



TU Clausthal

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Experimentelle Studie zum Anstrengungs- und
Versagensverhalten von Composites mit integrierten
Sensorelementen

Masterarbeit

eingereicht von:	Wanlu Li
	Matrikelnummer: 495701
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann
Zweitgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling
Betreuer:	M. Sc. Gaurab Sundar Dutta
Abgabetermin:	22.03.2023

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und das alle Stellen dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen werden, als solche kenntlich gemacht wurden und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsstelle vorgelegt wurde.

Ort, Datum

Unterschrift

Des Weiteren erkläre ich, dass ich mit der öffentlichen Bereitstellung meiner Abschlussarbeit in der Instituts- und Universitätsbibliothek einverstanden bin.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich nutze diese Gelegenheit, um allen Personen zu danken, die mich während meiner Masterarbeit unterstützt und begleitet haben.

Zuallererst möchte ich meinem Gutachter Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann danken, der mich professionell beraten und motiviert hat. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dutta, der mir bei Schwierigkeiten und Problemen immer sehr freundlich und hilfsbereit zur Seite stand und mir mit seiner Geduld und seinem Fachwissen geholfen hat, diese Arbeit abzuschließen. Ich habe viel von ihm gelernt, und dafür bin ich ihm zutiefst dankbar.

Außerdem möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PuK) bedanken, die mir während meiner Versuchsphase sehr geholfen haben.

Ich möchte auch der Universität und dem Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PuK) danken, die mir die Möglichkeit gegeben haben, mein Studium auf diesem Niveau fortzusetzen.

Schließlich möchte ich mich bei meinem Freund bedanken, der mich während meiner Arbeit immer unterstützt hat.

Ich danke allen Personen, die mich während meiner Masterarbeit unterstützt haben. Ohne ihre Hilfe und Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Clausthal-Zellerfeld im März 2023

Abstrakt

Die Einbettung von Sensoren in faserverstärkte Kunststoffe ermöglicht die Überwachung und Kontrolle des Aushärtungsprozesses. Allerdings kann die Integration von Sensoren zu einer Verringerung der strukturellen Festigkeit führen. In dieser Arbeit wurde die Auswirkung verschiedener Sensorformen auf die Verbundstruktur durch Änderung der Geometrie des Sensorkörpers beobachtet. Hierzu wurden Zug- und Drei-Punkt-Biegeversuche durchgeführt, um das Anstrengungs- und Versagensverhalten von Probekörpern mit unterschiedlichen Sensorformen zu vergleichen. Die erzielten Ergebnisse wurden verglichen und analysiert, um die Integration verschiedener Sensorformen in ein und demselben Verbundwerkstoff zu bestimmen. Zudem wurden die Ergebnisse der Zugversuche durch eine rechnerische Annäherung auf Basis des Hookeschen Gesetzes und Finite-Elemente-Methoden mittels ANSYS verifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass elliptisch geformte Sensoren bessere mechanische Eigenschaften unter Zug- und Biegebelastung aufweisen. Sowohl die experimentellen Ergebnisse als auch die Validierungsergebnisse stützen diese Schlussfolgerung.

Abstract

The embedding of sensors in fiber-reinforced plastics enables the monitoring and control of the curing process. However, the integration of sensors can lead to a reduction in structural strength. In this study, the effect of different sensor shapes on the composite structure was observed by changing the geometry of the sensor body. Tensile and three-point bending tests were carried out to compare the stress and failure behavior of specimens with different sensor shapes. The obtained results were compared and analyzed to determine the integration of different sensor shapes in the same composite material. In addition, the results of the tensile tests were verified using a computational approximation based on Hooke's law and finite element methods using ANSYS. The results show that elliptically shaped sensors have better mechanical properties under tensile and bending loads. Both the experimental results and the validation results support this conclusion.

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlage	6
2.1	Faserverbundkunststoffe.....	6
2.2	Glasfaser	7
2.3	Epoxidharz.....	8
2.4	Mechanische Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen	9
2.4.1	Zugfestigkeitseigenschaften	9
2.4.2	Biegeversuch	11
3	Materialien und Methoden	13
3.1	Materialien.....	13
3.2	Formauswahl für Dummy-Sensoren.....	14
3.3	Abmessungen der Dummy-Sensoren	15
3.4	Einbetten der Dummy-Sensoren.....	16
3.5	Der VARI Prozess.....	19
3.6	Herstellung der Proben.....	21
4	Experimentelle Untersuchung	23
4.1	Der Zugversuch	23
4.2	Der Drei-Punkt-Biegeversuch	24
5	Auswertung der Ergebnisse	25
5.1	Ergebnisse aus Zugversuchen.....	25
5.1.1	Vergleich der Ergebnisse für die Quadrat- und Rund-Proben	25
5.1.2	Vergleich der Ergebnisse für die Grundformen und Optimierte Formen	27
5.1.3	Vergleich der Ergebnisse für die Oval-, Augenform- und Rechteck-Proben.....	28
5.1.4	Vergleich der Zugfestigkeit aller Probekörper.....	29
5.2	Ergebnisse aus Biegeversuchen.....	30

5.2.1	Vergleich der Kurven aller Probekörper	31
5.2.2	Vergleich der Biegefestigkeit aller Probekörper	33
6	Validierung	37
6.1	Berechnung der Federkonstante	37
6.2	FEM-Simulation	42
7	Fehlerdiskussion	48
8	Zusammenfassung und Ausblick	50
	Literaturverzeichnis	52

Abkürzungsverzeichnis

AF	Die Proben mit eingebetteten augenförmigen Dummy-Sensoren
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverbundwerkstoffe
GFRP	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LAF	Die Proben mit eingebetteten langen augenförmigen Dummy-Sensoren
LO	Die Proben mit eingebetteten langen ovalen Dummy-Sensoren
NM	Die Proben ohne Dummy-Sensor
OL	Die Proben mit eingebetteten ovalen Dummy-Sensoren
PCB	Printed Circuit Board
PLA	Polymilchsäure
PZB	Piezoelektrisch
QD	Die Proben mit eingebetteten quadratischen Dummy-Sensoren
RD	Die Proben mit eingebetteten runden Dummy-Sensoren
RK	Die Proben mit eingebetteten rechteckigen Dummy-Sensoren
UD	Unidirektionale Fasergewebe
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion

Symbolverzeichnis

A	Die Fläche, auf die die Kraft einwirkt in mm^2
b_s	Die Breite der Dummy-Sensoren in mm
d	Die Dicke der Proben in mm
d_s	Die Dicke der Dummy-Sensoren in mm
E	Elastizitätsmodul in MPa
F	Die Normalkraft in N
F_x	Federkraft in N
k	Elastizitätsmodul von geraden Fasern
k'	Elastizitätsmodul von gebogen Fasern
L	Der Auflagerabstand bei der Biegeversuch in mm
l_s	Die Länge der Dummy-Sensoren in mm
r_1	Die erste Biegedehngeschwindigkeit in $\%/min$
r_2	Die zweite Biegedehngeschwindigkeit in $\%/min$
V_f	Das Faservolumengehalt in %
v_f	Das Volumen des Textils in mm^3
v_c	Das Volumen des Composites in mm^3
v_t	Die Prüfgeschwindigkeit beim Zugversuch in mm/min
v_1	Die erste Prüfgeschwindigkeit beim Biegeversuch in mm/min
v_2	Die zweite Prüfgeschwindigkeit beim Biegeversuch in mm/min
x	Federverschiebung in mm
α	Der erste Winkel der gebogenen Fasern zur Horizontalen in Grad
β	Der zweite Winkel der gebogenen Fasern zur Horizontalen in Grad
ΔL	Die Verlängerung der Proben in mm
σ	Die Normalspannung in N/mm^2

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Optische Gitter Sensor	2
Abbildung 1-2: In Verbundwerkstoffe eingebettete dielektrische Sensoren	2
Abbildung 1-3: Schema für den Aufbau der Arbeit.....	5
Abbildung 2-1: Faserverbundkunststoffe	6
Abbildung 2-2: Schematische Skizze des Prüfaufbaus für Zugversuch.....	11
Abbildung 2-3: Schematische Skizze des Prüfaufbaus für Drei-Punkt-Biegeversuch.....	11
Abbildung 3-1: Optimierung durch Verformung.....	14
Abbildung 3-2: Die Augenform aus der Natur	15
Abbildung 3-3: Zwei Methoden zur Einbettung von Dummy-Sensoren.....	17
Abbildung 3-4: Anordnung der Gewebelagen.....	17
Abbildung 3-5: Die gleiche Form, aber unterschiedliche Längen der betroffenen Fasern.....	18
Abbildung 3-6: Länge der betroffenen Fasern für verschiedene Proben.....	18
Abbildung 3-7: Die VARI-Konstruktion	19
Abbildung 3-8: VARI-Aufbau	19
Abbildung 3-9: Harzinjektionsverfahren für Gewebe mit eingebetteten Dummy-Sensoren	20
Abbildung 3-10: Prozess für Probenherstellung.....	21
Abbildung 3-12: Die Proben für Drei-Punkt-Biegeversuch.....	22
Abbildung 3-11: Die Proben für Zugversuch	22
Abbildung 4-1: Zugversuch nach DIN ISO 527.....	23
Abbildung 4-2: Drei-Punkt-Biegeversuch nach DIN ISO 178.....	24
Abbildung 5-1: Kurvenvergleich für Zugversuch von Quadrat- und Rund-Proben.....	26
Abbildung 5-2: Die Quadrat- und Rund-Proben nach Zugversuch.....	26
Abbildung 5-3: Kurvenvergleich für Zugversuch von RK- und QD-Proben	27
Abbildung 5-4: Kurvenvergleich für Zugversuch von OL- und RD-Proben.....	27
Abbildung 5-5: Kurvenvergleich für Zugversuch von RK- , OL- und AF-Proben im Verhältnis zu Proben ohne Störung.....	28
Abbildung 5-6: Umformung von Fasern mit unterschiedlichen Geometrien	29
Abbildung 5-7: Die Proben nach Zugversuch	29

Abbildung 5-8: Vergleich der Zugfestigkeit	30
Abbildung 5-9: Kurvenvergleich für Biegeversuch von QD- und RD-Proben	31
Abbildung 5-10: Kurvenvergleich für Biegeversuch von RK- , OL, und AF-Proben.....	32
Abbildung 5-11: Kurvenvergleich für Biegeversuch von LO-, LAF- Proben.....	32
Abbildung 5-12: Die Dummy-Sensoren mit der langen Ovalform und der langen Augenform.	33
Abbildung 5-13: Die Biegefestigkeit aller Proben	35
Abbildung 5-14: Vergleich der Biegefestigkeit	36
Abbildung 6-1: Konturlinie der Fasern in der Nähe des Dummy-Sensors.....	37
Abbildung 6-2: Die Proben mit und ohne Dummy- Sensoren im Zugversuch	38
Abbildung 6-3: Federmodelle für verschiedene Geometrien	39
Abbildung 6-4: Mathematische Berechnung des Federmodells.....	40
Abbildung 6-5: Die Koordinatenpositionen des A-, B- und C-Punktes	41
Abbildung 6-6:Vergleich der Verhältnisse der Federkonstanten	42
Abbildung 6-7: Modellierung.....	43
Abbildung 6-8: Vernetzung in FEM.....	43
Abbildung 6-9: Spannungsverteilung von QR- und RD-Modell.....	44
Abbildung 6-10: Die Spannungsverteilung mit der gleichen Skala von QR- und RD-Modell.....	44
Abbildung 6-11: Die Spannungsverteilung von OL-, RT- und AF-Modell.....	45
Abbildung 6-12: Die Spannungsverteilung mit der gleichen Skala von OL-, RT- und AF-Modell	46
Abbildung 7-1: Die Spannung-Dehnung-Kurven für Zugversuch von RK-Proben.....	48
Abbildung 7-2: Umformen von Fasern neben dem rechteckigen Sensoren.....	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierung und die Eigenschaften von verschiedenen Glasfasern.....	8
Tabelle 2 :Abmessungen der Dummy-Sensoren	16
Tabelle 3: Die Abmessungen und Anzahl der Proben	21
Tabelle 4: Koordinaten von A-, B- und C-Punkt für verschiedenen Geometrien.....	41
Tabelle 5: Die Winkel in der Formel von verschiedenen Dummy-Sensoren	42
Tabelle 6: Die maximalen und minimalen Spannungswerte für verschiedene Modelle.....	47

1 Einleitung

1.1 Motivation

In der heutigen Produktion werden Faserverbundwerkstoffe wegen ihres guten Verhältnisses von Festigkeit zu Gewicht und ihrer Korrosionsbeständigkeit in verschiedenen Industriezweigen immer beliebter. Der größte Teil der Faserverbundstrukturen wird in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Automobilindustrie verwendet, aber auch in Windkraftanlagen und im Bauwesen [1]. Die Leichtbaueigenschaften, insbesondere von faserverstärkten Kunststoffen (FVK), ermöglichen es, dass Luft- und Raumfahrtkonstruktionen deutlich leichter sind und somit die Umwelt deutlich weniger belasten, was zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und einem effizienteren Betrieb führt [2]. Aufgrund des Potenzials für eine höhere Ökoeffizienz werden immer mehr Strukturmaterialien für die Luft- und Raumfahrt aus FVK hergestellt, was zu einem erheblichen Wachstum der Faserverbundindustrie geführt hat. Ihre Produktion ist in den letzten Jahrzehnten mit einer durchschnittlichen Rate von 10 % pro Jahr stetig gestiegen [3]. Aufgrund ihres deutlich höheren Gewichtspotenzials gegenüber herkömmlichen Konstruktionswerkstoffen, wie z. B. Stahl [4], bieten sie auch große Möglichkeiten für den Leichtbau.

Mit der steigenden Verwendung von Verbundwerkstoffen hat die strukturelle Integrität dieser Materialien in der jüngsten Forschung einen wichtigen Schwerpunkt eingenommen. Aufgrund möglicher struktureller Überlastungen und Umwelteinflüsse sind Verbundwerkstoffe anfällig für Risse, Alterung und Schäden während ihrer Lebensdauer [5]. Daher ist das Erreichen eines bestimmten Aushärtungszustands des Harzes ein wichtiges Qualitätsziel, da der Endzustand der Faser-Harz-Matrix, der während des Aushärtungsprozesses erreicht wird, direkt mit den mechanischen Eigenschaften des endgültigen Bauteils zusammenhängt. Um die Auswirkungen dieser Variabilität zu erfassen, wurde viel Forschung in die Überwachung des Aushärtungsprozesses gesteckt, um eine höhere Qualität und Reproduzierbarkeit der Produktion zu gewährleisten. In der Vergangenheit haben Forscher eine Vielzahl von Methoden zur Untersuchung der Aushärtungseigenschaften von Verbundwerkstoffen eingesetzt. Dazu gehören Methoden wie Thermoelemente [6], Drucksensoren [7] und faseroptische Gitter (Sensoren, die Veränderungen der optischen Eigenschaften durch Übertragung von Licht und

Überwachung der Lichtintensität am anderen Ende des Sensors messen [8] [9]). Ihre industrielle Anwendbarkeit ist jedoch durch die komplexe Analyse der von ihnen gemessenen Materialeigenschaften begrenzt.

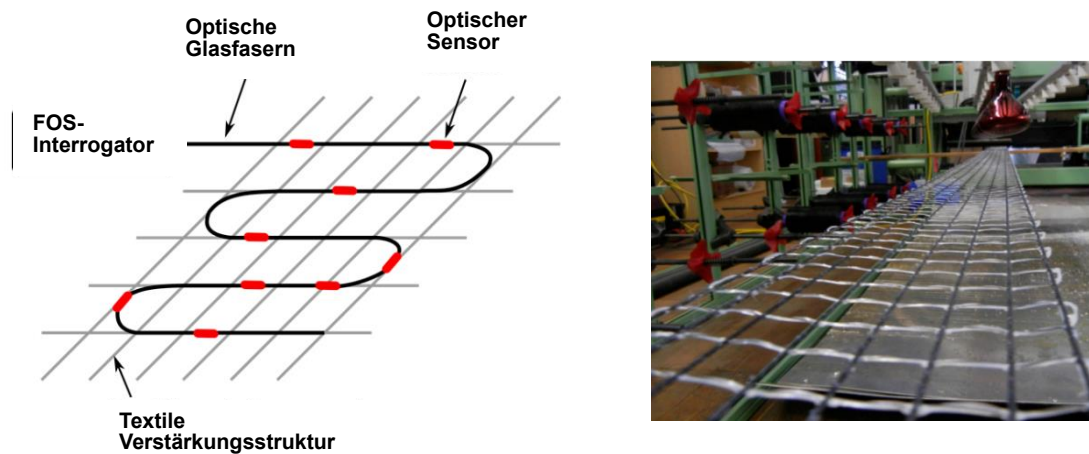


Abbildung 1-1: Optische Gitter Sensor

Ein weiterer vielversprechender Ansatz zur Überwachung des Aushärtungsprozesses von Verbundwerkstoffen ist der Einsatz von dielektrischen Sensoren [10]. Diese können direkt in das Material integriert werden und zeichnen sich durch eine hohe Empfindlichkeit bei der Messung und Analyse der dielektrischen Eigenschaften des Materials aus, da sie die komplexe Permittivität messen. Der eingebettete dielektrische Sensor nutzt elektrische Signale, um Änderungen der Dielektrizitätskonstante und des spezifischen Widerstands des Verbundwerkstoffs während des Aushärtungsprozesses zu überwachen [11].

