

Optimierung des Harzauftrages einer Online-Prepreg-Anlage

Forschungspraktikum

Marco Lichtenwald, Matrikelnummer 445830

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

der Technischen Universität Clausthal

Im Sommersemester 2022

Betreuer: Grigori Oehl

Gutachter: Prof. Gehrhard Ziegmann

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Einleitung.....	2
2. Prepreg- und VARI- Verfahren.....	4
3. Durchführung.....	6
4. Auswertung	9
4.1. Herstellung Prepregs	9
4.2. Dichte nach Auftriebsmethode.....	15
4.3. Faservolumengehalt nach Veraschungsmethode	17
4.4. Interlaminare Scherfestigkeit	18
4.5. 3-Punkt-Biegeversuch	20
4.6. Rasterelektronenmikroskopie	24
4.7. Dynamisch mechanische Analyse	26
5. Fazit	28

Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass im Online-Prepreg-Verfahren sich ein gewünschter Faservolumengehalt gezielt ansteuern lässt. Dazu muss das Flächengewicht und die Dichte der Verstärkungsfasern, sowie die Dichte des Harzes und der Flächenauftrag bekannt sein. Die in dieser Arbeit untersuchten Parameter sind der Harzfluss (in g/min) und die Robotergeschwindigkeit (in mm/s). und die abzufahrende Länge der Harzlinien auf einer bestimmten Fläche. Bei zu hohem Harzauftrag fließt das Harz schon bei leichter Kompaktierung aus dem Laminat heraus. Erst bei einem höheren Faservolumengehalt von etwa 40 % fließt so wenig Harz heraus, dass sich theoretische Berechnungen mit den Messergebnissen decken. Beim Harzauftrag sind Anfahreffekte zu beachten. Da die Harzdüse abtropft, wird diese zuerst gefüllt und somit fängt der Harzauftrag erst etwa eine halbe Sekunde nach dem gewünschten Beginn an, sodass es Ausgleichsmaßnahmen in Abhängigkeit zur Robotergeschwindigkeit bedarf.

Die Prepregs sind grundsätzlich in Kombination mit verschiedenen Aushärteverfahren nutzbar. Die Verwendung des Vakuum-Förderbandes der Anlage als Plattform zum vakuumunterstützten Aushärten ist aufgrund niedriger Oberflächenqualitäten nicht geeignet. Die Räumliche Nähe zum Laminiertisch im Nachbarraum oder der angrenzenden Hochleistungspressen bietet eine sinnvolle Ergänzung für flexible Einsatzzwecke der Forschungsanlage.

1. Einleitung

Übliche Prepregs werden von einem Hersteller produziert und tiefgefroren gelagert, damit die Matrix während der Lagerung nicht aushärtet. Im nächsten Schritt werden die Prepregs an die produzierenden Kunden geliefert, wo sie aufgetaut und verarbeitet werden. [1]

Im Online-Prepreg Verfahren wird die Harz imprägnierung von trockenen Fasern am Ort der weiteren Verarbeitung durchgeführt. Dadurch lassen sich die Prepregs just-in-Time fertigen und die tiefgekühlte Lagerung vermeiden. Es müssen lediglich die Ausgangsmaterialien gelagert werden und die Transportwege vom Prepreg-Hersteller zum Verarbeiter entfallen, sodass sich mehr Kontrolle über die Lieferkette erlangen lässt. Außerdem wird der Wertschöpfungsschritt der Prepreg-Herstellung in die eigene Produktion integriert. Dabei werden die trockenen Verstärkungsfasern vor der Harz imprägnierung in die gewünschte endkonturnahe Form geschnitten, weshalb kein imprägnierter Abfall anfällt. Der trockene Faserverschnitt kann daher noch anderweitig, z.B. als Sheet Molding Compound oder für Langfaserverstärkte Thermoplaste verwendet werden. Aufgrund vermiedener Transportwege, verringerter Verschwendung und reduzierter Lagerkosten, bietet das Online-Prepreg Verfahren Potential für eine bessere Wirtschaftlichkeit der Prepreg-Technologie gegenüber dem Beziehen von externen Prepreg-Herstellern. Im Gegensatz zu einem Preform-Verfahren, wo ebenfalls keine Imprägnierten Fasern gelagert werden müssen, lassen sich die Produktionsschritte der Imprägnierung der Fasern und der Aushärtung/Formgebung an zwei unterschiedlichen Orten ausführen und somit eine höhere Flexibilität erreichen.

In einem faserverstärktem Kunststoffsystem arbeiten Faser und Matrix immer im Verbund, dabei nehmen überwiegend die Fasern die auftretenden Lasten auf und die Kunststoffmatrix ermöglicht die Formgebung. Der Faservolumengehalt und damit auch der Matrixanteil sind deshalb eine entscheidende Kenngröße für die mechanischen Eigenschaften. Ein zu hoher Faservolumengehalt kann zu einer unvollständigen Imprägnierung der Fasern führen, sodass manche Stellen im Bauteil Fasern beinhalten, die nicht von Matrix umgeben sind und die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Ein niedriger Faservolumengehalt sorgt jedoch dafür, dass die Festigkeit und Steifigkeit sinken und somit niedrigere spezifische mechanische Kennwerte erreicht werden. Auch kann es dazu führen, dass in der Herstellung das nicht ausgehärtete Reaktionsharzsystem aus dem Bauteil herausläuft und Nachbearbeitung verursacht. Es ist daher nötig, den Harzauftrag in der Produktion von Faserverbundkunststoffen optimal einzustellen, sodass die gewünschten Materialeigenschaften reproduzierbar erreicht werden. [2]

Außerdem können mit faserverstärktem Kunststoff Produkte aus anderen Materialien, wie zum Beispiel Aluminium ersetzt werden. Bei einem Batteriegehäuse für Elektroautos bietet ein Faserverstärkter Kunststoff als Multi-Material-Lösung gegenüber einer Konstruktion aus Aluminium ein Potential zur Kosten- und Gewichtsersparnis und eine bessere Feuerfestigkeit [3]. Dadurch wird eine Diversifikation der Materialauswahl realisierbar und etwaige Lieferengpässe lassen sich besser abfangen. Jedoch ist für einen Markteintritt eines Produktes eine wirtschaftliche Produktion der Bauteile die entscheidende Hürde. Die Beherrschung des Prozesses stellt auf dem Weg zur Marktreife daher einen wichtigen Schritt dar.

Ziel des Forschungspraktikums ist es, die richtigen Parameter für den Harzauftrag der Online-Prepreg Maschine zu evaluieren und den Einfluss auf das Faserverbundsystem zu betrachten. Ein gewünschter Faservolumengehalt soll durch die richtigen Einstellungen erreicht werden.

Auch in Hinblick auf die Produktionsgeschwindigkeit trägt ein optimierter Harzauftrag zur Senkung der Taktzeit bei. Durch Verändern des Harzdurchsatzes muss die Geschwindigkeit des Harzmischkopfes angepasst werden, damit der Harzauftrag auf der entsprechenden Strecke gleichbleibt. Der Harzdurchsatz muss außerdem dem jeweiligen Lagenaufbau angepasst werden, höhere Flächengewichte benötigen mehr Harz auf gleicher Fläche. Es gilt daher einen optimalen Punkt aus Harzdurchsatz und Abfahrgeschwindigkeit zu erreichen und den Einfluss auf das Material zu untersuchen.

2. Prepreg- und VARI- Verfahren

Ein Faserverstärkter Kunststoff besteht aus Fasern (z.B. Glasfasern oder Kohlenstofffasern) und einer die Fasern umgebende Kunststoffmatrix. Aufgrund der deutlich höheren mechanischen Eigenschaften übernehmen die Fasern den Großteil der anliegenden Lasten, während die Matrix dem Formerhalt dient und somit die Eigenschaften der Fasern nutzbar macht. Faserverbundwerkstoffe arbeiten somit immer zusammen. [2]

Als Matrixwerkstoff wird häufig ein duroplastisches Harzsystem verwendet, welcher erst nach Imprägnierung der Fasern aushärtet. Solange das Harz-Härter-Gemisch noch nicht ausreagiert ist, ist eine Formgebung des Faserverbundes möglich. Die Formgebung erfolgt entweder vor der Imprägnierung (Preform) oder danach (Prepreg). [4]

Prepregs werden kontinuierlich durch Imprägnieren von Fasersträngen oder Fasermatten oder diskontinuierlich aus Vorformlingen hergestellt und für die spätere Verwendung gelagert. Durch eine richtig eingestellte Imprägnierung lässt sich eine gleichmäßige und hohe Qualität sicherstellen. Eine tiefgekühlte Lagerung der Prepregs sorgt dafür, dass die Vernetzungsreaktion des Reaktionsharzsystems deutlich langsamer stattfinden und sich die Lagerungsdauer verlängert. Zur Herstellung von Bauteilen aus Prepregs werden diese in Form gegeben und bei höheren Temperaturen, sowie Druck und ggf. mit Vakuum ausgehärtet. Die Investitionskosten in ein Kühllager und Verarbeitungsmaschinen wie z.B. Autoklaven oder Heißpressen sind hoch, sodass sich dies auf den Preis der Bauteile auswirkt. Verwendung finden Prepregs meist in gewichtssensitiven Hochleistungsanwendungen, wie Luftfahrt, Sportgeräte und Motorsport, wo hohe Leistungen die Materialkosten rechtfertigen. [1]

Das Preform-Verfahren zeichnet sich hingegen dadurch aus, dass Faserhalbzeuge in eine Form gegeben werden und anschließend der Faseraufbau mittels Vakuums und ggf. Druck mit Harz infundiert wird. Das VARI-Verfahren (Vacuum Assisted Resin Infusion) ist ein solches Preform-Verfahren. Hier wird mittels Vakuum Harz in einen Lagenaufbau aus Verstärkungsfasern eingebracht. Durch den äußeren Umgebungsluftdruck wird zusätzlich eine Kompaktierung des Laminates erreicht, was für eine gleichmäßige Harzverteilung sorgt. Die Infusionszeit lässt sich mit einer Fließhilfe reduzieren, da hierdurch der Abfall der Druckdifferenz zwischen dem angeschlossenen Vakuum und des Umgebungsluftdruckes über die Fließstrecke des Harzes weniger stark ausfällt. Der Lagenaufbau im VARI-Verfahren besteht, wie in Abbildung 1 dargestellt, aus dem Faser-Harz-Laminat, welches auf einer mit Trennmittel versehenen Werkzeughalbform (z.B. Laminiertisch) liegt. Darüber liegt ein Abreißgewebe, um den Rest des Aufbaus vom Laminat nach dem Aushärten abzutrennen. Auf dem Abreißgewebe befindet sich die Fließhilfe und darüber eine Vakuumfolie, welche mit Vakuumdichtband den gesamten Aufbau abdichtet. Auf einer Seite befindet sich der Harzeinlass und auf der anderen Seite der Vakuumeinlass. [5]

Sobald der Lagenaufbau weit genug mit Harz infundiert ist, wird der Harzeinlass abgeklemmt und nach der vollständigen Infundierung des Laminates das Vakuum abgeklemmt. Anschließend wird durch erhöhte Temperatur das Harz ausgehärtet (z.B. im Ofen oder mittels einer Heizdecke). Nach dem Aushärten wird alles außer das hergestellte Faserverbund-Bauteil entsorgt.

