This project has received funding from the Eurostars-2 joint programme with co-funding from the European Union Horizon 2020 research and innovation programme

Schlussbericht zum Vorhaben

„Untersuchung der Material- und Verarbeitungseigenschaften von Verbundwerkstoffen aus biobasiertem Pulverharz und recycelten Kohlenstofffasern“

im Rahmen des Eurostars Projekts

E! 113651 MarineCare

„MarineCare – Nachhaltige Verbundwerkstoffe aus recycelten Kohlenstofffasern und biobasiertem Pulverharz für maritime Anwendungen“

Jan Janzen, David May

Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Erwin-Schrödinger-Straße 58, 67663 Kaiserslautern

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2028C
Projektlaufzeit: 01.07.2020 – 30.09.2023

Inhaltsverzeichnis

1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse 3
1.1. AP 2 - Erstellung der allgemeinen technischen Spezifikationen 3
1.2. AP 3 - Entwicklung eines biobasierten Epoxidharz-Pulverprepregs 8
1.2.1. Technologieentwicklung zur Herstellung bemusterter Pulverprepregs / Feststoffharzprepregs 9
1.2.2. Analyse der hergestellten Feststoffharzprepregs 12
1.2.3. Einfluss der Prepregparameter auf die Verarbeitungseigenschaften 20
1.2.4. Herstellung von rCF-Prepregs..... 34
1.3. AP 4 – Anwendung des Pulverprepregs auf maritime Bauteile 35
1.3.1. Methoden zur Bewertung der Laminatqualität..... 35
1.3.2. Einfluss der Aushärtestrategie und des Vakuumaufbaus auf die Laminatqualität 37
1.3.3. Einfluss des Bedeckungsgrads und der Musterelementgeometrie auf die Laminatqualität..... 41
1.3.4. Einfluss des Trocknungszyklus auf die Laminatqualität 48
1.3.5. Festlegung der Parameter für die Herstellung von rCF-Laminaten 51
1.4. AP 5 – Verifikation und Validierung 52
1.4.1. Herstellung und Analyse von biobasierten rCF-Laminaten; Nutzwertanalyse 52
2 Zusätzliche Informationen 54
2.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 54
2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten 54
2.3. Verwertungsplan..... 54
2.4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 56
2.5. Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse 58
3 Literatur 60

1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Die wichtigsten Ergebnisse und andere wichtige Ereignisse werden im Folgenden sortiert nach Arbeitspaketen, an denen das IVW beteiligt war, aufgelistet.

1.1. AP 2 - Erstellung der allgemeinen technischen Spezifikationen

Im AP 2 des Projekts wurden zunächst alle relevanten Informationen entlang der neu entwickelten Prozesskette zur Herstellung und Verarbeitung von biobasierten Pulver-Prepregs bzw. Feststoffharzprepregs (SRP, von engl. Solid Resin Prepreg) gesammelt und in einer Anforderungsliste zusammengetragen. Die neu entwickelte Prozesskette ist in Abbildung 1 dargestellt.

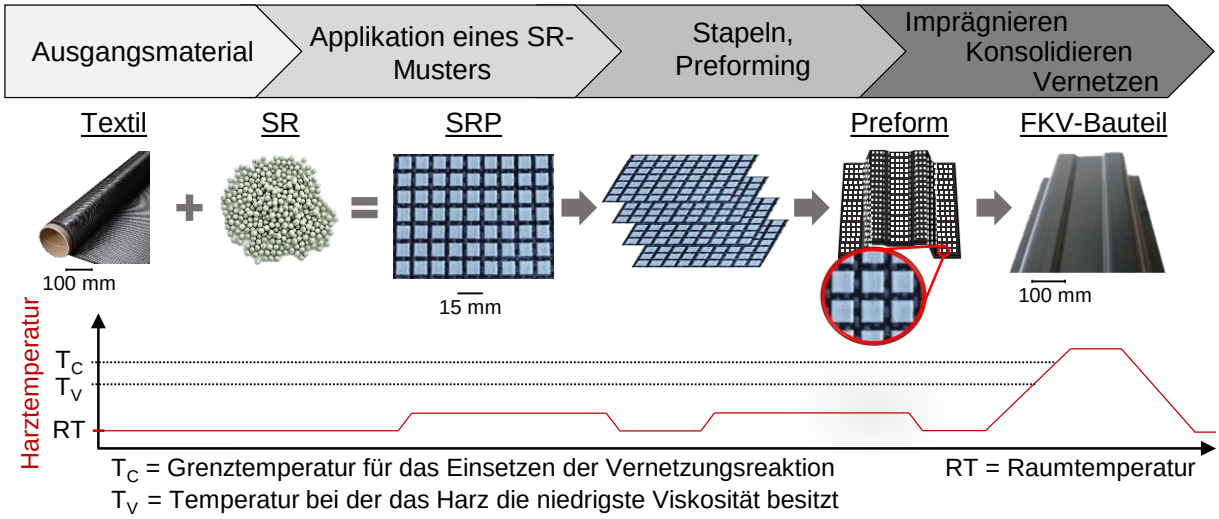

Abbildung 1: Prozesskette zur Herstellung und Verarbeitung von SRPs

Die erstellte Anforderungsliste (siehe Tabelle 1) orientiert sich entlang dieser Prozesskette und listet Anforderungen an die Ausgangsmaterialien, die Verarbeitung, das hergestellte Bauteil sowie an das Lebenszyklusende. Die Anforderungen wurden anhand von Erfahrungswerten, Literaturrecherchen sowie experimentellen Versuchen (bspw. mechanische Charakterisierung der bisherigen Greenboats Materialien, die als Benchmark für die rCF Laminate dienen) erstellt.

Tabelle 1: Anforderungsliste entlang der Prozesskette

Kategorie		Anforderung qualitativ	Anforderung detailliert / quantitativ	F/W
Ausgangs-material	Fasern / Textil	Nachhaltigkeit	Recycelte Kohlenstofffasern, Naturfasern	F
		Textilart	Gewebe, Gelege, Vlies/Wirrfasermatten	F
			Leinwand-, Köper-, Atlasbindung; 0°, 0°/90°, +-45°	F
			Kompaktierung auf Laminatdicke im Vakuumaufbau/Heizpresse realisierbar, Rückstellkräfte beachten	F
		Flächengewicht	CF: 150 bis 900 g/m² +- 3% NF: 300 bis 400 g/m² +- 3%	F
		Schlichte	Kompatibel mit Matrixwerkstoff und mit Heizprozess bis 200 °C	F
		Anteil von Fremdstoffen im Textil (bspw. Binder oder Fremdfaser)	< 90 % Rest: PA, PES oder PS kein PP, PE	F
		Verfügbarkeit	Rollenbreite > 1 m Faserorientierung in Verarbeitungsrichtung > 90%, Rollenware > 50 m Lauflänge durchgehend am Markt verfügbar	F
	Matrix	Duroplastisch	Epoxidharz	F
		Pulverbasiert	Partikelgröße < 400 µm	F
		Granulatbasiert	< 1 mm; Pulver zum Nachstreuen (Wunsch)	F
		Nachhaltigkeit	Biobasierter Anteil > 30 %	F
		Mechanische Eigenschaften	Zugfestigkeit E-Modul Bruchdehnung (genaue Werte unterliegen Geheimhaltung)	F
		Kosten	< 15 €/kg	F
	Prepreg	Faservolumengehalt	Oberfläche > 30 % +- 5 % Mechanik > 40 % +- 5 %	F

		Materialdicke	abhängig von Imprägniergrad (vollständig, semiimprägniert, bemustert, Kombination aus vorherigen Punkten)	F
		Mechanische Eigenschaften	Zugfestigkeit > UD-Flachs/EP 300 g/m² FVG 51%	F
			E-Modul	
	Kern	Nachhaltigkeit	PET aus recycelten Einwegflaschen, Kork, Balsaholz, Papierwaabe	F
		Mechanische Eigenschaften	rPET Rs/ρ=0,015, K/ρ=0,07 Kork Rs/ρ=0,0025, K/ρ=0,03 Balsaholz Rs/ρ=0,06, K/ρ=17 Papierwabe Rs/ρ=0,1	F
Verarbeitung	Fasern / Textil	Kompatibel mit Aufheizmethode	Elektrisch leitfähig für induktive oder kapazitive Aufheizmethoden	W
		Ausreichende Permeabilität	in Abhängigkeit von der Harzviskosität und auferlegtem Druck	F
		Drapierbarkeit	minimale Radien: Deckübergang/Bootsrumpf: 10 mm Foil: 5 mm	F
		Gesundheit	Keine Gesundheitsgefährdung bei der Verarbeitung	F
	Matrix	Anschmelztemperatur zur Anbindung an das Textil	> 100 °C, zur Wasserausdampfung	W
		Aushärtetemperatur	< 200 °C	F
		Topfzeit	Je nach Temperatur	F
		Gelierzeit	Je nach Temperatur	F
		Aushärtezeit	Je nach Temperatur	F
		Viskosität	siehe PE6405 BRA999 (Standardharz von Swiss CMT)	F
		Gesundheit	Keine Gesundheitsgefährdung bei der Verarbeitung, nicht deklarationspflichtig	F
		Reaktionsexothermie	< 250 J/g	F
	Prepreg	Lager-/ Transportfähigkeit	> 24 Monate bei 20 °C; ungekühlter Transport möglich	W
		Drapierbarkeit	minimale Radien: Deckübergang/Bootsrumpf: 10 mm Foil: 5 mm	F
	Kern	Temperaturbeständigkeit	T_g > 70 °C	F

		Schmelztemperatur	> 200 °C	F
	Aufheizmethode	Energie/ Nachhaltigkeit	< Kitesurfbrett < Bootsrumpf	F
		Heizrate	> 1 K/min	F
	Abfallminimierung	Minimieren des Einwegmaterials	10 % Reduktion	F
	Werkzeug	Geometrie	Schalenwerkzeug, Länge: 1,5 m Breite: 0,4 m	F
		Material	Aluminium, Beton, Keramik, hitzebeständiger Werkstoff	
		Temperaturbeständigkeit	bis 200 °C	F
Bauteil	Sandwich / Laminat	Mechanische Eigenschaften	Zugfestigkeit > UD-Flachs/EP 300 g/m² Biax Köper FVG 51% für alle Werte	F
			Druckfestigkeit >Sandwich: Biax 363gsm/ Köper 300gsm/ Kern/ sym: Laminat UD Köper Biax	F
			Zug E-Modul > NF-Laminate	F
			Schubfestigkeit > Sandwich: Biax 363gsm/ Köper 300gsm/ Kern/ sym: 0,903 MPa	F
			ILSS > NF-Laminate	W
		Medienbeständigkeit	GB-Lack (UV-Beständigkeit, Salzwasserbeständigkeit, -auslagerung) mit Pulverharz kompatibel	W
		Temperaturbeständigkeit	> 105 °C	W
	Geometrie Kiteboard	Materialdicke	Boot, Kitesurfbrett: 3 bis 20 mm Platten: 30 bis 60 mm	F

		Lagenaufbau	Volumenboard in rCFK (95% der virgin Materialeigenschaften): 200gms Biax, 200gms UD, 30-50 Kern, 200gms UD, 200gms Biax Twintip in rCFK (95% der virgin Materialeigenschaften) 2x 250gms UD, Kern, 2x 250gms UD	W
		Kosten	Board: 400 bis 900 € Foil: 900 bis 1500 €	F
		Oberflächenqualität	Porenfrei, hochglanz (vgl. PU-Lack UV-filternder (Sichtoptik), Gelcoat), partiell rutschsicher (z.B. durch Abreissgewebe erzeugt)	F
		Länge	1,5 m	F
		Breite	0,4 m	F
		Dicke	29 mm	F
		Flügel	Breite 0,4 m Dicke: 10 mm Länge: 800 mm	F
		Minimaler Radius	Deckübergang: 10 mm Foil: 5 mm	F
	Reparierbarkeit	Reparierbarkeit	mit gängigen Repairkits reparierbar	W
	Kontakt-korrosion		durch geeignete Maßnahmen und Arbeitsanweisungen vermeiden (z.B. CFK zu Metall)	F
Lebenszyklusende	Bauteil	Nachhaltigkeit	recycelbaren Anteil maximieren	F
			Produktionsabfälle in Wertschöpfungskette integrieren	F

Mit dem Erstellen der Anforderungsliste wurde das AP 2 erfolgreich abgeschlossen und der Meilenstein 1 „M1: Anforderungsliste definiert“ erreicht. Aufgrund von Betriebsgeheimnissen der Greenboats GmbH und der Swiss CMT AG, wurden Zahlenwerte zu Kosten und Materialeigenschaften aus der Anforderungsliste entfernt. Die Werte sind ggf. in den Berichten der jeweiligen Projektpartner einsehbar.

1.2. AP 3 - Entwicklung eines biobasierten Epoxidharz-Pulverprepregs

Ein herausragender Vorteil der SRPs stellt ihre Lagerbarkeit bei Raumtemperatur dar und somit der Wegfall von tiefgekühlten Transporten und Lagerungen. Hierdurch weisen sie das Potential einer Nachhaltigkeitssteigerung im Vergleich zu flüssigen Prepregs auf. Eine Herausforderung der SRP liegt jedoch in deren limitierter Drapierbarkeit bei Raumtemperatur, wodurch ein manuelles Bestücken der Werkzeuge, wie es im Bootsbau üblich ist, erschwert wird. Ein weiterer Risikofaktor bei der Verwendung der SRP in vakuumbasierten Verarbeitungsverfahren stellen, analog zu flüssigen Prepregs, Lufteinschlüsse zwischen den Prepreg-Lagen dar. Diese Lufteinschlüsse führen zu Poren innerhalb der Bauteile, wodurch deren mechanische Eigenschaften signifikant reduziert werden. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sollen die Textilien nicht mehr vollflächig, sondern in einer ausgeklügelten Musterform imprägniert werden. Durch diese Musterimprägnierung entstehen trockene Textilbereiche, durch welche zum einen die Evakuierbarkeit erhöht wird und zum anderen eine Drapierbarkeit (Biegung und Scherung) der SRPs bei Raumtemperatur ermöglicht wird (siehe Abbildung 2).

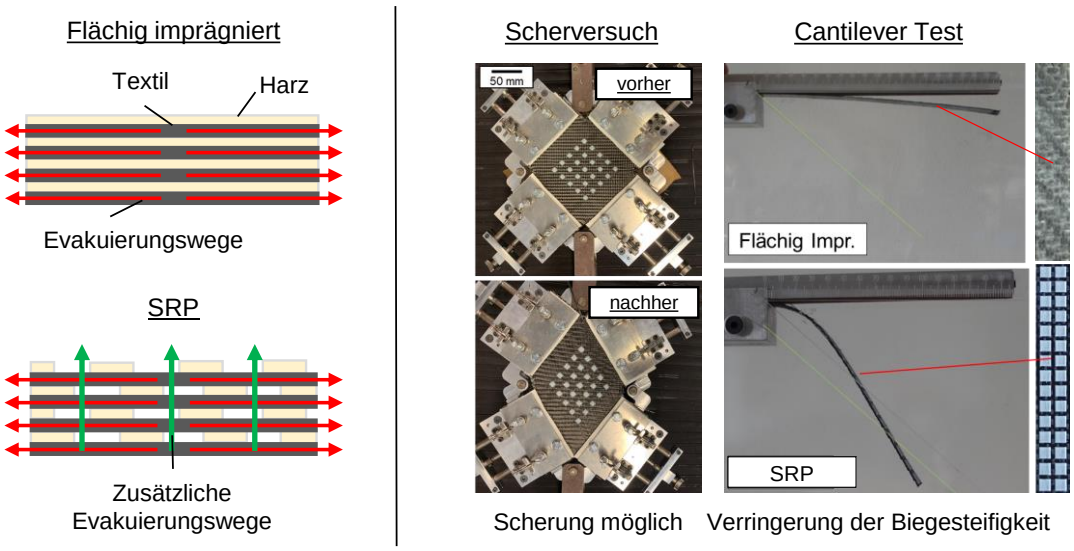

Abbildung 2: Verbesserte Evakuierbarkeit der SRP durch zusätzliche Evakuierungswege in Dickenrichtung (links); Ermöglichen einer Drapierbarkeit bei Raumtemperatur durch trockene Textilbereiche (rechts)

Um das Potential der Musterimprägnierung heben zu können, musste zunächst eine Technologie zur robusten Herstellung der SRP entwickelt werden. Diese Technologieentwicklung wird im folgenden Kapitel genauer beschrieben.

1.2.1. Technologieentwicklung zur Herstellung bemusterter Pulverprepregs / Feststoffharzprepregs

Für die Technologieentwicklung zur Herstellung bemusterter SRPs wurde zunächst folgende Anforderungsliste erstellt:

Tabelle 2: Anforderungsliste an die Herstellung der SRP

Kategorie	Anforderung qualitativ	Anforderung detailliert / quantitativ	F / W
Flächengewicht	Hohe Reproduzierbarkeit	± 5 %	F
Fasermassengehalt	Hohe Reproduzierbarkeit	± 3 p.p.	F
Musterelementgeometrie	Niedrige Toleranz	± 1 mm	F
Zeit zur Herstellung einer Lage	Niedrige Prozesszeit	< 20 min	W
Minimal realisierbare Kantenlänge	Niedrige Kantenlängen	< 10 mm	F
Flexibilität im Musterdesign	Hohe Flexibilität	-	W
Kosten zur Umsetzung	Minimierung der Kosten	< 500 €	W
Zeit bis zur Umsetzung	Minimierung der Zeit	< 9 Monate	F

Im Anschluss erfolgte eine Literaturrecherche zur Evaluierung geeigneter Technologien für die Applikation von Feststoffharzen auf textilbasierte Substrate. Die ausgewählten Technologien sowie deren Beschreibung und Evaluierung deren Vor- und Nachteile sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Evaluierung geeigneter Technologien zur Herstellung bemusterter SRPs

Technologie	Beschreibung der Technologie	Vor- und Nachteile
Pulversprühen	Das Beschichten von Substraten durch Versprühen von kunststoffbasierten Pulvern ist ein etabliertes Verfahren und wird bspw. in der Lackiertechnik verwendet. Hierbei wird ein Pulver-Luftgemisch mittels Sprühpistolen elektrostatisch aufgeladen und auf ein geerdetes Substrat aufgebracht. In einem nachfolgenden Schritt wird das Pulver durch Temperatureinwirkung geschmolzen und bei Bedarf ausgehärtet.	+ Etablierte Technologie - Investitionskosten - Genauigkeit der Muster - Genauigkeit der Applikationsmenge
FDM-3D-Druck	Beim FDM-3D-Druck wird strangförmiges Material durch eine beheizte Düse gedrückt. Währenddessen wird das Material aufgeschmolzen und mittels Portalsystem zielgenau auf das Substrat aufgetragen. Durch die kühlere Raumtemperatur erstarrt das gedruckte Material.	+ Etablierte Technologie + Designfreiheit bei Mustererstellung - Sprödigkeit des SR führt zu Zerbröckeln des Strangs während der Förderung - Gefahr einer Aushärtung des SR in der Förderzone

Pellet-3D-Druck	Beim Pellet-3D-Druck wird pellet- oder granulatförmiges Material mittels Extruderschnecke, ähnlich dem Spritzguss, durch eine beheizte Düse gedrückt und aufgeschmolzen. Das aufgeschmolzene Material wird äquivalent zum FDM-3D-Druck mittels Portalsystem aufgetragen und erstarrt infolge der einwirkenden Raumtemperatur.	+ Sprödigkeit stellt kein Problem dar + Designfreiheit bei Mustererstellung - Technologie nicht etabliert für reaktive Systeme - Gefahr einer Aushärtung des SR in der Förderzone - Pulverförmiges Material schlecht verarbeitbar
3D-Druck mit Spritzenpumpen	Das Material wird beim 3D-Druck mit Spritzenpumpen in einer beheizten Spritzenpumpe gespeichert. Das hierin vollständig aufgeschmolzene Material verweilt in der Spritzenpumpe und wird durch eine beheizte Düse auf das Substrat aufgetragen. Äquivalent zu den bereits vorgestellten 3D-Druck-Verfahren erfolgt die Applikation des Materials mit Hilfe eines Portalsystems mit anschließender Erstarrung.	+ Sprödigkeit stellt kein Problem dar + Designfreiheit bei Mustererstellung - Technologie nicht etabliert für reaktive Systeme - Gefahr einer Aushärtung des SR in der Förderzone - Viskositätserhöhung des SR durch lange Verweildauer im aufgeschmolzenen Zustand - Nur batchweise Verarbeitung
Selektives Lasersintern	Beim selektiven Lasersintern wird eine Schicht pulverförmigen Materials auf ein Substrat gerakelt. Im Anschluss wird die Pulverschicht durch einen Laserstrahl in gewünschter Form erwärmt und gesintert. Dieser Prozess wird iterativ wiederholt, bis die gewünschte Materialdicke erreicht ist. Abschließend wird das nicht gesinterte Pulvermaterial entfernt.	+ Sprödigkeit stellt kein Problem dar + Designfreiheit bei Mustererstellung - Technologie nicht etabliert für reaktive Systeme - Hohe Investitionskosten - Mehrere getrennte Arbeitsschritte notwendig, da Lasersintern nicht direkt auf Textil stattfinden kann, ohne dass Pulverrückstände im Textil verbleiben
Siebdruck	Beim Siebdruck wird eine vorher gefertigte Maske auf das Substrat gelegt und mit Hilfe eines Rakels die ausgeschnittenen Bereiche der Maske mit einem pulverförmigen Material gefüllt. Durch einen Wärmeeintrag erfolgt das Sintern und Schmelzen des Materials. Im Anschluss wird die Maske entfernt und das erstarrte Material verbleibt als Negativ der verwendeten Maske auf dem Substrat.	+ Niedrige Investitionskosten + Etablierte und einfache Technologie + Gute Skalierungsmöglichkeiten + Hohe Genauigkeit - Geringere Flexibilität als 3D-Druck-Verfahren - Hohe Investitionskosten für Automatisierung des Prozesses

Aufgrund der niedrigen Investitionskosten sowie der Möglichkeit einer schnellen Umsetzung in Verbindung mit der hohen Genauigkeit wurde sich für die Umsetzung des Siebdruckverfahrens entschieden. Bei dem neu entwickelten Prozess werden die Muster durch Auflegen

von Masken auf die Gewebelagen und anschließendem Aufbringen des Pulverharzes erzeugt. Zur Herstellung der Musterprepregs wird als Maske ein lasergeschnittenes Lochblech verwendet. Das Epoxidpulver wird mit Hilfe eines Rakels über das Lochblech gezogen und füllt dessen freie Stellen. Durch einen ausreichenden Wärmeeintrag wird das Pulver in der gewünschten Musterform, die dem Negativ der Maske entspricht, auf die Gewebelage aufgeschmolzen und das SRP hergestellt. Als Wärmequelle wird eine Heizplatte verwendet, auf die sowohl die Textillage als auch das Lochblech gelegt werden. Ein Wärmeeintrag von Textillage in Richtung Pulver erwies sich hierbei am geeignetsten, da hier das Sintern bzw. Schmelzen des Pulvers direkt auf der Textillage beginnt. Bei einem Wärmeeintrag von Pulver Richtung Textillage, kam es zum einen zu Problemen beim Aufrakeln, da das Pulver verklumpte. Zum anderen bildeten sich Hinterschnitte an der Lochblechoberfläche, welche zu einem Abreißen des Musters von der Textillage führten. Der entwickelte Herstellprozess ist in Abbildung 3 dargestellt. Die während dem Prozess auf das Textil aufgebrachte Pulverharzmenge hängt von der Schüttdichte des Pulvers sowie dem Bedeckungsgrad (von Muster bedeckter Textiloberfläche, BG) und der Dicke des Lochbleches ab.