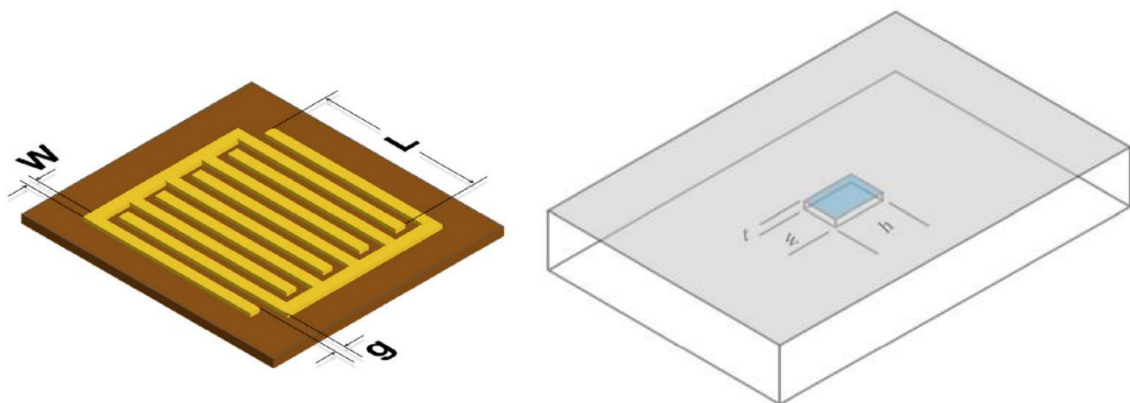


Abbildung 1-2: In Verbundwerkstoffe eingebettete dielektrische Sensoren

Die erfassten dielektrischen Eigenschaften können zur Bestimmung des Aushärtungsgrads genutzt werden. Dank Fortschritten in der Sensortechnologie ist es nun möglich, drahtlose Messungen im GHz-Bereich durchzuführen [12]. Durch die Integration dieser Sensoren in die verschiedenen Schichten des Verbundwerkstoffs können Aushärtungsprozesse in bestimmten Bereichen drahtlos überwacht und Änderungen der Prozessparameter über die gesamte Dicke des Bauteils hinweg verfolgt werden.

Frühere Untersuchungen [13] [14] haben die Auswirkungen von eingebetteten PZT-Sensoren auf die strukturelle Integrität von Verbundwerkstoffen ausführlich untersucht. Masmoudi et al. haben die mechanischen Eigenschaften von Laminaten mit und ohne Sensoren verglichen [15], während Hufenbach et al. feststellten, dass die Veränderung der mechanischen Eigenschaften hauptsächlich durch die Bildung von matrixreichen Bereichen verursacht wird [16]. Das Ausmaß dieser Veränderungen hängt von der Geometrie des Sensors ab [17]. Die Studie [18] untersuchte die Verwendung rechteckiger Sensoren in Faserverbundwerkstoffen und stieß dabei auf Probleme mit Harzablagerungen um die Sensoren, die die Integrität des Materials beeinträchtigten.

Diese Arbeit baut auf früheren Forschungen auf, bei denen 3D-gedruckte Teile (Dummy-Sensoren) unterschiedlicher Geometrie in eine Faserverbundwerkstoff-Schicht integriert wurden. Ziel war es, eine bessere Integration von Sensoren und Verbundwerkstoffen zu erreichen, indem die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe verglichen wurden.

1.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit werden die Auswirkungen unterschiedlicher Sensorformen auf die Struktur von Verbundwerkstoffen beobachtet, indem die Geometrie des Sensorkörpers modifiziert wird. Ziel ist es, die Verbindung zwischen dem Sensor und dem Verbundwerkstoff zu verbessern. Hierfür wurden Zug- und Drei-Punkt-Biegeversuche durchgeführt, um das Anstrengungs- und Versagensverhalten von Proben mit verschiedenen Sensorformen zu vergleichen. Die daraus gewonnenen Ergebnisse wurden analysiert, um die Integration verschiedener Sensorformen in denselben Verbundwerkstoff zu bestimmen. Zudem wurden theoretische Näherungsberechnungen sowie Finite-Elemente-Simulationen mittels ANSYS durchgeführt, um die experimentellen Ergebnisse zu validieren. Durch den Vergleich von experimentellen und theoretischen Ergebnissen konnte die Richtigkeit und Glaubwürdigkeit der Versuchsergebnisse erhöht werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Kapitel 2 werden grundlegende Kenntnisse über Faserverbundwerkstoffe und ihre mechanischen Eigenschaften vermittelt.

Im Kapitel 3 werden die für diese Arbeit verwendeten Materialien erörtert, einschließlich der Materialien, die für die Herstellung der Verbundwerkstoffe und der Dummy-Sensoren benötigt werden. Außerdem wird das für diese Arbeit gewählte Verfahren, die Vakuuminfusion, beschrieben. Insbesondere werden die Gründe für die Wahl der Form des Sensorkörpers und die Art und Weise, wie der Sensor eingebettet wurde, erläutert. Schließlich wird der gesamte Herstellungsprozess der für die Tests verwendeten Proben beschrieben.

Im Kapitel 4 werden die beiden für diese Arbeit durchgeführten Tests, der Zugversuch und der Drei-Punkt-Biegeversuch, beschrieben, und es werden die Kriterien für die Tests und die Testbedingungen erläutert.

Im Kapitel 5 wird die Reaktion der eingebetteten Proben mit unterschiedlich geformten Sensoren unter Zug- und Biegebelastung detailliert erörtert. Dabei werden die Spannungs-Dehnungskurven verglichen, um die mechanischen Eigenschaften der Proben zu beobachten.

Kapitel 6 konzentriert sich auf die Validierung der Zugversuchsergebnisse aus Kapitel 5 durch zwei verschiedene Methoden, einschließlich der rechnerischen Annäherung auf der Grundlage des Hookeschen Gesetzes und der Simulationsvalidierung durch FEM, um die erhaltenen experimentellen Daten zu unterstützen.

Im Kapitel 7 werden die Methodik und der Prozess dieser Arbeit kritisch bewertet, und es werden die Fehler in den Tests erörtert.

Kapitel 8 schließt die Arbeit ab und gibt einen Ausblick auf die Zukunft.

Um den Aufbau der Arbeit klarer zu vermitteln, wird im Folgenden ein Schema präsentiert.

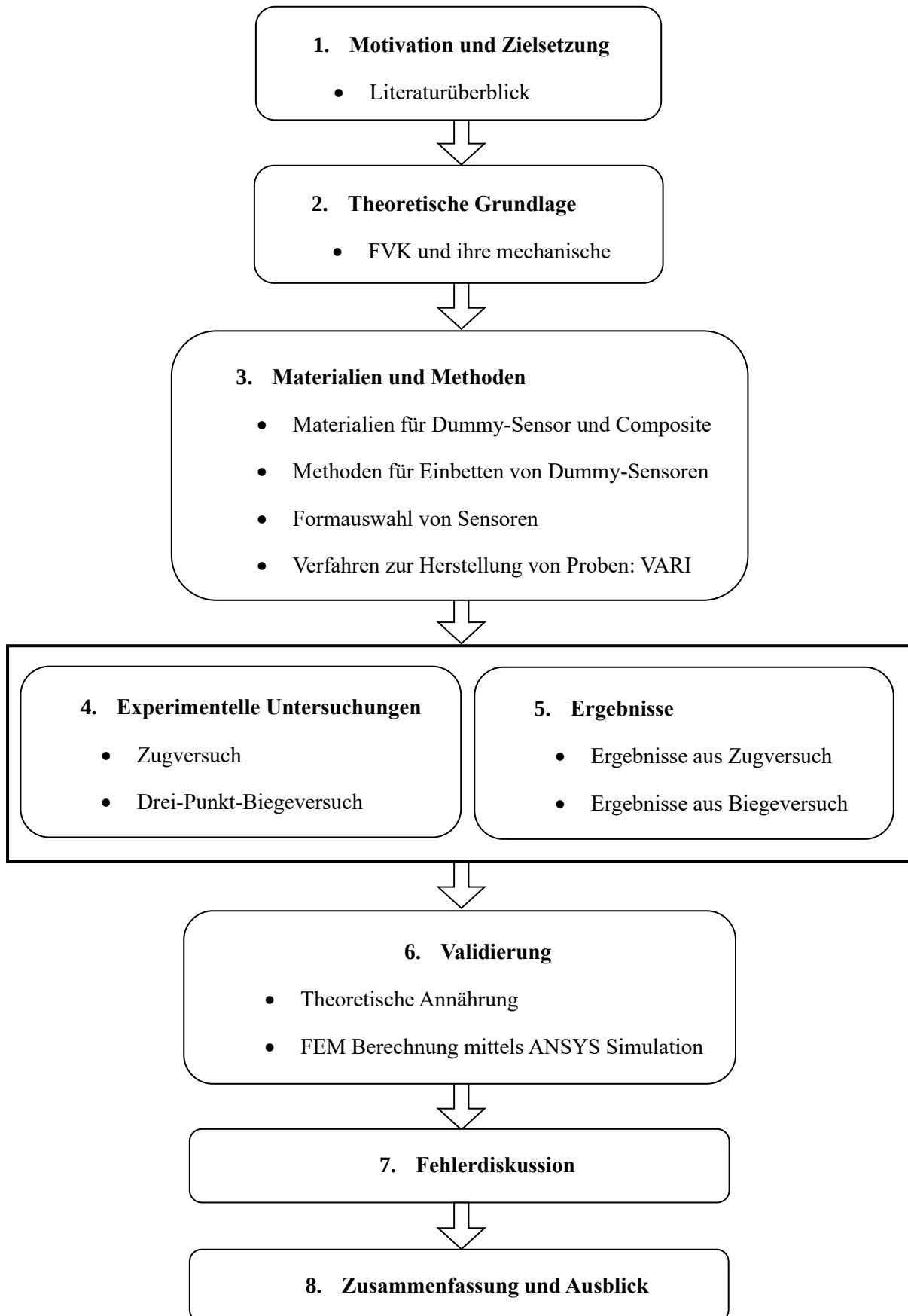


Abbildung 1-3: Schema für den Aufbau der Arbeit

2 Grundlage

Dieses Kapitel behandelt die Grundlagen von faserverstärkten Kunststoffen und ihren mechanischen Eigenschaften. In Abschnitt 2.1 wird eine kurze Einführung in faserverstärkte Kunststoffe gegeben. In den Abschnitten 2.2 und 2.3 wird eine kurze Einführung in Glasfasern bzw. Harzmatrizes gegeben, aus denen faserverstärkte Kunststoffe bestehen. Abschließend werden in Abschnitt 2.4 die mechanischen Eigenschaften der Proben diskutiert.

2.1 Faserverbundkunststoffe

Verbundwerkstoffe sind Materialien, bei denen verschiedene Komponenten miteinander kombiniert werden. Faserverbundwerkstoffe (FVK) oder faserverstärkte Kunststoffe sind eine Untergruppe der Verbundwerkstoffe, die aus einem Matrixmaterial wie Thermoplaste oder Duroplaste (vorwiegend aus Polyester- und Epoxidharzen) oder Beton und Fasern bestehen. Um die Materialeigenschaften der Fasern nutzen zu können, müssen sie in die Matrix eingebettet werden [19].

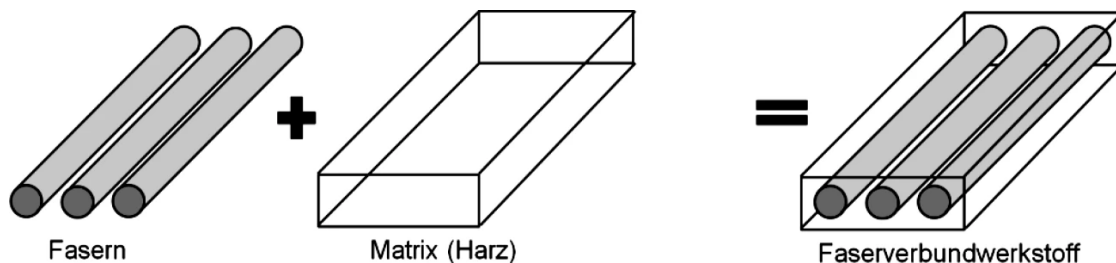


Abbildung 2-1: Faserverbundkunststoffe

Bei fast allen technischen Anwendungen, bei denen eine hohe Steifigkeit, Festigkeit und Ermüdungsbeständigkeit erforderlich ist, werden Verbundwerkstoffe mit Endlosfasern und nicht mit kleinen Partikeln oder Whiskern verstärkt. Sowohl die Fasern als auch die Matrix können aus verschiedenen Produkten bestehen.

In Faserverbundwerkstoffen haben die Fasern und die Kunststoffmatrix jeweils eine bestimmte Funktion. Die wichtigste Eigenschaft der Fasern liegt in der Längsrichtung und gewährleistet Zugfestigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung, hier wird häufig die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften der Fasern genutzt. Die Matrix hat drei Aufgaben: Sie sorgt für den Kraftfluss im Verbundwerkstoff, indem

sie die Spannung von Faser zu Faser überträgt. Darüber hinaus stützt die Matrix die von Natur aus weichen Fasern, um ein Verbiegen unter Druck zu verhindern. Schließlich schützt die Matrix die eingebetteten Fasern vor externen, möglicherweise korrosiven Umweltmedien [20]. Die Art der Verstärkungsfaser, der Faservolumengehalt (FVG) und die Faserausrichtung haben einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des späteren Bauteils.

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

Glasfasern sind anorganische, nichtmetallische Werkstoffe mit hervorragenden Eigenschaften, die in verschiedenen Ausführungen erhältlich sind [21]. Die Struktur von Glasfasern ist eine amorphe Struktur, die aus Silizium, Sauerstoff und anderen Atomen besteht. Sie wird durch Schmelzen bei hoher Temperatur, Ziehen, Wickeln und Weben hergestellt, wobei die Monofilamente einen Durchmesser von 7 bis 20 Mikron haben [22]. Das Material selbst ist isotrop. Die Nachteile von Glasfasern im Vergleich zu Kohlenstofffasern sind ihre Sprödigkeit, ihre geringeren Ermüdungseigenschaften, ihre Empfindlichkeit gegenüber Verschleiß bei der Handhabung und ihre hohe Dichte. Allerdings gelten Bauteile aus Glasfasern als kostengünstiger als Bauteile aus Kohlenstofffasern. Das liegt vor allem an den breiteren Anwendungsmöglichkeiten von Glasfasern und den deutlich niedrigeren Herstellungskosten.

Glasfasern werden häufig als Verstärkung in Verbundwerkstoffen, zur elektrischen und thermischen Isolierung, für Leiterplatten und in anderen Bereichen der Volkswirtschaft verwendet. Die gängigen Glasfasertypen sind S-Glas, E-Glas und C-Glas. S- und E-Glasfasern sind am weitesten verbreitet. S-Glas hat die höchste Zugfestigkeit und wird aufgrund seiner hohen Kosten meist für Flugzeug- und Raketenteile verwendet. Das C-Glas ist wegen seiner hohen Säurebeständigkeit bei den chemischen Elementen sehr beliebt [23].

In der nachstehenden Tabelle [24] [25] sind verschiedene gängige Glasfasern aufgeführt; die in dieser Arbeit verwendete Sorte ist E-Glas.

Tabelle 1: Klassifizierung und die Eigenschaften von verschiedenen Glasfasern

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 Epoxidharz

Epoxidharze werden aufgrund ihrer ausgezeichneten Faser-Matrix-Haftung, ihrer Feuchtigkeits- und hohen Korrosionsbeständigkeit nach dem Aushärten häufig als Basismaterial eingesetzt. Im Vergleich zu anderen polymeren Basismaterialien sind sie weniger anfällig für Beeinträchtigungen durch Wasser und Hitze [40].