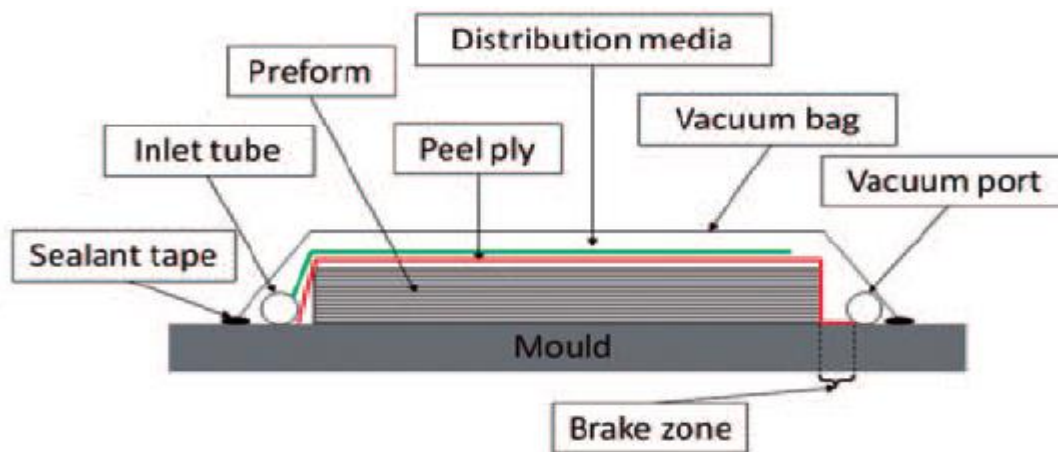


Abbildung 1: Beispiel VARI-Aufbau. [5]

Im Online-Prepreg-Verfahren werden endkonturnahe Faserzuschnitte zu Prepregs imprägniert. Diese lassen sich just-in-time fertigen und benötigen keine Tiefkühlagerung. Der Faserverschnitt ist dabei nicht mit Harz getränkt und eignet sich daher fürs Recycling. Bei der Online Prepreg-Anlage (Abbildung 2) werden die Faserlagen aus dem Rollengatter abgerollt und automatisch zugeschnitten. Ein Förderband transportiert die Faserzuschnitte zu einem Greifer, der die Lagen frei drehbar auf ein weiteres Förderband ablegt. An dem zweiten Förderband sind außerdem Vakuumpumpen angeschlossen und darauf ist eine luftdurchlässige Membran abgerollt, sodass es vor Harz geschützt ist. Darauf findet die Faserimprägnierung statt. Die einzelnen Lagen der Bauteile werden von einem Roboterarm durch eine Düse mit Harz imprägniert. Eine Vorwärmung zur Trocknung der Fasern, sowie eine Nacherwärmung zum Überführen der Matrix in einen teilvernetzten B-Zustand (b-stage), ist durch zwei Heizstrahler vor und hinter dem Roboterarm ebenfalls möglich. [6]

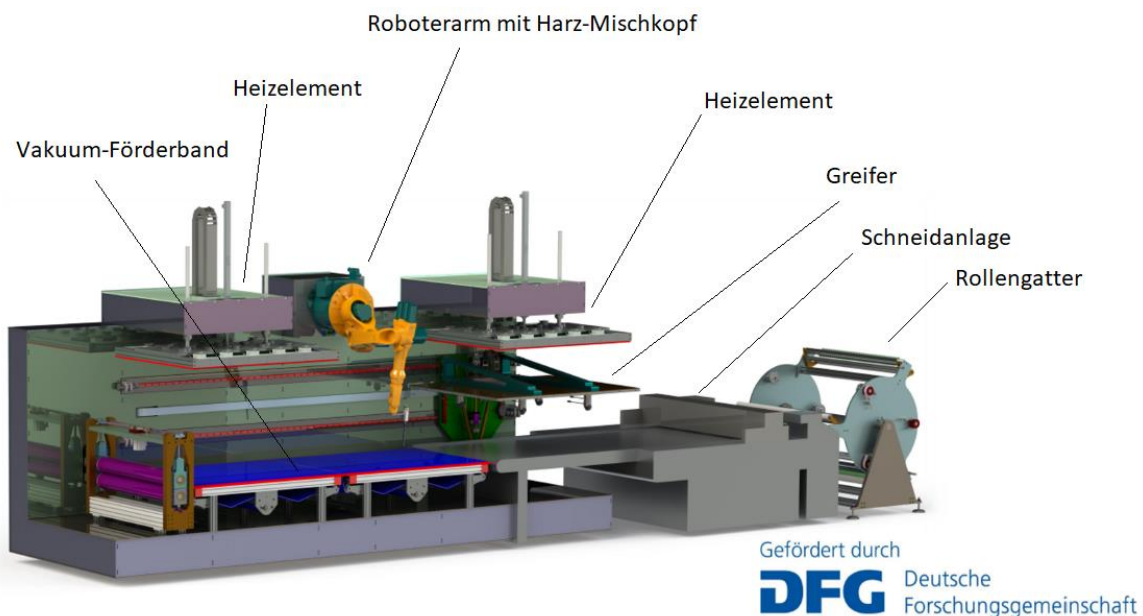


Abbildung 2: Aufbau der Online-Prepreg-Anlage. [7]

3. Durchführung

Der Automatische Zuschnitt erfolgt nach 2D-CAD-Daten. Hierzu wird das Programm „Qcad“ verwendet und nach einer vorläufigen Qcad-Anleitung für die Online-Prepreganlage (v 1.4) von Herrn Hefft vorgegangen [8]. Neben den Außenmaßen sind in der Datei auch die abzufahrende Harzspur und die Aufnahmepunkte der Greifer enthalten. Die Abbildung 3 zeigt das CAD-Bild vom Probenaufbau. Hier sind 6 gleiche Lagen übereinandergestapelt, sodass sie in einem 2D-Bild als eine einzige Lage erscheinen aber als mehrere Lagen in der Datei hinterlegt ist.

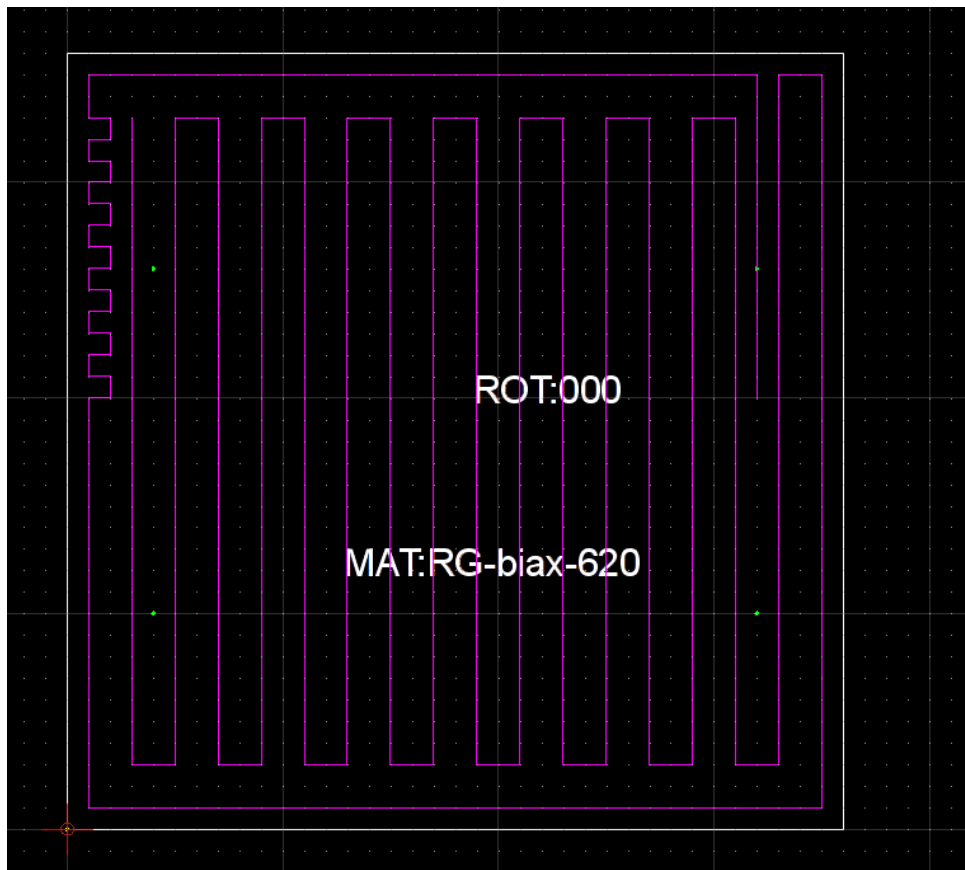


Abbildung 3: CAD-Bild des Prepreg-Bauteils.

Das Quadrat in der Abbildung 3 hat eine Seitenlänge von 360 mm. Die inneren vertikalen Harzlinien haben vom Rand einen Abstand von 30 mm und untereinander einen Abstand von 20 mm. Die äußeren Harzlinien sind 10 mm vom Bauteilrand entfernt. Außerdem sind Harzlinien sind miteinander verbunden, da hierdurch der Maschine eine klare Harzspur vorgegeben wird und keine ungewollten Verbindungslinien automatisch eingefügt werden. Im oberen linken Bereich ist ein rechteckiger Verlauf am Rand, da das Harz erst nach einer kurzen Zeit aufgetragen wird und deshalb auf den ersten paar Zentimeter kein Harz aufgetragen wird. Dieser nicht aufgetragene Bereich soll dadurch ausgeglichen werden. Im oberen rechten Bereich wurde zusätzlich eine Auslaufzone hinzugefügt, da das Harz kurz vorher nicht mehr aufgetragen wird. Die vier Aufnahmepunkte sind ebenfalls in der CAD-Datei eingetragen und müssen entsprechend der Anleitung einen Spreizwinkel von unter 78° aufweisen, da die Greifer sich sonst gegenseitig blockieren.

Als Verstärkungsfaser wird ein biaxiales (0/90) Glasfasergelege mit einem Flächengewicht von 620 g/m² von der R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH verwendet. Als Harzsystem findet EPIKOTE™ MGS™ RIMR035c mit dem Härter EPIKURE™ MGS™ RIMH038 von Hexion Anwendung. Zur Trocknung der Fasern wird bei den Heizstrahlern eine Zieltemperatur von 65 °C mit 60 % Leistung eingestellt. Die Leistung der Vakuumpumpe für das Förderband beträgt 80 %. An der Online-Prepreg-Anlage werden die in Tabelle 1 enthaltenen Harzdurchsätze und Robotergeschwindigkeiten eingestellt.

Tabelle 1: Einstellungen Harzfluss der Online-Prepreg-Anlage.

