



TU Clausthal

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Experimentelle Untersuchung an Faserkunststoffverbunden mit eingebetteten Dummy-Sensoren

Projektarbeit

Vorgelegt von:	Wanlu Li, 495701
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann
Betreuer:	M. Sc. Gaurab Sundar Dutta
Abgabetermin:	20.01.2023

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielersetzung	1
2	Grundlage	2
2.1	Faserverbundkunststoffe.....	2
2.2	Glasfaser	2
2.3	Kohlenstofffaser	3
3	Materialien und Methoden	4
3.1	Auswahl der Fasern	4
3.2	Einbetten der Dummy-Sensoren.....	4
3.3	Der VARI Prozess.....	5
3.4	Herstellung der Proben.....	7
4	Experimentelle Untersuchung	9
4.1	Der Zugversuch	9
4.2	Der 3 Punkt Biegeversuch	10
5	Auswertung der Ergebnisse	11
5.1	Vergleich der Kurven von GFK aus Zugversuchen.....	11
5.2	Vergleich der Kurven von GFK aus Biegeversuchen	12
5.3	Vergleich der Kurven von CFK aus Zugversuchen	14
5.4	Vergleich der Kurven von CFK aus Biegeversuchen	15
6	Fehlerdiskussion.....	17
7	Zusammenfassung.....	18

Abkürzungsverzeichnis

GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Normal	Die Proben ohne Dummy-Sensor
Bend	Die Proben mit durch Umformen der Fasern eingebetteten Dummy-Sensoren
Cut	Die Proben mit durch Schneiden der Fasern eingebetteten Dummy-Sensoren
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion

Symbolverzeichnis

L	Der Auflagerabstand bei der Biegeversuch in mm
h	Die Dicke der Proben in mm
v_1	Die erste Prüfgeschwindigkeit beim Biegeversuch in mm/min
v_2	Die zweite Prüfgeschwindigkeit beim Biegeversuch in mm/min
v_t	Die Prüfgeschwindigkeit beim Zugversuch in mm/min
r	Die Biegedehngeschwindigkeit in %/min
l_s	Die Länge der Dummy-Sensoren in mm
b_s	Die Breite der Dummy-Sensoren in mm
d_s	Die Dicke der Dummy-Sensoren in mm
d_f	Die Dicke der Kanäle der Dummy-Sensoren in mm
$\emptyset$	Die Durchmesser der Kanäle der Dummy-Sensoren in mm

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Faserverbundkunststoffe[3].....	2
Abbildung 2: Abmessung der Dummy-Sensoren.....	4
Abbildung 3: a) Die aus der ersten Schicht herausragenden Funkkanäle; b) In der mittleren Schicht platzierten Dummy-Sensoren	5
Abbildung 4: Aufbau der VARI für die Herstellung von Verbundwerkstoffen	6
Abbildung 5: Schematischer Ablauf der Herstellung von Proben.....	7
Abbildung 6: Die Proben von GFK.....	8
Abbildung 7: Die Proben von CFK.....	8
Abbildung 8: Zugversuch für GFK nach DIN ISO 527	9
Abbildung 9: Biegeversuch für GFK nach DIN ISO 178	10
Abbildung 10: Kurvengrafik des Zugversuchs der drei Proben von GFK	11
Abbildung 11: Die Proben von GFK nach dem Zugversuch.....	12
Abbildung 12: Kurvengrafik des Biegeversuchs der drei Proben von GFK	12
Abbildung 13: Die Proben von GFK nach dem Biegeversuch.....	13
Abbildung 14: Kurvengrafik des Zugversuchs der drei Proben von CFK	14
Abbildung 15: Die Proben von CFK nach dem Zugversuch.....	15
Abbildung 16: Kurvengrafik des Biegeversuchs der drei Proben von CFK	15
Abbildung 17: Die Proben von CFK nach dem Biegeversuch.....	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierung und physikalische Eigenschaften von verschiedenen Glasfasern[3]	3
Tabelle 2: In dem Experiment verwendete Fasertypen	4
Tabelle 3: Die Abmessungen und Anzahl der Proben	7

1 Einleitung

Leistungsstarke Verbundwerkstoffe werden wegen ihrer herausragenden Eigenschaften häufig in der Luft- und Raumfahrt sowie im Maschinenbau eingesetzt, und eingebettete Sensoren, die den Verbundwerkstoffaushärtungsprozess kontinuierlich überwachen und kontrollieren können, wurden entwickelt. Diese Sensoren ermöglichen es, den Aushärtungsprozess in Echtzeit zu überwachen und sicherzustellen, dass er korrekt durchgeführt wird, um die Qualität der Komponenten zu verbessern[1]. Die eingebetteten Sensoren bleiben nach der Verarbeitung in der Struktur, was Auswirkungen auf die lokale Integrität der Verbundstruktur hat. Um die Auswirkungen dieser Faktoren auf das mechanische Verhalten von glasfaserverstärkten Kunststoffen zu untersuchen, werden in dieser Arbeit mechanische Versuche durchgeführt, um die Auswirkungen von Unregelmäßigkeiten auf das Verbundsystem zu ermitteln.

1.1 Zielersetzung

In der Arbeit werden die eingebetteten Sensoren aufgrund von experimentellen Bedingungen und Kosteneinsparungen durch 3D-gedruckte Teile, die im Folgenden als Dummy-Sensor bezeichnet werden, ersetzt, um den Einfluss von „Störkörpern“ zu ermitteln.

In diesem Versuch wurden Dummy-Sensoren auf zwei verschiedene Arten in ausgewählte Verbundwerkstoffe eingebettet, auf ihre mechanischen Eigenschaften geprüft und mit dem nicht verunreinigten Verbundwerkstoff verglichen, um die Auswirkungen der eingebetteten Sensoren auf die Eigenschaften des Verbundwerkstoffs besser bestimmen zu können.

Die Struktur dieser Arbeit ist wie folgt. Im Kapitel 2 werden die Grundlagen vorgestellt. Das dritte Kapitel befasst sich mit dem experimentellen Aufbau und die Durchführung der Versuche . Im vierten Kapitel werden die experimentellen Ergebnisse ausgewertet. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen und führt eine Fehleranalyse durch.