Es ist bekannt, dass in Faserverbundwerkstoffen die Verstärkungsfasern den größten Teil der Last tragen. Es ist wichtig sicherzustellen, dass die Fasern im Verbundwerkstoff bis zu ihrer Bruchdehnung gedehnt werden können. Wenn die Bruchdehnung der Matrix geringer ist als die Bruchdehnung der Fasern, führt dies dazu, dass die Fasern reißen, wenn die Bruchdehnung der Matrix erreicht ist. Dadurch wird der Verbundwerkstoff vorzeitig beschädigt [27]. Es ist zu beachten, dass dies insbesondere bei niedrigen Temperaturen der Fall ist, wenn das Matrixmaterial aus Epoxid-, Vinylester- oder Phenolharzen besteht, die spröde werden und deren Bruchdehnung abnimmt [27].

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, hängen die Eigenschaften der Verbundwerkstoffproben zu einem großen Teil vom Faser-Volumenanteil (FVG) ab. Um eine gleichmäßige FVG für alle Proben zu erreichen, muss vor der Harzinjektion die benötigte Menge an Harz und Härter mit Gleichung 2-1 berechnet werden.

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (2-1)$$

Der maximal erreichbare Faservolumenanteil für Faserverbundlamine liegt in der Regel bei etwa 80-90 %. Oberhalb dieser Werte kann das Harz nicht in die Fasern imprägniert werden [28][29].

2.4 Mechanische Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen

Die mechanischen Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen hängen von den Eigenschaften der Matrix und den Fasern sowie den Bauteilen ab. Aufgrund ihrer Anisotropie sind die mechanischen Eigenschaften und Versagensmechanismen von faserverstärkten Kunststoffen komplexer als die von herkömmlichen isotropen Werkstoffen wie Metallen mit einer Vielfalt an Legierungen. Diese Arbeit befasst sich daher mit einem grundlegenden Verständnis der mechanischen Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen unter Zug- und Biegebeanspruchung. In den folgenden Abschnitten werden die Zug- und Biegeeigenschaften von glasfaserverstärkten Kunststoffen dargestellt.

Die mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen hängen von den jeweiligen mechanischen Eigenschaften der Fasern und der Matrix ab sowie vom Volumenverhältnis zwischen den Fasern und der Matrix und von der Ausrichtung der eingebetteten Fasern. Während des Produktionsprozesses ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Fasern gut in die Matrix integriert werden, um eine ausreichende Haftung unter Belastung sicherzustellen.

2.4.1 Zugfestigkeitseigenschaften

Das Hookesche Gesetz beschreibt das lineare elastische Verhalten eines Materials, wenn es einer Zug- oder Druckbelastung ausgesetzt wird. Bei der Betrachtung des elastischen Verhaltens von Verbundwerkstoffen wird in der Regel davon ausgegangen, dass sowohl die Fasern als auch das Harz linear elastisch sind. Das elastische Verhalten von Verbundwerkstoffen kann somit durch das Hookesche Elastizitätsgesetz beschrieben werden, welches besagt, dass die aufgebrachte Kraft proportional zur Fläche ist.

$$\sigma = E = \frac{F}{A} \quad (2-2)$$

In dieser Arbeit wurden unidirektionale Fasergewebe verwendet, um Verbundwerkstoffproben herzustellen. Daher sind die hergestellten Proben transversal isotrop, was eine spezielle Klasse orthotroper anisotroper Materialien darstellt. Das bedeutet, dass sie in einer Ebene die gleichen

Eigenschaften haben, während sie in Richtungen senkrecht zu dieser Ebene unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Zur Beschreibung dieser Eigenschaften sind neun unabhängige Variablen (d.h. elastische Konstanten) in der intrinsischen Matrix erforderlich [30].

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-v_{yx}}{E_y} & \frac{-v_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{-v_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{xz}}{E_x} & \frac{-v_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{zx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Die Zugeigenschaften von faserverstärkten Verbundwerkstoffen werden durch die Zugfestigkeit der Fasern bestimmt. Unter der Annahme einer perfekten Verbindung zwischen den Fasern und dem Harz sollte die Dehnung einer Probe unter Zugbelastung in Richtung der Fasern gleich der Dehnung der Fasern und des Harzes sein [31]. Wenn die Dehnung des Verbundmaterials, der Fasern und des Harzes gleich ist, hängt der Spannungswert direkt vom Elastizitätsmodul des Materials ab. Je höher der Elastizitätsmodul, desto höher ist die Spannung. Da die Festigkeit der Fasern bei Faserverbundwerkstoffen höher ist als die des Harzes aufgrund des höheren Elastizitätsmoduls der Fasern, bricht in der Regel die Faser-Harz-Matrix als erste und führt zum Versagen des Verbundwerkstoffs. Ein unbegrenzter Anstieg des Faservolumenanteils kann sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken.

Bei einem Zugversuch wird die Probe in der Regel an einem Ende gehalten und am anderen Ende mit einer Zugkraft belastet, wie in der Abbildung 2-2 dargestellt.



Abbildung 2-2: Schematische Skizze des Prüfaufbaus für Zugversuch

2.4.2 Biegeversuch

Um die Biegeeigenschaften des Materials zu ermitteln, wurde für diese Arbeit ein Drei-Punkt-Biegeversuch ausgewählt. Der Drei-Punkt-Biegeversuch ist eine gängige einachsige Verformungsprüfung, die dazu dient, das mechanische Verhalten von Werkstoffen unter Biegebelastung zu charakterisieren [32].

Bei dieser Prüfung wird eine längliche Probe auf zwei Auflagern platziert, während eine Kraft in der Mitte aufgebracht wird. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Verteilung von Spannung und Dehnung über die Höhe der Probe beim Biegen. Das Biegemoment bewirkt eine Biegung der Probe, wodurch Zugspannungen in den äußeren Fasern und Druckspannungen in den inneren Fasern entstehen.



Abbildung 2-3: Schematische Skizze des Prüfaufbaus für Drei-Punkt-Biegeversuch

Die Größe des Biegemoments und die Krümmung der Probe können gemessen werden, um die mechanischen Eigenschaften des Materials zu bestimmen, wie z. B. die Biegefestigkeit, Steifigkeit und Duktilität. Der Drei-Punkt-Biegeversuch ist in verschiedenen Bereichen der Materialwissenschaft von Bedeutung, einschließlich der Entwicklung von Verbundwerkstoffen, biomedizinischen Implantaten und architektonischen Strukturen [32].

Da es sich bei der verwendeten Probe für den Drei-Punkt-Biegeversuch in dieser Arbeit um ein rechteckiges Stück handelt, ergibt sich ihre Spannungs-Dehnungs-Kurve aus den folgenden beiden Gleichungen.

$$\sigma = \frac{3L}{2bd^2} F \quad (2-4)$$

$$\varepsilon = \frac{6d}{\varepsilon L^2} \Delta L \quad (2-5)$$

3 Materialien und Methoden

Dieses Kapitel besteht aus sechs Abschnitten. In Abschnitt 3.1 wird das verwendete Glasfasergewebe und die Matrix beschrieben, die zur Herstellung des Verbundwerkstoffs verwendet wurde, sowie die Materialien, die für die Dummy-Sensoren verwendet wurden. Abschnitt 3.2 erläutert die Wahl der Form des Dummy-Sensors und die Gründe dafür. Abschnitt 3.3 beschreibt die Abmessungen der Dummy-Sensoren und Abschnitt 3.4 beschreibt die Methode zur Einbettung des Sensors. In Abschnitt 3.5 wird die Herstellungsmethode VARI, beschrieben. Der letzte Abschnitt fasst den gesamten Herstellungsprozess zusammen und gibt die Abmessungen des fertigen Proben an.

3.1 Materialien

Für die Arbeit wurden Glasfasergewebe verwendet, da sie im Vergleich zu Kohlenstofffasern kostengünstiger zu beschaffen sind und aufgrund ihrer höheren Dichte bei der Einbettung des Dummy-Sensors weniger Bewegungen aufweisen und somit leichter zu kontrollieren sind. Es wurde ein unidirektionales Glasfasergewebe vom Typ E (HP-U600E) von HP Textiles verwendet. Das Gesamtflächengewicht beträgt 600 g/m². Es besteht aus einem Kettfaden (0°), einem Schussfaden (90°) und einem Nahtfaden. Während des Versuchs wird ein Teil des Fadens entfernt, um die Fasern besser biegen und den Einsatz platzieren zu können.

Verwendet wurden ein kommerzielles Epoxidharzsystem von Hexion, RIMR 035c, und der Härter RIMH 037. Das System hat gute mechanische Eigenschaften, eine lange Aushärtungszeit und ermöglicht eine gute Imprägnierung des Gewebes. Das Harz und der Härter werden bei den empfohlenen Temperaturbedingungen in einem Massenverhältnis von 100:30 gemischt.

Um die Trennung der ausgehärteten Materialplatte von der Stahlplatte zu erleichtern, wird vor dem Einspritzen des Harzes eine Schicht des handelsüblichen Trennwaxes auf Silikonbasis von Rexco auf die Platte aufgetragen.

Als Material für die Dummy-Sensoren wurde PLA (Polymilchsäure) gewählt, das ein biologisch abbaubares, nachhaltiges und lebensmittelechtes Polymer ist, das aus organischen Quellen hergestellt wird und aufgrund seiner Benutzerfreundlichkeit und seines breiten Anwendungsspektrums das am häufigsten verwendete Filament in 3D-Druckern ist. Verschiedene Formen von Dummy-Sensoren mit

einer Dicke von 500 μm [33] wurden mit dem ANYCUBIC i3 Mega S FDM-Drucker und PLA-Filament-Material gedruckt.

3.2 Formauswahl für Dummy-Sensoren

Bei der Optimierung der Form des Dummy-Sensors wurden zunächst die Grundformen Quadrat und Rund gewählt. In Erweiterung dieser beiden Grundformen wurden Rechtecke und Ovale gewählt, und es ist anzunehmen, dass diese komplexeren Formen Belastungen und Beanspruchungen besser standhalten können.

Mechanisch günstige optimale Formen können auch durch Verformung erzeugt werden. Ein Beispiel ist die Selbstoptimierungsfähigkeit [34] hochelastischer Materialien, bei der das Vorhandensein einer quer verlaufenden Kerbe in der Mitte des Materials eine Dehnung ermöglicht, um sich besser an die aufgebrachte Spannung anzupassen oder ihr zu widerstehen [35]. Dieses Verhalten ist das Ergebnis der dem Material innewohnenden Fähigkeit, Spannungskonzentrationen umzuverteilen und seine Form anzupassen, um äußere Belastungen besser aufnehmen zu können. Dieser Effekt ist bei hochelastischen Materialien besonders ausgeprägt, da sie in der Lage sind, große Verformungen ohne plastische Verformung zu ertragen. Obwohl die in dieser Arbeit verwendeten Faserverbundwerkstoffe kein hochelastisches Material sind, kann das Konzept der Optimierung auch auf Faserverbundwerkstoffe angewendet werden. Sie können auf kleineren Skalen ein ähnliches Verhalten zeigen. In der Praxis könnte diese Fähigkeit zur Selbstoptimierung genutzt werden, um effizientere und robustere Strukturen

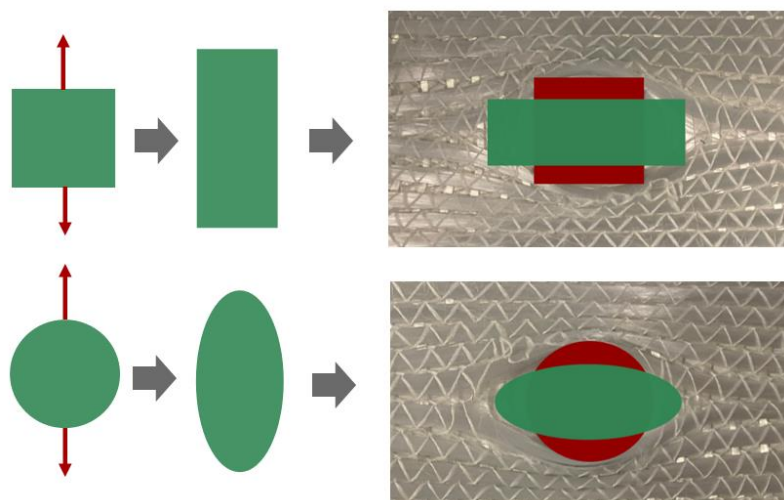


Abbildung 3-1: Optimierung durch Verformung

zu entwerfen.

Da der Dummy-Sensor durch Biegen der Fasern in das Fasergewebe eingebettet wird, reduziert der rechteckige und ovale Dummy-Sensor den Biegewinkel der Fasern beim Einbetten im Vergleich zur quadratischen und runden Grundform. Dies führt zu einem glatteren Biegeprofil der Fasern und einer besseren Anpassung an die Kanten des Sensors, insbesondere bei der ovalen Form. Viele Beispiele dafür sind auch in der Natur zu sehen, wie z. B. Schnee, der sich auf den Ästen von Bäumen türmt, oder Kieselsteine, die in einem Fluss angespült werden, wo die Konturen der Ränder oft den kombinierten Konturen mehrerer Spannungsdreiecke ähneln [34].

Die Natur hat sich über Milliarden von Jahren entwickelt und ist eine wichtige Inspirationsquelle für Designer und Ingenieure. Das Ergebnis der natürlichen Evolution ist die Funktion, und die Optimierungsmethode der Natur ist die Adaptivität.

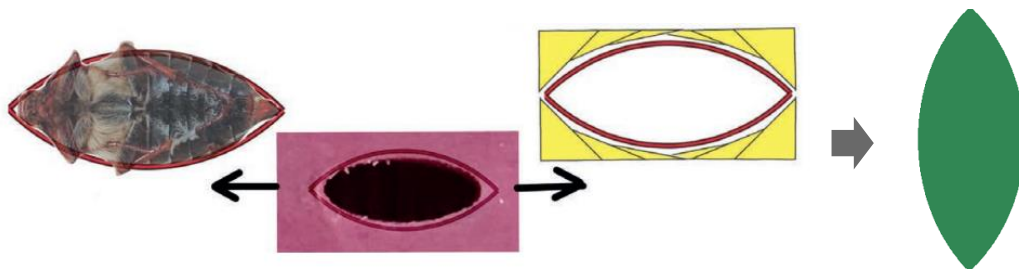


Abbildung 3-2: Die Augenform aus der Natur

Daher wurde ein Dummy-Sensor auf bionischer Basis in Form eines Auges gewählt, das auch die Form eines Käfers hat. Die Form des Auges, ein Oval mit spitz zulaufenden Enden, hat sich herausgebildet, um sich besser an die flüssige Umgebung anzupassen und anderen äußeren Belastungen zu widerstehen. Die Anwendung des gleichen Prinzips auf das Design von Dummy-Sensoren könnte dazu führen, dass sie in stressbehafteten Umgebungen besser funktionieren.

3.3 Abmessungen der Dummy-Sensoren

Um die Ziele dieser Arbeit vollständig zu verwirklichen, wird der eigentliche Sensor durch ein 3D-gedrucktes Teil ersetzt. Der herkömmliche drahtlose Sensor hat zwei dielektrische Kanäle auf der Oberseite, die als Reflexionspfade für die im Sensor eingebettete Antenne dienen. In dieser Arbeit werden die beiden Kanäle entfernt, um die Berechnungen zu vereinfachen. Deswegen wird nur der Hauptteil des Sensors betrachtet.

Die Wahl der Abmessungen folgt einem einfachen Modell eines Optimierungsproblems. Das heißt, es wurden Einschränkungen festgelegt, so dass die Fläche aller Dummy-Sensoren mit einem Fehler von nicht mehr als 0,14 % auf etwa 250 mm² kontrolliert wurde, während die Länge, basierend auf der internen Elektronik des Sensors [33], nicht weniger als 15 mm betrug.

Zum Zwecke des Formvergleichs wurden die Längen von Rechtecken und Ovalen als gleich definiert, während die Breiten von Augenformen und Ovalen als gleich definiert wurden, um jeweils vergleichbare Flächen für die jeweiligen Sensorformen zu erzielen. Die Dicke aller Dummy-Sensoren betrug 500 µm.

Tabelle 2 : Abmessungen der Dummy-Sensoren

	Länge in mm	Breite in mm	Fläche in mm ²
Rund	15.82	15.82	250.27
Quadrat	17.84	17.84	249.97
Rechteck	25.00	10.00	250.00
Oval	25.00	12.74	250.35
Augenform	28.32	12.74	250.04
Langes Oval	31.80	10.00	249.99
Lange Augenform	37.00	10.00	250.24

3.4 Einbetten der Dummy-Sensoren

Im Vorfeld der vorliegenden Arbeit wurde eine Projektarbeit durchgeführt, bei der die Auswirkungen von zwei verschiedenen Arten der Einbettung von Sensoren auf die Festigkeit des Verbundsystems untersucht wurden. Hierbei wurden 3D-gedruckte Dummy-Sensoren aus PLA-Filamentmaterial auf zwei unterschiedliche Arten in Glas- und Kohlefasergewebe eingebettet. Bei der ersten Methode wurden die Fasern manuell mit einer feinen Pinzette umgeformt, um eine Lücke zu schaffen, die groß genug war, um den Dummy-Sensor vollständig freizulegen. Die andere Methode bestand darin, mit einem Locher ein sensorähnliches Loch in die Faser zu schneiden und den Dummy-Sensor dort zu platzieren, wie in Abbildung 3-3 dargestellt.

