ausgehärtet werden. Um die unterschiedlichen Infiltrationsqualitäten zu untersuchen werden Biegekennwerte mittels des 4-Punkt Biegeversuches erstellt. Diese sind in Abbildung 3.1.1.9 zu sehen.

Es kann gezeigt werden, dass die Eigenschaften bei nur 30 Sekunden Härtezeit nicht auf dem Niveau der 90 und 120 Sekunden Härtezeit liegen. Die Platte mit 120 Sekunden Härtezeit hat leicht höhere Werte als die Platte mit 90 Sekunden Haltezeit. Die Platten aus Nassvliesen besitzen etwa dieselben Kennwerte wie die Platten aus Trockenvliesen. Lediglich der Kennwert in die Hauptorientierung ist invers zu einander. Das AWA Paper Nassvlies zeigt hierbei den höchsten Wert in 0°, die Trockenvliese von Tenowo in 90°. Dies kann durch die Hauptproduktionsrichtung und Faserorientierung erklärt werden.

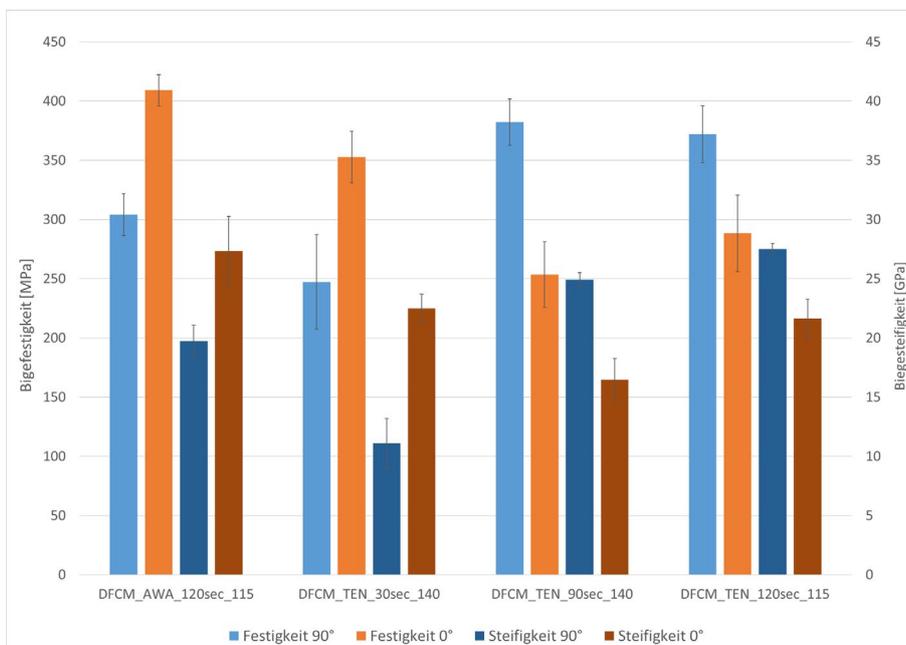
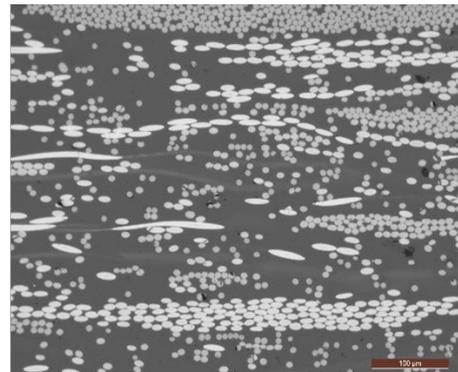


Abbildung 3.1.1.9: Biegekennwerte der konsolidierten AWA Paper Nassvliesplatte und der Tenowo Trockenvliesmaterialien. Für die Tenowo Materialien sind außerdem die Eigenschaften für 30 Sekunden, 90 Sekunden und 120 Sekunden zu sehen.



Abbildung 3.1.1.10: Im DFCM hergestellte Platten. Links: Zetacomp 5746 mit 30 Sekunden Härtezeit. Rechts: Nassvlies von AWA Paper und 2 Minuten Härtezeit.

DFCM



WCM

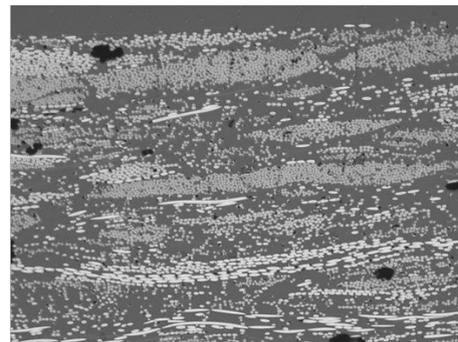
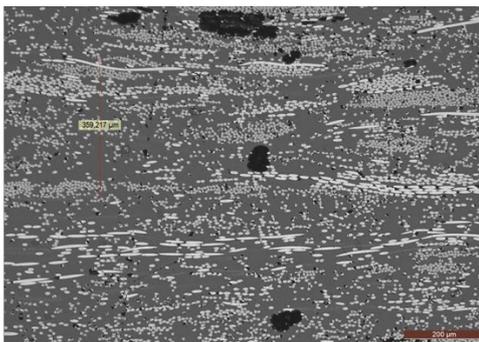


Abbildung 3.1.1.11: Vergleich der Schlifffbilder von Nassgepressten Proben (WCM) und DFCM Proben..

Insgesamt kann durch das DFCM Verfahren eine sehr gute Imprägnierqualität erreicht werden (siehe Abbildung 3.1.1.11). Im Vergleich zum klassischen WCM haben Platten aus dem DFCM Prozess eine geringere Anzahl und ein geringeres Porenvolumen.

## Nasspressversuche – Schikanebauteil am Fraunhofer IGCV

Weiterhin wird im AP 3.1.1. am Fraunhofer IGCV Nasspressversuche mit dem Huntsman Araldite® LY 3585 / Aradur® 3475 Harz durchgeführt. Hierbei wird versucht, das Schikanewerkzeug des Instituts mit drei unterschiedlichen FVG abzuformen. Für diese Versuche werden 5, 6 und 7 Lagen Trockenvlies von Tenowo mit der Bezeichnung #2 eingesetzt. Dies ergibt einen rechnerischen FVG von 30%, 35% und 40%. Für die Versuche wird eine Temperatur von 115 – 130 °C und ein Druck zwischen 40 und 50 bar eingestellt. Die Aushärtezeit beträgt drei Minuten. Alle Bauteile haben sich sehr gut abformen lassen (Siehe Abbildung 3.1.1.12) und alle Infiltrationsversuche waren erfolgreich. Aufgrund der niedrigen Viskosität des Harzes ist eine Infiltration von komplexeren Bauteilen sehr gut möglich, was eine gute industrielle Umsetzbarkeit des Nasspressens belegt. Es kann kein negativer Einfluss des höheren Faservolumengehaltes festgestellt werden.

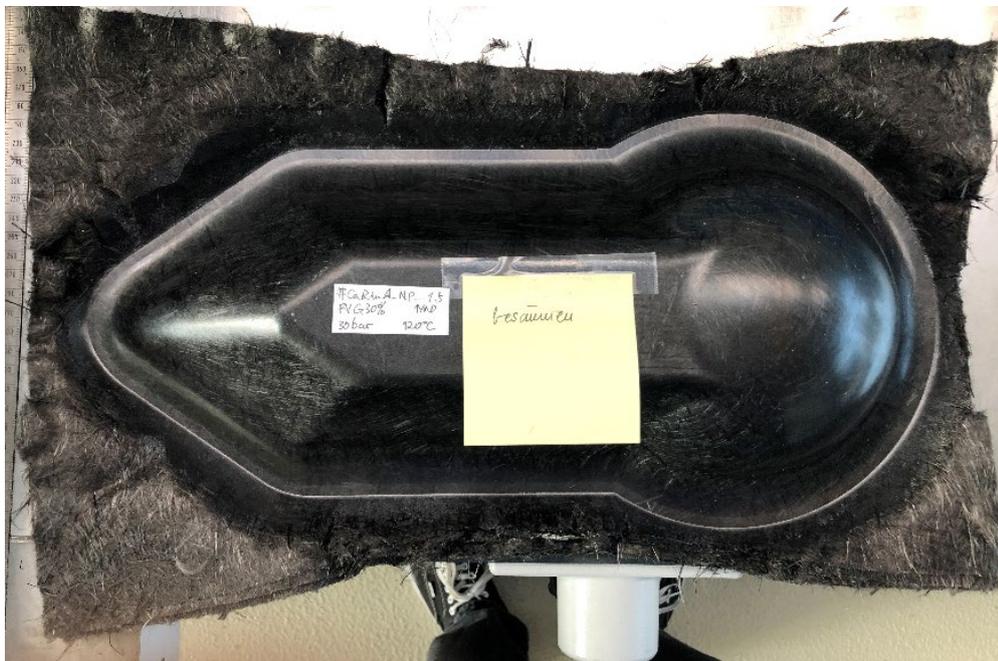


Abbildung 3.1.1.12: Am Fraunhofer IGCV infiltrierte Schikanebauteil mit einem Huntsman Epoxidharz.

Die Auswertung der Materialien abseits der Verfahrensoptimierung wird in Arbeitspaket 4 Materialcharakterisierung genauer beschreiben. Dort finden sich alle getesteten Kennwerte aller Nasspressversuche.

## Zusatzarbeitspaket: Prepreg

Während der Diskussionen zu den Anwendungen und Demonstrationsvorhaben ist aufgekommen, dass auch Prepregprodukte, vor allem für Airbus Helicopters, von großer Bedeutung sind und dass diese für potentielle Anwendungen genutzt werden können. Aus diesem Grund, hat sich die SGL bereit erklärt, 2 unterschiedliche Prepregs herzustellen.

In diesem Arbeitspaket wird die Imprägnierung von rCF-Vliesen mit einem Epoxid-Harzsystem, sowie deren Weiterverarbeitung untersucht. Hierfür werden zwei verschiedene rCF-Vliese und Harzsystemen ausgewählt. Als Vliese wird das bereits in den Nasspressversuchen verwendete Material „Carbiso M IM56-250“ von ELG und das Vlies „Zetacomp 5939“ von Tenowo verwendet. Die wichtigsten Eckdaten zu den Vliesen sind in Tabelle 3.1.1.5 aufgelistet.

Tabelle 3.1.1.5: Vliese für die Prepreg-Versuche mit rCF-Vliesstoffen.

Material	SOLL-Flächengewicht	IST-Flächengewicht
Zetacomp 5746	100 g/m <sup>2</sup>	68 g/m <sup>2</sup>
Carbiso M IM56-250	250 g/m <sup>2</sup>	250 g/m <sup>2</sup>

Als Prepreg-Harze werden die SGL-eigenen Harzsysteme „E730“ und das schnellaushärtende (engl. snap cure) „E420“ verwendet. Das E730 Harzsystem ist ein modifiziertes Epoxid-Harzsystem mit hoher Zähigkeit. E730 ist geeignet für Luftfahrtanwendungen und hier besonders für primäre Strukturen. E730 Prepreg lässt sich mittels Vakuumsack-, Autoklav- und Pressentechnik aushärten. In nachfolgender Abbildung (Abbildung 3.1.1.13) sind ermittelte Zeit/Umsatzkurven dargestellt, welche die möglichen Härtetemperaturen und die Umsätze in Abhängigkeit der Härtezeit und -temperatur angeben. Die Aushärtung kann zwischen 140°C und 200°C durchgeführt werden, wobei allgemein eine Aufheizrate von 1°C/min bis 4°C/min eingehalten werden sollte. Der anzuwendende Härtezeitdruck kann zwischen Vakuumdruck (> 0,7 bar) und ca. 8 bar positivem Druck variiert werden. Dieses ist abhängig von der jeweiligen Anwendung und dem Verstärkungsmaterial.

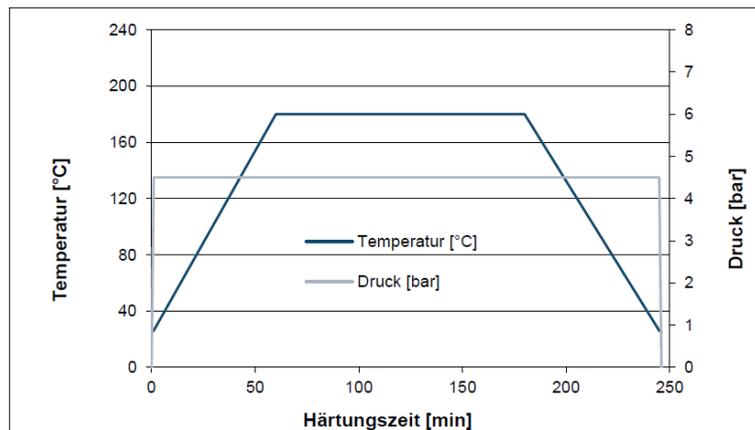


Abbildung 3.1.1.13: Exemplarischer Härtezyklus von E730 für die Aushärtung in der Presse.

Das Harzsystem E420 ist ein modifiziertes Hochleistungs-Epoxidharz, das sich durch äußerst kurze Härtezeiten bei erhöhten Temperaturen auszeichnet. Die hohe Glasübergangstemperatur (140 – 150°C) und deren schneller Aufbau ermöglichen ein heißes Entformen des Bauteils. Die Kombination mit einem angepassten Tack für automatisierte Verarbeitungsprozesse macht Prepregs und Towpregs mit E420 zu einer idealen Wahl für hochvolumige Serienfertigungen. Erfolgt die Härtung in einem Schritt, sollte die Härtungstemperatur zwischen 140 – 160°C gewählt werden, wobei 3 Minuten bei 150°C eine typische Zykluszeit (Abbildung 3.1.1.14) darstellt. Unter Berücksichtigung der Bauteildicke können hohe Aufheizraten (> 10 K/min) und isotherme Prozesse angewandt werden.

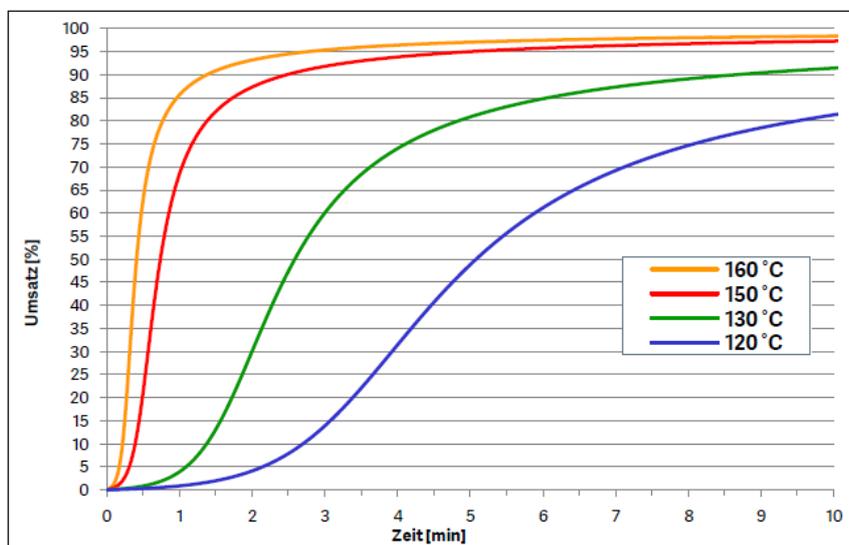


Abbildung 3.1.1.14: Zeit/Umsatz-Kurven für E420 basierend auf kinetischer Modellierung

### Herstellung der rCF-Prepreg Vliese

Die Herstellung der Prepreg-Vliese erfolgt auf einer Labor-Anlage der SGL Carbon. Hier können Vliesrollen mit bis zu 600 mm Breite aufgespannt, abgezogen, imprägniert, mit einer Folie belegt und wieder aufgerollt. Damit der Harzanteil über die ganze Länge der Rolle konstant bleibt, werden während des Prozesses regelmäßig Ronden ausgeschnitten, um damit das Flächengewicht des trockenen Vlieses zu bestimmen. Die Harzmenge kann daraufhin stufenlos mit einer Dosierwalze (Abbildung 3.1.1.15) angepasst werden. Über diese Walze wird das Harz in einem dünnen Film auf ein Trägerpapier aufgetragen und das Vlies aufgelegt (Abbildung 3.1.15).

Anschließend wird es durch einen Infrarotstrahler (Abbildung 3.1.1.16) und Durchlaufofen erhitzt. Dadurch sinkt die Viskosität des Harzes und das Imprägnieren des Vlieses wird erleichtert. Nach dem Aufheizen wird eine Trennfolie auf das Vlies aufgebracht und mit mehreren Kalandervalzen verpresst. Hier entsteht die endgültige Imprägnierung des Vlieses. Am Schluss wird das Material aufgewickelt (Abbildung 3.1.1.16).

In folgender Tabelle (Tabelle 3.1.1.6) sind alle hergestellten Vlies-Prepreg-Kombinationen aufgelistet.

Tabelle 3.1.1.6: Hergestellte rCF-Prepreg-Vliese.

Hersteller	rCF-Vlies	Flächengewicht	Harzsystem	Harzanteil in Gew.-%
ELG	Carbiso M IM56L-250	250 g/m <sup>2</sup>	E420	60 %
ELG	Carbiso M IM56L-250	250 g/m <sup>2</sup>	E730	56 %
ELG	Carbiso M IM56L-250	250 g/m <sup>2</sup>	E730	62 %
Tenowo	Zetacomp 5939	68 g/m <sup>2</sup>	E420	60 %
SGL	SIGRATEx C N96-AN0/NF	96 g/m <sup>2</sup>	E730	62 %



Abbildung 3.1.1.15: links, oben: Harzzuführung, links, unten: Dosierwalze und Harzfilm, rechts: Trockenes Vlies wird auf Harzfilm aufgelegt.

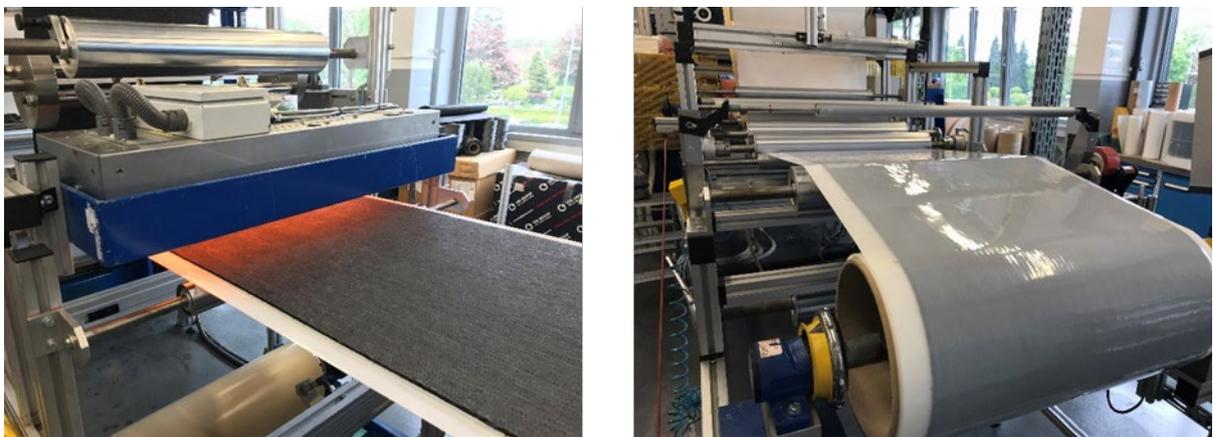


Abbildung 3.1.1.16: links: Erwärmen des Vlieses-Harz-Verbundes, rechts: Imprägniertes rCF-Vlies-Prepreg.

Das Vlies Carbiso M IM56L-250 wird mit beiden Harzsystemen imprägniert. Gemeinsam mit Airbus werden unterschiedliche Harze diskutiert ebenso wie der Vliestyp. In erster Instanz soll der ELG Vlies Carbiso M eingesetzt werden, da dieses Airbusrelevante Abfälle beinhaltet. Zusätzlich werden mit dem Harz E730 zwei Rollen mit unterschiedlichen Harzanteilen hergestellt. Das Tenowo-Vlies wird ausschließlich mit dem Harzsystem E420 imprägniert. Da beide Vliese mit E420 jeweils 60% Gewichtsanteile am Prepreg haben, können diese beiden Kombinationen miteinander verglichen werden.

## Pressen von Prepreg-Platten

Es werden folgende Materialien zu Platten verarbeitet:

■	ELG	Carbiso M IM56L-250	E420	60%
■	ELG	Carbiso M IM56L-250	E730	56%
■	Tenowo	Zetacomp 5939	E420	60%

Die Vliese mit E420 werden bei 155 °C isotherm für fünf Minuten verpresst. Die Vliese mit E730 werden bei 40 °C eingebaut, auf 180 °C aufgeheizt und bei zehn bar für zwei Stunden verpresst. Vor dem Ausbauen müssen die Platten wieder auf 40 °C abgekühlt werden. In Tabelle 3.1.1.7 sind alle wichtigen Parameter und Ergebnisse aufgelistet:

Tabelle 3.1.1.7: Pressparameter der Prepreg-Vliese.

Versuch	Material	Pressdruck	Ausbau-temperatur	Pressenprozess	SOLL-Dicke	IST-Dicke	gesamt
P-1.1	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	4 bar	155 °C	iO	2,00 mm	< 2,20 mm	niO
P-1.2	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	5 bar	155 °C	niO	2,00 mm	< 2,20 mm	niO
P-1.3	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	8 bar	155 °C	iO	2,00 mm	< 2,20 mm	niO
P-1.4	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	< 2,20 mm	niO
P-1.5	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	1,94 mm	iO
P-1.6	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	1,87 mm	iO
P-1.7	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	2,00 mm	iO
P-1.8	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	2,17 mm	iO
P-1.9	Carbiso M IM56L-250 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	2,13 mm	iO
P-3.1	Carbiso M IM56L-250 / E730 / 56%	10 bar	40 °C	iO	2,00 mm	2,12 mm	iO
P-3.2	Carbiso M IM56L-250 / E730 / 56%	10 bar	40 °C	iO	2,00 mm	2,13 mm	iO
P-3.3	Carbiso M IM56L-250 / E730 / 56%	10 bar	40 °C	iO	2,00 mm	1,97 mm	iO
P-3.4	Carbiso M IM56L-250 / E730 / 56%	10 bar	40 °C	iO	2,00 mm	2,19 mm	iO
P-4.1	Zetacomp 5939 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	1,95	iO
P-4.2	Zetacomp 5939 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	2,04	iO
P-4.3	Zetacomp 5939 / E420 / 60%	10 bar	155 °C	iO	2,00 mm	< 2,20 mm	niO

Der Pressvorgang ist bei allen Materialien problemlos durchführbar. Es entstehen weder Reinharz- noch Trockenstellen. Um die gewünschte Dicke von 2,00 mm  $\pm$  10% zu erreichen, wird der Pressendruck bei den ersten vier Platten von Versuch zu Versuch konstant gesteigert, bis ein kleiner sichtbarer Harz-Rand an den Plattenkanten entsteht. Wenn die richtigen Einstellungen gefunden sind, lassen sich aber Platten in guter Qualität und gewünschter Dicke reproduzierbar herstellen. Das Vlies SIGRATON C N96-AN0/NF mit einem E730 Harz wird zur Demonstratorherstellung bei Airbus Helicopters verwendet.

### 3.1.2 Arbeitspaket: RTM

Die RTM-Versuche werden in Quartal 1 und 2 2019 am Fraunhofer IGCV durchgeführt. Für das RTM werden ebenfalls die Vliestypen 2 und 15 von Tenowo und ELG verwendet. Die Versuche werden zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls mit dem Araldite® LY 3585 / Aradur® 3475 Harz durchgeführt. Für diese Versuche wird die Tartler Nodopur-VS-2K-Mischanlage vom Fraunhofer IGCV eingesetzt (siehe. Abbildung 3.1.2.1).



Abbildung 3.1.2.17: Für die RTM-Versuche, am Fraunhofer IGCV eingesetzte NODOPUR VS-2K Tartler Injektionsanlage.

Tabelle 3.1.2.8: Steckbrief der RTM-Platten vom Fraunhofer IGCV.

Verfahren	RTM
Harz	Huntsman XB3585
Härter	AD3475
Trennmittel	Freecote
Schließdruck (Presse)	50 bar
Werkzeugtemperatur	100 °C
Lagenanzahl	4 bis 6 Lagen
Härtezeit	unterschiedlich
Vliestypen	Tenowo #2 und ELG #15

Mit diesem Set-Up werden unterschiedliche Parameter zur Infiltration getestet. Leider ist es mit keinen Einstellungen möglich, dass Vlies aus recycelten Carbonfasern vollständig zu infiltrieren. Das Problem hierbei ist die schnelle Aushärtung des Harzes und die Verschiebung der Filamente während der Injektion. Für die ersten Infiltrationen wird ein Schließdruck von 50 bar eingestellt und mit fünf und sechs Lagen Vliesstoff gearbeitet. Dies ergibt einen

theoretischen FVG von 35 % bis 42 %. Als Injektionsgeschwindigkeit wird mit einem Wert mit 100 g/min gestartet, welcher anschließend aufgrund von Faserverschiebungen auf 60 und 50 g/min reduziert wird. Der Injektionsdruck wird im Laufe der Versuche von 10 bar auf 18 bar angehoben, um eine vollständige Infiltration der Vliese zu erreichen. Leider können auch mit diesen unterschiedlichen Einstellungen keine vollständig infiltrierten Platten hergestellt werden. Eine mögliche Lösung für dieses Problem wäre ein langsames Harzsystem mit dem es möglich sein sollte durch eine langsamere Injektion die Form zu füllen. Dies würde jedoch auch eine Erhöhung der Zykluszeiten bedeuten. Als weitere Möglichkeit wird die Spaltimpregnierung (C-RTM) und die High Pressure Injektion (HP-RTM) angesehen. Aus diesem Grund werden im weiteren Projektverlauf weitere Versuche mit dem HP-RTM am Fraunhofer ICT (Pfinztal) durchgeführt.



Abbildung 3.1.2.18: Unvollständig infiltrierte Platten bei den RTM-Versuchen am Fraunhofer IGCV.

### HP-RTM Versuche am Fraunhofer ICT in Pfinztal

Um eine bessere Infiltration der Platten durch den RTM-Prozess zu erhalten, werden Versuche am Fraunhofer ICT in Pfinztal durchgeführt. Hierfür wird eine Presse der Firma Dieffenbacher sowie eine Injektionsanlage der Firma Tartler verwendet. Die Daten der Versuche sind im entsprechenden Steckbrief zu finden (Tabelle 3.1.2.2). Für diese Versuche werden zwei Nassvliese und drei Trockenvliese ausgewählt. Um eine Plattengröße von 900 x 550 mm zu erreichen, wird ein Trockengewicht von 630 g – 700 g Vliesstoff eingelegt. Die Injektionsgeschwindigkeit variiert zwischen 30 g/s und 60 g/s, bei einer anliegenden Presskraft von 2000 kN – 5000 kN während der Infiltration. Der Injektionsdruck unterscheidet sich je nach eingestellter Injektionsgeschwindigkeit und Presskraft. Anschließend wird die Presskraft bei allen Versuchen auf 5000 kN erhöht, um eine gleichbleibende Plattendicke zu gewährleisten. Eine komplette Infiltration der Vliesstoffe kann nur sehr selten erreicht werden. Viele Materialien zeigen auch nach der Infiltration und Aushärtung des Materials noch trockene Stellen. Dadurch ist es auch immer wieder vorgekommen, dass es, aufgrund der Überpressung der Vliesstoffe, zu einer starken CF-Staubentwicklung gekommen ist.

Die besten Ergebnisse werden bei geringen Injektionsgeschwindigkeiten und hohen Presskräften während der Injektion erreicht. Die Materialien von Tenowo ergeben die besten RTM-Platten Qualität. Weiterhin wird auch versucht Platten mit 40 % FVG herzustellen, dies kann mit den Trockenvliesen nicht erreicht werden. Die einzige Platte mit einem FVG von 40 % besteht aus einem Nassvlies der Firma AWA Paper. Die mechanischen Kennwerte der RTM Platten im Vergleich zu den anderen Prozessrouten findet sich im Hauptarbeitspaket 4.

Tabelle 3.1.2.9: Steckbrief der RTM-Platten vom Fraunhofer ICT.

Verfahren	RTM
Harz	Huntsman Araldite® LY3585
Härter	Aradur® 3475
Trennmittel	Freecote
Injektionsgeschwindigkeit	30 – 60 g/s
Maximaler Injektionsdruck	max. 211 bar
Schließkraft	5000 kN
Werkzeugtemperatur	115 °C
Lagenanzahl	5 Lagen Trockenvlies / 12 – 15 Lagen Nassvlies
Härtezeit	3 min
Vliestypen	NV1.2, NV2, #2, #6, #15



Abbildung 3.1.2.19: RTM-Werkzeug mit eingelegten Vliesstoff (links) und vollständig infiltrierte Platte (rechts) als Ergebnis der RTM-Versuchen am Fraunhofer ICT.

Die Auswertung der Materialien abseits der Verfahrensoptimierung wird in Arbeitspaket 4 Materialcharakterisierung genauer beschreiben. Dort finden sich alle getesteten Kennwerte aller RTM-Versuche.

### 3.1.3 Arbeitspaket: Verstärkung mit unidirektionalen Materialien

In diesem Arbeitspaket werden trockene und vorimprägnierte 100%-rCF-Vliesstoffe lokal mit unidirektionalen Materialien verstärkt und zu Prüfplatten und Hutprofilen weiterverarbeitet. Dabei soll der Einfluss der Verstärkung auf die mechanischen Eigenschaften und auf die Drapierbarkeit der Vliese untersucht werden. Als Referenz werden unverstärkte Vliesestoffe herangezogen. Zur Herstellung von Prüfplatten wird ein Prepregvlies und ein trockener Vliesstoff kreuzförmig verstärkt. Für die Verarbeitung zu lokal verstärkten, dreidimensionalen Geometrien wird ein Prepregvlies und ein trockenes Vlies gitterförmig verstärkt. Die Positionierung der verschiedenen Verstärkungen werden im Absatz AP 3.2.3 Verstärkung mit Thermoplastmaterialien näher beschrieben.

Bei den sogenannten TowPregs (Abbildung 3.1.3.1) handelt es sich um vorimprägnierte (engl. pre-impregnated) Faserbündel (engl. tows) diverser Fasertypen. Diese werden in der Regel ohne Trennmateriale auf Hülsen aufgespult und können direkt weiterverarbeitet werden. Genauso wie die verschiedenen Fasertypen können auch die gängigen duromeren Matrixsysteme nahezu frei ausgewählt werden.



Abbildung 3.1.3.20: SGL Carbon; TowPreg-Spule zur lokalen Verstärkung.

Die SGL Carbon bietet in ihrer Produktpalette einige verschiedene Faser-Matrix-Systeme für TowPregs an. Die Materialien werden unter dem Markennamen SIGRAPREG vertrieben. Eine Übersicht zur Nomenklatur der Produkte zeigt Abbildung 3.1.3.2. Im Rahmen des Fördervorhabens MAI CC4 CaRinA wird das TowPreg SIGRAPREG C TP50/13-4.4/255-E420/39% verwendet. Das Harzsystem E420 ist ein schnellhärtendes Epoxid-Harzsystem, das sich durch äußerst kurze Härtingszeiten bei erhöhten Temperaturen auszeichnet. Das Harzsystem E420 wird auch bei der Herstellung einiger Prepreg-Vliese im Laufe dieses Projektes verwendet. Im Anschluss an die lokale Verstärkung der Prepreg-Vliese mit dem TowPreg, werden diese unter Druck und Temperatur in einer Heißpresse ausgehärtet. Die lokal mit TowPreg verstärkten trockenen Vliese werden anschließend im Nasspressverfahren verarbeitet. Im Fokus ist hier die Vernetzung der unterschiedlichen Harzsysteme sowie die Position der Verstärkungen nach dem Aushärten.

## SIGRAPREG C TP50/13-4.4/255-E420/38%



1 Markenname	2 Material	3 Typ	4 Anzahl Filamente	5 Breite	6 Mechanische Eigenschaften	7 Harztyp	8 Harzanteil
SIGRAPREG	C = Carbon G = Glas	TP = TowPreg	24 = 24.000 50 = 50.000	in mm	Zugfestigkeit/E-Modul in GPa	Exxx = Epoxid Pxxx = Phenol	Gewichts- anteil in %

Abbildung 3.1.3.21: Nomenklatur für SIGRAPREG TowPregs

### Broetje-Automation "STAXX 1700"

Die trockenen und vorimprägnierten Vliese werden mit einer automatisierten Legeanlage „STAXX 1700“ (Abbildung 3.1.3.3) der Firma Broetje-Automation lokal verstärkt. Diese Anlage kann 16 TowPreg-Bahnen mit einer jeweiligen Breite von 12,7 mm (1/2“) simultan ablegen.

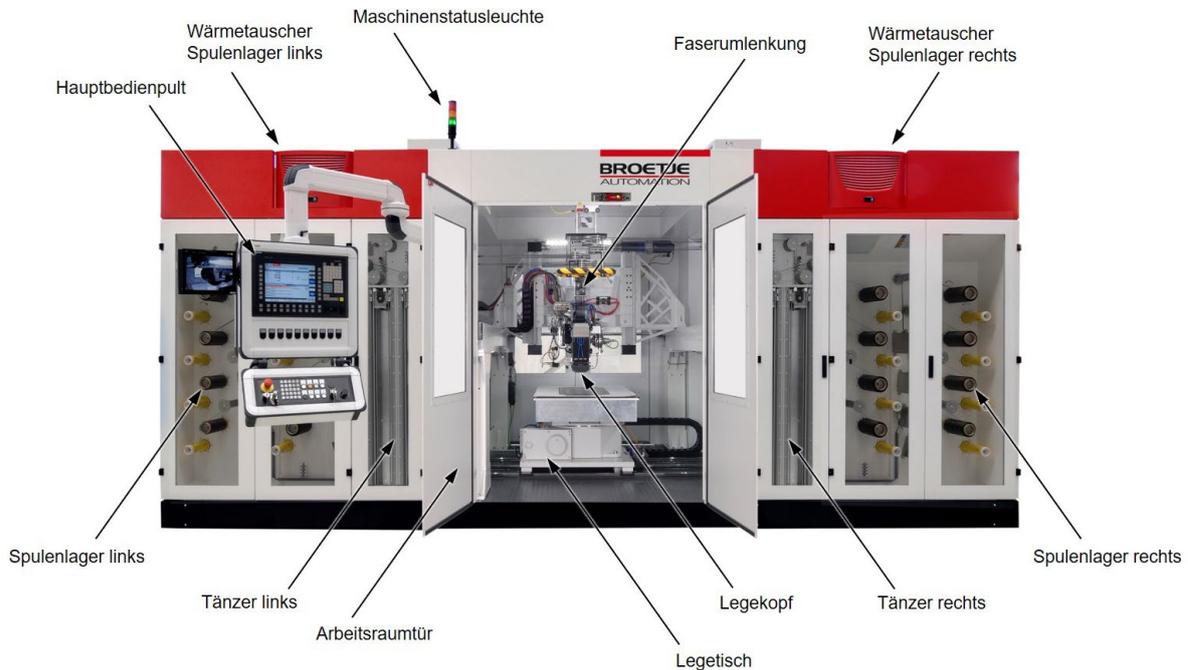


Abbildung 3.1.3.22: AFP-Anlage; Broetje-Automation - STAXX 1700 zur lokalen Verstärkung von Vliesstoffen.

Um die Klebrigkeit (engl. Tack) beim Abspulen zu reduzieren, werden die Spulenlager gekühlt. Das Material wird über diverse Umlenkrollen zum Legekopf geführt und auf definierten Bahnen platziert. Die Legebahnen werden mittels eines CAM-Systems auf Basis von CAD-Daten berechnet. Diese Bahnen können unterschiedliche Längen und Orientierungen haben und endkonturnah abgelegt werden. Durch das konturnahe Ablegen der einzelnen Tows kann im Gegensatz zur Verwendung von Prepregs eine signifikante Verringerung des Verschnitts erreicht werden. Mittels einer am Legekopf befestigten Anpressrolle wird das Material beim Ablegen auf den Legetisch (2-D) kompaktiert. Zur besseren Haftung der ersten Lage und der einzelnen TowPreg-Lagen zueinander wird der Legetisch beheizt. Zusätzlich wird zur Erhöhung der Klebrigkeit mit Hilfe einer Infrarotlampe lokal Temperatur eingebracht.

### Lokale Verstärkung der trocknen und vorimprägnierten Vliese

Um die Materialien mit TowPreg lokal verstärken zu können, darf sich das Vlies auf dem Arbeitstisch der AFP-Anlage nicht bewegen, sich nicht verziehen und keine Falten bilden. Da das Vlies aber sehr luftdurchlässig ist, reicht die reine Vakuumeistung des Tisches nicht aus, um die Lage ausreichend fest zu fixieren. Der Legekopf würde beim Ablegen des klebrigen TowPregs das Vlies mitziehen und somit eine genaue Ablage verhindern. Da die Zuschnitte für die Prüfplatten und die Hutprofile unterschiedliche Maße besitzen, werden dafür zwei unterschiedliche Blechrahmen angefertigt, die flach genug sind, um den Legeprozess nicht zu stören und gleichzeitig die Vliese auf dem Tisch fixieren. Die Bleche haben eine Dicke von ca. 2 mm und die Außenmaße 1 m x 1 m. Für die Prüfplattenzuschnitte wird ein quadratischer Ausschnitt von 460 mm x 460 mm ausgeschnitten. Das Blech für die Hutprofilzuschnitte bekommt einen rechteckigen Ausschnitt von 410 mm x 285 mm. Da die Vliese die Außenmaße 500 mm x 500 mm bzw. 450 mm x 325 mm haben, entsteht somit eine Überlappung von 20 mm an allen vier Seiten des Vlieses. Durch das Eigengewicht des Bleches und das zusätzlich wirkende Vakuum, wird das Blech auf den Tisch gepresst. Somit wird durch die Überlappung das Vlies gleichmäßig an allen vier Seiten auf dem Tisch fixiert und kann nicht mehr verrutschen. Mit diesen Vorrichtungen können alle Vliese problemlos lokal verstärkt werden (Abbildung 3.1.3.4).

Für die Nass- und Heißpressversuche wird nur ein Teil der gesamten Vliese mit TowPreg verstärkt. Ein Stack enthält ein bis maximal zwei verstärkte Vliese. Die restlichen Lagen sind unverstärkte Vliese.

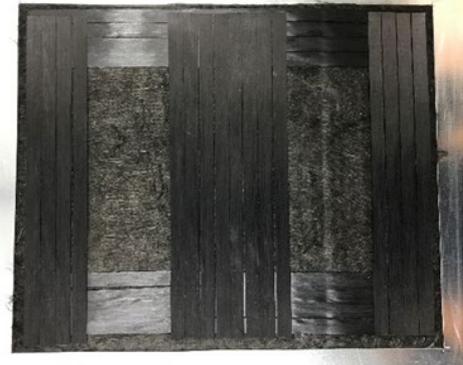


Abbildung 3.1.3.23: Links: Blech zur Fixierung des rCF-Vlieses auf dem Vakuumtisch. Rechts: lokale Verstärkung der Vliesstoffe für die Hutprofil Geometrie.

Der Nasspressprozess der verstärkten Vliese läuft identisch zum Nasspressen der unverstärkten Vliese ab. Ein Stack wird halbiert und auf beide Flächen des Imprägniertisches aufgeteilt. Beide Stack-Hälften werden mit dem Roboter mit Harz benetzt und aufeinandergelegt. Anschließend wird das gesamte Paket angehoben, in die Presse gelegt und verpresst.

Zu Beginn dieser Versuchsreihe wird eine Austragsmenge von 0,8 kg/min, eine Werkzeugtemperatur von 120°C, eine Presskraft von 700 kN und eine Aushärtedauer von 10 min eingestellt und für alle Platten (D-8.1 – D-8.9) beibehalten. Die Soll-Dicke wird auch hier auf 2,00 mm ± 0,2 mm festgelegt. Tabelle 3.1.3.1 enthält alle weiteren wichtigen Prozessparameter der hergestellten Prüfplatten.

Tabelle 3.1.3.10: Nasspressversuche von verstärkten Prüfplatten.

Vers-Nr.	Beschreibung	Anzahl Lagen	Gewicht Stack	Flächengewicht Stack	Haltezeit	Bewertung Prozess	IST-Dicke	Gesamtbewertung
D-8.1	unverstärkt	6	298 g	1192 g/m <sup>2</sup>	20 s	iO	2,30 mm	niO
D-8.2	unverstärkt	5	255 g	1020 g/m <sup>2</sup>	20 s	iO	2,09 mm	iO
D-8.3	Oberseite verstärkt	5	272 g	1088 g/m <sup>2</sup>	20 s	niO	2,09 mm	niO
D-8.4	Unterseite verstärkt	5	272 g	1088 g/m <sup>2</sup>	20 s	niO	2,14 mm	niO
D-8.5	Unterseite verstärkt	5	-	-	0 s	iO	2,06 mm	iO
D-8.6	Beidseitig	5	295 g	1180 g/m <sup>2</sup>	0 s	niO	2,15 mm	niO
D-8.7	Beidseitig + Unterbrechung	5	297 g	1188 g/m <sup>2</sup>	0 s	iO	2,06 mm	iO
D-8.8	Beidseitig innenliegend	5	293 g	1172 g/m <sup>2</sup>	0 s	iO	2,10 mm	iO
D-8.9	Beidseitig + Unterbrechung	5	303 g	1212 g/m <sup>2</sup>	0 s	iO	2,14 mm	iO

Zu Beginn der Versuchsreihe werden zwei Prüfplatten ohne Verstärkungen (vergl.: D-1.1 – D-1.9) hergestellt. Diese fungieren als Referenzplatten zu den verstärkten Prüfplatten. Die erste Platte D.8.1 ist mit 2,3 mm außerhalb der festgelegten Toleranz. Daraufhin werden die folgenden Platten mit einer Vlies-Lage weniger verpresst. Bei der

ersten verstärkten Prüfplatte (D.8-3) wird die Verstärkung auf der linken Stack-Hälfte platziert. Da der linke auf den rechten Stack gelegt wird, befindet sich die Verstärkung folglich auf der Oberseite der Platte. Der Prozess vom manuellen Auflegen der Vliese bis zum Einlegen des getränkten Stacks in die Presse verläuft problemlos. Da das Harz aber auf die Verstärkung aufgetragen wird, ist unterhalb der Verstärkung das Vlies noch trocken. Beim Pressprozess muss das Harz horizontal fließen, um unter die Verstärkung zu gelangen. Dabei wird die Verstärkung in Flussrichtung verschwemmt.

Aus diesem Grund wird bei der folgenden Platte (D.8-4) die Verstärkung auf der Unterseite platziert. Bei diesem Versuch löst sich jedoch die Verstärkung während der Phase, bei der der Roboter den Stack in der Luft hält, um die Durchtränkung der Vliese zu verbessern. Daraufhin wird bei den folgenden Versuchen dieser Schritt aus dem Roboterprogramm gelöscht.

Nach diesen Anpassungen wird die Platte D.8-5 problemlos getränkt und die Presse eingelegt. Durch das Positionieren der Verstärkung auf die Unterseite, treten keine Verschwemmungen mehr auf.

Bei der folgenden Platte (D.8-6) werden die Verstärkungen auf der Ober- und Unterseite positioniert. Hier tritt beim Pressen das gleiche Problem wie bei Platte D.8-3 auf. Die Verstärkungen auf der Oberseite werden beim Pressvorgang verschwemmt (Abbildung 3.1.24).

Um eine Prüfplatte mit beidseitiger Verstärkung herzustellen, wird bei den Platten D.8-7 und D.8-9 die verstärkte Lage auf der Oberseite des Stacks zunächst weggelassen. Nach dem Harzauftrag wird der automatische Prozess kurz unterbrochen und die verstärkte Vlieslage manuell auf die linke Stack-Hälfte gelegt. Der restliche Prozess läuft wieder vollautomatisiert ab. Da jetzt das Harz nicht auf den Tows ist, sondern zwischen der ersten und zweiten Lage, kommt es zu keinem horizontalen Harzfluss und somit auch zu keiner Verschwemmung der Verstärkungen (Abbildung 3.1.3.5).



Abbildung 3.1.3.24: Links: Verschwemmung der Verstärkung durch den Harzfluss. Rechts: Lokal verstärkte Nasspressplatte ohne Verschwemmungen.

Die Prüfplatte D.8-8 wird ebenfalls beidseitig verstärkt. Hier werden die verstärkten Vliese so positioniert, dass die Verstärkungen in die Mitte der Platte zeigen. Dieser Stack lässt sich ohne Unterbrechung vollautomatisiert verarbeiten. Die Verstärkungen zeichnen sich nach dem Aushärten leicht an den Oberflächen ab, so dass die Positionierung bewertet werden kann. Hier ist deutlich zu erkennen, dass keine Verschwemmungen auftreten.

### Nasspressen der trockenen verstärkten Vliesen zu Hutprofilen

Das Nasspressen der verstärkten Vliese zu Hutprofilen läuft identisch zu den oben beschriebenen Prüfplattenversuchen ab. Allein das Plattenwerkzeug wird durch das bereits beschriebene Hutprofilwerkzeug ausgetauscht. Auch bei diesen Versuchen wird ein Stack-Flächengewicht von ca.  $1150 \text{ g/m}^2 - 1200 \text{ g/m}^2$  angestrebt. Bei einer Zuschnitt-Größe von  $450 \text{ mm} \times 325 \text{ mm}$  errechnet sich ein Stack-Gewicht von ca.  $168 \text{ g} - 175 \text{ g}$ .

Aufgrund der Erkenntnisse aus den vorherigen Nasspressversuchen wird eine Austragsmenge von  $0,8 \text{ kg/min}$  festgelegt und die Haltezeit des getränkten Stacks gestrichen. In Tabelle 3.1.11 sind die wichtigsten Prozessparameter aufgelistet:

Tabelle 3.1.3.11: Nasspressversuche von verstärkten Hutprofilen.

Vers-Nr.	Beschreibung	Anzahl Lagen	Gewicht Stack	Flächengewicht Stack	Bewertung Prozess	IST-Dicke	Ergebnis
D-10.1	Unterseite verstärkt	4	163 g	1115 g/m <sup>2</sup>	niO	2,01 mm	niO
D-10.2	Oberseite + Unterbrechung	4	165 g	1128 g/m <sup>2</sup>	niO	1,97 mm	niO
D-10.3	Unterseite verstärkt	4	168 g	1149 g/m <sup>2</sup>	niO	2,01 mm	niO
D-10.4	Oberseite verstärkt	4	159 g	1087 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	iO
D-10.5	Unterseite verstärkt	4	159 g	1087 g/m <sup>2</sup>	iO	1,98 mm	iO
D-10.6	Oberseite + Unterbrechung	4	160 g	1094 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	iO
D-10.7	Beidseitig + Unterbrechung	3	154 g	1053 g/m <sup>2</sup>	niO	1,92 mm	niO
D-10.8	Beidseitig + Unterbrechung	3	155 g	1060 g/m <sup>2</sup>	niO	1,92 mm	niO
D-10.9	Beidseitig + Unterbrechung	3	154 g	1053 g/m <sup>2</sup>	iO	1,90 mm	iO
D-10.10	Beidseitig + Unterbrechung	3	156 g	1067 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	iO

Bei den Versuchen D-10.1 bis D-10.3 ist bei den Verstärkungen auf den äußeren Schenkel deutlich zu erkennen, wie die Tows aufgrund des Harzflusses beim Pressvorgang schwimmen (Abbildung 3.1.3.6, links). Für die Versuche D-10.4 und D-10.10 werden aufgrund dessen, die Verstärkungen auf den äußeren Schenkeln vor dem Stacken manuell entfernt. Bei den Versuchen D-10.6 – D-10.8 treten an den äußeren Schenkeln starke Verschwemmungen im Vlies auf (Abbildung 3.1.3.6, Mitte). Hier scheint der Harzfluss zu stark zu sein. Hutprofil D-10.9 und 10.10 konnten ohne Verschwemmungen im Tow und im Vlies hergestellt werden (Abbildung 3.1.3.6, rechts).

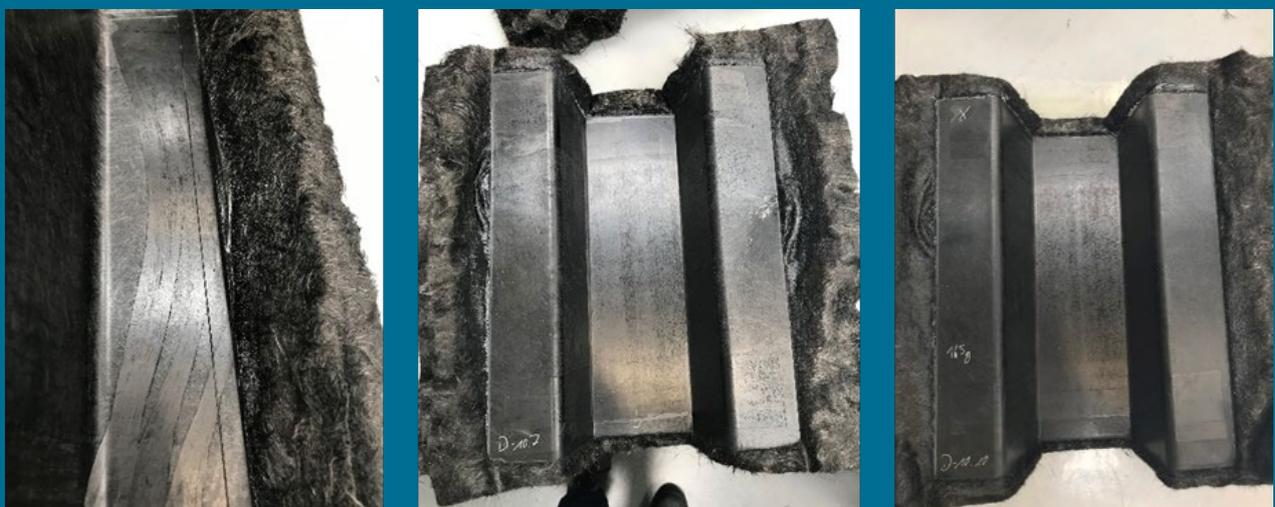


Abbildung 3.1.3.25.: Links: D-10.1 / Mitte: D10.7 / Rechts: D-10.10.