Probe	Harzdurchsatz in g/min	Geschwindigkeit Roboter in mm/s
1.	110	200
2.	150	200
3.	200	200
4.	150	300
5.	200	300
6.	250	300
7.	200	400
8.	250	400
9.	300	400

Auf die Membran des Förderbandes wird ein Abreißgewebe an die Position gelegt, wo die Faserzuschnitte zum Imprägnieren vom Greifer abgelegt werden. Dadurch soll ein Klebenbleiben der Membran am Bauteil verhindert werden. Nach dem Imprägnieren wird mit Vakuumdichtband um das Bauteil eine Vakuumfolie angeklebt und abgedichtet, sodass sich ein Vakuumaufbau ergibt. Der Aufbau lässt nur noch über die Membran an der Unterseite Luft hindurch und durch die Vakuumpumpen des Förderbandes wird im Aufbau Unterdruck erzeugt. Darauf wird mit einer Heizdecke über Nacht ca. 20 Stunden bei 80 °C die Matrix ausgehärtet. Während der gesamten Aushärtezeit ist die Vakuumpumpe aktiv. Ziel dieser Aufbauten ist ein Vergleich zwischen verschiedenen Maschineneinstellungen für den Harzauftrag bei gleichen Bedingungen und zwischen VARI-Aufbauten.

Als Referenz werden daher zwei gleich große quadratische Bauteile im VARI-Verfahren hergestellt. Hierzu wird ein Lagenaufbau ähnlich des in Abbildung 1 dargestelltem errichtet. Außerdem wird ein Trennmittel zwischen Werkzeugform aufgetragen und um den Vakuumeinlass befindet sich in der Auslaufzone ein Vliesgewebe. Die Aushärtung erfolgt ebenfalls unter einer Heizdecke bei 80°C für ca. 20 Stunden.

Die Probekörper für die jeweiligen Materialprüfungen werden an einer Probensäge aus den hergestellten Platten herausgesägt.

Untersucht werden die scheinbare interlaminae Scherfestigkeit (ILSF) im Kurzbiegeversuch nach DIN EN ISO 14130 an Probekörpern mit der Länge von 30 mm und einer Breite von 15 mm.

Außerdem werden 3-Punkt-Biegeversuche nach DIN EN ISO 14125 durchgeführt. Die Probekörper der Klasse III haben eine Länge von 60 mm und eine Breite von 15 mm. Zusätzlich wird an ausgewählten Proben die Bruchstelle in einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Dadurch sollen die Harzverteilung zwischen den Fasern bewertet werden.

Eine dynamisch-mechanische Analyse (DMA) wird nach DIN EN ISO 6721-1, zur Ermittlung des komplexen Schubmoduls und des Glasübergangsbereiches durchgeführt. Die Probekörper haben eine Länge von 32 mm und eine Breite von 10 mm.

Für die Dichteprüfung nach der Auftriebsmethode werden Probekörper von 15 mm Länge und 15 mm Breite verwendet. Diese Probekörper werden anschließend zur Bestimmung des Faservolumengehaltes im Muffelofen verascht, sodass sich der Fasermassenanteil bestimmen lässt.

4. Auswertung

4.1. Herstellung Prepregs

Die Länge der in QCad eingestellten Harzspur entspricht bei einer Robotergeschwindigkeit von 200 mm/s insgesamt 6700 mm. Der schnell wechselnde rechteckige Verlauf in der oberen linken Ecke der Abbildung 3 dient als Ausgleich für die Totzeit am Beginn der Imprägnierung und muss länger sein, je höher die Robotergeschwindigkeit ist. Deshalb werden bei 200 mm/s 4 rechteckige Verläufe hinzugefügt, was gegenüber einem linearen Verlauf eine 80 mm längere Harzlinie auf derselben Länge entspricht. Am Ende des Harzverlaufes wird eine kleine Strecke nicht mehr imprägniert. Hier wird eine fehlende Strecke von ca. 100 mm angenommen. Die eingestellte Ausgleichsstrecke von 150 mm am Ende (Abbildung 3 oben rechts) ist beim Imprägnieren sichtbar ein wenig länger. Insgesamt wird daher die Länge der tatsächlich aufgetragenen Harzlinie mit $L = 6520$ mm angenommen.

Aus dem Harzdurchsatz q und der Geschwindigkeit des Roboters v lässt sich die auf den Harzlinien abgegebene Harzmenge pro Meter (Metergewicht) berechnen:

$$\frac{m}{s} = \frac{q}{v} = \frac{g}{\text{min mm}} \frac{s}{60} = \frac{1000}{60} \frac{g}{m} \quad (1)$$

Mit einer angenommenen Länge der Harzlinien von $L = 6,52$ m und einer quadratischen Bauteilfläche von $A = 0,36 \text{ m} \times 0,36 \text{ m}$ ist die Harzmenge pro Quadratmeter als flächenbezogene Masse (Flächengewicht) bestimmbar:

$$\frac{m}{s^2} = \frac{L}{A} \cdot \frac{m}{s} = \frac{1000}{60} \frac{g}{m} \cdot \frac{6,52}{0,36^2} \frac{m}{m^2} \quad (2)$$

Die in Tabelle 2 dargestellten Meter- und Flächengewichte sind daher theoretische angenommene Werte der Harzmenge. Es ist zu erwarten, dass im Bauteil diese berechnete Harzmengen nicht überschritten werden, da sich in den Randbereichen des Aufbaus und auf dem Abreißgewebe überschüssiges Harz sammelt und somit nicht alles aufgetragene Harz im Faserverbund verbleibt. Die Zahlen basieren daher nur auf Berechnungen auf Basis von eingestellten Werten und Annahmen und entsprechen daher nicht den tatsächlichen Werten. Sie dienen dem Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Fasermassen- und Volumengehalten.

Tabelle 2: Harzauftrag der Online-Prepreg-Anlage.

Probe	Harzdurchsatz in g/min	Geschwindigkeit Roboter in mm/s	Metergewicht Harzlinie in g/m	Theoretisches Flächengewicht in g/m ²
1.	110	200	9,17	461,3
2.	150	200	12,50	628,9
3.	200	200	16,67	838,7
4.	150	300	8,33	419,1
5.	200	300	11,11	558,9
6.	250	300	13,89	698,8
7.	200	400	8,33	419,1
8.	250	400	10,42	524,2
9.	300	400	12,50	(628,9)

Bei Probe Nr. 9 Ist aufgrund eines Maschinenfehlers bei einer Faserlage nur etwa eine Hälfte mit Harz imprägniert worden, sodass das theoretische Flächengewicht bei allen 6 Lagen bezogen ca. 1/12 niedriger ist (also ca. 575 g/m²). Das Harz verteilt sich zwar, dennoch wird vermieden aus der betroffenen Plattenhälfte eine Probe zu verwenden. Es ist daher zu erwarten, dass der Harzanteil gegenüber Probe Nr. 2 niedriger ist.

Bei höheren Robotergeschwindigkeiten wird das Harz durch eine Richtungsänderung aufgrund der eigenen Trägheit stärker über die Ecken der Harzlinien hinausgeworfen. Dadurch muss ggf. eine Anpassung erfolgen, sodass eine niedriger über dem Bauteil ansetzende Harzdüse nötig wird und das Harz somit eine kürzere frei fallende Strecke überwinden muss.

Aus dem Flächengewicht des Harzes und dem Flächengewicht der Fasern von 620 g/m² lässt sich der theoretische Fasermassenanteil $\psi_{theorie}$ berechnen:

$$\psi = \frac{m_{Faser}}{m_{Faser} + m_{Matrix}} \quad (3)$$

Mit den angenommenen Dichten der Matrix von $\rho_{Matrix} = 1,15 \text{ g/cm}^3$ [9] und der Fasern von $\rho_{Faser} = 2,6 \text{ g/cm}^3$ [10] / [11], lässt sich das Flächenvolumen der Matrix und der Faser und damit der theoretische Faservolumengehalt berechnen:

$$\varphi = \frac{V_{Faser}}{V_{Faser} + V_{Matrix}} = \frac{\frac{m_{Faser}}{\rho_{Faser}}}{\frac{m_{Faser}}{\rho_{Faser}} + \frac{m_{Matrix}}{\rho_{Matrix}}} \quad (4)$$

Bei bekannter Dichte des Faserverbundes $\rho_{Verbund}$ lässt sich ebenfalls der Faservolumengehalt bestimmen:

$$\varphi = \frac{\psi * \rho_{Verbund}}{\rho_{Faser}} \quad (5)$$

Umgestellt zur Dichte ergibt sich:

$$\rho_{Verbund} = \frac{\varphi * \rho_{Faser}}{\psi} \quad (6)$$

Die berechneten Fasermassenanteile, Faservolumenanteile und Dichten in der Tabelle 3 entsprechen den rein aus Angaben verfügbaren Werten. Dabei ist nicht mit einbezogen, dass Harz nicht vollständig ins Verbundbauteil übergeht. Daher müsste der tatsächliche Faseranteil im Bauteil, sowie die Dichte höher sein als die berechneten Werte.

Tabelle 3: Theoretische Fasermassenanteile, Faservolumenanteile und Dichten.

Probe	$\psi_{Theorie}$	$\varphi_{Theorie}$	$\rho_{Verbund;Theorie}$ in g/cm ³
1.	57,30 %	37,25 %	1,690
2.	49,60 %	30,33 %	1,590
3.	42,50 %	24,63 %	1,507
4.	59,70 %	39,59 %	1,724
5.	52,60 %	32,92 %	1,627
6.	47,00 %	28,18 %	1,559
7.	59,70 %	39,59 %	1,724
8.	54,20 %	34,35 %	1,648
9.	49,60 %	30,33 %	1,590

Für den Faservolumenanteil der Prepreg-Proben ist hier ein Bereich von ca. 25 % – 40 % zu erwarten. Höhere Harzgehalte fließen leichter aus dem Aufbau heraus. Es ist davon auszugehen, dass die Abweichung der theoretischen zu den tatsächlichen Werten kleiner werden, je höher der Faseranteil ist, da mehr Harz bei niedrigem Faseranteil herausgedrückt wird.

In Abbildung 4 ist am Aufbau der Probe Nr. 5. zu sehen, dass sich Harz im Randbereich ansammelt und das Abreißgewebe auch fast vollständig mit Harz getränkt ist. Ebenso zeichnet sich der Untergrund der Platten von den Kettensegmenten des Förderbandes ab, über welches das Vakuum angeschlossen ist. Im Vergleich zur Abbildung 5 ist zu sehen, dass bei der Probe Nr. 4. weniger Harz außerhalb des Bauteils verbleibt, da die Harzmenge niedriger ist.



Abbildung 4: Ausgehärtete Prepreg-Platte der Probe Nr. 5.