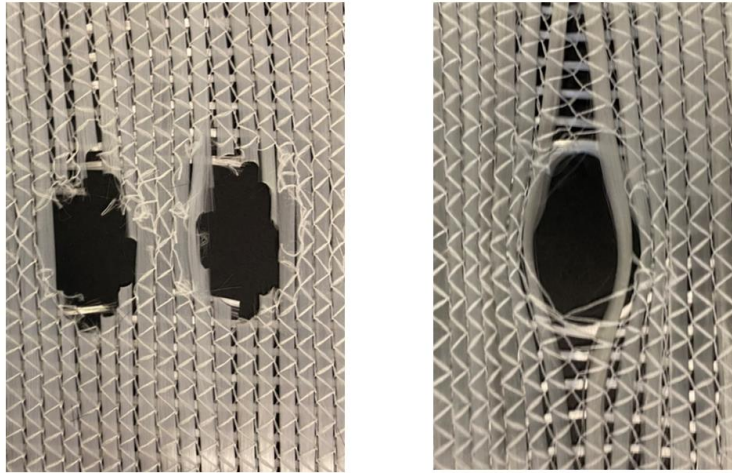


Abbildung 3-3: Zwei Methoden zur Einbettung von Dummy-Sensoren

Anschließend wurden die Verbundwerkstoffproben mit dem eingebetteten Dummy-Sensor und die Verbundwerkstoffproben ohne Dummy-Sensor Zug- und Drei-Punkt-Biegeversuchen unterzogen, um ihr mechanisches Verhalten unter Belastung zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sensoreinbettung durch Umformung der Fasern eine bessere Integration in den Verbundwerkstoff ermöglicht, während das Schneiden der Fasern die Festigkeit des Verbundsystems minimiert, da die Tragfähigkeit der kontinuierlich eingebrachten Fasern durch das Schneiden stark gestört wird. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde in dieser Arbeit beschlossen, den Sensor mit Hilfe von umgeformten Fasern einzubetten.

Die Dummy-Sensoren werden in die mittlere Schicht des Fasergewebes eingebettet, indem die Fasern so umgeformt werden, dass ein Teil des Polyesterfadens, der die Verstärkungsfasern an Ort und Stelle hält, abgeschnitten wird, damit sich die Fasern leichter bewegen können. Die Fasern werden dann manuell mit einer feinen Pinzette gebogen, um einen Spalt zu schaffen, der groß genug ist, damit der Dummy-Sensorbereich vollständig freigelegt und darin platziert werden kann (siehe Abbildung 3-4).



Abbildung 3-4: Anordnung der Gewebelagen

Beim Einbetten des Dummy-Sensors traten einige Probleme auf, insbesondere im Zusammenhang mit der unterschiedlichen Größe und Form des Sensors. Das manuelle Biegen der Fasern führte zu erheblichen Fehlern, wie in Abbildung 3-5 deutlich zu erkennen ist. Trotz gleicher Sensorform variierte der Abstand zwischen den Fasern und dem Dummy-Sensor stark. Diese Abstandsvariation hatte direkte Auswirkungen auf die Größe der Harzanreicherungszone und somit auf die Qualität des endgültigen Prüfkörpers.

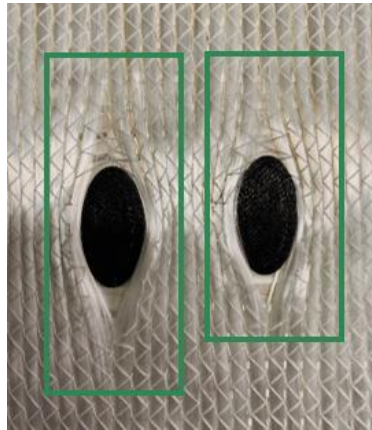


Abbildung 3-5: Die gleiche Form, aber unterschiedliche Längen der betroffenen Fasern

Um den Fehler des manuellen Biegens der Fasern zu eliminieren, werden die betroffenen Fasern bei allen Proben auf die gleiche Länge von 50 mm gekürzt, wie in Abbildung 3-6 dargestellt.

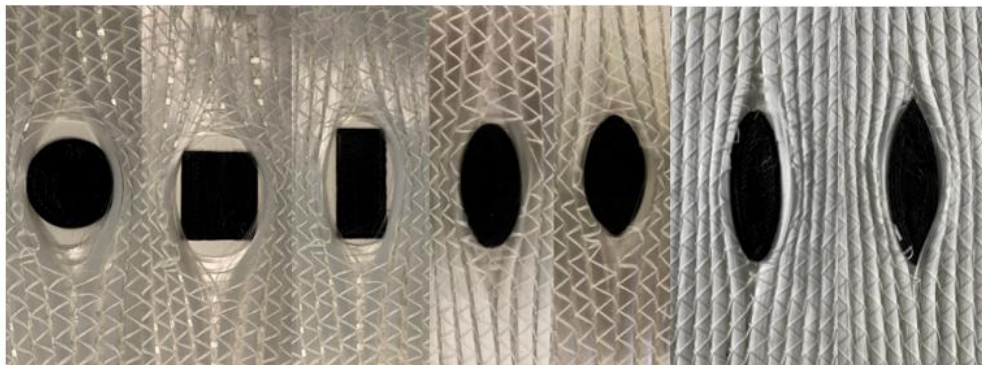


Abbildung 3-6: Länge der betroffenen Fasern für verschiedene Proben

3.5 Der VARI Prozess

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

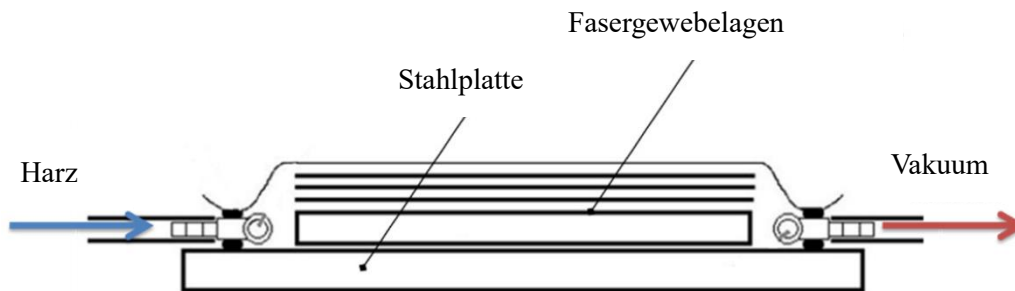


Abbildung 3-7: Die VARI-Konstruktion

Das VARI-Verfahren wurde nach dem Stapeln von drei Fasergewebelagen in jeweils gleicher Faserrichtung gemäß dem Versuchsablauf durchgeführt. In der oben abgebildeten Konstruktion [36] wird eine saubere Stahlplatte zunächst mit einer Wachsschicht überzogen, um später ein einfaches Ablösen von Platten zu ermöglichen. Anschließend wird das zugeschnittene Material auf die Stahlplatte gelegt und mit einer Kunststoffolie bedeckt, die dann mit Klebeband an der Stahlplatte befestigt wird. Das Gerät ist durch einen Schlauch mit dem Harzinjektor an der Einlassseite und mit der Vakuumpumpe an der Auslassseite verbunden. Vor der Harzinjektion wird das Material evakuiert, um sicherzustellen,

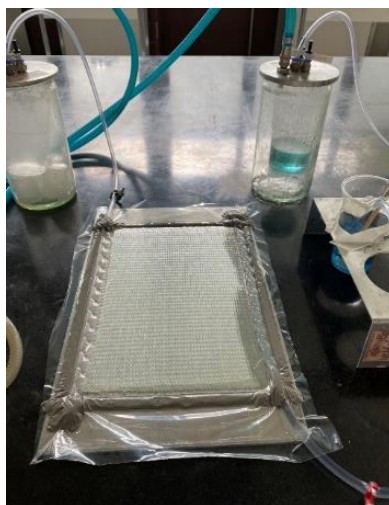


Abbildung 3-8: VARI-Aufbau

dass sich keine Gase im schwingungsdämpfenden Material befinden. Das Harz-Härter-Gemisch wird dann über einen Spiralschlauch gleichmäßig zwischen den Fasern verteilt.

Abbildung 3-9 zeigt das Harzinjektionsverfahren für ein Gewebe mit den eingebetteten Dummy-Sensoren. Während des Injektionsvorgangs sollte darauf geachtet werden, dass das Harz gleichmäßig fließt, um eine zu schnelle Strömung zu vermeiden, welche die Dummy-Sensoren aus dem Einführungsschlitz verdrängen könnte.

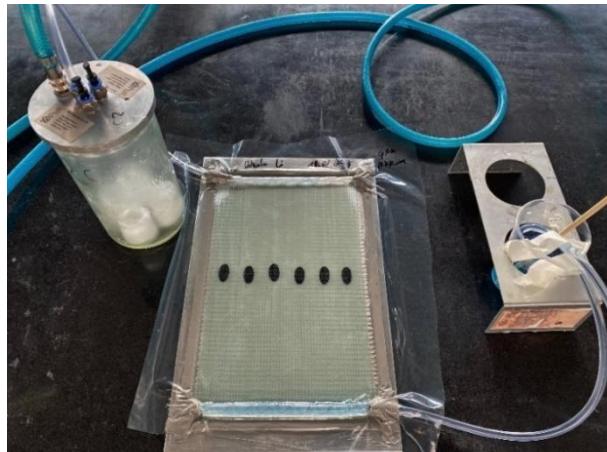


Abbildung 3-9: Harzinjektionsverfahren für Gewebe mit eingebetteten Dummy-Sensoren

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 nachhärten. Da die mechanischen Eigenschaften von faserverstärkten Verbundwerkstoffen in hohem Maße vom Faservolumengehalt abhängen, wurde für die in dieser Arbeit verwendeten Probekörper einer FVG von 60 % beibehalten.

3.6 Herstellung der Proben

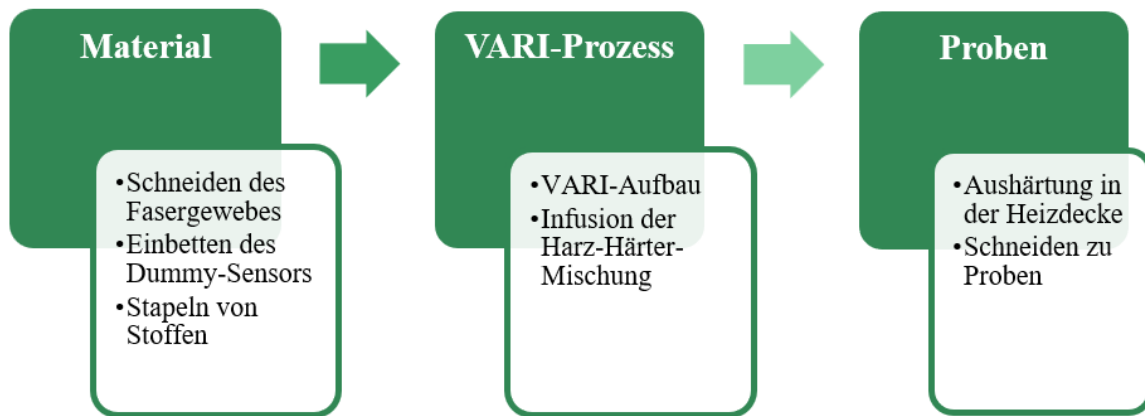


Abbildung 3-10: Prozess für Probenherstellung

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 je Form
Zugversuch	250	25	2.02	5
Drei-Punkt-Biegeversuch	80	25	2.06	5

Die folgenden Bilder zeigen alle für die Tests hergestellten Proben. Die Abbildung 3-11 zeigt die Zugprüfung und die Abbildung 3-12 die Biegeprüfung.

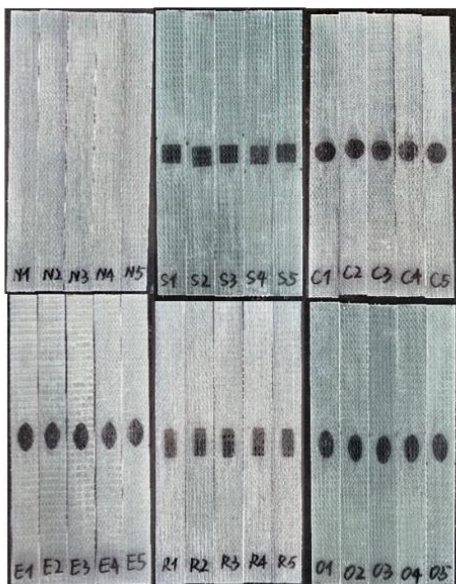


Abbildung 3-11: Die Proben für Zugversuch

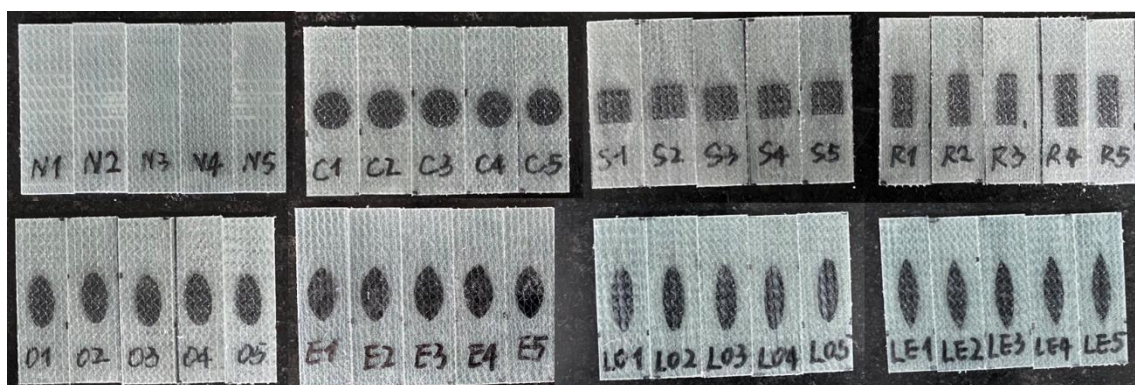


Abbildung 3-12: Die Proben für Drei-Punkt-Biegeversuch

4 Experimentelle Untersuchung

In diesem Kapitel werden die Prüfkriterien dieser Studie beschrieben, und in den Abschnitten 1 und 2 werden die Prüfverfahren und die Auswahl der spezifischen Prüfgeschwindigkeiten für die Zug- bzw. Drei-Punkt-Biegeversuche erläutert.

4.1 Der Zugversuch

Um die Zugeigenschaften 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 [37]. Bei den Versuchen wurden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für jeden Probe ermittelt.

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. Auch beim Einsetzen der Probe in die Halterung muss darauf geachtet werden, dass die Probe vollkommen aufrecht steht und nicht gekippt wird. Damit wird die Last in die Probe gleichmäßig eingeleitet.



Abbildung 4-1: Zugversuch nach DIN ISO 527

4.2 Der Drei-Punkt-Biegeversuch

Die Biegeversuche für diese Arbeit wurden auf einer Universalprüfmaschine von Zwick/Roell durchgeführt. Die Proben wurden wie in Abbildung 4-2 dargestellt auf zwei Stützen gelagert. Die Last wurde mit zwei konstanten Geschwindigkeiten auf die Mitte der Probe gerichtet.



Abbildung 4-2: Drei-Punkt-Biegeversuch nach DIN ISO 178

Bevor jede Probe getestet wird, müssen ihre Breite und Dicke mit einem Messschieber gemessen werden. Nachdem die Daten erfasst wurden, wird die Probe in die Universalmaschine eingelegt, um getestet zu werden

Zur Ermittlung der Biegespannungs-Dehnungs-Kurve wurden in Anlehnung an DIN ISO 178 [38] zwei Prüfgeschwindigkeiten gewählt, d.h. es wurde zunächst mit einer geringen Prüfgeschwindigkeit v_1 1 mm/min belastet und nach Ermittlung des Moduls auf eine höhere Belastungsgeschwindigkeit v_2 5 mm/min umgeschaltet.

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

$$L = (16 \pm 1) * d \quad (4-1)$$

$$v_1 = \frac{r_1 L^2}{600h} \quad (4-2)$$

$$v_2 = \frac{r_2 L^2}{600h} \quad (4-3)$$

5 Auswertung der Ergebnisse

Abschnitt 5.1 präsentiert das mechanische Verhalten der verschiedenen Proben im Zugversuch, während Abschnitt 5.2 die Ergebnisse des Drei-Punkt-Biegeversuchs darstellt. In jedem Unterabschnitt wird die Beziehung zwischen der Form des Dummy-Sensors und den mechanischen Eigenschaften der Probe veranschaulicht, indem die Ergebnisse aus verschiedenen Blickwinkeln verglichen werden.