## Fazit zum Verstärken und Nasspressen trockener Vliese

Das Verstärken der trockenen Vliese ist positiv zu bewerten. Mit einem passend angefertigten Metallrahmen zur Fixierung lassen sich TowPregs problemlos und unkompliziert auf einzelne Lagen ablegen. Hier sind unterschiedliche Zuschnitt-Maße der Vliese sowie verschiedene Verstärkungs-Geometrien verarbeitbar.

Beim Nasspressen der verstärkten Vliese gilt es zu beachten, dass die Matrix nicht auf die Tows aufgebracht werden darf. Dies führt zu Verschwemmungen der Verstärkungen während des Pressprozesses. Alternativ dazu, können die Verstärkungen auf der Unterseite des Stacks positioniert werden. Ist dies nicht möglich, besteht die Möglichkeit, die verstärkte Vlieslage manuell nach dem Harzauftrag aufzulegen oder die Verstärkungen zwischen den einzelnen Vlieslagen zu positionieren.

Ebene Platten können mit diesen Anpassungen ohne weitere Schwierigkeiten hergestellt werden. Hier treten keine Verschwemmungen, Reinharzbereiche oder Fehlstellen auf. Bei einer dreidimensionalen Form wie beispielsweise dem Hutprofil, müssen die Pressparameter noch weiter untersucht und angepasst werden. Hier treten trotz Umpositionierung der Verstärkungen Verschwemmungen im Vlies auf.

## Heißpressen der Prepreg-Vliese zu Prüfplatten

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Pressversuche werden ausschließlich mit dem verstärkten Vlies „Zetacomp 5923 / E420 / 60 %“ durchgeführt. Aufgrund dieser vorhergegangenen Versuchsreihe, wird ein Pressdruck von 10 bar, eine Temperatur von 155 °C und eine Aushärtedauer von fünf Minuten für alle Platten festgelegt.

Tabelle 3.1.3.12: Pressparameter für verstärkte Prepreg-Vlies-Prüfplatten.

Versuch	Beschreibung	Lagenanzahl	Gewicht Stack	Flächengewicht Stack	Pressepro- -----	SOLL-Dicke	IST-Dicke	gesamt
P-4.4	Oberseite verstärkt	11	665 g	2660 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	-	iO
P-4.5	Oberseite verstärkt	10	599 g	2396 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	-	iO
P-4.6	Oberseite verstärkt	9	533 g	2132 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	1,84 mm	iO
P-4.7	Oberseite verstärkt	10	591 g	2364 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	2,11 mm	iO
P-4.8	Oberseite verstärkt	10	588 g	2352 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	2,06 mm	iO
P-4.9	Oberseite verstärkt	10	579 g	2316 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	2,03 mm	iO
P-4.10	Beidseitig verstärkt	10	663 g	2652 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	-	iO
P-4.11	Beidseitig verstärkt	9	553 g	2212 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	1,92 mm	iO
P-4.12	Beidseitig verstärkt	9	602 g	2408 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	-	iO

Alle elf Versuche zur Herstellung von verstärkten Platten aus Prepreg-Vlies können erfolgreich durchgeführt werden. Der Pressvorgang läuft ohne Probleme ab und die optisch bewertbare Qualität ist einwandfrei. Die gemessenen Dicken der Platten P-4.6 – 4.9 und 4.11 liegen alle innerhalb der vorgegebenen Toleranz von 2,00 mm ± 10%. Bei den Platten P-4.4, 4.5, 4.10 und 4.12 liegen aufgrund eines Speicherproblems keine Materialstärken vor. Es ist aber aufgrund der guten Werte der restlichen Platten davon auszugehen, dass auch diese Werte sich innerhalb der Toleranz befinden.

## 3.2 Arbeitspaket: Thermoplastische Verarbeitung

### 3.2.1 Arbeitspaket: Verarbeitungsstudie Organovliese

In diesem Arbeitspaket wird die Verarbeitung von thermoplastischen Vliesstoffen erforscht und optimiert. Dazu werden von ELG, Tenowo und ITA die in den Spezifikationen genannten Vliese an das Fraunhofer IGCV und SGL Carbon geliefert, um dort unterschiedliche Parameter für die Verarbeitung zu testen und Verarbeitungsintervalle zu definieren. Zu Beginn dieses Kapitels sollen die Ergebnisse des Fraunhofer IGCV dargelegt werden, gefolgt von den Ergebnissen der SGL Carbon.

#### Voruntersuchungen zur Definition der Orientierung und Festlegung der Spezifikationen

In diesem Arbeitspaket werden zu Beginn unterschiedliche PA6/rCF Mischungen vom ITA Augsburg an das Fraunhofer IGCV geliefert und dort verpresst. Die Ergebnisse flossen in die Bachelorarbeit von Maria Mayer an der Hochschule Kempten mit ein<sup>1</sup>. Ziel dieser Versuche ist es, die Orientierung der Vliese des ITA zu bestimmen und eine Definition für die Begrifflichkeiten „orientiert“ und „isotrop“ zu finden. Weiterhin soll mit diesen Versuchen der Bereich des Faservolumengehaltes identifiziert werden, der im Projekt untersucht wird. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 3.2.1: und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

Tabelle 3.2.1.1: Verarbeitungsstudien der Vorversuche für das konsolidieren von PA6-rCF-Vliesstoffen und PPIGF-Vliesstoffen am Fraunhofer IGCV.

Bezeichnung	Druck / bar	Kraft / kN	Temperatur / °C	Haltezeit / min	Werkzeug	Lagenanzahl
ITA_V1	80	1280	290	-	TK400	10
ITA_V2	87,5	1400	290	5	TK400	10
ITA_V3	87,5	1400	290	5	TK400	15
ITA_V4	87,5	1400	290	5	TK400	14
ITA_V5	87,5	1400	290	5	TK400	14
ITA_V6	87,5	1400	290	5	TK400	12
ITA_V7	87,5	1400	290	5	TK400	11
ITA_V8	87,5	1400	290	5	TK400	14
ITA_V9	87,5	1400	290	5	TK400	10
ITA_V10	50	1040	290	5	TK400	13

Wie in den Abbildungen ersichtlich, wird ein maximaler Faservolumengehalt von 45 % erreicht, jedoch ohne Verbesserung der mechanischen Eigenschaften gegenüber den anderen Proben. Gründe hierfür können unter anderem Faserbrüche sein, wie sie in Abbildung 3.2.1.3 ersichtlich sind. Der FVG wird nach der Norm ISO 1183 (nasschemisch) bestimmt. Für einen FVG von 45 % ist ein Druck von 87,5 bar eingestellt worden und ausreichen.

<sup>1</sup> Maria Mayer, Herstellung von Verbundwerkstoffen aus Organovliesen auf Basis rezyklierter Carbonfasern zur Ermittlung relevanter Kennwerte und dem daraus resultierendem Potenzial für Materialsubstitutionen. Bachelorarbeit, Hochschule Kempten; 2018.



Abbildung 3.2.1.1: Unterschiedliche Fehlerbilder bei der Herstellung von Organovliesstoffen. Links: Austretende Matrix  
Mitte: Trockene Stellen in der Mitte der Platte Rechts: Trockene Stellen am Rand der Platte

Des Weiteren ist ersichtlich, dass ein MD/CD-Verhältnis von 1 bis 1,6 erreicht wird. Ein MD/CD-Verhältnis von 1 bedeutet, dass die Eigenschaften in Machinedirection und in Crossdirection beim Vliesstoff in der gleichen Höhe sind. Dabei gilt zu beachten, dass dies sowohl für die Zugfestigkeitseigenschaften wie auch auf die Steifigkeitseigenschaften gilt. Alle anderen Materialien haben ein MD/CD-Verhältnis ungleich 1 und sind somit in einer Weise orientiert. Diese Versuche sollen mehrere offene Punkte zur Finalisierung der Spezifikationen klären:

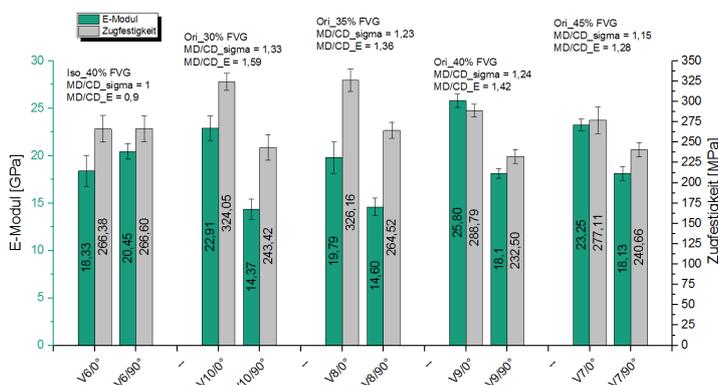


Abbildung 3.2.1.2: Gegenüberstellung der Zugsteifigkeit und Zugfestigkeit unterschiedlicher PA6 / rCF Vliesstoffe.

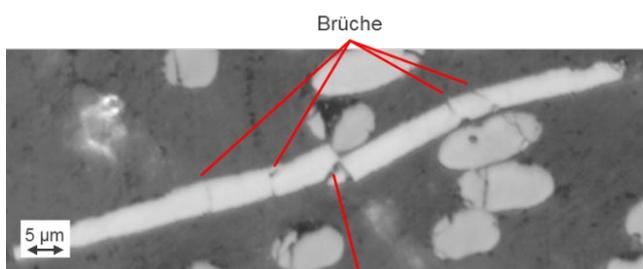


Abbildung 3.2.1.3: Aufkommende Faserbrüche beim Heiß-pressen von PA6/rCF-Vliesstoffen.

- Welcher Druck wird benötigt, um die Vliesstoffe zu verpressen?
- Welcher maximalen FVG kann erreicht werden und ist dies vorteilhaft für das Produkt?
- Welches MD/CD-Verhältnis wird gängiger Weise erreicht, wenn keine Optimierung vorgenommen wird? Was bedeutet „orientiert“ und was „isotrop“

**Anmerkung:** Das hier dargestellte MD/CD-Verhältnis ist ein Max/Min-Verhältnis. Im Laufe des Projektes wird hier eine neue Definition des Orientierungsgrades eingeführt. Im Folgenden wird das Max/Min-Verhältnis der Biegesteifigkeit als Orientierungsverhältnis für den Vliesstoff herangezogen da dies einfacher zu bestimmen ist und weniger Anfällig als die Festigkeit ist, da hier makroskopische Defekt nicht mit einbezogen werden. Auf Basis dieser Ergebnisse aus Abbildung 3.2.1.2 werden die Vliese die das ITA herstellt als „isotrope“ und die Vliese von Tenowo als „orientiert“ definiert.

## Studie zum Einflusses des Druckes auf die Eigenschaften

Neben den Analysen zum FVG und zur Orientierung wird auch eine Untersuchung des Einflusses des Druckes durchgeführt. Hierfür werden die Vliestypen #9 (Tenowo, Marubeni Faser, 250 g/m<sup>2</sup>, 22% FVG (real bestimmter Wert)) und #8 (ITA, ELG Faser, 250 g/m<sup>2</sup>, 25% FVG (real bestimmter Wert)) eingesetzt (Abbildung 3.2.1.4 und Abbildung 3.2.1.5). Diese Vliesstoffe werden bei unterschiedlichen Drücken und bei 285 °C zu Platten verpresst. Abschließend werden die 4-Punkt Biegekennwerte in 0° und 90° bestimmt und in Abbildung 3.2.1.4. gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass beim Vliestyp 8 eine Variation des Druckes zu keiner Veränderung der Eigenschaften

führt. Da jedoch bei höheren Drücken bereits Faserbrüche im Material gefunden werden können ist davon auszugehen, dass diese keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben bzw. sich mit der etwas besseren Konsolidierung nivellieren. Beim Vliestyp #9, welches einen Faseranteil von 22 vol-% besitzt kann eine Verbesserung der Eigenschaften mit höherem Konsolidierungsdruck festgestellt werden. Die Messungen bei 60 bar entsprechen nicht der Tendenz, denn der Wert bei 50 bar, wie auch 70 bar ist deutlich als der Wert der 60 bar Platte. Dennoch ist eine zunehmende Tendenz ersichtlich. Vergleicht man die Kennwerte bei 40 bar, so weist die Platte von Tenowo eine Steifigkeit von 12 GPa auf, wohingegen die Platte des ITA bereits eine Steifigkeit von 17,5 GPa besitzt. Somit kann festgestellt werden, dass bereits 40 bar ausreichen können, um eine gute Konsolidierqualität zu erreichen. In Abhängigkeit des Halbzeuges muss dieser Druck jedoch stufenweise erhöht werden bis die optimalen Einstellungen gefunden werden.

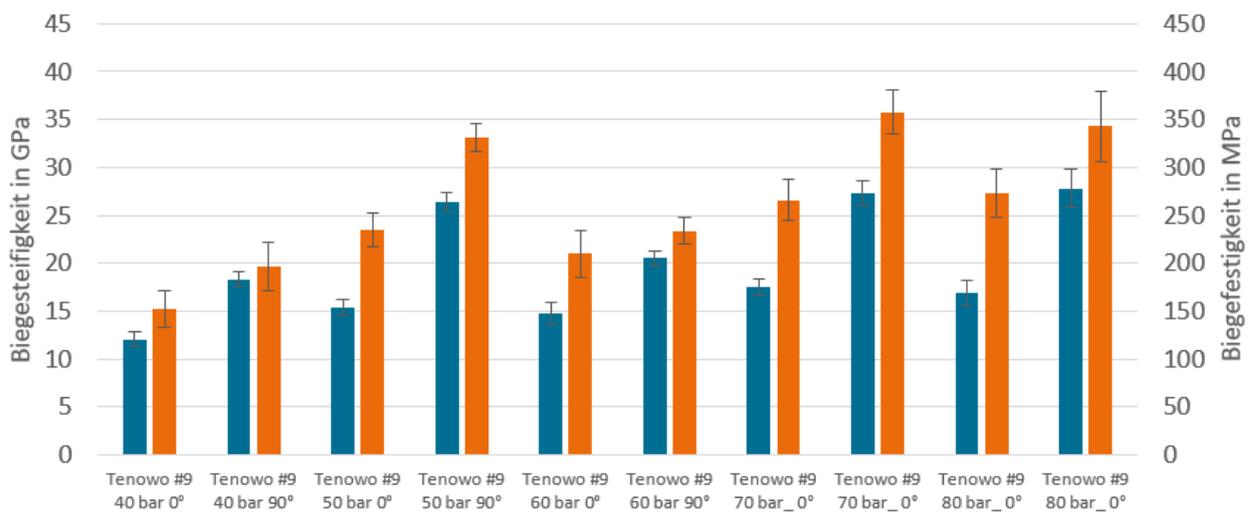


Abbildung 3.2.1.4: Biegekennwerte eines PA6 Vliesstoffes bei unterschiedlichen Konsolidierdruck (Tenowo #9).

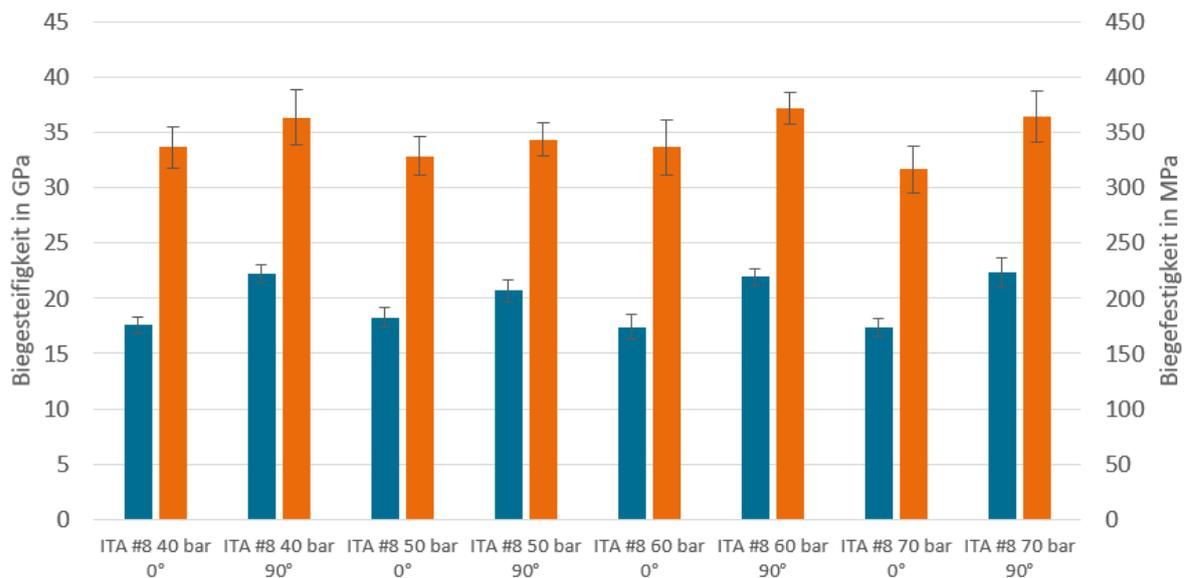


Abbildung 3.2.1.5: Biegekennwerte eines PA6 Vliesstoffes bei unterschiedlichen Konsolidierdruck (ITA #8).

## Verfahrensoptimierung zur Definition von Standardverarbeitungsparameter für das variotherme Pressen

Aus den Vorversuchen und Untersuchungen mit unterschiedlichen Thermoplasten werden am Fraunhofer IGCV unterschiedliche Standardparameter ausgearbeitet. Zur besseren Übersicht sollen diese hier aufgezählt werden. Diese Parameter werden auch für alle weiteren Versuche in HAP 4 eingesetzt.

Tabelle 3.2.2: Standardparameter der Verarbeitung von thermoplastischen Vliesstoffen.

Material	Druck / bar	Temperatur / °C	Temperaturtoleranz / K	Vorprozesse
MAPP und PP	50	180	5	Keiner
PA6	50	285	5	2 Stunden trocknen bei 80 °C
PET	50	285	5	2 Stunden trocknen bei 80 C°

Dabei erfolgt die Temperaturmessung an zwei Thermoelementen an der Ober- und Unterseite des Werkzeuges. Wenn beide innerhalb der eingestellten Temperatur inkl. Toleranz sind wird in den nächsten Prozessschritt weiter geschaltet. Das Material wird unter 50 kN (etwa 4 bar) leicht vorgepresst, während es erwärmt wird. Nach dem Erreichen der Verarbeitungstemperatur wird der Druck auf 50 bar erhöht und unter diesem die Platte auch abgekühlt. Bei 25-50°C wird die Platte entformt. Dieser Prozess wird auch nochmal in Abbildung 3.2.1.6 dargestellt. Die Auswertung der Materialien abseits der Vorversuche und Verfahrensoptimierung wird in Arbeitspaket 4 Materialcharakterisierung genauer beschreiben. Dort finden sich alle getesteten Kennwerte aller Thermoplastversuche.

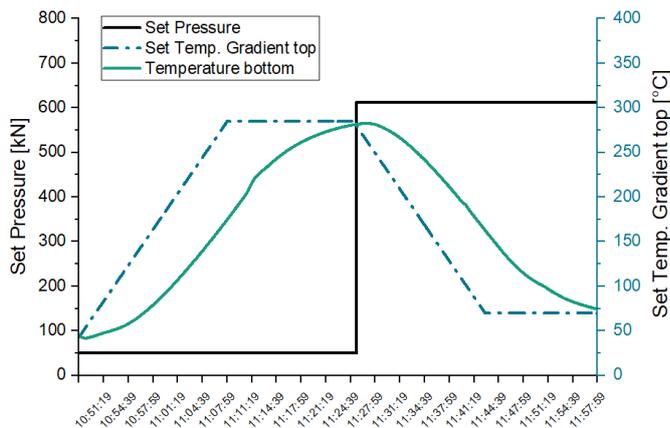


Abbildung 3.2.1.6: Aufzeichnung der Pressing Files am Fraunhofer IGCV. Darstellung der eingestellten Temperatur und Druck sowie der Heizrampe des Werkzeuges.

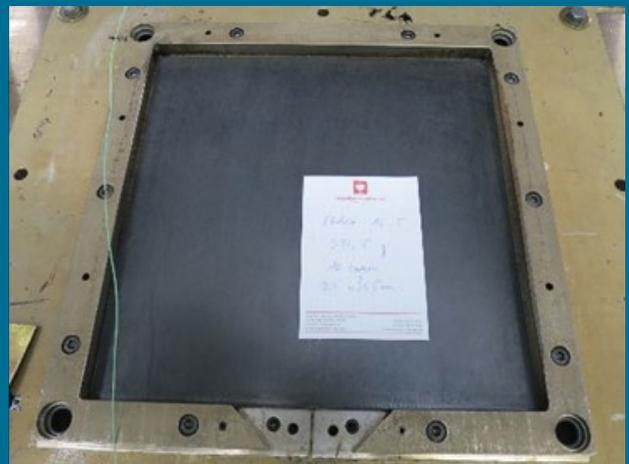
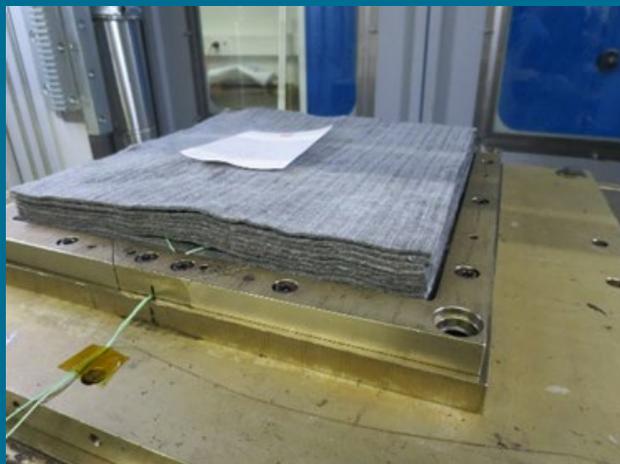


Abbildung 3.2.1.7: Links: Zugeschnittener Stack eines thermoplastischen Mischvlieses. Rechts: Fertig imprägnierter Vliesstack nach Abkühlen des Werkzeuges.

## Heißpressen bei der SGL Carbon

Alle Platten in diesem Kapitel werden in der Heiß-Vakuum-Pressen „WKP 1000S“ (Abbildung 3.2.1.8) der Firma WICKERT konsolidiert. Die Presse kann auf maximal 430 °C erhitzt werden und mit einer Kraft von 1150 kN pressen. Für die Herstellung der Organobleche werden folgende Materialien verwendet:

Tabelle 3.2.1.3: Materialien zu Herstellung der Organobleche.

Hersteller	Materialbezeichnung	Matrix	Fasertyp	FGA	Nummer
ITA	Vliestyp 3	PA6	Verschnitt	40 %	T-1.X
Tenowo	Zetacomp 5476/1	PA6	Verschnitt	51 %	T-2.X
ITA	Vliestyp 8	PA6	Pyrolysiert	40 %	T-3.X
Tenowo	Zetacomp 5476/2	PA6	Pyrolysiert	51 %	T-4.X
ELG	Carbiso TM MAPP/55 IM56-250	MA-PP	Pyro-AHD	45 %	T-5.X



Abbildung 3.2.1.8: Heiß-Vakuum-Pressen "WKP 1000S" von WICKERT.

Die trockenen Vliese werden genauso wie die Nasspress-Vliese vorbereitet. Die Lagen für die Heißpressversuche werden auf einem Cutter zugeschnitten und mit einer Fase zur richtigen Positionierung der Lagen aufeinander versehen. Im Unterschied zu den Nasspresslagen, werden die Lagen für das Heißpressen auf ein vorgegebenes Maß von 350 x 350 mm zugeschnitten.

Nach dem Zuschneiden der einzelnen Vlieslagen, werden alle Zuschnitte einzeln gewogen und das Flächengewicht bestimmt. Die Schwankungen der Flächengewichte sind im folgenden Diagramm (Abbildung 3.2.1.9) dargestellt.

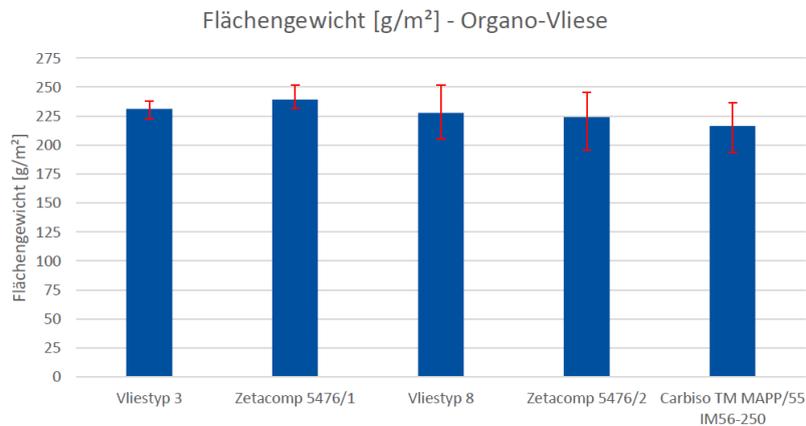


Abbildung 3.2.1.9: Diagramm Flächengewicht der Heißpressvliese.

Tabelle 3.2.1.4: Messwerte und Schwankungen der Heißpressvliese.

Material	Mittelwert	Min. Wert	Max. Wert	Abs. Fehler	Rel. Fehler
Vliestyp 3	231,8 g/m <sup>2</sup>	222,9 g/m <sup>2</sup>	237,6 g/m <sup>2</sup>	8,9 g/m <sup>2</sup>	4,0 %
Zetacomp 5476/1	239,6 g/m <sup>2</sup>	231,8 g/m <sup>2</sup>	251,4 g/m <sup>2</sup>	11,8 g/m <sup>2</sup>	4,9 %
Vliestyp 8	226,5 g/m <sup>2</sup>	204,1 g/m <sup>2</sup>	251,4 g/m <sup>2</sup>	24,9 g/m <sup>2</sup>	11,0 %
Zetacomp 5476/2	220,9 g/m <sup>2</sup>	150,2 g/m <sup>2</sup>	245,7 g/m <sup>2</sup>	70,7 g/m <sup>2</sup>	32,0%
Carbisio TM MAPP/55 IM56-250	220,6 g/m <sup>2</sup>	193,5 g/m <sup>2</sup>	246,5 g/m <sup>2</sup>	27,1 g/m <sup>2</sup>	12,3%

Im Vergleich zu den Nasspressvliesen, deren Flächengewicht sich in einem Bereich von ca. 230 – 330 g/m<sup>2</sup> liegt, befinden sich die Heißpressvliese zwischen ca. 195 – 255 g/m<sup>2</sup> und deutlich niedrigeres aber gleichzeitig konstanteres Flächengewicht. Das konstanteste Flächengewicht dieser fünf Vliese weist das Material „Vliestyp 3“ von ITA auf. Dieses schwankt zwischen 223 – 238 g/m<sup>2</sup> um einen Wert von 15 g/m<sup>2</sup>. Die kleinste Abweichung um den Mittelwert beträgt 8,9 g/m<sup>2</sup>, was einem relativen Fehler von 4,0 % entspricht. Wenn man die zwei letzten Messwerte des Vlieses „Zetacomp 5476/2“ von Tenowo ignoriert, lässt sich die größte Schwankung bei dem Vlies „Carbisio TM MAPP/55 IM56-250“ von ELG erkennen. Das Flächengewicht schwankt hier zwischen 194 g/m<sup>2</sup> – 247 g/m<sup>2</sup> um 53 g/m<sup>2</sup>. Betrachtet man auch die letzten beiden Werte des Materials „Zetacomp 5476/2“, so ergibt sich hier eine Schwankung von 96 g/m<sup>2</sup>. Hier liegt der relative Fehler bezogen auf den Mittelwert bei 32 %.

Tabelle 3.2.5: Parameter für die Herstellung von PA6-Prüfplatten.

Versuch	Lagenanzahl	Gewicht Stack	Flächegewicht Stack	Verpackung	Temperatur	Pressendruck	Presszeit	Ausbautemperatur	Presseprozess
T-1.1	12	339 g	2768 g/m <sup>2</sup>	Alufolie	285 °C	50 bar	30 min	80 °C	niO
T-1.2	12	341 g	2781 g/m <sup>2</sup>	Alufolie	285 °C	50 bar	30 min	80 °C	niO
T-1.3	12	339 g	2768 g/m <sup>2</sup>	Teflon	260 °C	50 bar	30 min	80 °C	niO
T-1.4	12	341 g	2736 g/m <sup>2</sup>	Teflon	240 °C	50 bar	30 min	80 °C	niO
T-1.5	12	331 g	2739 g/m <sup>2</sup>	Teflon	260 °C	50 bar	30 min	80 °C	niO

Um das Ausfließen der Matrix zu reduzieren und um die Presse vor Verschmutzung zu schützen, werden bei den Versuchen T-1.1 und 1.2 die Vliese in Alufolie eingepackt. Das Paket wird bei 285 °C in die Presse eingebaut und mit 50 bar für 30 Minuten verpresst. Nachdem die Presse bei 50 bar auf ca. 80 °C abgekühlt ist, kann das Organoblech wieder ausgebaut werden. Es wird eine vollständige Konsolidierung erreicht und es können keine Poren, Trockenstellen oder Reinharzbereiche festgestellt werden. Da aber sehr viel PA6 ausgepresst wird, werden die folgenden Versuche bei einer niedrigeren Temperatur verpresst (Abbildung 3.2.1.10).

Im Vergleich zu anderen Thermoplasten nehmen Polyamide je nach Typ bis zu 3,7% Wasser auf. Hiermit ist eine Volumenzunahme von bis zu 0,3% pro 1% Wasseraufnahme verbunden. Aus diesem Grund müssen die zugeschnittenen Vliese für die Prüfplattenherstellung vor dem Verpressen für vier Stunden bei 80°C unter Vakuum trocknen. Das eingeschlossene Wasser würde ansonsten die mechanischen Eigenschaften der Platte negativ beeinflussen.

Folgende Werte werden als Standardprozessparameter zum Verpressen der PA6-Vliese festgelegt:

- Verpackung: Teflongewebe-Folien
- Trocknen: mindestens 4 Stunden bei 80 °C in Vakuum
- Pressendruck: 50 bar
- Pressentemperatur: 250 °C
- Haltezeit: 30 min
- Ausbautemperatur: 80 °C



Abbildung 3.2.1.10: Links: Unkonsolidierter Stack. Mitte: Konsolidiertes Organoblech. Rechts: Polymerrand.

Die wichtigsten Parameter dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 3.2.1.6 a aufgelistet.

Tabelle 3.2.1.6: Versuchsmatrix zur Prüfplattenherstellung aus PA6-Mischvliesen.

Versuch	Material	Lagenanzahl	Gewicht Stack	Flächengewicht Stack	Pressprozess	SOLL-Dicke	IST-Dicke	gesamt
T-1.6	ITA – Vliestyp 3	12	341 g	2784 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	1,96 mm	iO
T-1.7	ITA – Vliestyp 3	12	331 g	2700 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	1,95 mm	iO
T-2.1	Zetacomp 5476/1	11	322 g	2626 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	1,91 mm	iO
T-2.2	Zetacomp 5476/1	11	324 g	2642 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	1,91 mm	iO
T-3.1	Vliestyp 8	12	332 g	2708 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	2,04 mm	iO
T-3.2	Vliestyp 8	12	336 g	2742 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	2,03 mm	iO
T-3.3	Vliestyp 8	12	323 g	2634 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	1,98 mm	iO
T-3.4	Vliestyp 8	12	319 g	2607 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	2,07 mm	iO
T-4.1	Zetacomp 5476/2	12	323 g	2633 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	2,33 mm	niO
T-4.2	Zetacomp 5476/2	12	329 g	2685 g/m <sup>2</sup>	iO	2,00 mm	2,33 mm	niO

Alle Vliese lassen sich mit den gleichen Parametern zu Prüfplatten verarbeiten. Auch die SOLL-Dicke von 2 mm wird sehr genau erreicht. Allein bei den Platten T-4.1 und T-4.2 ist die Dicke außerhalb der Toleranz. Aber hier dürfte die SOLL-Dicke durch eine Reduzierung der Lagenanzahl zu erreichen sein.

Tabelle 3.2.1.6: Versuchsmatrix zur Prüfplattenherstellung aus PP-Mischvliesen.

Versuch	Lagenanzahl	Gewicht Stack	Flächengewicht Stack	Pressdruck	Temperatur Presse	Pressprozess	SOLL-Dicke	IST-Dicke	gesamt
T-5.1	12	316 g	2576 g/m <sup>2</sup>	50 bar	250 °C	niO	2,00 mm	< 1,5 mm	niO
T-5.2	12	334 g	2730 g/m <sup>2</sup>	50 bar	195 °C	niO	2,00 mm	< 1,5 mm	niO
T-5.3	11	331 g	2698 g/m <sup>2</sup>	25 bar	195 °C	niO	2,00 mm	< 1,5 mm	niO
T-5.4	11	330 g	2693 g/m <sup>2</sup>	13 bar	190 °C	iO	2,00 mm	1,8 – 2,2 mm	iO
T-5.5	11	324 g	2642 g/m <sup>2</sup>	20 bar	190 °C	niO	2,00 mm	< 1,8 mm	niO
T-5.6	12	336 g	2740 g/m <sup>2</sup>	15 bar	190 °C	iO	2,00 mm	1,8 – 2,2 mm	iO
T-5.7	11	326 g	2664 g/m <sup>2</sup>	15 bar	190 °C	iO	2,00 mm	1,8 – 2,2 mm	iO
T-5.8	11	321 g	2624 g/m <sup>2</sup>	15 bar	190 °C	iO	2,00 mm	1,8 – 2,2 mm	iO
T-5.9	11	332 g	2706 g/m <sup>2</sup>	15 bar	190 °C	iO	2,00 mm	1,8 – 2,2 mm	iO

Die ersten drei Platten werden mit zu hoher Temperatur und Druck verpresst. Die Organobleche werden überpresst und liegen deutlich unterhalb der Dickentoleranz. Platte T-5.4 wird mit 13 bar bei 190 °C verpresst und liegt innerhalb der Toleranz. Bei Versuch T-5.5 wird versucht die Konsolidierung nochmals zu steigern. Die eingestellten 20 bar führen aber zu einer erneuten Überpressung. Somit werden die Pressparameter von 15 bar und 190 °C als optimal festgelegt und für die letzten 4 Versuche verwendet.

### Kontinuierliche Herstellung von Organoblechen

Zur Untersuchung der Verarbeitung von thermoplastischen Vliesstoffen werden auch Organobleche in unterschiedlichen Anlagen hergestellt. Diese Organobleche sollen in weiteren Untersuchungen als Halbzeuge für das isotherme Umformen eingesetzt werden (siehe Abbildung 3.2.12). Hierfür werden in einer ersten Versuchsreihe Organobleche am Fraunhofer IGCV hergestellt. Ausgangsprodukt für diese Organobleche sind vorher zugeschnittene und zu genannten Stacks gestapelte Vlieslagen mit den Abmessungen 345 mm x 345 mm. Dieser Vliesstack wird dann zwischen zwei Aluminiumblechen in einem Heitzisch der Firma Elkom erhitzt und anschließend in einer Langzauner Heizpresse unter Druck abgekühlt. Der Heitzisch besteht aus zwei individuell beheizbaren Platten, bei der sich die obere hydraulisch anheben lässt. Die untere Platte lässt sich dann wie eine Schublade herausziehen. Um den Transport des heißen Vliesstapels zu erleichtern und um einen Temperaturverlust im Vlies zu vermeiden werden die oben erwähnten Aluminiumbleche sog. Transferbleche verwendet. Diese werden per Hand in die Heizpresse transferiert und bei einer konstanten Werkzeugtemperatur von 30 °C und einem Druck von 50 bar abgekühlt. Auf diese Weise kann ein sehr gut vorkonsolidiertes Halbzeug hergestellt werden. Allerdings ist der beschriebene Prozess bzgl. Prozesszeit und Mengendurchsatz nicht mit der industriellen Herstellung von Organoblechen zu vergleichen und stellt lediglich einen Ersatzprozess dar mit dem das Halbzeug am Fraunhofer IGCV hergestellt werden kann.

Weiterhin werden auch Organobleche bei der Firma Meyer Maschinenfabrik GmbH in Rötzing im industriellen Maßstab produziert. Es wird das 250 g/m<sup>2</sup> Tenowo Vlies mit EMS PA6 eingesetzt. Als Doppelbandpresse wird eine KFK-XL mit einer maximalen Temperatur von 250 °C eingesetzt (siehe Abbildung 3.2.1.11). Es werden Versuche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und einer unterschiedlichen Anzahl von Vliesstofflagen bei 250 °C Bandtemperatur durchgeführt. Bis zu einer maximalen Geschwindigkeit von 10 m/min können einlagige Organobleche

hergestellt werden. Diese Geschwindigkeit ist allerdings nicht mehr geeignet, um mehrlagige Vliese zu konsolidieren. Um die Gewährleistung, dass das Matrixmaterial bis ins Innere schmelzflüssig ist, muss die Geschwindigkeit deutlich gedrosselt werden. In Absprache mit dem assoziierten Partner Brose wird für die weitere Optimierung der Parameter ein 4 lagiger Aufbau untersucht. Dieser wird mit Geschwindigkeiten von 0,5 – m/min verarbeitet. Mit einer langsameren Geschwindigkeit wird auch die mittlere gemessene Dicke des Organobleches dünner, was auf eine bessere Konsolidierung schließen lässt. Aus dieser Ergebnis wird der Konsolidierungsgrad für Organobleche, als Verhältnis der optimalen Dicke zur nicht konsolidierten Dicke, eingeführt. Für die vierlagigen Organobleche welche an der KFK-XL verarbeitet werden ergibt sich somit ein Konsolidierungsgrad von 27-36% für PA6.

Tabelle 3.2.1.7: Parameter und resultierender Konsolidierungsgrad für die Organoblechherstellung.

Herstellung	Maschinenfabrik Meyer Doppelbandpresse			
Material	PA6			
Bezeichnung	0,5m/min	1m/min links	1m/min mitte	1m/min rechts
Temperatur / °C	250	250	250	250
Lagenzahl	4	4	4	4
Mittlere Dicke	1,91	2,39	2,52	2,56
Standardabweichung	0,05	0,08	0,10	0,12
Konsolidierungsgrad	36%	28%	27%	27%



Abbildung 3.2.1.11: Kontinuierliche Herstellung von Organoblechen an der KFK-XL bei der Firma Maschinenfabrik Herbert Meyer GmbH.

Weiterhin werden Versuche an einer zweiten kontinuierlichen Anlage am Fraunhofer Forschungszentrum OHLF (Open Hybrid Lab Factory) durchgeführt. Die dortige Anlage ist eine Kalandar-Direktimprägnieranlage mit einem Geschwindigkeitsbereich von 0,5-5 m/min, 350 mm Bahnbreite, 125 N/cm<sup>2</sup> Flächenpressung und einer maximalen Temperatur von 300°C. An dieser Anlage werden Versuche mit maximaler Flächenpressung und 250 °C für PP, 280°C für PA6 und 270°C für PET-Fasern durchgeführt. Für diese Versuche wird versucht jeweils 2, 4, 6 oder 8 Einzellagen miteinander zu verbinden. Außerdem werden zwei teilkonsolidierte 4 Lagen Stacks versucht zu einem 8 lagigen Organoblech kontinuierlich zu verpressen. Aufgrund des geringen Konsolidierungsgrad wird in einem Geschwindigkeitsbereich von 0,1 bis 1 m/mm gearbeitet. Der höchste Konsolidierungsgrad, von 49%, wird mit PET-Fasern erreicht PP und PA6 erreichen nur 35% bzw. 33% mit vergleichbaren Einstellungen. Insgesamt ist das Material ein wenig besser als bei Meyer konsolidiert, was auf die erhöhte Temperatur und Flächenpressung zurückzuführen ist.

Tabelle 3.2.1.8: Parameter und Ergebnisse der Kalanderversuche am Fraunhofer OHLF.

Herstellung	OHLF Kalandrier				OHLF Kalandrier			
Material	PA6				PET			
Lagenzahl	4	6	8	2x4	4	6	8	2x4
Mittlere Dicke	2,72	3,55	4,16	4,14	0,97	1,57	1,85	1,86
Standardabweichung	0,17	0,23	0,29	0,23	0,09	0,74	0,12	0,09
Abweichung theoretische Konsolidierung	299%	247%	205%	204%	112%	129%	102%	102%
Konsolidierungsgrad	25%	29%	33%	33%	47%	44%	49%	49%
Herstellung	OHLF Kalandrier							
Material	PP							
Lagenzahl	4	6	8	2x4				
Mittlere Dicke	2,19	3,57	4,56	3,85				
Standardabweichung	0,18	0,42	0,34	0,32				
Abweichung theoretische Konsolidierung	224%	252%	238%	185%				
Konsolidierungsgrad	31%	28%	30%	35%				

### Thermoformen von Organovliesen und Organoblechen

Das IGCV beschäftigt sich neben der Herstellung von Organoblechen auch mit dem Thermoformen dieser Materialien. Hierfür werden im Rahmen der Bachelorarbeit von Leonhard Reichenberger<sup>1</sup> unterschiedliche Parameter (Druck, Temperatur und Konsolidierungsgrad) zur Herstellung von Organoblechen erforscht (siehe Abbildung 3.2.1.12).

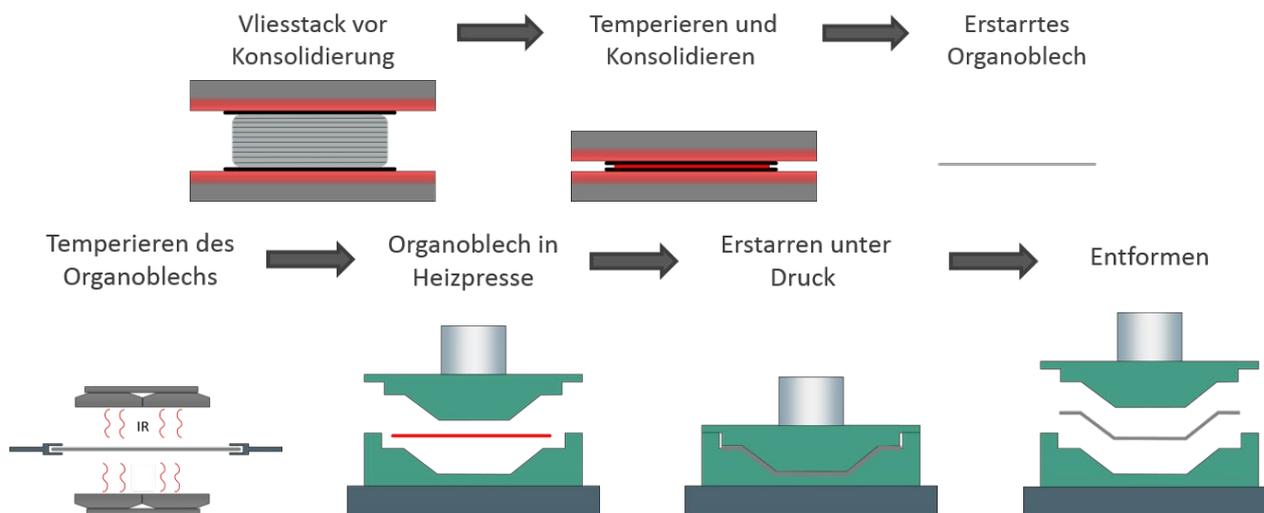


Abbildung 3.2.1.12: Beschreibung der Prozessroute zur Herstellung von Organoblechen und anschließendes Umformen am Fraunhofer IGCV.

Für diese Versuche werden Organobleche verarbeitet mit einer Matrixvariante aus MAPP (ELG #12) und einer aus PA6 (ITA #8) besitzen. Für das Aufheizen der Halbzeuge wird das IR-Feld des Fraunhofer IGCV, das ein Eigenbau des Instituts ist und Krelus IR-Strahler besitzt, eingesetzt. Zuerst werden Versuche zur benötigten Aufheiztemperatur durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die MAPP-Vliese eine gemessene Oberflächentemperatur von 180 °C und die PA6 Vliese eine Temperatur von 250 °C für optimale Ergebnisse benötigen. Für den Transfer der Organobleche zur Presse, wird das am Fraunhofer IGCV vorhandene Handlingsystem der sog. Spannrahmen so umgebaut, dass die Vliesstacks gut gegriffen werden können (siehe Abbildung 3.2.1.13). Des Weiteren werden unterschiedliche Versuche durchgeführt um die Transferzeit zwischen IR-Strahler und Heizpresse auf ein Minimum zu

<sup>1</sup> Leonhard Reichenberger, Isothermes Umformen von Organoblechen auf Basis rezyklierter Carbonfasern, Universität Augsburg, Bachelorarbeit, 2020

verkürzen. Damit verbunden ist nämlich die Abkühlung des Vliesstapels um eine bestimmte Temperaturdifferenz. Je geringer diese Differenz ist, je besser lassen sich die Organobleche in der Heizpresse umformen und umso besser ist die Konsolidierung der umgeformten Bauteile. Als minimale Transferzeit können ca. 10 Sekunden erreicht werden. Für die Umformung und Erstarrung der erhitzten Organobleche muss zudem eine geeignete Werkzeugtemperatur gefunden werden. Hier ergeben die Versuche der Bachelorarbeit eine optimale Temperatur von 130°C für MAPP und 160°C für PA6 für Umformversuche. Mit diesen Parametern können faltenfreie umgeformte Bauteile ohne starken Faserzug hergestellt werden.

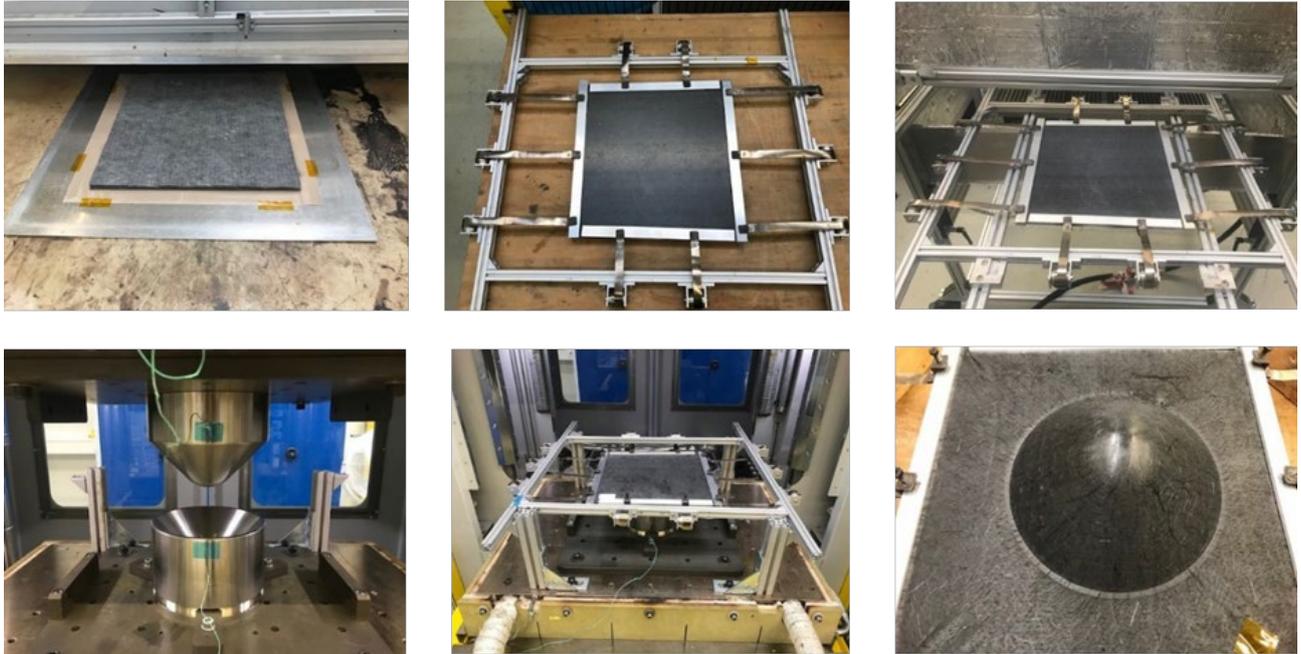


Abbildung 3.2.1.13: Prozessschritte zur Herstellung von Organoblechen, aufheizen, Transfer zur Presse und Umformen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich PA6 im Vergleich zu MAPP einfacher verarbeiten lässt und die Ausschussrate somit geringer ausfällt. Außerdem können Bauteile mit einer besseren Konsolidierung hergestellt werden. Eine gute Aussage über die Bauteilequalität, kann durch die Dicke gemacht werden. Je näher die Dicke des Bauteils an die theoretisch errechnete Bauteildicke heranreicht, desto höher ist der Konsolidierungsgrad und je geringer fällt die Zahl der sog. Lunker aus.