2 Grundlage

In Kapitel 2 wird eine kurze Einführung in die in dieser Arbeit behandelten Materialien, nämlich Glas- und Kohlenstofffaserverbunden und deren Eigenschaften gegeben.

2.1 Faserverbundkunststoffe

Verbundwerkstoffe sind Werkstoffe, bei denen verschiedene Komponenten miteinander kombiniert werden. Faserverbundkunststoffe (FVK) oder auch faserverstärkte Kunststoffe bzw. Composites sind eine Untergruppe der Verbundwerkstoffe, die aus einer faserverstärkten Kunststoffmatrix hergestellt werden[2].

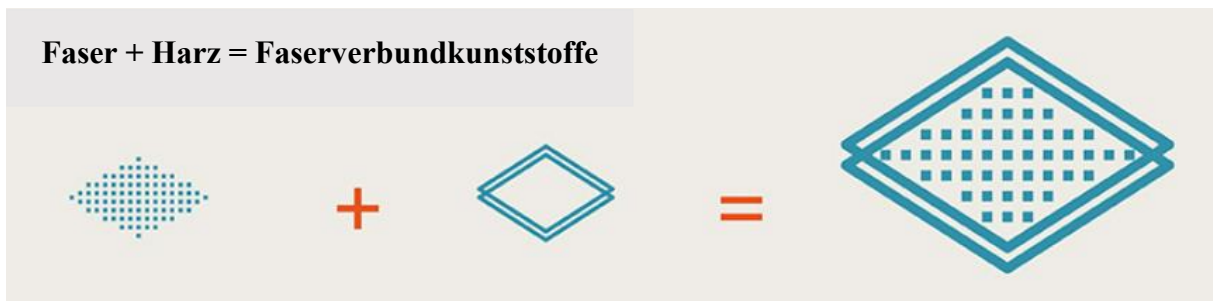


Abbildung 1: Faserverbundkunststoffe[3]

Sowohl die Fasern als auch die Matrix können aus verschiedenen Produkten bestehen. Die Art der Verstärkungsfaser, der Fasergehalt und die Faserausrichtung haben einen großen Einfluss auf die Eigenschaften der späteren Bauteile.

Faserverstärkte Kunststoffe werden hauptsächlich im technischen Bereich eingesetzt, in kurzlebigen Konsumgütern finden sie im Allgemeinen keine Verwendung. Die beiden am häufigsten verwendeten Verstärkungsmaterialien in den heutigen industriellen Verbundwerkstoffen sind Glasfasern und Kohlenstofffasern.

2.2 Glasfaser

Glasfaser, ein anorganisches, nichtmetallisches Material mit ausgezeichneten Eigenschaften, ist in einer Vielzahl von Typen erhältlich[4]. Es hat die Vorteile einer guten Isolierung, Wärmebeständigkeit und hohen mechanischen Festigkeit, aber den Nachteil, dass es spröde und wenig abriebfest ist. Es wird

durch Hochtemperaturschmelzen, Ziehen, Wickeln, Weben und andere Verfahren hergestellt, wobei der Durchmesser des Monofilaments zwischen 7 und 20 μm . Glasfasern werden häufig als Verstärkungsmaterial in Verbundwerkstoffen, Elektro- und Wärmedämmstoffen, Leiterplatten und anderen Bereichen der Volkswirtschaft verwendet.

In der nachstehenden Tabelle sind mehrere gängige Glasfasern aufgeführt, die in dieser Arbeit verwendete Qualität ist E-Glas.

Tabelle 1: Klassifizierung und physikalische und mechanische Eigenschaften von verschiedenen Glasfasern[5][6]

Klassifizierung	physikalische Eigenschaften	Festigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]
A-Glas	Höhere Haltbarkeit, Festigkeit und elektrischer Widerstand	3310	68.9
C-Glas	Höhere Korrosionsbeständigkeit	3310	68.9
D-Glas	Niedrige Dielektrizitätskonstante	2415	51.7
E-Glas	Höhere Festigkeit und elektrischer Widerstand	3445	72.3
S-Glas	Sehr hohe Festigkeit und gute Impacteigenschaften	4890	86.9

2.3 Kohlenstofffaser

Kohlenstofffasern bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff, der gegen hohe Temperaturen, Hitze und Korrosion beständig ist und zu verschiedenen textilen Gebilden verarbeitet werden kann[7]. Die geringe Dichte von Kohlenstofffasern führt zu einer hohen spezifischen Festigkeit und einem hohen Modul. Kohlenstofffasern werden hauptsächlich als Verstärkungsmaterial verwendet, das mit Harzen und Metallen zu modernen Verbundwerkstoffen verbunden wird. Kohlenstofffaserverstärkte Epoxidharz-Verbundwerkstoffe haben die höchste spezifische Festigkeit und das höchste Modul aller verfügbaren technischen Werkstoffe.

3 Materialien und Methoden

Dieses Kapitel beschreibt den Prozess der Herstellung von Proben für die ausschließenden Prüfungen.

3.1 Auswahl der Fasern

Für die Herstellung der Proben werden drei verschiedene Fasergewebe, zwei verschiedene Glasfasergewebe und ein Kohlefaserverbundstoff, verwendet. Diese Materialien werden mit der gleichen Anzahl von Schichten gestapelt.