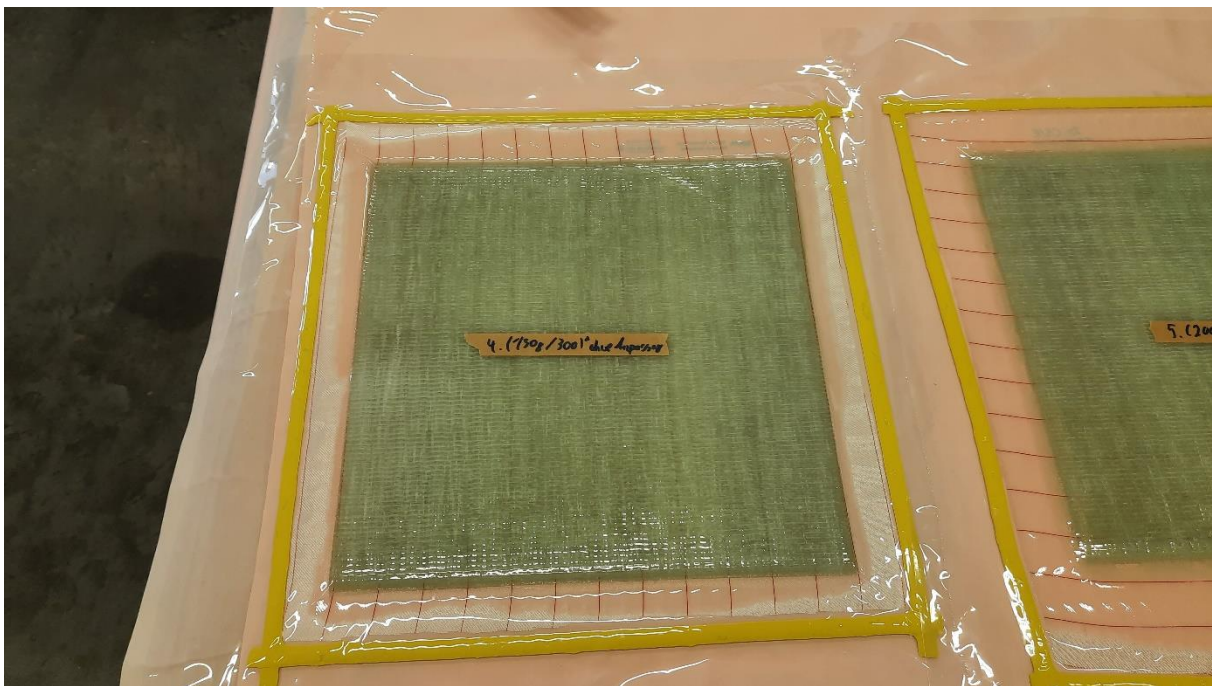


Abbildung 5: Ausgehärtete Prepreg-Platte der Probe Nr. 4.

Die Vakuumaufbauten lassen sich schnell errichten und bis zu drei Proben passen zum Aushärten gleichzeitig unter die Heizdecke. Es ist zu beachten, dass bei dem Aufbau das Vakuum von unten anliegt, während sich Lufteinschlüsse im Harz nach oben bewegen. Da die Kompaktierung im Vakuumaufbau niedrig ist, ist die Verteilung des Harzes weniger stark durch das Zusammenpressen des Aufbaus beeinflusst. Bei den gewählten hohen Harzanteilen stellt dies jedoch kein Problem dar, da alle Platten vollständig von Harz durchtränkt sind. Die Verteilung des Harzes zwischen den Fasern findet daher zu größerem Anteil durch Kapillarkräfte als durch äußere Kräfte statt.

Mit der abdichtenden Vakuumfolie bilden sich daher an der Oberseite des Bauteils Luftblasen und beeinflussen die Oberflächenqualität. Anhand der Abbildung 6 lässt sich die durch Luftblasen entstehende Oberfläche erkennen. Die Fasern wirken leicht gewellt, da sich die Oberfläche der Vakuum-Förderbandes auf die Struktur des Bauteils Einfluss nimmt.



Abbildung 6: Luftblasen an Oberfläche bei Proben Nr. 6.

Weiterhin ist die Qualität des Vakuums als niedrig zu bewerten. Das Förderband ist nicht für diesen Zweck vorgesehen. Bei Errichtung des Vakuumaufbaus ist zu beachten, dass die Vakuumfolie auf das mit Harz getränkte Bauteil erfolgt und die Handhabung gegenüber des „trockenen“ Aufbaus beim VARI-Verfahren erschwert. Ein kurzer Vergleich dieses Vorgehens gegenüber dem VARI-Verfahren ist in der Tabelle 4 ausgeführt.

Tabelle 4: Online-Prepreg (Vakuumaufbau auf Förderband) und VARI im Vergleich.

	Online Prepreg	VARI
Zuschnitt + Harzmischung	Automatisch	Manuell
Harzinfusion	Automatisch	Manuell + Schlauch anbauen
Vakuumaufbau	nass	trocken
Dauer Aufbau	kurz	lang
Vakuumanschluss	Unter dem Bauteil, dauerhaftes Vakuum	Hinter dem Bauteil + Schlauch anbauen, ca. 30 Minuten
OF-Qualität	niedrig	hoch
Anzahl gleichzeitiger Aufbauten	ca. 3, blockiert Anlage	vom Laminiertisch (und Heizdecken) begrenzt

Die letzten drei Punkte sind abhängig vom Vakuumaufbau auf dem Förderband. Da die Vakuumpumpen der Online-Prepreg-Anlage während der Aushärtezeit durchgehend in Betrieb sind, wurden eine Beschwerde wegen Lärmbelästigung geäußert. Diese Aushärtemethode ist daher nicht weiterzuempfehlen. Alternative Aushärtemethoden sind daher zu empfehlen, denkbar ist die Anschaffung einer Form für die ebenfalls im Technikum vorhandene Presse oder ein dem VARI-Aufbau ähnlicher Vakuumaufbau auf dem Laminierstisch, sodass sich die Vorteile des VARI-Verfahrens mit der automatisierten Prepreg-Herstellung kombinieren lassen.

Die oben bereits erwähnte Totzeit am Anfang der Imprägnierung wurde grob untersucht und erfordert Ausgleichmaßnahmen. Für eine Robotergeschwindigkeit von 200 mm/s werden im CAD-Programm 4 rechteckige Harzverläufe eingetragen, bei 300 mm/s werden 7 und bei 400 mm/s werden 10 rechteckige Verläufe eingestellt (siehe Abbildung 3). Unter Annahme einer zeitlich konstanten Verzögerung müsste für eine Erhöhung der Robotergeschwindigkeit um 100 mm/s jedoch eine Erhöhung dieser Anzahl um 2 „Rechtecke“ erfolgen, da dies proportional zu 4 Rechtecken bei 200 mm/s ist. Weiterhin basiert diese Anpassung der Harzlinie nicht auf Messungen, sondern auf Beobachtungen. Als Ursache dieses fehlenden Anfangs des Harzauftrags kommen zwei Einflüsse infrage. Das in der Düse befindliche Harz tropft bei Nichtverwendung heraus, sodass diese sich zuerst mit Harz füllt, bevor es aufgetragen werden kann. Ein höherer Harzdurchsatz füllt die Düse jedoch schneller auf, sodass der Harzauftrag früher anfangen müsste. Da die Harzpumpe einer Trägheit unterliegt, wird nicht sofort die Arbeitsdrehzahl erreicht und damit der gewünschte Massenfluss mit einer kleinen Verzögerung erreicht. Während dieser Beschleunigungsphase der Pumpe, wird die Düse bereits befüllt, sodass bis Erreichen des Nenndurchsatzes nur kleine zeitliche Unterschiede zwischen den eingestellten Masseflüssen entstehen und eine genaue Angabe durch einfache Beobachtung nicht möglich ist. Es tritt somit annähernd eine zeitlich konstante Verzögerung ein. Bei 80 mm fehlender Strecke für eine Geschwindigkeit von 200 mm/s, entspräche die Verzögerung nur ca. 0,4 s. Im Vergleich zur Gesamtstrecke der Harzlinie, ist der Fehler klein und wird für die hier angefertigten Proben vernachlässigt, zumal der grob durchgeführte Ausgleich diesen Fehler zusätzlich minimiert. Für kleinere Bauteile hat die Totzeit einen größeren Einfluss und eine nähere Untersuchung des Anfahrverhalten am Anfang und das Abschaltverhalten am Ende der Imprägnierung wird wichtiger.

4.2.Dichte nach Auftriebsmethode

Zur Bestimmung der Dichte werden die Probekörper an der Luft gewogen und anschließend das Gewicht unter Wasser bestimmt, wobei hier die Auftriebskraft des Wassers der Gewichtskraft des Probekörpers entgegenwirkt. Bei bekannter Temperatur des Wassers lässt sich mittels Tabellen die Dichte des Wassers ρ_{fl} bestimmen. Mit dem Gewicht des Probekörpers an Luft W_a und unter Wasser W_{fl} lässt sich die Dichte des Probekörpers ρ berechnen:

$$\rho = \frac{W_a * \rho_{fl}}{W_a - W_{fl}} \quad (7)$$

Jeweils 3 quadratische Probekörper von 15 mm Seitenlänge werden aus den hergestellten Platten herausgesägt und die jeweilige mittlere Dichte bestimmt. Die gemessenen Dichten sind in Tabelle 5 aufgeführt. Zum Vergleich sind die theoretisch berechneten Dichten aus der Tabelle 3 ebenfalls enthalten. Die Abweichung gibt an, um wie viel Prozent die Theoretische Dichte höher ist als die Gemessene.

Tabelle 5: Gemessene und theoretische Dichten.

Probe	ρ in g/cm ³	$\rho_{Verbund;Theorie}$ in g/cm ³	Abweichung
VARI-1	1,840	---	---
VARI-2	1,856	---	---
1.	1,575	1,690	7,27 %
2.	1,538	1,590	3,37 %
3.	1,497	1,507	0,68 %
4.	1,603	1,724	7,52 %
5.	1,571	1,627	3,58 %
6.	1,520	1,559	2,58 %
7.	1,602	1,724	7,62 %
8.	1,544	1,648	6,74 %
9.	1,538	1,590	3,40 %

Entgegen der Annahme, dass die tatsächliche Dichte höher ausfallen müsse als die theoretische Dichte zeigt sich hier das Gegenteil. Die Ursache hierfür sind die Lufteinschlüsse an der Oberfläche der Prepreg-Proben, welche im Tauchbad nicht vollständig von Wasser ausgefüllt werden und somit die Auftriebskraft der Lufteinschlüsse die Ergebnisse verfälschen. Die Werte der gemessenen Dichte liegen näher zusammen als bei den theoretischen Dichten. Dies deckt sich mit der Annahme, dass bei höheren Harzgehalten mehr Harz aus den Faserlagen herausgedrückt wird, sodass die gemessenen Dichten (von 1,497 g/cm³ bis 1,603 g/cm³) näher aneinander liegen als theoretisch berechnet (von 1,507 g/cm³ bis 1,724 g/cm³). Der Unterschied der Dichten zwischen den Proben 1 und 3 (sowie zwischen 4 und 6 bzw. zwischen 7 und 9) ist bei den gemessenen Werten niedriger als in den theoretischen Werten. Allgemein bedeutet ein

höherer Harzauftrag eine niedrigere Dichte, da die Dichte des Harzes niedriger ist als die Dichte der Fasern. Aufgrund der Oberflächenqualität der Prepreg-Proben und der damit verbundenen Lufteinschlüsse an der Oberfläche, ist diese Art der Dichtebestimmung hier nicht zielführend. Zur Bestimmung des Faservolumengehaltes nach Formel 5 ist diese Dichte daher nicht verwendbar.

Die Dichte der Probekörper im VARI-Verfahren ist deutlich höher als die der Prepreg-Proben. An der Oberfläche dieser Probekörper sind auch keine Luftbläschen erkennbar. Das höher erreichbare Vakuum sorgt hierbei für eine höhere Kompaktierung, sodass ein hoher Fasergehalt und damit eine hohe Dichte gewährleistet wird.