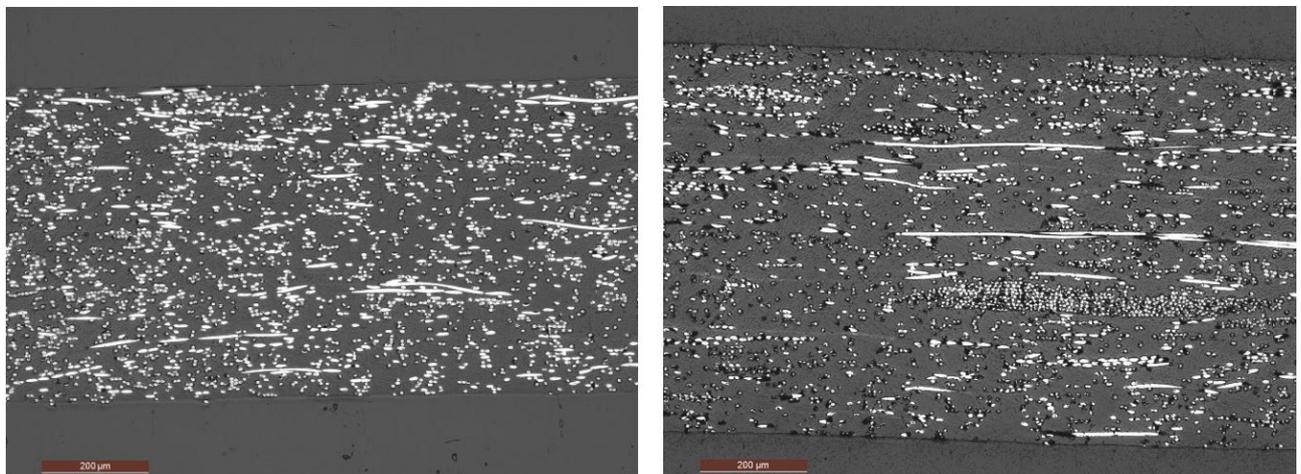


Abbildung 3.2.1.14: Schliffbilder von umgeformten Organoblechen, hergestellt am Fraunhofer IGCV (links) und in der Doppelbandpresse bei der Firma Meyer Maschinenfabrik GmbH (rechts)

Eine weitere Methode um eine Aussage über die Qualität der Konsolidierung von CFK-Bauteilen treffen zu können, ist die das Herstellen von Schliffbildern. In der Abbildung oben sind Schliffbilder von umgeformten Organoblechen zu sehen. Die linke Abbildung zeigt das Schliffbild eines Bauteils das aus einem Organoblech geformt wird, welches mit dem oben beschriebenen Prozess am Fraunhofer IGCV hergestellt wird. Wie bereits erwähnt, besitzen diese Organobleche eine deutlich bessere Konsolidierungsqualität als die, die industriell mit Hilfe der Doppelbandpresse der Firma Meyer Maschinenfabrik GmbH produziert werden. Rechts ist das Schliffbild eines Bauteils zu erkennen, das aus einem Organoblech aus dem industriellen Herstellungsprozess stammt. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl an Fehlstellen im linken Schliffbild lässt sich schließen, dass die Organoblechqualität auch einen starken Einfluss auf die spätere Bauteilqualität hat.

### Ermittlung von Verarbeitungsparametern zum Thermoformen

In der folgenden Abbildung ist der Thermoforming-Prozess dargestellt, der am ITA Augsburg innerhalb des Ca-RinA-Projekts erarbeitet wird.

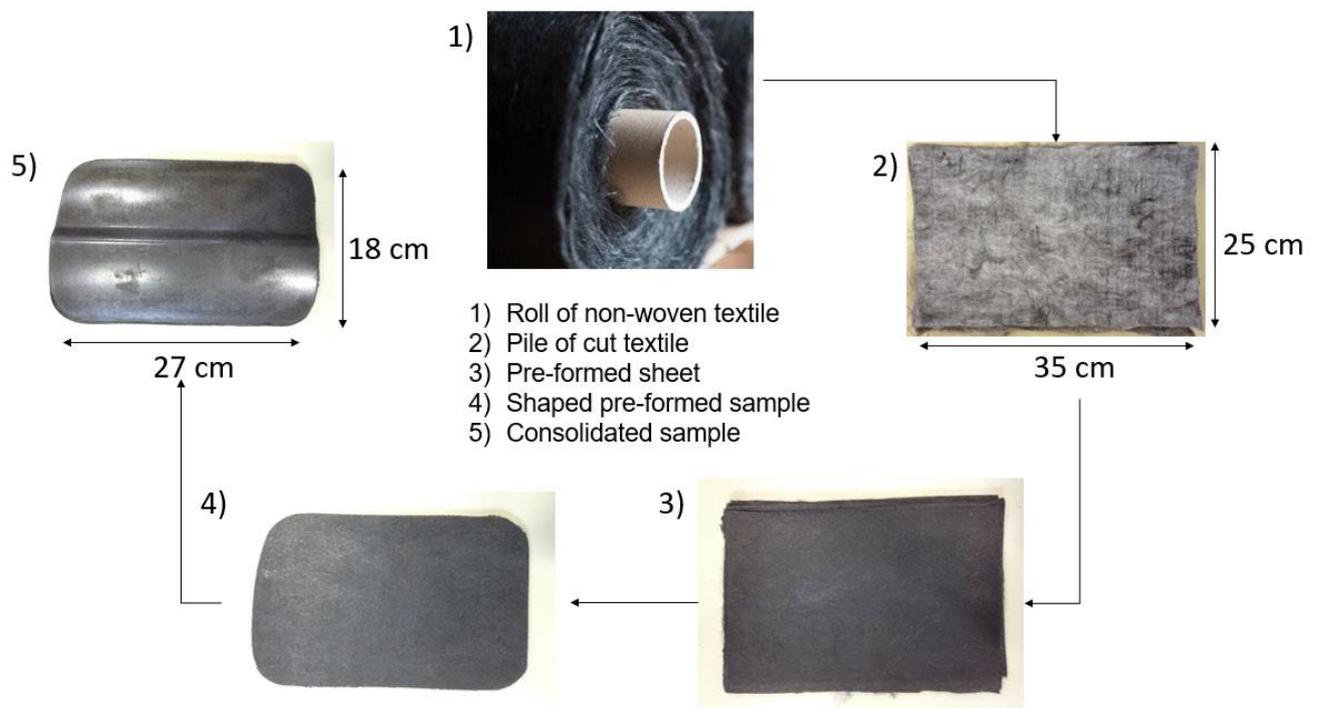


Abbildung 3.2.1.15: Prozessablauf des Thermoformens

Vor der Konsolidierung erfolgt der Zuschnitt (2) aus den hergestellten Vliesstoffrollen (1). Die Zuschnitte werden mit Hilfe einer Kniehebelpresse (3) vorkonsolidiert. Anschließend wird der Probekörper auf Werkzeugform geschnitten (4) und anschließend zum Bauteil verpresst. Das Material wird mithilfe eines Infrarotofens aufgeheizt und durch einen Roboter mit Nadelgreifer gehandelt (siehe Kap. 3.1.4).

In Vorversuchen werden geeignete Pressparameter für Vliesstoffbauteile ermittelt. In der folgenden Abbildung ist das verwendete Werkzeug dargestellt. Links sind die Oberschale und rechts die Unterschale des Werkzeugs abgebildet.

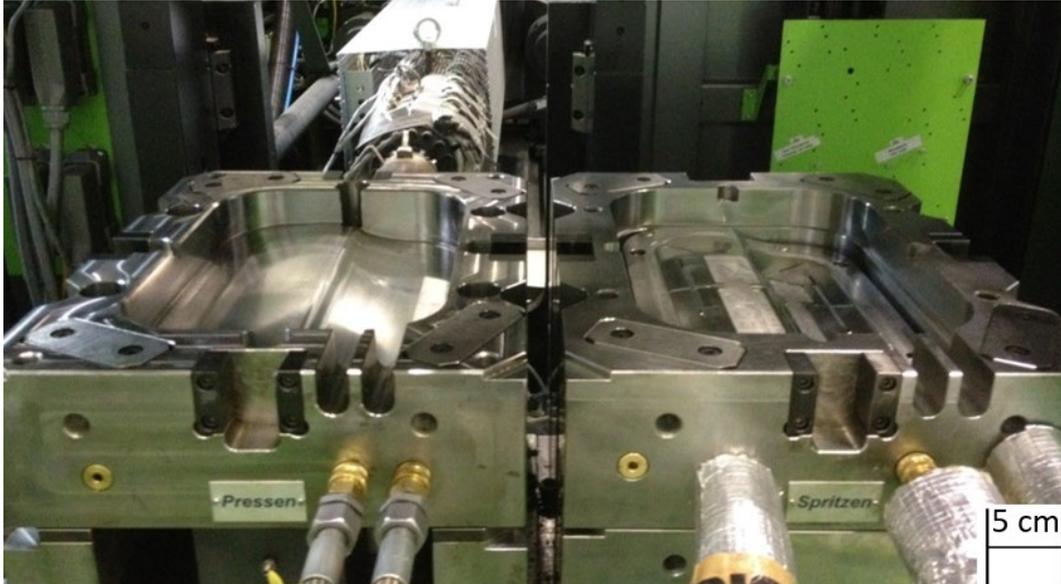


Abbildung 3.2.1.16: Geöffnetes Werkzeug der Engel Spritzgusspresse, Oberschale (links), Unterschale (rechts).

In Vorversuchen werden für den ITA-Prozess verschiedene Maschinenparameter für Temperatur, Druck und Verweilzeit validiert (Tabelle 3.2.1.10).

Tabelle 3.2.1.9: Parameter für das Thermoformen und Spritzgießen am ITA Augsburg.

Parameter	Einheit	Wert
$T_{\text{Oberschale}}$	°C	120
$T_{\text{Unterschale}}$	°C	100
Presskraft	kN	2000
Kühlzeit	s	40

### 3.2.2 Arbeitspaket: Drapierstudie

Die bisherigen Arbeiten im Projekte beschäftigen sich maßgeblich mit der Verarbeitung und den Eigenschaften von Vliesen. Dazu werden in der Regel zweidimensionale Platten hergestellt, aus welchen anschließend Prüfkörper geschnitten werden. Im Arbeitspaket 3.2.2 soll sich hingegen mit der Herstellung komplexerer Bauteile beschäftigen werden. Bisher gibt es hier noch sehr wenig Untersuchungen, so dass dieses Thema einen neuen Themenkomplex einführt. Um geometrisch anspruchsvolle Bauteile herzustellen muss der rCF-Vliesstoff in der Lage sein sich komplexen Formen anpassen zu lassen können ohne zu reißen, ohne dass sich Falten bilden und ohne dass sich Fasern massiv zu verschieben. Um diese Effekte messbar machen zu können, verwendet man im Neufaserbereich den Textechno Drapetest, welcher von Textechno für Gewebe und Gelege entwickelt wurde. Zu dieser Entwicklung gehört auch die Erstellung der DIN SPEC 8100:2015-11, welche den Vorgang in einem Normenentwurf zusammenfasst. Da dieses Gerät eigentlich für ein anderes Ausgangsmaterial entwickelt wurde, muss die Anlagentauglichkeit für Vliesstoffe bewiesen werden. Diese Versuche werden im Rahmen der Bachelorarbeit von Xiaotong

Guo<sup>1</sup> durchgeführt. Ein Teil dieser Versuchsdokumentation ist von den Arbeiten von Xiaotong Guo übernommen oder an diese angelehnt.



Abbildung 3.2.2.17: Am Fraunhofer IGCV genutzter Drapetester (links), umgeformtes Trockenvlies (mitte) und Faltenanalyse an der Drapetest Software (rechts).

Tabelle 3.2.2.1 zeigt alle eingesetzten Materialien die für die Drapierstudie eingesetzt werden. Die Materialien unterscheiden sich dabei in Trockenvliese und Nassvliese sowie ein Airlaymaterial von Autefa zur Referenz. Ein großes Spektrum der Materialien wird gewählt, um die unterschiedlichen Verfestigungsarten zu vergleichen.

Tabelle 3.2.2.10: Eingesetzte Materialien für die Drapierstudie.

Vliestyp	Fasertyp	Matrixtyp	Gew.-% CF	Verfestigung	Vlieshersteller
#1	vCF	X	100%	Vernadeln	ITA
#1.1	vCF	X	100%	Vernadeln	ITA
#2	vCF	X	100%	Vernadeln	Tenowo
#3	vCF	PA6	40%	Vernadeln	ITA
#3.1	vCF	PA6	40%	Vernadeln	ITA
#4	vCF	PA6	51%	Vernadeln	Tenowo
#5	vCF	MAPP	45%	Vernadeln	ITA
#8	pCF	PA6	40%	Vernadeln	ITA
#9	pCF	PA6	51%	Vernadeln	Tenowo
#10	pCF	PET	36%	Vernadeln	ITA
#11	vCF	PA6	40%	Maliwatt	Tenowo
#12	pCF	MAPP	45%	Vernadeln	ELG
#13	pCF	PPS	39%	Vernadeln	ELG
#14	pCF	PA	40%	Vernadeln	ELG
#15	pCF	X	100%	Vernadeln	ELG
#NV1.1	pCF	PA6	30%	PVOH 5%	AWA Paper
#NV1.2	pCF	-	100%	PVOH 5%	AWA Paper
#NV2	vCF	-	100%	PVA 7%	Marubeni
#Airlay	vCF	PP	20%	Vernadeln	Autefa

<sup>1</sup> Xiaotong Guo, Bewertung der Drapierbarkeit von Vliesstoffen aus recycelten Carbonfasern, Hochschule Nordhausen, Bachelorarbeit, 2020.

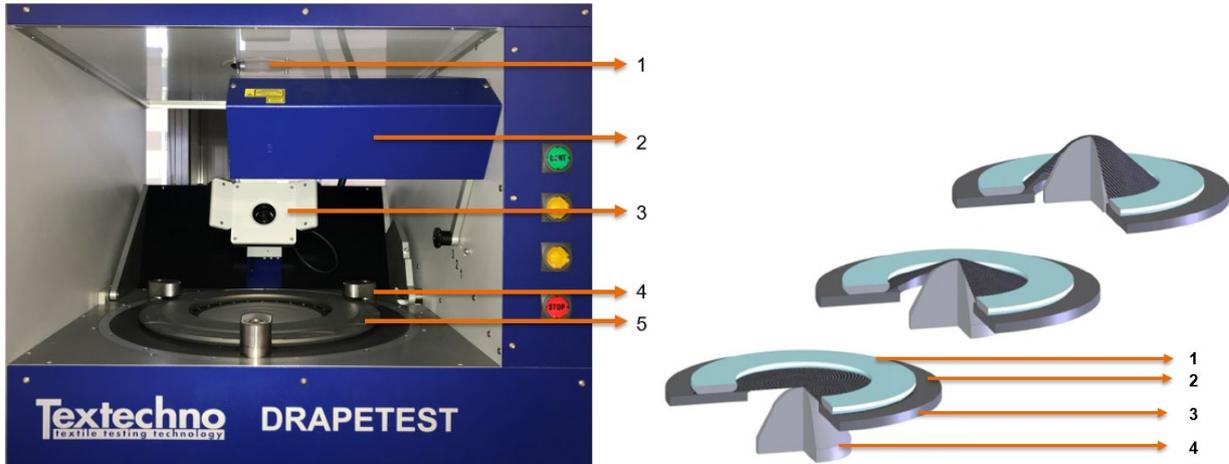


Abbildung 3.2.2.18: Links: Der Aufbau des Prüfgeräts DRAPETEST; (1) Gesamtbildkamera; (2) Laser-Triangulationssensor; (3) Detailkamera; (4) Haltevorrichtung; (5) Rückhaltering. Rechts: Abbildung der konischen Prüfkalotte (4) mit (1). Rückhaltering; (2). Testkörper und (3) Auflagefläche.

Als eine automatisierte Prüfmaschine kann der DRAPETEST Verformungskraft, Faltenbildung, Faserorientierung, Faserwinkeländerung, Gap, Unrundheit und Porengröße von Gelegen und Geweben messen. Die Bewertung der obengenannten Faktoren wird zur Charakterisierung der Drapierbarkeit verwendet. Bei der Prüfung von Vliesstoffen sind jedoch die meisten Faktoren nicht bewertbar, da Vliesstoff im Gegensatz zu Gewebe- und Gelegematerial wegen seinen kurzen Fasern und seiner chaotischen Struktur keine klare Faserorientierung besitzt und somit keine Merkmale des DRAPETESTs für eine Auswertung verwendet werden könnten. Deswegen ist bei Vliesstoffen keine Charaktervermessungen außer Verformungskraftmessung und Messung der Faltenhöhe durchführbar.

### Analyse der Faltenbildung von Vliesstoffen

Da mit der Vernadelungs- oder Nähwirkmaschine nicht alle Fasern oder Rovings in den Vliesstoff eingebracht werden kann, stehen Fasern von der Oberfläche ab. Während der Erhöhung der Kalotte (durch Verfahren der Kalotte auf die Drapierstufe) können sich nicht eingebrachte Fasern und Rovings von der Oberfläche des Vlieses abheben, siehe Abbildung 3.2.2.3. Der DRAPETEST erkennt die Fasern oder Rovings fälschlicherweise als Falten. Dies führt zu einer Abweichung beim Messen der Faltenhöhe.



Abbildung 3.2.2.19: Vom Vliesstoff abgehobene Fasern (a.) und Rovings (b. [Guo20]).

Die oben beschriebene Problematik sollte bei Eingabe der Faltenhöhe in das Messprogramm berücksichtigt werden. Es muss bestimmt werden, ab welcher Höhe eine Schwankung auf dem Testkörper als Falte gilt. Um diese Schwankungshöhe herauszufinden, wird eine Voruntersuchung durchgeführt. Bei dieser wird ein Testkörper je Vliestyp

eben auf die Auflagefläche an der Ausgangsposition aufgelegt und deren Oberfläche durch den Laser-Triangulationssensor gescannt.

Das Faltenbildungsverhalten beim Drapieren eines textilen Halbzeuges hat eine wichtige Bedeutung für die Verarbeitbarkeit des Vliesstoffes. Die sich bei der Drapierung auf dem Vliesstoff bildenden Falten können unter Umständen bei der weiteren Verarbeitung erhalten bleiben und zu mechanischen Schwachstellen im Bauteil führen. Durch die Analyse des Faltenbildungsverhaltens kann eingeschätzt werden, wie sich der Vliesstoff bei der Verarbeitung zu einem 3D-Kompositebauteil in dem Umformwerkzeug verhält. Beim Durchführen des Drapetestes wird in der Anfangsposition davon ausgegangen, dass der Vliesstoff flach ist und keine Falten aufweist. Aus den Prüfergebnissen der sechs Prüfkörper wird die Faltenanzahl jeder Drapierstufe und die Gesamtfaltenanzahl berechnet, siehe Tabelle 3.2.2.2. Aufgrund des frühen Reißens von Nassvlies ist die Auswertung seiner Faltenanzahl nicht sinnvoll.

Tabelle 3.2.2.11: Analyse der Faltenanzahl in Abhängigkeit der Kalottenhöhe und des Vliesstoffes.

Vliestyp	Gesamtzahl der Falten								
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm	
#NV1.1	0	3	6	aufgerissen					
#NV1.2	0	5	aufgerissen						
#NV2	0	aufgerissen							
#1	0	3	8	10	12	12	aufgerissen		
#1.1	0	8	7	2	0	0	0	0	
#2	2	0	4	3	3	3	aufgerissen		
#3	0	2	12	11	10	3	0	0	
#3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	
#4	4	11	20	19	23	24	5	4	
#5	0	0	2	4	3	1	0	0	
#8	0	3	10	13	11	6	0	0	
#9	2	11	21	21	23	19	1	3	
#10	1	0	0	0	0	0	0	0	
#11	3	17	16	0	0	0	0	0	
#12	1	6	23	24	22	21	2	2	
#13	1	10	23	21	20	16	5	4	
#14	0	14	20	20	20	20	2	2	
#15	5	15	23	23	22	22	aufgerissen		
#A	0	1	15	20	19	15	0	0	

Neben der Anzahl der Falten kann auch die Höhe der Falten gemessen werden. Beide Messwerte liefern eine Aussage über die Drapierbarkeit von Vliesstoffen und Kennwerte für eine mögliche Umformsimulation. Anhand der beiden Werte kann auch eine gemittelte Faltenhöhe pro Vlies und Verformungsgrad bestimmt werden, welche ein guter Anhaltspunkt zur Prozesssimulation sein kann. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Vliese #14 und #15 die meisten und größten Falten werfen. Diese sind beide Vliesstoffe von ELG, was einen gewissen systematischen Effekt erklären lässt, da beide Vliese ähnlich hergestellt werden. Beide Vliese haben relativ lange Fasern verglichen mit den bei Marubeni eingesetzten Fasern welche zudem noch aus EOL-Abfällen pyrolysiert wurden. Besonders hervorzuheben ist das Verhalten der Nassvliese, welche ebenfalls starke Falten zeigen und zudem auch noch schnell einreißen. Daher kann eine korrekte Auswertung und ein Vergleich zu den Trockenvliesstoffen nicht fair durchgeführt werden. Nassvliese sind auf Basis der ersten Untersuchungen somit als schlecht im Hinblick auf die Faltenbildung zu betrachten. Ein Grund hierfür ist definitiv der eingesetzte Binder, welcher die Vliese sehr starr macht.

## Analyse der Drapierkraft an Vliesstoffen

Zuerst wird ein kreisrunder Probekörper mit einem Durchmesser von 325 mm aus dem Vliesstoff geschnitten. Vor dem Test wird jede Messprobe gewogen und die flächenbezogene Masse, in g/m<sup>2</sup>, ermittelt um die gemessene Kraft nach der Messung normieren zu können. Zur Messung der Verformungskraft (auch Drapierkraft genannt) fährt die konische Kalotte des Prüfstandes um jeweils 10 mm nach oben und misst anschließend die Kraft die für diese Verformung nötig ist. Die Drapierkraft wird aus dem Mittelwert der maximalen Verformungskraft errechnet. Zur Auswertung des Mittelwerts werden sechs Messproben je Material verwendet. Aus dem Verlauf der von dem Programm automatisch aufgezeichneten Verformungskraft-Drapierstufen-Kurve wird ersichtlich, bei welcher Höhe die maximale Drapierkraft erreicht ist und ob der Vliesstoff durch die Kraft der Kalotte reißt. Im Fall, dass der Prüfkörper bei einer Kalottenhöhe von 80 mm und einer Winkelposition von 0° noch nicht gerissen ist, wird von der maximalen Verformungskraft ausgegangen. Da die Kalotte sich nur auf eine Höhe von 80 mm angehoben werden kann, ist die errechnete „maximale Drapierkraft“ für das ungerissene Material noch nicht die kritische Drapierkraft, die eine Zerstörung des Vliesstoffs zur Folge hätte. Wenn der Prüfkörper reißt, wird der dazugehörige Kraftwert als maximale Drapierkraft verwendet.

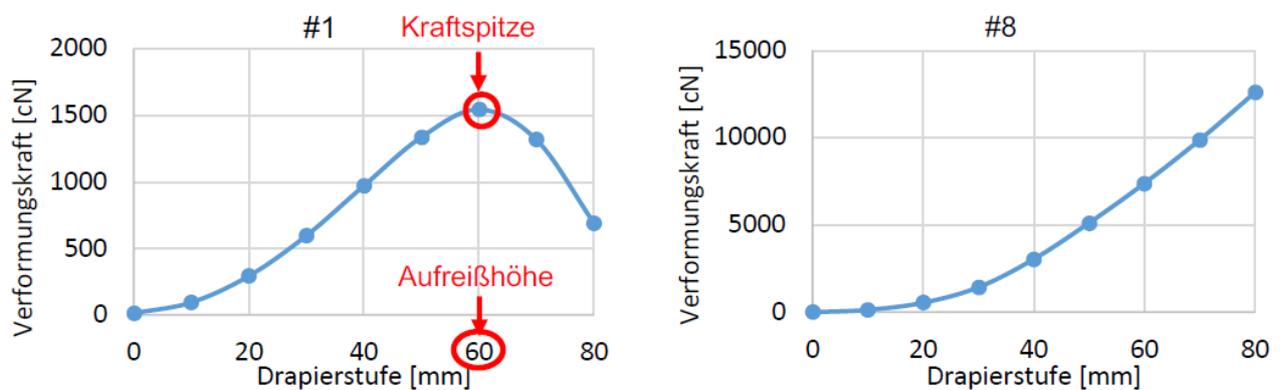


Abbildung 3.2.2.20: Die Verformungskraft-Drapierstufe-Kurve des gerissenen Vliesstoffs #1 (links) und des ungerissenen Vliesstoffs #8 (rechts) [Guo20].

Unter den Trockenvliesen reißen nur die 100%-igen Trockenvliese #1, #2 und #15 bei einer Höhe von 60 mm auf, während das 100%-ige #1.1 mit einer Faserlänge von 60 mm bei der Prüfung nicht aufgerissen wird. Dies ist auf eine größere Faserlänge zurückzuführen, die es den Fasern ermöglicht stärker auseinander gezogen zu werden, ohne dass der Vliesstoff dabei reißt. Darüber hinaus kann die Elastizität des Hybridvliesstoffs und die Reibung zwischen den Fasern mithilfe von weichen, gekräuselten und elastischen Polymerfasern erhöht werden. Daraus resultiert eine bessere Dehnbarkeit des Hybridvliesstoffs gegenüber der des 100%-igen Trockenvlieses bei gleichbleibender Faserlängenverteilung. In Abbildung 3.2.2.5 ist der Mittelwert aus den 6 Prüflingen jedes Vliesstoffes aufgetragen. Innerhalb der Hybridvliese mit 250 g/m<sup>2</sup> Soll-Flächengewicht zeigt #4 mit 43,49 N die niedrigste Drapierkraft und #8 mit 126,01 N die größte Drapierkraft. Da der Wirkfaden des Maliwatts die Drapierkraft teilweise aufnehmen kann, weist #11 mit 190,79 N die größte Drapierkraft auf.

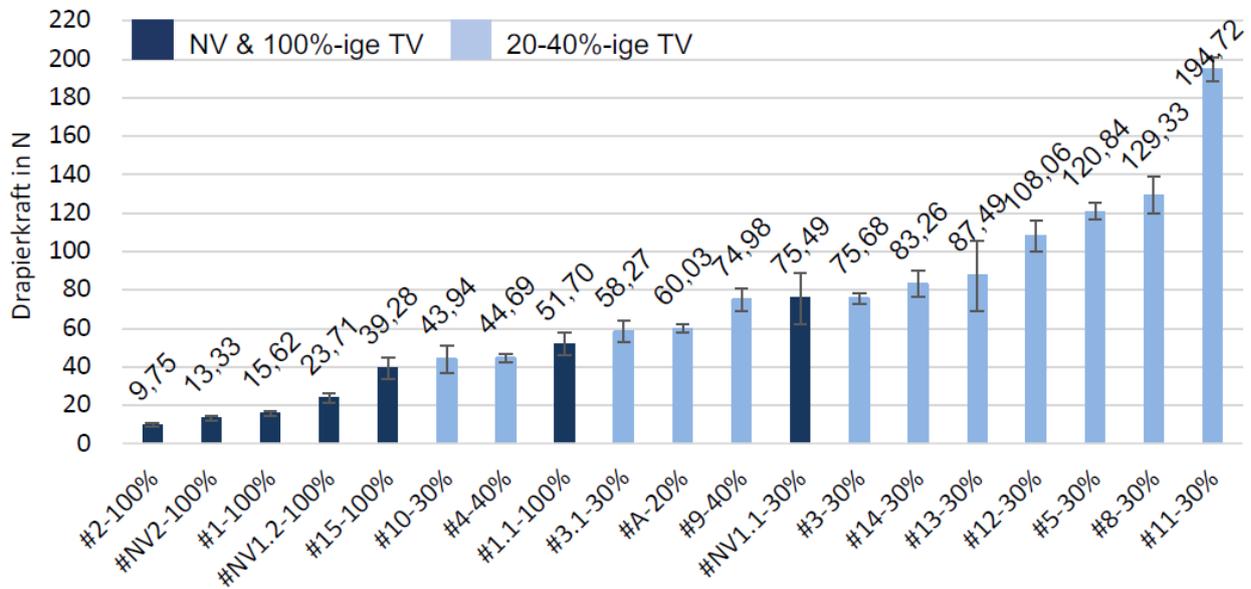


Abbildung 3.2.2.21: Mittelwert der maximalen Drapierkraft aller untersuchter Vliesstoffe [Guo20].

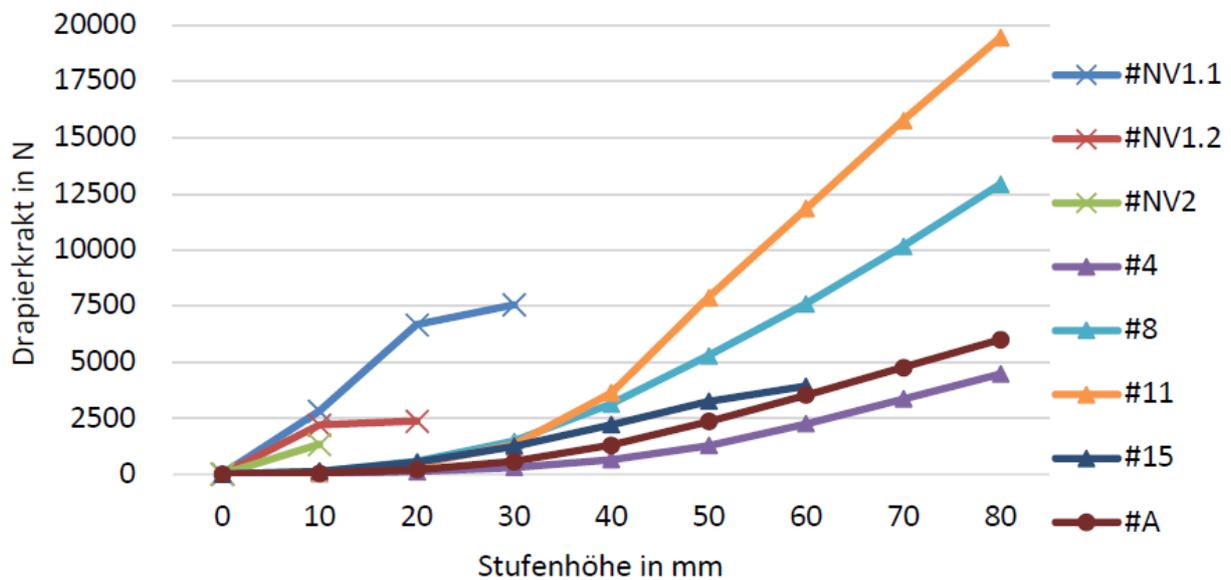


Abbildung 3.2.2.22: Drapierkraft über Drapierstufe von unterschiedlichen Materialien am Drapetest ermittelt [Guo20].

Im Unterschied zum sanften Anstieg der Verformungskraft-Drapierstufe-Kurve bei den Trockenvliesen und dem Airlay-Vliesstoff steigt die Kurve bei Nassvliesen rapide an bevor es früh einreißt, siehe Abbildung 3.2.2.6. Das Nassvlies zeigt die stärkste Erhöhung der Drapierkraft und ein sehr frühes einreißen des Material. Daraus kann gefolgert werden, dass dieses Material nicht gut trocken verformt werden kann. Gründe dafür sind die geringe Grammatur, die kurzen Faserlängen und damit fehlende Faserverschlingung und ein eingebrachter Binderanteil. Die Faserlänge spielt eine wichtige Rolle bei der Drapierung. Wenn der Vliesstoff aus kurzen Fasern besteht, wird er bereits bei einer niedrigen Drapierstufe zerissen. Aufgrund der Faserlängebeschränkung durch das Herstellungsverfahren zeigt das Nassvlies eine viel schlechtere Dehnbarkeit und Drapierbarkeit als das Trockenvlies oder Airlay-Vliesstoff. Wenn das Hybridtrockenvlies und das 100%-ige Trockenvlies die gleiche Faserlänge besitzen, zeigt das Hybridtrockenvlies aufgrund seines Anteils an Polymerfasern eine höhere Elastizität und bessere Dehnbarkeit als

das 100%-ige Trockenvlies. Außer der Faserlänge ist die Verfestigungsmethode des Vliesstoffs ein wichtiger Faktor zur Bestimmung der Drapierkraft. Im Vergleich zum Nassvlies und dem durch Vernadelung verfestigten Trockenvlies kann das Maliwattmaterial #11 aufgrund seines Wirkfadens eine deutlich größere Drapierkraft aufnehmen.

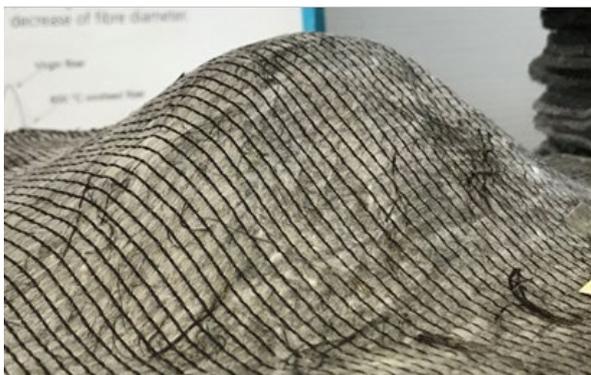


Abbildung 3.2.23 : Umgeformte Vliesstoffe und typisches Fehlerbild von schlecht drapierbaren Materialien.  
#8 (oben links), #2 (oben rechts), # 11(unten rechts), #NV1.2 (unten rechts).

### Analyse der Biegesteifigkeit bzgl. des Einflusses auf Drapierbarkeit

Weitergehend wird die Biegesteifigkeit der Materialien anhand der DIN EN ISO 9073-7 ermittelt. Hierbei zeigt sich eine sehr hoch (nicht messbare) Biegesteifigkeit der Nassvliese aufgrund des eingebrachten Bindermaterials. Alle anderen Materialien zeigen eine Biegesteifigkeit im Bereich von 50- 400 mN\*cm. In Ausnahme zu Material #2 haben Materialien mit einem 100% rCF Anteil eine höhere Biegesteifigkeit was an der Unterschiedlichen Fixierung des Materials und der fehlenden weichen Thermoplastfaser liegen kann. Auch ein Unterschied in 0° und 90° kann festgestellt werden. Allerdings liefert dieser keinen Zusammenhang mit den mechanisch ermittelten Biegesteifigkeiten und deckt sich nicht mit den Beobachtungen aus den anderen Drapiertests. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Biegesteifigkeit eine sehr schnell und einfach zu bestimmende Eigenschaft darstellt jedoch nur begrenzt Aussagen zur Drapierbarkeit liefert.

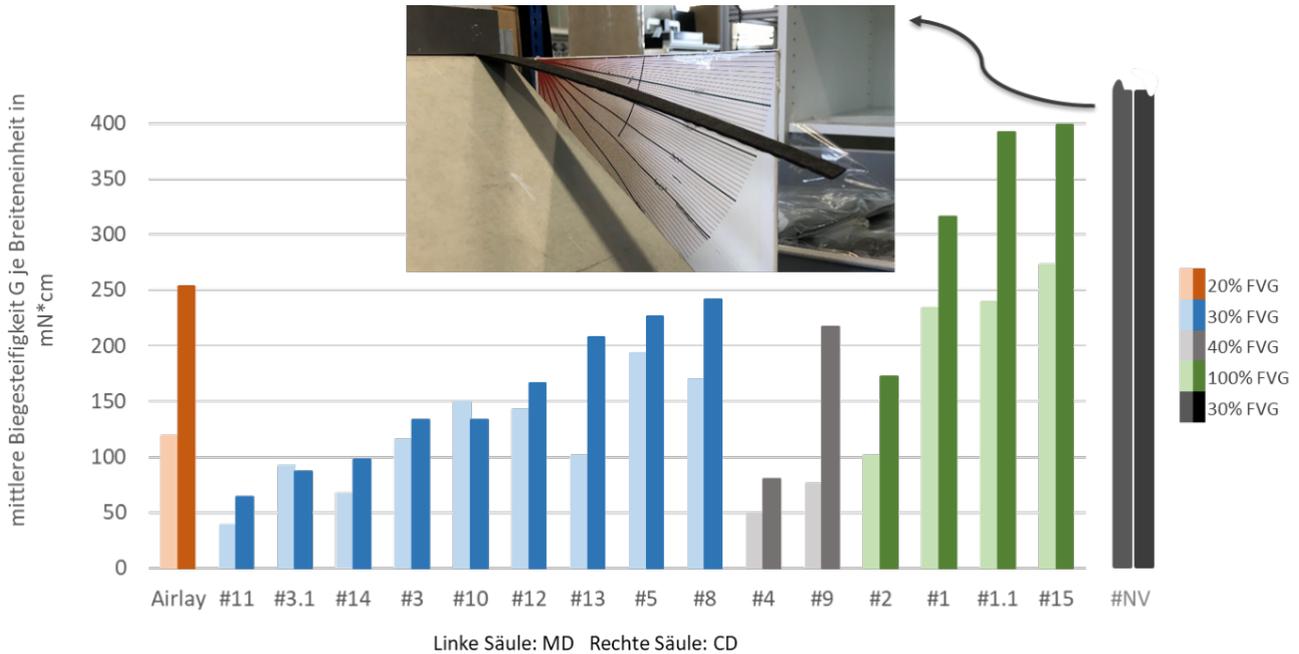


Abbildung 3.2.2.24: Biegesteifigkeiten der Vliesstoffe ermittelt nach DIN EN ISO 9073-7. Farblich gekennzeichnet ist hierbei der Faservolumenanteil [Guo20].

### Analyse des Relaxationsvermögens als Einflussfaktor auf die Drapierbarkeit

Neben der Drapierkraft wird mittels des Drapetesters auch ein Relaxationsvermögen berechnet. Hierzu wird die Drapierkraft ab einer Kalottenhöhe von 30 mm betrachtet und der Abfall der Kraft pro 5 Sekunden ausgewertet. Dieses Vorgehen wird für alle weiteren Kalottenhöhen (40, 50, 60, 70 und 80 mm) erneut gemessen. Anschließend wird der Mittelwert aus den diskreten Relaxationen gebildet.

Unter dem Begriff „Relaxation“ versteht man einen Rückgang der Drapierkraft beim Drapierertest. „Relaxationsvermögen“ ist ein Wert, an dem man sieht, wie gut ein Vliesstoff Umformungskräfte durch Verschiebung der Einzelfasern aufnehmen kann. Wenn der Vliesstoff ein gutes Relaxationsvermögen besitzt, ist die Erreichung eines höheren Umformgrads mithilfe einer langsamen Drapierung möglich. Wenn die Kalotte sich mit dem Testkörper zusammen in 30° Schritten von 0° auf 330° dreht, misst die Kraftmessdose bei jedem Schritt die Drapierkraft  $DK_i$ , siehe. Das heißt, je Drapierstufe  $i$  werden 12 Drapierkräfte gemessen. Die Vermessungszeitspanne zwischen  $DK_i$  und  $DK_{i+1}$  beträgt ca. 5 Sekunden.

Um das prozentuale Relaxationsvermögen  $Re$  eines Vliesstoffs zu berechnen, werden erst die Einzelrelaxationsvermögen  $\overline{Re}_i$  jeder Drapierstufe mit folgender Gleichung berechnet:

$$\overline{Re}_i = \frac{\sum_{i=1}^{11} \left( \frac{DK_i - DK_{i+1}}{DK_i} * 100\% \right)}{11}$$

Anhand der errechneten Einzelrelaxationsvermögen  $\overline{Re}_i$  kann man erkennen, dass diese erst ab einer Höhe von 30 mm relativ stabil werden. Deswegen ist eine Stufenhöhe erst ab 30 mm verwendbar. Bei den nicht reißenden Vliesstoffen wird aus dem Durchschnittswert der sechs Einzelrelaxationsvermögen  $\overline{Re}_i$  bei einer Stufenhöhe von 30 mm bis 80 mm das finale Relaxationsvermögen  $Re$  berechnet. Aufgrund des frühzeitigen Reißens der Nassvliese, erhält man keinen brauchbaren  $\overline{Re}_i$ -Wert, der für eine Auswertung genutzt werden könnte. Deswegen ist das Relaxationsvermögen von Nassvliesen bei dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Das Ergebnis des ausgewerteten Relaxationsvermögens  $Re$  ist in Abbildung 3.2.2.9 dargestellt.

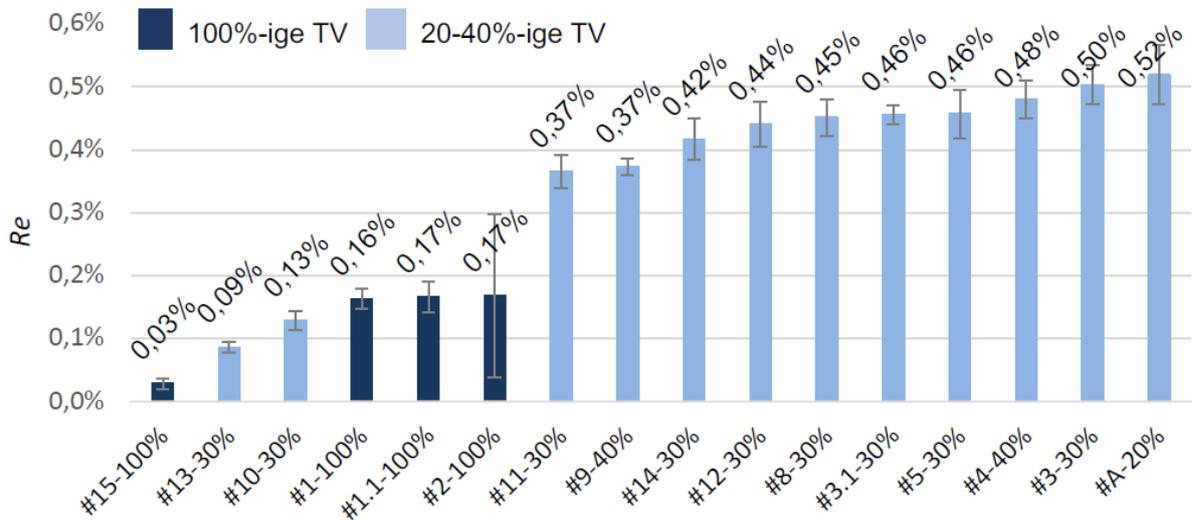


Abbildung 3.2.2.25: Das prozentuale Relaxationsvermögen  $Re$  von unterschiedlichen Vliesstoffen [Guo20].

Das Ergebnis zeigt, dass der **Re**-Wert bei #13 (PPS-Matrix) und #10 (PET-Matrix) deutlich niedriger ist, als der der anderen Hybridvliesstoffe. Vergleicht man die unterschiedlichen Dehnraten der Matrix wird ersichtlich, dass PET mit 36-52% Dehnung und PPS mit 46% Dehnung gegenüber PP (bis 80%) und PA6 (80%) deutlich steifer sind und ein direkter Zusammenhang zwischen gewählter Matrixfaser und Relaxation besteht. Vliesstoffe aus 100% rCF weisen ein noch geringeres Relaxationsvermögen auf, da diese nur aus CF mit einer Dehnung von 1,5-2% bestehen.

### Analyse der Drapierbarkeit beim Thermoformen

Die Hybridvliesstoffe #4, #8, #11, #A und #NV1.1 werden zusätzlich durch ein im Fraunhofer IGCV Technikum durchgeführtes Verfahren zu Organoblechen verarbeitet und diese Organobleche anschließend durch die mit Hutwerkzeug versehene isotherme Heißpresse zu 3D-Bauteilen weiterverarbeitet.

Abbildung 3.2.2.10 zeigt den Herstellungsprozess der Organobleche am Fraunhofer IGCV. Zur Herstellung der Organobleche werden die Vlieslagen, nach dem Eintrennen der metallischen Transferbleche mit dem Trennmittel „Frekote 700-NC“, mittig zwischen die Bleche in den Heiztisch eingelegt. Anschließend wird der Heiztisch geschlossen. Nun wird der Stack durch das Eigengewicht des Heiztisches zusammengepresst und erwärmt. Die einzustellende „Erwärmungstemperatur“ des Heiztisches hängt vom Schmelzpunkt der thermoplastischen Kunststofffasern ab, siehe Tabelle 3.2.13. Die geeignete Erwärmungstemperatur liegt leicht über dem Schmelzpunkt der Polymerfasern. Bei dieser Temperatur schmelzen die Polymerfasern nur unvollständig und verbinden sich mit den CF ohne die Vliesstofflagen zu zerstören. Nach einer Erwärmung von 10 Minuten wird das Organoblech herausgenommen. Erst nachdem dieses auf Raumtemperatur abgekühlt ist, werden die Transferbleche geöffnet, um eine Schrumpfung zu vermeiden.

Tabelle 3.2.2.12: Einstellungen der Herstellung der Organobleche am Fraunhofer IGCV.

Vliestyp	Erwärmungstemperatur / °C	IR-Temperatur / °C	Haltezeit	Schmelztemperatur / °C	Pressdruck / bar
#4-1	222	250	1 min	160	50
#4-2	222	250	1 min	160	50
#8-1	222	250	1 min	160	
#8-2	222	250	1 min	160	60
#11-1	222	255	1 min	160	50
#11-2	222	250	1 min	160	50
#Airlay	162	180	30 s	100	30
#NV1.1-1	215	250	1 min	160	50
#NV1.1-2	215	250	1 min	-	-

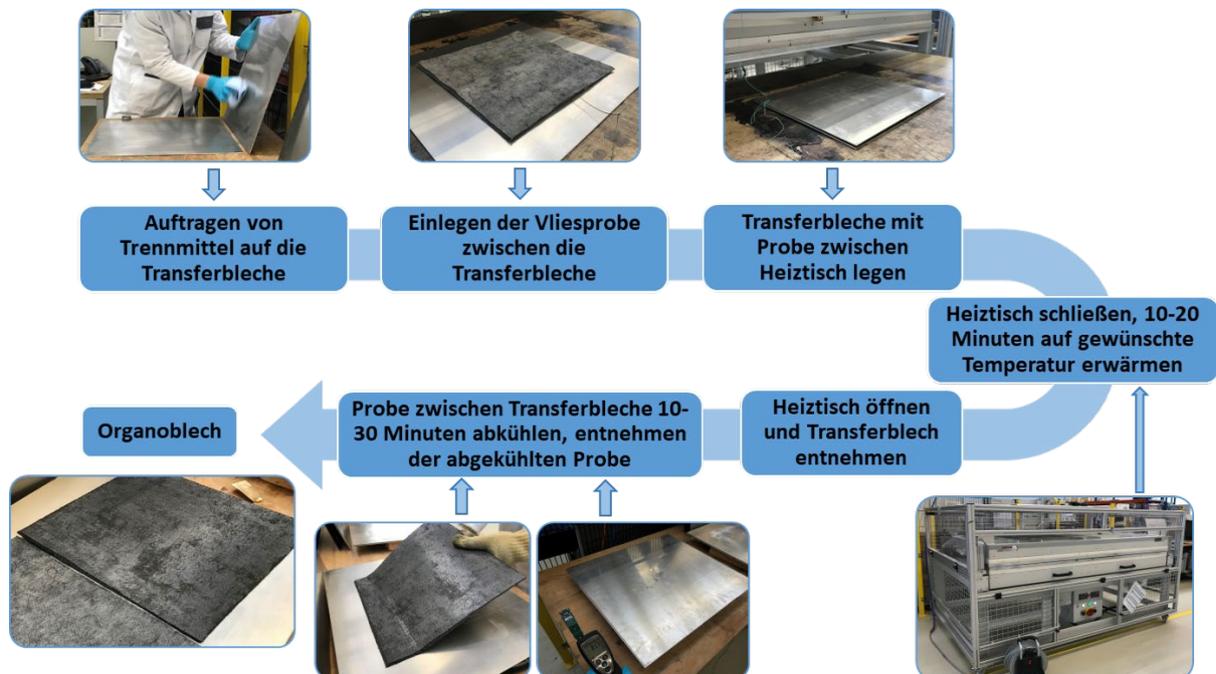


Abbildung 3.2.2.26: Darstellung des Herstellungsprozesses eines Organobleches im Fraunhofer IGCV Technikum [Guo20].

Das vorkonsolidierte Organoblech wird dann wie in dem in Abbildung 3.2.2.11 dargestellt Isotherm-Heißpressverfahren zu einem hutförmigen 3D-Bauteil verarbeitet.

Das durch Punkt- oder Schienenhalterung befestigte Organoblech wird in einen IR-Strahler gelegt. Im IR-Strahler wird das Organoblech schnell auf die Schmelztemperatur erwärmt. Nach kurzer Haltezeit im IR-Strahler wird das verschmolzene Organoblech sofort zum auf Erstarrungstemperatur vorgeheizte Umformwerkzeug transportiert. Die Erstarrungstemperatur wird bei den Versuchen variiert um das bestmögliche Ergebnis zu erhalten. Die Erstarrungstemperatur liegt unterhalb der Glastemperatur, ist aber noch ausreichend hoch, um nicht zur Schrumpfung des Organobleches zu führen. Nach einer drei minütigen Konsolidierung wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil kann aus dem Werkzeug entnommen werden. Die Erwärmungstemperaturen und Parameter des Isotherm-Heißpressverfahrens sind ebenfalls in Tabelle 3.2.13 aufgelistet.