Tabelle 2: In dem Experiment verwendete Textilien

Materialien	Flächengewicht [g/cm ²]	Anzahl der Schichten	Textilstruktur
Glasfaser	1232	3	Quadrax(0/90/45/-45)
Glasfaser	600	3	Unidirektional (0/90)
Carbonfaser	300	3	Unidirektional (0/90)

3.2 Einbetten der Dummy-Sensoren

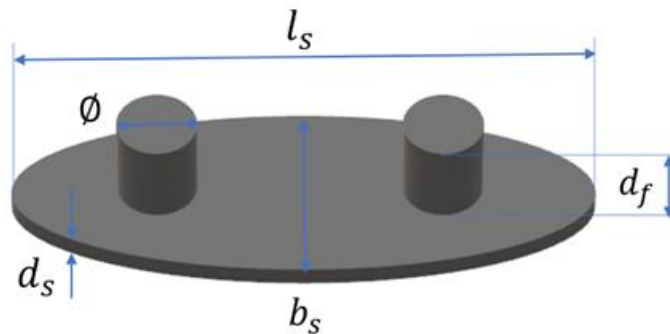


Abbildung 2: Abmessung der Dummy-Sensoren

Um die Ziele dieser Arbeit vollständig zu verwirklichen, wurden die eigentlichen Sensoren durch 3d-gedruckte Teile ersetzt. Zu diesem Zweck werden der ANYCUBIC i3 Mega S FDM-Drucker und PLA-Filament Material verwendet. Ein ovaler Dummy-Sensor mit einer Länge l_s von 25 mm, einer Breite b_s von 12 mm und einer Dicke d_s von 500 μm wurde gedruckt und an der Oberseite zwei dielektrische Kanäle als Reflexionsweg für die im Sensor eingebettete Antenne hinzugefügt. Die Kanäle haben eine

Dicke d_f von 4 mm und einen Durchmesser $\varnothing$ von 5 mm.

Der Dummy-Sensor ist in der mittleren Schicht des Fasergewebes eingebettet, und die beiden Funkkanäle des Sensors ragen aus der oberen Schicht des Fasergewebes heraus. In dieser Arbeit wird der Dummy-Sensor auf zwei verschiedene Arten eingebettet. Die erste besteht darin, die Fasern manuell mit einer feinen Pinzette zu umformen, um eine Lücke zu schaffen, die groß genug ist, um den Dummy-Sensor vollständig freizulegen und darin zu platzieren, wie in der Abbildung 2 gezeigt.

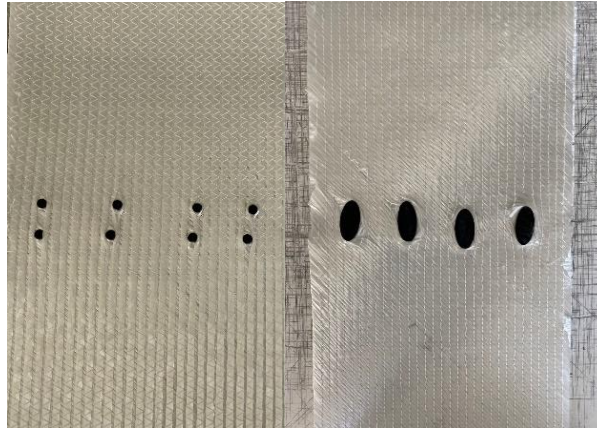


Abbildung 3: a) Die aus der ersten Schicht herausragenden Funkkanäle; b) In der mittleren Schicht platzierten Dummy-Sensoren

Eine andere Methode besteht darin, mit einem Lochstanzer ein sensorähnliches Loch in die Faser zu schneiden und den Sensor dort zu platzieren. Hierbei wird die kontinuierliche eingelegte Faser durchtrennt und in der Lastaufnahme gestört.

3.3 Der VARI Prozess

Die Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) ist eine günstige Methode zur Herstellung von Kunststoff-Verbundwerkstoffen, bei der das Harz unter Vakuumbedingungen ein trockenes Gewebe imprägniert.

Das VARI-Verfahren wurde nach dem Stapeln von drei Fasergewebelagen in jeweils gleicher Faserrichtung gemäß dem Versuchsablauf durchgeführt.

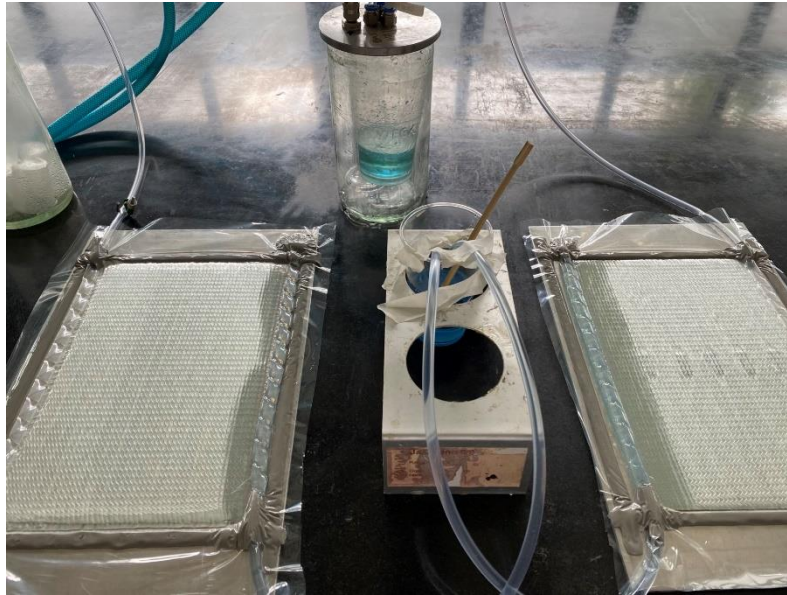


Abbildung 4: Aufbau der VARI für die Herstellung von Verbundwerkstoffen

Der Aufbau ist wie oben abgebildet, wobei sich das Material auf einer sauberen Stahlplatte befindet. Die Gewebelagen werden mit einer Folie abgedeckt, und mit Kleberband auf der Stahlplatte befestigt. Diese Vorrichtung wird einerseits einleitend über einen Schlauch mit einer Harzinjektion verbinden und ausleitend durch einen weiteren Schlauch mit einer Vakuumpumpenseite verbunden. Das Material wird zunächst vakuumiert, um sicherzustellen, dass kein Gas in Gelege vorhanden ist. Die Harzmischung wird über einer Spiralschlauch gleichmäßig zwischen den Fasern verteilt wird, wobei es sich um eine 100:30-Mischung aus Epoxidharz (EpikoteRIMR035c) und Härter (EpikureRIMH037) handelt.

Nach Abschluss der Injektion werden die Platten 24 Stunden lang bei Raumtemperatur ausgehärtet und anschließend 8 Stunden lang bei 80 Grad in einer Heizdecke temperiert, damit sie vollständig aushärten.