4.3. Faservolumengehalt nach Veraschungsmethode

Zur Bestimmung des Faservolumengehaltes nach der Veraschungsmethode wird das Gewicht der getrockneten Materialprobe bestimmt. Danach wird die Matrix im Muffelofen verbrannt, indem eine Zieltemperatur von 600 °C innerhalb von 30 Minuten angefahren und über eine Dauer von 2 Stunden gehalten wird. Im Anschluss wird der überwiegend aus Glasfasern bestehende Ascherest gewogen.

In der Tabelle 6 werden nach der Formel (3) der Fasermassenanteil, nach der Formel (4) der Faservolumengehalt und nach der Formel (6) die Dichte aus jeweils 3 Proben bestimmt. Zum Vergleich ist der theoretische Faservolumengehalt aus Tabelle 3 enthalten. Die relative Abweichung gibt an, wie viel größer der Gemessene gegenüber den berechneten Faservolumengehalt ist.

Tabelle 6: gemessener Fasermassenanteil ψ , Faservolumengehalt φ und Dichte $\rho_{Verbund}$.

Probe	ψ	φ	$\rho_{Verbund}$ in g/cm ³	$\varphi_{Theorie}$	Relative Abweichung
VARI-1	67,85 %	48,29 %	1,850	---	---
VARI-2	68,73 %	49,29 %	1,865	---	---
1.	58,04 %	37,96 %	1,700	37,25 %	1,93 %
2.	53,43 %	33,66 %	1,638	30,33 %	10,98 %
3.	47,26 %	28,39 %	1,562	24,63 %	15,26 %
4.	59,68 %	39,57 %	1,723	39,59 %	-0,03 %
5.	53,83 %	34,03 %	1,643	32,92 %	3,38 %
6.	49,66 %	30,38 %	1,591	28,18 %	7,81 %
7.	59,97 %	39,86 %	1,728	39,59 %	0,69 %
8.	56,05 %	36,06 %	1,673	34,35 %	4,97 %
9.	53,84 %	34,03 %	1,643	30,33 %	12,20 %

Die Werte der Proben 1, 4 und 7 decken sich mit den theoretischen Werten. Bei geringer Harzauftragsmenge fällt daher nur wenig überschüssiges Harz außerhalb des Bauteils an. Mit steigenden aufgetragenen Harzmengen unterscheiden sich die Werte jedoch immer mehr. Das deckt sich mit der Annahme, dass höhere Harzgehalte vermehrt aus dem Bauteil herausgedrückt werden und zunehmend von den theoretischen Werten abweichen. Bei Faservolumengehalten von über 39 % sinkt die relative Abweichung auf unter 1 %.

Im Vergleich zu den gemessenen Dichten nach der Auftriebsmethode aus Tabelle 5, zeigen die VARI-Proben hier keine nennenswerte Abweichung, während alle Prepreg-Proben eine höhere Dichte aufweisen. Da sich bei der Veraschungsmethode mögliche Lufteinschlüsse an der Oberfläche oder im Bauteil nicht auf die Messung auswirken und sich diese Werte besser mit den theoretisch berechneten Werten decken, eignet sich diese Methode zu Bestimmung der Dichte und des Faservolumengehaltes besser, vorausgesetzt die Dichten der Matrix und der Fasern sind bekannt.

4.4. Interlaminare Scherfestigkeit

Die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSF) wird im 3-Punkt-Kurzbiegeversuch nach DIN EN ISO 14130 an einer Universalprüfmaschine von Zwick bestimmt. Es wird ein Zwischenfaserbruch provoziert, der unabhängig von den Verstärkungsfasern ist und lediglich von der Matrix, bzw. der Faser-Matrix-Haftung abhängig.

Es werden jeweils 5 Probekörpern mit der Länge von 30 mm und einer Breite von 15 mm untersucht. Die Stützweite beträgt bei allen Probekörpern 15 mm. In der Tabelle 7 sind die Messergebnisse der mittleren scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit τ , sowie die Standardabweichung der ILSF S_τ und die mittlere Probekörperdicke h mit der Standardabweichung S_T aufgeführt. Dazu ist in der Abbildung 7 die Interlaminare Scherfestigkeit gegen die Probekörperdicke, mit den jeweiligen Standardabweichungen aufgetragen.

Tabelle 7: Interlaminare Scherfestigkeit und Probekörperdicke.

Probe	τ in MPa	S_τ in MPa	h in mm	S_T in mm
VARI-1	32,55	2,21	3,01	0,074
VARI-2	34,55	1,96	3,03	0,040
1.	34,49	3,18	4,18	0,076
2.	33,59	3,71	4,76	0,185
3.	40,57	2,05	5,31	0,259
4.	33,07	2,85	4,04	0,101
5.	33,50	1,88	4,44	0,076
6.	39,20	0,51	4,93	0,054
7.	29,86	1,36	3,99	0,108
8.	33,55	2,12	4,45	0,027
9.	37,02	1,53	4,63	0,081

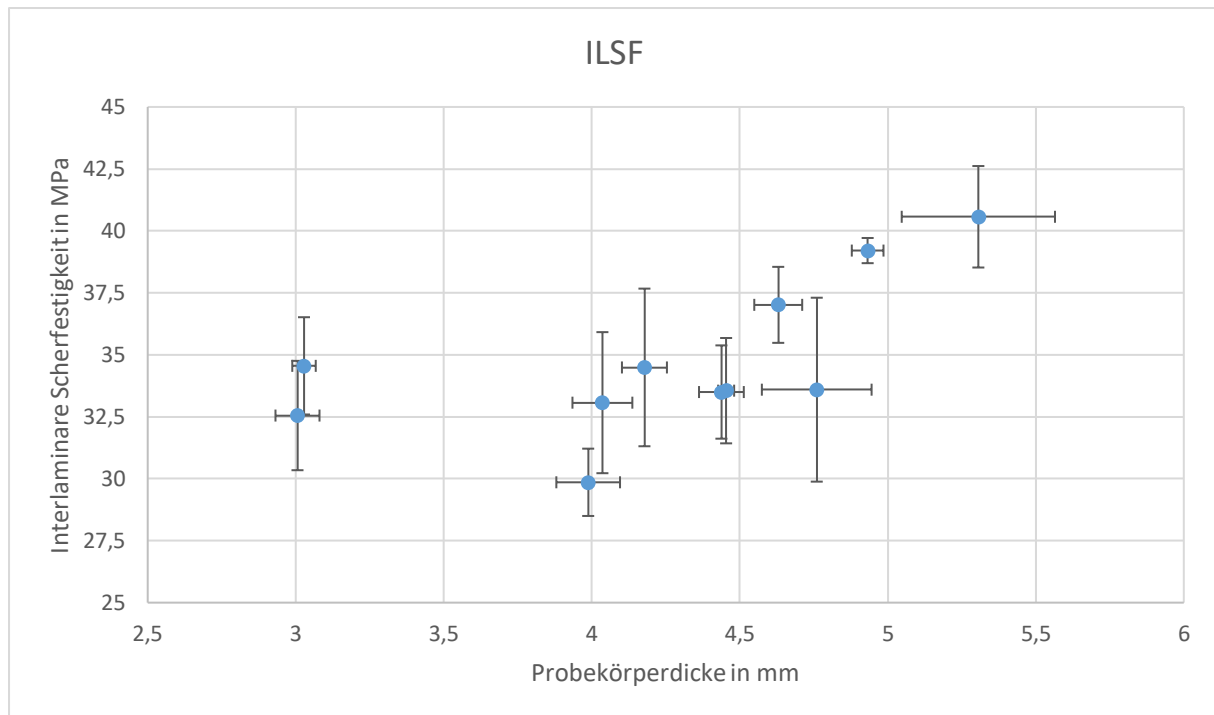


Abbildung 7: Interlaminare Scherfestigkeit gegen Probekörperdicke

Die Werte der VARI-Proben liegen im gleichen Bereich wie die der Prepreg-Proben. Auffällig ist, dass die ILSF bei höherem Harzauftrag steigt. Mit der Korrelationsfunktion von Microsoft Excel („=KORREL(X,Y)“) lässt sich der Korrelationskoeffizient k bestimmen. Für die Korrelation der ILSF ergibt sich ein Wert von $k = 0,61$. Die ILSF korreliert hier scheinbar mit Probekörperdicke. Zu beachten ist jedoch, dass die Werte der Proben 1, 2, 4, 5, 7 und 8, sowie die beiden VARI-Referenzproben alle im Bereich von ca. 30-35 MPa liegen. Im Versuch wurde das in der Norm geforderte Verhältnis von Auflagerabstand und Probekörperdicke nicht eingehalten, obwohl es deutliche Unterschiede gibt. Bei dickeren Proben kommt es vermehrt zu Druckbeanspruchung, wodurch die Werte weniger miteinander vergleichbar werden oder sogar ungültige Versagensarten auftreten, die nicht klar zu erkennen sind. Werden alle Probekörper mit einer Höhe von über 4,5 mm von der Korrelationsberechnung ausgenommen (Proben Nr. 2, 3, 6 und 9), ergibt sich ein Wert von $k = -0,037$. Somit korreliert die Probekörperdicke nicht mit der ILSF, sofern eine bestimmte Dicke nicht überschritten wird.

4.5. 3-Punkt-Biegeversuch

Im 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125 werden jeweils 7 Probekörper geprüft. Die verwendeten Verstärkungsfasern werden zwar als biaxiales $0^\circ/90^\circ$ - Gelege bezeichnet, nach genauerer Betrachtung, hat nur eine Lage einen geradlinigen Verlauf, während die andere Lage leicht versetzt verläuft. Deswegen werden die Probekörper immer mit der Längsseite in Richtung der gerade verlaufenden Fasern herausgesägt, sodass überwiegend diese Faserlagen im Biegeversuch die Lasten aufnehmen.



Abbildung 8: schräge „90°“ Glasfaser-Lage (links) und gerade 0° Glasfaser-Lage (rechts).

Die Beigeversuche werden an einer Universalprüfmaschine von Zwick durchgeführt. Die Stützweite beträgt 40 mm und die Prüfgeschwindigkeit beträgt 5 mm/min.

In der folgenden Tabelle 8 sind die Messwerte für den Biegemodul E und der Standardabweichung vom Biegemodul S_E , sowie die Biegefestigkeit σ , die Standardabweichung der Biegefestigkeit S_σ und die mittlere Probekörperdicke h eingetragen. Zur Veranschaulichung sind die Biegefestigkeiten und Biegemodule in den Abbildungen 9 und 10 aufgetragen.

Tabelle 8: Ergebniswerte 3-Punkt Biegeversuch.