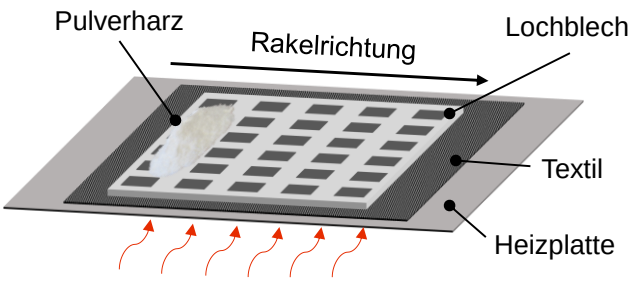

Abbildung 3: Schematische Darstellung des entwickelten Siebdruckprozesses zur Herstellung bemusterter SRPs

Als geeignete Prozessparameter erwies sich zum Aufrakeln eine Temperatur zwischen 50-60 °C, abhängig von der Umgebungstemperatur. Nach dem Aufrakeln und ersten Sintern des Pulvers wird das Lochblech von der Textillage abgehoben und die Temperatur der Heizplatte auf 70 °C erhöht, wodurch das Pulver komplett aufgeschmolzen und mit der Textillage verbunden wird. In Abbildung 4 ist ein auf diese Weise hergestelltes SRP mit einem quadratischen Muster dargestellt. Die Kantenlänge der Quadrate beträgt ca. 10 mm, der BG beträgt ca. 75 %.

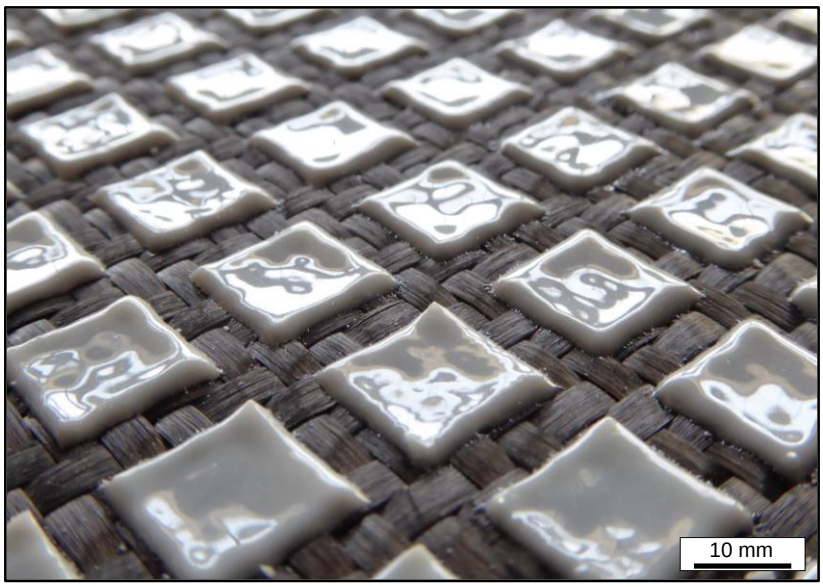

Abbildung 4: Hergestelltes SRP mit quadratischem Muster

Zur Bewertung der Herstellungsmethode folgte eine Analyse der hergestellten SRPs sowie ein Abgleich mit der erstellten Anforderungsliste. Die Methoden und Ergebnisse der Analyse sind im folgenden Kapitel dargestellt.

1.2.2. Analyse der hergestellten Feststoffharzprepregs

Die hergestellten SRPs wurden in Anlehnung an die erstellten Anforderungslisten anhand von vier Parametern analysiert: dem Flächengewicht, dem Fasermassengehalt, der Musterelementgeometrie und des BGs. In diesem Kapitel wird zunächst auf die verwendeten Materialien und Methoden eingegangen und anschließend die Ergebnisse der Analysen dargestellt.

<u>Materialien und Methoden</u>

<u>Materialien</u>

Als Matrixmaterial wurde das PE6405 Epoxidharzpulver von Swiss CMT verwendet das eine Glasübergangstemperatur im nicht ausgehärteten Zustand von 46 °C und eine minimale Viskosität von 1 Pa*s bei etwa 155 °C besitzt. Bei den verwendeten Kohlenstofffasergeweben handelt es sich um das KDK 8045 der Firma Sigratex. Das Gewebe weist eine Köper 2/2 Bindung sowie ein Flächengewicht von 400 g/m² auf. Die verwendeten 6k Rovings haben 400 tex und eine Dichte von 1,77 g/cm³. Der Zielwert für den Fasermassegehalt betrug 55 %, wodurch sich das Zielflächengewicht der SRPs von 727,27 g/m² ergibt. Für die Analysen wurden SRPs mit quadratischen und rechteckigen Mustern mit einem BG von jeweils 60 und 75 % hergestellt (siehe Abbildung 5). Für eine bessere Übersichtlichkeit werden die

Bezeichnungen der SRPs mittels eines Buchstabens und einer nachfolgenden Zahl abgekürzt; der vorgestellte Buchstabe bezieht sich auf die Musterelementgeometrie (Q für Quadrate; R für Rechtecke), die nachfolgende Zahl beschreibt den BG in Prozent.

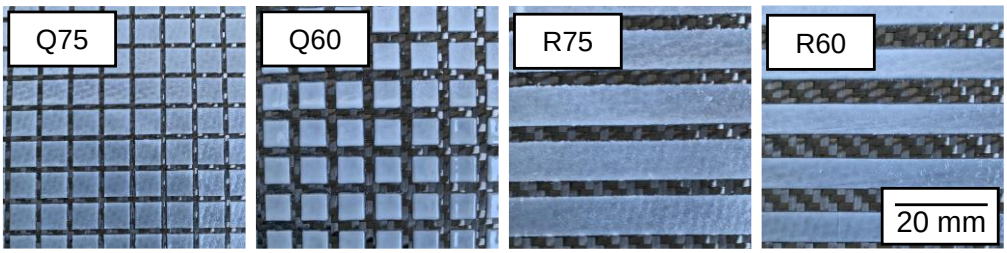

Abbildung 5: Für die Analyse hergestellte SRP-Typen

In Tabelle 4 sind die Maße der Musterelemente, die Elementanordnung sowie die verwendete Abkürzung angegeben. Alle SRPs hatten einen Zielfasermassengehalt von 55 %.

Tabelle 4: Beschreibung der SRP-Typen

Musterelementgeometrie	BG	Elementanordnung	Abkürzung
Quadrate, 10x10x0.4 mm³	75 %	Äquidistant, quadratisch gepackt	Q75
Quadrate, 8x8x0.5 mm³	60 %	Äquidistant, quadratisch gepackt	Q60
Rechtecke, 200x10x0.4 mm³	75 %	Äquidistant, parallel zueinander und zur Schussfadenrichtung	R75
Rechtecke, 200x8x0.5 mm³	60 %	Äquidistant, parallel zueinander und zur Schussfadenrichtung	R60

Analysemethoden

Im Folgenden wird näher auf die verwendeten Analysemethoden sowie den Umfang ebendieser eingegangen.

Musterelementgeometrie

Die Länge, Breite und Höhe der Musterelemente wurde durch 3D-Scannen sowie Schliffbildanalyse mit Hilfe eines Zeiss Smartzoom 5 Digitalmikroskops ermittelt. Hierfür wurden je hergestellter Musterelementgeometrie jeweils drei Musterelemente aus den vier Eckbereichen und drei aus der Mitte eines SRPs vermessen und der Mittelwert gebildet.

Bedeckungsgrad

Der BG kann bei hinreichend genau hergestellter Musterelementgeometrie (Toleranz < ± 0,5 mm) anhand der CAD-Dateien der Lochbleche analysiert werden. Hierbei wird die Fläche der ausgeschnittenen Lochblechbereiche ins Verhältnis zu der Zielgröße der SRPs (hier: 250 x 200 mm²) gesetzt.

Flächengewicht

Das Flächengewicht der hergestellten SRPs ist ein wichtiger Kennwert zur Kontrolle der Robustheit des Herstellungsprozesses. Zur Ermittlung wurden SRPs mit einer Größe von 250 x 200 mm² hergestellt und mit einer Sartorius-Waage LP 6200 mit einer Genauigkeit von ± 0,01 g gewogen. Zur Ermittlung des Flächengewichts wurden je SRP-Konfiguration zwölf SRPs jeweils drei Mal gewogen und der Mittelwert gebildet.

Fasermassengehalt

Der Fasermassengehalt der SRPs wurde durch Wiegen des verwendeten Textils vor und nach der SR-Applikation und anschließender Subtraktion dieser Werte ermittelt. Für jede SRP-Konfiguration wurden zwölf SRPs hergestellt und der Fasermassengehalt bestimmt. Die Größe der SRPs betrug jeweils 250 x 200 mm².

Bulk Factor

Der Bulk Factor (BF) ist das Verhältnis zwischen der gemittelten Stackdicke t_{SRP} vor der Aushärtung und der gemittelten Laminatdicke $t_{Laminat}$ und wird nach Formel (1) berechnet:

$$BF = \frac{t_{SRP}}{t_{Laminat}} \qquad (1)$$

Ein hoher BF, wie er typisch für teilimprägnierte Prepregs ist, kann bei einer vakuumbasierten Verarbeitung häufig zu Faserondulationen führen, da es während des Kompaktierens nicht zu einer Verschiebung der Lagen zueinander kommen kann. Zur Ermittlung des BF wurde jeweils die Dicke eines Stacks bestehend aus vier SRP Lagen an den in Abbildung 6 gekennzeichneten Stellen drei Mal gemessen. Nachdem der Stack mittels VBO-Verfahren zu einem Laminat verarbeitet wurde, wurden die Messungen an den gleichen Stellen mittels eines Höhenmessers wiederholt. Pro SRP-Typ wurden drei Laminate untersucht und der BF der verwendeten SRPs berechnet.

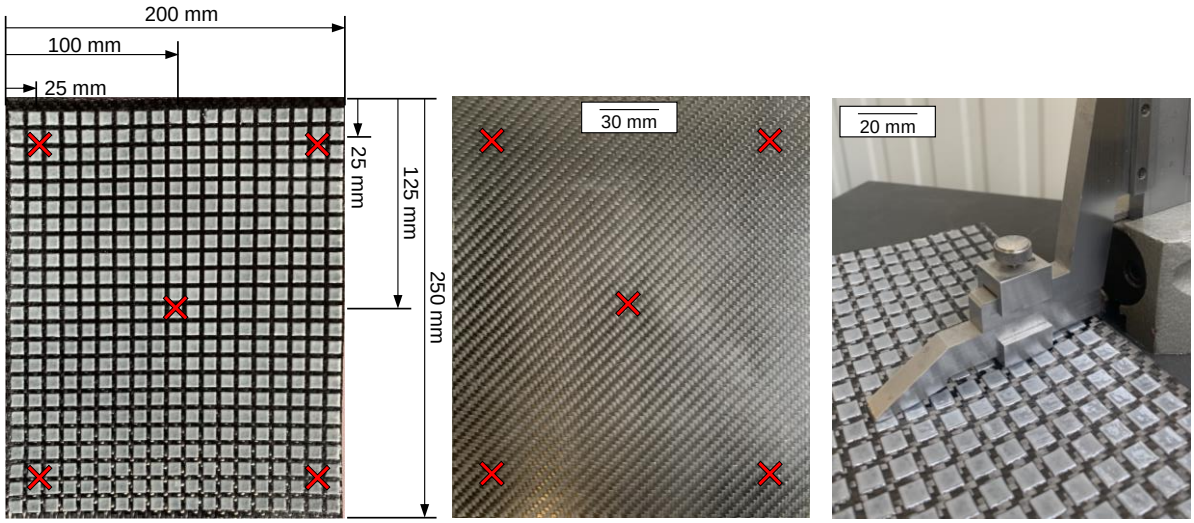

Abbildung 6: Dickenmessung des SRP-Stacks (links) und gefertigter Laminate (Mitte) mit einem Höhenmesser (rechts)

Ergebnisse der Analysen

Analyse der Musterelementgeometrie

In Abbildung 7 ist die Analyse eines Q60 Elements mit einer Zielkantenlänge von 8 mm dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Abrundung der oberen Musterelementkanten und somit eine leichte Abweichung von der perfekten Quaderform. Diese Abrundung entsteht durch Oberflächenspannungs- und Benetzungseffekten die aus dem Aufschmelzen des SR resultieren. Die Abrundungen sind bei SRPs mit niedrigeren BG ausgeprägter, da hier der Einfluss der Effekte signifikanter und der Einfluss der Partikelgrößenverteilung auf die Sinterung größer ist. Dennoch zeigen die Musterelemente eine hohe geometrische Reproduzierbarkeit deren maximale Abweichungen von Länge, Breite und Höhe unter ± 0,2 mm liegen. Somit wurde die Anforderung von einer maximalen Abweichung von ± 1 mm erreicht.

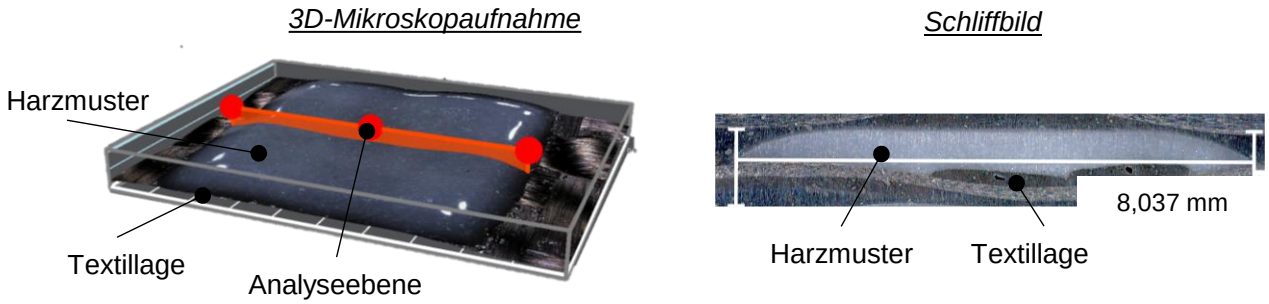

Abbildung 7: 3D-Analyse (links) und Schliffbild (rechts) eines Q60 Musterelements

Analyse des Bedeckungsgrads

Aufgrund der hohen Musterelementgenauigkeit sowie niedrigen Fertigungstoleranzen der Lochbleche (< ± 0,1 mm), erfolgte die Analyse des BGs anhand der CAD-Modelle der Lochbleche. Die Analyse der CAD-Modelle zeigte, dass die Größe und Form der SRP-Lagen infolge der Musterimprägnierung einen Einfluss auf den BG und somit den Fasermassengehalt haben. Betrachtet man beispielhaft ein R60 SRP führt die Wahl der Lagengröße von 250 x 200 mm² dazu, dass eine Rechteckreihe des Musters gerade nicht mehr in den Ausschnittbereich passt. Durch den Wegfall dieser Musterreihe kommt es zu einer Abweichung des BGs der ausgeschnittenen SRP-Lage. Dieser Effekt wird für kleine SRP-Lagen sowie für niedrige BG signifikanter, da hier die abgeschnittene Masse an SR pro Musterelement sowie das Verhältnis zwischen abgeschnittener SR-Masse zur Gesamtmasse des SR auf den Lagen größer ist. Während des Projektes wurden für die Herstellung aller verwendeter SRP-Typen die Lochbleche derart designt, dass nur komplette Musterelemente auf den Lagen erzeugt werden. Dies führte zu einer Veränderung des tatsächlichen BGs der SRPs, woraus eine Anpassung der erwarteten Größen für den Fasermassengehalt, das Flächengewicht sowie der aufzubringenden Pulvermasse resultierte. Die angepassten Werte sind in Tabelle 5 aufgelistet und dienen als neue Zielwerte für die SRP-Herstellung.

Tabelle 5: Tatsächlicher Bedeckungsgrad der SRP-Typen mit den hieraus erwarteten Größen für die Pulverauftragsmenge, den Fasermassengehalt und das Flächengewicht

Mustertyp	Tatsächlicher BG	Erwartete Pulverauftragsmasse	Erwarteter Fasermassengehalt	Erwartetes Flächengewicht
Q75	71,40 %	15,58 g	57,15 %	711,56 g/m²
R75	73,89 %	16,12 g	55,66 %	722,43 g/m²
Q60	55,94 %	15,26 g	58,04 %	705,13 g/m²
R60	53,31 %	14,54 g	60,01 %	690,78 g/m²

Analyse des Fasermassengehalts

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Fasermassengehaltsanalyse nach Mustertyp dargestellt. Die hergestellten SRPs weisen für alle Mustertypen einen reproduzierbar fertigbaren FMG auf, mit einer maximalen Schwankung von 1,07 Prozentpunkten (p.p.) für R60 Muster. Die Abweichungen resultieren aus Toleranzen in der Schüttdichte des Pulvers, der Dicken- und Fertigungstoleranzen der Lochbleche sowie aus den Schwankungen des Textilflächengewichts. Die Abweichungen von den in Tabelle 5 aufgelisteten Zielfasermassengehalten sind für niedrige BG mit 1,62 p.p. für Q60 und mit 1,2 p.p. für R60 leicht höher als für die höheren BGs mit 0,95 p.p. für Q75 und 0,15 p.p. für R75. Ein möglicher Grund hierfür stellt die höhere Anfälligkeit der größeren Musterelemente im Hinblick auf die Toleranz der Pulverschüttdichte dar. Sowohl die Abweichungen zu den Zielfasermassengehalten, als auch die Standardabweichung der ermittelten Fasermassengehalten liegen unter den Anforderungen von ± 3 p.p. aus Tabelle 2, wodurch diese Anforderung erfüllt wird.

Tabelle 6: Analyse des Fasermassengehalts (FMG) der SRP in Abhängigkeit der Mustergeometrie und des Bedeckungsgrads

Mustertyp	**Q75**			**R75**			**Q60**			**R60**		
Lagen	Pulver-masse in g	SRP Masse in g	**FMG**	Pulver-masse in g	SRP Masse in g	**FMG**	Pulver-masse in g	SRP Masse in g	**FMG**	Pulver-masse in g	SRP Masse in g	**FMG**
Lage 1	16,02	35,68	**55,10 %**	15,96	35,81	**55,43 %**	15,10	35,12	**57,00 %**	13,90	33,84	**58,92 %**
Lage 2	15,89	35,45	**55,18 %**	15,96	35,90	**55,54 %**	15,60	35,90	**56,55 %**	13,33	33,36	**60,04 %**
Lage 3	16,08	35,75	**55,02 %**	16,07	37,05	**56,63 %**	15,03	35,42	**57,57 %**	14,55	34,60	**57,95 %**
Lage 4	15,36	35,08	**56,21 %**	16,07	35,94	**55,29 %**	15,97	36,02	**55,66 %**	13,51	32,84	**58,86 %**
Lage 5	15,18	35,32	**57,02 %**	15,89	35,96	**55,81 %**	15,24	34,93	**56,37 %**	13,63	32,30	**57,80 %**
Lage 6	15,53	35,85	**56,68 %**	15,77	36,00	**56,19 %**	15,34	35,29	**56,53 %**	13,03	33,16	**60,71 %**
Lage 7	15,93	36,69	**56,58 %**	15,80	37,16	**57,48 %**	15,52	35,80	**56,65 %**	13,48	33,75	**60,06 %**
Lage 8	16,14	35,88	**55,02 %**	15,90	34,16	**53,45 %**	15,87	35,87	**55,76 %**	13,45	33,40	**59,73 %**
Lage 9	15,73	35,32	**57,02 %**	16,09	36,09	**55,42 %**	14,83	34,31	**56,78 %**	14,46	34,25	**57,78 %**
Lage 10	15,17	35,82	**56,09 %**	16,10	36,23	**55,56 %**	15,16	34,57	**56,15 %**	14,52	34,43	**57,83 %**
Lage 11	15,30	35,51	**57,28 %**	15,77	36,89	**57,25 %**	15,58	35,40	**55,99 %**	14,38	34,32	**58,10 %**
Lage12	15,05	35,76	**57,21 %**	15,99	36,08	**55,68 %**	15,60	35,43	**55,97 %**	14,31	34,00	**57,91 %**
Durchschnitt	15,61	35,68	**56,20 %**	15,95	36,11	**55,81 %**	15,40	35,34	**56,42 %**	13,88	33,69	**58,81 %**
Standardab-weichung	0,39	0,41	**0,90 p.p.**	0,12	0,78	**1,04 p.p.**	0,35	0,54	**0,55 p.p.**	0,54	0,70	**1,07 p.p.**
Variations-koeffizient	2,5 %	1,14 %	**-**	0,8 %	2,15 %	**-**	2,2 %	1,52 %	**-**	3,9 %	2,07 %	**-**

Analyse des Flächengewichts

Das Flächengewicht der SRPs in Abhängigkeit des Mustertyps wurde anhand der in Tabelle 6 gelisteten SRP-Massen berechnet. Die ermittelten Flächengewichte sowie die erwarteten Flächengewichte sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 7: Vergleich des tatsächlichen SRP-Flächengewichts mit dem erwarteten Flächengewicht

Mustertyp	Tatsächliches Flächengewicht	Erwartetes Flächengewicht	Abweichung
Q75	713,60 g/m² ± 1,15 %	711,56 g/m²	0,29 %
R75	722,20 g/m² ± 2,16 %	722,43 g/m²	0,03 %
Q60	706,80 g/m² ± 1,53 %	705,13 g/m²	0,24 %
R60	673,80 g/m² ± 2,07 %	690,78 g/m²	2,49 %

Die Standardabweichung der tatsächlichen Flächengewichte aller Mustertypen liegen im Bereich der Anforderung von maximal ± 5 %. Die erwarteten Flächengewichte der SRP werden für alle Mustertypen außer den R60 SRP mit sehr hoher Genauigkeit erreicht (Abweichungen < 0,3 %). Für die R60 SRP liegt die Abweichung zum erwarteten Flächengewicht bei 2,49 %. Ein möglicher Grund für die vergleichsweise hohe Abweichung kann in dem hohen Volumen der einzelnen R60-Elemente liegen. Wird bei der händischen Applikation des Pulverharzes eines dieser Musterelement nicht hinreichend mit Pulver gefüllt, so ist die resultierende Abweichung größer, als bei Musterelementgeometrien mit niedrigeren Volumen.

Bulk Factor

In Abbildung 8 sind die arithmetischen Mittelwerte der Stackdicke der SRPs, der Laminatdicke sowie des hieraus berechneten BFs der untersuchten SRP-Typen dargestellt.

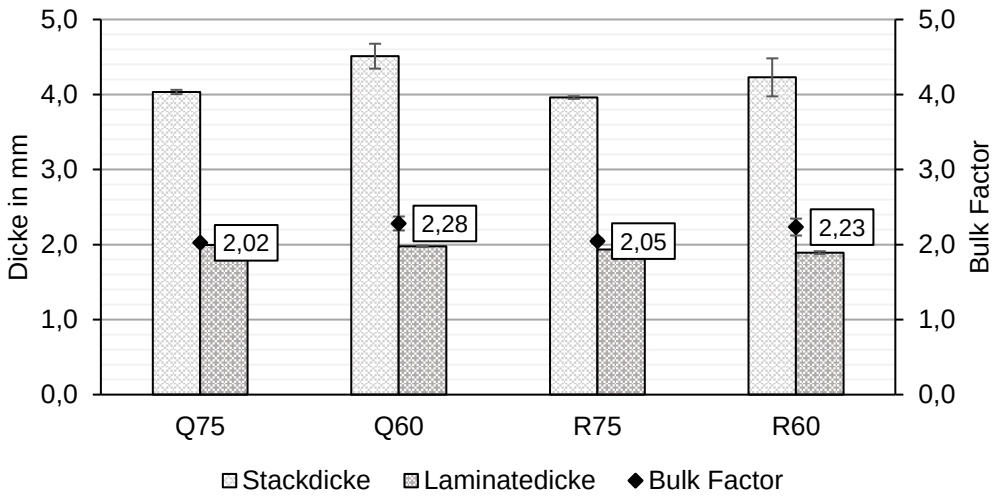

Abbildung 8: Stackdicke der SRPs, Laminatdicke und resultierender Bulk Factor nach SRP-Typ

Die Reproduzierbarkeit der Stack- und Laminatdicke ist sehr hoch, was durch die niedrigen Fehlerbalken erkennbar ist, die die Standardabweichung darstellen. Die Standardabweichung für BG 60 %-SRPs sind höher als für 70 %-SRPs. Dies ist auf die größeren Musterelementdicken zurückzuführen, die anfälliger für Schwankungen in der Pulverschüttdichte sind. Die berechneten BF sind für die 60 %-SRPs wie erwartet höher, da sich aus der größeren Musterelementdicke eine größere Stackdicke bei gleicher Laminatzieldicke, im Vergleich zu 70 %-SRPs, ergibt. Die berechneten BFs liegen im Bereich kommerziell erhältlicher Semipregs mit vollflächiger Imprägnierung (2,0 bis 2,3), jedoch über dem vollständiger imprägnierter OoA-Prepregs (1,0 bis 1,6).