3.4 Herstellung der Proben

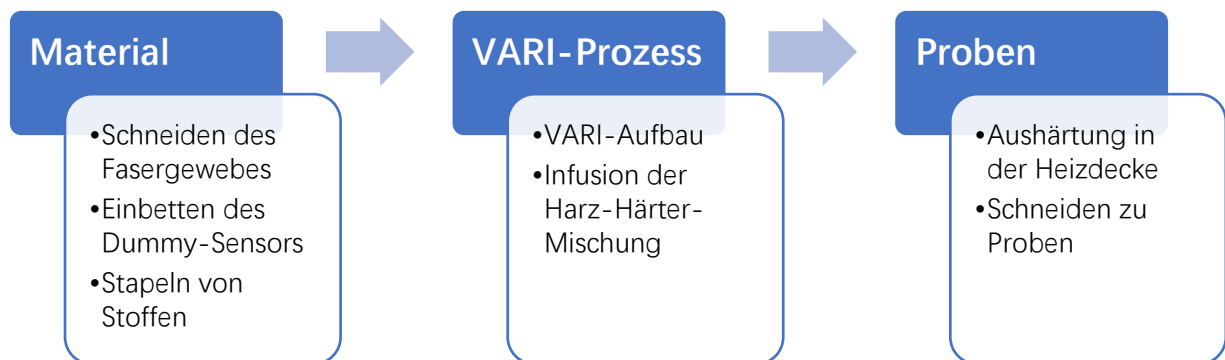


Abbildung 5: Schematischer Ablauf der Herstellung von Proben

Die Platten werden aus der Heizdecke genommen und bei Raumtemperatur abgekühlt, dann von der Stahlplatte getrennt, und danach mit einer Säge in die Probenabmessungen geschnitten, wobei sichergestellt wird, dass der Dummy-Sensor genau in der Mitte der Probe positioniert ist.

Die Proben für den Zugversuch werden gemäß der Norm ISO 527 zugeschnitten, während die Proben für die Biegeprüfung gemäß der Norm ISO 178 zugeschnitten werden.

Tabelle 3: Die Abmessungen und Anzahl der Proben

	Länge in mm	Breite in mm	Dicke in mm	Anzahl
GFK für Zugversuch	250	25	3.0	5
GFK für Biegeversuch	80	25	2.0	5
CFK für Zugversuch	250	25	1.5	5
CFK für Biegeversuch	80	25	1.4	5

Die folgenden Bilder zeigen alle Proben, die für die Versuche hergestellt wurden. das linke Bild für den Zugversuch und das rechte Bild für den Biegeversuch.

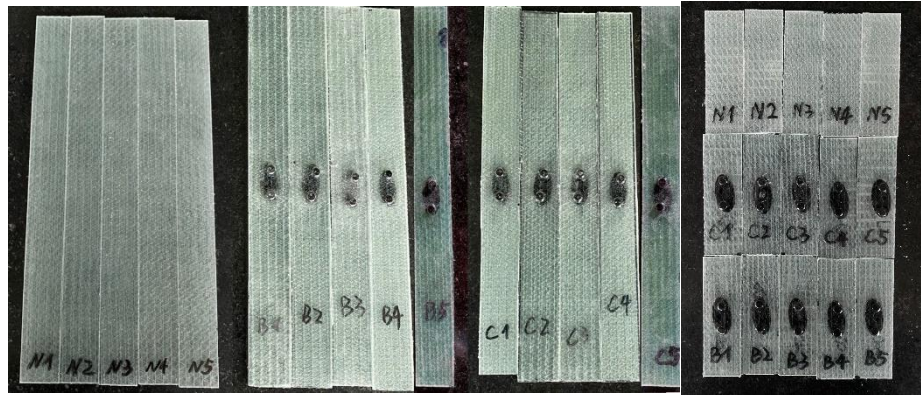


Abbildung 6: Die Proben von GFK

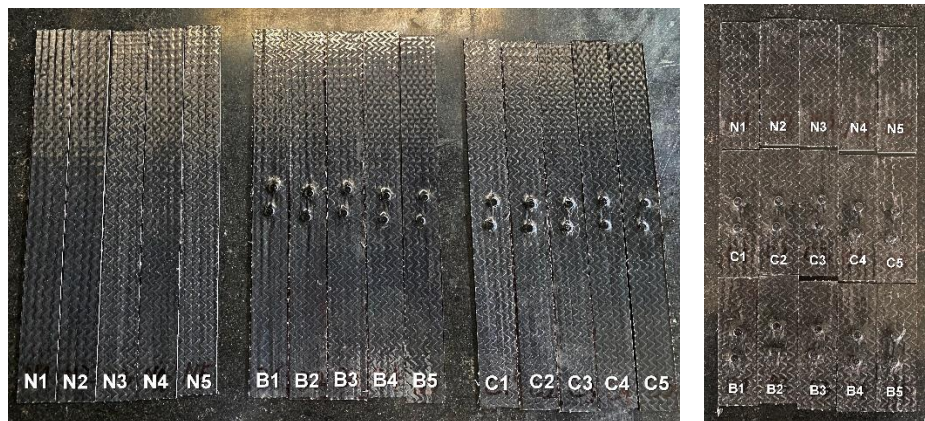


Abbildung 7: Die Proben von CFK

4 Experimentelle Untersuchung

4.1 Der Zugversuch

Um die elastischen Eigenschaften der Proben zu bestimmen, wird die Probe einem statischen Zugversuch unterzogen. In diesem Versuch wurden die Proben auf einer Universalprüfmaschine von Zwick / Roell geprüft, um die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs zu messen. Es stand eine Kraftmessdose von 100 kN zur Verfügung. Die Proben wurden mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit v_t von 2 mm/min bis zum Bruch gemäß der Norm DIN ISO 527 belastet[8]. Bei den Versuchen wurden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für jeden verstärkten Verbundwerkstoff ermittelt.



Abbildung 8: Zugversuch für GFK nach DIN ISO 527

Während der Tests wurde Sandpapier zwischen die Enden der Proben und die Spannvorrichtung gelegt, um die Reibung zwischen den Proben und der Spannvorrichtung zu erhöhen, und damit die Last in die Probe gleichmäßig einzuleiten.