Probe	E in GPa	S _E in GPa	σ in MPa	S _σ in MPa	h in mm
VARI-1	24,74	1,87	542	63,1	3,04
VARI-2	24,82	1,53	584	45,6	3,02
1.	13,45	1,21	417	38,7	4,14
2.	11,62	1,35	418	19,4	4,71
3.	10,55	1,35	391	15,4	5,15
4.	13,88	0,84	397	38,3	4,05
5.	13,33	0,71	390	19,9	4,48
6.	11,12	0,90	398	17,2	5,00
7.	13,50	0,87	435	42,2	4,10
8.	14,39	1,25	431	25,1	4,44
9.	13,02	0,99	417	26,4	4,50

Die Dickentoleranzanforderungen der DIN EN ISO 14125 können für die Prepreg-Proben nicht erfüllt werden, da die Proben erhebliche Dickenschwankungen aufweisen und die Grenzabweichung von +/- 2 % teilweise überschritten wird. Im Vergleich zu den VARI-Proben spiegelt sich das in den relativen Standardabweichungen jedoch nicht wider. Diese liegen sowohl bei den Moduln als auch bei den Festigkeiten im Bereich von unter 15 % bezogen auf die jeweiligen Mittelwerte.

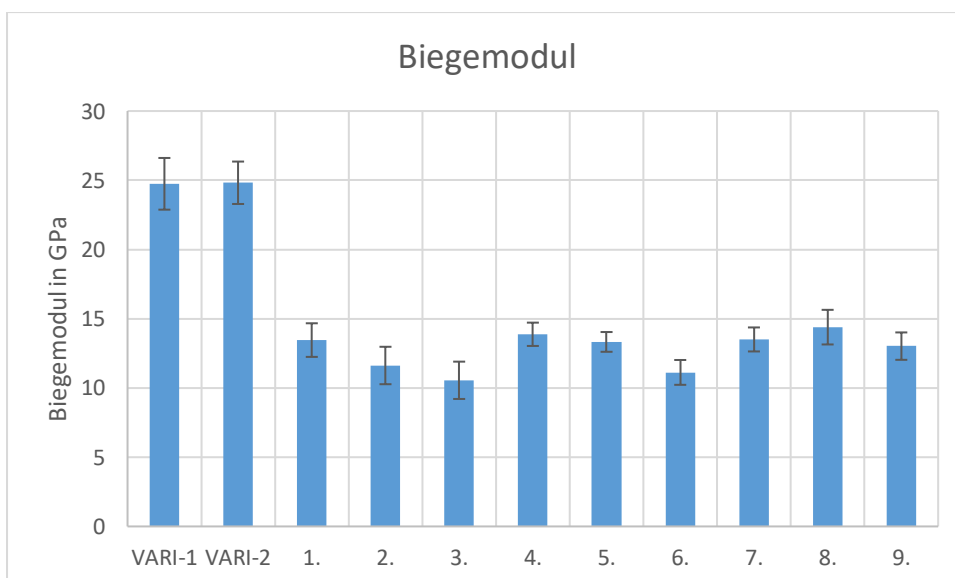


Abbildung 9: Biegemodul und Standardabweichung der Probekörper.

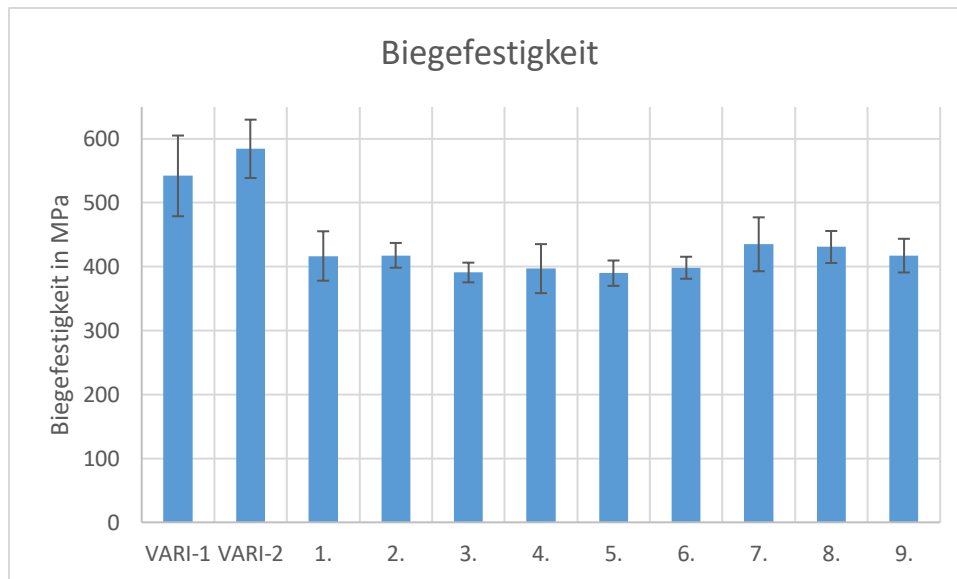


Abbildung 10: Biegefestigkeit und Standardabweichung der Probekörper.

Je höher der Faservolumengehalt, desto höher sind der Biegemodul und die Biegefestigkeit, da die Fasern im Vergleich zur Matrix deutlich höhere mechanische Werte aufweisen. Als Versagensart ist an den Proben Anzeichen Zugversagen („ausfransen“ an der Unterseite) und Druckversagen (Einknicken an der Oberseite bei der Druckfinne) zu erkennen. Der Korrelationskoeffizient des Biegemoduls zum Faservolumengehalt beträgt $k(E) = 0,93$ und für die Biegefestigkeit zum Faservolumengehalt $k(\sigma) = 0,89$. Werden für den Korrelationskoeffizienten der Biegefestigkeit zum Faservolumengehalt jedoch nur die Prepreg-Proben betrachtet, sinkt dieser auf $k(\sigma) = 0,54$. Da das Verhältnis von der Stützweite zur Probekörperdicke nicht angepasst wird, wirkt sich dies auf die Tatsächlichen Belastungsarten aus. Je größer der Unterschied der Probekörperdicke zwischen zwei Proben, desto weniger sind sie miteinander vergleichbar. Bei dickeren Proben wird zudem eine höhere Biegekraft benötigt und sogar ein anderer Kraftaufnehmer verwendet, der mehr als 2.500 N Kraft messen kann aber weniger enge Toleranzen hat. Die gemessene Biegefestigkeit ist bei niedrigerem Faservolumengehalt nur geringfügig niedriger, was sich in der Ansammlung der Messwerte in der Abbildung 11 erkennen lässt. Allerdings liegen die Mittelwerte mit den Standardabweichungen häufig noch im Rahmen der eingetragenen linearen Trendlinie. Im Grenzfall von 0 % Faservolumengehalt, liegt die Trendlinie bei 116,57 MPa und kommt damit sehr nah an den Wert von 115 MPa für die Biegefestigkeit für das reine Harzsystem laut Datenblatt heran [9].

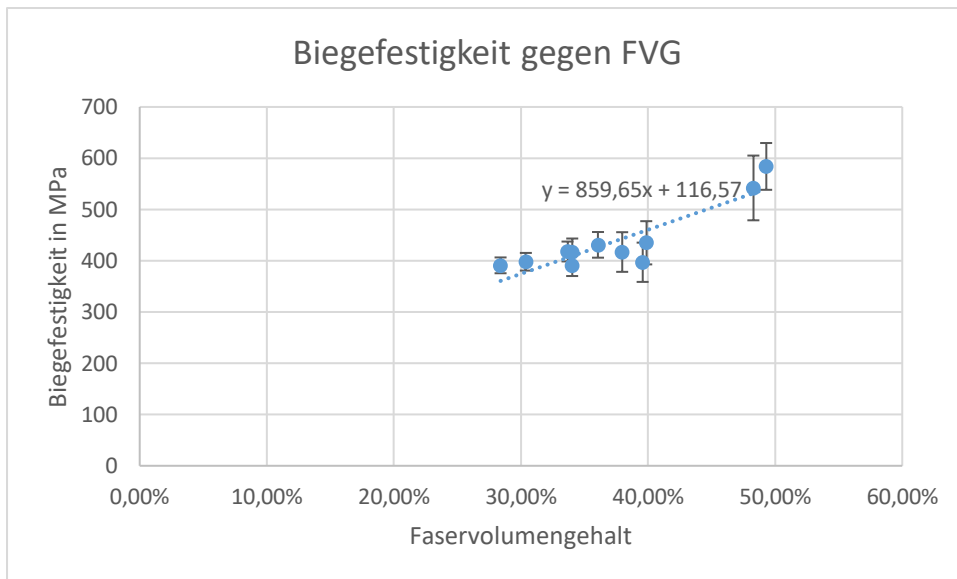


Abbildung 11: Biegefestigkeit gegen Faservolumengehalt.

Der Biegemodul in der Abbildung 12 zeigt hingegen, dass die Werte für die VARI-Proben erheblich vom Rest abweichen. Die Trendlinie ergibt für den Grenzfall von 0 % Faservolumengehalt sogar einen deutlichen negativen Wert. Das liegt daran, da im VARI-Verfahren ein anderer Schichtaufbau verwendet wurde. Die Faserlagen sind hier ab der Hälfte umgedreht und daher symmetrisch, wodurch sich in der Mitte der Platte ein Gelege von 0°/90°/90°/0° befindet und die mechanisch beanspruchten Fasern der 0°-Lage jeweils an den Außenseiten befinden. Dies hat Auswirkungen auf das Widerstandsmoment der Probekörper, wodurch sich eine höhere Bauteilsteifigkeit bei Biegebelastung ergibt und der tatsächliche Biegemodul höher ausfällt. Mit der Online-Prepreg-Anlage ist es hingegen nicht möglich, die Lagen umzudrehen, wodurch sich kein symmetrischer Aufbau ergibt. Aufgrund der nicht gradlinig verlaufenden „90°“-Lage, wurde außerdem darauf verzichtet, das biaxiale Gelege um 90° zu drehen.

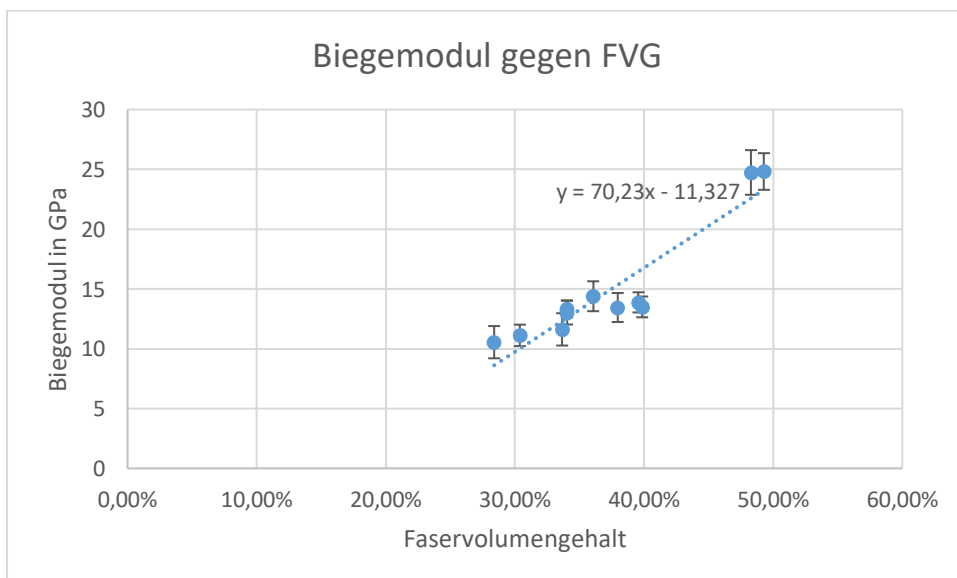


Abbildung 12: Biegemodul gegen Faservolumengehalt.