<u>Bewertung der entwickelten Herstellungsmethode</u>

Die abschließende Bewertung der Herstellungsmethode erfolgt anhand der SRP-Analysen sowie eines Vergleichs mit der Anforderungsliste (siehe Tabelle 2). Das Siebdruckverfahren konnte, wie zuvor in Tabelle 3 evaluiert, die Anforderungen im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit, Genauigkeit, Geschwindigkeit und Umsetzung (Kosten und Zeit) erfüllen. Die Nachteile der Herstellungsmethode liegen zum einen wie erwartet in der geringeren Flexibilität im Musterdesign im Vergleich zu additiven Verfahren. Zum anderen erfordert die Verwendung des pulverförmigen SR erhöhte Standards sowohl in der persönlichen Schutzausrüstung (FFP2-Maske, Schutzbrille, Handschuhe), als auch beim Schutz von umliegender Labortechnik (Einhausung des Arbeitsplatzes notwendig). Zusammenfassend lässt sich die Herstellungsmethode für den Labormaßstab als hervorragend (alle Anforderungen erfüllt) bewerten, weshalb sie für die weiterführenden Versuche verwendet wird.

Tabelle 8: Bewertung des Siebdruckverfahrens zur Herstellung von SRP anhand der Anforderungsliste

Kategorie	Anforderung qualitativ	Anforderung detailliert / quantitativ	F / W	Erfüllt?
Flächengewicht	Hohe Reproduzierbarkeit	± 5 %	F	✓
Fasermassengehalt	Hohe Reproduzierbarkeit	± 3 p.p.	F	✓
Musterelement-geometrie	Niedrige Toleranz	± 1 mm	F	✓
Zeit zur Herstellung einer Lage	Niedrige Prozesszeit	< 20 min	W	✓
Minimal realisierbare Kantenlänge	Niedrige Kantenlängen	< 10 mm	F	✓
Flexibilität im Musterdesign	Hohe Flexibilität	-	W	~
Kosten zur Umsetzung	Minimierung der Kosten	< 500 €	W	✓
Zeit bis zur Umsetzung	Minimierung der Zeit	< 9 Monate	F	✓

1.2.3. Einfluss der Prepregparameter auf die Verarbeitungseigenschaften

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Prepregparameter auf die Drapier- und Evakuierungseigenschaften betrachtet.

Drapiereigenschaften

Abbildung 2 zeigt die Möglichkeit einer Drapierung der SRP bei Raumtemperatur durch die Musterimprägnierung. Die Quantifizierung der Drapiereigenschaften der SRP sollte mittels Cantilever-Tests sowie Scherrahmenversuchen (siehe Abbildung 2) erfolgen. Die hierfür verwendeten Materialien und Methoden sowie die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

Materialien und Methoden

Für beide Versuchsreihen wurden die in Kapitel 1.2.2 bereits vorgestellten Materialien verwendet (Sigratex CF-Gewebe und das SR PE6405 von Swiss CMT). Für die Cantilever-Versuche wurden trockene Textilien, vollflächig imprägnierte SRPs sowie Q20, Q60, R20 und R60-SRPs verwendet. Die Versuche wurden in Kett- und Schussfadenrichtung sowie mit den Mustern auf der Ober- und Unterseite der Textilien durchgeführt und fünf Mal wiederholt. Im Scherrahmen wurden trockene Textilien sowie Q20 SRPs untersucht, die Versuche wurden jeweils drei Mal wiederholt.

Cantilever-Tests

Die Cantilever-Tests (Kategorie 1) wurden nach der DIN 53362:2003-10 durchgeführt [1]. Hierfür wurden einlagige Probekörper mit den Maßen 250 x 20 mm² auf einer waagerechten Auflagefläche platziert und mit einem sogenannten Schieber beschwert. Der Schieber wird innerhalb von 10 s gleichmäßig nach vorne bewegt, sodass der mitgeführte Probekörper über die Auflagefläche ragt und dessen Vorderkante in der Endposition einen Winkel von 41° 33‘ erreicht. Anschließend wird die Überhanglänge mit Hilfe der Schieberposition bestimmt. Mit der Überhanglänge $L_Ü$ können nachfolgend die Längengewichtskraft F_L sowie die Biegesteifigkeit B des Probekörpers mit Hilfe der Fallbeschleunigung g, der Probenkörpermasse m und –länge L anhand folgender Formeln berechnet werden:

$$F_L = g * \frac{m}{L} \qquad (2)$$

$$B = F_L * \left(\frac{L_Ü}{2}\right)^3 \qquad (3)$$

Diese Formeln basieren auf der Annahme eines homogenen Probekörpers. Die Sinnhaftigkeit dieser Annahme muss anhand des Versuchsverlaufs kritisch hinterfragt werden.

<u>Scherrahmenversuche</u>

Die Scherrahmenversuche wurden in Anlehnung an die DIN EN ISO 20337:2020-01 durchgeführt [2]. Die Progengeometrie ist in Abbildung 9 dargestellt. Alle Maße sind in Millimeter angegeben, die Bohrungen zur Einspannung der Proben in den Scherrahmen haben einen Durchmesser von 10 mm. Die Prüfgeschwindigkeit betrug immer 100 mm/min. Die Muster wurden zentral auf der Probe aufgebracht (Größe des Imprägnierbereichs: 100 x 100 mm²).

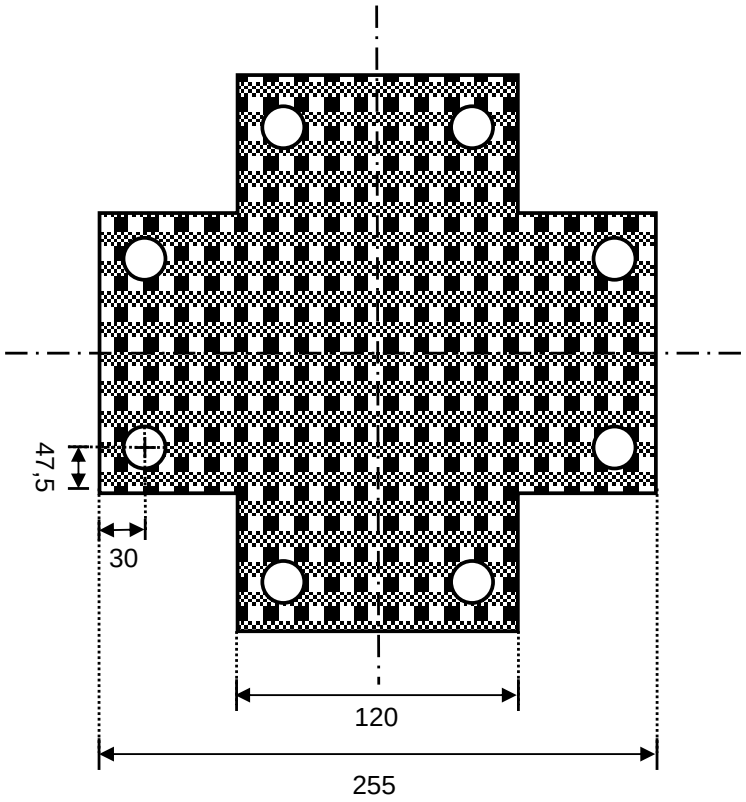

Abbildung 9: Geometrie einer Scherrahmenprobe

Ergebnisse der Untersuchungen

Cantilever-Tests

Eine sinnvolle Ermittlung der Biegesteifigkeit infolge einer Auswertung der Cantilever-Tests erwies sich aufgrund der Musterimprägnierung der SRPs als nicht sinnvoll. Durch die Musterimprägnierung ist das Probengewicht stark von dem Probenzuschnitt abhängig, da hierbei der Zuschnitt so gewählt werden kann, dass die Anzahl der Musterelemente auf den Probenzuschnitten unterschiedlich ist. Analog zur Veränderung des resultierenden BGs der Probe, die bereits in Kapitel 1.2.2 erläutert wird, kommt es zu einer Veränderung der Probenmasse und damit letztendlich zu einer Abweichung der damit berechneten Biegesteifigkeit. Aus diesem Grund erfolgte die Auswertung zunächst ausschließlich über die ermittelte Überhanglänge. Eine kürzere Überhanglänge wäre hierbei ein Indikator für verbesserte Biegeeigenschaften. In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Versuche in einem Balkendiagramm und in Tabelle 9 tabellarisch dargestellt, inklusive der Versuche, die nicht ausgewertet werden konnten. Die Beschriftung der Daten erfolgt im folgenden Schema: zuerst wird die Testrichtung beschrieben (in Kett- oder Schussfadenrichtung) und nachfolgend die Positionierung des SR-Musters auf dem Textil (oben: auf der Oberseite des Textils; unten: auf

der Unterseite des Textils). Zusätzlich zu den Ergebnissen wurde für jede Konfiguration ein Beispielbild aufgenommen (siehe Abbildung 11).

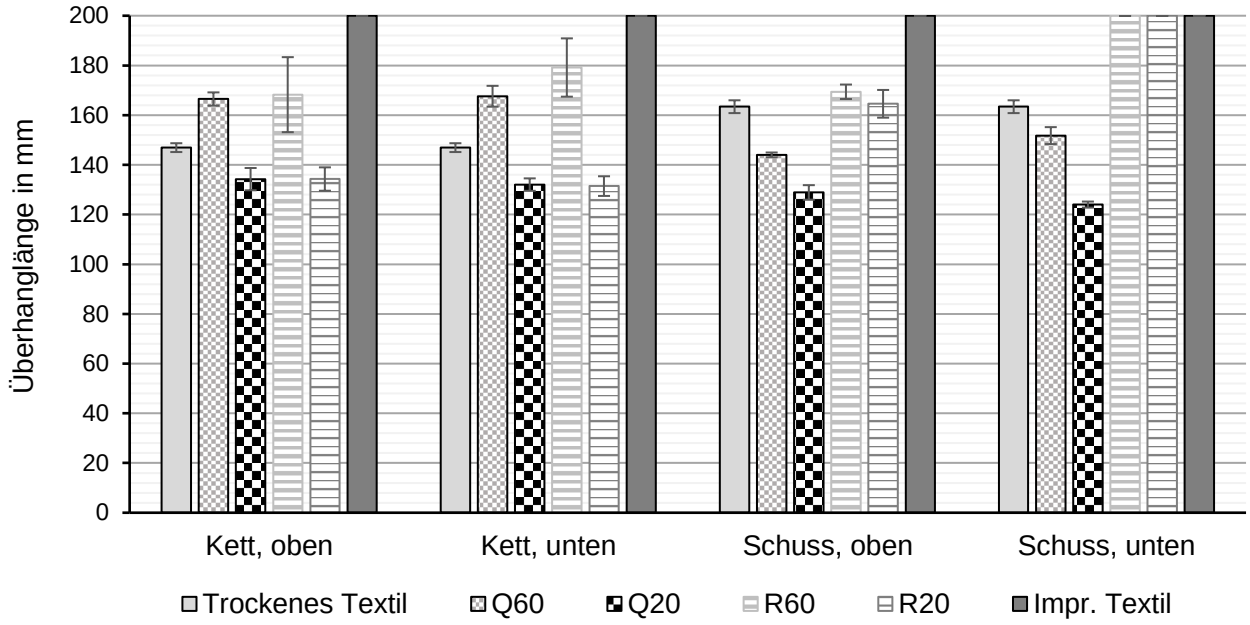

Abbildung 10: Ergebnisse der Cantilever-Versuche

Tabelle 9: Ergebnisse der Cantilever-Versuche

Mustertyp	Testrichtung[1]	Muster-position	Überhanglänge		Bild
			Mittelwert in mm	Variationskoeff. in %	
Trockenes Textil	Kett	n/a	146,92	1,78	A1
	Schuss	n/a	163,40	2,58	A3
Vollflächig imprägniert	Kett	n/a	n/a, Steifigkeit zu hoch		A2
	Schuss	n/a	n/a, Steifigkeit zu hoch		A4
Q60	Kett	Oberseite	166,48	2,67	B1
		Unterseite	167,60	4,19	B2
	Schuss	Oberseite	144,00	0,96	B3
		Unterseite	151,76	3,42	B4
Q20	Kett	Oberseite	134,24	4,48	C1
		Unterseite	132,04	2,51	C2
	Schuss	Oberseite	128,88	2,94	C3
		Unterseite	124,00	1,22	C4
R60	Kett[2]	Oberseite	168,24	15,09	D1
		Unterseite	179,16	11,73	D2
	Schuss[2]	Oberseite	169,39	2,92	D3
		Unterseite	n/a, Steifigkeit zu hoch		D4
R20	Kett[2]	Oberseite	134,28	4,70	E1
		Unterseite	131,44	3,95	E2
	Schuss[2]	Oberseite	164,56	5,58	E3
		Unterseite	n/a, Steifigkeit zu hoch		E4

[1]Die Testrichtung beschreibt die Richtung in welcher der Probekörper bewegt wurde. So wurde bspw. für „Schuss“ der Probekörper entlang der Schussfadenrichtung des Textils bewegt.
[2]Die Lange Kante des Musterelements war immer parallel zur Schussrichtung ausgerichtet

Das trockene Textil weist in Schussrichtung eine höhere Überhanglänge auf als in Kettrichtung, was vermutlich auf die höhere Ondulation der Schussfäden zurückzuführen ist. Weiterhin hat es eine höhere Überhangslänge als SRPs mit einem BG von 20 %, außer bei den Rechteckmustern in Schussfadenrichtung und Muster auf der Textiloberseite mit ähnlichen Überhanglängen (siehe Abbildung 11; A3, D3 und E3). Die vergleichbare Überhanglänge mit der letztgenannten Konfiguration ist jedoch auf das Brechen des Musters während des Versuchs zurückzuführen. Das hierbei entlang der Testrichtung ausgerichtete Rechteckelement versagt infolge der Biegebelastung an der Elementoberseite auf Zug. Bei den R20-SRPs mit Muster auf der Textilunterseite und Testrichtung in Schussfadenrichtung, wird die Zugbelastung auf der SRP-Oberseite von den Fasern getragen, wodurch das Brechen des Elements verhindert wird.

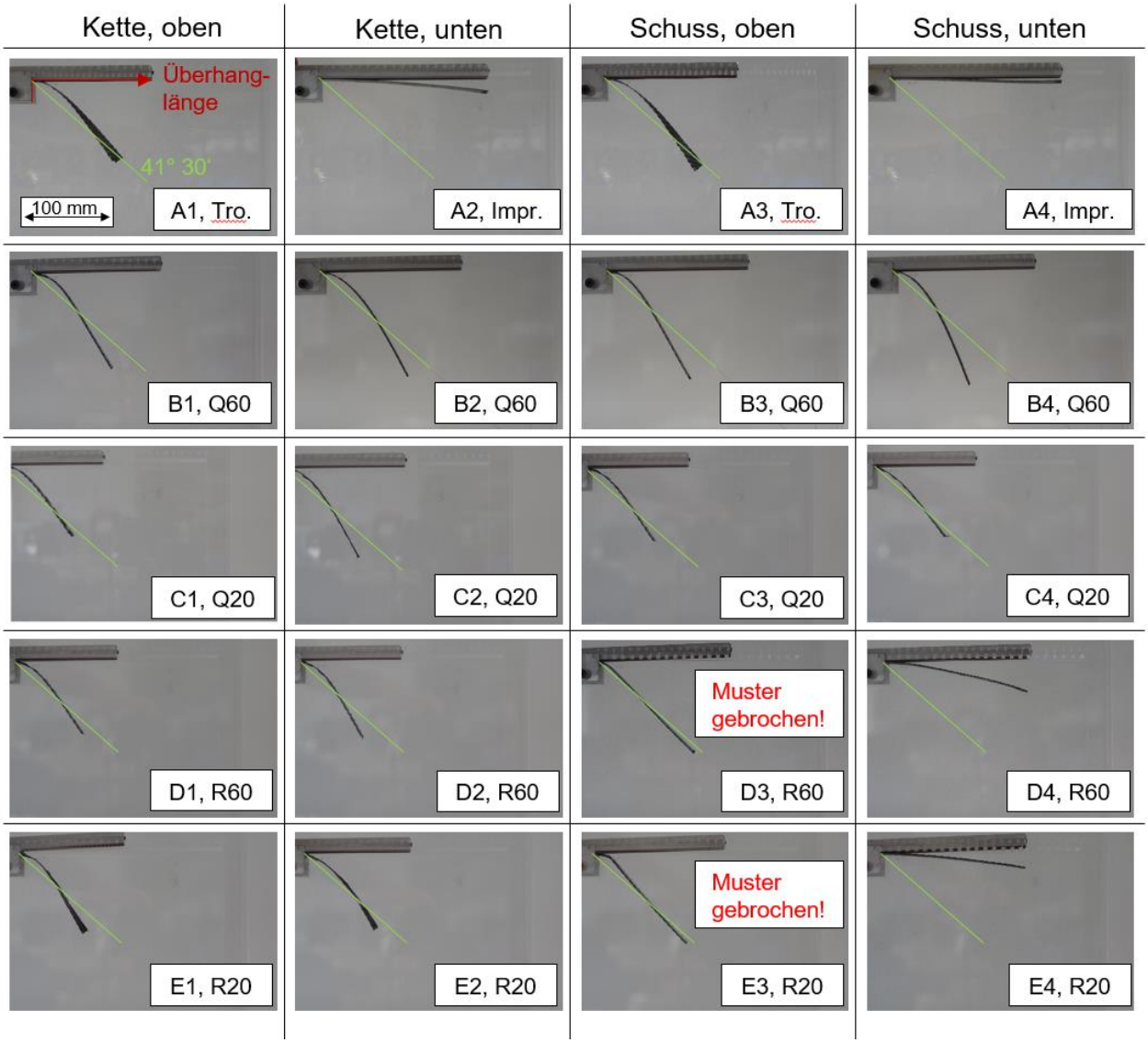

Abbildung 11: Bilder der Cantilever-Versuche für verschiedene Probekörper (der Schieber im oberen Bereich der Bilder zeigt die Überhanglänge an)

Die geringere Überhanglänge der BG 20 %-SRPs ist auf die Inhomogenität durch die Musterimprägnierung zurückzuführen. Die trockenen Textilbereiche zwischen den Musterelementen tragen bei den Versuchen die Masse der Musterelemente, die bereits über die Kante der Ablagefläche geschoben wurden. Durch diese zusätzliche Masse biegen sich die trockenen Textilbereiche stärker durch, als bei dem komplett trockenen Textil. Aus diesem Grund ist auch die Vergleichbarkeit der Überhanglängen beeinflusst. Ein weiteres Problem stellt die genaue Erreichung des Zielwinkels von 41° 33‘ dar. Auch hier ist die Ursache die inhärente Inhomogenität der Musterimprägnierung, infolge derer die trockenen Textilbereiche durch die Masse vorausgeschobener Musterelemente nicht nur stärker, sondern auch ungleichmäßig gebogen werden. Als Resultat werden große Durchbiegewinkel innerhalb

kürzester Zeit durchlaufen, sobald ein Musterelement die Ablagefläche vollständig überschritten hat. Ein exaktes Einstellen des Zielwinkels wird so unmöglich. Eine aussagekräftige Quantifizierung des Biegeverhaltens der bemusterten SRPs kann aus diesen Gründen nicht erfolgen. Dennoch konnte gezeigt werden, dass durch die Musterimprägnierung eine Biegung der SRPs bei Raumtemperatur ermöglicht werden kann. Ebenso kann durch die Musterauswahl eine Anisotropie der SRP-Biegeeigenschaften erzeugt (siehe Abbildung 11, E2 und E4) oder eine durch das Textil vorgerufene Anisotropie ausgeglichen werden.

Scherrahmenversuche

In Abbildung 12 ist ein Q20-SRP vor und nach einem Scherversuch dargestellt. Der Versuch wurde bei Raumtemperatur durchgeführt und zeigt die Ermöglichung einer Scherung der SRPs durch die aufgebrachte Musterimprägnierung.

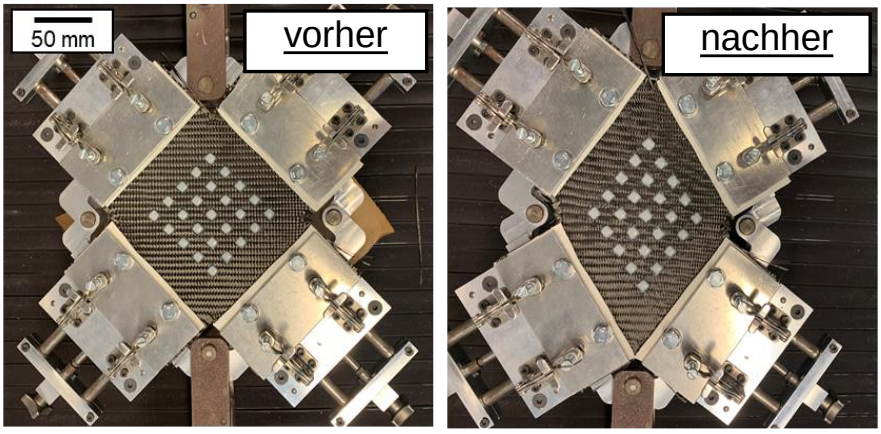

Abbildung 12: Scherversuche einer Q20 Probe; links: vor Start des Versuchs, rechts: nach Ende des Versuchs (maximaler Scherwinkel 13°)

In Abbildung 13 sind die Kraft-Scherwinkel-Kurven eines Q20-SRPs sowie des trockenen Textils abgebildet. Die Proben wurden hierbei über die maschinell maximal mögliche Winkeländerung von 45° getestet. Während bei dem trockenen Textil die Kraft zur Scherung bis zu einem Scherwinkel von ca. 32° nur geringfügig steigt, ist die zur Scherung benötigte Kraft bei der Q20-Probe deutlich höher. Erst nach dem Erreichen des Scherwinkels von ca. 32° steigt die Kraft beim trockenen Textil exponentiell an. Im Vergleich hierzu steigt die Kraft bei dem Q20-SRP nach Start der Prüfung bis zu einem Scherwinkel von ca. 14,1° linear an. Ab diesem Winkel fällt die Kraft zunächst bis zu einem Winkel von ca. 21,4° ab. Anschließend steigt die Kurve exponentiell, ähnlich wie die des trockenen Textils.

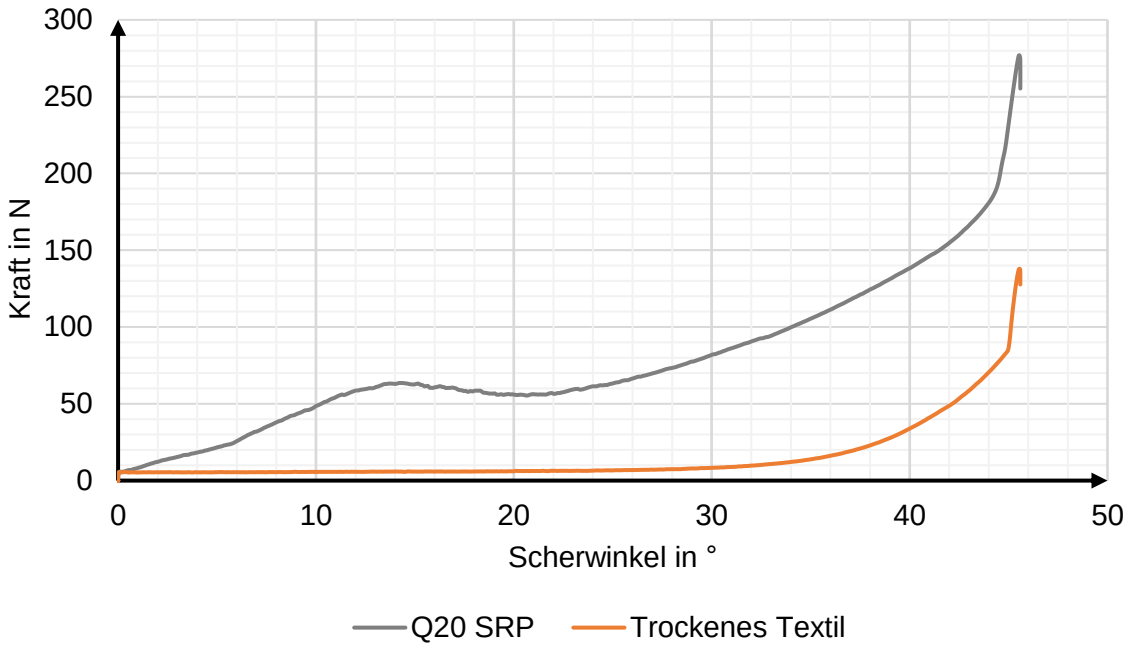

Abbildung 13: Kraft-Scherwinkel-Kurven einer Q20 SRP-Probe und des trockenen Textils

Der Abfall der Kraft bei den Q20 SRP-Proben korreliert mit einem Brechen des Musters. Der Grund für den initialen Kraftanstieg resultiert wahrscheinlich durch die aufgenommenen Scherkräfte der Musterelemente. Ab einem Scherwinkel von ca. 14° brechen die Musterelemente, wodurch es zu einem Abfall der Scherkraft kommt. Verbleibende Teilelemente sowie Stücke gebrochener Musterelemente verbleiben während des restlichen Versuchsablaufs auf bzw. im Textil. Hierdurch kommt es zu einer Erschwerung der Scherung und zu einer höheren benötigten Scherkraft, als bei den trockenen Textilien.