4.2 Der 3 Punkt Biegeversuch

Die Biegeversuch wurde auf einer Universalprüfmaschine von Zwick/Roell durchgeführt. Bei dem Dreipunkt-Biegeversuch wird die Probe auf zwei Stützen gelagert, wie in Abbildung 8 dargestellt. Die Last wird mit zwei konstanten Geschwindigkeiten auf die Mitte der Probe gerichtet.

Zur Bestimmung der Biegespannungs-Biegedehnungs-Kurven werden nach der Norm DIN ISO 178 [9] zwei Prüfgeschwindigkeiten gewählt, wobei die Maschine zunächst mit einer Prüfgeschwindigkeit belastet wird und nach der Bestimmung des Moduls auf eine höhere Belastungsgeschwindigkeit umgestellt wird. Hier war die erste Prüfgeschwindigkeit v_1 für GFK-Proben und CFK-Proben gleich, beide bei 1 mm/min, während die zweite Prüfgeschwindigkeit v_2 unterschiedlich war, mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min für GFK-Proben und 1 mm/min für CFK-Proben.

Gemäß der Norm ISO 178 wird der Abstand L zwischen den Stützen und die oben genannte Prüfgeschwindigkeit v durch die folgenden beiden Gleichungen bestimmt.

$$L = (16 \pm 1) * h \quad (1)$$

$$v = \frac{rL^2}{600h} \quad (2)$$



Abbildung 9: Biegeversuch für GFK nach DIN ISO 178

5 Auswertung der Ergebnisse

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven für jede Probe wurden aus den oben genannten Versuchen gewonnen und die Daten wurden für die Ergebnisse verarbeitet. In diesem Kapitel wird aus den Ergebniskurven jeder der fünf Proben für jeden Test eine Durchschnittskurve ermittelt, und die Durchschnittskurven der verschiedenen Proben werden verglichen, um die strukturellen Eigenschaften der verschiedenen Proben weiter zu vergleichen.

5.1 Vergleich der Kurven von GFK aus Zugversuchen

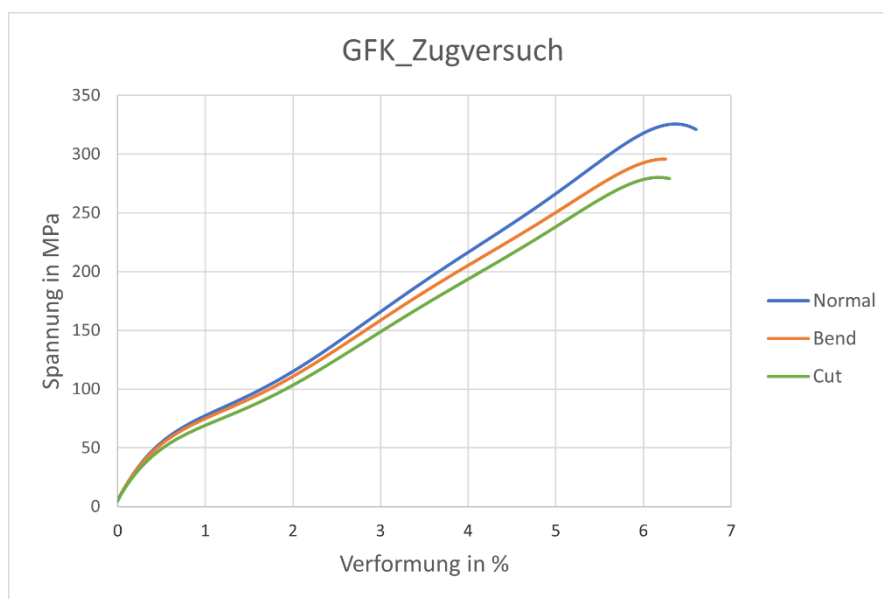


Abbildung 10: Kurvengrafik des Zugversuchs der drei Proben von GFK

Die Ergebnisse des Zugversuchs zeigen, dass es keine großen Unterschiede in der Leistung der drei Proben gibt, aber die normale Probe hat eine etwas höhere Kurve als die Biege- und Schnittproben. Es ist auch zu beobachten, dass die Verformung der normalen Probe beim Bruch etwas größer ist als die der beiden anderen Proben.

Das Bild unten zeigt, wie alle Proben von GFK nach dem Zugversuch aussehen. Der Bruch einer Zugprobe beginnt an der schwächsten Stelle, und das ist in der Regel die Stelle, an der sich Verunreinigungen befinden. Es ist also zu erkennen, dass, dass die Bruchstelle sowohl bei Biege- als auch bei Schnittproben genau in der Mitte liegt, wo der Dummy-Sensor eingebettet ist. Aber es ist auch deutlich zu erkennen, dass es drei Normalproben gibt, bei denen der Bruch nicht in der Mitte der Probe

auftritt. Dafür gibt es zwei mögliche Gründe: Der erste könnte sein, dass die Luftblasen nicht vollständig aus der Probe entfernt wurden. Luftblasen, die sich an den Enden der Probe verteilen, könnten diesen Bereich schwächen und zum Bruch führen, der zweite könnte sein, dass die Proben beim Einsetzen in die Prüfvorrichtung leicht gekippt wurden und sie deshalb im Griffbereich der Proben gebrochen sind. Dies könnte zu einer niedrigeren strukturellen Festigkeit der Normalproben führen.