Aus den oben genannten Tests wurden für jede Probe Spannungs-Dehnungs-Kurven ermittelt. Aus den Ergebniskurven der fünf Proben wird für jeden Test eine Durchschnittskurve ermittelt, die Durchschnittskurven der verschiedenen Proben werden verglichen.

5.1 Ergebnisse aus Zugversuchen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Zugversuchen verglichen und diskutiert. Hierbei werden die Spannungs-Dehnungskurven und Zugfestigkeiten von Proben miteinander verglichen, um die Auswirkungen von verschiedenen eingebetteten Dummy-Sensoren auf den Verbundwerkstoff zu untersuchen. Es wird analysiert, wie sich die unterschiedlichen Sensorformen auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs auswirken, indem Proben mit und ohne Sensoren verglichen werden.

5.1.1 Vergleich der Ergebnisse für die Quadrat- und Rund-Proben

Die folgende Abbildung 5-1 vergleicht die Prüfergebnisse für die beiden Grundformen und die Normalproben. Es ist deutlich erkennbar, dass die Festigkeit des Verbundwerkstoffs durch die Einbettung des Dummy-Sensors erheblich beeinträchtigt wird. Die Quadrat-Proben zeigen eine Reduktion der Festigkeit um 24,6 %, während die Rund-Proben eine Reduktion um 31,5 % aufweisen. Die höhere Zugfestigkeit der Quadrat-Proben im Vergleich zu den Rund-Proben ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass der runde Dummy-Sensor bei gleicher Fläche 250 mm^2 etwa 2 mm länger ist als der quadratische. Dadurch müssen die Fasern eine größere Winkelumlenkung aufnehmen, um die Biegung zu bewältigen. Es bleiben mehr gebogene Fasern übrig, so dass weniger Fasern die Last in

Belastungsrichtung (0 Grad) übertragen können.

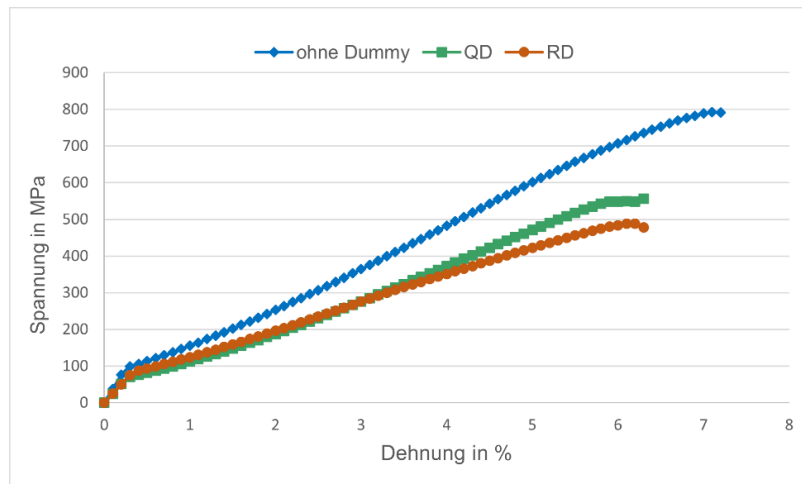


Abbildung 5-1: Kurvenvergleich für Zugversuch von Quadrat- und Rund-Proben

Interessanterweise zeigen die Rund-Proben bis zu einer Dehnungsrate von 3 % etwas höhere mechanische Eigenschaften als die Quadrat-Proben. Dies könnte auf die größere Spannungsakkumulation zurückzuführen sein, die durch die vier Ecken der quadratischen Dummy-Sensoren verursacht wird. Der frühere Spannung-Dehnungsverlauf des Versuchs zeigt daher relativ geringere Eigenschaften, die sich allerdings bei höherer Beanspruchung umkehren.

Im Rahmen des Zugversuchs entwickeln sich bei zunehmender Belastung Risse entlang der Belastungsrichtung. Dies geschieht aufgrund des Versagens der Faser-Matrix-Grenzfläche, bis sie schließlich total versagt. Die Abbildung 5-2 unten zeigen die quadratischen und runden Proben nach dem Test. Es ist deutlich erkennbar, dass die Quadrat-Proben Nummer eins und drei sowie die Rund-Proben Nummer eins, zwei und drei insgesamt ein signifikantes Bruchversagen aufweisen. Bei den übrigen Proben erfolgt der Bruch an der Faser-Harz-Matrix in der Nähe der Dummy-Sensoren.

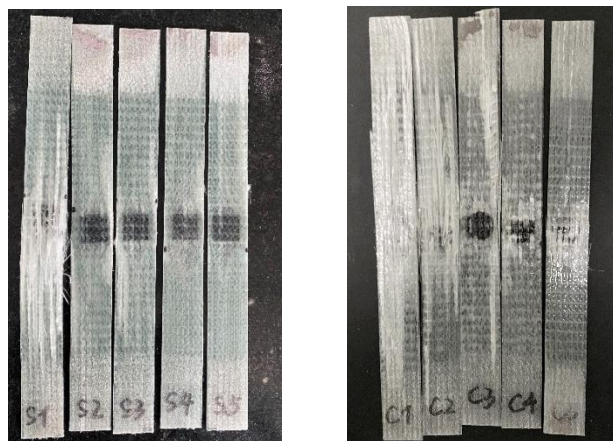


Abbildung 5-2: Die Quadrat- und Rund-Proben nach Zugversuch

5.1.2 Vergleich der Ergebnisse für die Grundformen und Optimierte Formen

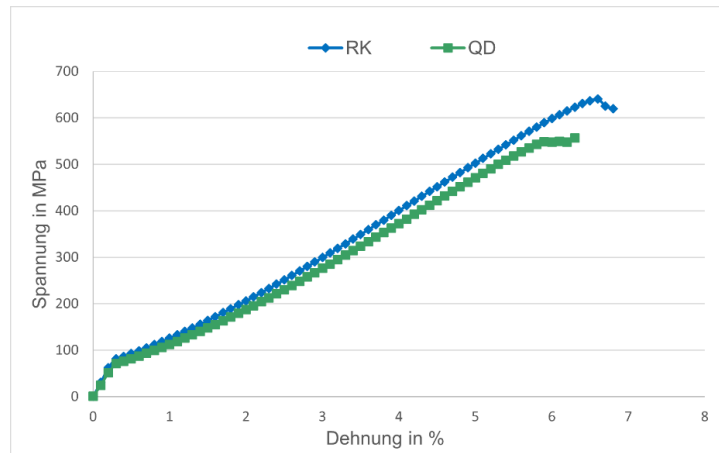


Abbildung 5-3: Kurvenvergleich für Zugversuch von RK- und QD-Proben

Dieser Abschnitt vergleicht die Ergebnisse von Zugversuchen an Quadrat- und Rechteck-Proben mit gleichen Querschnitt sowie an Rund- und Oval-Proben. Die entsprechenden Ergebnisse sind in den Abbildungen 5-4 und 5-5 dargestellt. Die Auswertung der Daten zeigt, dass sich die mechanische Festigkeit durch Verlängerung der Grundform verbessert. Im Vergleich zu den Quadrat-Proben weisen die Rechteck-Proben eine Steigerung der Festigkeit um etwa 15,7 % auf, während die Oval-Proben im Vergleich zu den Rund-Proben eine Steigerung von 28,4 % aufweisen. Dies legt nahe, dass die verlängerte Form der Proben es den Fasern ermöglicht, sich in einem kleineren Winkel um die Dummy-Geometrie zu legen als in der Rundform. Dies führt zu einer besseren Anpassung an das Profil der gebogenen Fasern und somit zu einer höheren mechanischen Festigkeit.

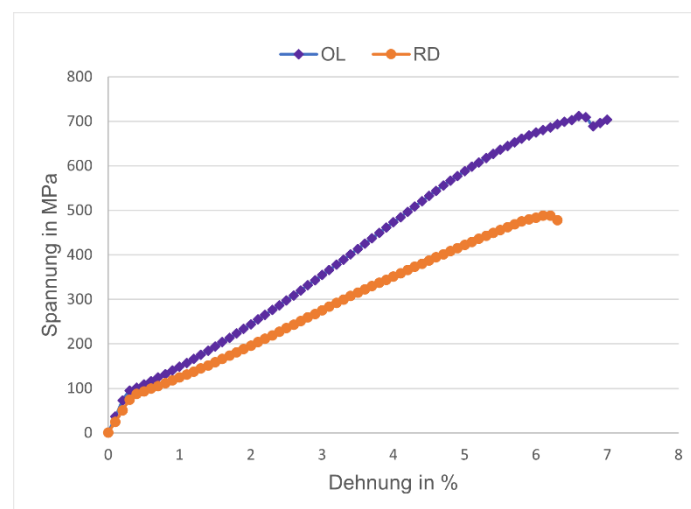


Abbildung 5-4: Kurvenvergleich für Zugversuch von OL- und RD-Proben

5.1.3 Vergleich der Ergebnisse für die Oval-, Augenform- und Rechteck-Proben

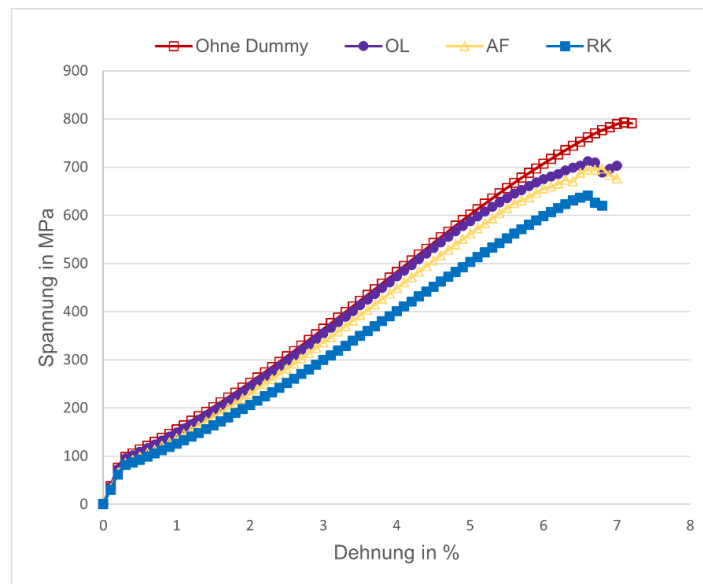


Abbildung 5-5: Kurvenvergleich für Zugversuch von RK-, OL- und AF-Proben im Verhältnis zu Proben ohne Störung

Das obenstehende Diagramm verdeutlicht, dass die Zugfestigkeitseigenschaften der Oval- und Augenform-Proben deutlich über denen der Rechteck-Proben liegen. Die Festigkeit der Oval- und Augenform-Proben ist im Vergleich zu den Rechteck-Proben um 11,26 % bzw. 10 % höher.

Dies lässt sich auf die bessere Anpassung der ovalen und Augenform-Proben an die gebogene Form der Fasern sowie die glatteren Konturlinien auf beiden Seiten zurückführen. Die Abbildung 5-6 unten zeigt die Dummy-Sensoren, die während der Materialvorbereitungsphase in das Gewebe eingebettet wurden. Es ist offensichtlich, dass der rechteckige Sensor aufgrund seiner geraden Kanten auf beiden Seiten kreisförmige Segmente hinterlässt, wenn er in das Gewebe eingebettet wird. Im Gegensatz dazu passen sich die ovalen und augenförmigen Formen perfekt an die gekrümmten Fasern an. Nach dem Vari-Verfahren entstehen durch die Lücken zwischen den Fasern und dem rechteckigen Sensor harzreiche Bereiche, die die Materialeigenschaften erheblich beeinträchtigen bzw. frühzeitige Rissbildung bewirken können. Während der Prüfung neigt die harzreiche Zone aufgrund der erhöhten Belastung zur Rissbildung und schließlich zum Bruch.

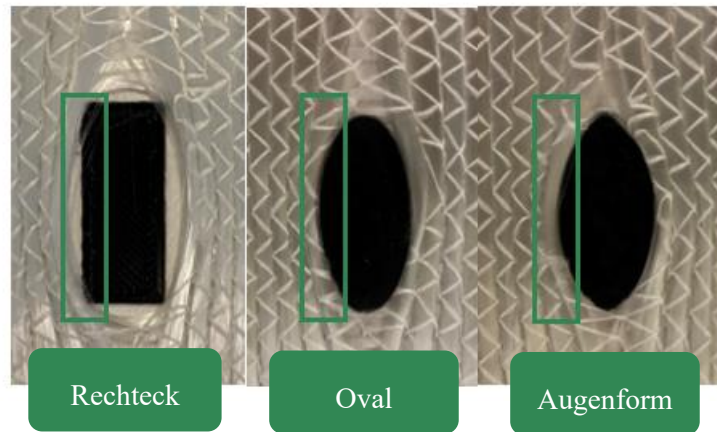


Abbildung 5-6: Umformung von Fasern mit unterschiedlichen Geometrien

Die Kurven für die Oval- und Augenform-Proben auf Abbildung 5-5 ähneln sich aufgrund ihrer ähnlichen Gesamtform sehr. Trotzdem weisen die Oval- Proben mit einem um etwa 2 % geringeren Verlust an Systemfestigkeit bessere Zugeigenschaften auf als die Proben mit augenförmiger Dummy-Sensor. Möglicherweise führen die scharfen Ecken an der Ober- und Unterseite des augenförmigen Sensors zu einer erhöhten Spannung, die das gesamte Fasermatrixsystem belastet.



Abbildung 5-7: Die Proben nach Zugversuch

5.1.4 Vergleich der Zugfestigkeit aller Probekörper

Das vorliegende Balkendiagramm vergleicht die Zugfestigkeit von Proben, in die verschiedene Formen des Dummy-Sensors eingebettet wurden. Eindeutig ist erkennbar, dass sowohl die Ellipse/Augenform als auch das Rechteck im Vergleich zu den beiden Grundformen Quadrat und Kreis eine höhere Festigkeit aufweisen. Unter den drei optimierten Formen schneidet die Ellipse jedoch am besten ab,

gefolgt von der Augenform.

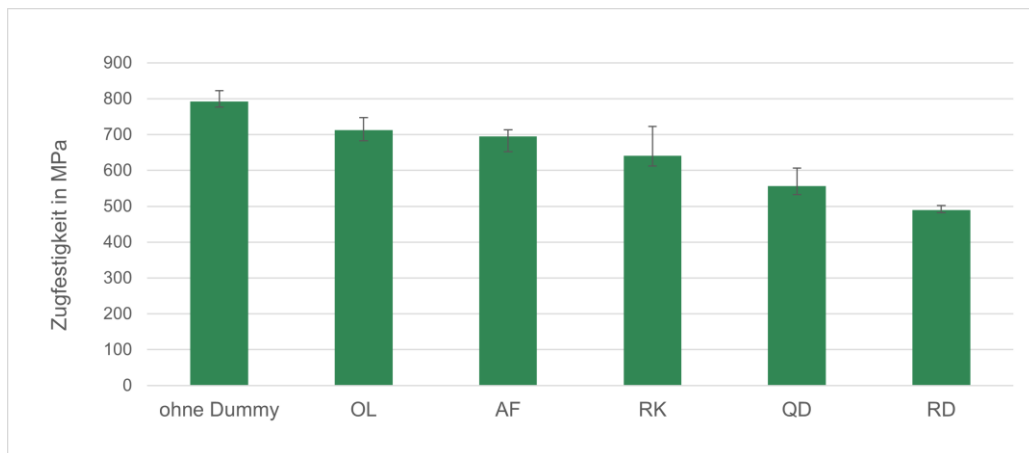


Abbildung 5-8: Vergleich der Zugfestigkeit

Allerdings zeigt sich auch hier, dass die Standardabweichung des rechteckigen Musters relativ hoch ist, Eine detaillierte Erläuterung dieses Problem findet sich in der Fehlerdiskussion in Kapitel 7.

Aus dem Vergleich der Versuchsergebnisse in diesem Abschnitt ergibt sich, dass der Unterschied zwischen den Zugversuchen der ovalen und der augenförmigen Proben nicht signifikant ist, insbesondere hinsichtlich der Dehnung. Dies liegt daran, dass die Länge der Proben, die auf Zug getestet wurden, 250 mm betrug, während die Fasern, die vom eingebetteten Dummy-Sensor signifikant beeinflusst wurden, nur etwa 50 mm lang waren. Darüber hinaus wurde die Last in Richtung der Fasern aufgebracht, was dazu führte, dass die Kraft nicht direkt auf die betroffenen Fasern wirkte und den Vergleich der Ergebnisse weiter beeinträchtigte. Es sind daher weitere Drei-Punkt-Biegeversuche notwendig, um zuverlässigere Ergebnisse zu erzielen.