Neben der benötigten Kraft zur Erzeugung einer Scherung ist der sogenannte „locking angle“ ein Bewertungskriterium des Scherverhaltens. Der „locking angle“ beschreibt den Winkel, ab dem die Rovings des Textils infolge der Scherung so stark aneinandergeschoben und in der Ebene gestaucht werden, dass sich das Textil wölbt und Falten wirft. Er ist als Scheitelpunkt der Kraft-Scherwinkel-Kurve definiert und wird durch zwei sich schneidende Tangenten bestimmt, die von den linearen Kurvenanteilen ausgehen. Eine Scherung des Textils über den „locking angle“ hinaus ist aufgrund der mit der Faltenbildung einhergehenden Abnahme der Festigkeit nicht sinnvoll. Die Bestimmung des „locking angles“ ist jedoch für SRP-Proben ungeeignet, da die Musterelemente bereits vor dessen Erreichen versagen. Das Bewertungskriterium für die SRP-Proben sollte deshalb der Scherwinkel sein, bei dem die Musterelemente brechen bzw. sich vom Textil ablösen. Neben einer optischen Auswertung, kann dies ebenfalls über den auftretenden Kraftabfall bestimmt werden. Aufgrund von auftretenden Eigenspannungen während des Einspannens der Probe, sind die ermittelten

quantitativen Werte nicht belastbar. Eine qualitative Tendenz zeigt, dass der Scherwinkel mit steigendem BG abnimmt.

Evakuierungseigenschaften

Zur Bewertung der Evakuierungseigenschaften wurden Strömungssimulationen der SRP-Stacks durchgeführt. Hierfür wird die Software GeoDict verwendet, die die Dickenpermeabilität der Stacks berechnet. Da beim Stapeln der einzelnen Lagen das genaue Überlappen der Muster nicht gewährleistet werden kann, wurde ein Pythonprogramm geschrieben, das die Prepreglagen im Modell randomisiert erstellt und realitätsnah mit einer stetig gleichverteilten Verschiebung stapelt. Hierbei werden zunächst 16 zusammenhängende Einheitszellen des Musters erstellt, welche zur Hälfte ein vorausgewähltes Textil imprägnieren (siehe Abbildung 14).

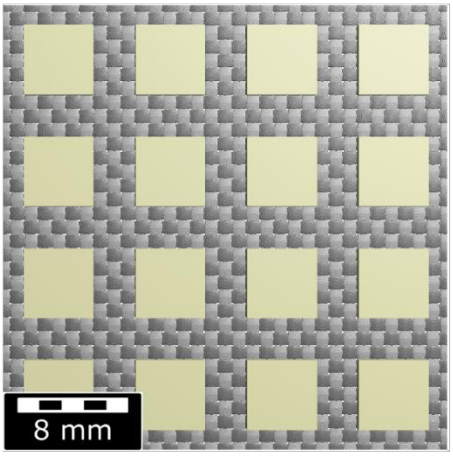

Abbildung 14: 16 Einheitszellen einer Prepreglage mit quadratischem Muster

Diese SRP-Lagen werden anschließend stetig gleichverteilt gestapelt und das Modell in x- und y-Richtung auf die Größe einer Einheitszelle reduziert, um die Berechnungsdauer zu verringern (siehe Abbildung 15). Die maximale Verschiebung in x- und y-Richtung entspricht dabei der Kantenlänge der Einheitszelle. Als Bedingungen an den Modellrändern in x- und y-Richtung wurde die Einstellung „periodisch wiederholen“ gewählt, wodurch ein quasi unendlich großer Prepreg-Stack in der x-y-Ebene berechnet wird.

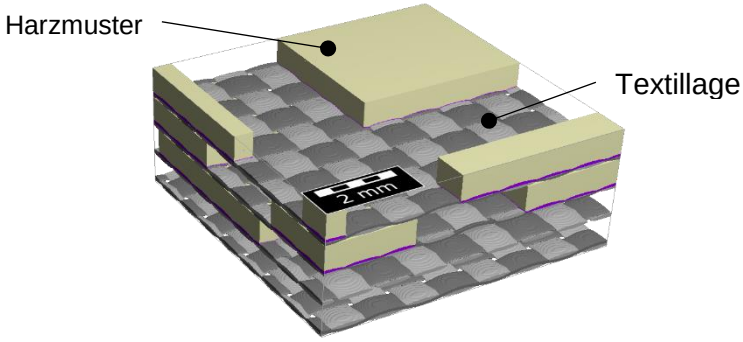

Abbildung 15: Vier lagiger SRP-Stack, dessen erste Lage die Einheitszelle des Musters abbildet

Zur Validierung der erstellten Modelle, wurde ein Schliffbild eines SRP-Stacks angefertigt. Hierzu wurde der Stack in eine Form eingelegt und diese mit Einbettharz getränkt. In Abbildung 16 sind eine Schliffprobe sowie ein erstelltes Simulationsmodell gegenübergestellt. Obwohl die Lagen durch das Einbettharz leicht voneinander getrennt wurden und unterschiedliche Textilien verwendet wurden, bildet das Modell die Realität mit ausreichender Genauigkeit ab.

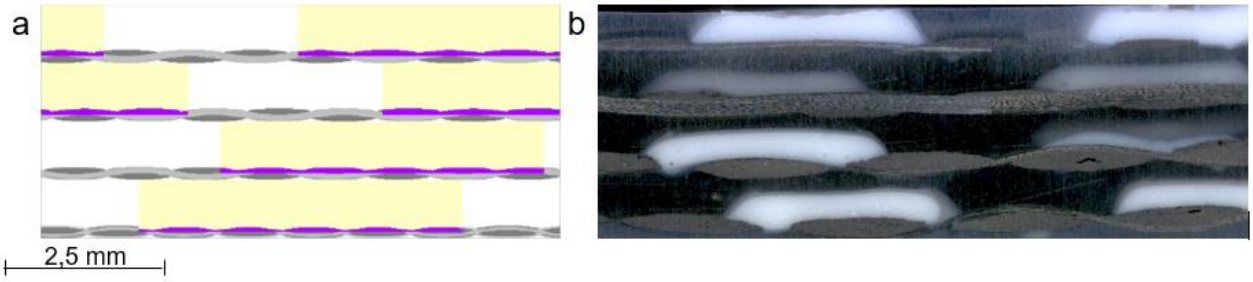

Abbildung 16: Vergleich zwischen a) in GeoDict erstelltem Stack und b) Schliffprobe eines realen Stacks

Weiterhin ist in Abbildung 16 der Einfluss der Stapelgenauigkeit auf die Evakuierungskanäle in Dickenrichtung zu erkennen. Da die Muster in diesem Fall im realen Stack eine höhere Kongruenz aufweisen als im Simulationsmodell, ist hier die Tortuosität der realen Evakuierungskanäle geringer. Mit einer höheren Tortuosität der Evakuierungskanäle ist eine niedrigere Permeabilität und somit auch eine schlechtere Evakuierbarkeit des Stacks zu erwarten. Neben der Tortuosität der Evakuierungskanäle, sind zudem deren Breite und Höhe, die durch die Musterdicke vorgegeben werden, und der BG den die Muster auf dem Textil einnehmen wichtige Einflussgrößen auf die Evakuierbarkeit. Um deren Einfluss zu quantifizieren wurden Strömungssimulationen an Stacks mit jeweils vier Lagen durchgeführt. Die Randbedingungen der Strömungssimulationen sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Randbedingungen der durchgeführten Strömungssimulationen

Parameter	Wert / Kommentar
Musterart	Quadrate, Rechtecke
Mustergröße	1 bis 7 mm
Stapelfolge	[0/0] und [0/90]
Lagenanzahl	4 (randomisiert gestapelt)
Textilart	Leinwandgewebe
Permeabilität der Rovings	2,5e-13 m² (isotrop)
Solver	LIR-Brinkman
Druckdifferenz	50 Pa

Für jede Parameterkombination wurden jeweils zehn randomisiert gestapelte Stacks erstellt, um den Einfluss der in der Realität auftretenden Stapelungenauigkeiten zu erfassen.

In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Simulationen für quadratische Muster mit unterschiedlichen Kantenlängen bei konstanter Musterdicke von 0,8 mm und einem konstanten BG von 39,06 % dargestellt. Die Dickenpermeabilität ist hierbei normiert abgebildet. Die Kantenlänge des Musters scheint keinen signifikanten Einfluss auf die Dickenpermeabilität zu nehmen. Zwar erhöht sich mit zunehmender Kantenlänge der Weg, den die Luft zurücklegen muss, um ein Quadrat zu umströmen, jedoch sind auch die Bereiche, in denen kein Quadrat die Evakuierungswege bedeckt, größer. Insgesamt scheinen sich die beiden Effekte auszugleichen und lediglich der BG Einfluss auf die Dickenpermeabilität zu nehmen. Der Einfluss des BGs auf ein quadratisches Muster bei konstanter Musterdicke und konstanter Kantenlänge ist in Abbildung 18 abgebildet. Durch die konstante Musterdicke und die konstante Kantenlänge des Musters verringert sich mit steigendem BG der FMG. Ebenso verringert sich die Dickenpermeabilität des Stacks mit steigendem BG. Hierbei herrscht zwischen Dickenpermeabilität und BG ein linearer Zusammenhang. Die Abnahme in der Dickenpermeabilität ist auf die erhöhte Tortuosität der Evakuierungskanäle zurückzuführen. Die Tortuositätserhöhung resultiert dabei aus der erhöhten Anzahl an Evakuierungskanälen, bei denen die Luft ein Quadrat umströmen muss. Aufgrund der Umströmungen der Quadrate sind die Evakuierungskanäle im Durchschnitt länger und somit die Tortuosität höher, als bei einem geringeren BG. `

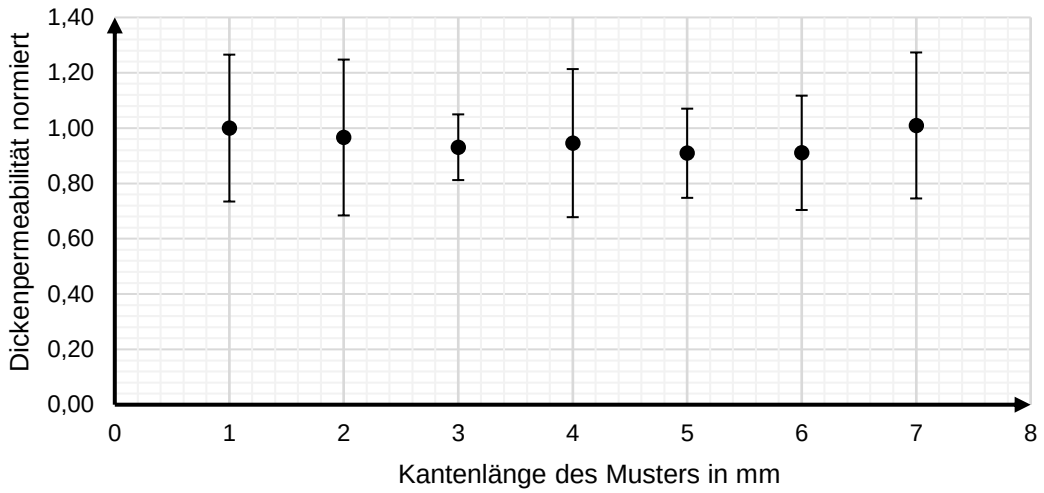

Abbildung 17: Einfluss der der Kantenlänge eines quadratischen Musters auf die Dickenpermeabilität bei einem Bedeckungsgrad von 39,06 %

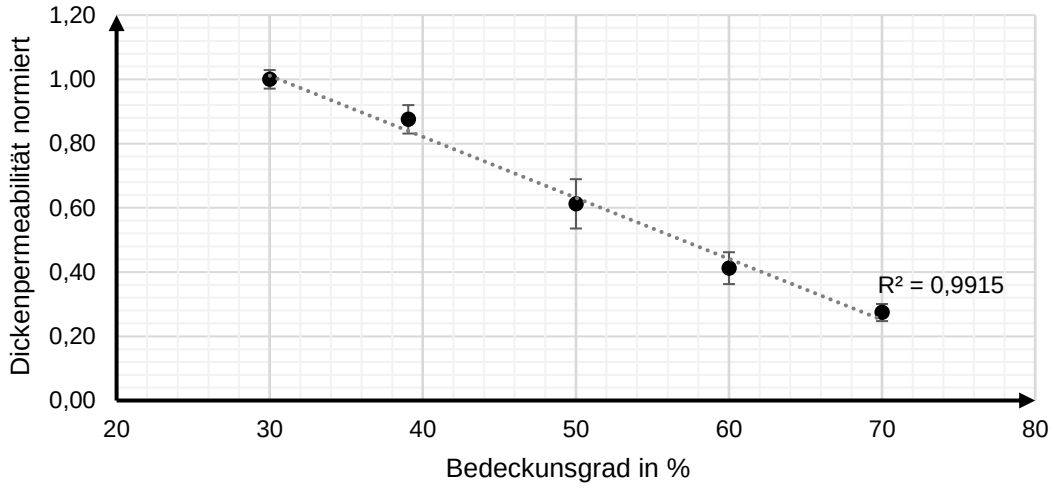

Abbildung 18: Einfluss des Bedeckungsgrades bei konstanter Musterdicke und konstanter Kantenlänge

Um den Einfluss des BGs auf die Dickenpermeabilität eines Prepregs mit festgelegtem FMG zu ermitteln, muss die Musterdicke ebenfalls angepasst werden. Die Musterdicke muss hierbei bei einer Verdoppelung des BGs halbiert werden, um die gleiche Matrixmasse auf das Textil aufzubringen und somit den FMG konstant zu halten.

In Abbildung 19 werden die Einflüsse des BGs auf die Dickenpermeabilität bei konstantem und variierendem FMG betrachtet. Hierbei sei erwähnt, dass bei konstantem FMG die Musterdicke variiert, während bei variierendem FMG die Musterdicke konstant 0,8 mm beträgt. Als Referenzwert gilt der BG von 39,06 %, bei dem die Musterdicke beider Kurven 0,8 mm beträgt.

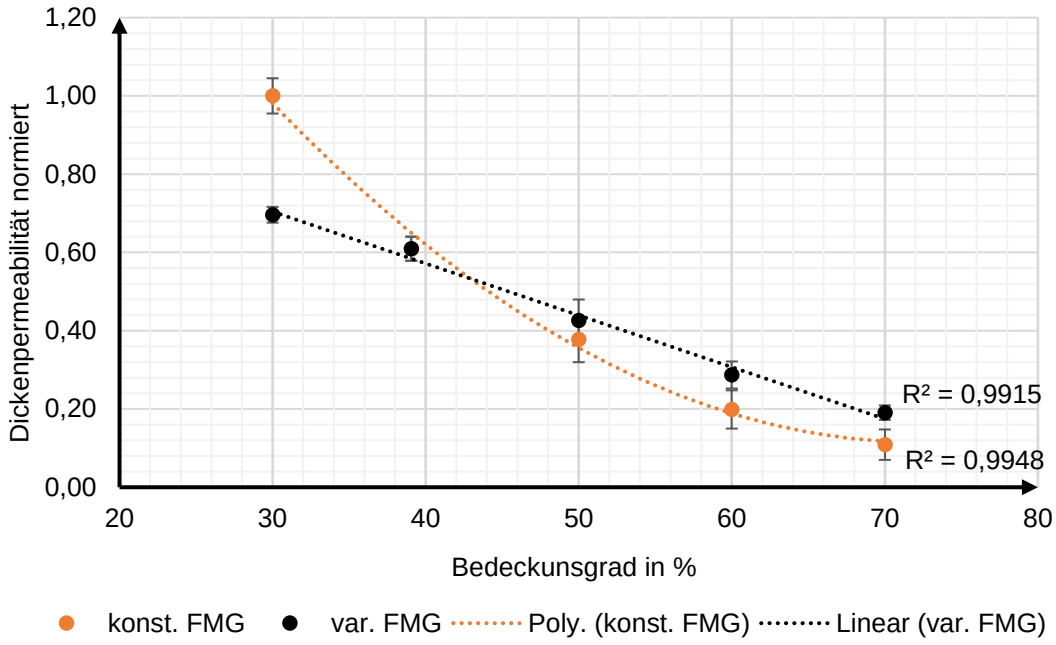

Abbildung 19: Vergleich des Einfluss des Bedeckungsgrads bei konst. FMG und variierendem FMG

Durch die Verringerung der Musterdicke nimmt auch die Höhe der Evakuierungskanäle ab. Infolgedessen nimmt die Dickenpermeabilitätskurve mit dem konstanten FMG stärker ab, als die mit variierendem FMG. Der Schnittpunkt der beiden Kurven kann durch eine Veränderung des FMG der konstanten Kurve angepasst werden. Mit Hilfe der Kurven kann der BG für Prepregs mit unterschiedlichen FMG so angepasst werden, dass eine Zielpermeabilität erreicht wird.

Weiterhin kann die Dickenpermeabilität durch Verändern des Musters und dessen Stapelreihenfolge angepasst werden. Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden Simulationen für ein Rechteckmuster, jeweils mit Stapelfolge [0/0] und [0/90], sowie für ein quadratisches Muster durchgeführt. Die Dickenpermeabilitäts-BG-Kurven sind in Abbildung 20 aufgeführt. Bei den drei Kurven wurde der gleiche FMG angenommen und konstant gehalten.

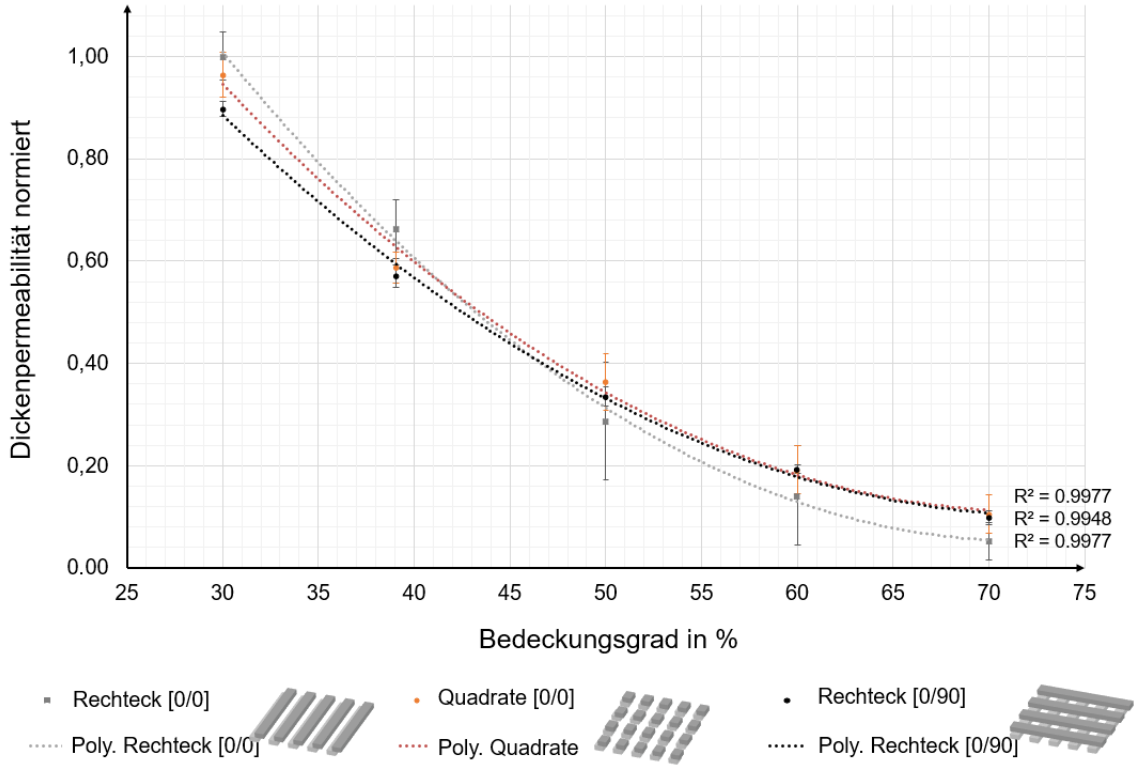

Abbildung 20: Einfluss der Musterart und der Stapelfolge auf die Dickenpermeabilität

Bei niedrigen BGs bis ca. 40 % weist ein Rechteckmuster mit einer Stapelreihenfolge von [0/0] die höchste Dickenpermeabilität auf. Dies liegt an der höheren Wahrscheinlichkeit die Muster der einzelnen Lagen kongruent zu stapeln und somit die Tortuosität des Stacks gering zu halten. Bei höheren BG ist die Dickenpermeabilität im Vergleich jedoch geringer, da die Wahrscheinlichkeit eines Verschlusses der Evakuierungskanäle in Dickenrichtung steigt. Durch diese Verschlüsse wird die Luft gezwungen in der Ebene durch die nicht imprägnierten Rovings des Textils zu fließen, deren Permeabilität signifikant geringer ist als die der Evakuierungskanäle. Ein vollständiger Verschluss der Evakuierungskanäle in Dickenrichtung kann durch eine Stapelreihenfolge von [0/90] oder der Verwendung eines quadratischen Musters verhindert werden.

Eine [0/90] Stapelfolge sowie ein quadratisches Muster weisen jedoch eine höhere Tortuosität auf, aufgrund derer die Dickenpermeabilität bei niedrigen BGs niedriger ist, als bei [0/0] gestapelten Rechteckmustern. Letztendlich wird die Dickenpermeabilität somit durch die Tortuosität der Evakuierungskanäle sowie deren Verschlusswahrscheinlichkeit in Dickenrichtung bestimmt.

1.2.4. Herstellung von rCF-Prepregs

Mit der entwickelten Technologie (vgl. Kapitel 1.2.1) wurden rCF-Prepregs mit dem biobasierten SR von Swiss CMT hergestellt. Die kommerziell erhältlichen rCF liegen i. d. R. als Vliesstoff vor, bei denen hohe Kompaktierungsdrücke zum Erreichen der Zielfaservolumengehalte benötigt werden. Bei dem von uns betrachteten, vakuumbasierten Prozess könnten deswegen nur Bauteile mit geringen Faservolumengehalten (< 20 %) realisiert werden. Diese Bauteile weisen jedoch keine ausreichenden mechanischen Eigenschaften für unsere Anwendungsfälle auf. Aus diesem Grund wurden Partner gesucht, um die rCF-Textilien mit gerichteter Faseranordnung herzustellen. Die gerichtete Faseranordnung reduziert zum einen die benötigten Kompaktierungskräfte und erhöht zum anderen die mechanischen Eigenschaften in Faserrichtung. In Zusammenarbeit mit der Wagenfelder Spinnereien GmbH wurden zunächst rCF-Garne hergestellt. Die Garne wiesen zunächst einen rCF-Anteil von 60 % und, zum Stabilisieren des Garns, einen PA6-Anteil von 40 % auf. Die rCF-Garne wurden anschließend von der Tissa Glasweberei AG zu unidirektionalen rCF-Textilien weiterverarbeitet. Aufgrund des hohen PA6-Anteils in den rCF-Garnen führt die zusätzliche Applikation des SRs jedoch zu einer Reduzierung des Fasermassenanteils, sowohl in den SRPs, als auch in den hergestellten Bauteilen. Die Erhöhung des rCF-Anteils in den Garnen auf > 80 % war mit deutlich erhöhtem Aufwand verbunden, weshalb nur Mindermengen beschaffbar waren. Ebenso war die Herstellung von unidirektionalen Textilien nicht möglich, weshalb ein 0/90-Gelege hergestellt wurde.