In Tabelle 3.2.2.4 ist die Übersicht über das Ergebnis des isothermen Drapierversuches gegeben. Es zeigt sich, dass bei allen Materialien eine schienenförmige Befestigung einer punktförmigen Befestigung überlegen ist da das Material hier flächig eingespannt wird. Viele Vliese zeigen Ausdünnungen oder reißen ein. Besonders das Nassvlies zeigt ein schlechtes Drapierverhalten was an den kurzen Fasern wie auch dem Binder im Vliesstoff liegt. Mit dem Material #8 (ITA\_PA6) kann der Hut sehr gut abgeformt werden und ein gutes Ergebnis erzielt werden. Vliestyp #8 zeichnet sich auch über eine hohe maximale Drapierkraft und einen hohen Widerstand gegen einreißen aus sowie besitzt eine hohe Relaxation. Es kann also eine Übertragung der Versuche bei Raumtemperatur mit den Versuchen bei hoher Temperatur festgestellt werden.

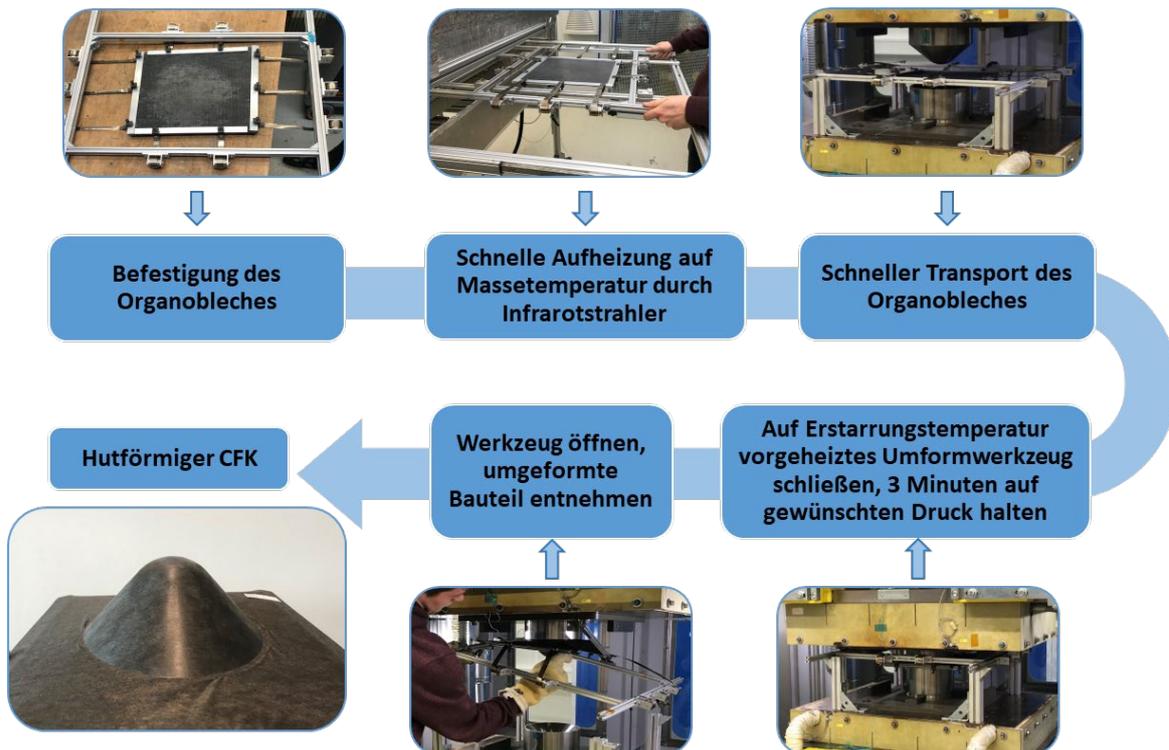
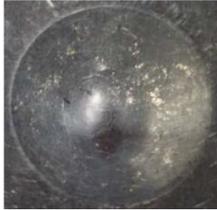


Abbildung 3.2.2.27: Darstellung des Umformprozesses eines Organobleches im Fraunhofer IGCV Technikum [Guo20].

### Zusammenfassung der Drapierstudie

Unterschiedliche Verfahren zur Bewertung der Drapierfähigkeit werden ein- und durchgeführt. Dabei zeigt sich ein stark unterschiedliches Materialverhalten der Vliesstoffe. Vor allem der Messung der maximalen Drapierkraft und der Relaxation wird große Bedeutung in Bezug auf die Drapierbarkeit eines Vliesstoffes zugesprochen. Ein weiterer Wert der als Kennwert für ein Vlies bezüglich seiner Umformbarkeit herangezogen werden kann, ist die maximale Umformbarkeit. Dieser kann zukünftig als Kriterium für die Umformsimulation verwendet werden. Die Drapierversuche bei Raumtemperatur, liefern für das Preformen für RTM- und Nasspressversuche sinnvolle Werte. Mit den Versuchen bei der Schmelztemperatur jeweiligen Polymers dagegen lässt sich eine Aussage über die Umformbarkeit beim Thermoformen machen. Zusammenfassend kann man sagen, dass der Einsatz von thermoplastischen Fasern und hohe Dehnraten dieser Fasern, so wie eine hohe Verfestigung des Vlieses zu einer guten Drapierbarkeit führen. Pyrolysierte oder kurzen Fasern hingegen wirken sich negativ auf das Gesamtergebnis aus. Aufgrund der kurzen Faserlänge zeigen auch Nassvliese eher schlechte Eigenschaften bzgl. der Drapierbarkeit. Hier besteht noch Optimierungsbedarf hinsichtlich des Binders und dem Einsatz längerer Fasern. Der Einsatz des Malivat Verfahrens sticht hier hervor, da diese Verfestigungstechnik die Drapierkraft deutlich erhöht und ebenfalls das Aufreißen und Ausdünnen des Vliesstoffes verhindert. Weitere Versuche zur Erfassung weiterer Daten sind notwendig, um die Drapierbarkeit noch genauer beschreiben zu können und um die Grenzen der Drapierbarkeit simulativ abzubilden.

Tabelle 3.2.2.13: Übersicht der isotherm umgeformten Materialien beim Fraunhofer IGCV. Schienenbefestigung und Punkt-  
befestigung im Vergleich.

Vliestyp	Schienenbefestigung	Punktbefestigung
#4	 Leicht örtliche Ausdünnung, faltenlose Oberfläche	 Ausdünnung, Faltenbildung
#8	 Perfekte, faltenlose Oberfläche; Ohne örtliche Ausdünnung	 Das Organoblech wird aufgerissen, die Risse sind alle entlang der MD
#11	 Örtliche Ausdünnung an der Wirkpunkte, faltenlose Oberfläche	 Ausdünnung an der Wirkpunkte, das Organoblech wird aufgerissen
#Airlay	 Mehr örtliche Ausdünnung als #4, faltenlose Oberfläche	Versuch misslungen, das Organo-blech wird im IR-Strahler wegen der Zugkraft des Spannrings aufgerissen
#NV1.1	 gerissene und faltenreiche Oberfläche	Versuch misslungen, das Organo-blech wird im IR-Strahler wegen der Zugkraft des Spannrings aufgerissen

### 3.2.3 Arbeitspaket: Verstärkung mit Thermoplastmaterialien

Ähnlich wie in „AP 3.1.3 Verstärkung mit unidirektionalen Materialien“ werden auch die thermoplastischen Vliese mit UD-Materialien lokal verstärkt und zu Organoblechen bzw. zu Hutprofilen konsolidiert und umgeformt. Die verstärkten Platten werden benötigt, um mechanische Kennwerte, die mit denen der unverstärkten Vliese verglichen werden, zu generieren. Durch das Umformen der verstärkten und unverstärkten Vliese wird untersucht, wie sich diese Halbzeuge bei einer dreidimensionalen Konsolidierung verhalten und welche Probleme dabei auftreten können.

Einzelne Vlieslagen werden mit einer Automated Tape Laying (ATL) – Anlage lokal mit UD-Tapes aus carbonfaserverstärkten Polyamid 6 (PA6/CF UD-Tapes) verstärkt und mit ca. zehn weiteren unverstärkten Vlieslagen zu Organoblechen konsolidiert. Aus esniinigen Organoblechen werden Prüfkörper geschnitten und getestet. Die restlichen Organobleche werden in einem Umformprozess zu Hutprofilen weiterverarbeitet.

#### FiberForge Relay2000

Die Verstärkung der Vliese wird mit der Anlage „FiberForge Relay2000“ (Abbildung 3.2.3.1) umgesetzt. Mit dieser Anlage lassen sich Kohlenstoff- und Glasfasertapes mit thermoplastischer Matrix endkonturnah und lastpfadgerecht ablegen. Mit dem translatorisch und rotatorisch beweglichen Vakuumtisch lässt sich jede Positionierung und Orientierung der einzelnen Tapes exakt umsetzen. Auf der linken Seite der Anlage befinden sich zwei Spulenaufnahmen. Somit können zwei verschiedene Materialbreiten oder Materialtypen verarbeitet werden. Beim Legeprozess zieht ein Greifer ein Tape auf eine definierte Länge ab, das Tape wird geschnitten und in der Brücke an die zu benötigte Position über dem Vlies gezogen. Durch die in der Brücke sitzenden Schweiß-Sonotroden, werden die einzelnen Tape-Lagen mit den darunterliegenden Materialien punktuell verschweißt.



Abbildung 3.2.3.28: FiberForge Relay 2000 Anlage des Fraunhofer IGCV beim SGL Fiber Placement Center.

## Verwendete Materialien

Für die Herstellung der verstärkten Vliese und Organobleche werden folgende Materialien verwendet:

Tabelle 3.2.3.14: Materialien zur Herstellung der Organobleche und zur lokalen Verstärkung.

Mat.	Firma	Bezeichnung	Matrix	Faser-Typ	C-Faser-%	Maße [mm]
Vlies	Tenowo	Zetacomp 5476/1	Polyamid 6	Verschnitt	51 Gew.-%	1500 x 3,6
Tape	SGL Carbon	SIGRAPREG®TP C U157-0/NF-T340/46%	Polyamid 6	50k C-Faser	42 Vol.-% 54 Gew.-%	50 x 0,2



Abbildung 3.2.3.29: PA6/CF UD-Tape der SGL Carbon.

## Verstärkung von Vliesen zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften

Um den Einfluss von einzelnen verstärkten Lagen auf das gesamte Organoblech zu untersuchen werden einzelne Vlieslagen kreuzförmig verstärkt (Abbildung 3.2.3.3). Das Kreuz wird diagonal auf dem Vlies positioniert um eine höhere Festigkeit gegen Zug-, Biege und Rotationsbelastungen zu erreichen. Abbildung 3.2.3.3 zeigt eine Vlieslage mit dem ersten Tape-Streifen auf dem Vakuumtisch der FiberForge Relay2000.

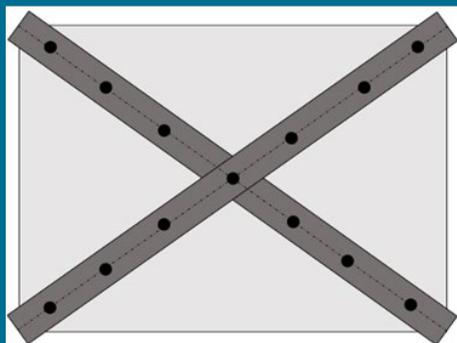


Abbildung 3.2.3.30: Links: Kreuzförmige Verstärkung der Organobleche. Rechts: Vlieslage mit aufgeschweißtem Tape-Streifen.

### Verstärken von Vliesen zur Herstellung von verstärkten Hutprofilen

Die Vliese die anschließend zu Hutprofilen umgeformt werden sollen, werden nicht kreuzförmig verstärkt. Die Verstärkungen sollen in 0°- und 90°- Orientierung auf dem Hutprofil aufgebracht werden. Gleichzeitig dürfen sich nur maximal zwei Tape-Streifen lokal überschneiden, um eine Überpressung der Vliese unterhalb dieser Überlap-pung zu verhindern. Wie die Tapes auf dem Vlies und im Hutprofil angeordnet werden, zeigen folgende Abbil-dungen.

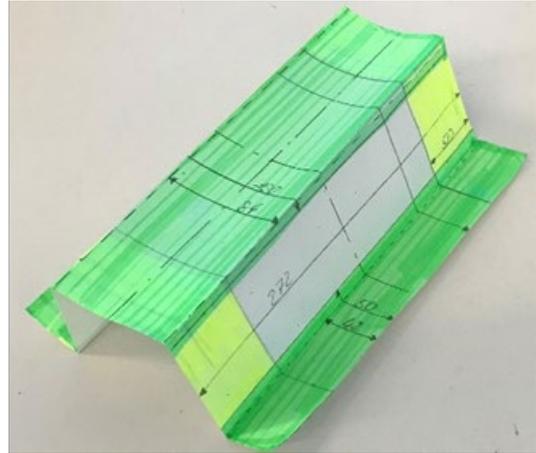


Abbildung 3.2.3.31: Links: Lokale Verstärkung für die Hutprofilgeometrie. Rechts: Positionierung der Tapes auf dem Hutprofil.

Die thermoplastischen rCF-Vliese lassen sich mit der FiberForge ohne Probleme lokal verstärken. Da keine Kräfte in horizontaler Richtung auf das Vlies wirken, reicht die Vakuumleistung des Tisches aus, damit die Vliese beim Verstärkungsprozess nicht verrutschen. Auch die Schweißpunkte halten sehr gut und alle Tapes haften auf den Vliesen. Die so hergestellten Halbzeuge werden in Arbeitspaket 3.2.4 umgeformt (Thermoformen) und später auch am Fraunhofer IGCV im Biegeversuche charakterisiert.

### 3.2.4 Arbeitspaket: Thermoformen und Spritzgießen

Der AP ist nach dem Ausscheiden von B&W angepasst worden. Das ITA und Fraunhofer IGCV übernehmen die Untersuchungen zum Handling vorgeheizter Organovliesstoffe als Einleger in ein horizontales Werkzeug. Weiterhin fokussiert sich das ITA auf die Ermittlung von Spritzgussparametern für das An- und Hinterspritzen von Organoblechen.

#### Versuche zum Thermoformen und Spritzgießen von ITA Augsburg

Das ITA führt Versuche zum Handling vorgeheizter Organovliesstoffe mit Einlegern in einem horizontalen Werkzeug durch. Zudem werden in diesem Arbeitspaket geeignete Spritzgussparameter ermittelt, mit denen zusätzliche Strukturen an die Organovliesstoffe-Einleger anspritzbar sind. Als letzter Punkt erfolgt eine Bewertung der Verstärkungswirkung durch die Einleger aus Organovliesstoff im Thermoformverfahren. Nach Ausscheiden des Projektpartners Borscheid und Wenig GmbH, ist der Umfang des Arbeitspaketes in Absprache mit dem PTJ angepasst worden. Die Versuche werden an einer Spritzgussmaschine vom Typ insert 1050H/200 der ENGEL AUSTRIA GmbH, Schwertberg durchgeführt, die in der folgenden Abbildung in Draufsicht mit allen Komponenten dargestellt ist.

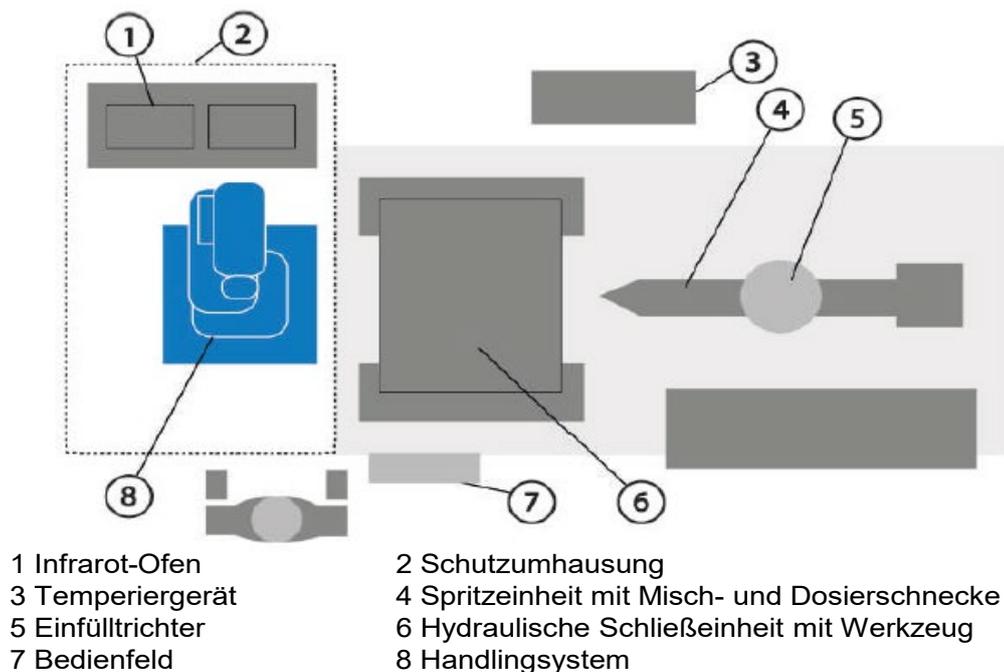


Abbildung 3.2.4.32: Draufsicht auf Engel Insert 1050HI200.

Die Spritzgussmaschine verfügt über einen Roboter, der mit einem Nadelgreifer (Abbildung 3.2.4.2) ausgerüstet ist. Die Organovliesstoffeinleger werden in einem Ofen mit Infrarot-Heizstrahlern aufgeheizt.

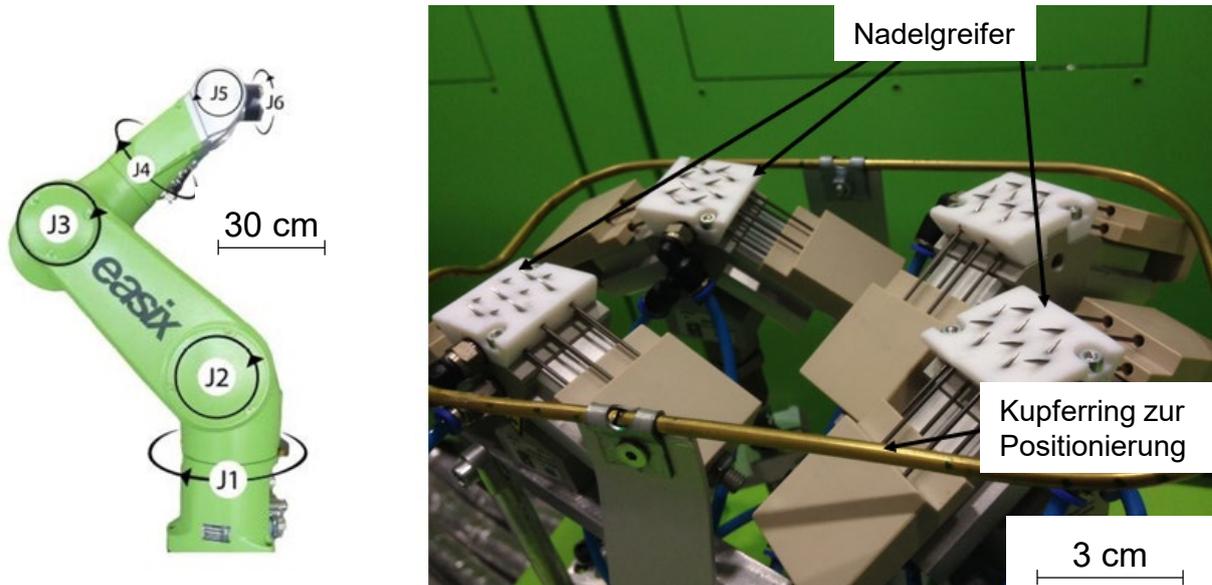


Abbildung 3.2.4.33: Roboter für das Handling des Einlegers (links) und Nadelgreifer (rechts).

Dazu sind automatische Fächer an den Ofen angebracht, die das Material in und aus dem Ofen transportieren. In der folgenden Abbildung sind der Roboter und der Nadelgreifer dargestellt. Ein 6-achsiger Roboter ermöglicht das Handling der auf Schmelzviskosität erwärmten Vliesstoffe aus dem Infrarotofen in die kalte Werkzeugform. Dafür wird ein Greifer mit Nadeln verwendet. Diese fahren druckluftgesteuert in das Textil ein und erzeugen einen Formschluss mit dem das Organovlies gehoben und bewegt werden kann.

Der Transportweg wird am ITA auf wenige Sekunden optimiert. Die Carbonfasern verlieren nach der Aufwärmung durch die hohe Wärmeleitfähigkeit sehr schnell ihre Temperatur und der aufgeschmolzene Kunststoff beginnt zu erstarren. Ein zügiger Transport in die Umformeinheit ist entscheidend für ein gutes Konsolidierungsergebnis beim Thermoforming-Prozess.

Ziel ist deshalb die Optimierung des Einlegeprozesses hinsichtlich der Reduktion der Prozesszeit und der Erarbeitung von Prozesswissen. Dies begünstigt zum einen die Wirtschaftlichkeit des Prozesses und zum anderen die Verformbarkeit aufgrund der höheren Temperaturen.

Beim Thermoformzyklus liegen die besäumten Organobleche bereits vorkonsolidiert vor (vgl. Abbildung 3.2.4.3). Die Dauer eines Thermoformzyklus wird durch die Länge der Heizphase bestimmt. Das Heizprofil wird individuell für die Organobleche eingestellt (Tabelle 3.2.4.1).

Tabelle 3.2.4.15: Heizprofile in Abhängigkeit der Carbonfasermasse für den IR-Ofen.

Materialkombination	PA6-CF20	PA6-CF30	PA6-CF40
Heiztemperatur	260 °C	270 °C	280 °C
Heizzeit	90 s	135 s	150 s

Im vorliegenden vollautomatisierten Thermoformzyklus können zwei Heizphasen simultan ablaufen, indem zwei Halbzeugs parallel im IR-Ofen aufgeheizt werden. Dadurch lässt sich die Auslastung der Anlage erhöhen, wodurch die Fertigungszeit für die gesamte Losgröße reduziert wird. Zusätzlich kann die Zeit des vollautomatisierten Thermoformzyklus verkürzt werden, indem der Roboter die folgenden Transportvorgänge ausführt:

- Einlegen des Halbzeugs in den IR-Ofen
- Entnahme des aufgeheizten Halbzeugs aus dem IR-Ofen
- Transport des aufgeheizten Halbzeugs zur Presse
- Entnahme des Bauteils aus Formwerkzeug und Ablage

Es wird angenommen, dass der Roboter sowohl für das Auf- bzw. Ablegen des Halbzeugs bzw. Bauteils als auch für das Zurücklegen der Strecken zwischen den einzelnen Stationen der Anlage (Halbzeugablage - IR-Ofen - Formwerkzeug - Bauteilablage) 0,5 s benötigt. Daraus ergeben sich die Zeiten für den Prozesszyklus aus Tabelle 3.2.4.2 und eine Gesamtzeit von 53,5 s für das Handling und Abkühlen. In Anbetracht der benötigten Heizzeit für die Organovlieseinleger wird ersichtlich, dass bei höheren Carbonfaseranteilen bis zu drei Heizkammern simultan mit Material bestückt werden können.

Tabelle 3.2.4.16: Angenommene Dauer einzelner Prozessschritte Prozessschritt.

Prozessschritte	Prozesszeiten bei Vollautomatisierung
Einlegen des Halbzeugs in IR-Ofen	2,5 s
Entnahme des Halbzeugs aus IR-Ofen	1,0 s
Transport des Halbzeugs zur Presse	1,5 s
Werkzeug schließen & Pressen	3,0 s
Kühlen	40,0 s
Werkzeug öffnen	3,0 s
Entnahme aus Formwerkzeug	2,5 s
<b>Gesamt</b>	<b>53,5</b>

Die folgende Abbildung zeigt einen vorkonsolidierten Organovliesstoffeinleger sowie auf der rechten Seite das daraus im Thermoformverfahren hergestellte Bauteil.

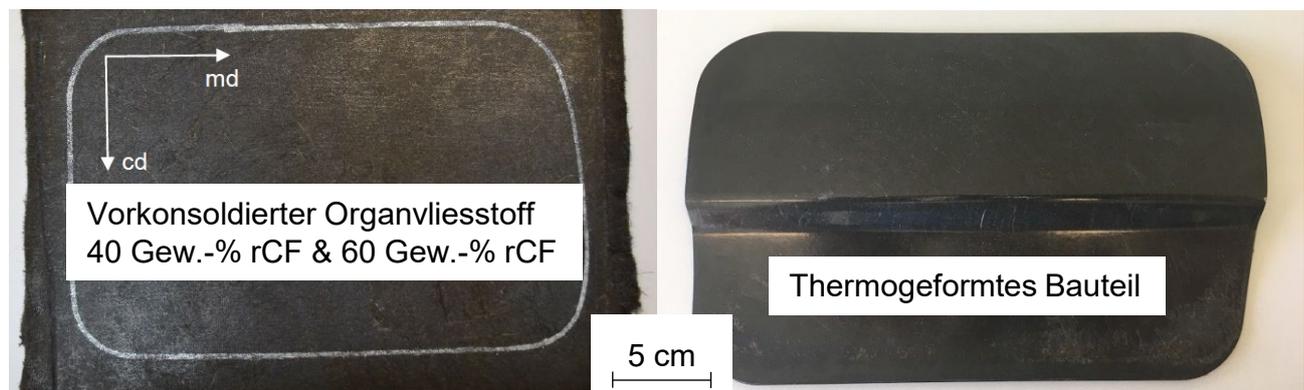


Abbildung 3.2.4.34: Vorkonsolidierter Rohling (links) und thermogeformtes Bauteil (rechts).

### Untersuchung geeigneter Spritzgussparameter und Bewertung der Verstärkungswirkung

In diesem Punkt werden Spritzgussparameter für das Anspritzen von Funktionselementen und Rippenstrukturen an einen Organovliesstoffeinleger erarbeitet. Die Ausgangsmaterialien sind PA6 und PP-Granulat. Das Material wird im Extruder der Spritzgussmaschine vom Typ insert 1050H/200 der ENGEL AUSTRIA GmbH, Schwertberg, aufgeschmolzen und anschließend in die dafür vorgesehene Werkzeugform eingespritzt. Dazu werden konsolidierte Bauteile aus Organovliesstoff und Organoglasfasertape eingesetzt.

Für die Verarbeitung und die Kühlzeitberechnung werden die durchschnittlichen Verarbeitungskennwerte der Granulate verwendet, welche den jeweiligen Datenblättern entnommen werden. Diese Parameter sind für die Verarbeitung der Spritzgußmassen ausreichend und Strukturen können erfolgreich angespritzt werden. In Abbildung 3.2.4.4 ist die Applikation einer Hinterspritzung auf einem glasfaserverstärkten Organblech dargestellt.

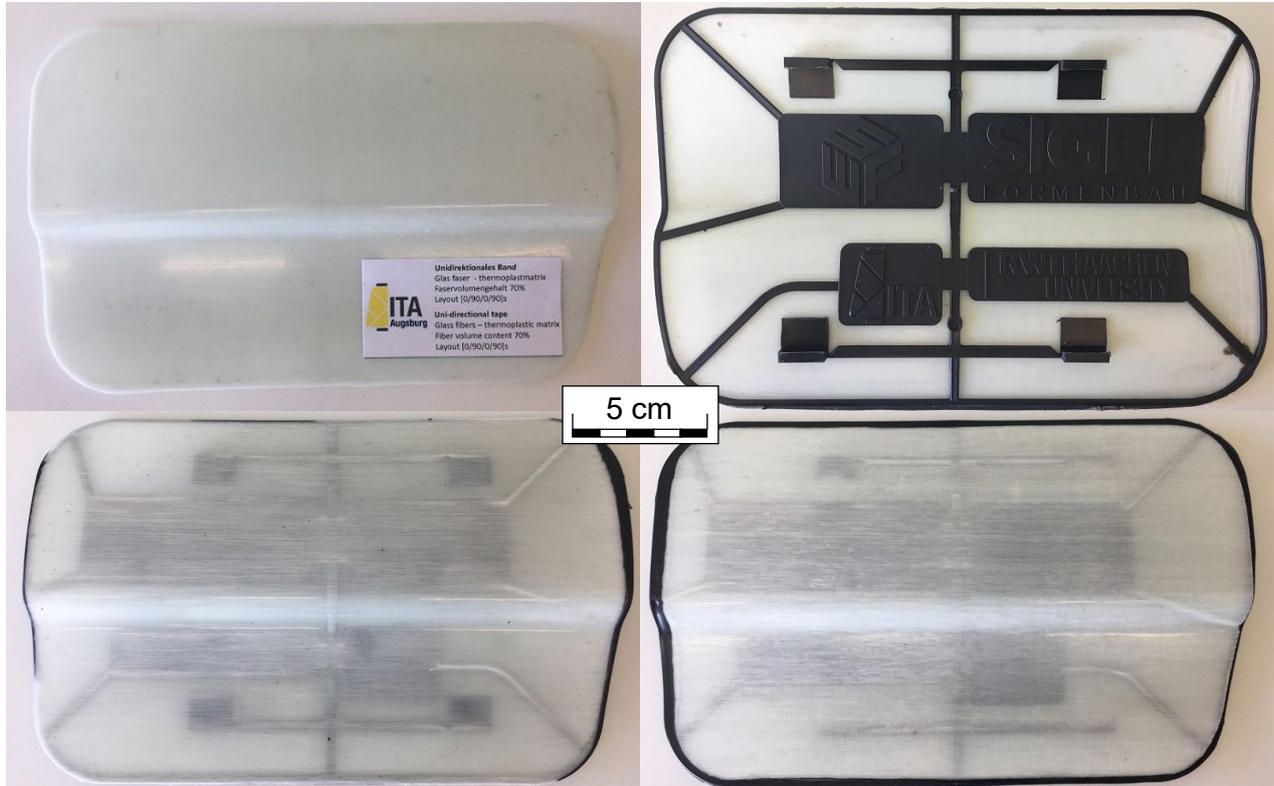


Abbildung 3.2.4.35: Glasfasereinleger mit Hinterspritzung.

Abbildung 3.2.4.5 veranschaulicht den Hinterspritzprozess beim Einsatz von rCF-Organoblechen.

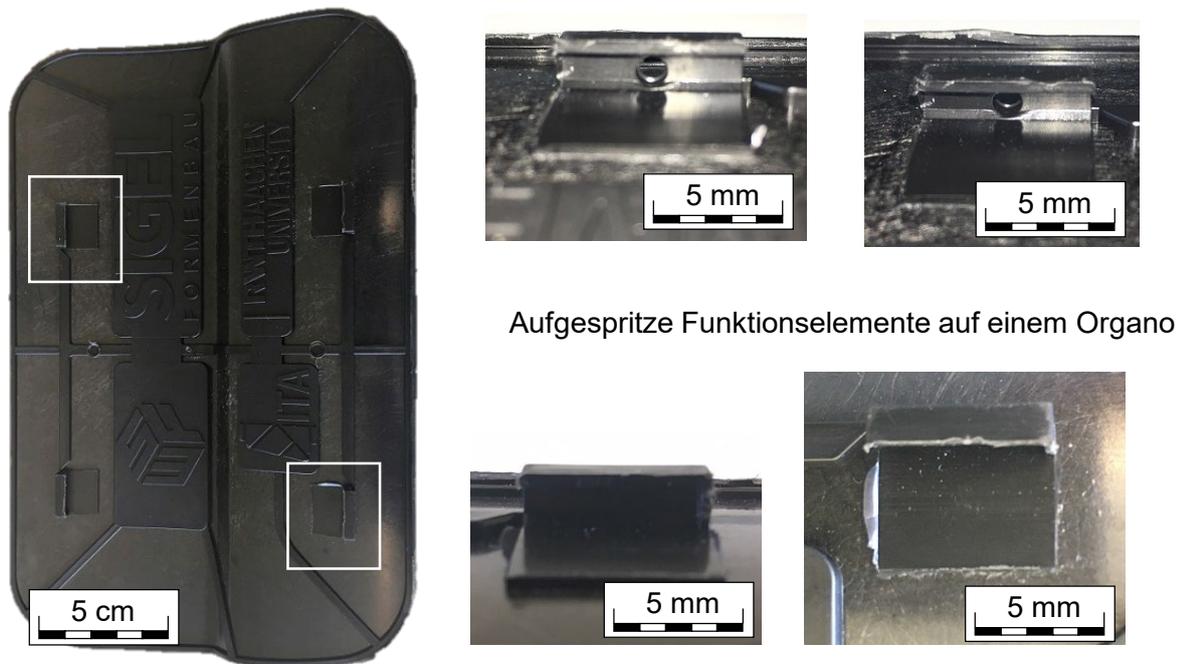


Abbildung 3.2.4.36: rCF-Organoeinleger mit Hinterspritzung und Detailansicht der Funktionselemente.



Die Funktionslemente können erfolgreich angespritzt werden. Aufgrund des Ausscheidens des Projektpartners Borscheid und Wenig findet die Bewertung der Verstärkungswirkung ohne mechanische Versuche statt. Die Verstärkungswirkung durch einen Vliesstoffeinleger kann dahingehend bestätigt werden, dass die carbonfaserverstärkten Vliesstoffe Steifigkeiten von bis zu 20 GPa und mehr erreichen, wie verschiedene Untersuchungen in diesem Projekt belegen. Eine reine Kunststoffmatrix aus PA6, PET oder PP weist eine Steifigkeit im niedrigen einstelligen Bereich auf. Durch den Vliesstoffeinleger wird deshalb in jedem Falle eine deutliche Verstärkungswirkung erzielt.

### Thermoformen und Spritzgießen bei der SGL Carbon

In AP 3.2.4 werden unverstärkte, sowie lokal verstärkte PA6/CF-Vliese und Organobleche mit einer externen Wärmequelle erwärmt, in ein Umformwerkzeug transferiert und unter Druck konsolidiert und umgeformt. Die Versuche werden in der WPT-Zelle (Abbildung 3.1.1.1 und Abbildung 3.1.1.2), die neben dem Nasspressen auch für das Umformen von thermoplastischen Materialien (Thermoformzelle) verwendet werden kann und in einer Spritzgussanlage der Firma ENGEL Austria GmbH durchgeführt.

In der WPT-Zelle kann neben dem bereits beschriebenen duromeren Nasspressverfahren auch das Thermoformen von Organoblechen durchgeführt werden. Dafür ist in der Anlage ein IR-Ofen integriert. Dieser Ofen kann durch einen linear verfahrbaren Auflagetisch von außerhalb der Zelle mit konsolidierten Organoblechen bestückt werden. Durch Einfahren in den Ofen, transportiert der Tisch die Organobleche zwischen zwei waagerechte IR-Felder, deren Leistungen und Temperaturen einzeln eingestellt werden können. Nach dem Aufschmelzen des Organobleches fährt der Tisch in die Zelle ein. Der zentral positionierte Roboter greift den Stack aufgrund der hohen Temperatur mit einem Nadelgreifer-System. Nun wird der Stack, ähnlich dem Nasspressverfahren, in das, in der Presse montierte, Werkzeug eingelegt. Für die hier beschriebenen Versuche wird das gleiche Hutprofilwerkzeug, wie bei den Nasspressversuchen verwendet. Nachdem der Roboter wieder aus der Presse ausgefahren ist, schließt das Werkzeug und der heiße Stack wird umgeformt und konsolidiert. Nach einer kurzen Abkühlphase kann das fertige Bauteil entformt werden.

Um das Thermoformpotenzial von rCF-Vliesen zu untersuchen, werden für diese Versuchsreihe Organobleche mit den, in Abschnitt: „Herstellen von Prüfplatten aus PA6-Vliesen“ verwendeten, Pressparametern vorgefertigt. Die Flächengewichte und Dicken der verwendeten Organobleche liegen zwischen 2547 g/m<sup>2</sup> – 2680 g/m<sup>2</sup> und 1,85 mm – 1,98 mm. Vor dem Start der Versuchsreihe wird das Umformwerkzeug auf 90 °C vorgeheizt und für alle Umformversuche beibehalten. Dieser Wert hat sich bei anderen Thermoformversuchen mit PA6-Matrix unabhängig von CaRinA als erfolversprechend erwiesen. Die restlichen Parameter sind in Tabelle 21 aufgelisteten.

Tabelle 3.2.4.17: Thermoformen von unverstärkten Organoblechen in der WPT-Zelle.

Versuch	Flächengewicht Organoblech	Dicke Organoblech	Temperatur IR-Ofen	Abstandhalter	Presskraft	Pressprozess	SOLL-Dicke	IST-Dicke	Gesamt
T-8.1a	2550 g/m <sup>2</sup>	1,85 mm	160 °C	2,45 mm	200 kN	niO	2,00 mm	-	niO
T-8.1b	2564 g/m <sup>2</sup>	1,88 mm	160 °C	2,45 mm	200 kN	iO	2,00 mm	2,30 mm	niO
T-8.2a	2511 g/m <sup>2</sup>	1,85 mm	180 °C	2,45 mm	300 kN	iO	2,00 mm	2,78 mm	niO
T-8.2b	2547 g/m <sup>2</sup>	1,88 mm	200 °C	2,45 mm	450 kN	niO	2,00 mm	2,19 mm	iO
T-8.3a	2588 g/m <sup>2</sup>	1,91 mm	190 °C	2,25 mm	450 kN	iO	2,00 mm	2,17 mm	iO
T-8.3b	2598 g/m <sup>2</sup>	1,91 mm	190 °C	2,25 mm	600 kN	iO	2,00 mm	2,09 mm	iO
T-8.4a	2652 g/m <sup>2</sup>	1,98 mm	190 °C	2,25 mm	600 kN	iO	2,00 mm	2,18 mm	iO
T-8.4b	2632 g/m <sup>2</sup>	1,98 mm	190 °C	2,25 mm	600 kN	iO	2,00 mm	2,13 mm	iO
T-8.5a	2567 g/m <sup>2</sup>	1,92 mm	190 °C	2,00 mm	600 kN	iO	2,00 mm	1,96 mm	iO
T-8.5b	2584 g/m <sup>2</sup>	1,96 mm	190 °C	2,00 mm	600 kN	iO	2,00 mm	2,00 mm	iO
T-8.6a	2600 g/m <sup>2</sup>	1,95 mm	190 °C	2,00 mm	600 kN	iO	2,00 mm	2,02 mm	iO
T-8.6b	2593 g/m <sup>2</sup>	1,90 mm	190 °C	2,00 mm	600 kN	iO	2,00 mm	2,04 mm	iO
T-8.7a	2680 g/m <sup>2</sup>	1,96 mm	190 °C	2,00 mm	600 kN	iO	2,00 mm	-	iO

Bei Versuch T-8.1a ist fälschlicherweise eine Haltezeit nach der Aufnahme des heißen Organobleches im Programm hinterlegt. Dies führt zu einer Abkühlung des Organobleches und verhindert ein erfolgreiches Umformen. Bei den Versuchen T-8.1b – T-8.2b wird die Temperatur und die Presskraft drei Mal erhöht, um die Dicke zu verringern. Bei T-8.2b kann trotz eines kurzen Stoppens des Pressvorgang die angestrebte Dicke von  $2,00 \pm 10\%$  erreicht werden. Durch eine Verringerung der Abstandhalter auf 2,25 mm und eine weitere Erhöhung der Presskraft auf 600 kN bei den Versuchen T-8.3a – T-8.4b wird eine konstante Dicke von 2,09 mm – 2,19 mm erreicht. Um die SOLL-Dicke noch genauer zu erreichen wird ab Versuch T-8.5a der Abstand auf 2,00 mm reduziert. Dies führt zu Dicken von 1,96 mm – 2,04 mm.

### Thermoformen von verstärkten Organoblechen in der WPT-Zelle

Nachdem das Thermoformen von unverstärkten Vliesstoffen erfolgreich nachgewiesen werden kann, wird in diesem Abschnitt das Umformen von verstärkten Organoblechen untersucht. Diese Versuche finden ebenfalls in der WPT-Zelle mit dem gleichen Anlagenaufbau wie bei den unverstärkten Organoblechen statt.

Tabelle 3.2.4.4: Prozessparameter für das Thermoformen von Organoblechen.

Versuch	Flächengewicht Organoblech	Dicke Organoblech	Temperatur IR-Ofen	Abstandhalter	Presskraft	Pressprozess	SOLL-Dicke	IST-Dicke	Gesamt
T-11.1	2440 g/m <sup>2</sup>	1,85 mm	210 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.2	2662 g/m <sup>2</sup>	2,05 mm	190 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.3	2524 g/m <sup>2</sup>	1,99 mm	190 °C	2 mm	900 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.4	2508 g/m <sup>2</sup>	2,10 mm	190 °C	2 mm	900 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.5	2465 g/m <sup>2</sup>	2,42 mm	190 °C	2 mm	650 kN		2,00 mm	2,17 mm	iO
T-11.6	2820 g/m <sup>2</sup>	2,38 mm	190 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.7a	3059 g/m <sup>2</sup>	2,25 mm	190 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.7b	2996 g/m <sup>2</sup>	2,22 mm	210 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	2,20 mm	niO
T-11.8a	2736 g/m <sup>2</sup>	2,02 mm	170 °C	2 mm	900 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.8b	2763 g/m <sup>2</sup>	2,04 mm	210 °C	2 mm	900 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.9a	2361 g/m <sup>2</sup>	1,81 mm	140 °C	2 mm	900 kN		2,00 mm	-	niO
T-11.9b	2394 g/m <sup>2</sup>	1,81 mm	190 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	1,82 mm	iO
T-11.10a	2410 g/m <sup>2</sup>	1,83 mm	190 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	1,86 mm	iO
T-11.10b	2393 g/m <sup>2</sup>	1,82 mm	190/170 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	1,90 mm	iO
T-11.11a	2466 g/m <sup>2</sup>	1,84 mm	190/170 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	1,90 mm	iO
T-11.11b	2507 g/m <sup>2</sup>	1,88 mm	190/170 °C	2 mm	600 kN		2,00 mm	1,98 mm	niO

Bei den Versuchen T-11.1 – T-11.10a wird die IR-Feld-Temperatur und die Presskraft in unterschiedlichen Kombinationen variiert. Dabei ist keine reproduzierbare Verbesserung zu erkennen. Bei einzelnen Versuchen greift der Nadelgreifer nicht das ganze Paket und einzelne Lagen klappen teilweise oder komplett beim Transport nach unten weg. Das häufigste Ausschusskriterium ist allerdings das Nichtanhaften der PA6/CF UD-Tapes auf dem Vlies nach dem Umformprozess. Die Tapes lösen sich beim Aufheizvorgang und verbinden sich nicht mehr beim Umformen mit dem Vlies. Bei den Versuchen T-11.10b – T-11.11b wird die Temperatur des dem verstärkten Vlies zugewandten IR-Feldes auf 170°C reduziert, um das Ablösen zu verhindern. Dies führt zu einer leichten Verbesserung. Jedoch ist auch mit dieser Einstellung kein reproduzierbar gutes Ergebnis erzielbar.

### Thermoformen von nachträglich verstärkten Organoblechen in der WPT-Zelle

Zusätzlich zu den Organoblechen, die vor dem Konsolidieren mit CF/PA6 UD-Tapes lokal verstärkt werden, sollen auch Organobleche, die nach dem Konsolidieren verstärkt werden (Abbildung 3.2.4.6) in der WPT-Zelle umgeformt werden. Da dies nur eine kleine zusätzliche Versuchsreihe ist, werden nur drei nachträglich verstärkte Organobleche in der WPT-Zelle umgeformt. Die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 3.2.4.5 aufgelistet.

Tabelle 3.2.4.18: Thermoformen von nachträglich verstärkten Organoblechen in der WPT-Zelle.

T-12.1a	2807 g/m <sup>2</sup>	2,36 mm	190/170 °C	2 mm	600 kN	2,00 mm	2,26 mm	niO
T-12.1b	2839 g/m <sup>2</sup>	2,32 mm	190/170 °C	2 mm	600 kN	2,00 mm	2,32 mm	niO
T-12.2a	2875 g/m <sup>2</sup>	2,42 mm	190/170 °C	2 mm	600 kN	2,00 mm	2,36 mm	niO

Der Umformprozess funktioniert besser als bei den vorhergegangenen Versuchen. Die Tapes lösen sich weder im IR-Feld noch bei Transport zur Presse vom Vlies ab. Auch der Umformprozess schert die Tapes nicht ab. (Abbildung 3.2.4.6) Jedoch ist auch hier die Anbindung am Vlies nicht sehr gut und die Tapes lassen sich nachträglich mit der Hand vom Hutprofil abziehen. Auch die Materialdicke lässt sich nur sehr schwer einstellen und kann mit drei Versuchen nicht unterhalb von 2,2 mm gedrückt werden.



Abbildung 3.2.4.37: Links: Nachträglich lokal verstärktes Organoblech.  
Rechts: Nachträglich verstärktes umgeformtes Organoblech.

### Thermoformen von unkonsolidierten rCF-Vliesen in der WPT-Zelle

Um zu untersuchen, ob eine Zwischenkonsolidierung der rCF-Vliese vor dem Umformen notwendig ist, sollen zusätzlich zu den Organoblechen auch unkonsolidierte rCF-Vliese in der WPT-Zelle zu Hutprofilen geformt werden. Nach interner Absprache werden diese Versuche aber nicht durchgeführt, da in der Vergangenheit schon untersucht wurde, ob sich CF-Vliese im IR-Feld auf- bzw. durchwärmen lassen. Da hat sich gezeigt, dass das Material im unkonsolidierten Zustand eine zu hohe Isolierwirkung besitzt, um die Matrix homogen aufzuschmelzen.

### Fazit zum Thermoformen in der WPT-Zelle

Abschließend lässt sich sagen, dass das Thermoformen in der WPT-Zelle sehr stark davon abhängt, wie die rCF-Vliese vorbehandelt werden. Unkonsolidierte Vliese lassen sich in einem IR-Feld nicht homogen aufheizen. Sie bleiben in der Mitte des Stacks aufgrund der Isolierwirkung zu kalt und an den äußeren Lagen können Sie sich, bei zu hoher Hitze, entzünden. Vorkonsolidierte Organobleche hingegen lassen sich sehr gut Thermoformen. Das Aufheizen im IR-Feld ist problemlos umsetzbar. Der Transport mit Nadelgreifern zur Presse funktioniert ebenfalls reibungslos. Auch das Einlegen und Positionieren im Werkzeug, ist aufgrund der Vorkonsolidierung sehr genau



möglich. Das Organoblech speichert die eingebrachte Temperatur lange genug, um ein erfolgreiches und reproduzierbares Thermoformen zu ermöglichen (Abbildung 3.2.4.7). Bei vor- oder auch nachträglich lokal verstärkten Organoblechen, lösen sich die PA6/F UD-Tapes im IR-Feld häufig ab und verhindern somit ein reproduzierbar erfolgreiches Umformen. Ein möglicher Lösungsansatz wäre die lokale Verstärkung nicht als äußerste Lage zu nehmen, sondern als zweite Lage, so würde das Vlies das Ablösen unterbinden. Weiterhin ist eine Aufheizung und ein Transport in einem Kontaktsystem (Kontaktheizung + Transportbleche) denkbar, welches die Tapes ebenfalls fixieren sollte. Auch ein Kenntnis über den Umformgrad des Bauteils ist hier von großer Bedeutung, da eine weniger starke Umformung die Spannungen die zum Ablösen führen auch reduzieren würde.



Abbildung 3.2.4.38: Links: T-8.4a umgeformtes Organoblech von unten. Rechts: T-8.4a umgeformtes Organoblech von oben.

## Thermoformen in der Spritzgussanlage

Um zu untersuchen, welche Heiztechnologie sich am besten dafür eignet, konsolidierte und unkonsolidierte rCF-Vliese aufzuschmelzen, werden die bereits beschriebenen Umformversuche auch in einer Spritzgussanlage durchgeführt. Dafür wird das bereits in der WPT-Zelle verwendete Umformwerkzeug in die Presse dieser Anlage eingebaut.

Die Spritzgussanlage „Insert 200“ der Firma Engel (Abbildung 3.2.4.8) besitzt ein Förderband, um vorbereitete Halbzeuge in die geschlossene Zelle zu befördern. Hier können Organobleche oder vorgeformte dreidimensionale Körper per Hand aufgelegt werden, ohne den laufenden Automatikbetrieb unterbrechen zu müssen.

Ein zentral positionierter Roboter greift kalte Halbzeug mit einem Sauggreifer und legt es auf einen ausgefahrenen Gitterrost des integrierten Umluftofens (Abbildung 3.2.4.8). Der Ofen besitzt insgesamt zehn dieser Auflageroste und kann auf 350 °C aufgeheizt werden. Die Gitter sind im Ofen übereinander angeordnet und können unabhängig voneinander entnommen und hinzugefügt werden. So ist es möglich bis zu zehn Halbzeuge simultan aufzuheizen, fertig aufgeheizte Organobleche zu entnehmen und Neue hinzuzufügen. Dafür zählt der Ofen für jeden einzelnen Rost die Heiz-Zeit und kann so alle Bauteile immer exakt gleich lange aufwärmen.

Nach dem Aufheizprozess wird das heiße Organoblech aus dem Ofen gefördert und vom Roboter mit einem Nadelgreifer zur Presse transportiert. Die Presse kann auf 90 °C temperierte werden und mit einer Kraft von 2000 kN schließen. Hinter der Presse ist eine Spritzgussereinheit für die Schmelze angebracht. Diese Einheit heizt das Kunststoffgranulat auf bis zu 400 °C auf und drückt mit einer integrierten Schnecke die Schmelze in das eingebaute Spritzgusswerkzeug. Nach einer kurzen Abkühlphase öffnet die Presse wieder und der Roboter legt das Bauteil mit dem Sauggreifer auf das Förderband, mit dem es aus der Presse befördert.