5.2 Ergebnisse aus Biegeversuchen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Drei-Punkt-Biegeversuchs besprochen, um zu untersuchen, wie verschiedene Dummy-Sensoren den Verbundwerkstoff beeinflussen. Dazu werden die Spannungs-Dehnungskurven und die Biegefestigkeit der Proben verglichen. Es wird untersucht, wie unterschiedliche Sensorformen die Biegeeigenschaften des Verbundwerkstoffs beeinflussen, indem Proben mit und ohne Sensoren verglichen werden.

5.2.1 Vergleich der Kurven aller Probekörper

Abbildung 5-9 zeigt, dass die Biegefestigkeit der quadratischen und runden Proben im Vergleich zu den normalen Proben deutlich geringer ist, und auch die Dehnungsrate um 30 % reduziert ist. Zwischen den quadratischen und runden Proben ist jedoch nur ein geringfügiger Unterschied zu verzeichnen, wobei die quadratischen Proben eine leicht höhere Biegefestigkeit aufweisen als die runden Proben.

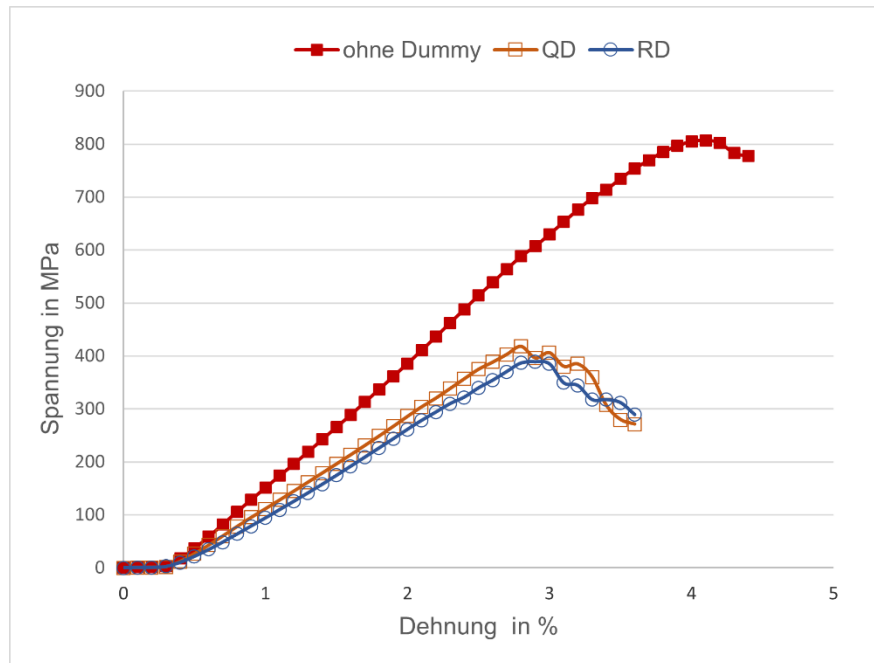


Abbildung 5-9: Kurvenvergleich für Biegeversuch von QD- und RD-Proben

In Abbildung 5-10 wird das Biegeverhalten von Normal-Proben und die Proben mit eingebetteten ovalen, augenförmigen und rechteckigen Dummy-Sensoren verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Proben mit dem eingebetteten ovalen Dummy-Sensor eine höhere Tragfähigkeit aufweist als die beiden anderen Probekörper. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Last direkt auf den Bereich einwirkt, in dem der Sensor eingebettet ist. Dadurch werden die durch die Einbettung gebogenen Fasern direkt von der Last beeinflusst, was zu einem deutlicheren Unterschied in der Dehnungsrate im Vergleich zum Zugversuch führt. Es ist zu erkennen, dass die rechteckigen Proben eine geringere Verformungsrate von etwa 3,4 % aufweisen, während die ovalen und die augenförmigen Proben eine Dehnungsrate von etwa 3,7 % haben.

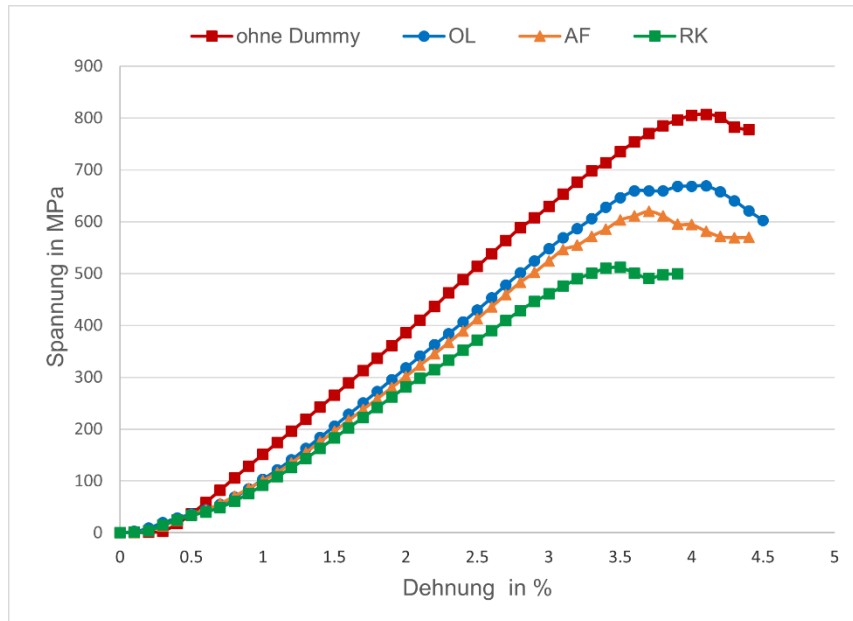


Abbildung 5-10: Kurvenvergleich für Biegeversuch von RK-, OL- und AF-Proben

Wie in Abschnitt 5.1.4 erörtert, bleibt der Unterschied zwischen den Oval- und den Augenform-Proben bei den Ergebnissen für die Zugproben unbedeutend. In beiden Tests zeigen sie jedoch ähnliche Ergebnisse, dass die elliptischen Proben höhere mechanische Eigenschaften aufweisen.

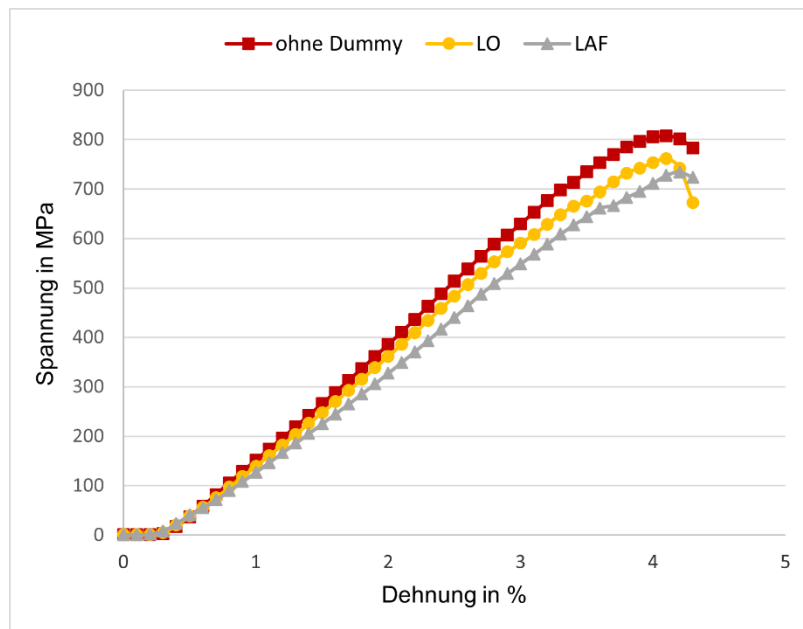


Abbildung 5-11: Kurvenvergleich für Biegeversuch von LO-, LAF- Proben

Abbildung 5-11 zeigt die Kurven der länglichen Oval- und Augenform- Proben im Vergleich zu Normal-Proben. Das lange Oval und der lang Augenform zeigen bessere Biegeeigenschaften im Vergleich zur

Oval- und Augenform, weil sie den Fasern erlauben, sich in einem kleineren Winkel zu biegen, wie in Abbildung 5-12 dargestellt. Dadurch verringert sich die Zone der Harzanreicherung zwischen dem Dummy-Sensor und dem Gewebe. Aus den in Abschnitt 5.1.4 genannten Gründen wurden die beiden anderen optimierten Formen, das lange Oval und die lange Augenform, nicht auf Zug, sondern nur auf Biegung geprüft.

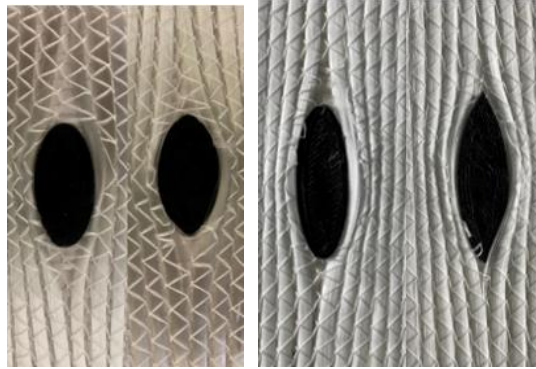
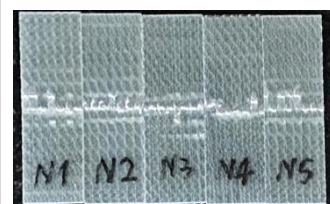
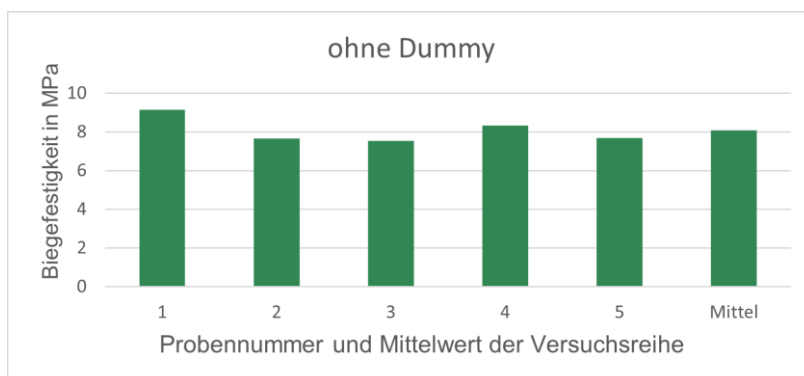
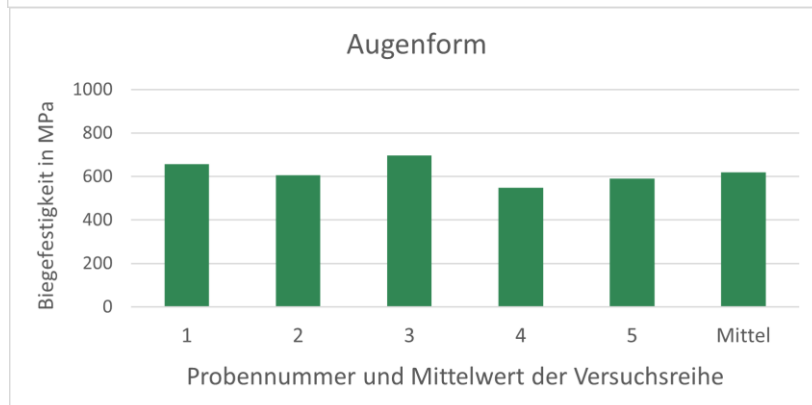
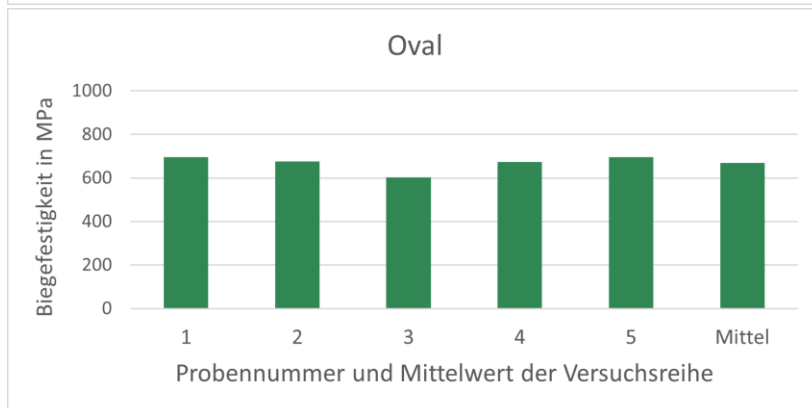
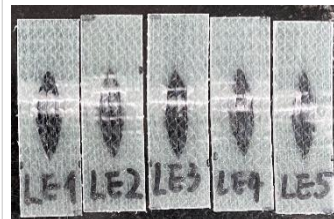
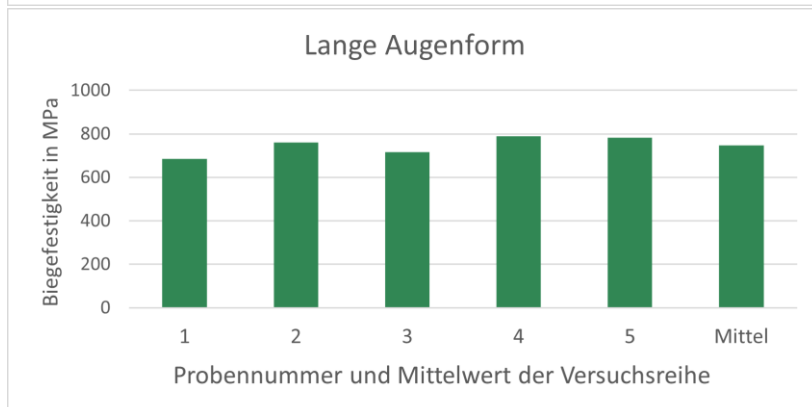
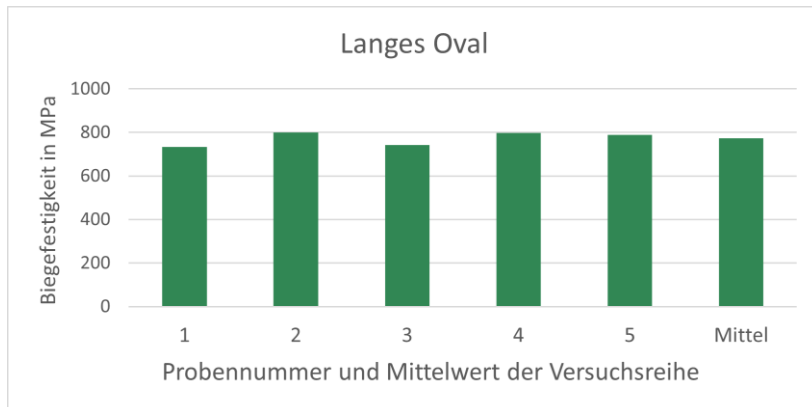


Abbildung 5-12: Die Dummy-Sensoren mit der langen Ovalform und der langen Augenform.

5.2.2 Vergleich der Biegefestigkeit aller Probekörper

Im Rahmen des Drei-Punkt-Biegeversuchs wurden insgesamt 40 Proben untersucht. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5-13 dargestellt, die jeweils Fotos der Proben nach dem Test sowie ihre Biegefestigkeiten zeigen. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass alle Proben ein eindeutiges Versagensverhalten aufweisen. Insbesondere sind die harzangereicherten Bereiche, die durch den eingebetteten Dummy-Sensor verursacht wurden, fehlerhaft. Die Belastung befand sich sehr nahe an diesen Bereichen, was zur direkten Beschädigung des Faser-Harz-Matrix-Systems führte und schließlich zum Versagen der Proben.