Infolge des erhöhten rCF-Anteils war die Stabilität der Garne deutlich geringer, wodurch diese deutlich bauschiger waren, als bei höheren PA6-Anteilen. Dies führt bei der SRP-Herstellung dazu, dass die Musterelemente deutlich unschärfer waren, da das verwendete Lochblech nicht plan auf das Textil aufgelegt werden konnte. Dennoch konnten rCF-SRPs (mit rCF-Anteil in den Garnen von je 60 und 80 %) und den biobasierten Pulverharz von Swiss CMT hergestellt werden, die bei Raumtemperatur drapierbar sind (siehe Abbildung 21). Hiermit wurde der Meilenstein M3: „Pulverprepreg aus recycelten Kohlenstofffasern und biobasiertem Epoxidharz verfügbar“ erreicht und das AP 3 erfolgreich beendet.

Abbildung 21: Drapierbares, biobasiertes rCF-SRP (rCF-Anteil im Garn > 80%)

1.3. AP 4 – Anwendung des Pulverprepregs auf maritime Bauteile

Im AP 4 wurde vom IVW die Aushärtestrategie entwickelt und deren sowie der Einfluss der SRP-Parameter auf die Laminatqualität untersucht. Für die Laminatherstellung wurden ebenfalls das CF-Köper Gewebe KDK 8045 und das PE6405 verwendet. In diesem Kapitel werden zunächst die Methoden zur Bewertung der Laminatqualität vorgestellt und anschließend die Einflüsse der Aushärtestrategie und SRP-Parameter diskutiert.

1.3.1. Methoden zur Bewertung der Laminatqualität

Im Folgenden werden die verwendeten Methoden zur Bewertung der Laminatqualität beschrieben.

<u>Porenvolumengehalt</u>

Der Porenvolumengehalt (PVG) wurde mittels Grauwertanalyse anhand von Schliffbildern der Laminate bestimmt. Als Analysesoftware wurde die Software ImageJ verwendet. Pro hergestelltem Laminat wurden jeweils vier Proben entnommen, zwei aus der Mitte des Laminats und zwei aus dem Randbereich. Die Entnahmestellen waren für alle Laminate gleich. Für die Aufnahme der Schliffbilder wurden die Proben in einer Epoxidmatrix eingebettet, geschliffen und poliert. Die Einbettung erfolgte dabei derart, dass jeweils ein Schliffbild in Schuss- und eines in Kettrichtung der Textilien aufgenommen werden konnte. Die Schliffbilder wurden mit einem Leica DM6000M Mikroskop aufgenommen. Für jeden gefertigten Laminattyp wurden jeweils drei Laminate gefertigt und der mittlere PVG mit folgender Formel berechnet:

$$PVG = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\left[\frac{1}{4}\sum_{j=1}^{4} PVG\left(Laminat_i, Schliffbild_j\right)\right] \qquad (4)$$

Faserondulation

Zur Bestimmung der Faserondulation wurde eine auf DIN 53852:1991-09 basierende Auswertungsmethode verwendet. Die Norm beschreibt ein Verfahren zur Berechnung des Faserondulationsindex trockener Gewebe, welcher die Faserondulation quantifiziert. Der Faserondulationsindex ist definiert als die Differenz zwischen der gestreckten Rovinglänge l_S und dem euklidischen Abstand in Faserrichtung zwischen Anfangs- und Endpunkt eines Rovings l_E, geteilt durch l_S:

$$Faserondulationsindex = \frac{l_S - l_E}{l_S} \qquad (5)$$

Bei trockenen Geweben wird zur Bestimmung dieser Längen zunächst ein Roving innerhalb des Gewebes mit zwei Punkten markiert. Der Abstand dieser beiden Punkte in Faserrichtung wird gemessen und entspricht dem euklidischen Abstand l_E. Anschließend wird der markierte Roving aus dem Gewebe entnommen und gestreckt. Der Abstand zwischen den Markierungen wird in diesem Zustand erneut gemessen und entspricht der gestreckten Länge l_S (siehe Abbildung 22, links). Die Berechnung des Faserondulationsindex erfolgt abschließend nach Formel (5). Je höher der berechnete Wert, desto höher ist die Faserondulation, wobei ein berechneter Faserondulationsindex von 0 eine perfekt gerade Faser beschreibt.

Da eine Rovingentnahme bei ausgehärteten Laminaten nicht möglich ist, wurden die benötigten Längenwerte anhand der für die Ermittlung des PVG aufgenommenen Schliffbilder ermittelt. Hierzu wurde erneut die Software ImageJ verwendet, um zunächst einzelne Rovings zu segmentieren und auszuschneiden (siehe Abbildung 22, rechts). Die ausgeschnittenen Rovings wurden dann auf ihre Mittellinien reduziert (ImageJ Funktion „Skeletonize“) und die Längen l_E und l_S mit der Funktion „Analyze Skeletton“ ermittelt. Pro gefertigtem Laminat wurden jeweils vier Rovings in Schuss- und vier Rovings in Kettrichtung analysiert. Die Länge der analysierten Rovings betrug bei jeder Messung mindestens 15 mm, was die nach Norm geforderte Mindestanalyselänge von einem Webmuster für alle Textilien überschreitet (max. Webmusterlänge bei KDK 8045 Gewebe von 8 mm).

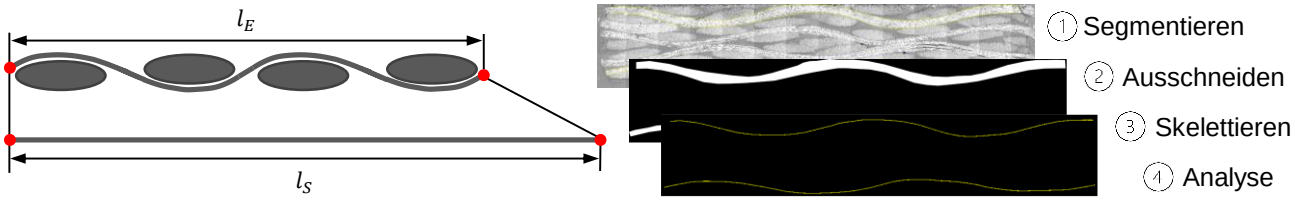

Abbildung 22: Darstellung der euklidischen Länge l_E und der gestreckten Länge l_S (links); Ermittlung des Faserondulationsindex mittels ImageJ (rechts)

Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit

Für die mechanische Analyse wurde die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS, von engl. interlaminar shear strength) nach DIN EN ISO 14130:1998-02 mit kurzem Balken ermittelt. Die Untersuchung der ILSS wurde aufgrund ihrer nachgewiesenen Sensibilität gegenüber dem PVG ausgewählt, wodurch eine Querkontrolle zu den Ergebnissen der PVG-Bestimmung möglich ist. Die Maße der Probekörper betrugen 20 x 10 x 2 mm³ und lagen innerhalb der vorgeschriebenen Toleranzen. Die ILSS wurde jeweils in Kett- und Schussfadenrichtung ermittelt. Die Versuche wurden an einer Universalprüfmaschine vom Typ Zwick 1445 durchgeführt. Es wurden jeweils fünf Probekörper pro Serie geprüft.

1.3.2. Einfluss der Aushärtestrategie und des Vakuumaufbaus auf die Laminatqualität

Zur Identifizierung geeigneter Parameterräume für die SRPs, den Vakuumaufbau sowie für die Aushärtestrategie, wurden zunächst Vorversuche durchgeführt. Aufbauend auf deren Ergebnissen wurden die Parameterräume neu definiert und die folgenden Versuchspläne erstellt. In diesem Kapitel wird zunächst auf die Vorversuche eingegangen, diese bewertet und anschließend die hieraus eruierten Erkenntnisse für die weiterführenden Versuchspläne erläutert.

Ergebnisse der Vorversuche

In einer ersten Versuchsreihe zur Ermittlung des Einflusses der Aushärtestrategie und des Vakuumaufbaus auf die Laminatqualität wurden SRPs mit quadratischem und rechteckigem Muster mit jeweils 20 und 60 % BG hergestellt. Als Materialien wurden weiterhin das CF-Köper Gewebe KDK 8045 und als SR das PE6405 verwendet. Für die Laminatfertigung wurden jeweils 8 SRP-Lagen auf einer Heizplatte gestapelt und in einem vakuumbasierten Verfahren (engl. Vacuum-Bag-Only, VBO) zunächst konsolidiert und imprägniert sowie anschließend ausgehärtet. Für den Aufbau des Prozesses wurden so wenig Einweg-Hilfsmaterialien wie nötig verwendet (Abbildung 23, links). Zur Fertigung der Laminate wurde der Druck im Vakuumaufbau auf unter 100 Pa gesenkt und während des kompletten Prozesses

gehalten. Nach einer 16-stündigen Vakuumhaltedauer bei Raumtemperatur erfolgt der Schmelz- und Aushärteprozess nach dem in Abbildung 23 dargestellten Aushärtezyklus. Zunächst werden die SRP-Stacks mit einer Heizrate von 2,7 °C/min auf 105 °C erhitzt. Diese Temperatur wird anschließend für 150 min gehalten, um das Harz vollständig aufzuschmelzen sowie die Textilien zu imprägnieren. Nach der Schmelzphase wird die Temperatur auf 180 °C erhöht, wodurch die Aushärtereaktion initiiert wird. Nach einer Haltedauer von 60 Minuten wird die Heizplatte abgeschaltet und die Laminate kühlen langsam auf Raumtemperatur ab.

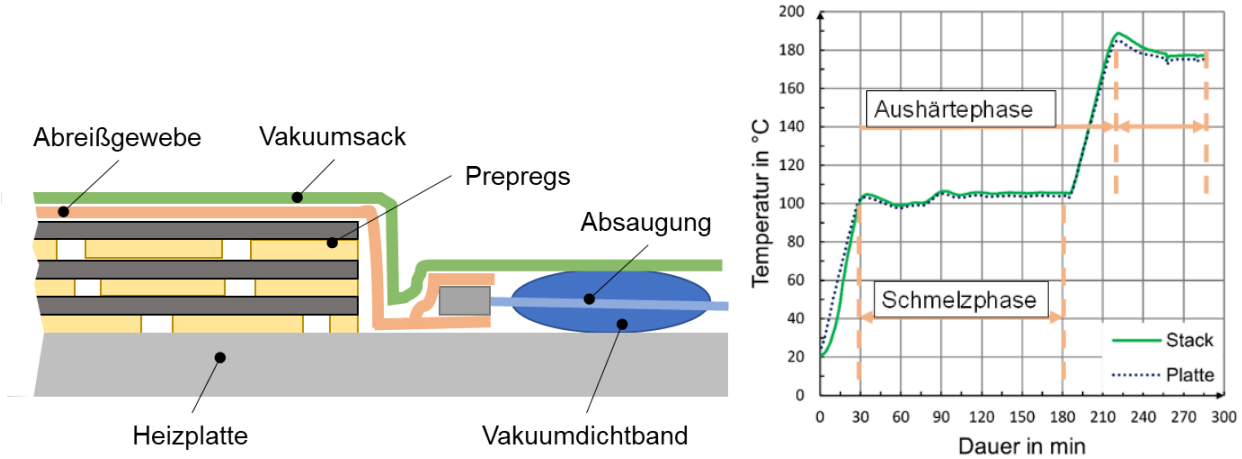

Abbildung 23: Aufbau des VBO-Verfahrens (links); Aushärtezyklus während der Verarbeitung (rechts)

Im beobachteten Parameterbereich erwiesen sich SRPs mit einem BG von 20 % als ungeeignet, unabhängig vom Mustertyp. Die entsprechenden Laminate weisen alle hohe Faserondulationen sowie einerseits sehr harzreiche und andererseits trockene Stellen in anderen Laminatbereichen auf (unzureichender Harzfluss in die nicht vom Muster bedeckten Bereiche hinein, vgl. Abbildung 24). Laminate, die mit 60 % BG hergestellt wurden, weisen hingegen deutlich geringere Faserondulationen auf. Ebenso fand eine vollflächige Imprägnierung der Textilien statt, mit jeweils homogenerer Harzverteilung bei quadratischen Mustern im Vergleich zu den Rechteckmustern.

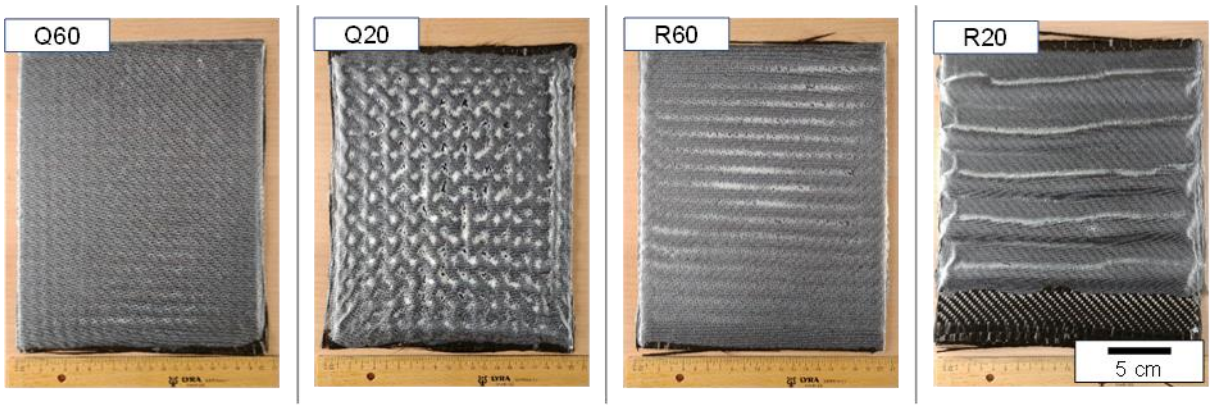

Abbildung 24: Draufsicht auf die Oberseite der gefertigten Laminate

Eine Betrachtung der Laminatquerschnitte zeigt bei R20 sowie Q20-Mustern deutliche Rückstände der Musterelemente vor allem in SRP-Lagen nahe der Heizplatte. Diese Harzansammlungen resultieren aus einem Überspannen der Muster durch die Vakuumfolie sowie der darüberliegenden SRP-Lagen. Ist der Abstand zwischen zwei Musterelementen zu groß, kommt es zum „Bridging"-Effekt, wodurch die überspannenden Lagen auf Zug belastet werden und dadurch den Großteil des Drucks aufnehmen. Der auf den Musterelementen der darunterliegenden SRP-Lagen herrschende Druck reicht infolgedessen nicht aus, um die Textilien zu imprägnieren. Zudem erzeugt das Überspannen der Vakuumfolie in den höher liegenden Prepreglagen Hohlräume zwischen den Musterelementen. In diesen Hohlräumen herrscht ein niedrigeres Druckniveau, aufgrund dessen es zu Harzsammlungen in diesen Bereichen kommt (siehe Abbildung 25).

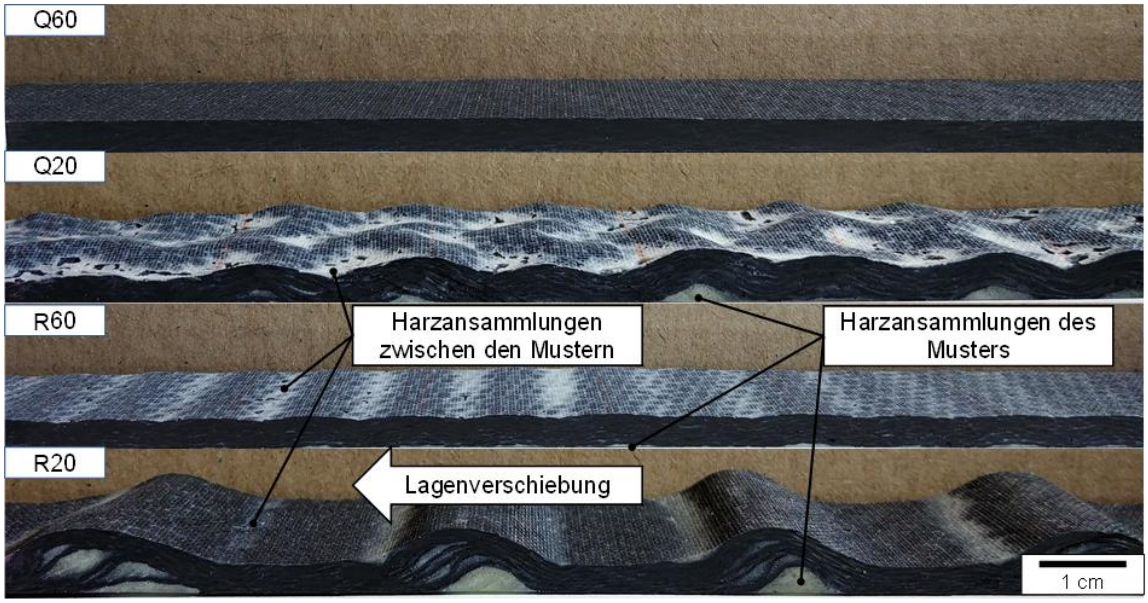

Abbildung 25: Aufnahmen des Querschnitts der gefertigten Laminate

In Abbildung 26 ist das Überspannen durch eine SRP-Lage in einem R20-Laminat abgebildet. Deutlich zu erkennen ist eine auf Zug belastete SRP-Lage, welche den Druck aufnimmt.

Infolgedessen ergibt sich über dieser Lage ein höherer Faservolumengehalt, als in den darunterliegenden Lagen. Zudem ergibt sich durch den geringeren Druck in dem überspannten Bereich ein höherer PVG.

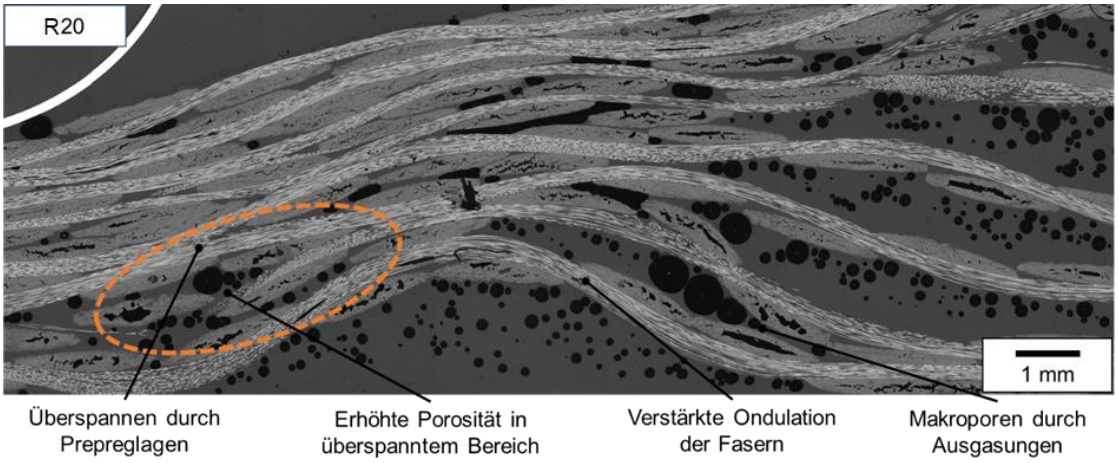

Abbildung 26: Mikroskopaufnahme eines R20-Laminats mit überspannten Bereichen durch SRP-Lagen

Insgesamt lag der PVG aller gefertigten Laminate zwischen 5 und 10 % und somit oberhalb des Zielwertes von 3 %. Als Ursachen wurden für die Makroporen die Feuchtigkeit innerhalb der SR-Elemente, die während der Aushärtung ausgasen, und für die Mirkoporen eine zu hohe SR-Viskosität vermutet. Bei dem hier verwendeten Vakuumaufbau erfolgte die Evakuierung der Ausgasungen über das Abreißgewebe zu den Absaugungsleitungen. Durch ein vorzeitiges Imprägnieren des Abreißgewebes kam es jedoch zu einem Verschluss dieses Evakuierungsweges, sodass die Ausgasungen nicht evakuiert werden konnten. Um dem entgegenzuwirken, wurde in den folgenden Versuchen der Vakuumaufbau um eine gaspermeable VAP-Membran und eine Breather-Lage ergänzt (siehe Abbildung 27). Weiterhin wird zur Entfernung der Feuchtigkeit ein Trocknungszyklus bei einer Temperatur von 60 °C durchgeführt. Die Trocknung findet dabei im weiterentwickelten Vakuumaufbau statt mit direkt folgender Aushärtung.

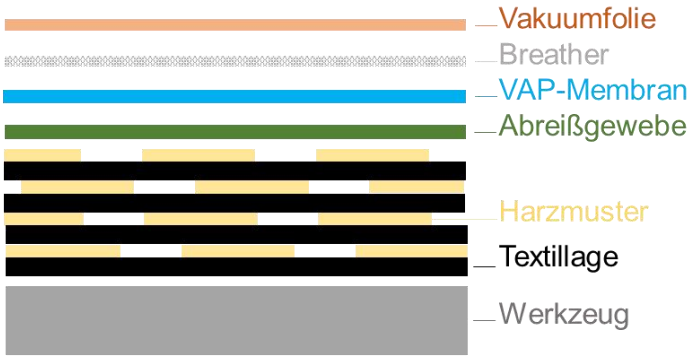

Abbildung 27: Weiterentwickelter Vakuumaufbau mit Breather und VAP-Membran

Weiterhin wurde die Haltezeit bei 105 °C entfernt. Die Viskosität des SRs ist bei dieser Temperatur nicht niedrig genug, um eine robuste Mikroimprägnierung der Rovings zu erreichen. Weiterhin kann es durch die Haltezeit bei dieser Temperatur es zu einer Vorhärtung und damit verbunden zu einer Erhöhung der minimal erreichbaren Viskosität des SR kommen. Dies kann ebenso bereits bei der SRP-Herstellung oder dem Trocknungszyklus eintreten, weshalb auch hier die Temperatureinwirkung so kurz und niedrig wie möglich gehalten werden sollte (vgl. Abbildung 28). Der minimale BG der hergestellten SRPs wurde zudem auf 60 % festgelegt.

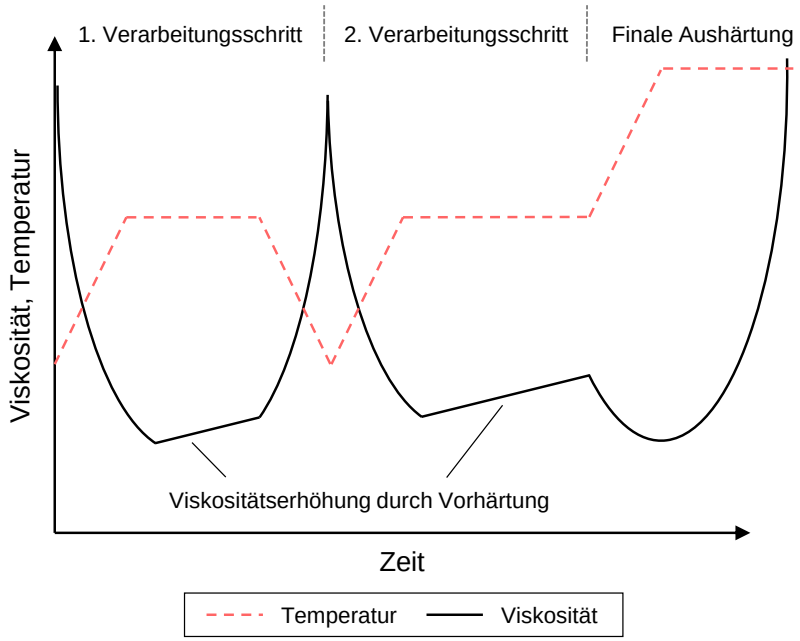

Abbildung 28: Darstellung des Einflusses vorausgehender Verarbeitungsschritte auf die minimale Viskosität bei der finalen Aushärtung eines SR

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Vorversuchen wurden verwendet, um die Laminatqualität zu steigern und den Einfluss der neu entwickelten Aushärtestrategie sowie der SRP-Parameter auf ebendiese zu untersuchen.