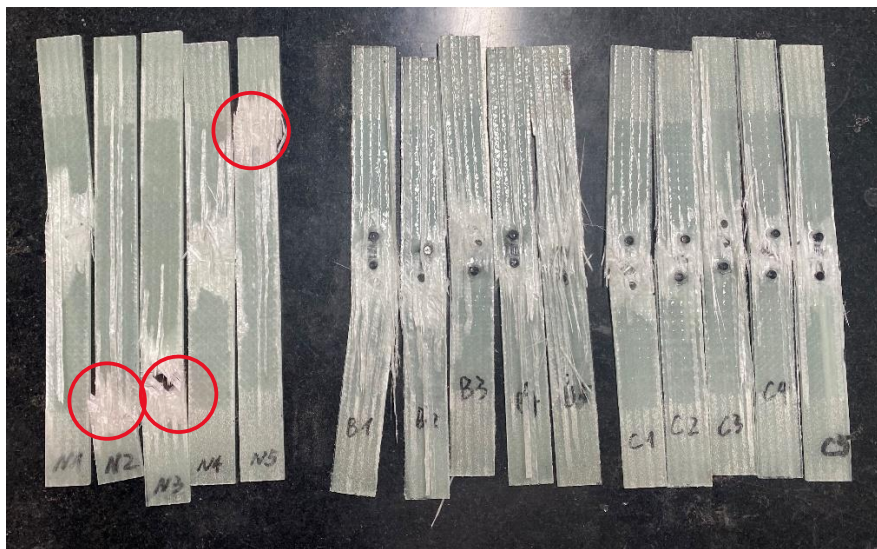


Abbildung 11: Die Proben von GFK nach dem Zugversuch

5.2 Vergleich der Kurven von GFK aus Biegeversuchen

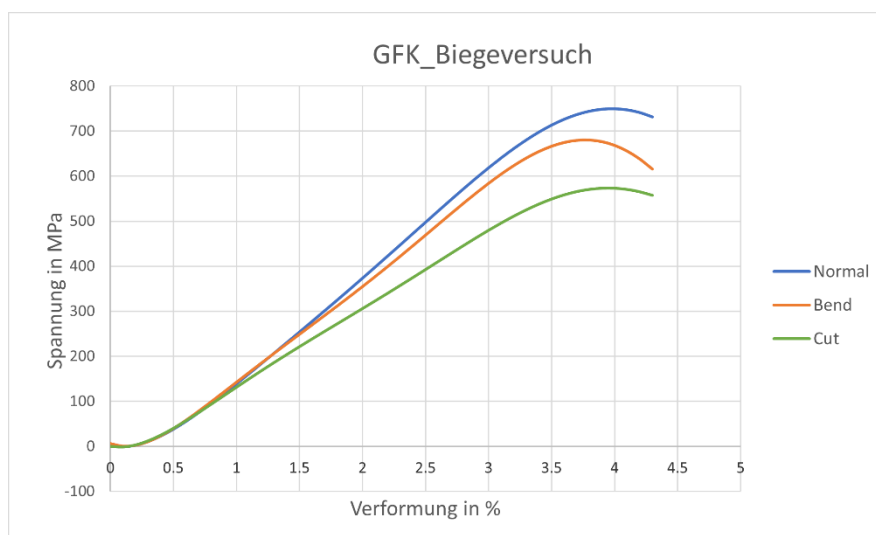


Abbildung 12: Kurvengrafik des Biegeversuchs der drei Proben von GFK

Aus den Ergebnissen der Biegeversuche wird deutlich, dass die Integration der Dummy-Sensor die Festigkeit des Verbundwerkstoff-Systems reduziert, da die Faser-Harz-Tragfähigkeit durch die

Unreinheit gestört wird. Es ist erwähnenswert, dass die Festigkeit der Biegeproben höher ist als die der Schnittproben. Die Festigkeitsreduzierung des Systems für die Schnittproben war fast 17 % höher als die entsprechende Veränderung für die Biegeproben.

Das folgende Diagramm zeigt die Probe nach dem Biegeversuch und verdeutlicht die Veränderung der Struktur in der Mitte der Proben als Folge der aufgebrachten Kräfte.