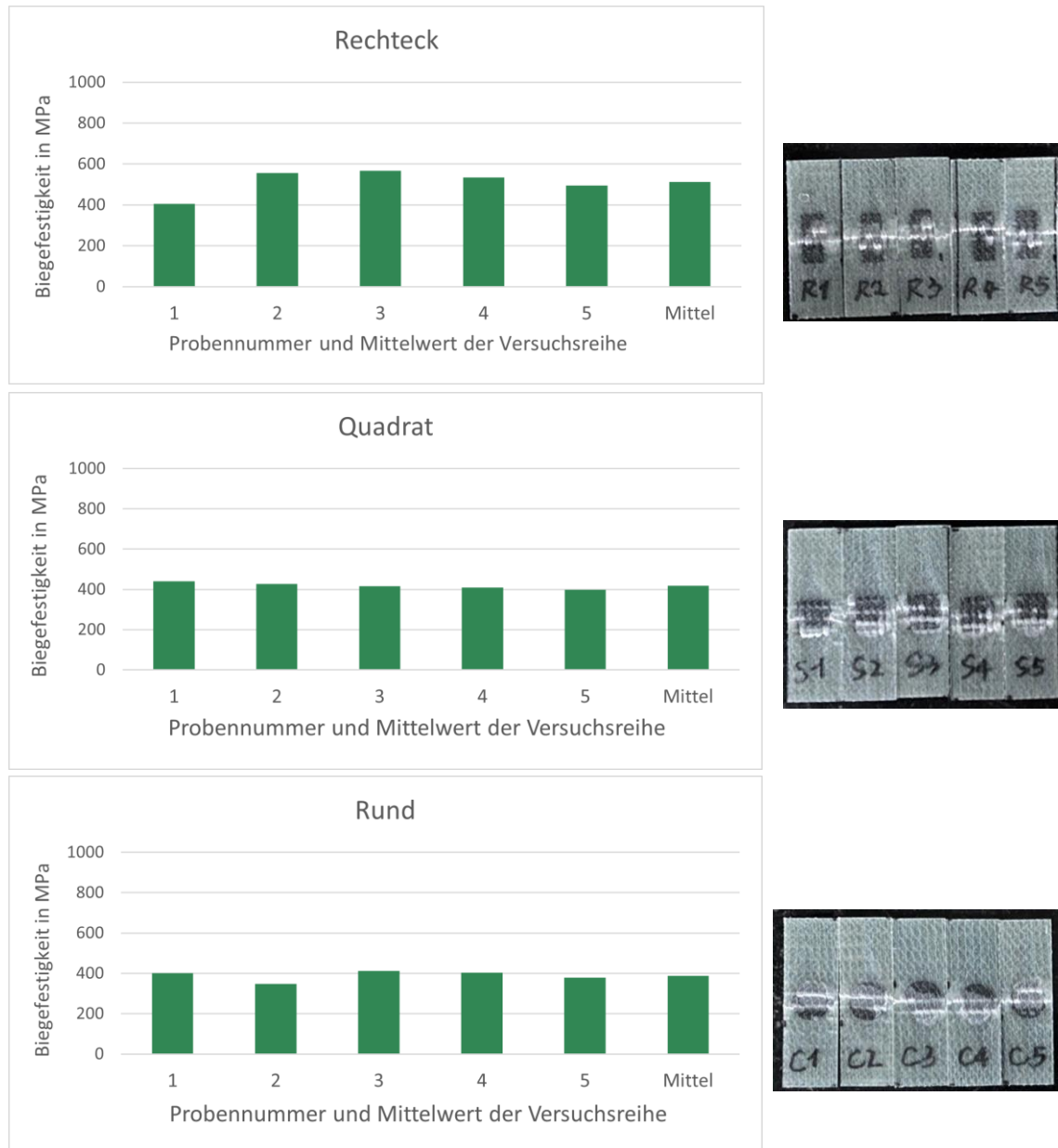


Abbildung 5-13: Die Biegefestigkeit aller Proben

Die Daten aller Proben jeder Form weisen eine geringe Standardabweichung auf. Allerdings ist zu beachten, dass Probe Nummer drei der Augenform eine höhere Biegefestigkeit aufweist als die anderen vier Proben, was zu einigen Unregelmäßigkeiten bei den Daten für die Augenform führte. Nichtsdestotrotz zeigen die anderen vier Proben relativ einheitliche Festigkeiten.

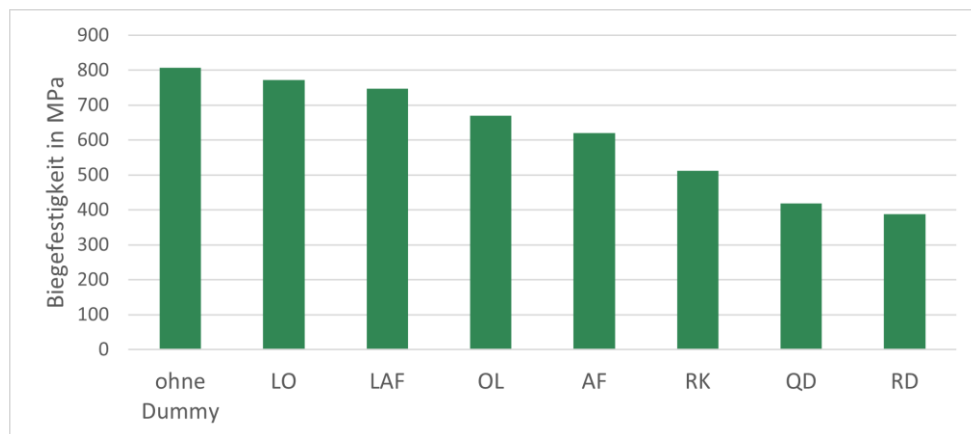


Abbildung 5-14: Vergleich der Biegefestigkeit

Das obere Balkendiagramm erleichtert den Vergleich der durchschnittlichen Biegefestigkeit von Proben mit verschiedenen Formen von Dummy-Sensoren. Deutlich erkennbar ist, dass das Oval unter den sieben verschiedenen Sensorformen am besten abschneidet. Das verlängerte Oval und die verlängerte Augenform haben beide eine höhere Biegefestigkeit als das normale Oval und die Augenform. Das Quadrat und der Kreis sowie die Ellipse und die Augenform zeigen ähnliche Biegefestigkeiten.

6 Validierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse früherer Zugversuche mit zwei Methoden validiert. In Abschnitt 6.1 werden die experimentellen Ergebnisse durch einfache theoretische Näherungen unterstützt. Abschnitt 6.2 wird eine Simulation der Probe mit der Finite-Elemente-Methode von ANSYS vorgestellt, um die Spannungsbereiche zu erörtern. Hierbei wird die Spannungsverteilung bei unterschiedlich geformten Dummy-Sensoren verglichen.

6.1 Berechnung der Federkonstante

In diesem Unterabschnitt werden mithilfe eines grundlegenden Federmodells die Federkonstanten berechnet, um die Ergebnisse der Zugversuche an Proben mit unterschiedlich geformten Dummy-Sensoren zu überprüfen.

Während des Einbettens des Dummy-Sensors in das Gewebe bilden sich aufgrund der unterschiedlichen Geometrie des Sensors in den Fasern, die dem Dummy-Sensor am nächsten liegen, unterschiedliche Konturlinien aus. Dies wird in Abbildung 6-1 dargestellt.



Abbildung 6-1: Konturlinie der Fasern in der Nähe des Dummy-Sensors

Wie in Abbildung 6-2 zu sehen ist, werden die Normal-Proben (mit geraden Fasern) und die Probe mit dem eingebetteten Dummy-Sensor (mit gebogenen Fasern) in X-Richtung belastet. Aufgrund der durch die Anwesenheit des Dummy-Sensors verursachten Biegung der Fasern weist die Probe mit dem Sensor eine Schwächung der mechanischen Eigenschaften in Belastungsrichtung auf. Die verschiedenen Konturlinien enthalten daher Informationen über den Grad der Verringerung der mechanischen

Eigenschaften.

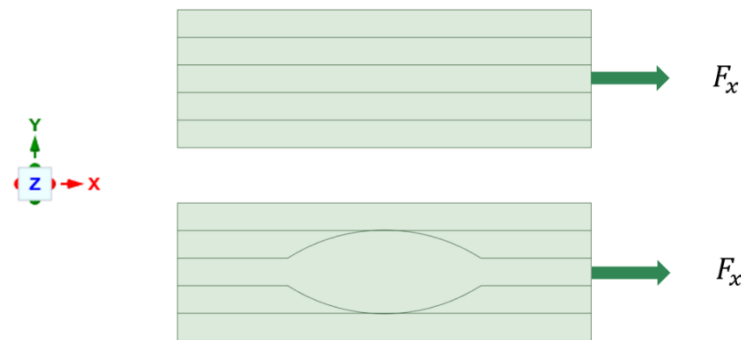


Abbildung 6-2: Die Proben mit und ohne Dummy- Sensoren im Zugversuch

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erwähnt wurde, können alle elastischen Materialien durch Federn beschrieben werden und folgen dem grundlegenden Hookesches Gesetz [30], wie in Gleichung 6-1.

$$F_x = kx \quad (6-1)$$

Indem man die durchgehenden Fasern diskretisiert, die gebogenen Fasern als kleine, in Reihe geschaltete Federn und die abgewinkelten Federn als in Reihe geschaltete, in X-Richtung horizontale Federn betrachtet, kann eine neue Federkonstante abgeleitet werden. Diese Konstante gibt Auskunft über das Ausmaß der Schwächung der gebogenen Fasern in X-Richtung im Vergleich zu den geraden Fasern. Durch den Vergleich der Federkoeffizienten, also des Elastizitätsmoduls, der einzelnen äquivalenten Federn können die Unterschiede bei den Zugversuchen der Proben ermittelt werden, die in verschiedene Dummy-Sensoren eingebettet wurden. Um die Berechnungen zu vereinfachen, betrachten wir lediglich ein Modell mit vier in Reihe geschalteten Federn.

Das folgende Diagramm stellt das diskrete Federmodell für jede Form des Dummy-Sensors dar.

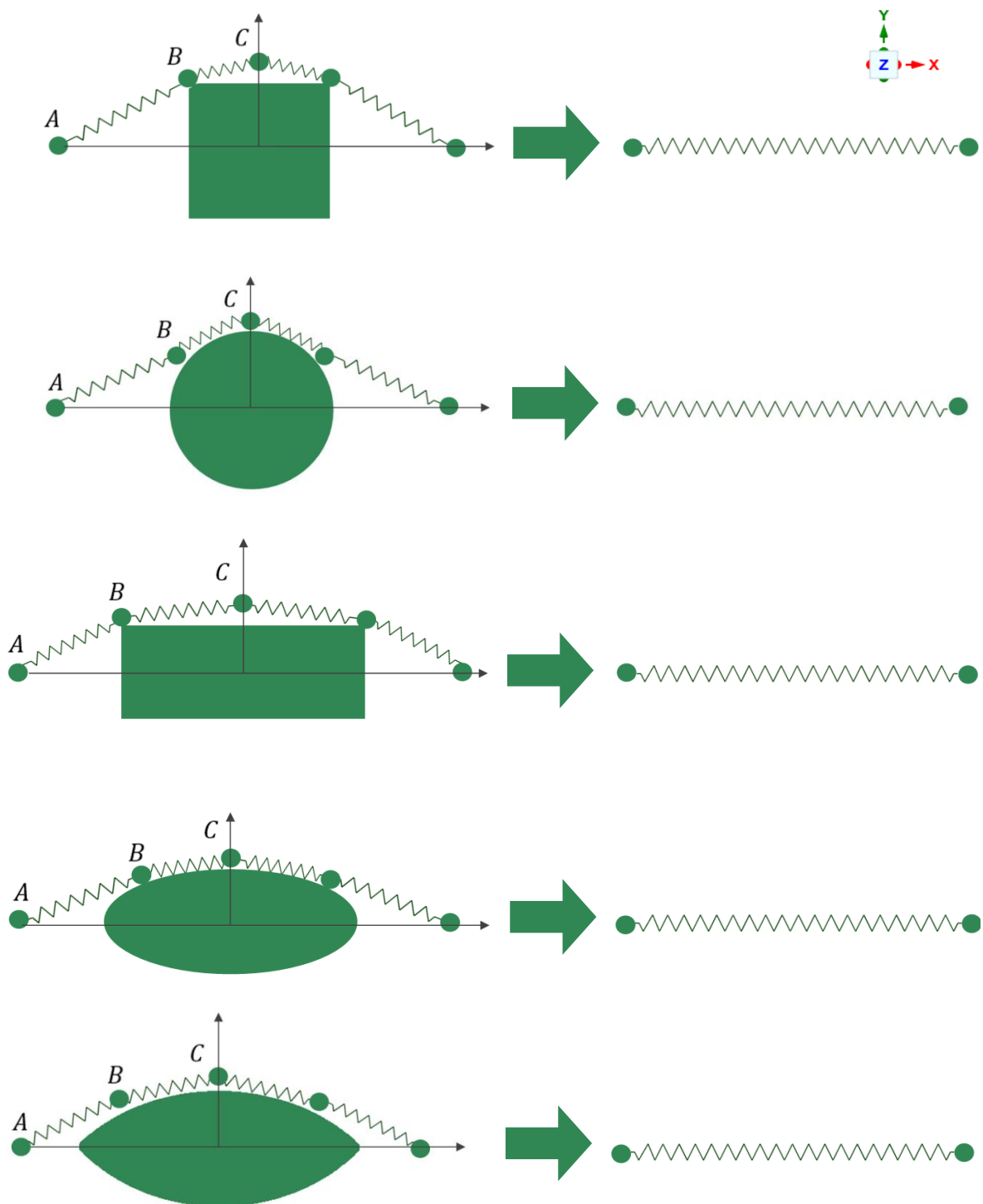


Abbildung 6-3: Federmodelle für verschiedene Geometrien

Zur Berechnung des Federkoeffizienten werden zwei grundlegende Formeln (wie die Gleichungen 6-2, 6-3) verwendet, die auch als Serien-Parallel-Problem für Federn bekannt sind.

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (6-2)$$

$$k_p = k_1 = k_2 = \dots = k_n \quad (6-3)$$

Betrachten wir zunächst das einfachste Modell einer Feder, wie in Abbildung 6-4 dargestellt.

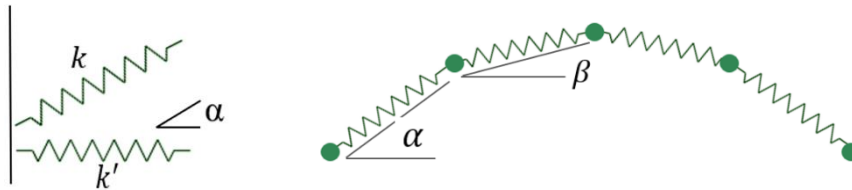


Abbildung 6-4: Mathematische Berechnung des Federmodells

Unter Verwendung der Serien-Parallel-Gleichung für eine Feder ergibt sich.

$$k' = k \cdot \cos \alpha \quad (6-4)$$

In ähnlicher Weise kann das Federmodell für vier in Reihe geschaltete Federn berechnet werden:

$$k' = \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{2(\cos \alpha + \cos \beta)} \cdot k \quad (6-5)$$

Der Winkel in der Formel wird basierend auf der Faserlänge und der Position des ABC-Punktes definiert. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, wurden die Fasern in allen Proben auf eine Länge von 50 mm festgelegt. Daher haben alle Punkte A die Koordinaten (-25 mm, 0). Die Koordinaten der Punkte B und C werden durch unterschiedliche Geometrien bestimmt. Rechtecke und Quadrate haben Punkt B als ihren Scheitelpunkt, während Ovale, Augen und Kreise den Punkt auf dem Bogens als Punkt B wählen. Das ist der Punkt, an dem das Quadrat mit dem Ursprung als Scheitelpunkt den Bogen innerhalb dieser drei Geometrien schneidet. Abbildung 6-5 zeigt die Koordinatenpositionen des A-, B- und C-Punktes für jede Geometrie.

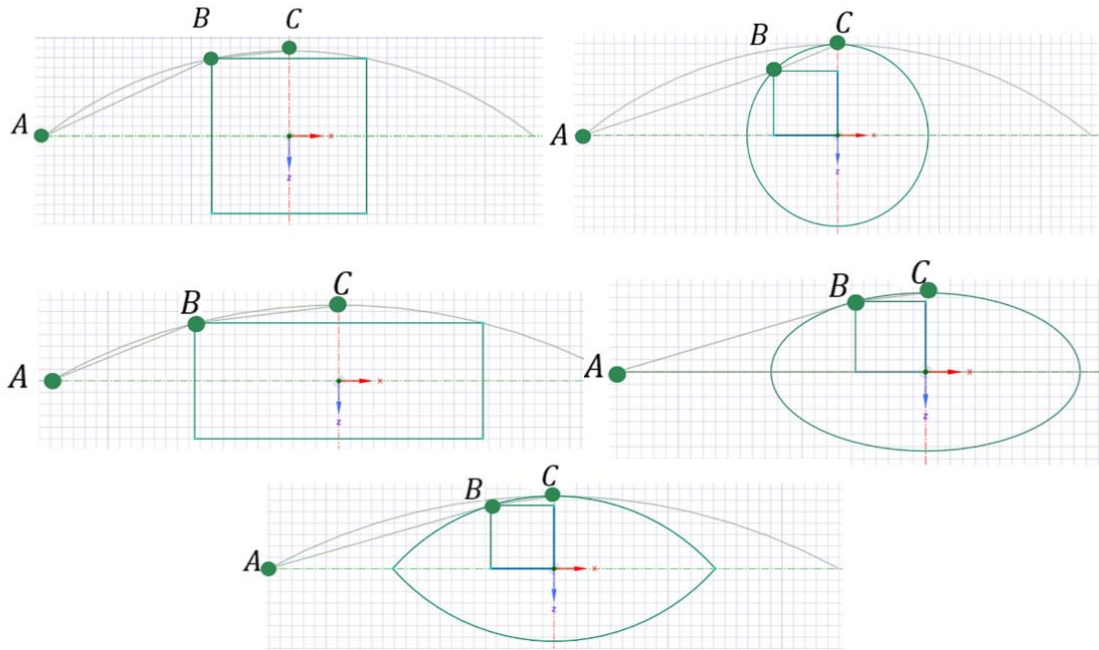


Abbildung 6-5: Die Koordinatenpositionen des A-, B- und C-Punktes

Die folgende Tabelle zeigt die für die A-, B- und C-Punkte gewählten Koordinate.