1.3.3. Einfluss des Bedeckungsgrads und der Musterelementgeometrie auf die Laminatqualität

<u>Laminatherstellung</u>

Zur Ermittlung des Einflusses der SRP-Parameter auf die Laminatqualität wurden vier verschiedene SRP-Typen verwendet: Q75, Q60, R75 sowie R60 (weitere Informationen vgl. Tabelle 4). Weiterhin wurden als Benchmark vollflächig imprägnierte SRPs verwendet (Abkürzung: „V100“). Der FMG lag für alle SRPs im Bereich der in Tabelle 6 ermittelten Werte (zwischen 56 und 59 %), die Größe der Lagen betrug 250 x 200 mm². Der Vakuumaufbau

entsprach für alle hergestellten Laminate dem aus Abbildung 27. Pro Vakuumaufbau wurden jeweils vier Laminate hergestellt. Um mögliche prozessbedingte Schwankungen auszugleichen, wurden in jedem Vakuumaufbau jeweils vier verschiedene SRP-Typen verarbeitet. Die Dauer der Trocknungsphase betrug 5 h. Nach dieser Trocknungsphase wurde die Temperatur mit einer durchschnittlichen Aufheizrate von 2 °C/min auf 180 °C erhöht und das Laminat 30 Minuten lang ausgehärtet. Pro SRP-Typ wurden drei Laminate hergestellt.

Ergebnisse

Bei der Diskussion der Ergebnisse wird zunächst auf die Faserondulation und anschließend auf den PVG sowie die ILSS eingegangen. Die betrachteten SRP-Parameter belaufen sich auf den BG sowie die Musterelementgeometrie.

Faserondulation

In Abbildung 29 sind die Faserondulationsindizes des trockenen Textils sowie der hergestellten Laminate aufgetragen. Zusätzlich wurden die Werte der Q20 und R20 SRPs aus den Vorversuchen eingefügt. Der Wert des trockenen Textils dient hierbei als Referenzwert. Er ist der niedrigste der ermittelten Werte, da es im Vergleich zu den mehrlagigen Aufbauten zu keinen Nesting- und Kompaktierungseffekten kommt, welche in einer erhöhten Faserondulation resultieren. Im BG-Bereich von 60 bis 100 % bei einem FMG von ca. 55 % hat weder der Bedeckungsgrad, noch die Musterelementgeometrie einen signifikanten Einfluss auf die Faserondulation. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass während der Kompaktierung keine in-plane Bewegung zwischen den SRP-Lagen auftreten. Die resultierenden Faserondulationen werden als ähnlich hoch eingeschätzt wie die erwartbaren Werte bei einem Vakuuminfusions- oder RTM-Verfahren. Um einen Vergleich zu Laminaten mit stark ondulierten Fasern zu erhalten, wurden die Faserondulationsindizes der Q20 und R20 Laminate aus den Vorversuchen hinzugefügt. Beide Laminate zeigen deutlich erhöhte Faserondulationsindizes, weshalb die Methode zur Analysen als plausibel zu werten ist.

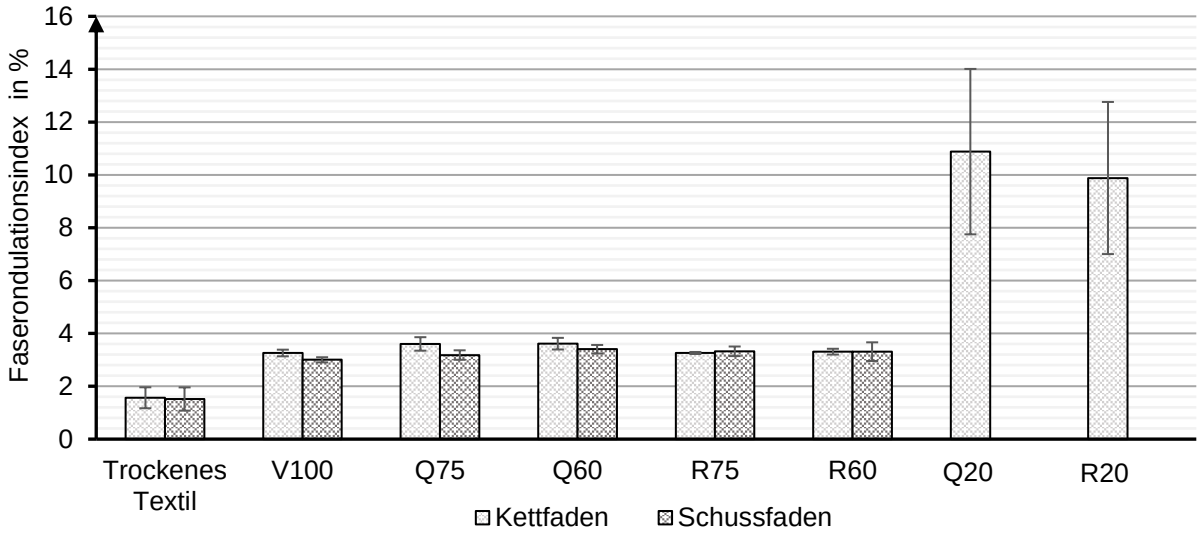

Abbildung 29: Faserondulationsindex der hergestellten Laminate

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es einen Schwellenwert für den BG gibt, unterhalb dessen die Faserondulation zu hoch und die mechanischen Eigenschaften der Laminate stark reduziert werden. Dieser Wert ist jedoch vom FMG des SRPs und somit letztendlich von dessen BF abhängig. Mit einer Reduzierung des FMG kann dadurch der Schwellenwert für den BG ebenfalls reduziert werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit den BG über die SRP-Fläche bei gleichbleibender Musterelementhöhe lokal zu variieren und hierüber die Drapiereigenschaften gezielt zu steuern. Der hierdurch ebenfalls lokal variierende FMG kann im finalen Verarbeitungsprozess durch ausreichenden Harzfluss aus Bereichen mit hohem BG in Bereiche mit niedrigem BG kompensiert werden.

<u>Porenvolumengehalt und scheinbare interlaminare Scherfestigkeit</u>

Der Einfluss des BGs auf die ILSS und den PVG von Laminaten aus SRPs mit quadratischem Muster ist in Abbildung 30, der von Laminaten aus SRPs mit rechteckigem Muster in Abbildung 31 dargestellt. Insgesamt konnten mit allen SRP-Typen Laminate mit einem PVG < 2 % hergestellt werden, womit der Zielwert von < 3 % für alle Typen erreicht wurde.

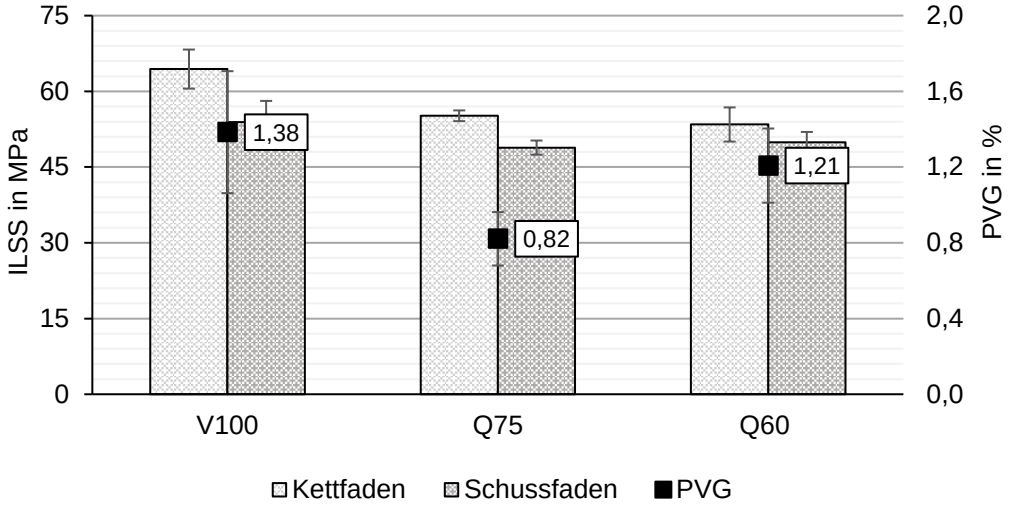

Abbildung 30: Einfluss des Bedeckungsgrads von SRPs mit quadratischem Muster auf die Laminatqualität

Beide betrachteten quadratischen Muster weisen tendenziell niedrigere PVG auf, als die Referenzlaminate aus den vollflächig imprägnierten V100-SRPs. Die Q75-Laminate weisen zudem einen niedrigeren PVG auf, als die Q60-Laminate. Dies widerspricht der ursprünglichen Erwartung, dass Laminate aus SRPs mit niedrigerem BG einen niedrigeren PVG aufweisen sollten, da sie aufgrund ihrer größerer Evakuierungskanäle eine verbesserte Evakuierung der SRP-Stacks ermöglichen. Der höhere PVG bei niedrigerem BG ist auch bei den Laminaten aus R-SRPs zu erkennen. Insgesamt liegen die PVG der R-Laminate im Bereich der Referenzlaminate, wobei die R60-Laminate mit einem durchschnittlichen PVG von 1,69 % den höchsten Wert aufweisen.

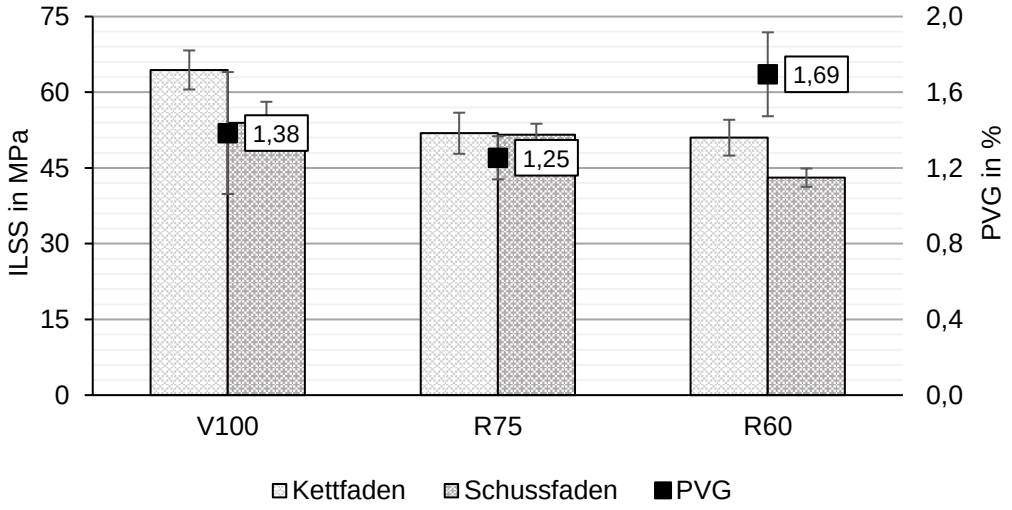

Abbildung 31: Einfluss des Bedeckungsgrads von SRPs mit rechteckigem Muster auf die Laminatqualität

Der erhöhte PVG in Laminaten aus SRPs mit niedrigerem BG bei gleichem FMG ist wohlmöglich auf die geometriebedingt schlechteren Trocknungseigenschaften der 60 %-Musterelemente zurückzuführen. Die thermische Trocknung der Musterelemente ist eine Kopplung aus temperaturinduzierten und von Stoffeigenschaften abhängigen Wärme- und Feuchtigkeitstransporten, die sich gegenseitig beeinflussen und nur durch komplexe Modelle iterativ beschrieben werden können. Hierbei führt der zugeführte Wärmestrom zunächst zu einer Verdampfung der oberflächennahen Feuchtigkeit der SR-Elemente, wodurch die im Inneren der Elemente liegende Feuchtigkeit beginnt an die Oberfläche zu diffundieren. An der Oberfläche erfolgt anschließend die erneute Verdampfung der Feuchtigkeit, bis der Umgebungsdruck dem Dampfdruck entspricht oder die gesamte Feuchtigkeit entfernt wurde. Nimmt man zur Vereinfachung an, dass die Umgebungsbedingungen und Stoffeigenschaften für alle Musterelemente gleich sind, so hängt die Trocknung ausschließlich von der Erwärmung des Musterelements ab. [3–7] Zur Beschreibung des Erwärmungsvorgangs wird die dimensionslose Biot-Zahl *Bi* verwendet. *Bi* kann mit Hilfe des Wärmeübergangskoeffizienten α, der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ_S des SR und der charakteristischen Länge L_C mit der Formel (6) berechnet werden:

$$Bi = \frac{\alpha * L_C}{\lambda_S} \qquad (6)$$

Ausgehend von der oben getroffenen Vereinfachung sind der Wärmeübergangskoeffizient sowie die spezifische Wärmekapazität des SRs für alle Musterelement nahezu gleich und konstant. Somit ist *Bi* maßgeblich von der charakteristischen Länge abhängig, die für ebene Geometrien als Verhältnis zwischen der Oberfläche des betrachteten Körpers A_K und dessen Volumen V_K definiert ist (siehe Formel (7)).

$$L_C = \frac{A_K}{V_K} \qquad (7)$$

In Tabelle 11 sind die Werte der charakteristischen Längen für die untersuchten SRP-Typen aufgelistet. Je höher der Wert der charakteristischen Länge, desto höher ist die Biot-Zahl und desto schneller erfolgt die Trocknung der jeweiligen Musterelemente.

Tabelle 11: Charakteristische Längen der untersuchten SRP-Typen

Mustertyp	A_K	V_K	L_C
Q75	216 mm²	40 mm³	5,40 mm^{-1}
Q60	144 mm²	32 mm³	4,50 mm^{-1}

R75	4.168 mm²	800 mm³	5,21 mm^{-1}
R60	3.408 mm²	800 mm³	4,26 mm^{-1}
V100	100.360 mm²	20.000 mm³	5,02 mm^{-1}

Die 75 %-Elemente haben jeweils eine größere charakteristische Länge, als die korrespondierenden 60 %-Elemente, wodurch sie ein besseres Trocknungsverhalten aufweisen. Vergleicht man die PVG von Q- und R-Laminaten mit gleichem BG miteinander, so ist zu erkennen, dass Q-Laminate stets den niedrigeren PVG aufweisen (siehe Abbildung 35). Auch dies ist wahrscheinlich auf die verbesserten Trocknungseigenschaften der Q-Musterelemente im Vergleich zu den R-Musterelementen zurückzuführen (siehe Tabelle 11).

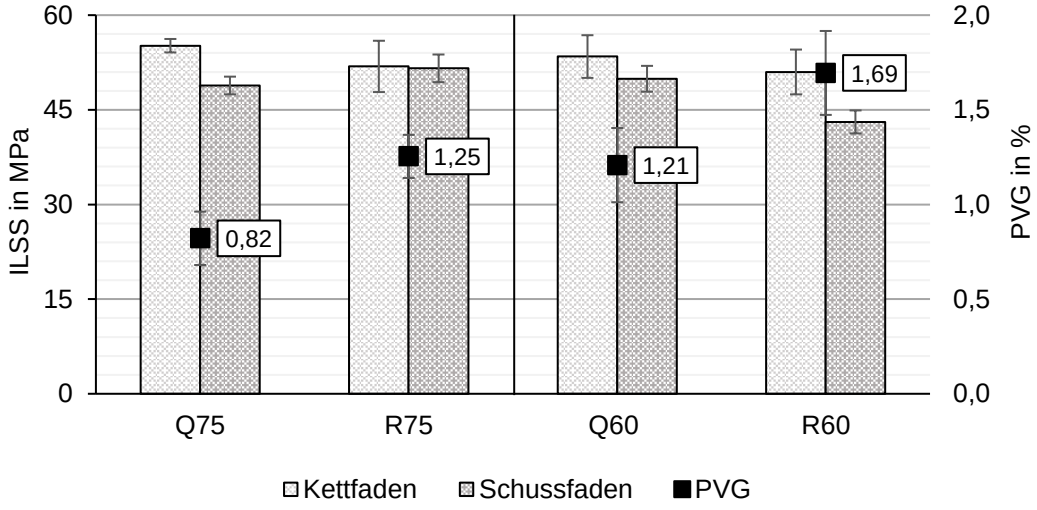

Abbildung 32: Einfluss der Musterelementgeometrie auf die Laminatqualität bei vergleichbaren Bedeckungsgraden; links: bei 75 %, rechts bei 60 %

Es lässt sich die Hypothese aufstellen, dass es aufgrund dieses verbesserten Trocknungsverhaltens bei einer 5 h Trocknung zu dem niedrigeren PVG in den hergestellten Laminaten kommt. Hieraus ergibt sich, dass durch eine Erhöhung der Trocknungsdauer der PVG der Laminate auf ein gleiches Niveau reduziert werden kann. Der BG sowie die Musterelementgeometrie beeinflussen somit nicht den minimal erreichbaren PVG, sondern die benötigte Trocknungsdauer. Zur Validierung der Hypothese wird im nächsten Kapitel die Trocknungsdauer auf 15 h erhöht und der Einfluss auf den PVG der Laminate untersucht.

Die ILSS-Werte der hergestellten Laminate liegen innerhalb der Standardabweichungen bei Beachtung der Testrichtung (Kett- und Schussfaden), mit Ausnahme der Schussfadenrichtung der R60-Laminate, die eine deutlich verringerte ILSS in Schussfadenrichtung aufweisen, sowie der V100-Laminate in Kettfadenrichtung, mit einer höheren ILSS. Die Unterschiede im PVG sind zwischen den Q-Laminate und das R75-Laminaten im betrachteten

Parameterbereich somit zu gering, um eine signifikante Reduzierung der ILSS hervorzurufen. Für die R60-Laminate führte der erhöhte PVG zu einer Verringerung der ILSS. Dies ist auf die Verringerung der Probenquerschnittfläche durch die Poren sowie auf Spannungsüberhöhungen an deren Kanten zurückzuführen. Die Geometrie und Größe der Poren spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Vor allem Poren mit großen Aspektverhältnissen von Länge zu Breite resultieren in einer signifikanten Reduzierung der ILSS, aufgrund ihrer Anfälligkeit für eine Rissentstehung. [8–12] In Abbildung 33 sind beispielhaft die Schliffbilder eines Q60- und R60-Laminats dargestellt. Zu erkennen sind in beiden Laminaten sowohl Mikroporen, die hauptsächlich auf einen unzureichenden Harzfluss hindeuten, als auch Makroporen, die infolge eingeschlossener Feuchtigkeit entstehen. [13–15] Die am häufigsten vorkommenden Poren liegen als Ellipsoid oder kugelförmig vor. Weiterhin sind größere Poren zu erkennen, die aus einer Agglomeration mehrerer Blasen entstanden sind. Die Makroporen des R60-Laminats sind im Vergleich zum Q60-Laminat flächenmäßig größer und weisen ein größeres Aspektverhältnis von Länge zu Breite auf. In Kombination mit dem insgesamt höheren PVG der R60-Laminate ergibt sich deren verringerte ILSS. Die höheren ILSS-Werte der V100-Laminate stehen im Widerspruch zu den zugehörigen PVG. Ein Grund für die erhöhten Werte können lokal niedrigere PVG in den ausgeschnittenen ILSS-Proben sein im Vergleich zu den Proben für die PVG-Bestimmung.

Für alle hergestellten Laminate ist die ILSS in Schussfadenrichtung tendenziell geringer als in Kettfadenrichtung. Dies ist voraussichtlich auf die schlechtere Mikroimprägnierung der Schussfäden zurückzuführen, die in allen Laminaten auftritt (siehe, Abbildung 34).

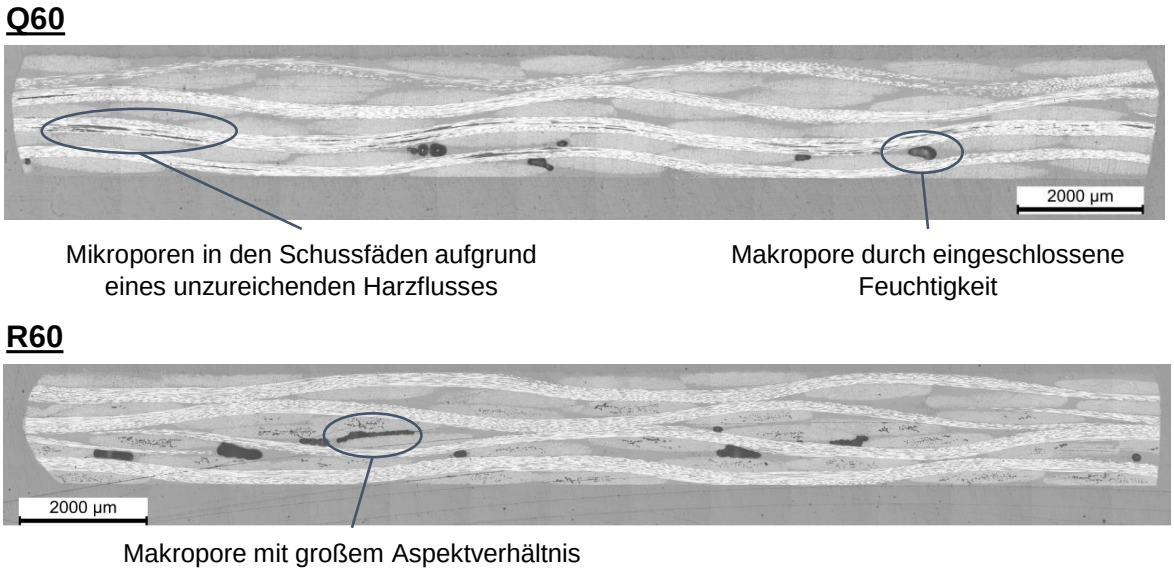

Abbildung 33: Schliffbilder eines Q60- und eines R60-Laminats mit 5 h Trocknungsdauer

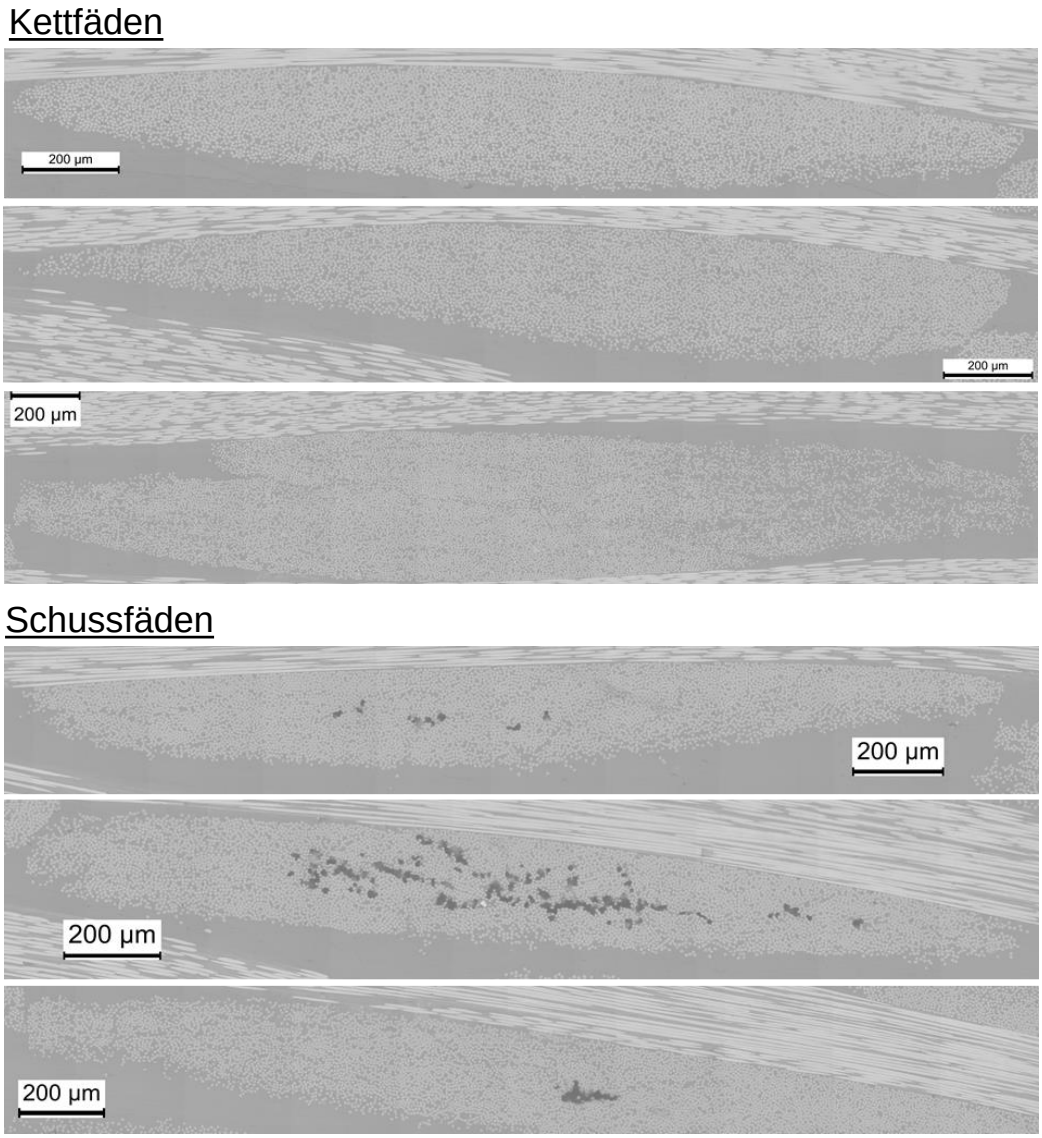

Abbildung 34: Mikroimprägnierung der Kett- und Schussfäden eines Q60-Laminats

1.3.4. Einfluss des Trocknungszyklus auf die Laminatqualität

In diesem Kapitel wird der Einfluss des Trocknungszyklus auf die Laminatqualität untersucht und die aufgestellte Hypothese aus Kapitel 1.3.3 überprüft.