4.6. Rasterelektronenmikroskopie

Die Bruchstellen wurden zusätzlich noch unter einem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Dazu werden ausgewählte Proben aus dem 3-Punkt Biegeversuch vollständig zerbrochen und anschließend mit einer Probensäge auf ca. 5 mm Länge gekürzt.

Die Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt der Probe Nr. 6. Die Probe wurde mit einem hohen Harzauftrag hergestellt und weist teilweise große Ansammlungen von Matrix ohne darin enthaltene Fasern auf. Diese Ansammlung hat eine Größe von über 100 µm. Sie entstehen, da bei der Probe der Faservolumengehalt niedrig ist und die Kompaktierung im Vakuumaufbau nur schwach ist. Dadurch sammelt sich an manchen Stellen Harz an ohne enthaltene Fasern, die in der Fasermatte zusammengenäht sind und innerhalb ihrer Lage nur einen begrenzten Raum für das Harz zur Verfügung hat. Das Herausdrücken von Harzüberschuss reicht hierbei nicht aus.

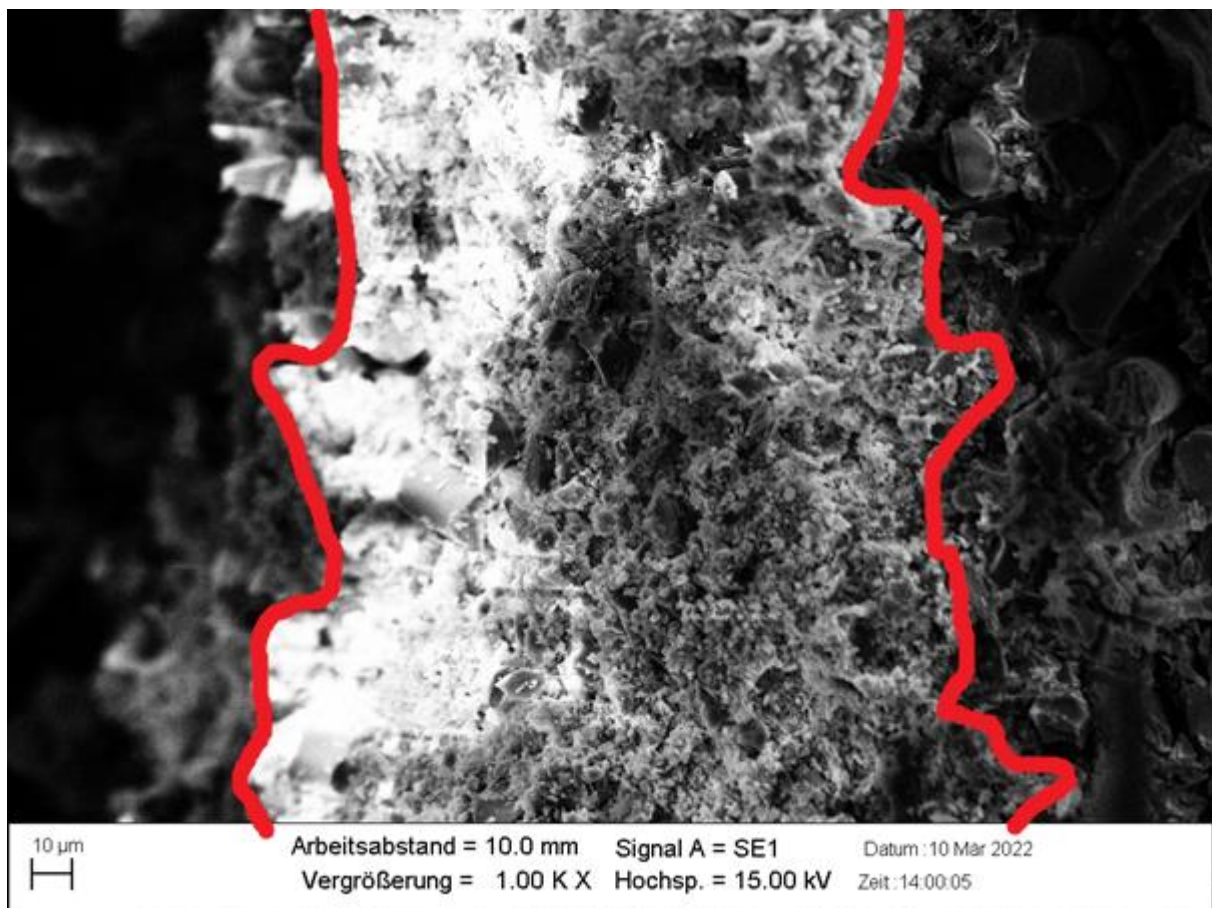


Abbildung 13: REM-Aufnahme, Harzklumpen zwischen den Fasern (zwischen Markierung).

Die Abbildung 14 zeigt die Übergangsstelle zwischen den biaxialen Gelege innerhalb einer Faserlage vom gleichen Probekörper. Die gebrochenen Fasern auf der linken Bildhälfte sind alle von Matrix umgeben und es wurden keine Fasern durch die Belastung herausgezogen. Es ist daher von einer guten Faser-Matrix-Anbindung auszugehen. Innerhalb der Faserlagen wird der Raum trotz niedriger Kompaktierung gut ausgefüllt, sodass das Fließen des Harzes aufgrund der Kapillarkräfte ausreicht.

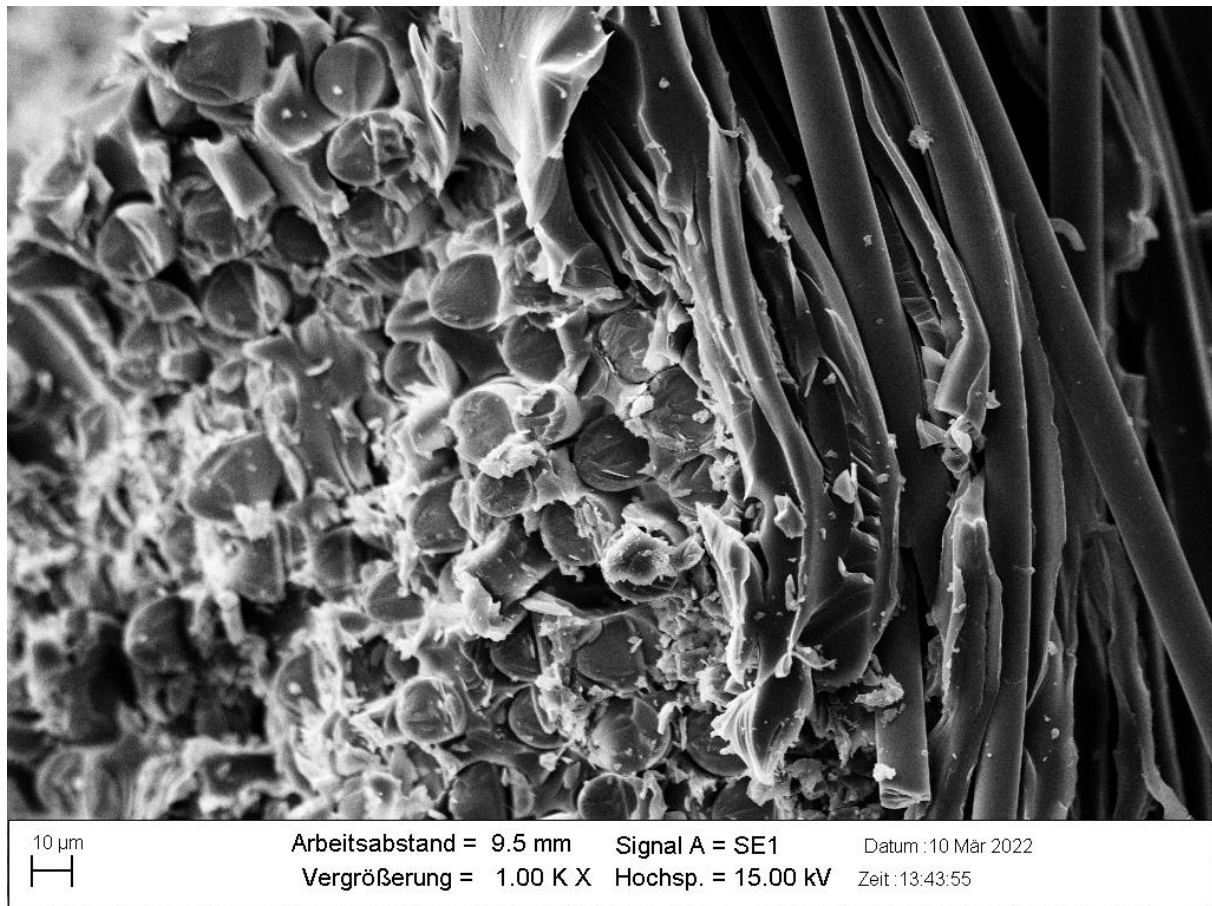


Abbildung 14: REM-Aufnahme, Übergang der biaxialen Faserlagen, mit gebrochenen Fasern der 0°-Lage (links).

4.7. Dynamisch mechanische Analyse

Bei der dynamischen mechanischen Analyse (DMA) werden Probekörper unter dynamischer Belastung geprüft. Hieraus lässt sich der komplexe Modul aus Speicher- und Verlustmodul bestimmen. Unter Temperaturänderung lässt sich dies Temperaturabhängig überprüfen und die Glasübergangstemperatur bestimmen.

Vorgegangen wird nach der Prüfnorm DIN EN ISO 6721-1. Hierzu werden jeweils 3 Probekörper mit einer Länge von 32 mm und einer Breite von 10 mm aus den Platten herausgesägt. Das in der Norm DIN EN ISO 6721-5 geforderte Längen-Dicken-Verhältnis von 16:1 wird daher nicht eingehalten. Dies dient der Vereinheitlichung der Probengeometrien und vereinfacht lediglich die Probenherstellung. Geprüft wird unter einer Stickstoffatmosphäre ausgehend von Raumtemperatur bis 150 °C mit einer Heizrate von 2 K/min.

Die Daten der Tabelle 10 und Abbildung 15 werden mit dem Programm TA Universal Analysis ausgewertet. Die Glasübergangstemperatur T_g wird anhand des Verlaufes des Speichermoduls direkt im Programm bestimmt.

Tabelle 10: Glasübergangstemperatur und Speichermodul aus DMA.