Abbildung 3.2.4.39: Links: Spritzgussanlage „Engel – Insert 200“. Rechts: Umluftofen und Roboter bei der SGL.

## Thermoformen von unverstärkten Organoblechen in der Spritzgussanlage

Zur Umformung von unverstärkten Organoblechen werden insgesamt neun Organobleche vorbereitet und vermessen. Die Versuche werden nicht wie oben beschrieben, im vollautomatisierten Prozess verarbeitet. Für alle kommenden Thermoformversuche in der Spritzgussanlage werden die Organobleche per Hand auf dem Gitterrost platziert und einzeln im Ofen aufgeheizt. Das Ausfahren, Greifen, Transportieren, Einlegen und Verpressen laufen anschließend automatisiert ab. Daher ist in Tabelle 3.2.4.6 nur das Flächengewicht und die Dicke der vorbereiteten Organobleche exakt dokumentiert. Da die am Ende ermittelte optimale Temperatur von 250 °C aber anfangs noch nicht bekannt war, ist davon auszugehen, dass bis zu Versuch T-8.11b eine Ofentemperatur ungleich dieser 250 °C eingestellt war.

Die Versuche T-8.12a – T-8.13b werden bei 250 °C im Umluftofen aufgeheizt und können so erfolgreich umgeformt werden. Es lässt sich also sagen, dass das Thermoformen von unverstärkten Organoblechen mit einem Umluftofen genauso gut funktioniert, wie mit einem IR-Feld. Ein großer Vorteil des Umluftofen ist die Möglichkeit mehrere Organobleche gleichzeitig aufzuheizen und somit die Taktzeit deutlich verringern zu können. Dieser Automatisierungsschritt wird in dieser Versuchsreihe nicht untersucht, ist aber aufgrund der guten Ergebnisse sehr wahrscheinlich umsetzbar.

Tabelle 3.2.4.19: Thermoformen von unverstärkten Organoblechen in der Spritzgussanlage.

Versuch	Flächengewicht Organoblech	Dicke Organoblech	Temperatur Umluftofen	Gesamt
T-8.8a	2475 g/m <sup>2</sup>	1,97 mm	(≠ 250 °C)	niO
T-8.8b	2539 g/m <sup>2</sup>	2,00 mm	(≠ 250 °C)	niO
T-8.9a	2519 g/m <sup>2</sup>	1,99 mm	(≠ 250 °C)	niO
T-8.9b	2508 g/m <sup>2</sup>	2,01 mm	(≠ 250 °C)	iO
T-8.11b	2532 g/m <sup>2</sup>	1,87 mm	(≠ 250 °C)	niO
T-8.12a	2535 g/m <sup>2</sup>	1,99 mm	250 °C	iO
T-8.12b	2580 g/m <sup>2</sup>	2,02 mm	250 °C	iO
T-8.13a	2659 g/m <sup>2</sup>	2,09 mm	250 °C	iO
T-8.13b	2611 g/m <sup>2</sup>	2,06 mm	250 °C	iO

### Thermoformen von verstärkten Organoblechen in der Spritzgussanlage

Die verstärkten Organobleche werden vor dem Thermoformen auf die gleiche Art und Weise wie die unverstärkten Organobleche vorbereitet. In Tabelle 3.2.4.7 sind alle wichtigen Parameter notiert. Bei den Versuchen T-11.12a und 11.12b wird die verstärkte Seite nach unten zeigend auf den Gitterrost gelegt. Durch das Aufheizen lösen sich die Tapes ein wenig vom Organoblech und fallen beim Transport zur Presse ab.

Die restlichen Versuche werden mit der Verstärkung nach oben aufgelegt. Durch diese Änderung können fast alle verstärkten Organobleche erfolgreich umgeformt werden. Nur bei T-11.15 und T-11.17a werden die Tapes im Ofen aufgrund der zirkulierenden Luft vom Organoblech heruntergeweht.

Es lässt sich also sagen, dass verstärkte Organobleche sich im Umluftofen aufheizen lassen. Jedoch birgt dieser Prozess die Gefahr, dass die Tapes verrutschen. Durch eine Anpassung der Lüfterleistung und Luftzuführung kann dieses Problem jedoch gelöst werden.

Tabelle 3.2.4.20: Thermoformen von verstärkten Organoblechen in der Spritzgussanlage

Versuch	Flächenge- wicht Orga- noblech	Dicke Orga- noblech	Temperatur IR-Ofen	Gesamt
T-11.12a	2332 g/m <sup>2</sup>	1,77 mm	250 °C	niO
T-11.12b	2331 g/m <sup>2</sup>	1,78 mm	250 °C	niO
T-11.13a	2342 g/m <sup>2</sup>	1,79 mm	250 °C	iO
T-11.13b	2374 g/m <sup>2</sup>	1,80 mm	250 °C	iO
T-11.14a	2388 g/m <sup>2</sup>	1,78 mm	250 °C	iO
T-11.14b	2426 g/m <sup>2</sup>	1,80 mm	250 °C	iO
T-11.15	2615 g/m <sup>2</sup>	2,27 mm	250 °C	niO
T-11.16a	2352 g/m <sup>2</sup>	1,79 mm	250 °C	iO
T-11.16b	2388 g/m <sup>2</sup>	1,83 mm	250 °C	iO
T-11.17a	-	2,09 mm	250 °C	niO
T-11.17b	-	1,95 mm	250 °C	iO
T-11.18a	-	1,94 mm	250 °C	iO
T-11.18b	-	2,00 mm	250 °C	iO

### Thermoformen von nachträglich verstärkten Organoblechen in der Spritzgussanlage

Auch die Organobleche, die nach dem Konsolidieren lokal verstärkt werden, sollen im Umluftofen aufgeheizt und in der Spritzgussanlage umgeformt werden. In Tabelle 3.2.4.8 sind alle wichtigen Prozessparameter aufgelistet.

Tabelle 3.2.4.21: Thermoformen von nachträglich verstärkten Organoblechen in der Spritzgussanlage.

Versuch	Flächenge- wicht Orga- noblech	Dicke Orga- noblech	Temperatur IR-Ofen	Gesamt
T-12.2b	2836 g/m <sup>2</sup>	2,18 mm	250 °C	iO
T-12.3a	2794 g/m <sup>2</sup>	2,18 mm	250 °C	niO
T-12.3b	2790 g/m <sup>2</sup>	2,22 mm	250 °C	iO

Aufgrund der geringen Probenanzahl ist es schwierig eine eindeutige Aussage über die Prozessqualität zu treffen. Es zeigt sich eine Ähnlichkeit zum Thermoformen von vorverstärkten Organoblechen. Auch hier neigen die Tapes dazu sich vom Organoblech abzulösen. Dieses Problem könnte aber wie bei den vorherigen Versuchen durch eine Anpassung der Lüfterleistung im Umluftofen verbessert werden.

## Thermoformen von unkonsolidierten rCF-Vliesen in der der Spritzgussanlage

Vor dem ersten Thermoformversuch mit unkonsolidierten rCF-Vliesen, werden die einzelnen Vlieslagen mit einem Ultraschallschweißgerät einzeln miteinander verschweißt. Dies soll die einzelnen Vliese daran hindern durch den Umluftofen davongeweht zu werden. Es werden insgesamt nur zwei Heizversuche durchgeführt. Bei beiden lässt sich das Vlies nicht homogen aufheizen. Das unkonsolidierte Vlies hat eine zu hohe Isolierwirkung. Somit kann resümiert werden, dass sich unkonsolidierte Vliese nicht durch einen Umluftofen aufschmelzen und sich somit auch nicht in der Spritzgusszelle thermoformen lassen.

### 3.2.5 Arbeitspaket Fortsetzung AP 3.2.4 Hinterspritzen von Organoblechen

In diesem Abschnitt sollen Versuche zum Hinterspritzen von verstärkten und unverstärkten Hutprofilen durchgeführt werden. Es wird untersucht welche Heiz-, Press- und Spritzgussparameter die besten Ergebnisse in Bezug auf Verarbeitbarkeit, Optik, Anhaftung, und Schrumpf der Schmelze liefert. Zusätzlich wird untersucht, ob sich ein Organoblech mit dem Spritzgusswerkzeug in einem Prozessschritt umformen und hinterspritzen lässt. Die Ergebnisse gehören zum Arbeitspaket 3.2.4 „Thermoformen und Hinterspritzen“, werden zur verbesserten Übersichtlichkeit hier im Kapitel 3.2.5 beschrieben.

Um die Hutprofile mit einer PA6-Schmelze zu umspritzen, wird ein entsprechendes Werkzeug (Abbildung 3.2.5.1) in die Presse der Spritzgussanlage gerüstet. Dieses Werkzeug hat die gleiche Geometrie wie das bisher verwendete Umformwerkzeug. Im Unterschied zum reinen Umformwerkzeug besitzt dieses Werkzeug zusätzliche Kavitäten für Rippen und eine umlaufende Kunststoffkante. In dieses Werkzeug werden die umgeformten Hutprofile eingelegt und anschließend umspritzt. Beim Einschießen des flüssigen Kunststoffes fließt die Schmelze in die freien Kavitäten. Nachdem die Schmelze ausgehärtet ist, wird das hinterspritzte Hutprofil mit den in der Abbildung sichtbaren Auswerferstiften entformt und kann entnommen werden.



Abbildung 3.2.5.40: Darstellung des Hutprofil-Spritzgusswerkzeuges der SGL Carbon.

## Hinterspritzen von verstärkten und unverstärkten Hutprofilen

Bei dieser Versuchsreihe werden bereits umgeformte Hutprofile aus rCF-Vliesen in der Spritzgussanlage mit einer PA6-Schmelze umspritzt. Da das Spritzgusswerkzeug einen umlaufenden Schmelze-Kanal besitzt, der eine saubere Kunststoffkante am Hutprofil erzeugt, muss im Gegensatz zum reinen Umformwerkzeug das eingelegte Hutprofil exakt zugeschnitten werden. Daher werden alle für diese Versuchsreihe vorgesehenen Hutprofile auf eine Länge von 277 mm und eine Breite von 208 mm zugesägt. Aus den Erfahrungen vorheriger Projekte können folgende Parameter schon vor Beginn der Versuchsreihe festgelegt werden:

- Temperatur Umluftofen: 200 °C
- Heiz-Zeit Umluftofen: 315 s
- Presskraft: 1300 kN
- Temperatur Schmelze: 260 °C
- Einspritzgeschwindigkeit: 1100 cm<sup>3</sup>/s
- Haltezeit Presse: 45 s

Diese Werte bestätigen sich während den Versuchen und müssen nicht weiter angepasst werden. Aus Tabelle 3.2.24 können alle weiteren wichtigen Prozessparameter entnommen werden. Bei dieser Versuchsreihe wird nicht auf die Beschriftung der Hutprofile geachtet. Deshalb ist die Reihenfolge der Spritzgussversuche nicht die gleiche wie die der Beschriftung. Die Tabelle ist allerdings chronologisch nach Spritzgussversuchen geordnet.

Tabelle 3.2.5.22: Hinterspritzen von verstärkten und unverstärkten Hutprofilen.

Verstärkt / unverstärkt	Versuchsbezeichnung	Flächengewicht Organoblech	Dicke Organoblech	Umschaltvolumen	Haltezeit Presse	Gesamt
unverstärkt	T-8.12a	2535 g/m <sup>2</sup>	1,99 mm	90 cm <sup>3</sup>	45 s	niO
	T-8.12b	2580 g/m <sup>2</sup>	2,02 mm	130 cm <sup>3</sup>	45 s	iO
	T-8.13a	2659 g/m <sup>2</sup>	2,09 mm	140 cm <sup>3</sup>	45 s	iO
verstärkt	T-11.13a	2342 g/m <sup>2</sup>	1,79 mm	150 cm <sup>3</sup>	45 s	niO
	T-11.16a	2352 g/m <sup>2</sup>	1,79 mm	140 cm <sup>3</sup>	45 s	iO
	T-11.13b	2374 g/m <sup>2</sup>	1,80 mm	140 cm <sup>3</sup>	45 s	niO
	T-11.16b	2388 g/m <sup>2</sup>	1,83 mm	135 cm <sup>3</sup>	45 s	iO
	T-11.14a	2388 g/m <sup>2</sup>	1,78 mm	135 cm <sup>3</sup>	45 s	iO

Beim ersten Versuch T-12a wird eine zu niedrige Einspritzmenge gewählt. Dies hat zur Folge, dass sich die Rippen-Kavitäten nicht vollständig mit Schmelze füllen (Abbildung 3.2.5.2).

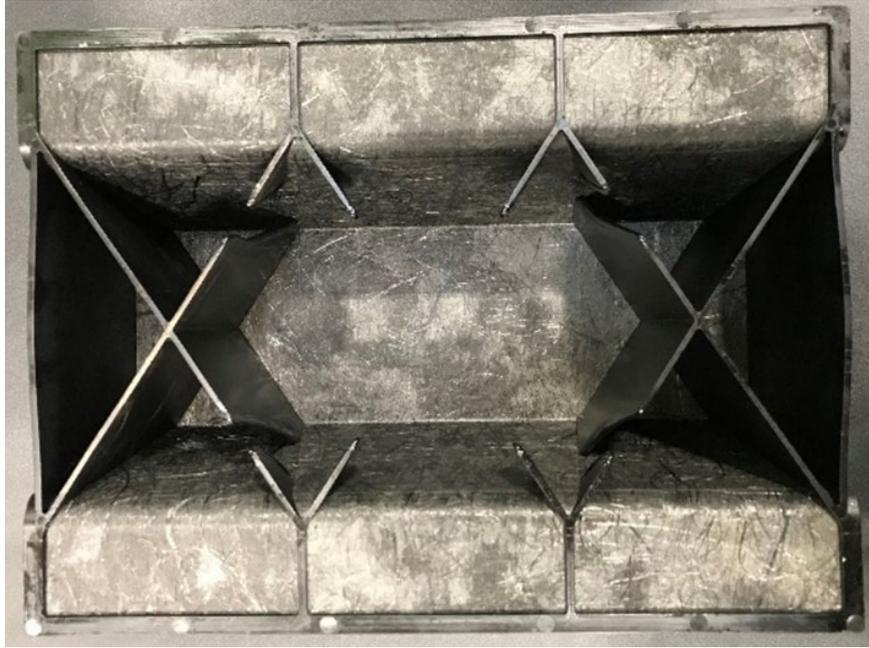


Abbildung 3.2.5.41: T-12a: unvollständige Füllung der Rippen.

Bei den Versuchen T-8.12b und T-8.13a (Abbildung 3.2.5.3) wird die Einspritzmenge deutlich erhöht. Die Rippen und die umlaufende Kante werden vollständig gefüllt. Es sind keine Fehlstellen zu erkennen. Allein die abschließenden Außenwände wölben sich nach dem Ausbau nach außen. Dieser Effekt ist auf die thermische Schrumpfung des Kunststoffes und die daraus resultierenden Spannungen zurückzuführen.



Abbildung 3.2.5.42: T-12a: Vollständige Füllung aller Schmelze-Kavitäten; Ausbeulen der äußeren Wände.

Bei den Versuchen T-11.13a und T-11.13b wird beides mal zu wenig Schmelze eingespritzt. Das könnte daran liegen, dass vor diesen zwei Durchgängen die Anlage eine Zeit stillsteht und sich dadurch die Viskosität der Schmelze ändert. Bei den restlichen drei Versuchen wird genügend Schmelze eingespritzt, obwohl an den Parametern nichts geändert wird. Diese Bauteile weisen nur eine kleine Überspritzung der Schenkel des Hutprofils auf. Dies liegt an der geringen Wandstärke der Hutprofile. Dadurch entsteht ein kleiner Spalt zwischen Organoblech und Werkzeugoberfläche.

## Thermoformen und Hinterspritzen von verstärkten und unverstärkten Organoblechen

Bei der letzten Versuchsreihe zum Hinterspritzen werden sowohl verstärkte als auch unverstärkte Organobleche in einem Prozessschritt umgeformt und hinterspritzt. Die Schwierigkeit bei diesem Prozess liegt in der exakten Positionierung der Organobleche im Spritzgusswerkzeug. Ist das Organoblech zu groß oder verrutscht es beim Einlegen in das Werkzeug, stimmen die Kanten nicht mehr mit der umlaufenden Schmelze-Kavität überein.

Vor Beginn der Versuche, wird die abgewickelte Breite des Spritzgusswerkzeuges von 338 mm ermittelt und alle übrigen Organobleche auf das Maß 277 mm x 338 mm zugeschnitten. Für diese Versuche werden folgende Prozessparameter zu Beginn festgelegt und für alle Versuche beibehalten:

■ Temperatur Umluftofen	250 °C
■ Haltezeit Umluftofen	480 s
■ Presskraft	1300 kN
■ Temperatur Schmelze	260 °C
■ Einspritzvolumen	450 cm <sup>3</sup>
■ Einspritzgeschwindigkeit	1100 cm <sup>3</sup> /s

Die ersten Organobleche werden umgeformt, ohne eine Schmelze einzuspritzen. Sie sind nur zur Einstellung der Positionierung gedacht. Dabei fällt auf, dass die abgewickelte Breite von 338 mm zu groß ist. In dieser Richtung ragt das Organoblech nach dem reinen Umformen über die umlaufende Kavität hinaus. Durch den Umformprozess längt sich das Organoblech in dieser Richtung. Durch mehrere Zuschnitt- und Umformiterationen kann die optimale Breite von 325 mm ermittelt werden. Aus Tabelle 3.2.5.2 können alle weiteren wichtigen Prozessparameter entnommen werden.

Tabelle 3.2.5.23: Thermoformen und Hinterspritzen von unverstärkten Organoblechen.

Versuchs- bez.	Länge	Breite	Dicke Or- ganoblech	Umschalt- volumen	Haltezeit Presse	Gesamt
T-8.7b	277 mm	325 mm	1,95 mm	135 cm <sup>3</sup>	45 s	iO
T-8.10a	277 mm	325 mm	1,96 mm	150 cm <sup>3</sup>	80 s	iO
T-8.10b	277 mm	325 mm	2,00 mm	150 cm <sup>3</sup>	45 s	iO
T-11.19a	277 mm	325 mm	1,96 mm	135 cm <sup>3</sup>	45 s	niO
T-11.19b	277 mm	325 mm	1,95 mm	135 cm <sup>3</sup>	45 s	niO
T-11.20a	277 mm	325 mm	1,94 mm	135 cm <sup>3</sup>	45 s	niO

Nachdem die Zuschnitt-Größe und die Positionierung der Organobleche exakt eingestellt sind, werden alle restlichen unverstärkten Organobleche erfolgreich umgeformt und hinterspritzt. Auch hier tritt das kleine Problem des Ausbeulens der Außenwand auf.

Beim Umformen und Hinterspritzen der verstärkten Organobleche lösen sich bei jedem der drei Versuche die Tapes ab und behindern das Einlegen in die Presse oder verhindern das komplette Schließen des Spritzgusswerkzeuges.



---

## Fazit zum Spritzgießen

Durch die begrenzte Anzahl an Versuchen, können noch keine mängelfreien Bauteile hergestellt werden. Die Problematik des Ausbeulens ist hier wohl die größte Herausforderung. Dafür müsste eine weitere große Versuchsreihe mit genügend identischen Organoblechen durchgeführt werden. Es ist aber zu erwarten, dass sich dieses Problem durch Optimieren der Prozessparameter lösen lässt.

Das Hinterspritzen von verstärkten Organoblechen bzw. Hutprofilen ist sehr fehleranfällig. Da sich die Tapes beim Aufheizvorgang vom Organoblech lösen, verrutschen oder fallen sie komplett ab. Dadurch ist kein stabiler Prozess möglich.

Das Hinterspritzen mit und ohne gleichzeitigen Umformen von unverstärkten Organoblechen bzw. Hutprofilen läuft sehr stabil und fehlerfrei ab. Trotz der sehr geringen Stückzahl an Halbzeugen kann ein Prozess entwickelt werden, bei dem Ergebnisse in wiederholbarer Qualität erzielt werden können. Durch weitere Versuche kann die Qualität der hinterspritzten Hutprofile noch weiter verbessert werden.

### 3.3 Arbeitspaket: Prozessbewertung

Das Arbeitspaket Prozessbewertung schließt alle Prüfungen aus den zuvor vorgestellten Versuchsreihen mit ein. Es soll eine Übersicht über die wichtigsten Kennwerte und Zusammenhänge liefern.

Das Fraunhofer IGCV fokussiert sich bei der Herstellung der Platten in erster Linie auf den thermoplastischen, variothermen Prozess, um eine möglichst gute Qualität und damit verbunden, möglichst hohe Eigenschaften, zu erzeugen. Bei der SGL Carbon werden isotherme Prozesse durchgeführt, die sich durch schnellere Taktzeiten und dadurch für eine Serienanwendung eignen. Auch bei der Nasspressroute werden die seriennahen Prozesse bei der SGL durchgeführt, indem eine vollautomatisierte Nasspresszelle eingesetzt wird. Manuelle Platten für das Nasspressen werden mit dem neuen DFCM-Verfahren bei Huntsman durchgeführt. Für das RTM wird ebenfalls die Infrastruktur des Fraunhofer IGCV genutzt.

zeigt die Kennwerte der kommerziellen Materialien von ELG und Tenowo die im 4-Punkt-Biegeversuch ermittelt werden. Dabei zeigt sich, dass die duromeren Kennwerte durch das WCM (DFCM) und RTM die höchsten Kennwerte ergeben. Selbst bei den unzureichenden RTM-Versuchen am Fraunhofer IGCV ergeben sich sehr hohe Kennwerte für das RTM-Verfahren. Es zeigt sich außerdem, dass bei den duromeren Verfahren die Eigenschaften der Tenowo Materialien über denen der ELG-Materialien liegen. In Rücksprache mit ELG könnte dies an einer nicht vollends optimierten thermischen Separation der Airbus Fasern liegen. Ein Vergleich zu den Ergebnissen der Einzelfasermessung ist in AP 4.1 gegeben. Alle Materialien zeigen deutliche höhere Werte in 90°, was auf die Ausrichtung der Fasern quer zur Rollenrichtung, in die Cross Direktion zurück zu führen ist. Die höchsten Werte liefert das Tenowo Mateial #2 im DFCM-Versuch. Hier werden Biegefestigkeiten von 510 MPa und eine Biegesteifigkeit von 31 GPa erreicht in 90° erreicht und 25 GPa, sowie 475 MPa in 0° erreicht. Die Materialien mit PA6 als Matrix zeigen eine Biegefestigkeit von 250 – 310 MPa sowie eine Biegesteifigkeit von 15 – 20 GPa.

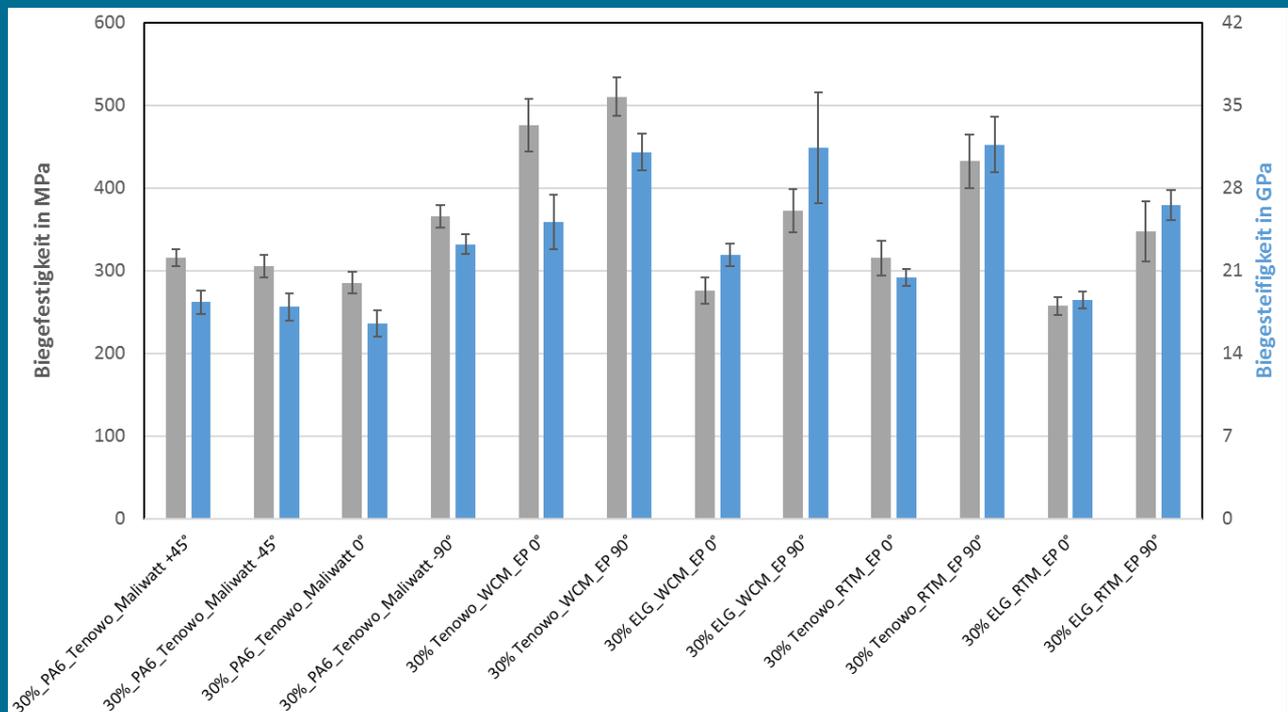


Abbildung 3.3.1 Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit einiger ELG und Tenowo Materialien aufgelistet nach 0° und 90° Biegeeigenschaft. Keine Normierung der Daten auf einen FVG. Die WCM Daten in dieser Darstellung beziehen sich auf die bei Huntsman infiltrierten Platten

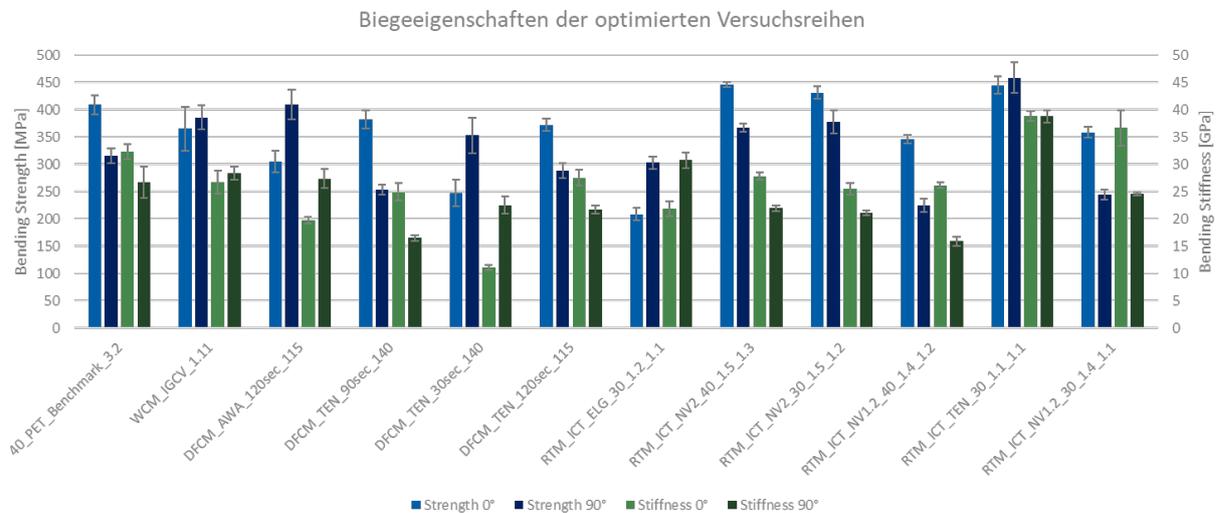


Abbildung 3.3.2: Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit einiger ITA, ELG, Tenowo und Nassvliesmaterialien aufgelistet nach 0° und 90° Biegeeigenschaft. Fokussierung auf RTM Daten, erzeugt am Fraunhofer ICT. Keine Normierung der Daten auf einen FVG.

Abbildung 3.3.2 erweitert die Darstellung des Leistungsspektrums der Vliesstoffe um weitere Materialien. In dieser Darstellung ist ebenfalls das AWA Nassvlies aufgelistet, welches im DFCM Prozess verarbeitet wird. Außerdem beinhaltet die Darstellung die Daten aus den RTM Versuchen am Fraunhofer ICT in Pfinztal. Das Tenowo Material #2 aus Verschnittfasern von MCAM weißt hierbei die besten Kennwerte in beide Raumrichtungen auf. Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass dieses Material im RTM-Prozess die höchsten Kennwerte aller Materialien aus dem CaRinA Projekt ergeben hat. Die Festigkeit dieses Materials beläuft sich auf 445 – 465 MPa und die Steifigkeit 39 GPa Biegefestigkeit. Es zeigt sich also, dass das RTM-Verfahren die besten Kennwerte hervorbringen kann. Ob dies jedoch mit dem Aufwand, Zykluszeiten und Kosten vereinbar ist, muss noch weiter analysiert werden. Weiterhin sind in dieser Darstellung die Eigenschaften des PET-Vliesstoffes aufgezeigt, welche zu den besten im Bereich der Thermoplaste gehören. Die Festigkeit dieses Materials liegt bei 315-410 MPa und die Steifigkeit bei 27-33 GPa. Dieses Material wird mit einem FVG von 40 vol.-% hergestellt.

### Gesamtvergleich unterschiedlichen thermoplastischer Vliesstoffe

In Abbildung 3.3.3 ist der Vergleich unterschiedlicher Vliesstoffe mit thermoplastischer Matrix gezeigt. Für diese Darstellung werden ausschließlich Vliesstoffe von ELG ausgewählt, welche die selbe Carbonfaser haben und auch mit derselben Krempel hergestellt werden. Es handelt sich um die Eigenschaften des MAPP, des PA6 und des PPS Vlieses.

Es ist ersichtlich, dass das PPS die höchste Festigkeit und Steifigkeit aufzeigt, gefolgt vom PA6 und dem MAPP. Gemessen am Preis und der Einsatzmöglichkeit war dies so zu erwarten. Die Steifigkeit des PA6 liegen etwa auf dem gleichen Niveau wie die von MAPP, lediglich die Festigkeit liegt 16% über der von MAPP. Da viele rCF-Anwendungen Steifigkeitsdominiert sind rechtfertigt der Aufpreis und die notwendige Trocknung von PA6 nicht die Steigerung der Performance. Für PPS kann mit einem maximalen Wert von 33 GPa eine um 50% erhöhte Steifigkeit erreicht werden. Die Festigkeit nimmt um 5% zu. Diese Steigerung der Eigenschaften kann für potentielle zukünftige Anwendungen interessant sein.

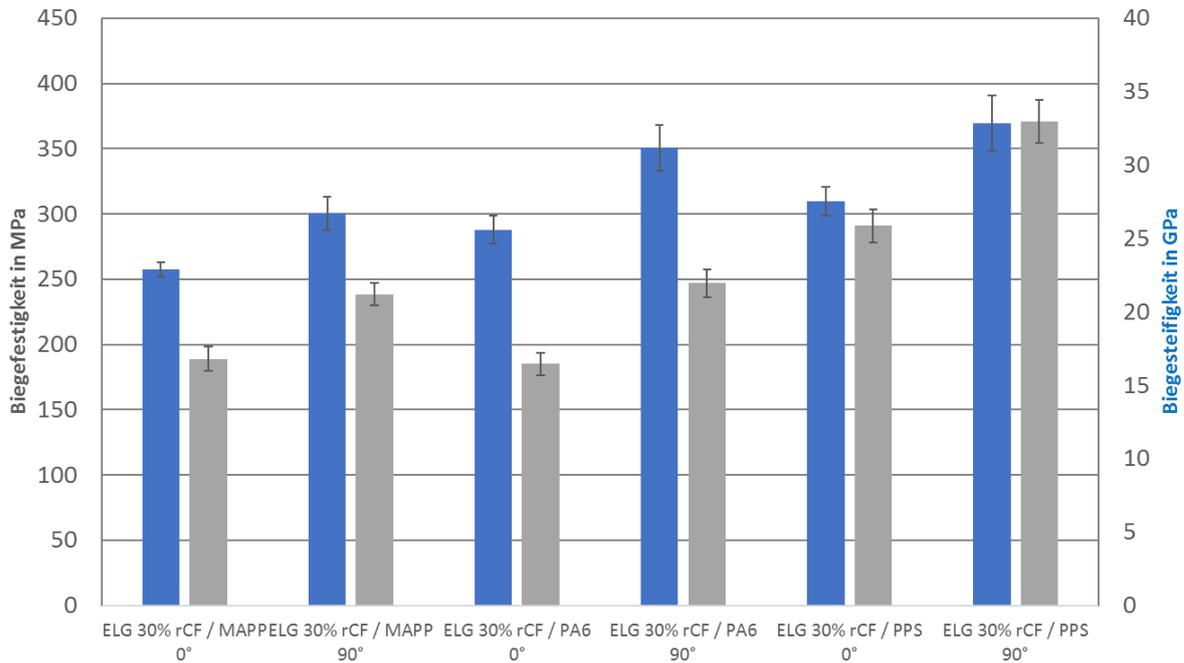


Abbildung 3.3.3: Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit aller thermoplastischen Materialien von ELG Carbon Fibres aufgelistet nach 0° und 90° Eigenschaft. Keine Normierung der Daten auf einen FVG.

Neben diesen Thermoplasten wird auch PET als Matrixwerkstoff im Projekt untersucht. Das PET hierfür wird vom assoziierten Partner Trevira zur Verfügung gestellt. Zu Beginn werden vom ITA unterschiedliche PET Typen nach ihren textilen Eigenschaften ausgewählt und ihre Eignung für den Krempelprozess evaluiert. Nachdem eine geeignete Faser gefunden ist ((T290, 60 mm Faserlängen 6,7 dtex, 4 B/cm) wird diese dazu eingesetzt Vliesstoffe mit unterschiedlichen Faservolumengehalten herzustellen. Der Einfluss der unterschiedlichen PET-Fasern sowie der Unterschied zu vergleichbaren PA6 Derivaten ist in die Veröffentlichung „Influences on textile and mechanical properties of recycled carbon fiber nonwovens produced by carding“ von F. Manis und G. Stegshuster eingeflossen. Die so hergestellten Vliesstoffe werden anschließend am Fraunhofer IGCV zu Platten verpresst und charakterisiert. Die Kennwerte der 4-Punkt Biegeversuche sind in Abbildung 3.3.4 aufgezeigt. Die Kennwerte sind hierbei als Mittelwert der 0° und 90° Eigenschaften aufgetragen. Es kann festgestellt werden, dass ein Zuwachs der mechanischen Kennwerte mit steigendem Faservolumengehalt besteht. Allerdings ist dieser Zusammenhang nicht gänzlich linear, zwischen den Materialien mit 15 vol.-% und 18 vol.-% ist keine Verbesserung der Eigenschaften zu beobachten und auch zwischen den 25 vol.-% und 30 vol.-% Material besteht kaum eine Verbesserung. Jedoch ist das Niveau der 25/30 vol.-% Proben höher als das der 15/20 vol.-% Proben womit ein Anstieg der Kennwerte gezeigt werden kann. Es bleibt also festzuhalten, dass die Eigenschaften von Vliesstoffen mit steigendem FVG ebenfalls steigen, jedoch nicht zwangsläufig linear. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da diese beinhaltet, dass eine Normierung von mechanischen Kennwerten auf einen FVG nur bedingt möglich ist. Gründe hierfür sind wahrscheinlich vor allem Einflüsse aus der Verarbeitung der Vliese. Lokale Schwankungen der Carbonfasermasse im Vliesstoff sowie Schwankungen im Flächengewicht können das Verpressen der Platten erschweren und den ermittelten Kennwert beeinflussen. So kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob beispielsweise der zu 25 vol.-% bestimmte FVG dem Wert der Prüfprobe entspricht. In vliesstoffbasierten Produkten ist hier mit Schwankungen zu rechnen. Ein tendenzieller Anstieg ist jedoch zu beobachten.

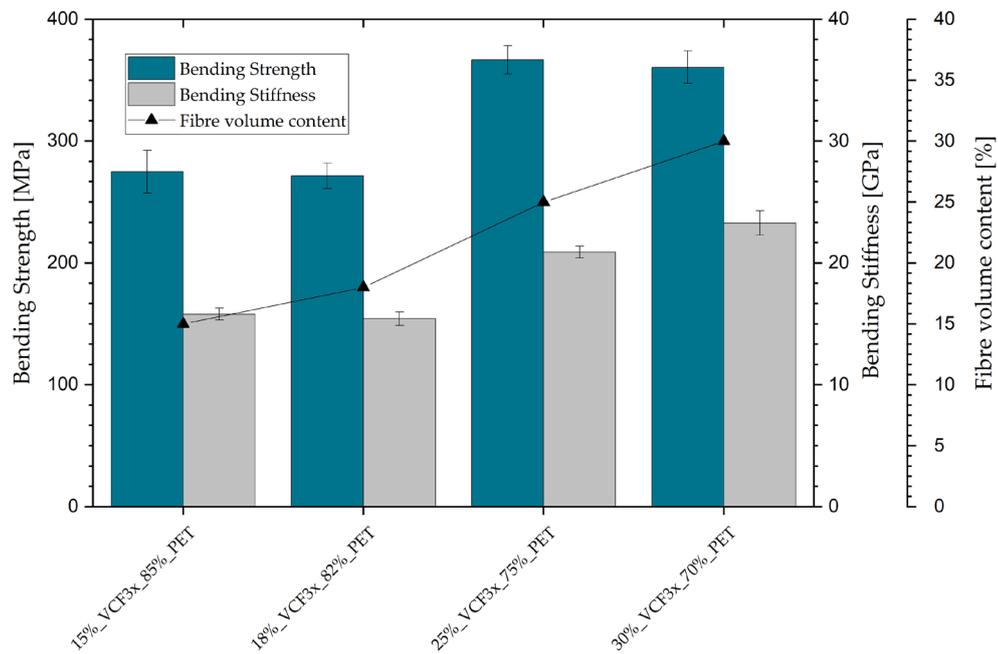


Abbildung 3.3.4: Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit von rCF-Vliesstoffen mit einer unterschiedlichem FVG und einer PET-Matrix [Man21].

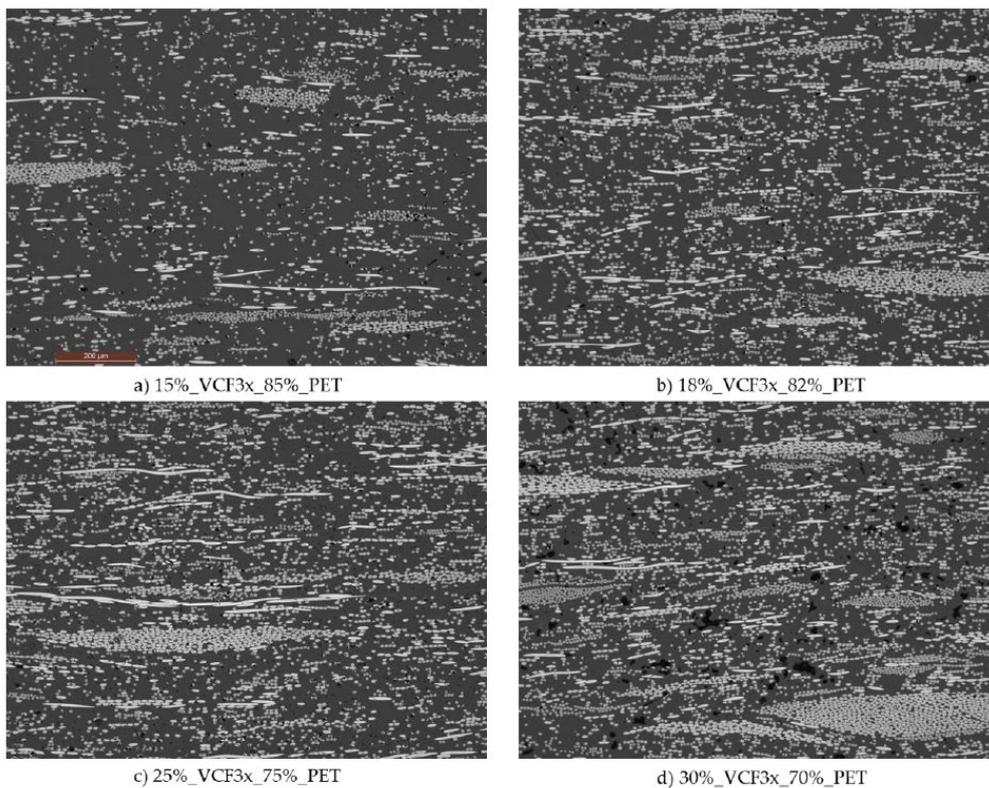


Abbildung 3.3.5: Schliffbilder unterschiedlicher PET-Materialien mit variierendem FVG [Man21].

Abbildung 3.3.5 zeigt das Schlibbild der vier unterschiedlichen Vliesstoffe mit PET als Matrixwerkstoff und variierendem FVG. Es kann eine objektive Zunahme der Fasern anhand des Schlibbes gezeigt werden. Ebenfalls ersichtlich ist, dass bei einem FVG von 30% mehr Poren in der Probe gefunden werden können was auf die erschwerten Konsolidierungsbedingungen zurückzuführen ist.

### Einfluss der lokalen Verstärkung auf Vliesstoffe

Wie im Kapitel 3.1.3 und 3.2.3 beschrieben, werden Vliesstoffe mit Endlosfasern im Projekt lokal und schichtweise verstärkt. Mit dieser Technologie werden sowohl Bauteile wie auch Platten hergestellt. Die Platten sollen anschließend mechanisch charakterisiert werden. Die Ergebnisse dieser Charakterisierung wird in der Lightweight Design „Lastpfadgerechte Verstärkung von rCF-Vliesstoffen“ im Dezember 2020 veröffentlicht [Man20]. Für diese Versuche werden die Decklagen auf beiden Seiten nicht nur lokal, sondern flächig verstärkt damit Probenkörper herausgeschnitten und geprüft werden können.

Unverstärkte Platten aus Prepreg-Vliesstoff weisen eine Festigkeit von ca. 284 MPa und eine Biegesteifigkeit von 17,3 GPa auf. In ihrer verstärkten Form kann die Festigkeit auf 792 MPa und die Steifigkeit auf 78,5 GPa gesteigert werden. Dies entspricht einer Steigerung der Steifigkeit von 453%. Der Hybrid-Vliesstoff aus Polyamid 6 besitzt in seiner konsolidierten Variante eine Festigkeit von 365 MPa und eine Steifigkeit von 27,4 GPa. Lokal verstärkt können diese Eigenschaften auf 534 MPa und 59,6 GPa Steifigkeit erhöht werden, was ebenfalls einer Steigerung von 217% entspricht.

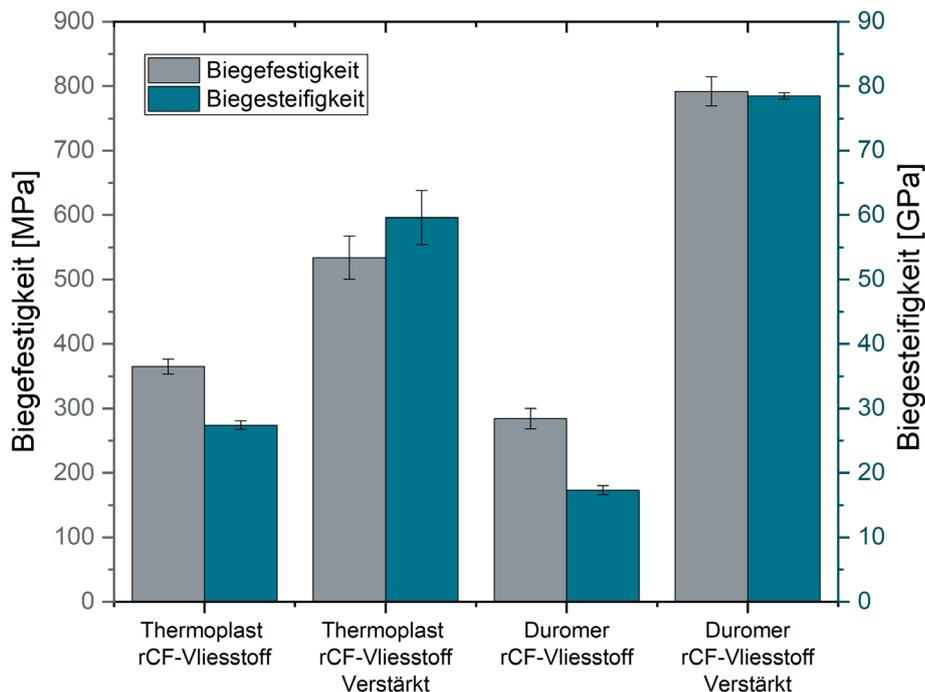


Abbildung 3.3.6: Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit von unverstärkten und verstärkten thermoplastische und duromeren Vliesstoffen [Man20].

## 4 HAUPTARBEITSPAKET 4: MATERIALCHARAKTERISIERUNG

### 4.1 Arbeitspaket: Fasercharakterisierung

Nach der Definition der Spezifikationen und der Materialbestellung werden die unterschiedlichen Carbonfasern am Fraunhofer IGCV auf ihre Einzelfaserkennwerte untersucht. Für die Charakterisierung werden jeweils 20 Filamente statistisch unabhängig aus unterschiedlichen Rovings ausgewählt und am FAVIMAT+ des Fraunhofer IGCV, nach der nach der ASTM 3822, vermessen. Die Filamente haben eine Mindestlänge von 25 mm und werden mit einer Vorspannung von 1 cN/tex geprüft. Der Durchmesser wird vibroskopisch am selben Gerät nach ASTM D1577 mit 0,7 cN/tex vermessen. Als Prüfungsgeschwindigkeit wird 0,5 mm/min gewählt. Die Ergebnisse ins in Tabelle 9 aufgetragen.

Tabelle 4.1.1: Einzelfasereigenschaften der im Projekt CaRinA eingesetzten Fasern.

	PCF ELG SM45R	VCF1x/VCF3x MCA HT-Faser	PCF Airbus / ELG-Faser
<b>Einzelfaserfestigkeit [GPa]</b>	4,05 ± 0,82	3,56 ± 0,98	4,00 ± 0,61
<b>Einzelfasersteifigkeit [GPa]</b>	284,34 ± 6,66	240,8 ± 6,76	271,99 ± 10,81
<b>Durchmesser [µm]</b>	6,72 ± 0,18	6,95 ± 0,16	5,81 ± 0,21
<b>Titer [dtex]</b>	0,63 ± 0,03	0,68 ± 0,03	0,47 ± 0,03
<b>Bruchdehnung %</b>	1,57 ± 0,30	1,62 ± 0,41	1,64 ± 0,2

Es geht hervor, dass die Eigenschaften aller drei Fasern auf einem ähnlichen Niveau sind, die Faser von MCAM ist etwas weniger steif und die Airbusfaser besitzt, da es sich um eine Luftfahrtfaser handelt einen reduzierten Durchmesser von 5,81 µm und einen Titer von 0,47 dtex und ist somit etwas feiner als die anderen beiden Fasern.

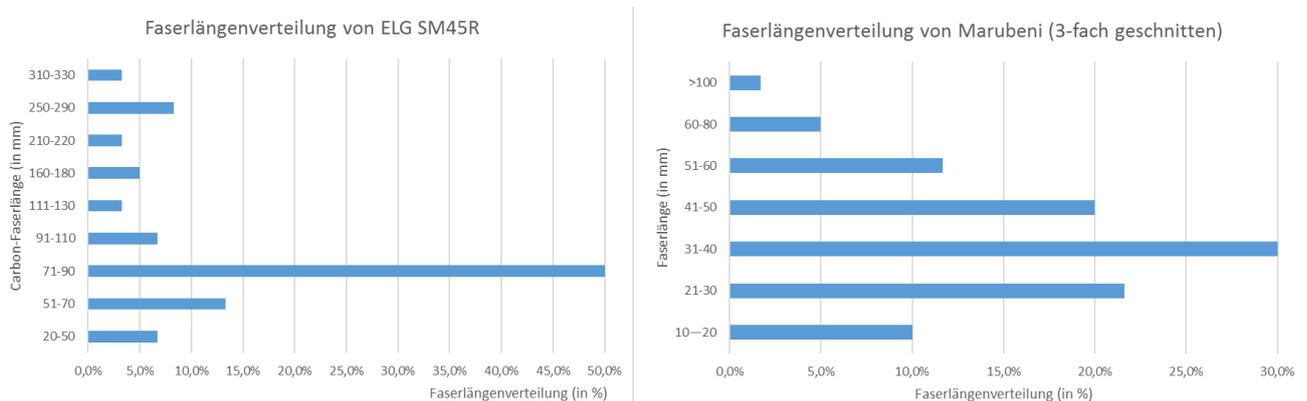


Abbildung 4.1.1: Faserlängenverteilung der ELG SM45R und Marubeni (3-fach geschnittenen) Faser wie sie im Projekt zu Vliesstoffen verarbeitet worden.

Neben der Vermessung de Einzelfasereigenschaften wird von Tenowo die Länge der Faser händisch am Mikroskop ausgezählt. Dazu werden mindestens 50 Filamente an unterschiedlichen Stellen entnommen und vermessen. Es ist klar ersichtlich, dass die ELG Faser eine mittlere Länge von 80 mm besitzt während die Marubeni Faser statistisch verteilter vorliegt. Die gemessenen gemittelten Faserlängen werden ebenfalls in Tabelle 1.1.1 aufgelistet.