Laminatherstellung

Es wurden drei verschiedene SRP-Typen verwendet: V100, Q75 und Q60. Größe der Lagen, deren FMG sowie der Vakuumaufbau entsprechen den Werten aus 1.3.3. Pro Vakuumaufbau wurden jeweils vier Laminate hergestellt. Um mögliche prozessbedingte Schwankungen auszugleichen, wurden in jedem Vakuumaufbau jeweils alle SRP-Typen verarbeitet. Untersucht wurden zwei Trocknungszyklen mit einer Dauer von 5 und 15 h bei jeweils 60 °C. Zur Temperaturüberwachung während des Prozesses wurden zwei Thermoelemente angebracht, eines an der Werkzeugplatte und eines auf dem Vakuumsack, etwa in der Mitte des

Q75 Laminats. Nach dieser Trocknungsphase wurde die Temperatur mit einer durchschnittlichen Aufheizrate von 2 °C/min auf 180 °C erhöht und das Laminat 30 Minuten lang ausgehärtet. Pro SRP-Typ wurden drei Laminate hergestellt.

Ergebnisse

Faserondulation

Äquivalent zur Musterelementgeometrie hat auch die Trocknungsdauer keinen Einfluss auf die Faserondulation in dem betrachteten Parameterbereich (BG 60 bis 75 %; FMG 55 %, siehe Abbildung 29). Relevante Einflussparameter wurden im Kapitel 1.3.3 diskutiert.

Porenvolumengehalt und scheinbare interlaminare Scherfestigkeit

In Abbildung 35 sind die Werte der PVG und ILSS für 5 und 15 h nach Mustertyp gegenübergestellt.

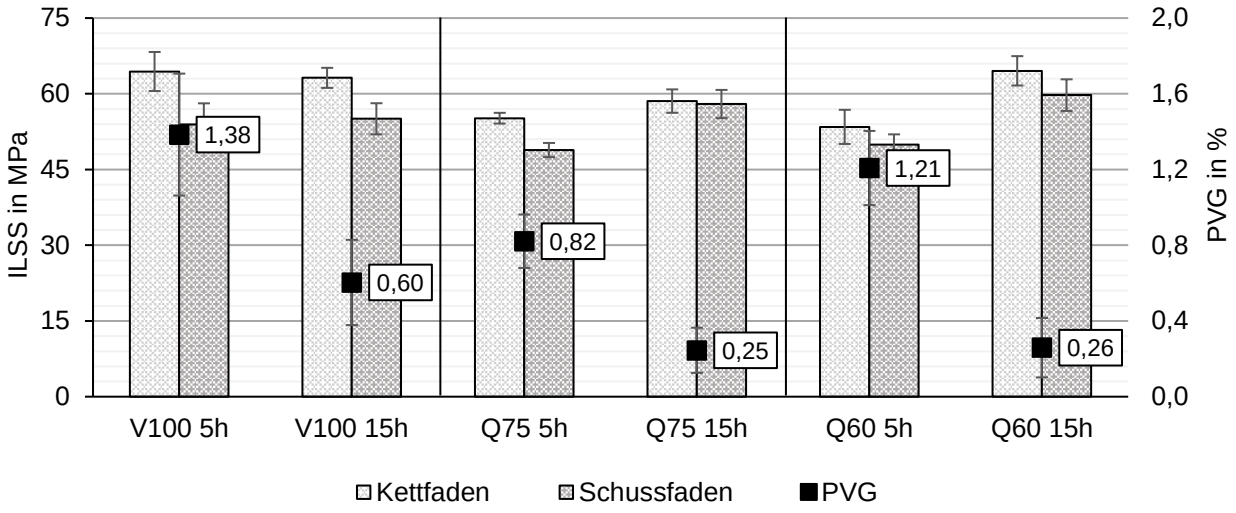

Abbildung 35: Einfluss der Trocknungsdauer auf die Laminatqualität von V100 (links), Q75 (Mitte) und Q60 (rechts) SRPs

Bei allen Laminaten führte die erhöhte Trocknungsdauer zu einer deutlichen Reduzierung des PVG und einer Erhöhung der ILSS für die Q-Laminate. In den Q-Laminaten mit 15 h Trocknung treten so gut wie keine Makroporen mehr auf (Abbildung 36). In den V100-Laminaten mit 15 h Trocknung ist der Anteil an Makroporen größer, worauf deren höherer PVG zurückzuführen ist.

5 h Trocknungsdauer:

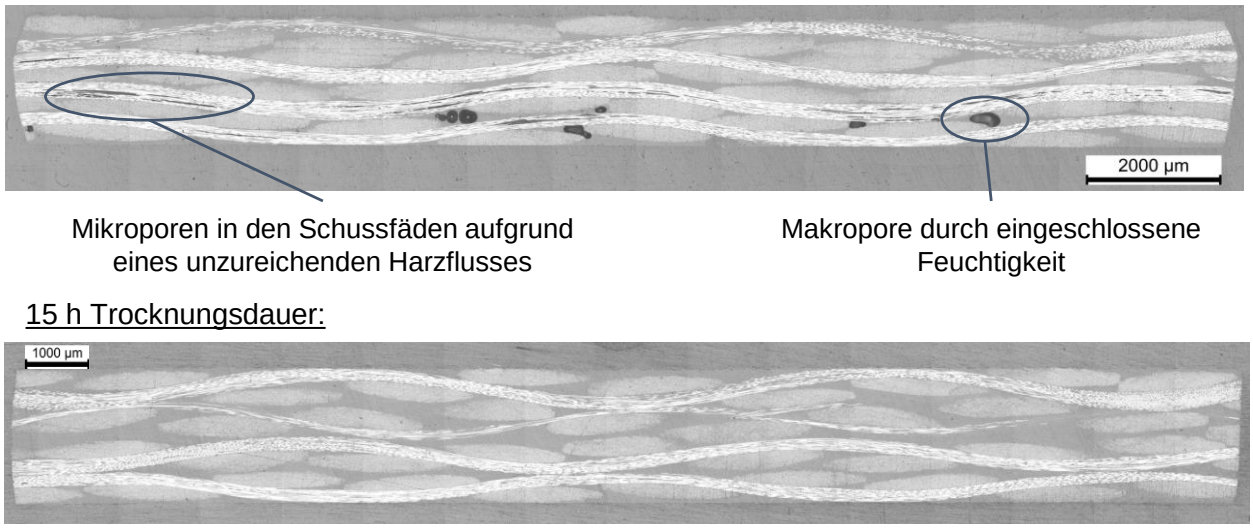

Abbildung 36: Schliffbilder von Q60-Laminaten mit 5 h Trocknungsdauer (oben) und 15 h Trocknungsdauer (unten)

Die längere Trocknungsdauer erhöhte die Viskosität des SRs geringfügig, jedoch führte dies nicht zu einer Erhöhung der Mikroporen (ca. 0,2 p.p.) im Vergleich zu den 5 h Laminaten (siehe Abbildung 36 und Abbildung 37).

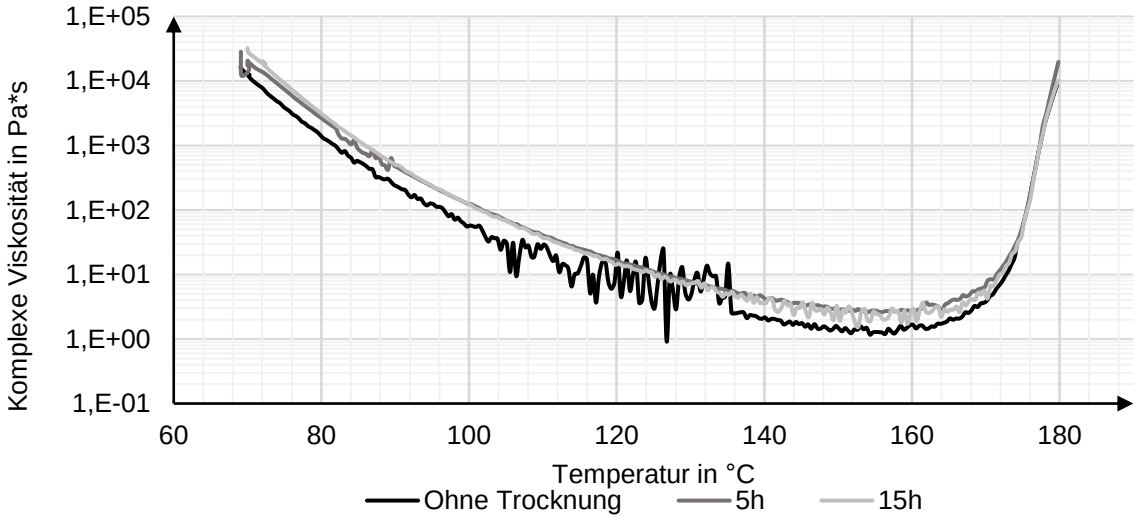

Abbildung 37: Komplexe Viskosität über der Temperatur des SRs mit und ohne Vortrocknung

Die postulierte Hypothese, dass die eine erhöhte Trocknungsdauer den PVG für unterschiedliche Muster auf das gleiche Niveau reduziert hat sich für die Musterimprägnierungen bestätigt (siehe Abbildung 38). Auffällig ist jedoch, dass der PVG der V100-Laminate immer noch über dem der Q-Laminate liegt, trotz höherer charakteristischer Länge (siehe Tabelle 11). Eine mögliche Ursache hierfür könnten die schlechteren Evakuierungseigenschaften der V100-SRP-Stacks sein, infolge derer die Feuchtigkeit nicht evakuiert werden kann.

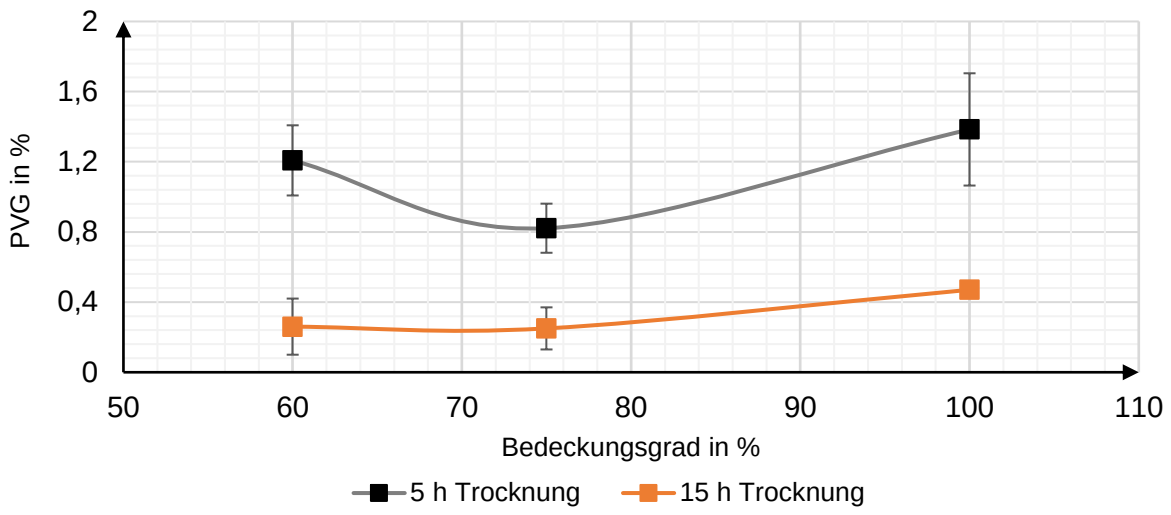

Abbildung 38: Porenvolumengehalt-Bedeckungsgrad-Diagramm für eine Trocknungsdauer von 5 und 15 h

1.3.5. Festlegung der Parameter für die Herstellung von rCF-Laminaten

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel wurde als Muster für die Imprägnierung der rCF-Textilien das Q75 ausgewählt. Die Trocknungsdauer wurde auf 15 h festgelegt, der restliche Aushärtezyklus bleibt bestehen. Der Vakuumaufbau entspricht dem aus Abbildung 27. Hiermit wurde AP 4 sowie M4 „Auswahl der Aushärtestrategie abgeschlossen“ erfolgreich erreicht.

1.4. AP 5 – Verifikation und Validierung

Die in den vorausgegangenen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse wurden in diesem Kapitel verifiziert und validiert. Weiterhin wurde die Nutzwertanalyse zum Vergleich des alten und neuen Produktionsverfahren aufgestellt.

1.4.1. Herstellung und Analyse von biobasierten rCF-Laminaten; Nutzwertanalyse

Die erste Herstellung von rCF-Laminaten erfolgte bei Greenboats mit den 60/40 rCF-PA6 Textilien mittels Vakuuminfusion und in der Presse mit flüssigen Harzsystemen. Die Zugfestigkeit der rCF-Laminate lag bei etwa 60 % der derzeit von Greenboats verwendeten CF-UD-Laminate. Ein Grund für die niedrigeren Werte könnte sein, dass die zur Herstellung der rCF-Textilien verwendeten Fasern bereits eine geringere Zugfestigkeit aufweisen, als die von Greenboats verwendeten Kohlenstofffasern. Außerdem führen der hohe Volumenanteil von PA6 in den rCF-Garnen (bisher ca. 40 %) und die reduzierte Ausrichtung der rCF im Vergleich zu „neuwertigen“ Materialien zu niedrigeren Zugfestigkeiten.

Im nächsten Schritt wurden die SRPs aus rCF-Textilien (rCF-Anteil > 80 %) und bio-basiertem SR (Bio-Anteil > 25 %) mit Q75-Muster zu rCF-Laminaten verarbeitet. Die Analyse der hergestellten Laminate zeigten jedoch einen sehr hohen Porenvolumengehalt sowie trockene Textilbereiche. Als Grund hierfür wurden die hohen Verdichtungskräfte identifiziert, die zur Kompaktierung der rCF-Textilien erforderlich sind. Diese benötigten Kräfte sind aufgrund der bauschigen rCF-Garne und der damit einhergehenden schlechteren Faserorientierung um ein vielfaches höher, als bei endlosen Neufasern. Da die Kompaktierungskräfte im VBO-Verfahren durch die maximale Druckdifferenz von einer Atmosphäre zwischen Vakuumaufbau und Umgebung begrenzt sind, reichten die hieraus resultierenden Kräfte nicht aus, um die rCF-Textilien auf die Zieldicke von 2 mm zu kompaktieren. Die Dicke der hergestellten Laminate beträgt ca. 3 mm, wodurch die zuvor berechnete Menge an Bioharz nicht ausreichte, um die rCF-Textilien vollständig zu imprägnieren. Eine Erhöhung des Matrixmassegehalts würde vermutlich zu einer vollständigen Imprägnierung führen, jedoch würde dies den Faservolumengehalt des Laminats verringern. Für die Zielanwendung des Materials in Foils Boards ist dieser Ansatz aufgrund der hieraus resultierenden Masseerhöhung der Boards nicht zielführend. Aus diesem Grund wurde das Herstellverfahren von einem VBO-Verfahren zu einem Pressverfahren angepasst, welches bei Greenboats erfolgreich durchgeführt wurde. Durch das Herstellen der Boards in einer Presse konnten deutlich höhere Kompaktierungskräften realisiert und die Zieldicke sowie der Zielfaservolumengehalt erreicht werden.

Abbildung 39: Hergestelltes rCF-Sandwich mit Korkkern

Ausgehend von den hergestellten Demonstratoren wurde eine Nutzwertanalyse erstellt, die Energie- und Materialverbrauch des bisherigen mit dem neu entwickelten Prozess vergleicht. Die Inhalte der Nutzwertanalyse unterliegen der Geheimhaltung der Greenboats GmbH und können gegebenenfalls in deren Abschlussbericht eingesehen werden.

2 Zusätzliche Informationen

2.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

IST-Wert der wichtigsten Positionen:

F0812 Beschäftigte E12-15: 135.921,19 €

F0817 Beschäftigte E1-11: 98.607,67 €

FF0822 HiWi: 2.799,63 €

F0838 Verbrauchsmaterial: 9.292,38 €

F0844 Dienstreisen Inland: 0 €

F0845 Dienstreisen Ausland: 0 €

F0831 Gegenstände bis 800/410/400€: 1.328,00 €

F0843 Overhead: 23.732,85 €

2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Um auch in Zukunft die Wettbewerbsfähigkeit als Forschungsdienstleister auf dem Markt zu erhalten, muss das aufgebaute Know-how in die Entwicklung neuartiger und innovativer Produkte bzw. Prozesse einfließen. Für das IVW ist es wichtig, durch die enge Kooperation mit KMUs für neue **Impulse in der Industrie zu sorgen**, um daraus eigene, neue Entwicklungsanreize zu erhalten. Durch das beantragte Vorhaben konnte der **Transfer von technologischem Know-how** auf dem Gebiet der Feststoffharze aus der universitären Forschung des IVW in die klein- und mittelständische Industrie vorangetrieben werden. Gleichzeitig konnten gewonnene Erkenntnisse für die Entwicklung einer neuen, nachhaltigen und bio-basierten Prepregtechnologie auf rCF-Basis genutzt werden. **Ohne eine Förderung wäre diese Entwicklung für das IVW nicht realisierbar** gewesen, da nur geringe Eigenmittel für Entwicklungen zur Verfügung stehen. Durch die Förderung wurde das IVW in die Lage versetzt, seine breite Expertise zum Erfolg des Projektes einzusetzen.

2.3. Verwertungsplan

Als Forschungsinstitut liegt für das IVW die Verwertung der Ergebnisse hauptsächlich im wissenschaftlichen Bereich. Insgesamt wurde ein peer-reviewed Journal-Paper, ein peer-reviewed Konferenz-Paper, zwei wissenschaftliche Vorträge, ein wissenschaftliches Poster sowie vier PR-Beitrage veröffentlicht. Die detaillierte Auflistung der Veröffentlichungen nach Kategorie:

Journal- & Konferenz-Paper:

- J. P. Janzen, D. May, „Solid epoxy prepregs with patterned resin distribution: Influence of pattern and process parameters on part quality in vacuum-bag-only processing“, Polym. Compos., 2023, pc.27696, doi: 10.1002/pc.27696
- J. P. Janzen, D. May; „Solid Epoxy Prepregs with Patterned Resin Distribution for Out-of-Autoclave Processing”; Proceedings of SAMPE Madrid 2023

Konferenzen, Poster & Vorträge:

- J. P. Janzen, D. May; Online Forum "Composites and Sustainability"; Composites United; 29 June 2021 - 1 July 2021; MarineCare – Sustainable boats and water sports equipment
- J. P. Janzen, D. May, P. Mitschang; “Sustainable Composites for Marine Applications”; Poster, 30 Jahre-IVW Kolloquium: 08 und 09.09.2021, Kaiserslautern
- J. P. Janzen, D. May; „Solid Epoxy Prepregs with Patterned Resin Distribution for Out-of-Autoclave Processing”; SAMPE Madrid 2023

PR-Beiträge:

- CU reports 01_2021: Saubere Meere / Unsoiled seas https://digitalmagazin.b4bschwaben.de/de/profiles/610b21560ff9/editions/d7b866df035bfeaabba9/pages/page/36
- Zukunftsregion Westpfalz: 03_2021 https://www.zukunftsregion-westpfalz.de/sites/default/files/zrw-newsletter_03-2021.pdf
- AVK Composites report 04 2021: MARINECARE Sustainable boats and water sports https://www.avk-tv.de/files/publications/files/avk_compositesreport4_gb_komprimiert.pdf
- Leibniz-Magazin, No. 16 „Wasser“; Frischer Wind: 25.10.2021 https://www.leibniz-magazin.de/alle-artikel/magazindetail/newsdetails/frischer-wind

Im Rahmen des Projekts wurden weitere Ideen generiert, die in Folgeprojekten bearbeitet werden sollen. Ende 2023 wurde hierzu ein neues Forschungsprojekt bewilligt, das auf der Arbeit des Marine-Care-Projekts aufbaut. Das Projekt ist Teil des Luftfahrtforschungsprogramms VI des BMWK (Name: NewPreg, Förderkennzeichen: 20Q2227B, Projektpartner: INVENT GmbH, Swiss CMT AG, Universität Bayreuth) und begann bereits am 01.01.2024. Ziel des Projekts ist die Erreichung eines höheren Bio-Anteils im Feststoffharz, die Verbesserung dessen Flammschutzes sowie automatisierte Herstellung großflächig bemusterter

Prepregs für den Luftfahrtbereich. Durch die Muster soll das Drapierverhalten auf die jeweilige Anwendung maßgeschneidert werden.

Ein zweites Projekt, das zurzeit begutachtet wird, wurde bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingereicht (Name: Functionally graded polymers and polymer composites based on solid resin systems, Projektpartner: Fraunhofer IFAM). Ziel ist hierbei eine Additivierung des Feststoffharz in der in-plane-Ebene des Prepregs. Mit diesen Prepregs können letztendlich Gradientenwerkstoffe mit dreidimensionalen Gradienten hergestellt werden. Das Ergebnis der Begutachtung wird Mitte 2024 erwartet.

Weiterhin werden die Ergebnisse im Rahmen einer Dissertation verwendet. Innerhalb des Projekts wurden 5 studentische Arbeiten betreut (zwei Studien-, zwei Bachelor- und eine Masterarbeit) sowie zwei Technikerarbeiten betreut. Teile der Ergebnisse sind in Vorlesungen eingebunden worden.

Als gemeinnütziges Forschungsinstitut belaufen sich die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten auf industrielle Auftragsforschung. Im Rahmen des Projekts ergab sich ein industrieller Forschungsauftrag für die Verarbeitung von Feststoffharzprepregs mit Musterimprägnierung im Pressprozess. Weitere Auftragsforschung in diesem Bereich ist wahrscheinlich.