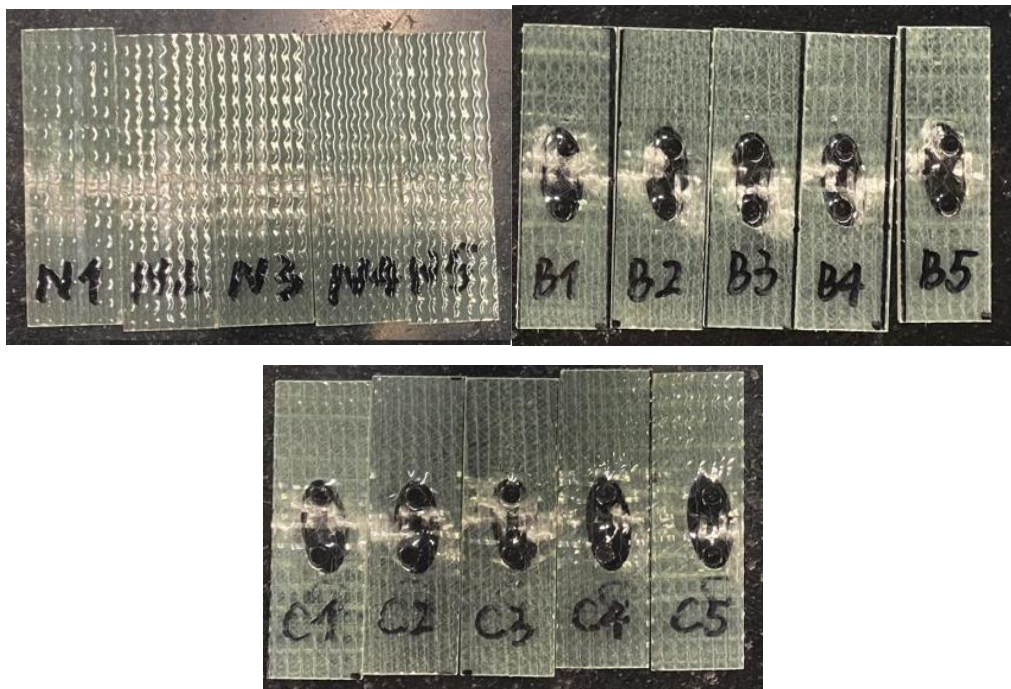


Abbildung 13: Die Proben von GFK nach dem Biegeversuch

5.3 Vergleich der Kurven von CFK aus Zugversuchen

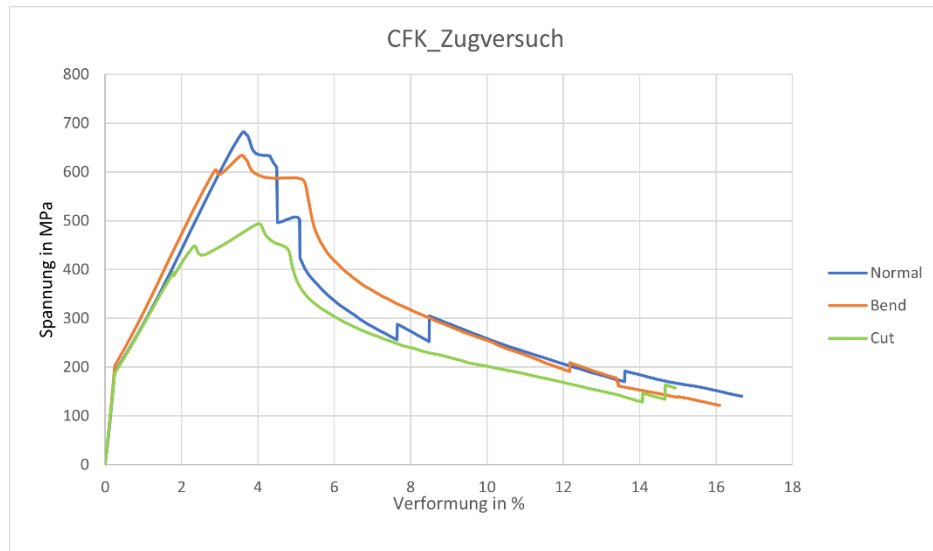


Abbildung 14: Kurvengrafik des Zugversuchs der drei Proben von CFK

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kurve im obigen Diagramm nicht glatt genug ist, was darauf zurückzuführen ist, dass die ursprünglichen Daten aus dem Zugversuch von CFK eine sehr steile Kurve aufwiesen und es schwierig war, mit Hilfe der Kurvenanpassung eine Durchschnittskurve zu erhalten, weshalb hier eine andere Methode der Datenverarbeitung verwendet wird.

Im obigen Diagramm ist die Kurve für die geschnittene Probe deutlich niedriger als die der beiden anderen Proben. Der Unterschied zwischen der Normal- und der Biegeprobe ist jedoch nicht signifikant. Dies zeigt, dass die Ergebnisse des Zugversuchs nicht zufriedenstellend waren, weshalb ein Biegeversuch durchgeführt wurde. Es ist jedoch erwähnenswert, dass bei einer Dehnungsrate von 3,7 %, der höchsten Spitze der Kurve, die Normalprobe höheren Spannungen standhalten kann als die geschnittene Probe.

Abgesehen davon zeigen die Biegeproben beider Materialien im Zugversuch keine größeren strukturellen Unterschiede im Vergleich zu den Normalproben.

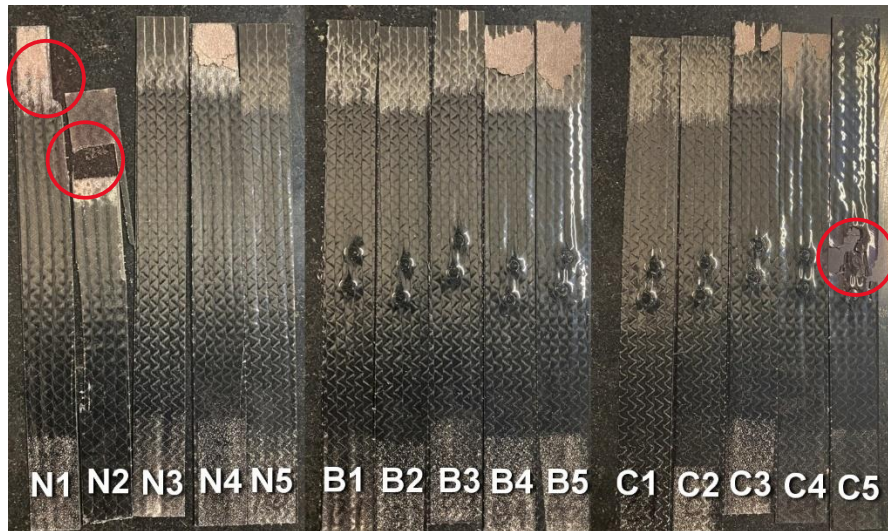


Abbildung 15: Die Proben von CFK nach dem Zugversuch

Wie auf dem Bild der Proben nach der Prüfung zu sehen ist, gibt es nur drei Proben mit signifikanten Brüchen, was auf die größere Elastizität und Zugfestigkeit von Kohlefasern im Vergleich zu Glasfasern zurückzuführen ist.

5.4 Vergleich der Kurven von CFK aus Biegeversuchen

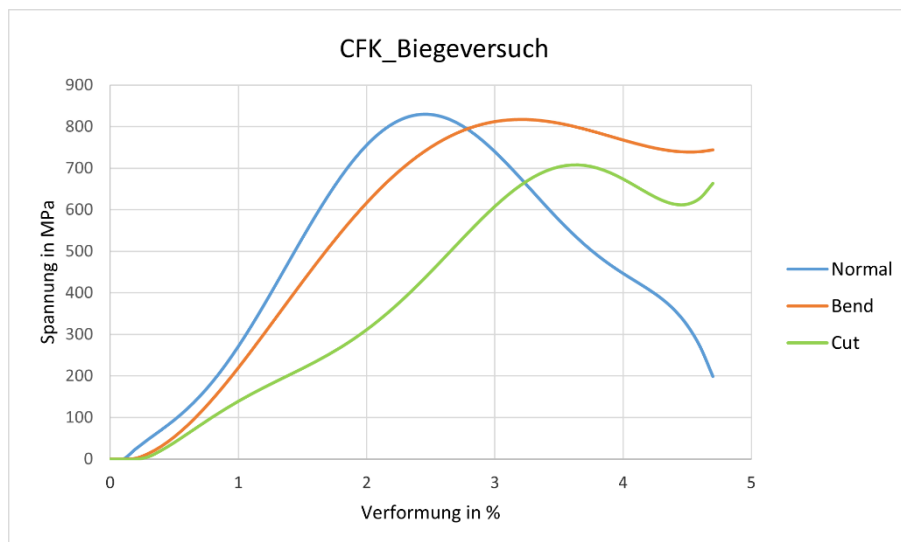


Abbildung 16: Kurvengrafik des Biegeversuchs der drei Proben von CFK

Die strukturellen Eigenschaften der Normalprobekörper sind deutlich stärker als die der Probekörper mit den Dummy-Sensoren, bis die Verformungsrate 2,4 % erreicht. Nach Erreichen des Spitzenwertes zeigt die Kurve von normalen Proben jedoch eine abnehmende Tendenz.