Messungen werden am ITA Augsburg nach der Zwei-Pinzetten-Methode in Anlehnung an DIN 53808-1 durchgeführt. Die pyrolysierten Carbonfasern erreichen im Mittel 59 mm. Die Verschnittcarbonfasern sind im Mittel 49 mm lang. Abbildung 4.1.2 zeigt die Stapelschauliniendiagramme der beiden Carbonfasern.

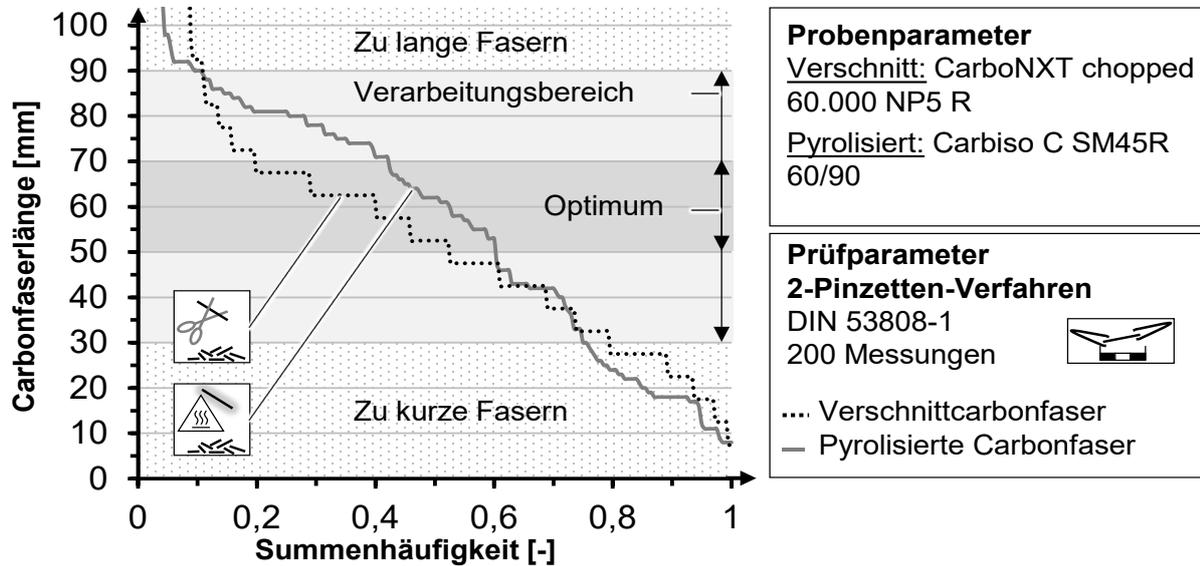


Abbildung 4.1.2: Stapelschauliniendiagramm der Verschnittcarbonfaser und pyrolysierten Carbonfaser [Ste21].

## 4.2 Arbeitspaket: Halbzeugcharakterisierung

Als wichtiger Indikator für die Qualität der Vliesstoffe kann das Flächengewicht herangezogen werden. Aus diesem Grund wird bei der SGL und beim Fraunhofer IGCV jeder Zuschnitt vor dem Stacking zur Platte gewogen, um damit der Mittelwert und die Schwankung im Flächengewicht ermittelt. Die Ergebnisse der SGL Messungen sind in Abbildung 3.1.4 und Abbildung 3.2.9 bereits dargestellt worden. Im Folgenden ist die Darstellung der Messungen des Fraunhofer IGCV gezeigt (Abbildung 4.2.1).

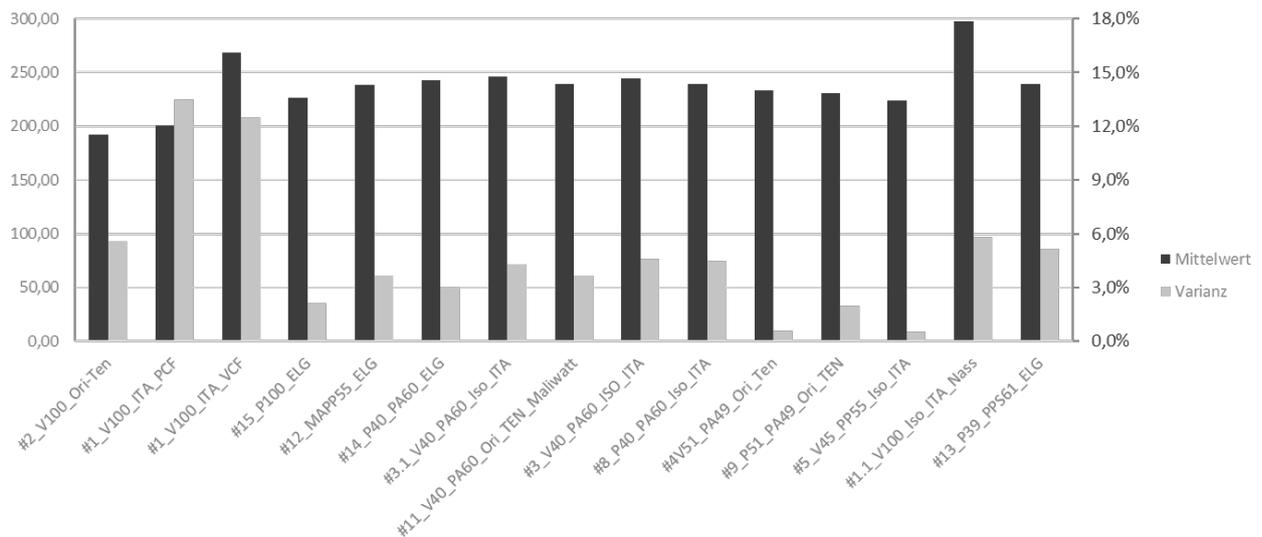


Abbildung 4.2.1: Faserflächengewicht und Variationskoeffizient der Vliestypen.

Die meisten Vliese haben ein Flächengewicht unter dem angezielten Wert von 250 g/m<sup>2</sup>. Ausnahmen bilden hier der Vliestyp #1 mit Verschnittfasern von Marubeni sowie #1.1, ebenfalls mit Verschnittfasern. Der Variationskoeffizient der Vliesstoffe bewegt sich im Normalfall zwischen 1% und 5%. Bei zwei der Versuchsvliesen des ITA wird vereinzelt ein Wert von >10% festgestellt, was wahrscheinlich auf die geringe Produktionsmenge und kurze Einlaufzeit dieser Vliese zurückzuführen ist.

Im weiteren Projektverlauf wird für alle Materialien die textile Zugfestigkeit im trockenen Zustand gemessen. Dieses Maß stellt einen Indikator für die Reißfestigkeit des Vlieses dar und ist ein wichtiges Maß für wichtige Prozessrouten, wie das Prepregen oder das Infiltrationsverfahren bei Lamilux. Außerdem kann dieser Wert für die Bewertung der Drapierung herangezogen werden.

### Untersuchungen der Vliesstruktur durch CT-Aufnahmen

Neben den Kennwerten aus den klassischen mechanischen Prüfungen werden mit zwei Materialproben CT-Scans durchgeführt. Ziel dieser Scans ist es, den dreidimensionalen Orientierungstensor zu erhalten. Diesen Tensor kann man mittels Software in eine materialspezifische FE-Materialkarte umwandeln, so dass der vollständige anisotrope Spannungstensor vorliegt, um so das Materialverhalten noch exakter in der Simulation abzubilden.

In Abbildung 4.2.2 ist ein CT-Scan an verschiedenen Stellen eines isotropen Vlieses zu sehen. Dies bestätigen auch die Aufnahmen an den verschiedenen Stellen. Es gibt lokale Bereiche mit minimalen Lunkern und Fehlstellen sowie lokale Faseranhäufungen. Generell ist eine sehr gute Konsolidierung des Materials vorhanden. Alle drei Bereiche weisen unterschiedliche Faserzusammenstellungen und damit Orientierungen auf, so dass in den Berechnungen die orthotrope Materialabbildung zu wählen ist.

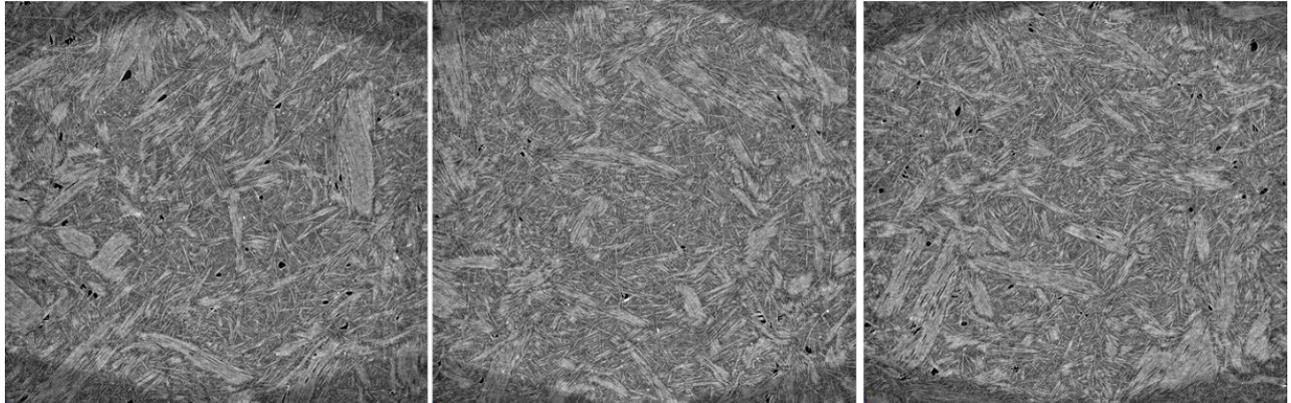


Abbildung 4.2.2: CT-Aufnahmen an unterschiedlichen Stellen im Vliesstoff.

Im nächsten Schritt werden die Orientierungstensoren an insgesamt 500 Stellen ermittelt. Zum besseren Verständnis wird in den folgenden Zeilen das Vorgehen an einem Beispiel wiedergegeben. Neben den reinen visuellen Aufnahmen wie in Abbildung 4.2.2 werden mittels Software die Orientierungstensoren ermittelt. Für jede Stelle in gewissen Abständen in allen drei Raumrichtungen. Um den Isotropiegrad zu prüfen, werden die Orientierungen an Stellen untersucht, wo die y- und z-Koordinaten jeweils den gleichen Wert besitzt und nur der x-Wert variiert wird. In Abbildung 4.2.3 ist die Normalverteilung der jeweiligen Raumrichtungen dargestellt.

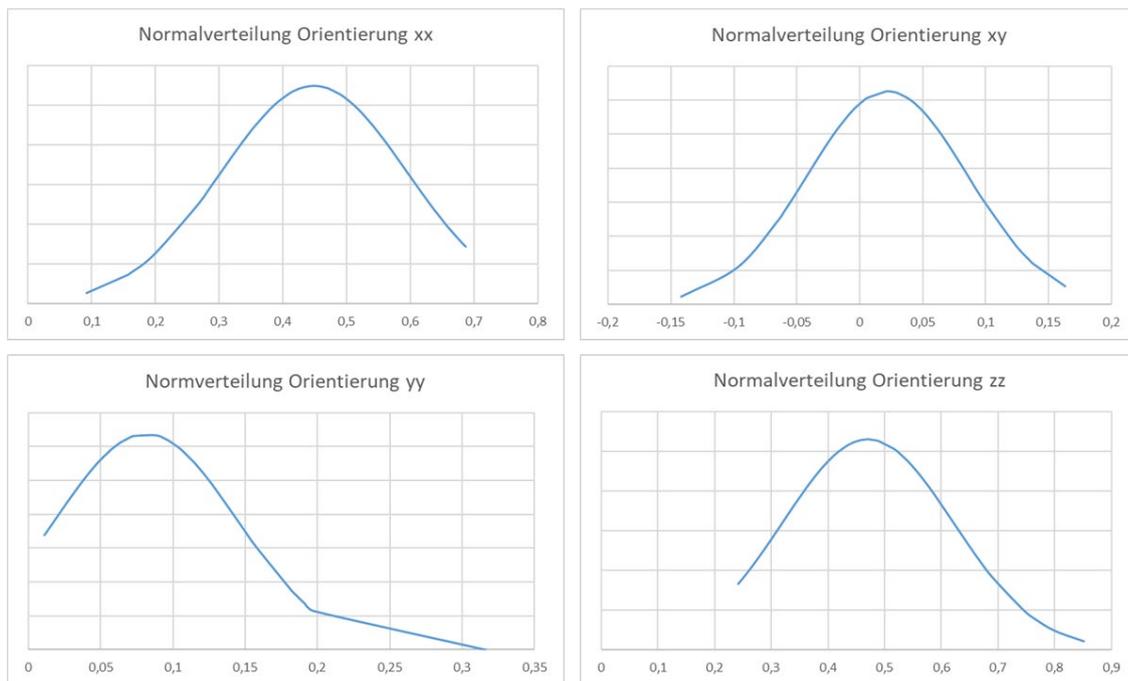


Abbildung 4.2.3: CT-Scan - Untersuchung Orientierungstensor.

Wie zu erkennen ist, weisen die Normalverteilungen der Orientierungen in xx-, xy- und zz-Ebene eine annehmbare Gauß-Verteilung auf, so dass hier eine ausreichende Isotropie angenommen werden kann. Lediglich bei der Normalverteilung der Orientierung der yy-Ebene zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Kurve. Dies bedeutet, dass hier eine Richtungsabhängigkeit zu sehen ist. Die Ergebnisse aus diesem CT-Scan spiegeln die Ergebnisse aus den mechanischen Charakterisierungen deutlich wieder, denn die y-Richtung ist die Abzugsrichtung des Vlieses, so dass hier eine Richtungsabhängigkeit entsteht. In den Kennwerten ist dies ebenfalls zu sehen, da hier die absoluten Werte im Vergleich zu den Werten in x-Richtung, für Trockenvliese, immer höher sind. In Abbildung 4.2.4. sind die mittels Software erzeugten Punkte einigermaßen zu erkennen.

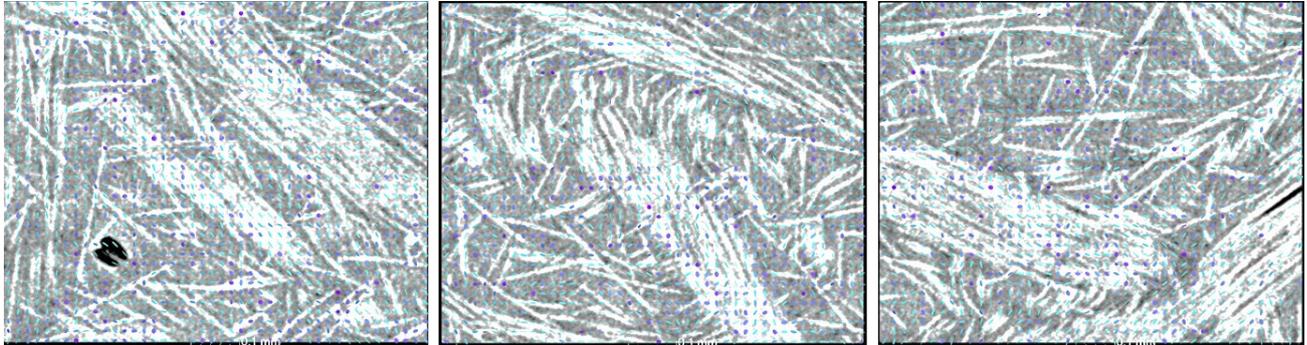


Abbildung 4.2.4: CT-Scan: Bestimmung Orientierungstensor mittels Software.

Analog zu den CT-Scans des isotropen Vlieses werden die Auswertungen für die orientierten Vliese durchgeführt. Die Ergebnisse weisen identischen Merkmale auf, jedoch sind die Normalverteilungen bei  $yy$  und auch minimal bei  $xx$  stärker ausgeprägt, so dass die eine deutlichere Richtungsabhängigkeit zu erkennen ist. Diese Erkenntnis spiegelt sich auch in den untersuchten Materialkennwerten wieder.

Die Implementierung des vollständigen anisotropen Steifigkeitstensors ist zu Beginn angedacht worden. Jedoch zeigt sich, dass die Ergebnisse aus den mechanischen Tests, der CT-Scans und den Berechnungen darauf hinweisen, dass eine Ermittlung des anisotropen Steifigkeitstensors nicht rechtfertigend ist, da der Aufwand im Vergleich zu den Kosten und Nutzung der Ergebnisse in keinem Verhältnis steht. Neben den Softwarekosten und der Kosten zur Ermittlung der CT Scan, deren Auswertung und Übertragung auf das FE-Model, welches zudem nur auf sehr lokalen Messungen bestehen würde, wird beschlossen, diese Methodik nicht weiter zu verfolgen. Im Arbeitspaket 5.2 „Case Studies“ wird in den Berechnungen, im Vergleich zum Versuch, eine deutliche Kongruenz des Verhaltens ersichtlich, so dass es diese Entscheidung untermauert.

### 4.3 Arbeitspaket: Mechanische Charakterisierung

Wie in den Spezifikationen definiert werden an allen Weiterverarbeitungsmaterialien 4-Punkt Biegeversuche in 0° und 90° und teilweise auch +45° und -45° durchgeführt. Des Weiteren werden für den Großteil der Materialien auch Zugversuche in 0° und 90° durchgeführt. Sowohl die Zug- als auch die Biegeversuche werden nach den DIN-Normen DIN 527-5 und DIN EN ISO 14125 geprüft. Die Biegeprüfung hat sich dabei als schnelle und geeignete Variante zur Bewertung der Vliesstoffe herausgestellt, da hier keine Kräfteinleitungselemente geschnitten werden müssen und die Proben kleiner sind.

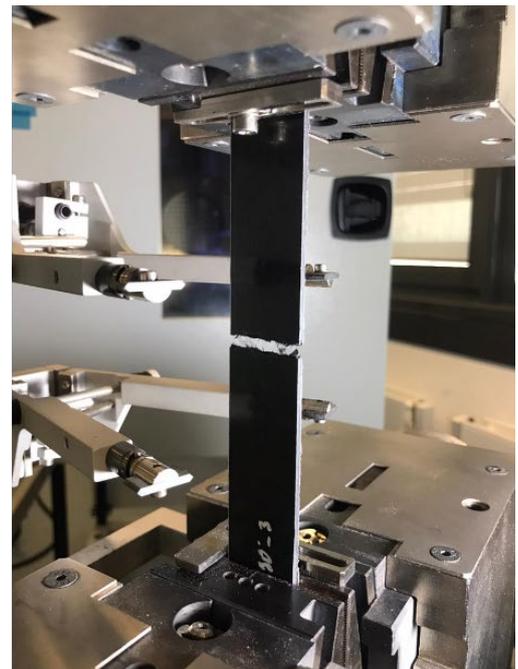
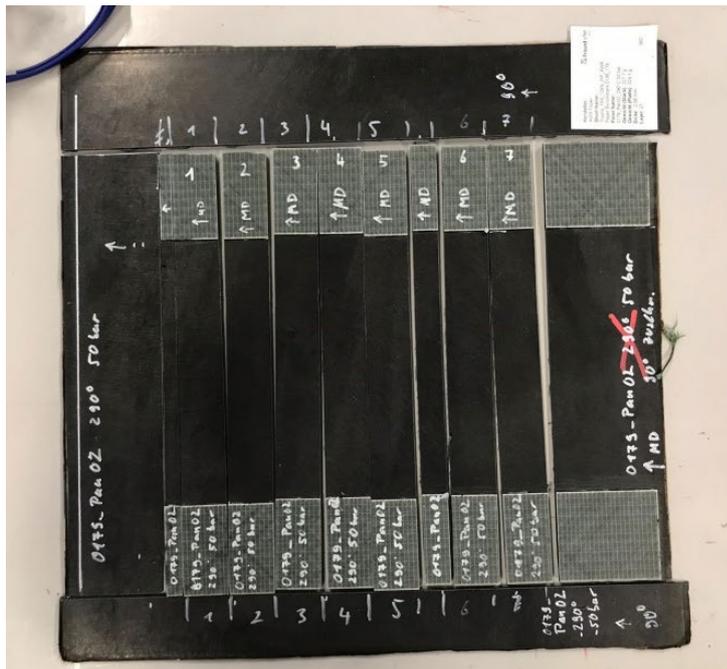


Abbildung 4.3.1: Zuschnitt der Zugprobekörper aus den Prüfplatten (links). Geprüft Vliesplatte (rechts).

Im Zuge der Prüfung der Materialien wird eine Definition des MD/CD-Verhältnisses eingeführt, siehe Abbildung 4.3.2. Mit dem Verhältnis der mechanischen Eigenschaften kann eine Aussage über die Isotropie, also die Faserorientierung der Vliesstoffe getroffen werden. In der Abbildung wird noch einmal die Definition der Maschinedirection und Crossdirection aufgezeigt.

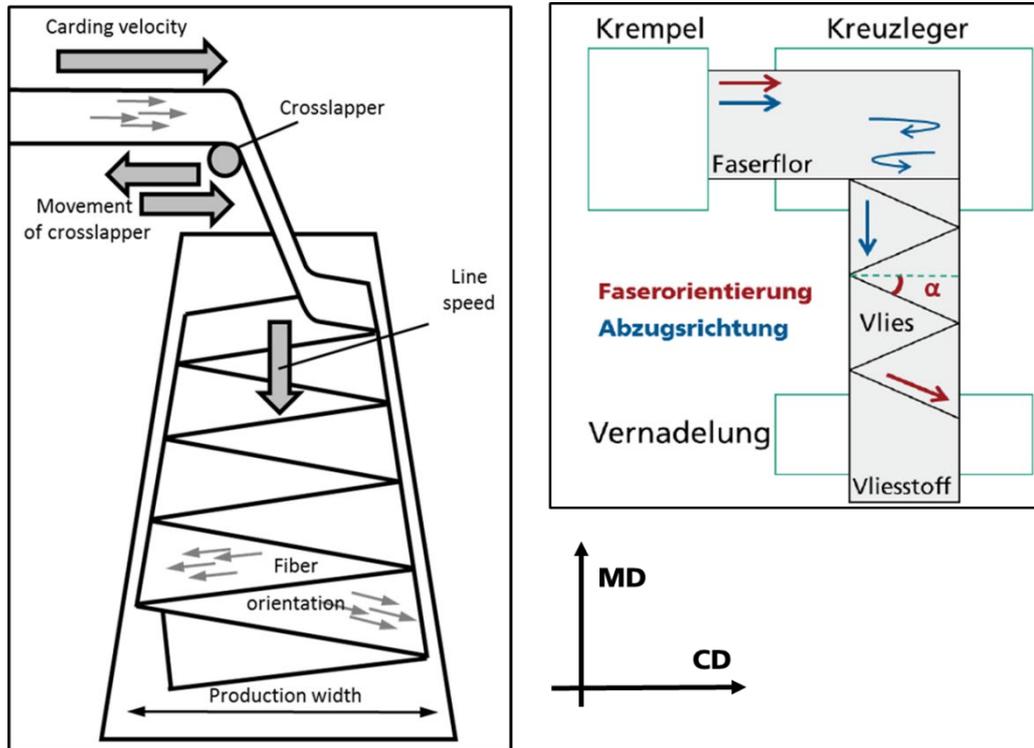


Abbildung 4.3.2: Darstellung der Definition der Maschine (MD) und Cross Direction (CD) sowie der theoretischen Faserorientierung durch das Kreuzlegen.

Die Bewertung aller MD/CD-Verhältnisse zeigt, dass sowohl bei der Betrachtung der Biegeverhältnisse wie auch der Zugverhältnisse ein MD/CD-Verhältnis von größer als auch kleiner 1 auftreten kann. Dies ist sowohl bei der Steifigkeit wie auch bei der Festigkeit zu beobachten. Tabelle 4.3.1 zeigt eine Übersicht über die MD/CD-Verhältnisse aller untersuchter Weiterverarbeitungsplatten. In der letzten Spalte ist die im Rahmen der Spezifikation und nach den Ergebnissen der Vorversuche geglaubte Orientierung eingetragen. Es zeigt sich, dass die Vliesstoffe in der Realität keine oder eine zumindest eine andere Orientierung haben als im Vorhinein vermutet. Viele Produkte sind nicht orientiert oder auch nicht isotrop, weshalb die Endung „iso“ und „ori“ in der Materialbezeichnung nicht weiterverwendet wird. Vor allem der Vliestyp#1 hat ein MD/CD-Verhältnis von 1,75, sollte aber isotrop sein. Hier ist besonders zu betonen, dass dieses Material in MD orientiert ist, heißt nicht, wie geglaubt, in der der vom Tambour vorgegebenen Orientierung. Dies würde bedeuten, dass das Flor quer zur Tambourproduktionsrichtung ausgerichtet ist.

Für einen besseren Vergleich der Materialien zueinander, wird die Definition des **Max/Min-Verhältnis** eingeführt, also der höchste Kennwert geteilt durch den entsprechenden niedrigsten Kennwert desselben Materials, getestet um selben Test. Dieser Kennwert liefert einen besseren Eindruck über die mechanischen Eigenschaften des Produktes und gibt die Verhältnis aus der höher orientierten Ebene zur niedrig orientierten Eben besser wieder.

Tabelle 4.3.1: Orientierungen und Qualitätskriterien von unterschiedlichen CaRinA Vliesstoffen.

	Annahme	Max:Min Biegemodul	Max:Min Zugmodul	Max:Min Biegefestigkeit	Max:Min Zugfestigkeit	FVG in %	Lagengewicht in g/m <sup>2</sup> und Standardab- weichung
#1 Marubeni_EP_Iso_WCM	Isotrop	1,37	-	1,28	-	26,9	268,5 / 74,75
#2 Marubeni_EP_WCM	Orientiert	1,18	-	1,06	-	28,6	236,0 / 2,64
#2 Marubeni_EP_RTM	Orientiert	1,55	-	1,37	-	25,8	191,80 / 4,66
#2 Marubeni_EP_DFCM	Orientiert	1,24	1,02	1,07	1,04	34,2	
#2 Marubeni_EP_V40_DFCM	Orientiert	1,04	-	1,07	-	34,3	
#15 IM45P_EP_WCM		1,42	-	1,39	-	23,1	287,68 / 25,18
#15 IM45P_EP_RTM		1,43	-	1,35	-	27,4	226,58 / 0,93
#15 IM45P_EP_DFCM		1,44	1,49	1,38	1,50	28,2	
#15 IM45P_EP_V40_DFCM		1,58	-	1,39	-	24,4	
#6_SM45R_EP_WCM		1,32	-	1,19	-	20,3	253,63 / 24,15
#8 SM45R_PA6	Isotrop	1,30	1,22	1,08	1,17	24,7	221,84 / 2,11
#9 SM45R_PA6	Orientiert	1,72	1,80	1,41	1,75	21,5	220,88 / 9,74
#14 IM45P_PA6		1,41	1,13	1,22	1,12	23,2	236,02 / 0,78
#3.1 Marubeni_L_PA6	Isotrop	1,50	1,06	1,13	1,02	36,0	238,74 / 1,55
#3 Marubeni_PA6	Isotrop	1,18	1,07	1,07	1,06	29,0	226,57 / 1,73
#4 Marubeni_PA6_SGL	Orientiert	1,39		1,18		38,4	238,59 / 0,33
#4 Marubeni_PA6	Orientiert	1,36	1,23	1,17	1,19	37,3	
#11 Marubeni_PA6_Maliwatt	Orientiert	1,40	1,38	1,28	1,29	32,0	
#5 Marubeni_MAPP	Isotrop	1,09	1,14	1,16	1,19	27,4	
#12 IM45P_MAPP_		1,26	1,07	1,17	1,17	21,3	231,50 / 1,09
#13 IM45P_PPS_		1,27	1,43	1,19	1,40	27,8	

### Materialcharakterisierung zur Erstellung der Materialkarten

Wie die guten und kaum streuende Versuchsergebnisse bei EDAG in Abbildung 4.3.3 zeigen, weisen die unterschiedlichen Kraft-Verschiebungs-Kurven einen kurzen linearen Anstieg auf, ehe ein leichtes Abknicken des Kurvenverlaufs eintritt. Anschließend ist der Verlauf nahezu linear. Auffallend ist, dass zum einen sich Differenzen bei den Steifigkeiten zeigen – quer zur Produktionsrichtung (90 Grad) traten die größten Steifigkeitskennwerte (E-Modul) auf, wobei die prozentuale Abweichung der Elastizitätsmoduli zehn Prozent betrug. Zum anderen unterscheiden sich die Versagenszeitpunkte bis der Bruch der Probe eintrat. Auch hier liegt die Streuung bei knapp zehn Prozent, so dass hier die Ergebnisse kongruent sind. Diese Merkmale stellt man auch bei den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen fest. Bereits diese Erkenntnisse lassen einige Schlüsse zu, welche in der Materialkartenerstellung und der Validierungsrechnung direkt und schnell angewandt werden können. Folgende Annahmen werden zu diesem frühen Zeitpunkt getroffen:

- Nahezu isotropes Materialverhalten kann in Betrachtung gezogen, da die Streuung der Messergebnisse bei knapp zehn Prozent liegt und dies auch auf fertigungs-, versuchs- und materialbedingte Einflüsse zurück zu führen ist
- Die linearen Kurvenverläufe und ein abruptes Versagen der Proben ermöglichen den Einsatz von spannungs- oder dehnungsbasierten Versagenskriterien
- Die Materialkartenerstellung kann mit Single-Element-Test begonnen werden, da nahezu lineare Kurvenverläufe vorliegen

Neben den Zugversuchen werden auch Biegeversuche durchgeführt. Diese dienen als Validierungsreferenz für die Erprobung der generierten Materialkarte. Die aus den Zugversuchen gewonnen Kennwerte werden in eine Materialkarte überführt und vorab an Single-Element-Test validiert, um die korrekten Steifigkeiten und später Versagenseintritt abbilden zu können. Um eine Materialkarte hinsichtlich statischer Belastungen zu validieren, wird die generierte Materialkarte bei der FE-Simulation des Biegeversuchs eingesetzt und auf Kongruenz überprüft. Passten hier Versuch und Simulation zusammen, ist die Materialkarte für statische Belastungen valide.

Auch hier sind die Versuchsergebnisse, wie in Abbildung 4.3.4 einzusehen, von guter Qualität und mit marginaler Streuung. Somit treten hier keine Unterschiede zu den Messungen aus den Zugversuchen auf. Die maximale Biegespannung und die Dehnung liegen auf identischem

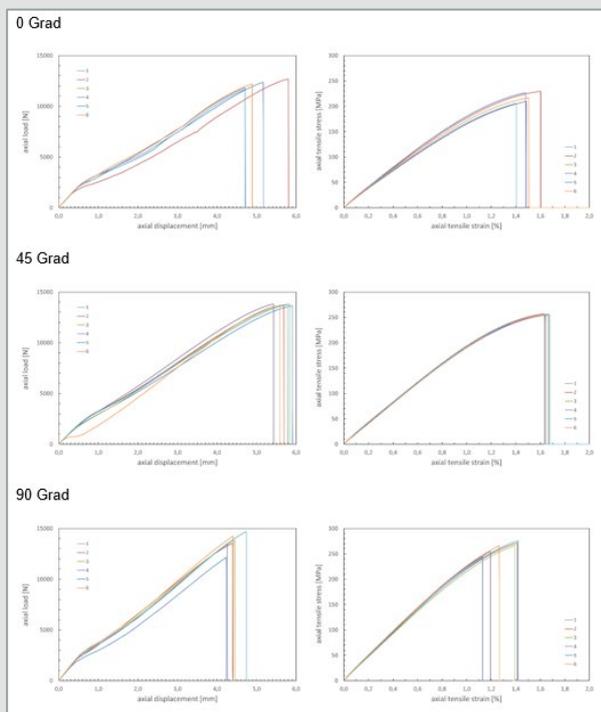


Abbildung 4.3.3: Ergebnisse der Zugprüfungen in den verschiedenen Produktionsrichtungen - Kraft-Verschiebungs-Kurven und Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

Niveau und im normalen Bereich der Streuung. Somit können diese Ergebnisse die aus den Zugversuchen gewonnen Erkenntnisse stützen und der vorgeschlagene Weg weiterverfolgt werden. Für die CAx-Integration der Messergebnisse und daraus resultierenden Materialkarte werden auch die Biegeversuche nachgestellt und mit der Realität verglichen.

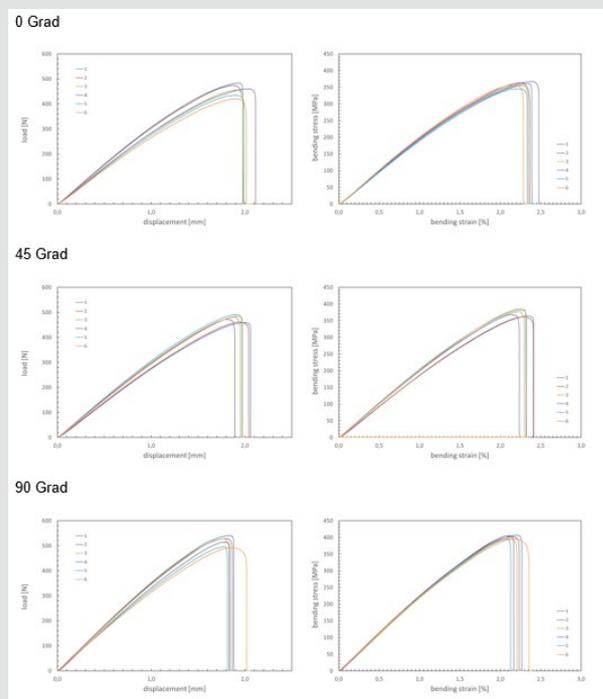


Abbildung 4.3.4: Ergebnisse der Biegeprüfungen in den verschiedenen Produktionsrichtungen - Kraft-Verschiebungs-Kurven und Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

## 4.4 Arbeitspaket: Akustische Charakterisierung

Zur Bewertung der akustischen Fähigkeit von rCF-Vliesstoffen werden vom ITA, dem Fraunhofer IGCV, Faurecia und Röchling einige Möglichkeiten diskutiert und gegenübergestellt. Es wird eine Auswahl an Materialien definiert, welche durch zwei unterschiedliche Tests charakterisiert werden sollte. Bei Faurecia sollten diese Materialien in einer sogenannten Modalanalyse untersucht. Nach Rücksprache mit den Messingenenieuren wird von diesem Test jedoch abgesehen, da die Materialien ein zu stark dämpfendes Verhalten gezeigt haben und eine Bewertung somit als unwahrscheinlich angesehen wird.

Mit dem assoziierten Partner Röchling werden die Materialien im Kund'schen Rohr untersucht. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der Materialauswahl für die akustische Bewertung. Dabei werden bewusste Materialien mit PP und Naturfasern ausgewählt, weil diese perspektivisch das größte Potential in akustischen Anwendungen haben sollten. Für die Materialien wird ein Flächengewicht von 1500 g/m<sup>2</sup> ausgewählt, da dies einen guten Vergleichswert zu heutigen genutzten Unterbodenstrukturen der Röchling Automotive ist. Auch die konsolidierte Dicke von 1,2 mm entspricht den Spezifikationen von Röchling. Es soll der Einfluss von PP gegenüber zu PA, der Einfluss der Naturfaser und der Einfluss des Lofting untersucht werden. Dazu werden die Platten auf eine Enddicke von 6 mm geloftet.

Tabelle 4.4.1: Materialauswahl für die akustische Charakterisierung von Vliesstoffen.

#	Faser	NF	Matrix	geloftet	Bemerkungen	Dicke / mm	Geloftete Dicke / mm
1	Glas	Nein	PP	ja	Benchmarkmaterial Röchling Automotive (40m% GF)	1,2	6
2	CF	Nein	PP	ja	selbe Dicke wie GF-Platte, höheres Loftverhältnis, ergo leichtere Platte		6
3	CF	Nein	PA	ja	selbe Dicke wie GF-Platte, höheres Loftverhältnis, ergo leichtere Platte, mit PA6, Matrixvergleich (PP zu PA)		6
4	Nein	Ja	PP	nein	selbes Fasergewicht wie #2, 30% Flaxfaseranteil, 70% PP	1,2	-
5	ja	ja	PP	ja	selbes Fasergewicht wie #2, 15% Flaxfaseranteil, 15%CF, 70% PP		6
6	ja	ja	PP	nein	selbes Fasergewicht wie #2, 15% Flaxfaseranteil, 15%CF, 70% PP	1,2	-
7	ja	ja	PP	ja	15% Flaxfaseranteil, 15%CF, 70% PP, geringeres Loftverhältnis, selbe Dicke		6

Abbildung 4.4.1 zeigt die Auswertung der Absorptionskoeffizienten über ein Frequenzband von 0 – 4400 Hz. In den unterschiedlichen Farben sind die unterschiedlichen Materialien dargestellt. Im Bereich 0 Hz sind noch Einschwingeffekte zu beobachten die nicht repräsentativ für die entsprechenden Materialien sind. Es ist ersichtlich, dass das Material 15% NF / 15%CF / 70% PP bei der Distanzmessung von 10 mm den steilsten Anstieg in der Kurvenschar zeigt. Im niedrigen Frequenzbereich hat dieses Material also die Stärkste akustische Absorption. Damit kann die 15% NF / 15% GF / 70% PP-Platte verglichen werden. Im direkten Vergleich werden hier die CF durch GF getauscht. Dieses Material liegt bis 730 Hz unterhalb der Kurve des 15% Carbonfasermaterials. Den gleichen Verlauf zeigt auch das CF/PA6 Material und das CF/PP Material. Die Matrix hat also scheinbar keinen Einfluss auf den Absorptionskoeffizienten. Deutlich darunter liegt das GF/PP-Referenzmaterial von Röchling. Ab einer Frequenz von ca. 3000 Hz weißt dieses Material hingegen einen leicht höheren Absorptionskoeffizienten von >0,9 auf. Das

Anfänglich sehr gute NF/CF-Material zeigt ab ca. 500 Hz keine starke Verbesserung und bleibt unter dem Wert von 0,5.

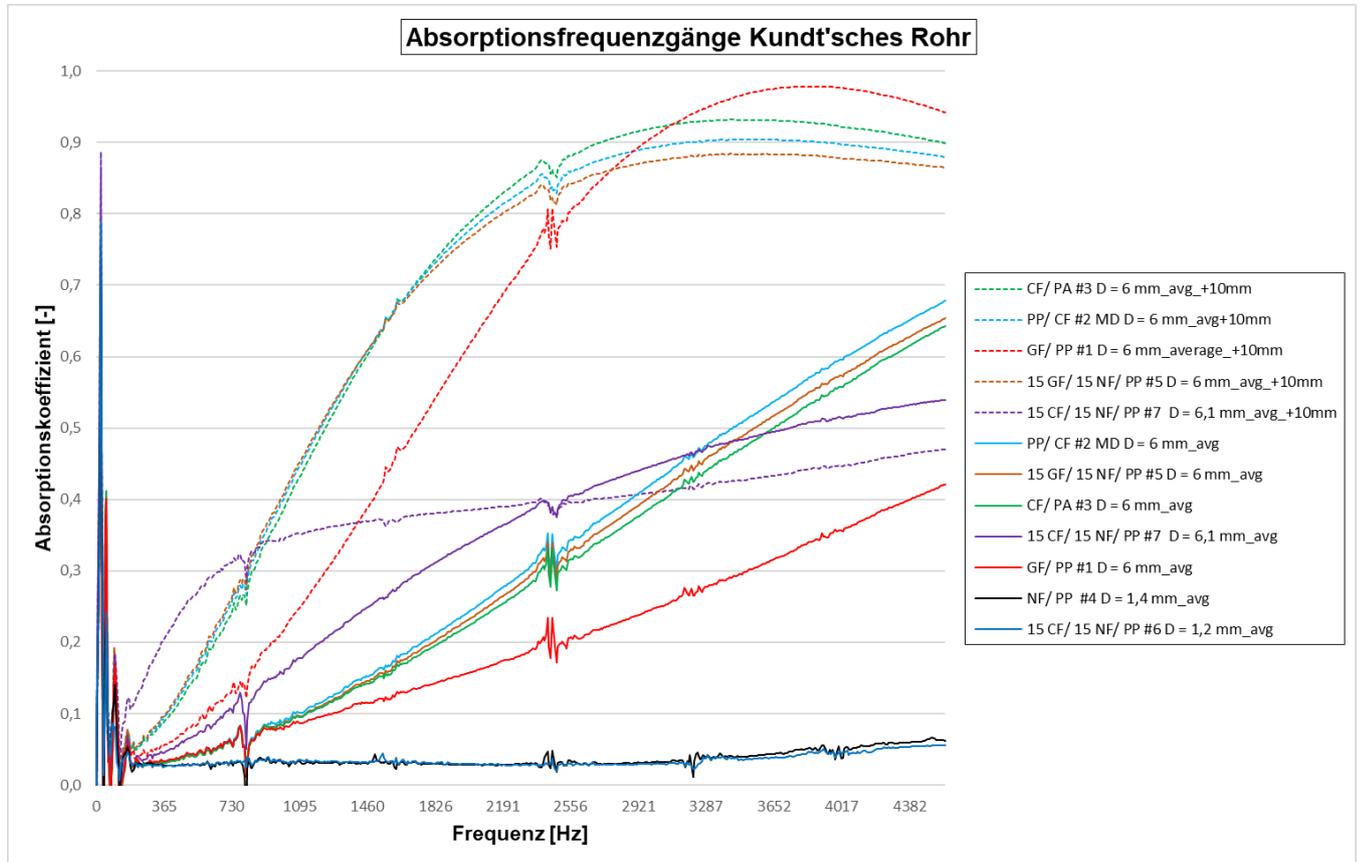


Abbildung 4.4.1: Ergebnisse der akustischen Prüfung aus dem Kundt'schen Rohr.

Bei der Messung ohne Abstand weißt ebenfalls das NF/CF-Material den höchsten anfänglichen Koeffizienten auf wird aber ebenfalls ab ca. 3000 Hz von den anderen Materialien outperformt, was jedoch deutlich später ist als bei der Messung mit 10 mm Abstand. Auch bei er Messung ohne Abstand ist das GF/PP-Benchmarkmaterial das schlechtestes Material.

Ebenfalls getestet werden zwei nicht geloftete Materialien mit 1,2 mm Dicke. Diese Materialien zeigen eine durchgehend schlechte Absorption.

Zusammenfassung lässt sich sagen, dass alle CF-basierte Platten über oder gleich der Absorption von GF-Materialien sind und sich somit hervorragend für die akustische Dämpfung eignen. Bei der Vermischung mit Naturfasern kann eine anfängliche Steigerung der Absorption erreicht werden, welches für manche Anwendungsfälle vorteilhaft sein kann. Durch eine gezielte Einbringung von NF kann so die Absorption eingestellt werden. Eine Messung einer 100% NF Platte sollte vergleichend noch durchgeführt werden. Materialien ohne Loft zeigen fast keine Dämpfung, was noch einmal belegt, dass der geometrische Einfluss bei dieser Prüfung sehr groß ist.

## 4.5 Arbeitspaket: Datenkonsolidierung

Zusammen mit den Partnern Fraunhofer IGCV, ITA und EDAG gab es am 24.09. einen Workshop zur Definition der Daten, Parameter und Eigenschaften welche für die Datenkonsolidierung herangezogen werden sollten. Dabei werden alle Erkenntnisse in der Halbzeugherstellung, der Verarbeitung und der Prüftechnik mit einbezogen.

Tabelle 4.5.1: Auszug aus den Parametern die für die Datenbank genutzt werden.

Material ID		Einheit	Bemerkung
<b>Carbonfaser</b>			
Fasertyp	Marubeni Faser 3-Fach geschnitten		Hoch orientiert
Einzelfaserfestigkeit	3,56 ± 0,98	GPa	Von Textechno Export (PDF)
Einzelfasersteifigkeit	240,8 ± 6,76	GPa	Von Textechno Export (PDF)
Bruchdehnung	1,62 ± 0,41	%	Von Textechno Export (PDF)
Faserlänge (Einwaage)	20-80	mm	gewichteter Mittelwert
<b>Polymer</b>			
Matrixart	Thermoplast		Duromer oder Thermoplast
Polymertyp	PA6		PP, PA, EP etc.
Titer	3,3	dtex	
Polymerfestigkeit		MPa	
Polymersteifigkeit		GPa	
<b>Mischungsverhältnis der Komponenten (Einwaage)</b>			
Komponente 1		Gew.-%	
Komponente 2		Gew.-%	
Komponente 3		Gew.-%	
<b>Vliesstoffherstellung</b>			
Art der Vliesbildung	Kardierverfahren		Kardier-, Airlayverfahren oder hydrodynamische Vliesstoffherstellung
Zusatz für Kardier- und Airlayverfahren			
Öffnungsgrad		stark, mittel, wenig	
Gewicht der Faservorlage		g/m <sup>2</sup>	
Abnehmergeschwindigkeiten		m/min	

EDAG hatte als Projektziel eine Datenbank für recycelte Carbonfasern zu erstellen. In dieser sollten neben den mechanischen Eigenschaften auch andere Eigenschaften wie die in Tabelle 4.5.1 genannten abgebildet werden. Die Vielzahl an Daten aus der Herstellung wie Prozessparameter oder aus den Materialversuchen müssen für die Darstellung und Berechnung aufbereitet werden, damit eine validierte Materialkarte für die CAE-gestützte Bauteilauslegung zur Verfügung steht. Primäre Ziele der Datenbank sind zum einen die Bereitstellung einer Hilfe für einen Konstrukteur, damit dieser bereits in der Konzeptfindungsphase das passende Material abgreifen und nach dessen spezifischen Merkmalen konstruieren kann. Zum anderen soll der Prozess der Materialkartenerstellung für die FEM-Berechnung vereinfacht werden, indem die Materialeigenschaften aus der Datenbank direkt in eine verwendbare Materialkarte überführt werden können. Gestartet wird mit der Erstellung der Datenbank mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche (GUI). Mit der Programmiersprache Python wird eine Materialdatenbank für das Projekt CaRinA entwickelt. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist der erste Entwurf abgebildet.

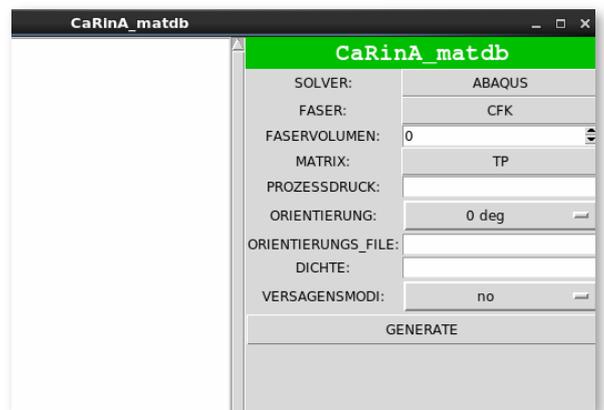


Abbildung 4.5.1: GUI:Materialdatenbank CaRinA - Erster Entwurf.

Die Benutzeroberfläche ist in zwei große Bereiche eingeteilt. Rechts befinden sich die Einstellungsmöglichkeiten, welche der Anwender auswählt und links wird die erzeugte Materialkarte vorab angezeigt, ehe die Möglich-

keit besteht, eine Solver-spezifische Materialdatei zu exportieren. Die hier zu sehenden Auswahlmöglichkeiten sind eine erste Einschätzung der Parameter. In den folgenden Stichpunkten werden die einzelnen Auswahlmöglichkeiten genauer beschrieben

<b>Solver</b>	<p>Die ermittelten Daten sollen solverunabhängig aufbereitet und zur einer Materialkarte definiert werden können, um die kundenspezifische Auslegungsstrategie mit den entsprechenden Solvern sicherzustellen. Aus Folgenden FE-Solvern kann ausgewählt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ ABAQUS</li> <li>■ LS-Dyna</li> <li>■ PAM-Crash</li> <li>■ NASTRAN</li> </ul>
<b>Faser</b>	<p>Hier begrenzt sich die Auswahl auf die zwei klassischen Fasertypen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Glasfaser (GFK)</li> <li>■ Kohlenstofffaser (CFK)</li> </ul> <p>Im Verbundvorhaben werden nur diese beiden Fasern separat betrachtet, um das singuläre Materialverhalten zu erforschen. In Zukunft ist hier auch eine Auswahl von unterschiedlichen Fasern mit einem Mischungsverhältnis möglich</p>
<b>Faservolumen</b>	<p>Der Anwender kann hier den gewünschten Faservolumengehalt in Prozent einstellen</p>
<b>Matrix</b>	<p>Um die viel Zahl der möglichen Matrices einzugrenzen, kann hier zunächst nur zwischen Thermoplast (TP) und Duroplast (DP) unterschieden werden. Im Laufe des Projekts werden hier sicherlich die meisten Erkenntnisse aus den Materialversuchen zu erwarten sein und welche Eigenschaften bzw. welche signifikanten Unterschiede die Unterklassen von TP und DP aus das Materialverhalten aufweisen.</p>
<b>Prozessdruck</b>	<p>Dieser Parameter ist in der herkömmlichen Materialbestimmung nicht berücksichtigt. Im Falle von rCFRP-Vliesen sollte der Prozessdruck einen entscheidenden Einfluss auf den Faservolumengehalt und die Kompaktheit des Vlieses haben. Ziel ist es, bereits in der Materialkartencharakterisierung den Herstellungsprozess mit zu berücksichtigen</p>
<b>Orientierung</b>	<p>Wie im Punkt AP 1.2 dieses Berichts erwähnt, werden die Materialkennwerte eine andere Eigenschaft besitzen, je nachdem ob sie entlang der Fertigungsrichtung, quer dazu oder unter 45° entnommen werden. So kann der Anwender die Prozessrichtung und da durch den Herstellungsprozess in der Erstellung der Materialkarte berücksichtigen. Erste Versuchsergebnisse müssen zeigen, welcher Anisotropiegrad zwischen den Entnahmerichtungen vorherrscht. Des Weiteren kann hier auch eine gewollte Richtungsabhängigkeit im Herstellungsprozess untersucht und mit eingebracht werden</p>
<b>Dichte</b>	<p>Dieser Parameter korreliert mit dem Faservolumengehalt und dem Prozessdruck und kann zunächst nur manuell aus den jeweiligen Messungen eingegeben werden. Eine Hinterlegung von analytischen Formeln zur Berechnung kann angedacht werden.</p>

Im Verbundvorhaben liegt der Fokus auf dem FE-Solver von ABAQUS und wird folglich zur Materialkartenvalidierung herangezogen. Auf folgende Einteilungen in Untergruppen hat man sich in Abstimmung mit dem Fraunhofer IGCV und ITA auf folgende Clusterungen geeinigt, damit eine einheitliche und übersichtliche Datenbank geschaffen werden kann:

- Fasereigenschaften
- Matriceigenschaften
- Vlieskennwerte
- Prozessparameter
- Mechanische Eigenschaften

Das Fraunhofer IGCV arbeitet einen excelbasierten Entwurf der Parameter, auf Basis der am Institut vorhandenen Granta MI Datenbank, aus. Wie in Tabelle 4.5.2 zu sehen, ist hier ein Auszug aus Parameter der Datenbank zu sehen. Diese basierte auf Excel, damit im späteren Anwendungsfall sowohl der Berechnungsingenieur unter Linux als auch der Entwicklungsingenieur unter Windows problemlos die Datenbank anwenden können.