Probe Nr.	T_g in °C	Speichermodul in MPa
VARI-1	88,76	8487
VARI-2	88,36	8200
1.	84,07	3303
2.	85,42	3059
3.	85,60	2857
4.	78,71	3797
5.	84,02	3147
6.	83,51	3116
7.	80,89	3653
8.	83,26	3618
9.	84,27	3327

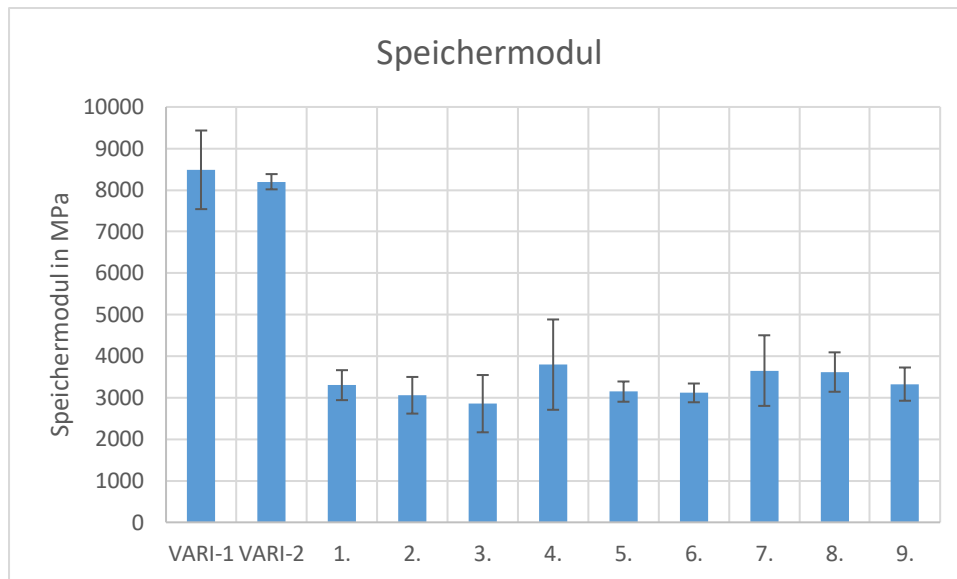


Abbildung 15: Speicherm modul der Prepreg-Proben.

Für die VARI-Proben liegen alle Werte der Glasübergangstemperaturen im Bereich zwischen 88 °C und 89 °C. Bei den Prepreg-Proben weichen diese Werte stärker voneinander ab. Die Glasübergangstemperatur liegt damit in der Nähe der Aushärtetemperatur von 80 °C. Da die Prepregs während der gesamten Aushärtezeit unter einem Luftzug der Vakuumpumpe vom Förderband stehen, ist davon auszugehen, dass ungleichmäßige Kühleffekte während der Aushärtung wirken und sich in einer geringeren Glasübergangstemperatur bemerkbar machen. Der Speicherm modul ist bei höheren Faservolumengehalten höher, doch für die VARI-Proben ist er erheblich höher als bei den Prepregs. Die Werte des Speicherm moduls decken sich dennoch mit den Werten des Biegemoduls aufgrund der biegesteiferen Anordnung der Faserlagen bei den VARI-Proben. Der Korrelationskoeffizient zwischen gemessenen Biegemodul aus der Tabelle 8 zum Speicherm modul beträgt $k = 0,99$. Allerdings ist anzumerken, dass die Speicherm modulen der Prepreg-Proben erheblichen Schwankungen unterliegen. Als Extremfall ist die Probe Nr. 4 zu nennen, hier haben die drei Probekörper einen Speicherm modul von 2733 MPa, 3752 MPa und 4906 MPa, sodass sich eine Standardabweichung von 1087 MPa ergibt. Angesichts solcher großer Schwankungen bei lediglich 3 Probekörpern pro Material, sind die Mittelwerte teilweise sehr ungenau. Es ist daher nur eine qualitative Aussage zu treffen. Die Bauteilqualität der Prepreg-Proben ist niedrig in Hinblick auf ungleichmäßigen Probendicken und Lufteinschlüssen an der Oberfläche, obgleich sich die Mittelwerte mit den Erwartungen trotz niedriger Probenanzahl decken.

5. Fazit und Handlungsempfehlung

Die untersuchte Bandbreite an Maschineneinstellungen deckt einen kleinen Bereich der Fähigkeiten der Online-Prepreg-Anlage ab. Die Faservolumengehalte sind im Vergleich zu den VARI-Referenzen niedrig, sodass die Parameter für höhere Faservolumengehalte abgeändert werden können. Viel mehr sind sogar niedrige Faservolumengehalte von unter 40 % nicht sinnvoll, weil sich dadurch ein größerer Teil des Harzes selbst bei niedriger Kompaktierung in den Randbereichen außerhalb des Bauteils ansammelt. Für einen niedrigen Harzverlust ist zu empfehlen, einen Faservolumengehalt von mindestens 40 % anzusteuern. Für das verwendete Glasfasergelege mit 620 g/m^2 wird ein Harzfluss von niedriger als 200 g/min bei einer Robotergeschwindigkeit von 400 mm/s empfohlen, die Länge der aufgetragenen Harzlinie ist hier mit 6520 mm angenommen für ein Quadrat mit 36 cm Seitenlänge. Dadurch lassen sich höhere Faseranteile erreichen und prüfen, ob die Annahmen zur Berechnung des Faservolumengehaltes für weitere Proben reproduzierbar sind.

Der Vakuumaufbau und das Aushärten auf dem Förderband eignen sich jedoch nicht, da die Güte des hier erzeugten Vakuums gering ist und es von unten anliegt, während sich Luftblasen im Harz nach oben bewegen, sodass sie nicht abtransportiert werden können und sogar von der Vakuumfolie im Bauteil gehalten werden. Dies hat Auswirkungen auf die Bauteilqualität. Ein alternativer Aufbau, z.B. als Vakuumaufbau ähnlich dem VARI-Verfahren oder ein Pressverfahren, ist hier anzuraten. Durch die Möglichkeit der Nacherwärmung bei der Online-Prepreg-Anlage lässt sich die Matrix bereits härten, sodass eine Kompression weniger Harz aus dem Bauteil herausdrückt. Außerdem wird die Maschine dabei nicht blockiert, sodass sich der Vorteil der Trennung von Harzinjektion und Aushärtung an zwei verschiedenen Orten erreichen lässt. Der Betrieb der Vakuumpumpen über mehrere Stunden erzeugt zudem eine Lärmbelästigung in der Halle und einen hohen Stromverbrauch. Weiterhin bietet die unmittelbar in der Nähe befindliche Presse die Möglichkeit, die Prepregs im Pressverfahren auszuhärten.

Die Messergebnisse decken sich mit den Erwartungen und den Berechnungen. Die theoretischen Faservolumengehalte decken sich im Falle der Proben 4 und 7 und weichen lediglich im Nachkommastellenbereich voneinander ab. Das Anpassen des Harzauftrages durch Änderung der Robotergeschwindigkeit und des Harzdurchsatzes ist daher eine gute Möglichkeit, um gezielte Faservolumengehalte von mindestens 40 % anzusteuern. Dazu müssen jedoch folgende Parameter bekannt sein: die Dichten des Harzsystems und der Fasern, das Flächengewicht der Fasern, die Länge der Harzlinien und die Fläche des Bauteils. Jeder dieser Parameter unterliegt einer Fehleranfälligkeit. Eine weitere Möglichkeit zur Modifizierung bietet die Anpassung der Länge der Harzlinien. Die Dauer zum Imprägnieren lässt sich dadurch deutlich reduzieren, da eine kürzere Strecke abgefahren werden muss. Die mechanischen Eigenschaften sind abhängig vom Faservolumengehalt und daher von der aufgetragenen Harzmenge. Es zeigen sich hierbei keine Auffälligkeiten zwischen den Parametern. Eine weitere Möglichkeit zur Modifizierung des Harzauftrages bietet die Anpassung der Länge der Harzlinien. Die Dauer zum Imprägnieren lässt sich dadurch deutlich reduzieren, da eine kürzere Strecke abgefahren werden muss.

Die betrachteten Robotergeschwindigkeiten haben hingegen keinen Einfluss auf die Bauteile. Für größere Geschwindigkeiten gilt es jedoch den Ablageverlauf des Harzstrahls zu beachten, der beim Richtungswechsel der Harzlinien über die Ecken stärker hinausgeworfen wird. Bei Geschwindigkeiten von 400 mm/s ist diese Gefahr jedoch noch gering. Bei höheren

Geschwindigkeit kann es jedoch notwendig werden, die Höhe der Düsenposition zu reduzieren. Das Anfahrverhalten der Harz Imprägnierung muss ebenfalls beachtet werden. Insbesondere bei kleineren Bauteilen hat dies einen größeren Effekt. Die Lösung, zusätzliche Harzlinien einzufügen bedarf zwar keiner baulichen Veränderung, beruht jedoch nur auf groben Beobachtungen. Eine verschließbare Düse wäre hier eine Möglichkeit, um dieses Problem nachhaltig zu lösen, denn dadurch tropft die Düse bei Nichtverwendung nicht aus und muss am Beginn der Imprägnierung nicht erst gefüllt werden, sodass sich keine Totzeit ergibt.

Quellenverzeichnis

- [1] Hauke Lengsfeld, Johannes Krämer, Javier Lacalle, Volker Altstädt: Faserverbundwerkstoffe – Prepregs und ihre Verarbeitung. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München 2020, ISBN 978-3-446-44882-7
- [2] Manfred Flemming, Gerhard Ziegmann, Siegfried Roth: Faserverbundbauweisen – Fasern und Matrices. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1995, ISBN 978-3-642-63352-2
- [3] Pressemitteilung: AZL schließt gemeinsam mit 46 Industriepartnern Projekt zu Batteriegehäusen erfolgreich ab – Multimaterial-Lösungen eröffnen hohes Potential zur Kosten- und Gewichtsersparnis für Batterie-Gehäuse, AZL Aachen GmbH, 6.12.2021, <https://azl-aachen-gmbh.de/media/> , Stand: 18.05.2022
- [4] Chokri Cherif (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau - Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 2011, ISBN 978-3-642-17991-4
- [5] Q. Govignon, S. Bickerton and P.A. Kelly, Experimental investigation into the post-filling stage of the resin infusion process - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Stages-in-the-resin-infusion-process-a-Lay-up-b-Pre-filling-c-Filling-d_fig1_258795784 [accessed 26 Apr, 2022]
- [6] L. Hefft, Auslegung und Einführung einer online-Prepreganlage zur Herstellung faserverstärkter Halbzeuge, <https://www.puk.tu-clausthal.de/ueber-uns/abgeschlossene-projekte/auslegung-und-einfuehrung-einer-online-prepreganlage-zur-herstellung-faserverstaerakter-halbzeuge> (Stand: 18.05.2022)
- [7] Abbildung Online-Prepreg-Anlage (mit eigener Beschriftung ergänzt): <https://www.czm.tu-clausthal.de/forschung/ants-advanced-manufacturing-technology-laboratories/kunststoff-und-faserverbundtechnikum/online-prepreg-technologie> (Stand: 18.05.2022)
- [8] Anleitung Online-Prepreganlage – Eine Anleitung für QCad, Lars Hefft, 17.08.2021, v1.4
- [9] Datenblatt Harz: EPIKOTE™ Resin MGS™ RIMR035c EPIKURE™ Curing Agent MGS™ RIMH036, 037, 038, 038F APPLICATION
- [10] Datenblatt Glasfasern: https://www.r-g.de/wiki/Verst%C3%A4rkungsfasern_-_Einf%C3%BChrung_und_%C3%9Cberblick (Stand: 18.05.2022)
- [11] Datenblatt Glasfasern - 2: <https://www.r-g.de/wiki/Glasfasern> (Stand: 18.05.2022)