Die Biegeproben zeigen bessere Eigenschaften bei dem Biegeversuch als die Schnittproben.

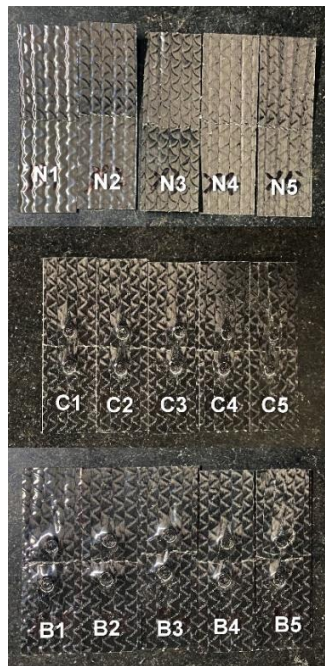


Abbildung 17: Die Proben von CFK nach dem Biegeversuch

6 Fehlerdiskussion

Die manuelle Methode der Einbettung von Dummy-Sensoren führt auch zu Fehlern, z. B. bei der Biegung der Fasern, die sich leicht verschieben können, und bei denen nicht garantiert werden kann, dass sie bei allen Fasern in gleichem Maße gebogen werden. Bei Fasern muss der Lochstanzer, der aufgrund von Werkzeugbeschränkungen keine ovale Form(Sensorform) hat, manuell durch Stanzen von Löchern in eine Sensorform gebracht werden, in der der Sensor platziert werden kann. Keine der beiden Einbett-Methoden kann garantieren, dass die Lücke für den Sensor genau die gleiche Form hat. Dieses Problem kann vermieden werden, wenn eine maßgeschneiderte Faserplatzierung verwendet werden kann.

Das Verfahren zur Verarbeitung der Probe wirkt sich auf die Probe aus: Beide, sowie die Temperatur, bei der das Harz eingespritzt wird, wie auch die Geschwindigkeit mit der das Harz zwischen der Gewebefasern fließt, können schwanken. Das wirkt sich auf die Aushärtung und die Dicke der Probe aus. Das verursacht Fehler. Offensichtlichen Fehler und Mängeln sind bei meinen Versuchen nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Beschränkung der Ausrüstung und aus Gründen der Energieeinsparung wurden die Nachhärtung der Proben in der Heizdecke verfestigt, und es kann zu ungleichmäßigen Temperaturen im Vergleich zum Backofen gekommen sein.

Aufgrund der Gegebenheiten entsprechen die Abmessungen einiger Proben nicht genau den Abmessungsanforderungen der Norm. Darüber hinaus können die Ergebnisse durch Messfehler bei der Messung der Abmessungen beeinflusst werden.

7 Zusammenfassung

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Biegen der Fasern, um sie an den Dummy-Sensor anzupassen, im Vergleich zum Schneiden der Faserschichten bessere Ergebnisse in Bezug auf das strukturelle Verhalten liefert. Die Integration der Dummy-Sensor führt zu einer Verringerung der Festigkeit der einzelnen Verbundsysteme, da die Faser-Harz-Matrix durch die Anwesenheit von Fremdkörpern gebrochen wurde.

Wie bei jedes Experiment gibt es auch bei dieser Arbeit Grenzen. Die Anzahl der Proben in dieser Arbeit basierte auf der von der Norm geforderten Mindestanzahl von fünf. Wenn die Anzahl der Proben erhöht werden könnte, könnten fehlerhafte Daten, die von der Durchschnittskurve abweichen, während der Datenverarbeitung entfernt werden, was zu genaueren experimentellen Ergebnissen führen würde.

Aufgrund des Zeitmangels wurden viele verschiedene Experimente auf die Zukunft verschoben. Zum Beispiel der Scherversuch, bei der die Schereigenschaften der Verbundwerkstoffe in der Ebene ein wesentlicher Parameter sind, der die Struktur des Verbunds beeinflusst. Die Einbeziehung von Daten aus Scherversuchen würde einen umfassenderen Vergleich der Auswirkungen der Einbettung auf die Struktur des Verbundstoffs ermöglichen.

Das Einbetten von drahtlosen Sensoren in faserverstärkten Verbundwerkstoffsystemen ist für die Aushärtungskontrolle von Verbundwerkstoffen von großem Interesse, und die Sensoren können mit mehreren Funktionen ausgestattet werden. Es ist daher unerlässlich, sie eingehender zu untersuchen, um z. B. die Größe des in sie eingebetteten Sensors zu optimieren.

Literaturverzeichnis

- [1] Javdanitehran, M., Hoffmann, R., Groh, J., Vossiek, M., & Ziegmann, G. (2016). Effect of embedded printed circuit board (PCB) sensors on the mechanical behavior of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) structures. *Smart Materials and Structures*, 25(6), 065016.
- [2] Ku, A. I. V. (Ed.). (2014). *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. Springer-Verlag.
- [3] <https://exelcomposites.com/guide-to-composites/>
- [4] Loewenstein, K.L. (1973). *The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers*. New York: Elsevier Scientific. pp. 2–94. ISBN 978-0-444-41109-9.
- [5] Sathishkumar, T.; Satheeshkumar, S.; Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258–1275.
- [6] Cameron, N. M., and C. F. Rapp. "Fiberglass, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*." (2001): 3142-3146.
- [7] Chung, Deborah DL, and Deborah Chung. *Carbon fiber composites*. Elsevier, 2012.
- [8] ISO 527-1:2019(en) *Plastics — Determination of tensile properties*
- [9] ISO 178:2019 - *Plastics — Determination of flexural properties*