Tabelle 4.5.2: Datenbank - Faser- und Matriceigenschaften.

Nr.	Fasereigenschaften					Matrixeigenschaften	
	Faserart	Fasertyp	Einzelfaserfestigkeit	Einzelfasersteifigkeit	Hersteller	Matrixart	Orientierung
			N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>			
1	CF	Verschnitt	3560	240800	TEN	EP	orientiert
2	CF	Verschnitt	3560	240800	TEN	EP	orientiert
3	CF	Verschnitt	3560	240800	ITA	PA	isotrop
4	CF	Verschnitt	3560	240800	ITA	PA	isotrop
5	CF	Verschnitt	3560	240800	TEN	PA	orientiert
6	CF	Verschnitt	3560	240800	TEN	MAPP	isotrop
7	CF	Pyrolisiert	4050	284340	ITA	PA	isotrop

Zu Beginn sind die Namen der jeweiligen Materialien aufgelistet. Die Namenkonvention stellt sich aus den wichtigsten Parametern von den Eigenschaften des jeweiligen Materials zusammen. In Tabelle 4.5.3 sind die Kennwerte der Rohvliesdaten aus der Herstellung niedergeschrieben. Die wichtigsten Parameter wie Flächengewicht und Faservolumengehalt sind essentiell. Die anderen Parameter wie cv-Wert, einem speziellen Wert, welche bei der Herstellung des Halbezugs für die Produzenten von Bedeutung ist, können ebenfalls eingepflegt werden.

Tabelle 4.5.3: Datenbank –Vlieseigenschaften.

Vliesdaten						
Faserlänge Einwaage	Faserlänge Ende	Flächengewicht	cv-Wert	Faservolumengehalt	Vernadelungsdichte	Trockenvliesfestigkeit CD
mm	mm	g/m <sup>2</sup>	[%]	%		N/5cm
50		192	6	100		3
50		192	6	100		3
50		244	5	40		251
60		246	4	40		58
50		233	1	51		35
50		224	1	45		316
80		231	7	40		218

Vliesstoffkennwerte			
Faserlänge (Carbon im Vlies)		mm	gewichteter Mittelwert
Vliesstofffestigkeit (MD)	5,21	N/5cm	Streifenzugversuch
Vliesstofffestigkeit (CD)	11,77	N/5cm	Streifenzugversuch
Flächengewicht	226,6	g/m <sup>2</sup>	Rondenprüfung / Zuschnitt
CV-Wert des Flächengewichts	2	%	Variationskoeffizient (CV)

In Tabelle 4.5.4 sind zunächst die Prozessparameter samt der mechanischen Kennwerte abgebildet.

Tabelle 4.5.4: Datenbank – Prozess - und Materialeigenschaften.

Prozess		Mechanische Eigenschaften							
Druck	Verarbeitungsverfahren	E-Modul 1	E-Modul-2	Zug-festigkeit 1	Zug-festigkeit 2	B-Modul 1	B-Modul-2	Biege-festigkeit 1	Biege-festigkeit 2
bar		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
60	Heiß	17489	24264	208	270	16550	23249	285	365
50	Nass	16987	20345	203	245	21744	19687	341	328
60	Heiß	22794	28004	239	285	20632	28037	311	363
60	Heiß	21032	18475	197	166	19020	18200	218	188
60	Heiß	17157	21069	205	240	18289	17893	329	342
60	Heiß	15604	27990	165	289	15408	26440	235	331

Zum Projektende wird die Materialdatenbank, bestehend aus 15 Materialien vollständig aufgebaut. Im nächsten Schritt wird die bereits vorhandene graphische User Interface (GUI) weiterentwickelt und weiter programmiert. Das GUI wird erweitert und ist nun in fünf größere Bereiche unterteilt:

- Auswahlfeld Eigenschaften
- Darstellung zugehöriger Materialkarte für FE-Solver
- Visualisierung Spannungs-Dehnungsdiagramm
- Vorschlagfeld, wenn mehrere Materialien zu gesuchten Eigenschaften vorhanden

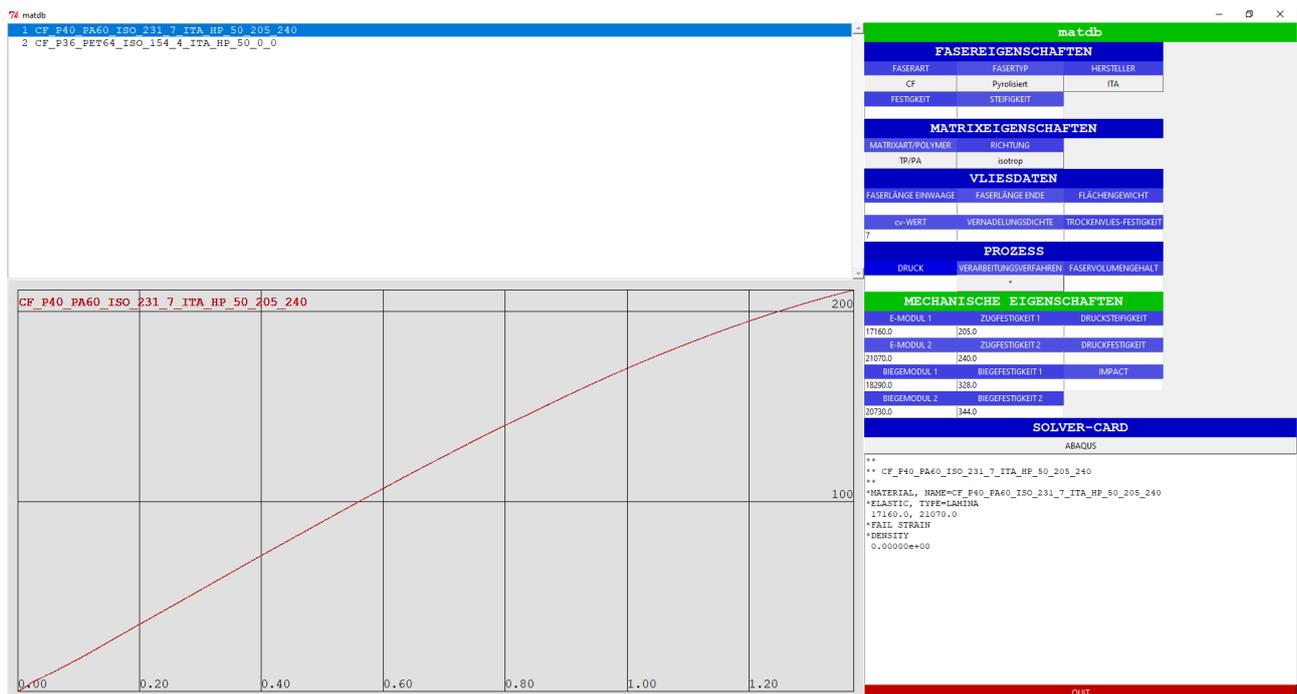


Abbildung 4.5.2: Weiterentwickeltes Datenbank GUI von EDAG.

Wie bereits erwähnt, soll in der Datenbank im unteren Bereich die Spannungs-Dehnungskurve aus den Versuchen für das jeweilige Material angezeigt werden. Sollte es bei Suchanfragen aus dem Auswahlfeld rechts mehrere Materialien geben, welche die eingestellten Suchkriterien erfüllen, kann im oberen Bereich in einer Auswahlliste unterschiedliche Materialien ausgewählt und gleichzeitig in der Spannungs-Dehnungskurve angezeigt werden, so dass die möglichen Unterschiede im Material auch visuell gleich erkennbar sind.

Wie in Abbildung 4.5.3 nebenstehend einzusehen, sind hier auch die fünf Kernpunkte zu Clusterung der Eigenschaften wie in der Excelexportbank wiederzufinden. In den Feldern, welche mit einem „\*“ gekennzeichnet waren, besteht die Auswahl von verschiedenen Parametern mittels Drop-Down-Auswahl. Am Beispiel der Faserart kann hier zwischen Glasfaser und Kohlenstofffasern ausgewählt werden. Dieses Schema zieht sich durch das ganze Auswahlfeld und knüpfte direkt an die Excelexportbank an. Alles was dort eingepflegt wird, kann auch in der GUI ausgewählt werden. So können im späteren Einsatzalltag selbstständig und unkompliziert Anpassungen vorgenommen werden oder Materialien hinzugefügt werden.

Ein weiteres, speziell für die Berechnung hinzugefügtes Feld generiert aus den getroffenen Auswahlmöglichkeiten für das gesuchte Material automatisch eine FE-Materialkarte. Da diese Materialkarten solverspezifisch sind, besteht hier die Auswahlmöglichkeit für die kommerziell häufigsten eingesetzten Solvoren ABAQUS, LS-Dyna und NASTRAN. Es ist anzumerken, dass nur die Materialkarten für den Solver Abaqus validiert worden sind.

Abbildung 4.5.3: Datenbank GUI: Suchfeld

## 5 HAUPTARBEITSPAKET 5: CAX INTEGRATION

### 5.1 Arbeitspaket: Integration von Kennwerten in CAX-Modelle

Bevor die Erstellung und Validierung der Materialkarten erfolgen kann, werden mehrere Überlegungen angestellt, wie das Materialverhalten abgebildet werden kann. Aus wirtschaftlicher Sichtweise ist immer ein Mittelweg zwischen Detaillierungsgrad und Berechnungsaufwand zu wählen, wobei stets eine möglichst valide und sichere Prognosegüte gewährleistet werden muss. Aus diesem Grund wird beschlossen, von einfachen und schnellen Modellierungsmethoden bis hin zu äußerst komplexen Abbildungen die Möglichkeiten auszuloten, zu berechnen und zu bewerten, um am Ende eine fundierte Aussage über den Einsatz der Abbildungsmethode geben zu können. Folgende Überlegungen werden dabei angestellt – Die Komplexität und der Materialinput nimmt von oben nach unten zu:

*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC	klassisches isotropes Materialverhalten
*ELASTIC, TYPE=LAMINA	Materialmodell für eine FVK-UD-Schicht für ebene Spannungszustände
*ELASTIC, TYPE=ENG. KONSTANTS	zusätzliche Berücksichtigung der Dickenrichtung im vgl. zu TYPE=LAMINA
*ELASTIC, TYPE=ORTHOTROPIC	orthotropes Materialmodell
*ELASTIC, TYPE=ANISOTROPIC	anisotropes Materialmodell mit vollständig besetzter 6x6 Steifigkeitsmatrix
*ELASTIC; TYPE=FABRIC	Materialmodell speziell für Gewebe oder non-woven-Materials wie etwa Vliese. Spezielle User-Subroutine benötigt
*USER DEFINED MATERIAL	Möglichkeit zur Implementierung eines eigenen Materialmodells

#### Zugversuch

Neben den Single-Element-Tests kann auch direkt der Versuch nachgestellt werden. Aufgeführt und genauer erklärt werden im Folgenden nur der Zugversuch. Die Voruntersuchungen mittels Single-Element-Tests werden als Indikation durchgeführt. Deshalb fließen die dort entstandenen Erkenntnisse in die Materialmodellierung beim Zugversuch ein. In Abbildung 5.1.1 ist das FE-Modell des Zugversuchs einzusehen – Türkis der eigentliche Prüfkörper und rot die Aufleimer aus GFK Gewebe zur besseren Lasteinleitung.

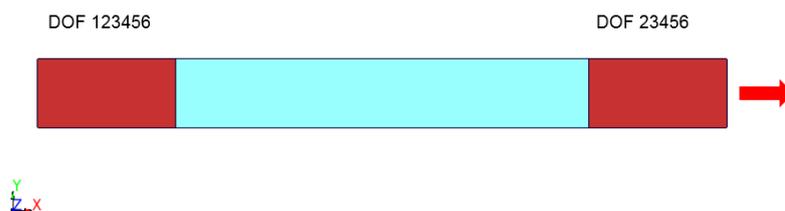


Abbildung 5.1.1: FE-Modell des Zugversuchs.

Das Material wird wie folgt definiert:

\*ELASTIC; TYPE=ISOTROPIC  
19700., 0.24

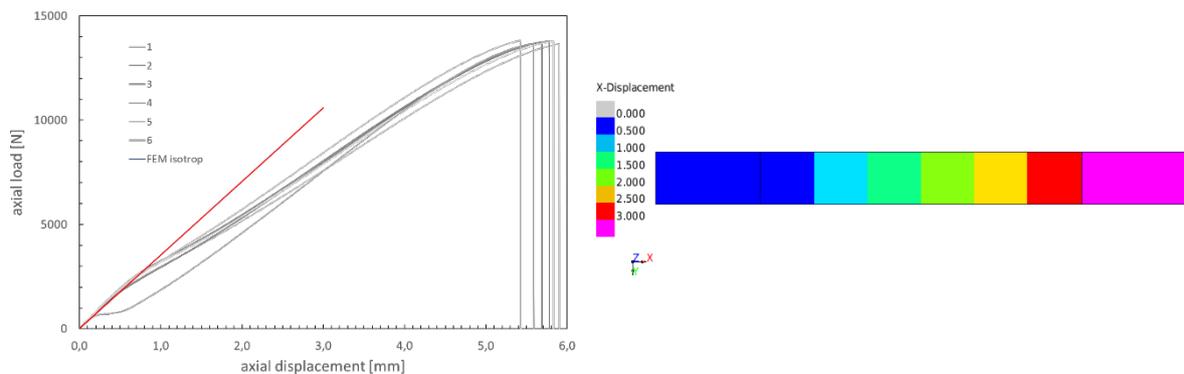


Abbildung 5.1.2: Vergleich Zugversuch (0-Grad Orientierung) FEM – Versuch.

Dieses Verhalten zeigt somit, dass eine Abbildung mit isotropen Materialverhalten nicht ausreichend ist, um den Kraft-Weg-Verlauf wie im Versuch nachzustellen, jedoch die Anfangssteifigkeiten sehr gut abgebildet werden kann. Es ist festzuhalten, dass Wirrfaserhalbzeuge und die darauf entstehenden Vlies-Faserverbunde keine isotropes Materialverhalten aufweisen.

In Abbildung 5.1.3 sind farbig die Versuchskurven des Materials V40\_PA60\_ISO\_ITA\_0Grad dargestellt, welche in einem sehr engen Korridor von geringer Streuung liegen. Die schwarze Kurve aus der Simulation weißt eine sehr gute Übereinstimmung auf. Das Materialverhalten wird mit erweiterten Kennwerten mit \*ELASTIC, TYPE=LAMINA definiert. Die aus den beiden Versuchen ermittelten Steifigkeiten in zwei unterschiedlichen Richtungen sowie die Bruchdehnung werden in die Materialkarte eingepflegt. Das Schubverhalten wird mittels der bekannten mathematischen Gleichungen ermittelt.

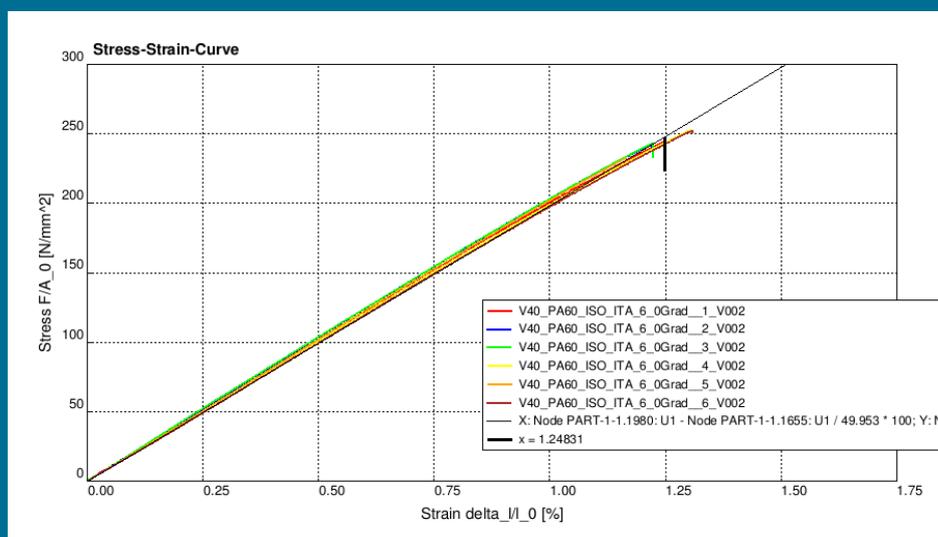


Abbildung 5.1.3: Vergleich Versuch vs. Simulation - isotrop in 0°-Richtung.

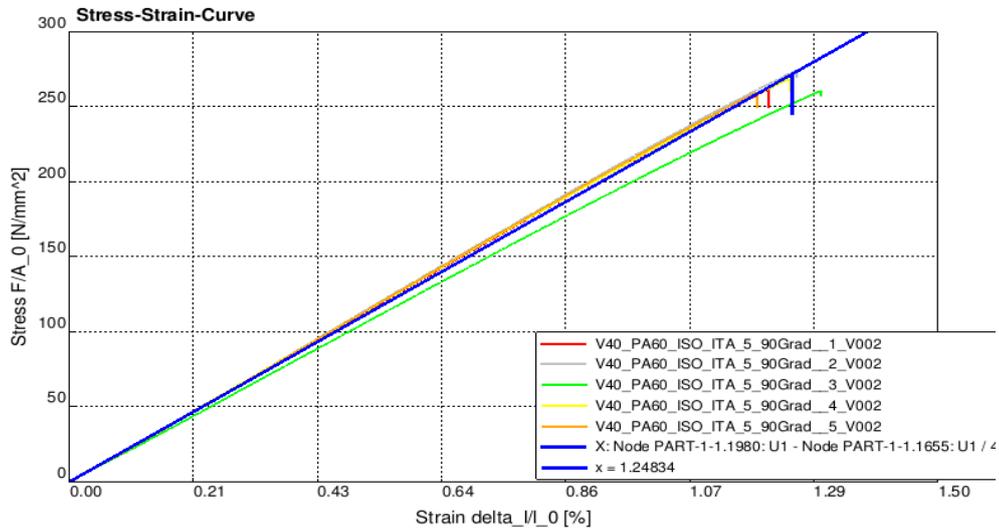


Abbildung 5.1.4: Vergleich Versuch vs. Simulation - isotrop in 90°-Richtung.

Auch in Abbildung 5.1.4 lässt sich das in der Simulation gewählte Materialmodell im Vergleich zu den Versuchswerten in 90°-Richtung sehr gut bestätigen. Die gleichen Ergebnisse weisen die Simulationen im Vergleich zu den Versuchsergebnissen von orientieren Vliesen auf.

## Biegeversuch

Da bei der Biegung auch Dickeneffekte eine Rolle spielen, wird die Materialformulierung von \*ELASTIC, TYPE=LAMINA auf TYPE=ENGINEERING CONSTANTS umgestellt. Als Versuchsaufbau wird ein klassischer 4-Punkt Biegeversuch gewählt, welcher seitens des Projektpartners Fraunhofer IGCV für die Versuchsdurchführung und die Kennwertermittlung aufgebaut und für das Testing eingesetzt wird.

Die Versuchsergebnisse werden mit den Ergebnissen aus der Simulation verglichen. Auf eine Beschreibung, wie das Model in der FE abgebildet wird, wird hier bewusst verzichtet. Die Biegeprobe wird im ersten Loop mittels Shells abgebildet, da die Probengeometrien noch als dünnwandig angesehen werden kann. In sind die Spannungsplots der Berechnung quer und entlang zur Prozessrichtung dargestellt.

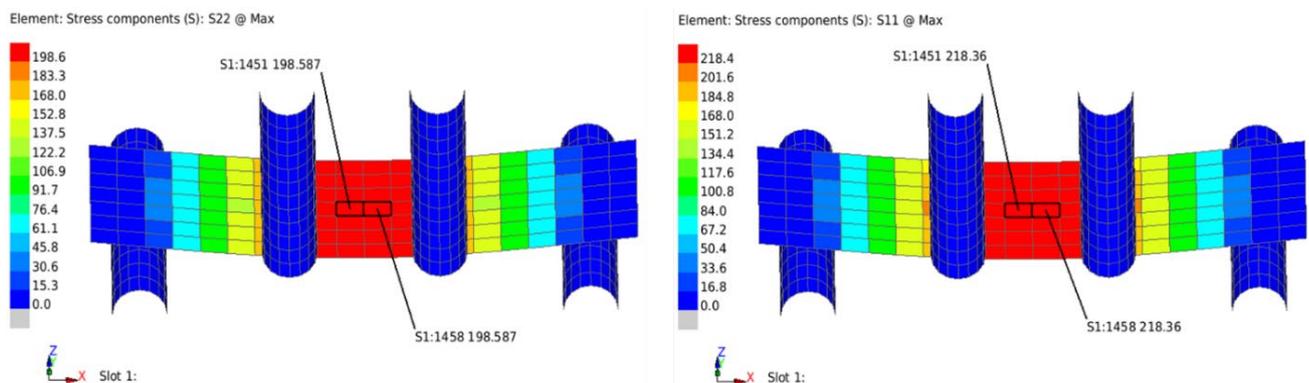


Abbildung 5.1.5: Simulation der Biegeprobe

Hier zeigt sich bereits, dass die Simulation nicht zu den Versuchen passt. Die anfänglichen Steigungen wird nicht getroffen. Sobald das Versagen in Dickenrichtung beginnt, kann die Simulation diesen Effekt nicht mehr abbilden. Hintergrund sind u.a. fehlende Materialkennwerte hinsichtlich der Druckbelastung. In Abstimmung mit dem Fraunhofer IGCV werden Druckversuche an deren Institut durchgeführt, um dieses Verhalten abzubilden. Es stellt sich heraus, dass es einen hohen Einfluss der Druckfestigkeit gibt.

In weiteren Untersuchungen werden sowohl die Einflüsse seitens des Schubverhaltens und der Bruchenergien, in Bezug auf das Materialverhaltens, als auch aus FE-Solver Seite die Contact-Forces und Stabilisierungsenergien untersucht. In Abbildung 5.1.6 ist der finale Stand der Materialkarte zu sehen. In dieser Materialkarte sind die korrekten Kennwerte für die Druckfestigkeit hinterlegt.

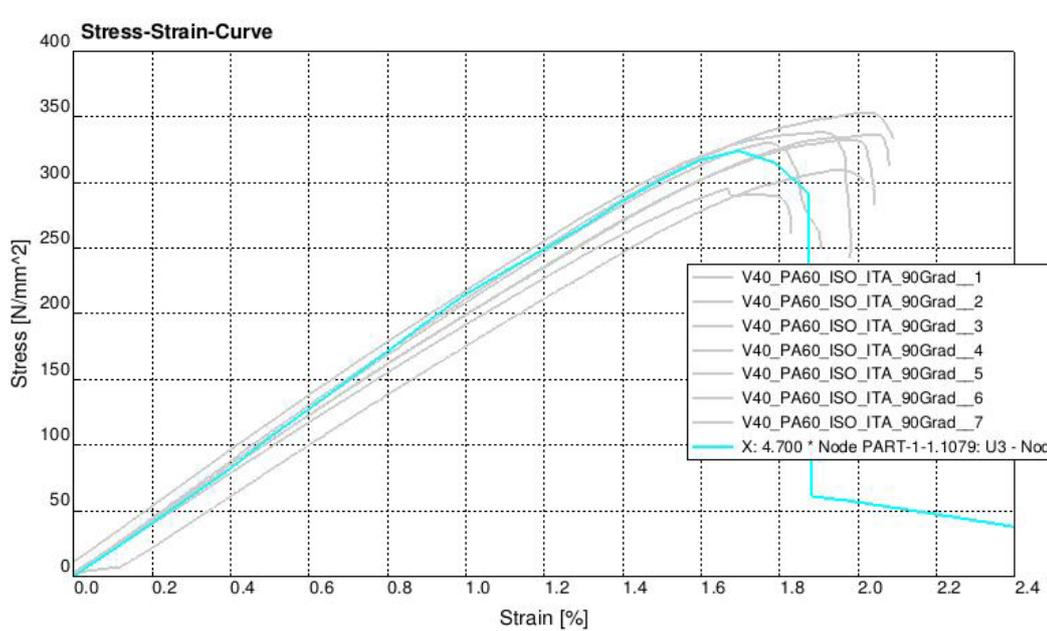


Abbildung 5.1.6: Integration Kennwerte - finaler Berechnung, Vergleich Simulation-Versuch.

Für die Degradation des Vliesmaterials wird über mehrere Iterationsschleifen die Bruchenergien ermittelt, da hier kein geeignetes Verfahren zur Bestimmung vorhanden ist. Der FE-Solver Abaqus bietet für das Versagen von Faserverbundmaterialien jedoch nur diese Vorgehensweise an. Für die erste Charakterisierung ist dies ausreichend, da es zu Beginn des Projekts noch nicht klar erkennbar war, ob eine Abbildung in der Simulation generell möglich ist.

Wie sich jedoch zeigt, sind alle getroffenen Einstellungen und Anpassungen in der Materialkarte erfolgsversprechend und bilden das Verhalten des Materials sehr gut ab. Die Anfangssteigung wird nahezu identisch abgebildet und der Bereich der Schadensinitiierung liegt im Streubereich des Versuchs. Auch die Degradation spiegelt das Versuchsergebnis gut wieder.

Abschließend kann hier aufgezeigt werden, dass das Verhalten des Materials gut abgebildet wird und somit die Materialkarte mit ihren Parametern valide ist. Jetzt gilt es diese Materialkarte in den Case Studies anzuwenden und die Validität zu bestätigen.

## 5.2 Arbeitspaket: Case Studies

Gemeinsam mit EDAG, dem Fraunhofer IGCB und EDAG werden zwei Case-Studies ausgewählt welche von SGL produziert, vom Fraunhofer getestet und von EDAG simuliert werden soll.

### Case Study 1 – Hutprofil

Der erste Case Study ist ein generischer Demonstrator und bildete ein Hutprofil mit 2 mm Wandstärke ab. Das Hutprofil liegt auf zwei Auflagern auf und wird mittig per Stempel eingedrückt – eine Anlehnung an einen 3-Punkt-Biegeversuch. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist der Demonstrator als FE-Modell einsehbar.

Das Hutprofil wird mit einem 4-mm-Shell-Mesh vernetzt, die Kontakte sind mit einer Reibung definiert und es besteht ein globaler Selbstkontakt. In einer ersten Berechnung wird eine linear implizite Rechnung angestoßen, damit die Ähnlichkeiten in der Simulation im Vergleich zur Validierung der Materialkarte gegeben sind. Zur Validierung wird die Kraft-Verschiebungskurve des Stempels herangezogen, welche in der Simulation über die Kontaktkraft abgebildet wird. Wie in Abbildung 5.2.2 zu erkennen, ist die Steigung der beiden Kurven zu Beginn nahezu gleich, lediglich eine Relativ-Verschiebung zueinander ist zu beobachten, welches sich auf das Einfahren der Prüfmaschine zurückzuführen lässt. Somit kann zu diesem Zeitpunkt schon festgestellt werden, dass auch in einem Anwendungsfall in einem Case Study die Steifigkeiten korrekt wiedergegeben werden.

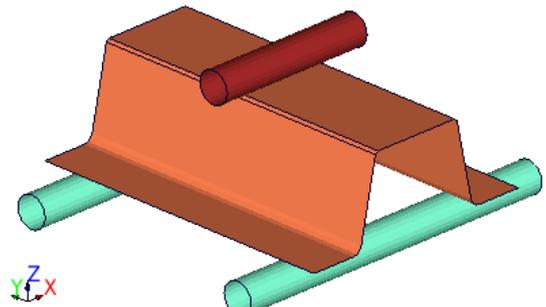


Abbildung 5.2.1: Hutprofil-Demonstrator im digitalen Modell.

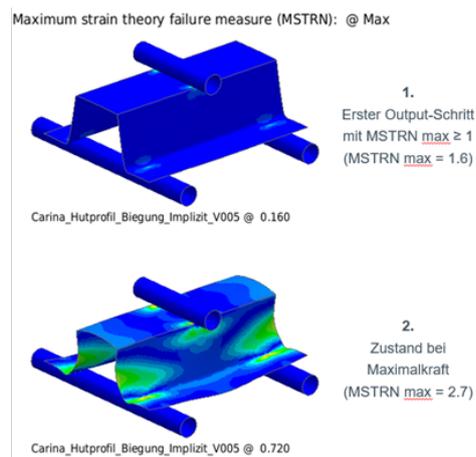
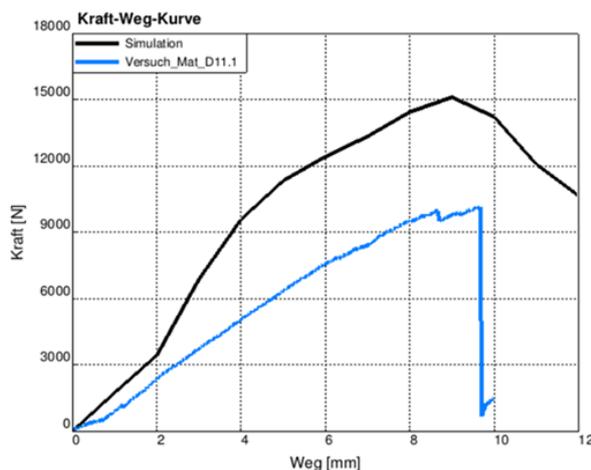


Abbildung 5.2.2: Hutprofil-Demonstrator im digitalen Modell.

Im weiteren Verlauf treten jedoch geometrische Effekte auf, welche einen immensen Einfluss auf das Ergebnis haben. Ab einer Verschiebung von zwei Millimetern treten vermehrt Beuleffekte auf und das Hutprofil spreizt sich an den Auflageflächen. Diese Oberflächenvergrößerung bringt eine erhöhte Abstützwirkung mit sich, woraus sich letztendlich eine erhöhte Steifigkeit ergibt. Die zeigen auch der Kurvenverläufe in Abbildung 5.2.2. Die Schadensinitiierung findet in einer Region statt, in der auch der Versuch erste Anzeichen eines Schadens aufweist.

Eine tiefere Analyse zeigt, dass mehrere tausend Eigenvalues in der Simulation vorhanden sind, welche das Beulen und Knicken belegen. An diesem Zeitpunkt der Simulation steigt man nun vertieft in die Abbildungsmethodiken ein und stellte Untersuchungsmatrices auf. Untersuchungen zeigten, dass eine Abbildung mit CSHELLs oder SOLIDs zu wählen ist. Jedoch kann eine Berechnung impliziten Methoden nicht vollständig umgesetzt werden, da es das Beulen des Bauteils in der Simulation nicht abgebildet werden kann. Man entschied sich deshalb, den statischen Lastfall mit expliziten Methoden abzubilden.

In Abbildung 5.2.3 sind die Kurvenverläufe mit und ohne Versagen abgebildet. Die unterschiedlichen Kurven beruhen auf der Untersuchung von verschiedenen Reibkoeffizienten bei den Berechnungen ohne Versagen und der Entfall von Schub – sowie Druckfestigkeiten zu Ermittlung der Schadensinitiierung und der folgenden Degradation.

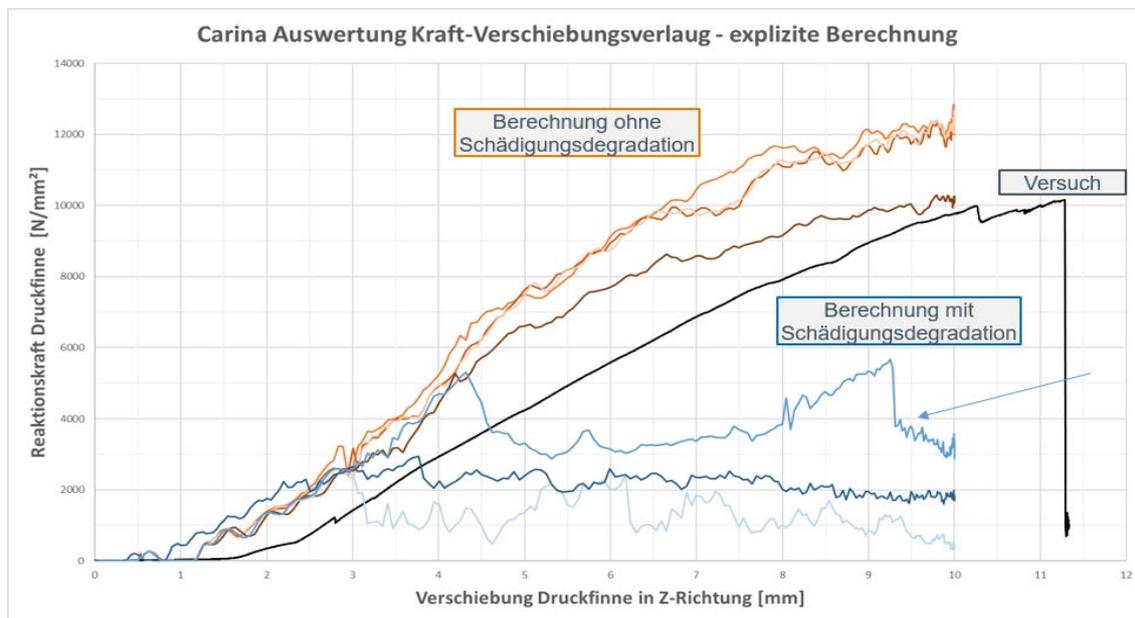


Abbildung 5.2.3: Hutprofil, Berechnung, explizit, mit und ohne Versagen.

Alle Ergebnisse zeigen die Erwartungen, dass diese Veränderungen der Parameter nur minimale Einflüsse auf das Ergebnis haben bzw. die auftretenden Abweichungen den Erwartungen eines Berechnungsingenieurs wieder spiegeln.

Es werden, bis auf eine Relativverschiebung, welche aus dem Versuch stammt, alle Steifigkeiten sehr gut wiedergegeben. Bei der Berechnung mit Versagen (siehe Pfeil) sind die ursprünglichen Kennwerte eingepflegt. Im Vergleich zur experimentellen Versuchsauswertung seitens des Fraunhofer IGCV kann man den Bereich um die 6 kN für ersten Schäden gut prognostizieren.

Der Beuleffekt tritt in der expliziten Simulation ebenfalls auf, kann jedoch auf Grund der unterschiedlichen Berechnungsgrundlage der expliziten Berechnung besser berechnet werden. Einige Untersuchungen wie die Einbringung einer geringen Stabilisierungsenergie zeigt bereits erste Erfolge. Alle Erkenntnisse und Anpassungen sind in eine finale Berechnung eingeflossen und das Ergebnis kann in Abbildung 5.2.4 eingesehen werden.

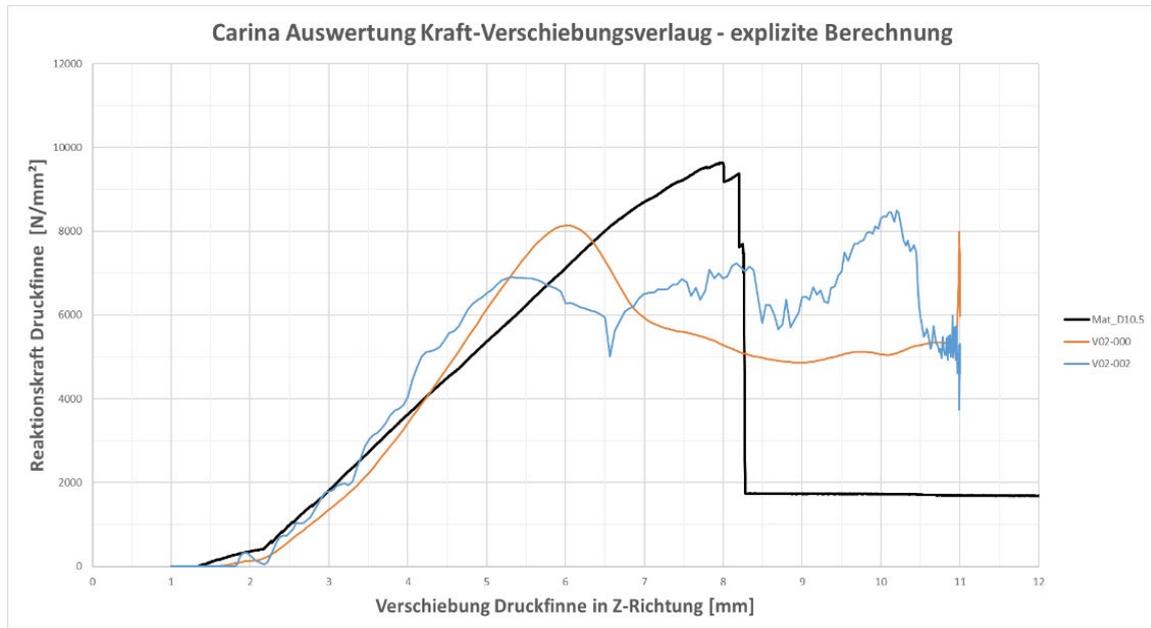


Abbildung 5.2.4: Finaler Abgleich Versuch -Simulation des Hutprofils.

Die Kurven steigen zum gleichen Zeitpunkt mit einer identischen Steigung an und deren Verlauf wird gut getroffen. Lediglich die Schadeninitiierung verläuft auf einem geringeren Niveau ab. Ein Verlauf, also der genaue Ablauf der Degradation, kann der Versuch leider nicht wieder spiegeln, da hier vorzeitig der Versuch, aufgrund abplatzender Teile beendet wird. Zudem fehlen auch Versuchsdaten, um den Schädigungsverlauf abbilden zu können. In Case Studie 2 ist dies berücksichtigt worden, um einen Eindruck über das Versagensverhalten zu bekommen. Abschließend bleibt hier zu sagen, dass die Abbildungsmethodik und die Materialkarte ein zufriedenstellendes Ergebnis liefern.

### Case Study 2 – Türverkleidung

Der zweite Case Study ist ein Türverkleidungsmodul, welches seitens SGL als generischer Demonstrator zur Verfügung steht. In Abbildung 5.2.5 ist das FE Model zu sehen, welche eine Eindruckversuch mittels eines Bolzens nachstellt. Dies ist an einen realen Versuch für die Entwicklung einer Türverkleidung im Automobilbau angelehnt.

Der Realversuch wird bei EDAG selbst durchgeführt. In Abbildung 5.2.6 kann man einsehen, wie das Bauteil eingespannt wird und in welchem Bereich der Stempel gedrückt wird.

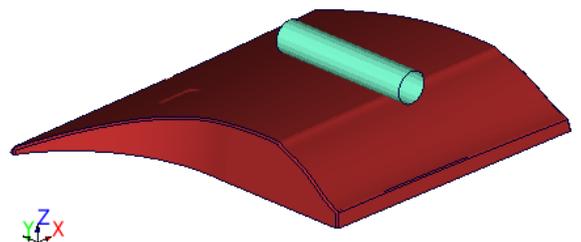


Abbildung 5.2.5: Türverkleidungsmodul - FE-Model.

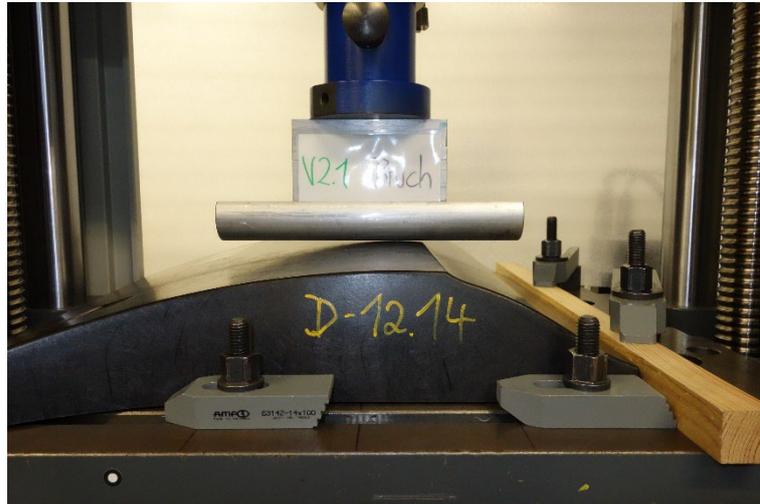


Abbildung 5.2.6: Versuchsaufbau Türverkleidung Eindrückttest.

In der Simulation wird der Versuchsaufbau nachgestellt und simulativ ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2.7 zu sehen.

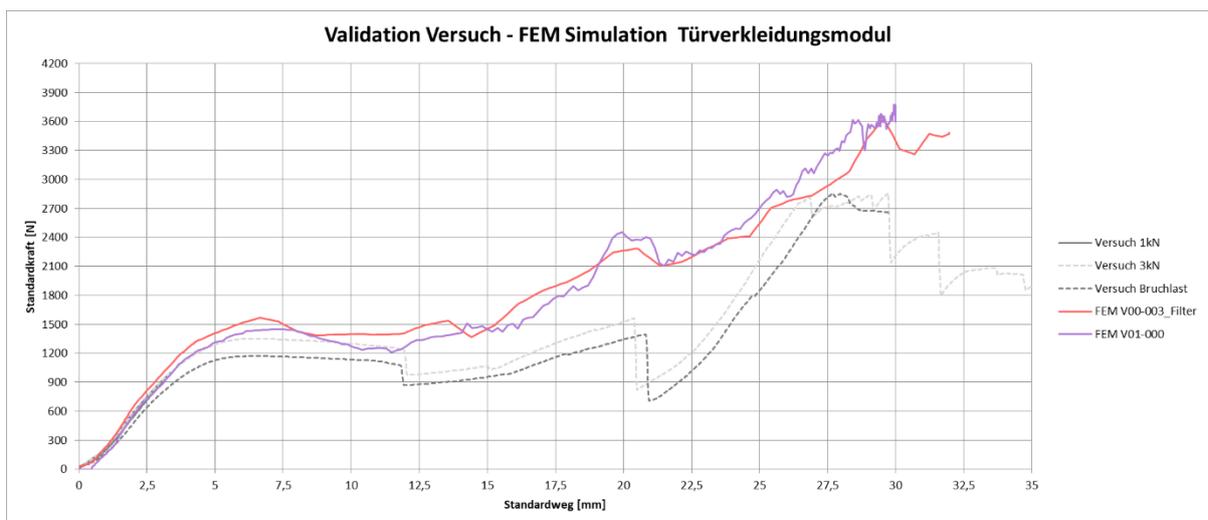


Abbildung 5.2.7: Vergleich Versuch zu Simulation Türverkleidungsmodul - Kraft-Weg-Verlauf.

Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den vorherigen Berechnungen. Die Anfangssteigung samt dem Übergang in die Waagrechte wird gut getroffen. Im Bereich von 12,5 mm Wegstrecke tritt erstes Versagen im Realversuch auf, welches die Simulation nicht zeigt. Etwas verspätet kann ein marginaler Abfall in der roten Kurve festgestellt werden. Den zweiten Abfall der Kraft bei 20 mm zeigt die Simulation wieder, jedoch auf einem höheren Kraftniveau, da ein vorheriges Absacken ausblieb. Der anschließende Anstieg bis zur Maximalkraft kann dann nicht mehr sauber abgebildet werden. Es zeigte sich jedoch, dass die Maximalkräfte beim Versagen in einer Streubreite von 20% lagen, was in Anbetracht der mathematisch ermittelten Bruchenergien und der Anpassungen der Materialarten bei den Hutprofilen annehmbar ist. Das Bruchbild zeigte eine gute Kongruenz von Versuch zu Simulation, wie auch in Abbildung 5.2.8 gut zu sehen ist.

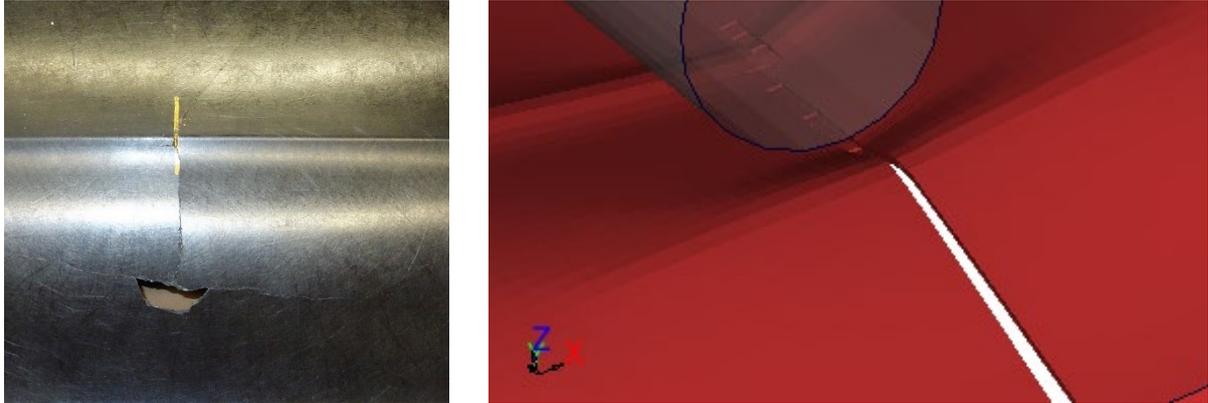


Abbildung 5.2.8: Vergleich Bruchbild Versuch zu Simulation.

Auch die zweite Case Study ist erfolgreich und legte dar, dass eine Abbildung des Materialverhaltens in der CAE möglich ist. Führt man sich die Ziele des Projekts vor Augen, können diese erreicht und sogar teilweise übertroffen werden. Folgende Ziele werden erreicht:

- Abbildung der Steifigkeiten
- Abbildung der Festigkeiten und Bereich der Schadensinitiierung
- Teilweise Abbildung der Schadensdegradation ohne dafür Versuchsdaten zu haben

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die CAx-Integration ein großer Erfolg ist, da auch erstmals die Prozessparameter in der Materialkartenerstellung bzw. bei den Kennwerten berücksichtigt werden.

## 6 HAUPTARBEITSPAKET 6: POTENTIALBEWERTUNG UND ANWENDUNGEN

Im Arbeitspaket 6.2 war eine Kooperation des ITA mit dem Partner Borscheid und Wenig vorgesehen. Nach dessen Ausscheiden aus dem Projekt wird der Arbeitsplan angepasst. Die Anpassungen gestalten sich wie im Folgenden beschrieben:

Geänderter Arbeitsplan und Aufwand des ITA in HAP6. Arbeiten, die ganz übernommen werden, sind gelb markiert. Arbeiten, die teilweise übernommen werden und sich etwas weniger anwendungsspezifisch gestalten, sind grau markiert. Inhalte, die entfallen, sind durchgestrichen dargestellt.

Tabelle 5.2.1: Gegenüberstellung erzielter Ergebnisse zur ursprünglichen und aktualisierten Planung für das Arbeitspaket

HAP	Angepasster Arbeitsinhalt	Erzielte Ergebnisse
6.1	Gesamtbewertung der Ergebnisse und Ableitung von Optimierungsansätzen	Gesamtbewertung und Optimierungsansätze erstellt.
6.2	<del>Ansprechpartnern für werkstoffseitigen Fragestellungen für B&amp;W</del> Durchführung von Versuchen auf der vorhandenen Thermoform/Spritzgussanlage zur Funktionsintegrationen durch Verrippungen, lokale Aufdickungen für Krafteinleitungs- oder Fügeelemente, die an die faserverstärkte Struktur angespritzt werden.	Funktionsintegration in grundsätzlichen Versuchen an glasfaserverstärkten Organoblechen aufgezeigt und Machbarkeit dargestellt.
6.3	Vliesstoffproduktion für die Demonstratorfertigung	Vliesstoffe für die Demonstratorherstellung produziert.
6.4	Abschließende Betrachtung der Projektergebnisse	Abschließende Betrachtung und Bewertung durchgeführt.