2.4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

SR auf Epoxidbasis finden in der Industrie hauptsächlich Anwendung in den Bereichen der Pulverbeschichtung sowie der Bauteilherstellung ohne Faserverstärkung mittels Spritzguss oder im Transferpressen [16, 17]. Aber auch im FKV-Bereich sind SR in Industrie und Forschung zunehmend relevant. Neben dem Einsatz als Bindermaterial für die Preformherstellung, z. B. durch das Dry Fiber Placement [18–20], kommen SR auch als Matrixwerkstoff zum Einsatz. Die Anwendung von SR als Matrixwerkstoff im FKV-Bereich untersuchte die NASA bereits 1990. Sie entwickelte hierfür eine Anlage mit deren Hilfe Faserbündel, sog. Rovings, mit Epoxidharzpulver vorimprägniert werden konnten. Diese vorimprägnierten Rovings wurden in einem nachfolgenden Schritt durch Weben, Flechten oder Tapelegen zu Preforms weiterverarbeitet und abschließend in einem vakuumbasierten Verfahren vollständig imprägniert und ausgehärtet [21–23]. Die Herstellung und Weiterverarbeitung der Preforms erwies sich jedoch aufgrund des spröden Materialverhaltens und der begrenzten Drapierbarkeit als herausfordernd. Die untersuchten Strategien zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit bspw. durch Aufschmelzen während der Verarbeitung oder durch die Applikation eines wasserbasierten Gels zur Erhöhung der Duktilität waren entweder impraktikabel, unwirtschaftlich oder resultierten in einer unzureichenden Bauteilqualität [22]. Das Verfahren hat sich daher nicht durchgesetzt. Maguire et al. [24–26] untersuchten einen alternativen

Ansatz, bei dem ein SR-Pulver vollflächig entweder ein- oder beidseitig auf textile Halbzeuge (Gewebe oder Gelege) aufgetragen und geschmolzen wird. Hierfür wurde ein SR mit relativ niedriger Schmelzeviskosität (ca. 1 Pa*s) und Aushärteenthalpie (ca. 180 J/g) verwendet. Mit diesen SRPs wurde die Herstellung großer, dickwandiger Bauteile über eine rein vakuumbasierte Alternative zur Autoklavenfertigung untersucht. O'Braidaigh et al. [27] fertigten so einen 12,6 m großen Prototypen eines Rotorblattes einer Windkraftanlage. Hierbei wurden die beiden Rotorblatthälften zunächst getrennt imprägniert und konsolidiert und in einem nachfolgenden Schritt durch erneutes Aufschmelzen unter Druck gefügt und gemeinsam ausgehärtet. Die Nachteile dieses neuen Prozesses sind zum einen weiterhin die begrenzte Drapierbarkeit der SRPs und zum anderen die im VBO-Verfahren übliche Anfälligkeit für Porenbildung. Diese resultiert i. d. R. aus unzureichender Evakuierung der eingeschlossenen Luft und Feuchtigkeit zwischen und innerhalb der Prepreglagen bzw. aus vernetzungsinduzierten Ausgasungen der Matrixwerkstoffe [8, 28, 29]. Diese Evakuierungsproblematik ist bereits von konventionellen Flüssigharzen bekannt und führte zu der Entwicklung verschiedener Prepregtechnologien für VBO-Anwendungen, unter anderem mit einer Musterimprägnierung [8, 13, 14, 29–32]. Durch die Musterimprägnierung entstehen zusätzliche Evakuierungskanäle in Dickenrichtung des Prepregstacks. Durch diese Kanäle kann die Länge der Evakuierungspfade drastisch verkürzt werden, was insbesondere bei der Herstellung von Bauteilen mit großen Abmessungen in der Ebene, wie Bootsrümpfen oder Windkraftflügeln, zum Tragen kommt. NEXX Technologies, Teil der Mitsubishi Gas Chemical America, entwickelte kürzlich ein Cyanat-Prepreg mit Evakuierungskanälen in Dickenrichtung, dessen Datenblatt eine vereinfachte Verarbeitung sowie mittels VBO-Verfahren hergestellte Laminate in Autoklavqualität verspricht [33, 34]. Auch Cytec hält ein Patent für Prepregs mit Oberflächenöffnungen in der Imprägnierung [35]. Als Textilstruktur werden hierbei Gewebe verwendet, an deren Rovingkreuzungspunkten die Oberflächenöffnungen vorgesehen sind. Die Advanced Composite Group, heute ebenfalls Teil der Solvay Gruppe, entwickelte die ZPreg-Technologie, bei der die Textilien in Streifenform imprägniert werden [36–38]. Das ZPreg-System ist hierbei das einzige, das eine gezielte Form der Oberflächenöffnungen anstrebt.

Der Ansatz der Musterimprägnierung mit flüssigen Harzsystemen wird auch an der University of Southern California untersucht. So fertigten Schechter et al. [39, 40] Prepregs, bei denen die Textiloberfläche nur teilweise mit flüssigen Harzsystemen bedeckt ist [41]. Neben der aufwendigen Fertigung (teilweise mehrere Stunden pro Lage), stellt eine nur begrenzt reproduzierbare Mustergeometrie (insb. hinsichtlich des BGs) Herausforderungen dar. Dies

ist vor allem auf die Verwendung der flüssigen Harzsysteme zurückzuführen, welche aufgrund von Benetzungs- und Kapillarkrafteffekten zum Zerfließen neigen [42, 43]. Für eine reproduzierbare Semipregherstellung, welche für eine robuste Bauteilfertigung unabdingbar ist, muss die Viskosität des Harzsystems bei Raumtemperatur so hoch sein, dass die Musterstruktur erhalten bleibt. Gleichzeitig muss die Viskosität des Harzes bei der Verarbeitung gering genug sein, um die trockenen Textilstellen zu final zu imprägnieren [39, 40]. Da die im MarineCare-Projekt verwendeten SR bei Raumtemperatur fest sind und bei Verarbeitungstemperatur eine niedrige Viskosität aufweisen, sind sie für eine geometrisch reproduzierbare und stabile Vorimprägnierung in Musterform im Vergleich zu flüssigharzbasierten Prepregs prädestiniert.

2.5. Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse

Nachfolgend sind die erfolgten Veröffentlichungen der Ergebnisse und PR-Beiträge nach Kategorie und Datum aufgelistet.

Journal- & Konferenz-Paper:

- J. P. Janzen**,** D. May, „Solid epoxy prepregs with patterned resin distribution: Influence of pattern and process parameters on part quality in vacuum-bag-only processing“, Polym. Compos., 2023, pc.27696, doi: 10.1002/pc.27696
- J. P. Janzen, D. May; „Solid Epoxy Prepregs with Patterned Resin Distribution for Out-of-Autoclave Processing”; Proceedings of SAMPE Madrid 2023

Konferenzen, Poster & Vorträge:

- J. P. Janzen, D. May; Online Forum "Composites and Sustainability"; Composites United; 29 June 2021 - 1 July 2021; MarineCare – Sustainable boats and water sports equipment
- J. P. Janzen, D. May, P. Mitschang; “Sustainable Composites for Marine Applications”; Poster, 30 Jahre-IVW Kolloquium: 08 und 09.09.2021, Kaiserslautern
- J. P. Janzen, D. May; „Solid Epoxy Prepregs with Patterned Resin Distribution for Out-of-Autoclave Processing”; SAMPE Madrid 2023

PR-Beiträge:

- CU reports 01_2021: Saubere Meere / Unsoiled seas

https://digitalmagazin.b4bschwaben.de/de/profiles/610b21560ff9/editions/d7b866df035bfeaabba9/pages/page/36

- Zukunftsregion Westpfalz: 03_2021 https://www.zukunftsregion-westpfalz.de/sites/default/files/zrw-newsletter_03-2021.pdf
- AVK Composites report 04 2021: MARINECARE Sustainable boats and water sports https://www.avk-tv.de/files/publications/files/avk_compositesreport4_gb_komprimiert.pdf
- Leibniz-Magazin, No. 16 „Wasser"; Frischer Wind: 25.10.2021 https://www.leibniz-magazin.de/alle-artikel/magazindetail/newsdetails/frischer-wind

3 Literatur

[1] *DIN 53362:2003-10, Prüfung von Kunststoff-Folien und von textilen Flächengebilden (außer Vliesstoffe), mit oder ohne Deckschicht aus Kunststoff_- Bestimmung der Biegesteifigkeit_- Verfahren nach Cantilever*, Berlin.

[2] *DIN EN ISO 20337:2020-01, Faserverstärkte Kunststoffe_- Schubversuch mittels Schubrahmen zur Ermittlung der Schubspannungs-/Schubverformungskurve und des Schubmoduls in der Lagenebene (ISO_20337:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_20337:2019*, Berlin.

[3] B. Prakash und Z. Pan, "Effect of Geometry of Rice Kernels on Drying Modeling Results", *Drying Technology*, Jg. 30, Nr. 8, S. 801–807, 2012, doi: 10.1080/07373937.2012.665112.

[4] A. Z. Sahin und I. Dincer, "Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids", *Journal of Food Engineering*, Jg. 71, Nr. 1, S. 119–126, 2005, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.10.024.

[5] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Wärmeatlas,* 11. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.

[6] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik: Grundlagen und apparative Umsetzungen,* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1546882

[7] A. Z. Sahin, I. Dincer, B. S. Yilbas und M. M. Hussain, "Determination of drying times for regular multi-dimensional objects", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Jg. 45, Nr. 8, S. 1757–1766, 2002, doi: 10.1016/S0017-9310(01)00273-3.

[8] M. Mehdikhani, L. Gorbatikh, I. Verpoest und S. V. Lomov, "Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance", *Journal of Composite Materials*, Jg. 53, Nr. 12, S. 1579–1669, 2019, doi: 10.1177/0021998318772152.

[9] X. Yang, L. Zhan, C. Jiang, X. Zhao und C. Guan, "Effect of random vibration processing on void content in composite laminates", *Polym. Compos.*, Jg. 40, Nr. 8, S. 3122–3130, 2019, doi: 10.1002/pc.25156.

[10] A. A. Goodwin, C. A. Howe und R. J. Paton, Hg., *THE ROLE OF VOIDS IN REDUCING THE INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH IN RTM LAMINATES*. Australia: Proceedings of ICCM-11: Proceedings of ICCM-11, 1997.

[11] L. Luo *et al.,* "Identification of voids and interlaminar shear strengths of polymer-matrix composites by optical microscopy experiment and deep learning methodology", *Polym Adv Technol*, Jg. 32, Nr. 4, S. 1853–1865, 2021, doi: 10.1002/pat.5226.

[12] H.-y. ZHU, D.-h. LI, D.-x. ZHANG, B.-c. WU und Y.-y. CHEN, "Influence of voids on interlaminar shear strength of carbon/epoxy fabric laminates", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Jg. 19, s470-s475, 2009, doi: 10.1016/S1003-6326(10)60091-X.

[13] Y. Mujahid, N. Sallih, M. Z. Abdullah und M. Mustapha, "Effects of processing parameters for vacuum-bag-only method on void content and mechanical properties of laminated composites", *Polym. Compos.*, Jg. 42, Nr. 2, S. 567–582, 2021, doi: 10.1002/pc.25848.

[14] W. Hu, T. Centea und S. Nutt, "Mechanisms of inter-ply void formation during vacuum bag-only cure of woven prepregs", *Polym. Compos.*, Jg. 41, Nr. 5, S. 1785–1795, 2020, doi: 10.1002/pc.25497.

[15] J. P. Anderson und M. C. Altan, "Formation of voids in composite laminates: Coupled effect of moisture content and processing pressure", *Polym. Compos.*, Jg. 36, Nr. 2, S. 376–384, 2015, doi: 10.1002/pc.22952.

[16] J. Pietschmann, *Industrielle Pulverbeschichtung: Grundlagen,Verfahren, Praxiseinsatz,* 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1636779

[17] M. L. Berins, *SPI Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc*. Boston, MA: Springer US, 1991.

[18] M. Dickert und G. Ziegmann, *Influence of Binder on the Mechanical Properties and the Permeability of a Non-Crimp Carbon Fabric Preform*.

[19] O. Rimmel, D. Becker und P. Mitschang, "Maximizing the out-of-plane-permeability of preforms manufactured by dry fiber placement", *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Jg. 2, 3-4, S. 93–102, 2016, doi: 10.1080/20550340.2016.1260900.

[20] O. Rimmel, D. May und P. Mitschang, "Impact of stitching on permeability and mechanical properties of preforms manufactured by dry fiber placement", *Polym. Compos.*, Jg. 40, Nr. 4, S. 1631–1642, 2019, doi: 10.1002/pc.24911.

[21] T. D. Bayha *et al., Processing, Properties and Applications of Composites using Powder-Coated Epoxy Towpreg Technology*. Advanced Composites Technology Conference. Verfügbar unter: https://ntrs.nasa.gov/citations/19940010804. Zugriff am: 27. Januar 2022.

[22] N. J. Johnston, Cano, R. J., Marchello, J. M. und D. A. Sandusky, *Powder-Coated Towpreg: Avenues to Near Net Shape Fabrication of High Performance Composites.* Verfügbar unter: https://ntrs.nasa.gov/citations/19960023881. Zugriff am: 27. Januar 2022.

[23] R. M. Baucom und J. M. Marchello, *LaRC Dry Powder Towpreg System.* Verfügbar unter: https://ntrs.nasa.gov/citations/19920013396. Zugriff am: 27. Januar 2022.

[24] J. M. Maguire, K. Nayak und C. M. Ó Brádaigh, "Novel epoxy powder for manufacturing thick-section composite parts under vacuum-bag-only conditions. Part II: Experimental validation and process investigations", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 136, S. 105970, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105970.

[25] J. M. Maguire, P. Simacek, S. G. Advani und C. M. Ó Brádaigh, "Novel epoxy powder for manufacturing thick-section composite parts under vacuum-bag-only conditions. Part I: Through-thickness process modelling", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 136, S. 105969, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105969.

[26] J. M. Maguire, K. Nayak und C. M. Ó Brádaigh, "Characterisation of epoxy powders for processing thick-section composite structures", *Materials & Design*, Jg. 139, S. 112–121, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.068.

[27] C. M. Ó Brádaigh, A. Doyle und D. Doyle, "Electrically-Heated Ceramic Composite Tooling for Out-of-Autoclave Manufacturing of Large Composite Structures", *Proceedings of SAMPE 2011*, 2011.

[28] M. H. Hassan, "A mini review on manufacturing defects and performance assessments of complex shape prepreg-based composites", *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 115, 11-12, S. 3393–3408, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07421-8.

[29] T. Centea, L. K. Grunenfelder und S. R. Nutt, "A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 70, S. 132–154, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.09.029.

[30] L. K. Grunenfelder und S. R. Nutt, "Void formation in composite prepregs – Effect of dissolved moisture", *Composites Science and Technology*, Jg. 70, Nr. 16, S. 2304–2309, 2010, doi: 10.1016/j.compscitech.2010.09.009.

[31] T. Centea und P. Hubert, "Out-of-autoclave prepreg consolidation under deficient pressure conditions", *Journal of Composite Materials*, Jg. 48, Nr. 16, S. 2033–2045, 2014, doi: 10.1177/0021998313494101.

[32] J. J. Torres, M. Simmons, F. Sket und C. González, "An analysis of void formation mechanisms in out-of-autoclave prepregs by means of X-ray computed tomography", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 117, S. 230–242, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.11.010.

[33] NEXX Technologies, *Datasheet - NTC-425 Cyanate Ester Prepreg.* [Online]. Verfügbar unter: https://img1.wsimg.com/blobby/go/acb02ff0-7593-4e2f-b4bf-f93c5484f461/downloads/NTC425_DATASHEET%2009-06-2023.pdf?ver=1698778660083 (Zugriff am: 14. November 2023).

[34] M. Richardson, *NEXX Technologies unveils vertically integrated cyanate ester prepreg system.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.composites.media/nexx-technologies-unveils-vertically-integrated-cyanate-ester-prepreg-system (Zugriff am: 9. Februar 2023).

[35] M. Roman, S. J. Howard und J. D. Boyd, "Curable prepregs with surface openings,"

[36] S. S. Tavares, V. Michaud und J.-A.E. Månson, "Assessment of semi-impregnated fabrics in honeycomb sandwich structures", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 41, Nr. 1, S. 8–15, 2010, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.09.005.

[37] J. Summerscales und T. J. Searle, "Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Jg. 219, Nr. 1, S. 45–58, 2005, doi: 10.1243/146442005X10238.

[38] M. Clifford und A. Long, "Flow Characterisation for Partially Impregnated Prepregs", *Proceedings of ECCM11*, 2004. [Online]. Verfügbar unter: http://www.escm.eu.org/docs/eccm/B027.pdf

[39] S. G.K. Schechter, T. Centea und S. R. Nutt, "Polymer film dewetting for fabrication of out-of-autoclave prepreg with high through-thickness permeability", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 114, S. 86–96, 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2018.08.002.

[40] S. G. K. Schechter, L. K. Grunenfelder und S. R. Nutt, "Design and application of discontinuous resin distribution patterns for semi-pregs", *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Jg. 6, Nr. 2, S. 72–85, 2020, doi: 10.1080/20550340.2020.1736864.

[41] W. T. Edwards, P. Martinez und S. R. Nutt, "Process robustness and defect formation mechanisms in unidirectional semipreg", *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Jg. 6, Nr. 4, S. 198–211, 2020, doi: 10.1080/20550340.2020.1834789.

[42] M. F. Pucci, P.-J. Liotier und S. Drapier, "Capillary wicking in a fibrous reinforcement – Orthotropic issues to determine the capillary pressure components", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 77, S. 133–141, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.05.031.

[43] B. Willenbacher, D. May und P. Mitschang, "Out–of–plane capillary pressure of technical textiles", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 124, S. 105495, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105495.

Kurzbericht MarineCare

Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Aufgabe und Ziel des Teilvorhabens „Untersuchung der Material- und Verarbeitungseigenschaften von Verbundwerkstoffen aus biobasiertem Pulverharz und recycelten Kohlenstofffasern“ im Verbundvorhaben „MarineCare“ war die Entwicklung eines nachhaltigen Verbundwerkstoffes in Sandwichbauweise sowie eines abfallminimierenden Herstellverfahrens. Die Sandwichstruktur kombiniert dabei einen Kern aus Kork oder recyceltem PET, gewonnen aus Einwegflaschen, mit Prepreg-Decklagen aus recycelten Kohlenstofffasern (rCF) und einem biobasierten Feststoffharz auf Epoxidbasis. Das Sandwich soll in einem vakuumbasierten Herstellungsverfahren hergestellt werden können.

Die Hauptaufgaben des IVW lagen in der Erstellung der Anforderungsliste, der Analyse der bisher verwendeten Materialien von Greenboats und Swiss CMT, der Entwicklung und Charakterisierung eines Feststoffharzprepregs mit Musterimprägnierung, dessen Verarbeitung zu Laminaten sowie die Auslegung der Aushärtestrategie. Weiterhin wurde eine Nutzwertanalyse erstellt, um das bisherige Herstellverfahren mit dem neu entwickelten zu vergleichen.

Stand an den angeknüpft wurde:

Bei der Herstellung von Booten und Wassersportgeräten werden oft Verbundwerkstoffe aus Glasfasern und Kunstoffen verwendet. Die energieintensive Faser- und Bauteilherstellung sowie die meist auf Erdöl basierenden Kunststoffe stehen dabei teilweise der Nachhaltigkeit entgegen. Die Greenboats GmbH hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, die Nachhaltigkeit im maritimen Bereich zu erhöhen. Hierfür verwenden sie für ihre Produkte ausschließlich biobasierte oder recycelte Materialien. Ein Hebel zur weiteren Steigerung der Nachhaltigkeit stellt das bisher verwendete Herstellverfahren in Form der Vakuuminfusion dar. Bei der Vakuuminfusion wird eine trockene Textilstruktur in ein Werkzeug eingelegt, mit einer Vakuumfolie abgedichtet und der Aufbau evakuiert. Anschließend wird durch den entstehenden Unterdruck ein flüssiges, duroplastisches Harz infusioniert und unter erhöhter Temperatur, meist in beheizten Zelten, ausgehärtet. Für die Infusion des Harzes sowie dessen Verteilung wird eine signifikante Menge an Einweg-Hilfsmaterialien wie bspw. Anströmleitungen, Verteilungsmedien und Ventilen benötigt. Eine Möglichkeit der Einsparung dieser Hilfsmaterialien ist die Verwendung von vorimprägnierten Textilien, sogenannten Prepregs, welche ebenfalls in einem vakuumbasierten Prozess verarbeitet werden. Der Nachteil bei der Verwendung handelsüblicher Prepregs liegt in deren Notwendigkeit für eine tiefgekühlte Lagerung, um ein vorzeitiges Aushärten zu verhindern. Diese tiefgekühlte Lagerung sowie der Transport sind nicht nur kosten-, sondern auch energieintensiv, wodurch sie den in der Vakuuminfusion verwendeten Materialien im Hinblick auf die Nachhaltigkeit das Nachsehen haben.

Eine Alternative stellen die bei Raumtemperatur lagerbaren Prepregs der Swiss CMT AG dar. Bei diesen Prepregs werden die Textilstrukturen nicht mit einem flüssigen, duroplastischen Harz imprägniert, sondern mit einem Feststoffharz (SR, von engl. Solid Resin) auf Epoxidbasis. Diese SR sind vollständige Harzsysteme (Harz und Härter), die bei Raumtemperatur als spröder, tack-freier Feststoff vorliegen und sich

erst bei Erreichen einer Schmelztemperatur verflüssigen. Die Vernetzungsreaktion ist bis hierhin vernachlässigbar. Erst bei weiter erhöhter Temperatur findet eine relevante Vernetzungsaktivität statt. Solange diese Vernetzungstemperatur nicht erreicht ist, können SR mehrmals aufgeschmolzen, in Form gebracht und wieder solidifiziert werden. Eine Herausforderung bei Feststoffharzprepregs (SRP, von engl. Solid Resin Prepregs) stellt jedoch deren limitierte Drapierbarkeit bei Raumtemperatur dar, wodurch ein manuelles Bestücken der Werkzeuge erschwert wird. Ein weiterer Risikofaktor bei der Verwendung der SRP in vakuumbasierten Verarbeitungsverfahren stellen, analog zu flüssigen Prepregs, Lufteinschlüsse zwischen den Prepreg-Lagen dar. Diese Lufteinschlüsse führen zu Poren innerhalb der Bauteile, wodurch deren mechanische Eigenschaften signifikant reduziert werden. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, werden die Textilien nicht mehr vollflächig imprägniert, sondern in einer ausgeklügelten Musterform. Durch die Musterimprägnierung entstehen trockene Textilbereiche, durch welche zum einen die Evakuierbarkeit erhöht wird und zum anderen eine Drapierbarkeit der SRPs bei Raumtemperatur ermöglicht wird.

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens:

Zunächst wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern eine Anforderungsliste entlang der gesamten Prozesskette erstellt. Hierfür wurden u. a. die bisher verwendeten Materialien von Greenboats und Swiss CMT charakterisiert. Die hierbei ermittelten Werte dienen als Benchmark für die neu zu entwickelnden Materialien. Im nächsten Schritt wurde eine Herstellmethode für die bemusterten SRPs entwickelt (Siebdruck) und hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit evaluiert. Da die rCF-Textilien lokal starke Schwankungen im Hinblick auf Homogenität der Faserverteilung, Dicke und Flächengewicht aufweisen, erfolgte die Untersuchung des Einflusses der Harzmuster auf die resultierende Laminatqualität zunächst mit Standardmaterialien. Weiterhin wurden die verwendeten Hilfsmaterialien im Vakuumaufbau variiert und sukzessive angepasst, um den niedrigst möglichen Materialeinsatz zur Fertigung hochwertiger Bauteile zu ermitteln und hierdurch die entstehenden Abfälle zu minimieren. Die Entwicklung der Harzaushärtestrategie erfolgte zunächst ebenfalls anhand von Standardmaterialien. Der Fokus verschob sich hierbei von der reinen Auswahl der Heizmethode auf die optimale Auslegung des Aushärtezyklus. Nach der Durchführung mehrerer Versuchsreihen wurden die finale Musterform (quadratische Muster, Kantenlänge 10 mm, 75 % Bedeckung der Textiloberfläche) und der finale Aushärtezyklus (Trocknung 15 h bei 60 °C, anschließend 30 Minuten bei 180 °C) festgelegt. Die detaillierte Versuchsdurchführung sowie die Ergebnisse der Versuchsreihen wurden als Open Access veröffentlicht (DOI: https://doi.org/10.1002/pc.27696). Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend auf das biobasierte Harz sowie die rCF-Textilien übertragen. Die hieraus hergestellten Laminate wurden anschließend charakterisiert und mit den Benchmarkmaterialien verglichen.