### 6.1 Arbeitspaket: Gesamtbewertung und Ableiten von Optimierungsansätzen

Wie in den vorherigen Punkten beschrieben, war eine Abbildung des Materialverhaltens inkl. Berücksichtigung der Prozesseinflüsse in den Materialkennwerten erfolgreich. Dies kann auch in der programmierten Datenbank berücksichtigt werden, was im Nachgang für die Verwertung des Projekts äußerst positiv zu bewerten ist. Jedoch waren einige Punkte nicht berücksichtigt worden, welche jedoch als Optimierung des Abbildbarkeit in der Simulation anzustreben sind. Folgende Punkte sollten noch optimiert werden:

- Validierung der Materialkarten und Abbildbarkeit mit anderen FE-Solvern
- Genauere Untersuchungen und vor allem Realversuche zur Darstellung des Schadens – und Versagensverhaltens des Materials
- Untersuchungen des Materials für den Einsatz bei dynamischen Belastungen (Impact, Crash, ...)

Als weiteren Punkt zur Optimierung bzw. zur Untersuchung gilt es den Einsatz des Materials für bestimmte Anwendung zu untersuchen. Aus den gewonnen Erkenntnissen und des Materialverhaltens kommen primär tragende Strukturen nicht zum Einsatz, wären Einsatzgebiete wie bei Sekundärstrukturen, Verkleidungsteilen oder der Ersatz von Kunststoffbauteilen, welche aus SMC gefertigt werden, denkbar

Die Vliesstoffherstellung aus Carbonfasern und Mischungen aus Carbon- und Thermoplastfasern funktioniert sowohl im trockenen als auch im nassen Verfahren. Die wichtigsten Maschinenparameter mit dem größten Einfluss

auf zentrale Qualitätskriterien von Vliesstoffen hinsichtlich des Einsatzes in Composites werden für die trockene Vliesstoffherstellung nach dem Krempelverfahren für die häufigsten Carbonfasertypen sowie für die Mischung aus pyrolysierten Carbonfasern und Polyamid6-Fasern identifiziert.

Im trockenen Vliesstoffprozess werden vier wesentliche Ansätze für Optimierungen festgestellt. Die Schwankungen der Flächengewichtsgleichmäßigkeit und des Faservolumengehalts sind für industrielle Zwecke zu hoch. Flächengewichte schwanken um ca. 10 % und der Faservolumengehalt um ca. 5 %. Die Verbesserung der Durchmischung und die Erhöhung der Gleichmäßigkeit sind entscheidend für den industriellen Einsatz der Vliesstoffe. Dazu muss in weiterführenden Projekten die Faservorbereitung und die Flockenbeschickung der Vliesstoffanlage weiterentwickelt werden. Die Eingangsqualität ist maßgeblich für spätere Qualität der Vliesstoffe. Zudem sollten weitere maschinenbauliche Lösungen erarbeitet werden, wie sich die Gleichmäßigkeit auch im späteren Prozess deutlich verbessern lässt. Eine sensortechnische Erfassung der Durchmischungsqualität über radiometrische Messsysteme ist zudem denkbar um einen Regelkreis zur Erhöhung der Güte zu etablieren.

Die Faserschädigung sollte weiter reduziert werden. Dazu können Arbeiter-Wender-Stellen weiter reduziert werden und der Einsatz von Avivagen untersucht werden. Diese müssen mit den späteren Matrices im Einklang stehen um den Erhalt der mechanischen Kennwerte zu gewährleisten.

Viele Maschinenparameter sind in der Modellerstellung nicht betrachtet worden. ca. 20 qualitätsrelevante Einstellgrößen verbleiben, deren exakte Auswirkung auf den Vliesstoffprozess noch untersucht werden sollte. Die 9 ausgewählten Maschinenparameter sollten zudem in einem Mehrdimensionalen Versuchsplan untersucht werden, um die Wechselwirkungen innerhalb der Anlage besser zu verstehen. Diese Untersuchungen waren aufgrund des großen Umfangs nicht realisierbar. Der Einsatz von künstlicher Intelligenz bei der Erfassung der Vliesstoffqualität ist daher sicherlich ein adäquates Mittel, um mit einem geringeren Aufwand unter Einsatz von Sensorik und Machine Learning mehr über die Prozesszusammenhänge zu lernen.

Die Einbringung von thermoplastischen Materialien funktioniert und die Einbringungsarten unterscheiden sich bei den mechanischen Kennwerten kaum. Zudem zeigt der Einsatz von PET-Fasern deutliche Potentiale der Werkstoffkombination auf die in weiterführenden Arbeiten detailliert untersucht werden sollten. Die Materialpaarung bietet hohe Steifigkeiten bei geringem Materialpreis.

Die Verarbeitung der Organovliesstoffe mit dem Thermoforming-Prozess funktioniert. Die Erwärmung mit Infrarot-Strahlung hat jedoch den Nachteil, dass die Vliesstoffe vorkonsolidiert werden müssen. Der zusätzliche Prozessschritt verursacht Kosten, die durch eine alternative Heizmethode möglicherweise kompensiert werden könnten. Die Entwicklung eines kurzzykligen variothermen Werkzeugs, die mit Borscheid & Wenig angedacht war, sollte in einem weiterführenden Projekt umgesetzt und erforscht werden. Die Methode bietet den Vorteil rCF-Vliesstoff direkt zu einem Bauteil verarbeiten zu können und das mit kurzen Zykluszeiten.

Der CV-Wert der mechanischen Prüfung, also die Schwankung in den mechanischen Eigenschaften, Zugspannung, Zugsteifigkeit, Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit beträgt durchschnittlich 3-6% und ist somit im Bereich von neuwertigen Materialien. Die Schwankungen im FVG und des Flächengewichts wirken sich also nicht direkt auf die mechanischen Eigenschaften aus. Somit sollten vor allem die Eigenschaften der textilen Halbzeuge verbessert werden, um definierte Produkte zu erzeugen.

Zur besseren Darstellung der Gesamtbewertung soll in Tabelle 6.1.1 nochmal eine große Auswahl der getesteten Materialien aufgelistet werden. Weiterhin ist in Abbildung 6.1.1 eine grafische Übersicht dieser Materialien gegeben. In dieser Darstellung sind Biegeeigenschaften aus dem 4-Punkt Biegeversuche aufgetragen. Auf der X-Achse wird der Unterschied in den Prozessen, Fasertypen und der Matrix aufgezeigt.

Tabelle 6.1.1: Auflistung aller Materialien, die mechanisch charakterisiert werden.

Typ	Vliesbezeichnung	Fasertyp	Matrixtyp	Vlieslieferant	Weiterverarbeitungsprozess	Pressparameter
#1	#1_Marubeni 3-fach VCF_V100_EP_Iso_ITA_SGL_WCM	VCF	Epoxy	ITA	WCM, SGL	250bar, 130°C
#2	#2_Marubeni 3-fach VCF_V100_EP_Ori_Ten_DFCM	VCF	Epoxy	Tenowo	DFCM, Huntsman	6 bar, 115°C
#2	#2_Marubeni 3-fach VCF_V100_EP_Ori_Ten_SGL_WCM	VCF	Epoxy	Tenowo	WCM, SGL	250bar, 130°C
#2	#2_Marubeni 3-fach VCF_V100_EP_Ori_Ten_RTM	VCF	Epoxy	Tenowo	RTM, IGCV	30bar, 100°C
#3	#3_Marubeni 3-fach VCF_V40_PA60_Iso_ITA	VCF	PA6	ITA	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#3.1	#3.1_Marubeni 1-fach VCF_V40_PA60_iso_ITA	VCF	PA6	ITA	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#4	#4_Marubeni 3-fach VCF_V51_PA49_Ori_Ten	VCF	PA6	Tenowo	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#5	#5_Marubeni 3-fach VCF_V45_MAPP55_Iso_ITA	VCF	MAPP	ITA	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#6	#6_Cabiso SM45R 60/100 PCF_V100_iso_ITA_SGL_WCM	PCF	Epoxy	ITA	WCM, SGL	250bar, 130°C
#8	#8_Cabiso SM45R 60/100 PCF_P40_PA60_iso_ITA	PCF	PA6	ITA	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#9	#9_Cabiso SM45R 60/100 PCF_V51_PA49_Ori_Ten	PCF	PA6	Tenowo	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#11	#11_Marubeni 3-fach VCF_V40_PA60Ori_Ten_Maliwatt	VCF	PA6 Maliwatt	Tenowo	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#12	#12_IM45P-30/60 PCF_P45-MAPP55_Ori_ELG	Pyro-AHD	MAPP	ELG	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#12	#12_IM45P-30/60 PCF_P45-MAPP55_Ori_ELG	Pyro-AHD	MAPP	ELG	Isotherm Hot pressing, SGL	15bar, 190°C
#13	#13_IM45P-30/60 PCF_P39_PPS61_Ori_ELG	Pyro-AHD	PPS	ELG	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#14	#14_IM45P-30/60 PCF_P40_PA60_Ori_ELG	Pyro-AHD	PA6	ELG	Hot pressing, IGCV	50bar, 285°C
#15	#15_IM45P-30/60 PCF_P100_EP_Ori_ELG_DFCM	Pyro-AHD	Epoxy	ELG	DFCM, Huntsman	6 bar, 115°C
#15	#15_IM45P-30/60 PCF_P100_EP_Ori_ELG_SGL_WCM	Pyro-AHD	Epoxy	ELG	WCM, SGL	250bar, 130°C
#15	#15_IM45P-30/60 PCF_P100_EP_Ori_ELG_RTM	Pyro-AHD	Epoxy	ELG	RTM, IGCV	115bar, 100°C

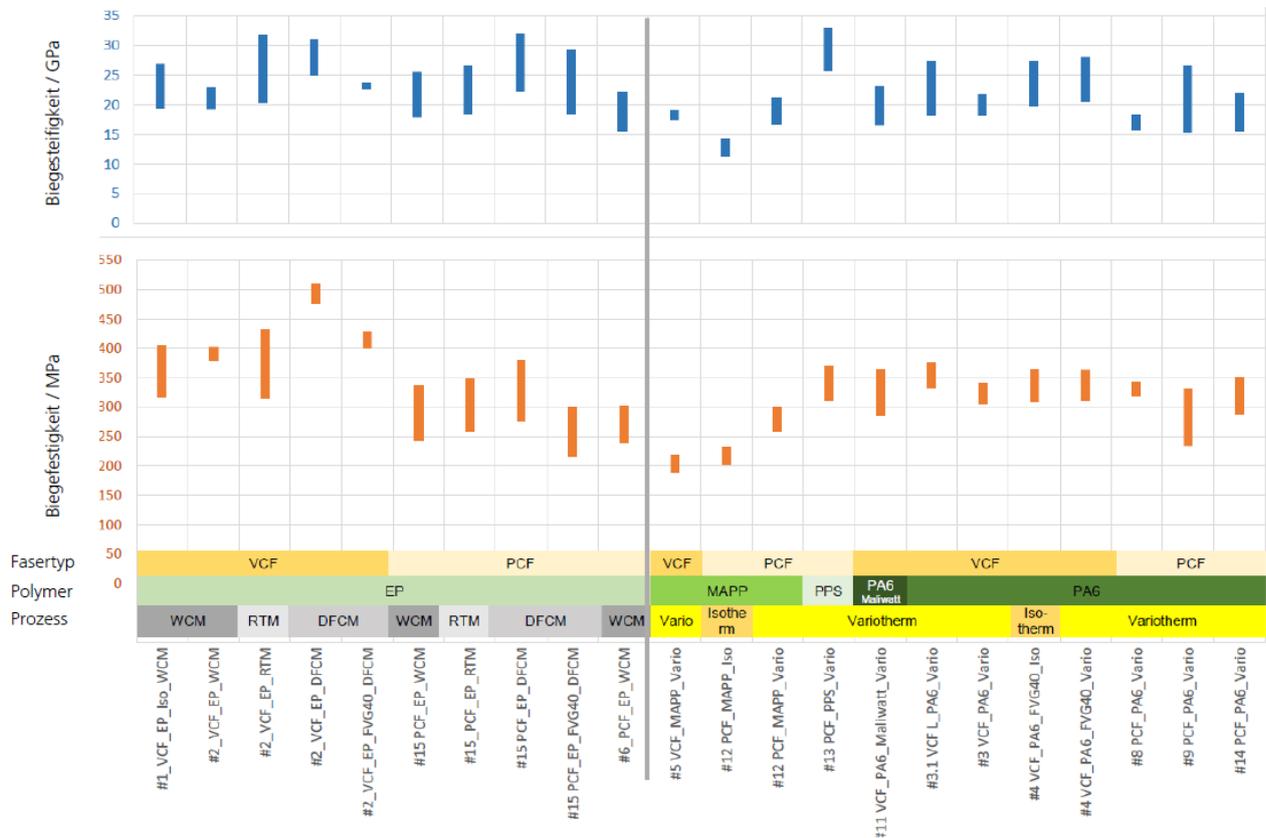


Abbildung 6.1.1: Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit aller Materialien in einer Minimal-Maximal-Darstellung. Alle Kennwerte in dieser Darstellung sind auf den gravimetrisch bestimmten FVG gemittelt.

Weiterhin sind in Abbildung 6.1.2 und Abbildung 6.1.3 die leichtbauspezifischen Zug- und Biegeeigenschaften in sogenannten Ashby Diagrammen dargestellt. Hier sind die Eigenschaften als Blasen aufgezeichnet. Die Größe der Blase wird durch die absolute Schwankung definiert, also der maximale Wert plus Standardabweichung und die minimale Abweichung abzüglich der Standardabweichung. Als Dichte wird eine definierte Dichte bezogen auf den gemessenen Faservolumengehalt eingesetzt.

Es zeigt sich, dass die Eigenschaften der rCF-Vliesstoffe in Bezug auf Ihre spezifische Zugfestigkeit über den Eigenschaften von Stahl und Aluminium liegen und diese Materialien somit ein besseres Leichtbaupotential bieten. Die rCF-Materialien liegen gleich auf und teilweise etwas unter der Zugfestigkeit von Glasfasergewebe was eine zugfestigkeitsdominierte Substitution von Glasfasern erschweren würde. Grund hierfür sind die ebenfalls sehr hohe Festigkeit von Glasfasern im Vergleich zu Carbonfasern. Im Bereich der spezifischen Zugsteifigkeit liegen die Eigenschaften allerdings weit über den Eigenschaften von Glasfasern. Hierfür sind jedoch Stähle und Aluminium besser geeignet als rCF-Vliesstoffe. Zusammenfassend zeigt sich ein gemischtes Bild im Bereich der Zugeigenschaften. In manchen Vergleichen sind die rCF-Produkte besser in anderen jedoch auch schlechter.

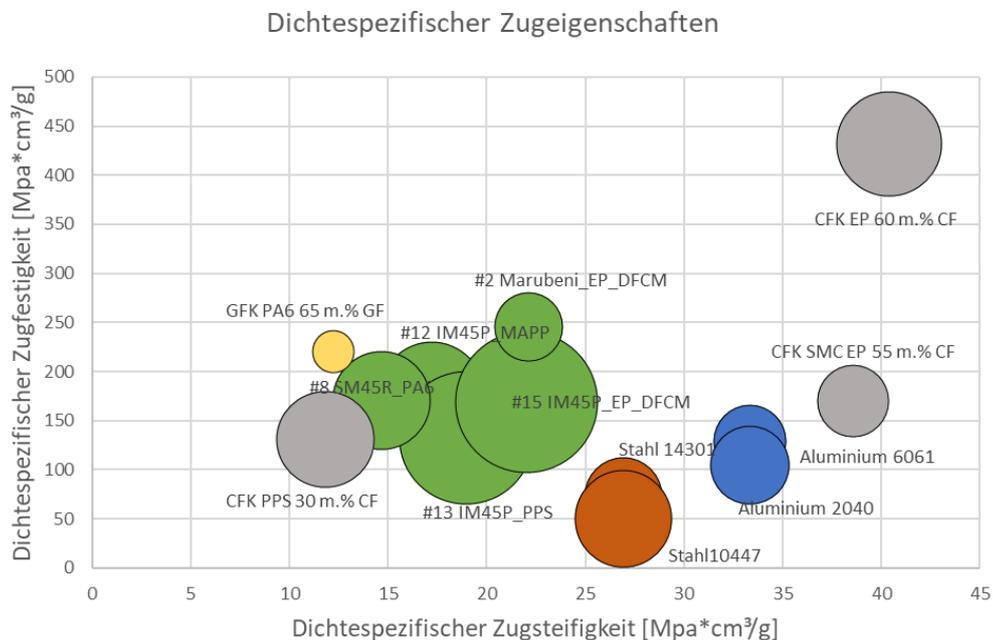


Abbildung 6.1.2: Leichtbaupotential von Vliesstoffen auf Basis der dichtespezifischen Zugeigenschaften.

Abbildung 6.1.3 zeigt die dichtespezifischen Biegeeigenschaften der rCF-Vliesstoffe im Vergleich zu anderen Materialien. Auch hier zeigt sich wieder ein gemischtes Bild. Im Bereich der Festigkeit liegen die rCF-Materialien deutlich über den Stählen und Aluminium und gleichauf mit Glasfasern. Im Falle einer steifigkeitsdominierten Leichtbau Anforderung würden Aluminium, vor Stahl vor rCF-Vliesstoffen einen Einsatz finden. Hier können die rCF-Produkte auch mit vCF-SMC mithalten und zeigen ähnliche Werte.

Um das richtige Material zu finden muss also immer auch der genaue Lastfall betrachtet werden. Die rCF-Materialien outperformen nicht in allen Bereichen andere bereits eingesetzt Materialien, können aber im richtigen Lastfall durchaus eine vernünftige Ergänzung oder Substitution darstellen. In Tabelle 6.1.2 ist eine vereinfachte Darstellung der Leichtbaupotentiale gezeigt, welche eine schnelle Abschätzung des Einsatzes von rCF zeigt.

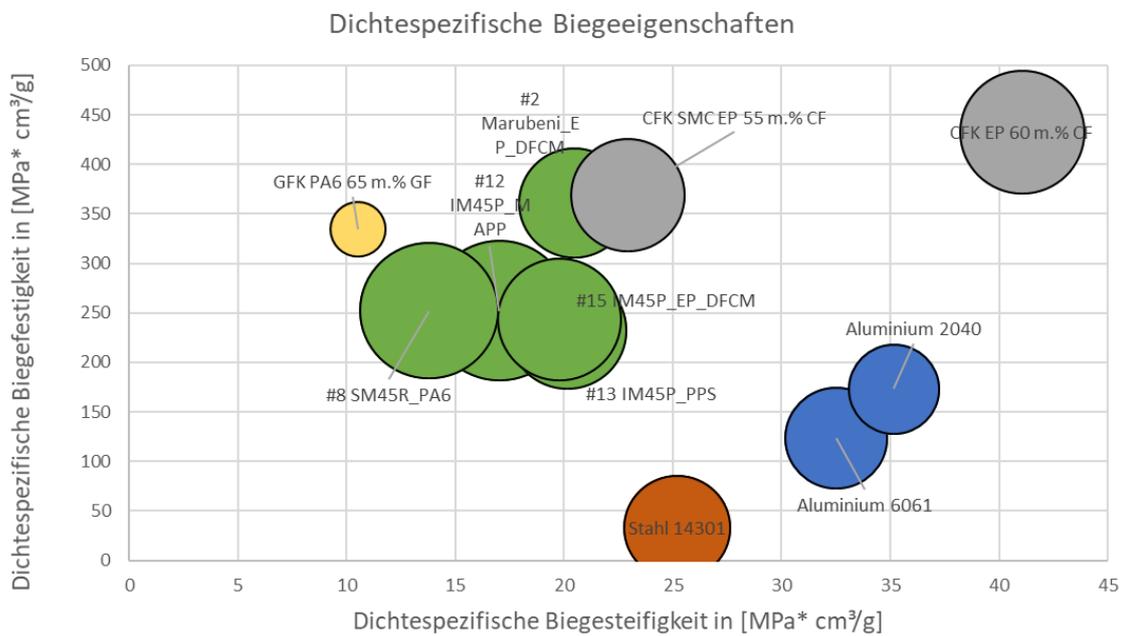


Abbildung 6.1.3: Leichtbaupotential von Vliesstoffen auf Basis der dichtespezifischen Biegeeigenschaften.

Tabelle 6.1.2: Abschätzung der Leichtbaupotentiale unterschiedlicher Materialklassen. Bei multipler Nennung in einer Kategorie besitzt das zuerst genannte Material die besseren Eigenschaften.

Lastfall	Bestes Material	Verfolger	Schlusslicht
Spez. Zugfestigkeit	vCFK	rCFK, vGF	Aluminium, Stahl
Spez. Zugsteifigkeit	vCFK	Aluminium	Stahl, rCFK
Spez. Biegefestigkeit	vCFK	rCFK, vGF	Aluminium, Stahl
Spez. Biegesteifigkeit	vCFK	Aluminium	Stahl, rCFK, vGFK

## 6.2 Arbeitspaket: Funktionsintegration durch Hinterspritzen

Siehe Ergebnisse in AP 3.2.4. Aufgrund des Ausscheidens von Borscheid und Wenig kann hier nur die grundlegende Machbarkeit der Funktionsintegration durch Anspritzen einer Rückenstruktur an den Tankdeckel im Werkzeug des ITA gezeigt werden.

## 6.3 Arbeitspaket: Demonstratorfertigung

Zum Abschluss des Projektes sollen mehrere Demonstratoren gefertigt werden, welche veranschaulichen sollen, welche unterschiedlichen Verarbeitungsmöglichkeiten sich bei Bauteilen aus rCF-Vliesen ermöglichen. Für die Demonstration der Prozessrouten wird sich auf folgende Demonstratoren verständigt (Abbildung 6.3.1). Das „Hutprofil“ und die „Eistüte“ wurden bereits in den vorhergegangenen Kapiteln ausgiebig beschrieben. Daher soll in diesem Kapitel vor allem auf die anderen drei Bauteile eingegangen werden.

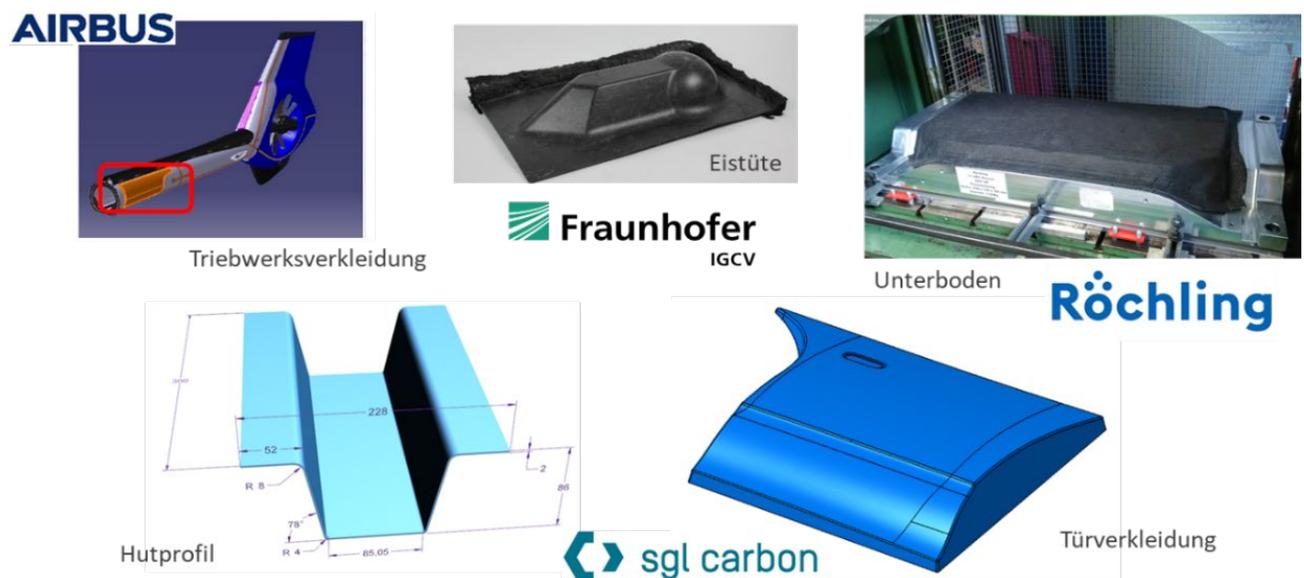


Abbildung 6.3.1: Im Projekt CaRina verwendete Prozessdemonstratoren.

### 6.3.1 Demonstrator – SGL / Türverkleidung

Um einen anwendungsnahen Demonstrator zu fertigen, wird sich dazu entschieden, einen sogenannten Türdemonstrator, auch Außenhautbauteil (AHB) (Abbildung 6.3.1.1) im Nasspressverfahren aus rCF-Vliesen herzustellen.

Hier wird die Möglichkeit des Herstellens komplexer dreidimensionaler Körper noch deutlicher dargestellt. Die wichtigsten Eigenschaften zu diesem Werkzeug sind folgende:

- Längslaufende Sicke
- Seitenblinker (Vertiefung)
- Unterschiedlich tiefe Seitenwände mit möglichst kleiner Entformungsschräge
- Unterschiedliche Krümmungsradien in zwei Ebenen

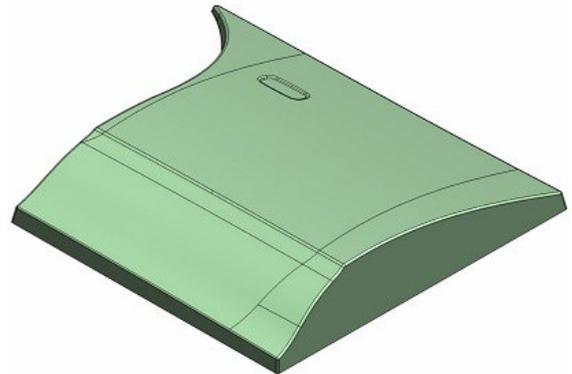


Abbildung 6.3.1.1: CAD-Konstruktion des Demonstrator-Außenhautbauteils.

Mit diesem Werkzeug kann das Herstellen von größeren und komplexeren Körpern als mit dem Hutprofilwerkzeug nachgewiesen und veranschaulicht werden.

Bei dem Werkzeug handelt es sich um ein zweiteiliges Stahlwerkzeug (Abbildung 6.3.1.2) mit einem konstruktiven Formspalt von 1,7 mm. Das bedeutet, dass die darin hergestellten Bauteile mindestens diese Dicke erreichen müssen, um unter Druck ausgehärtet werden zu können. In den sichtbaren Bohrungen werden noch Zentrierbolzen eingesetzt.

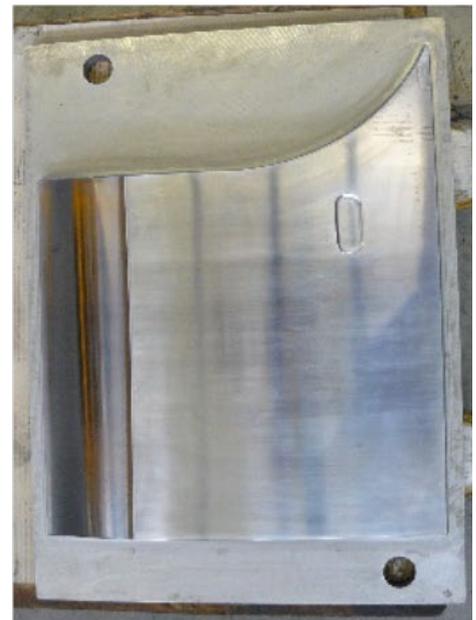
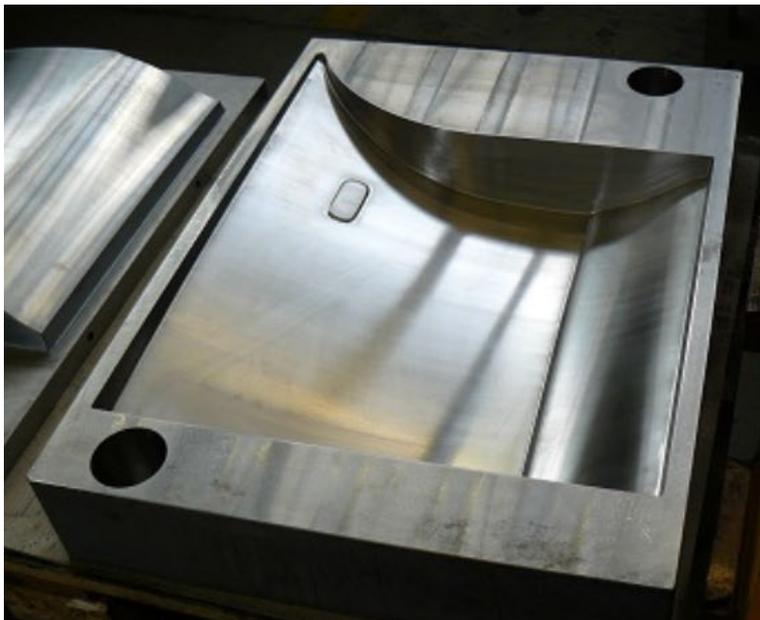


Abbildung 6.3.1.2: Links: AHB-Werkzeug Unterseite. Rechts: AHB-Werkzeug-Oberseite.  
Eine Herausforderung stellen die benötigten Zuschnitte für die Nasspressversuche dar. Die Zuschnitte werden auf Basis der CAD-Abwicklung (Abbildung 6.3.1.1) angefertigt und von Versuch zu Versuch angepasst.

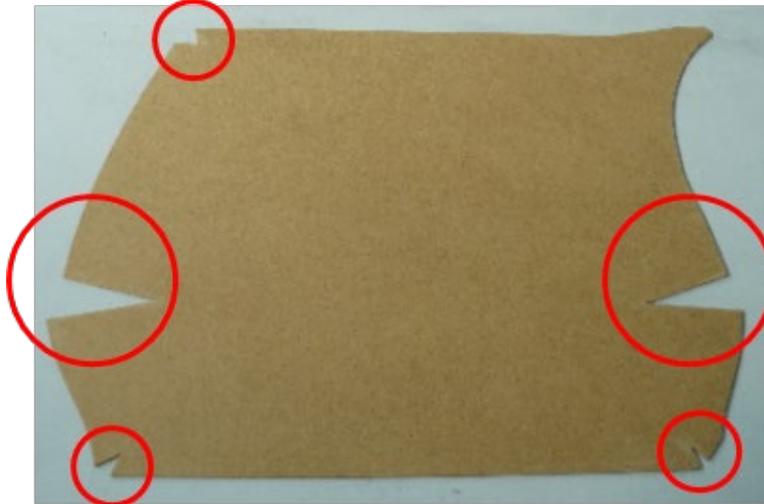


Abbildung 6.3.1.2: AHB-abgewickelte Fläche mit Aussparungen.

Die Zuschnitte werden anfangs ohne die dreieckigen Aussparungen (rote Markierungen) vorbereitet. Neben dem geringeren Arbeitsaufwand, wird so auch ein(e) mögliche(r) Gap oder Überlappung vermieden. Des Weiteren müssen noch zusätzliche Laschen für die pneumatischen Greifer mit ein konstruiert werden (Abbildung 6.3.1.4). Die folgenden Versuche bestätigen die Vermutung, dass sich das Vlies aufgrund ihrer sehr guten Drapierbarkeit auch ohne diese Aussparungen fehlerfrei in die Form legen lassen. Für die Versuche werden zwei unterschiedliche Vliese verwendet:

Tabelle 6.3.1.1: Eingesetzte Vliese für die AHB-Demonstratoren.

Hersteller	Vliesbezeichnung	Flächengewicht	Faseranteil	Glasfaseranteil	Lagenanzahl
ELG	Carbiso M IM56L-250	250 g/m <sup>2</sup>	100 %	0 %	4
SGL	Sigratex C N96-ANO/NF	96 g/m <sup>2</sup>	88 %	12 %	10 – 11

Der signifikanteste Unterschied liegt wohl im Flächengewicht der Vliese. Das deutlich leichtere Vlies von SGL muss zur Stabilität mit einem thermoplastischen Faden vernäht werden, damit es beim Handling nicht reißt. Als Matrix wird das Harz-Härter-System von Huntsman verwendet, welches auch schon in AP 3.1.1 „Nasspressen“ verwendet wurde.

### Nasspressen der Außenhautbauteile

Die Versuche D-12.1 – D-12.8 werden benötigt um die Zuschnitt-Geometrie, die Harzmenge und das Roboterprogramm optimal einzustellen. Diese acht Versuche weisen verschiedene Fehlstellen auf und können nicht als Demonstratoren verwendet werden. Anhand dieser ersten Pressdurchgänge können folgende Prozesswerte festgelegt und beibehalten werden:

- Presskraft: 800 kN
- Eingestellte Pressentemperatur: 130 °C
- Resultierende Werkzeugtemperatur: 120 °C
- Aushärtezeit in der Presse: 6 min

In Tabelle 6.3.1.2 sind alle weiteren Prozessparameter der folgenden Außenhautbauteile dargestellt.

Tabelle 6.3.1.2: Versuchsparameter der Nasspressversuche der Außenhautbauteile.

Versuchsbez.	Material	Lagenanzahl	Austragsmenge	Haltezeit	gesamt
T-12.9	Carbiso M IM56L-250	4	0,55 kg/min	0 s	iO
T-12.10	Carbiso M IM56L-250	4	0,60 kg/min	0 s	iO
T-12.11	Carbiso M IM56L-250	4	0,70 kg/min	0 s	iO
T-12.12	Carbiso M IM56L-250	4	0,75 kg/min	0 s	iO
T-12.13	Carbiso M IM56L-250	4	0,75 kg/min	0 s	iO
T-12.14	Carbiso M IM56L-250	4	0,80 kg/min	0 s	iO
T-12.15	Carbiso M IM56L-250	4	0,75 kg/min	20 s	niO
T-12.16	Carbiso M IM56L-250	4	0,75 kg/min	20 s	niO
T-12.17	Sigratex C N96-ANO/NF	10	0,75 kg/min	20 s	niO
T-12.18	Sigratex C N96-ANO/NF	10	0,75 kg/min	20 s	iO
T-12.19	Sigratex C N96-ANO/NF	11	0,75 kg/min	20 s	iO
T-12.20	Sigratex C N96-ANO/NF	11	0,75 kg/min	20 s	iO

Aufgrund der fehlenden Verwebung mit thermoplastischen Material, ist das ELG-Material „Carbiso M IM56L-250“ tendenziell etwas instabiler. Mit dem zusätzlichen Gewicht der aufgetragenen Matrix neigt das Vlies dazu beim Transport zur Presse zu reißen. Um dies zu verhindern, wird bei diesem Material die Einwirkzeit nach dem Harzauftrag auf null Sekunden reduziert. Durch eine weitere Anpassung der Zuschnitt-Geometrie kann bei den Versuchen T-12.15 und T-12.16 diese Haltezeit wieder eingebaut werden ohne, dass das Vlies reißt. Bei diesen Außenhautbauteilen ist aber zu erkennen, dass an den Bauteilkanten nach dem Aushärten raue Trockenstellen entstehen. Das SGL-Material dagegen lässt sich ohne größere Probleme erfolgreich Nasspressen (Abbildung 6.3.1.5). Das Handling funktioniert trotz des zusätzlichen Matrixgewichtes problemlos und die Ergebnisse weisen keine Fehlstellen auf. Allein bei T-12.17 bricht das Bauteil aufgrund schlechter Trennwirkung beim Entformungsprozess.

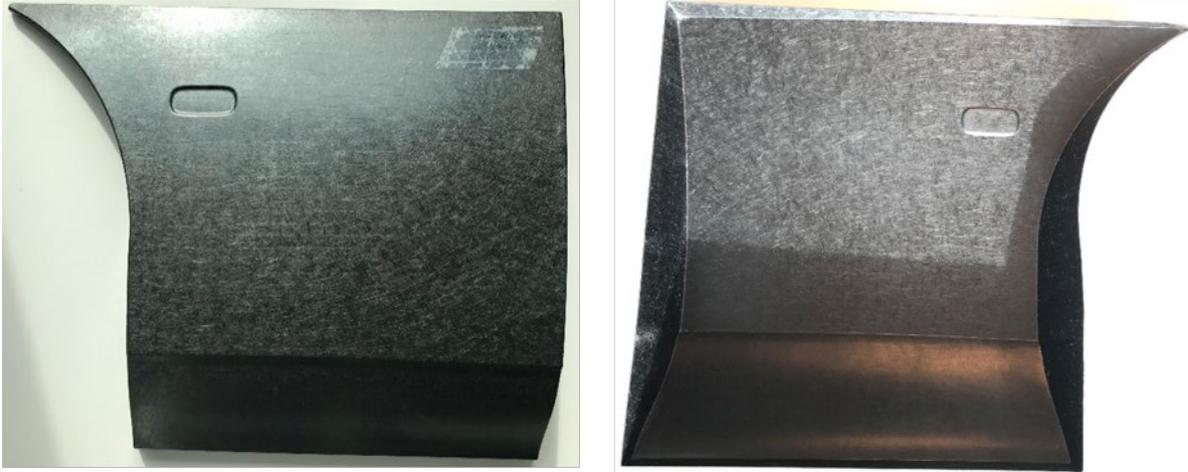


Abbildung 6.3.1.3: Links: AHB-Außenseite mit ELG-Vlies. Rechts: AHB-Innenseite mit ELG-Vlies.

### 6.3.2 Demonstrator – Airbus Helicopters / Hitzeschutz

In Zusammenarbeit mit der SGL, dem Fraunhofer IGCV und Airbus Helicopters werden unterschiedliche Bauteile betrachtet und diskutiert. Schlussendlich wird sich auf einen Hitzeschutz für den Heckausleger eines mittelschweren Hubschraubers verständigt. Für diesen ist die Bauteilarchitektur und Lagenabfolge basierend aus rCF-Vliesstoffen vergleichbar mit den heute eingesetzten Carbon- und Glasfaseraufbau. Das Bauteil ist nicht primär lasttragend. Der Vliesstoff kann hier die flächigen Textillagen aus Geweben ersetzen sofern es in die dominierte Biegerichtung belastet wird. Durch die Substitution der Glasfasern kann es zudem zu einem leichteren Bauteil führen, was in der Luftfahrt einen großen zusätzlichen Nutzen darstellt.

Die SGL Carbon stellt das Prepreg, bestehend aus dem SGL Sigratrex C N96-AN0-NF Vliesstoff mit der E730 Matrix her und liefert es an Airbus Helicopters. Dort werden die Lagen zugeschnitten, die Schutzfolie entfernt und die einzelnen Lagen mit samt des Kernwerkstoffes manuell gestapelt. Anschließend wird ein Vakuumaufbau angebracht und das Bauteil im Autoklav bei 180 °C für 2 Stunden unter 2 bar Relativdruck ausgehärtet. Nach der Entfernung des Vakuumaufbaus werden die Kanten besäumt.

Die so hergestellten Bauteile werden nach der Produktion händisch und mittels Ultraschall überprüft. Es kann eine gute Anbindung der Vlieslagen an den Kernwerkstoff festgestellt werden. Weiterhin ist höhere Schalldämpfung zu beobachten gewesen. Dies kann im Ultraschall auf eine sehr homogene, aber erhöhte Porosität im recycelten Material zurückgeführt werden. Insgesamt hat das Bauteil jedoch eine hohe Qualität und ist als durchaus zufriedenstellend von den Ingenieuren bewertet worden. Weitere Tests sowie ein Testflug sollen im Anschluss an das Projekt durchgeführt werden.



Abbildung 6.3.2.1: Linksseitiges und rechtsseitiges Hitzeschild von Airbus Helicopters.

### 6.3.3 Demonstrator – Röchling Automotive / Unterboden

Weiterhin wird in Zusammenarbeit mit Röchling, Tenowo und dem Fraunhofer IGCV ein Demonstrator für die Firma Röchling gebaut. Dazu wird eine bereits vorhandene Unterbodengeometrie von Röchling für die Versuche genutzt. Für die Versuche stellt Tenowo ein  $400 \text{ g/m}^2$  Mischvlies mit 7% MAPP aus MCAM VCF1x Fasern her. Das Vlies wird mit 20 vol.-% (30 gew.-%) hergestellt, damit die Menge an Carbonfasern der Menge an Glasfasern im Originalbauteil entspricht. Dieses wird zu  $2000 \text{ g/m}^2$  aufeinandergestapelt und oben und unten mit einer  $180 \mu\text{m}$  dicken Aluminiumfolie ausgestattet, welche als KTL-Ersatzlack und für das Thermomanagement des Unterbodens dient. Der Sandwich wird anschließend bei  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  für 8,5 Minuten erwärmt und in einer zweiten Presseinheit bei ca. 10 bar thermogeformt. Das so hergestellte Bauteil ist in Abbildung 6.3.3.1 zu sehen.

Äußerlich weist das Bauteileine gute Oberfläche und Abformbarkeit des Werkzeuges auf. Da der Zuschnitt der Aluminiumfolie nicht optimiert wird sind vereinzelt Falten und eingerissene Stellen auf der Folie zu sehen. Aufgrund des Aussteigens von Röchling aus dem Konsortium werden am Bauteil keine weiteren Tests unternommen. Insgesamt weist das Bauteil aber ein hohes Potential für weitere Versuche auf, vor allem in Anbetracht der guten akustischen Eigenschaften der Carbonfaservliesstoffe (siehe Arbeitspaket 4.4).



Abbildung 6.3.3.1: Unterbodenstruktur von Röchling Automotive aus recycelten Carbonfasern überzogen mit Aluminiumfolie.

## 6.4 Arbeitspaket: Lessons Learned

Das interdisziplinäre Konsortium, das entlang der Prozesskette aufgestellt ist, kann die umfangreiche Aufgabe der Untersuchung sowohl der üblichen Vliesstoffherstellungsrouten sowie der Weiterverarbeitung und der simulativen Modellierung des Werkstoffs erfolgreich bewerkstelligen.

Gerade der Ansatz sich vom groben zu immer feineren Detailgraden vorzuarbeiten gelang hervorragend. Zunächst war eine intensive und fachübergreifende Zusammenarbeit der Partner erforderlich, um eine umfangreiches Lastenheft und ausführliche Versuchsplanung aufzustellen. Durch die Herstellung von über 100 Vliesstoffen und Weiterverarbeitung in dutzenden Verfahren ist eine umfangreiche Datenbank an Materialkarten entstanden, die Industrieunternehmen die Möglichkeit bietet einfach und schnell die richtige Werkstoffkombination und das dazugehörige Herstellungsverfahren zu identifizieren. Wichtige Zusammenhänge der Maschinenparameter im Vliesstoffprozess werden beleuchtet und erarbeitet. Die Modelle und insbesondere die Methodik der Modellfindung bieten die Grundlage für Vliesstoffhersteller Ihre Prozesse schnell zu analysieren und die wichtigsten Maschinenparameter zu identifizieren.

Das frühzeitige Aussteigen der Partner Borscheid & Wenig sowie Röchling hat das Konsortium vor große Herausforderungen gestellt auf die schnell und flexibel reagiert werden musste. Nach einem turbulenten ersten Projektjahr konnte jedoch mit der Bearbeitung effektiv und zielstrebig vorangeschritten werden. Trotz der epidemiologischen Lage im letzten Projektjahr, können alle Milestones erreicht und Projektziele erreicht werden. Die Zusammenarbeit der Projektpartner und assoziierten Partner war über die gesamte Projektlaufzeit stets professionell und sehr freundlich. So konnten die teils schwierigen Situationen gemeistert und das Projekt gewinnbringend beendet werden.

## VERÖFFENTLICHUNGEN AUS DEM PROJEKT

- [1] G. Stegschuster; PERSPECTIVES OF WEB BASED COMPOSITES FROM RCF MATERIAL; TexComp13, Mailand 2018.
- [2] F. Manis; MAI CC4 CaRinA Projektvorstellung, MAI Projektforum; Augsburg 2018.
- [3] F. Manis; Carbon fibre recycling-Nonwoven for industrial applications, EcoComp; 20.06.2019, Coventry .
- [4] F. Manis; MAI CC4 CaRinA Projektvorstellung, MAI Projektforum; Augsburg 2019.
- [5] F. Manis; MAI CC4 CaRinA Projektvorstellung, MAI Projektforum; Augsburg 2020.
- [6] F. Manis; H. Paulus; Lastpfadgerechte Verstärkung von rCF-Vliesstoffen, Lightweight Design; 15.12.2020; <https://www.springerprofessional.de/recycling/verbundwerkstoffe/lastpfadgerechte-verstaerkung-von-rcf-vliesstoffen/18680002>.
- [7] Manis, F.; Stegschuster, G.; Wölling, J.; Schlichter, S. Influences on Textile and Mechanical Properties of Recycled Carbon Fiber Nonwovens Produced by Carding. J. Compos. Sci. 2021, 5, 209. <https://doi.org/10.3390/jcs5080209>

## ABSCHLUSSARBEITEN AUS DEM PROJEKT

- [1] Maria Mayer. Herstellung von Verbundwerkstoffen aus Organovliesen auf Basis rezyklierter Carbonfasern zur Ermittlung relevanter Kennwerte und dem daraus resultierendem Potenzial für Materialsubstitutionen. Bachelorarbeit, Hochschule Kempten; 2018.
- [2] Jens Klug: Untersuchung der Vorhersagbarkeit von Krempelparameter-konfigurationen für die gezielte Einstellung von Vlies- und Composite-Eigenschaften mit rezyklierten Carbonfasern, Masterarbeit, RWTH Aachen University, 2018.
- [3] Tanja Köpf: Einfluss von Naturfasern auf die Eigenschaften von thermoplastischen Carbonfaser-Composites, Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2018.
- [4] Constantin Sykora: Einflüsse von TP-Fasereigenschaften auf den Herstellungsprozess von Hybridvliesen aus rezyklierten Carbonfasern, Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2018.
- [5] Hannah Lindner: Untersuchung zur Herstellung eines CFK-Halbzeugs aus rezyklierten Carbonfasern durch Thermoplast-Vliesstacking, Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2018.
- [6] Joel Schnitter: Untersuchung des Pulverstreuens bei der Produktion thermoplastischer rCF-Vliesstoffe, Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2018.
- [7] Christoph Klement: Einflüsse von TP-Fasereigenschaften auf den Herstellungsprozess von Hybridvliesen aus rezyklierten Carbonfasern, Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2018.
- [8] Jennifer Berres: Vergleichende Untersuchung alternativer Einbringungsarten thermoplastischer Matrices in Web Based Composites, Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2018.
- [9] Veronika Roßner: Weiterverarbeitung von recycelten Carbonfaser-Vliesstoffen mittels Resin Transfer Moulding, Nasspress- und Heißpressverfahren und Bewertung der mechanischen Kennwerte, Masterarbeit, Universität Hamburg Fern Hochschule, 2020.
- [10] Xiaotong Guo: Bewertung der Drapierbarkeit von Vliesstoffen aus recycelten Carbonfasern, Hochschule Nordhausen, Bachelorarbeit, 2020.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Coh13] Cohen, J.:  
Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, Aufl. 2nd ed.,  
Hoboken: Taylor and Francis, 2013.
- [FHH+19] Fischer, H.; Heilos, K.; Hofmann, M.; Miene, A.; Ziller, M.; Cleff, C.; Maidorn, J.;  
Hohmuth, H.; Schaarschmidt, R.; Bauer, K.:  
RecyCarb – Ganzheitliche verfahrenstechnische Betrachtung und prozessbegleitendes  
Monitoring von Qualitätsparametern bei der Aufbereitung von Carbonfaserabfällen  
und deren hochwertigen Wiedereinsatz in textilen Flächengebilden als Basismaterial für  
Faserverbundwerkstoffe der Zukunft: gemeinsamer Schlussbericht zu Nr. 3.2: Laufzeit  
des Vorhabens: 01.12.2016-30.11.2018, Berichtszeitraum: 01.12.2016-30.11.2018:  
futureTEX: Ein Zukunftsmodell für Traditionsbranchen in der vierten industriellen Revo-  
lution  
Norderstedt: BoD – Books on Demand, 2019.
- [GUO20] Xiaotong Guo, Bewertung der Drapierbarkeit von Vliesstoffen aus recycelten Carbon-  
fasern, Bachelorarbeit, Hochschule Nordhausen, 2020.
- [Kle16] Kleppmann, W.:  
Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren  
9. Aufl. – München; Wien: Hanser, 2016.
- [Man20] F. Manis, H. Paulus, Lastpfadgerechte Verstärkung von rCF-Vliesstoffen, Lightweight  
Design, Dezember 2020.
- [Man21] Manis, F.- Stegschuster, G. Influences on textile and mechanical properties of recycled  
carbon fiber nonwovens produced by carding, Journal of Composite Science, 2021.(im  
Review-Prozess)
- [Mey19] Meyer Maschinenfabrik GmbH, Rötz:  
Pulverstreuer für gleichmäßige und homogene Verteilung  
URL: <https://www.meyer-machines.com/streuen/streumaschinen/>, Zugriff am  
18.01.2019.
- [Ode02] Odenwald, S.:  
Eigenschaften und Umformverhalten naturfaserverstärkter Thermoplaste, Schriften-  
reihe Strukturleichtbau, Band 5, Chemnitz: Techn. Univ 2002.
- RHB16] Rösler, J.; Harders, H.; Bäker M.:  
Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, Aufl. 5.  
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2016.
- [SBH17] Siebertz, K.; Bebbber, D. van; Hochkirchen, T.:  
Statistische Versuchsplanung  
Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2017.
- [Ste21] Stegschuster, G.:  
Analyse des Kardiervfahrens zur Herstellung von Carbonfaservliesstoff als Verstär-  
kungstextil für Faserverbundwerkstoffe.  
Dissertation, Universität Augsburg; 2021. ISBN 978-3-8440-7999-9