Tabelle 4: Koordinaten von A-, B- und C-Punkt für verschiedenen Geometrien

	Koordinaten von Punkt	Koordinaten von Punkt	Koordinaten von Punkt
	A [mm]	B [mm]	C [mm]
Quadrat	(-25, 0)	(-7.91, -7.91)	(0, 8.69)
Rund	(-25, 0)	(-6.31, -6.31)	(0, 8.92)
Rechteck	(-25, 0)	(-12.5, 5)	(0, 6.49)
Oval	(-25, 0)	(-5.68, 5.68)	(0, 6.37)
Augenform	(-25, 0)	(-5.54, -5.54)	(0, 6.37)

Die Winkel für die verschiedenen Formen wurden mithilfe des in ANSYS integrierten Werkzeugs SpaceClaim ermittelt, woraufhin die entsprechenden Federkoeffizienten mithilfe von Gleichung (6-5) berechnet wurden, wie in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Die Winkel in der Formel von verschiedenen Dummy-Sensoren

	α in Grad	β in Grad	$\frac{k'}{k}$ in Prozent
Rund	18.6	22.5	93.567
Quadrat	24.8	4	95.055
Rechteck	21.8	6.8	95.964
Augenform	15.9	8.5	97.518
Oval	16.4	7	97.564

Das folgende Balkendiagramm veranschaulicht, wie sich die verschiedenen Formen der Dummy-Sensoreinbettung auf die Festigkeit der Fasern in Faserrichtung auswirken. Ein höherer Wert bedeutet einen größeren Federkoeffizienten der äquivalenten Feder und damit einen größeren Elastizitätsmodul der gebogenen Fasern. Dies führt zu einer besseren Leistung in Zugversuchen.

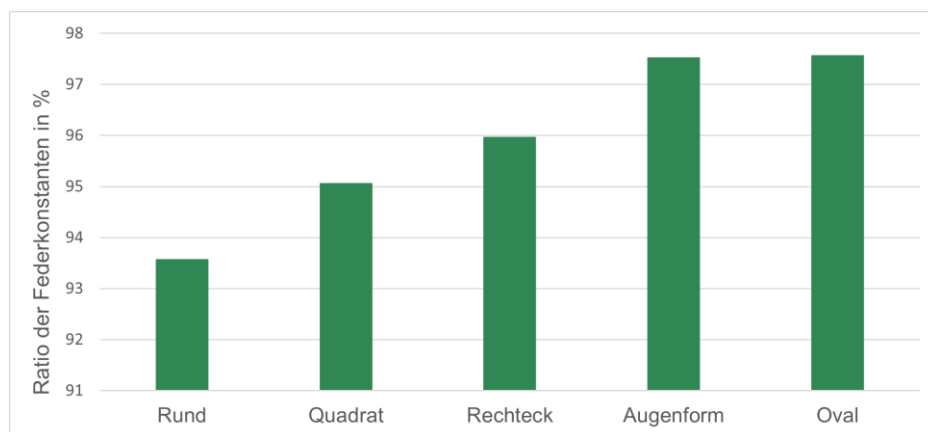


Abbildung 6-6: Vergleich der Verhältnisse der Federkonstanten

6.2 FEM-Simulation

In diesem Abschnitt werden FEM-Simulationen des Zugversuchs durchgeführt. Aufgrund des größeren Interesses am Kontaktbereich zwischen dem Dummy-Sensor und der Faserschicht wird bei der Modellierung lediglich die mittlere Faserschicht mit einer Dicke von 1 mm berücksichtigt. Die Modellierung ist in zwei Teile unterteilt, wie in der Abbildung 6-7 dargestellt.

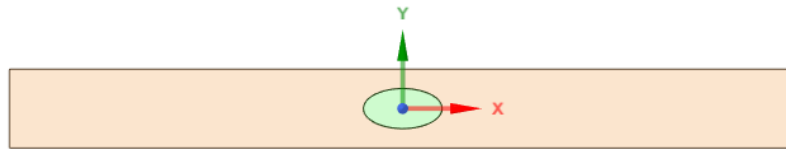


Abbildung 6-7: Modellierung

Der erste Teil umfasst die Faserschicht mit der sensorförmigen Lücke in der Mitte, während der zweite Teil den Dummy-Sensor darstellt. Beiden Teilen werden unterschiedliche Materialeigenschaften zugewiesen. Das für die Faserschicht gewählte Material ist das unidirektionale GFK Epoxy E-Glass UD, welches in der ANSYS Engineering-Datenbank enthalten ist und eine unidirektionale Faserausrichtung in x-Richtung aufweist. Die Dummy-Sensoreinheit wird aus einem benutzerdefinierten PLA-Material hergestellt [39].

Um den Vergleich der verschiedenen Formen zu erleichtern, wurden die Zellen in allen Faserschichtmodellen auf ein Quadrat von etwa 1 mm festgelegt. Die Qualität der Vernetzung hat einen großen Einfluss auf die Endergebnisse, weshalb der Kontaktbereich zwischen der Faserschicht und dem Sensor verfeinert wurde. In diesem Bereich tritt eine Spannungskonzentration auf, wodurch ein feineres Netz genauere Ergebnisse der Spannungsverteilung liefert.

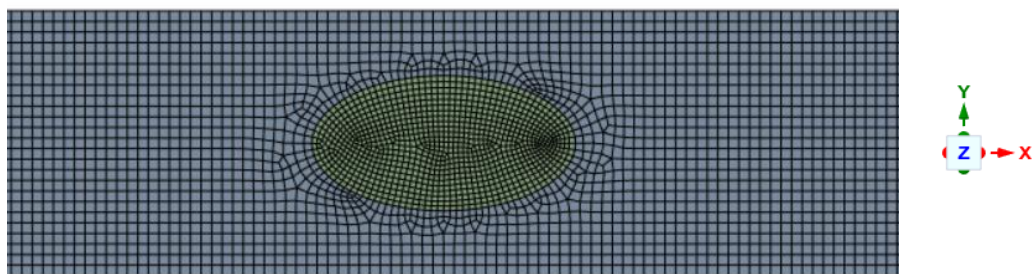


Abbildung 6-8: Vernetzung in FEM

Nach der Vernetzung wurde die statische Strukturanalyse durchgeführt. Hierbei wurden zunächst die Randbedingungen festgelegt, wie dies auch beim Zugversuch in Kapitel 4 der Fall war. Dabei wurde ein Ende des Modells festgehalten und auf das andere Ende wurde eine Zugkraft ausgeübt, wobei die Zugkraft und das feste Ende auf die beiden Flächen des Probekörpers an jedem Ende festgelegt wurden. Die Zugkraft wurde auf eine repräsentative Kraft von 1000 Newton eingestellt, wobei die Richtung der

Kraft in X-Richtung lag, also in Richtung der unidirektionalen Fasern. Sobald die Randbedingungen festgelegt waren, wurde die statische Strukturanalyse gestartet. Das folgende Diagramm vergleicht die Spannungsverteilung im quadratischen und im runden Modelle.

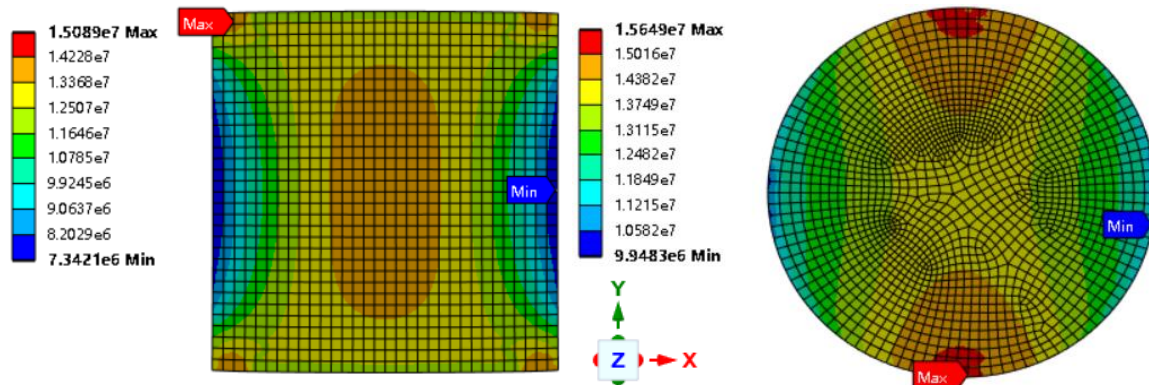


Abbildung 6-9: Spannungsverteilung von QR- und RD-Modell

Wenn ein Modell Schlitz aufweist und einem äußeren Moment ausgesetzt wird, tritt ein mehrachsiger, inhomogener Spannungszustand auf. In Abbildung 6-9 ist deutlich zu erkennen, dass die Spannungsmaxima des runden Sensors hauptsächlich in Y-Richtung am höchsten Punkt des Sensorkörpers verteilt sind. Im Gegensatz dazu verteilen sich die Spannungsmaxima des Quadrats hauptsächlich auf die vier Ecken. Die linke Skala zeigt, dass die Spannungsmaxima und -minima des runden Sensors höher sind als die des quadratischen Sensors. Daher lässt sich schließen, dass die Eigenspannungen im quadratischen Sensor bei der Belastung in X-Richtung geringer sind. Die Abbildung 6-10 zeigt die quadratischen und runden Sensoren auf der gleichen Skala. Es ist deutlich zu erkennen, dass die runden Sensoren einen größeren Bereich mit hoher Belastung aufweisen.

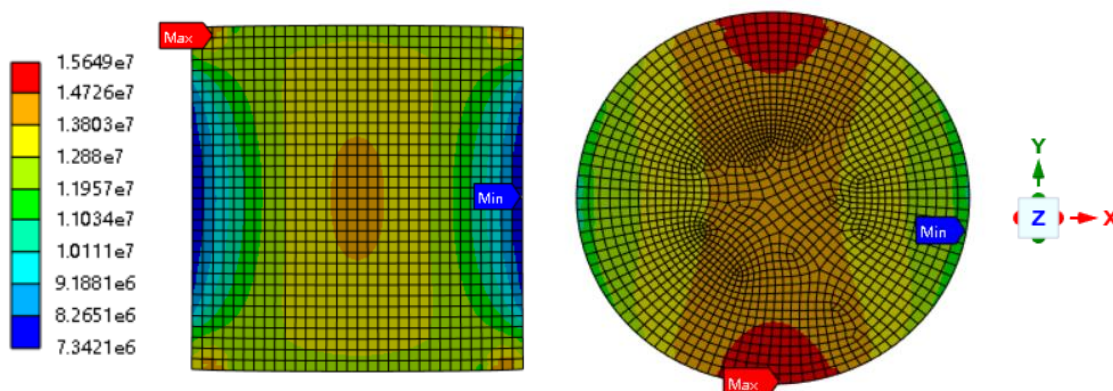


Abbildung 6-10: Die Spannungsverteilung mit der gleichen Skala von QR- und RD-Modell

Im Folgenden wird die Spannungsverteilung für die Modelle des ovalen, augenförmigen und rechteckigen Dummy-Sensors verglichen. Es ist erkennbar, dass die höchsten Spannungsbereiche (die roten Bereiche) sowohl für das ovale als auch für das augenförmige Dummy-Sensormodell in Richtung der Y-Achse verteilt sind, wo der Sensorkörper stärker gekrümmt ist und somit stärker belastet wird.

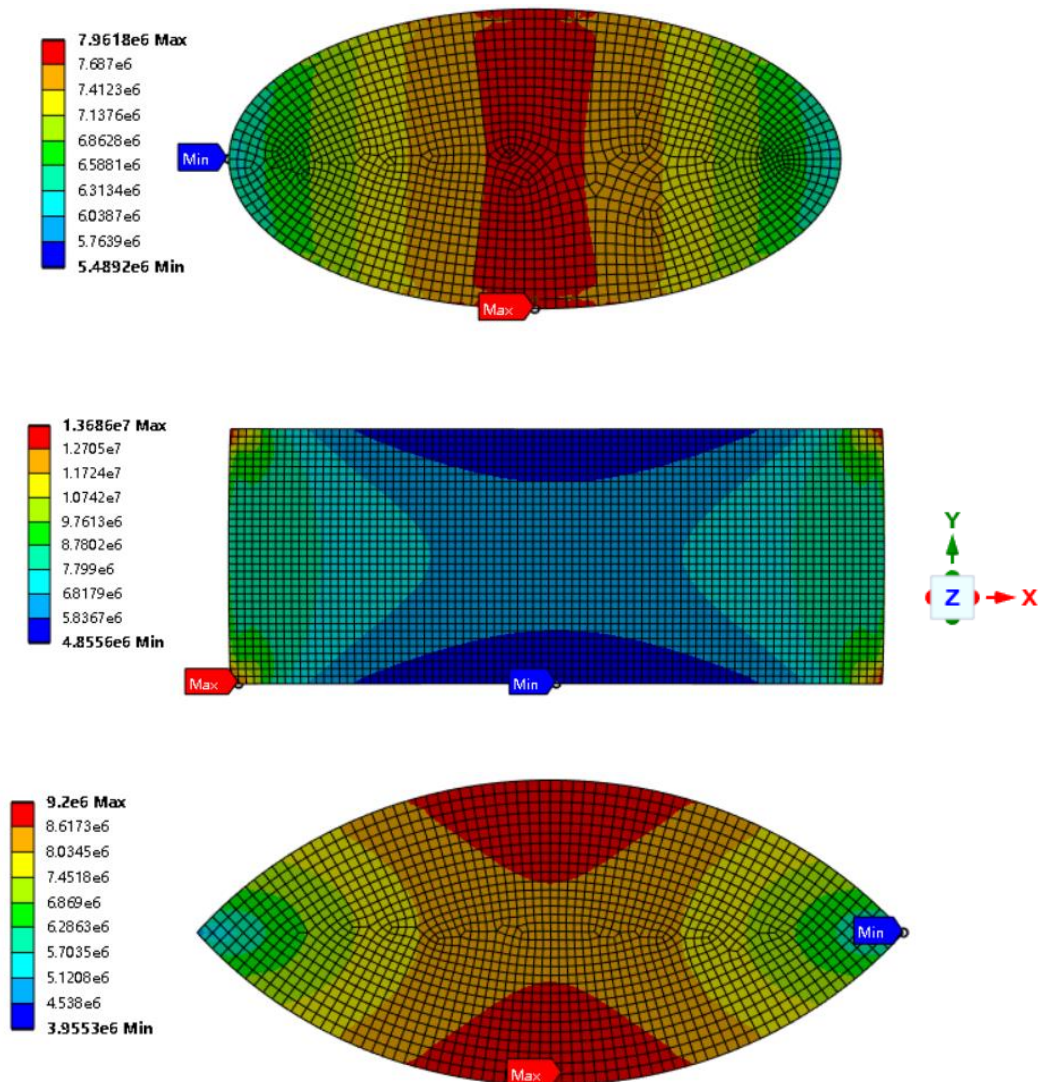


Abbildung 6-11: Die Spannungsverteilung von OL-, RT- und AF-Modell

Im Gegensatz dazu sind die höchsten Spannungsbereiche für das rechteckige Modell in den vier Ecken und an den beiden kurzen Seiten verteilt. Obwohl das rechteckige Modell einen größeren Bereich mit geringen Spannungen aufweist (die blauen Bereiche), sind die maximalen Spannungswerte für die ovalen und augenförmigen Modelle um 36,25 % bzw. 21,71 % niedriger als beim rechteckigen Modell. Um den Vergleich der drei Modellformen klarer zu gestalten, kann man sie in Abbildung 6-12 auf den

gleichen Skala bringen und dann die Farbverteilung der Spannungen betrachten. Dadurch lässt sich visuell besser erkennen, dass die ovale und die Augenform eine gleichmäßigere Spannungsverteilung mit einer drastischen Verringerung der Bereiche mit hoher Spannung aufweisen. Die ovale Form weist weniger Bereiche mit hohen Spannungen als die Augenform auf.

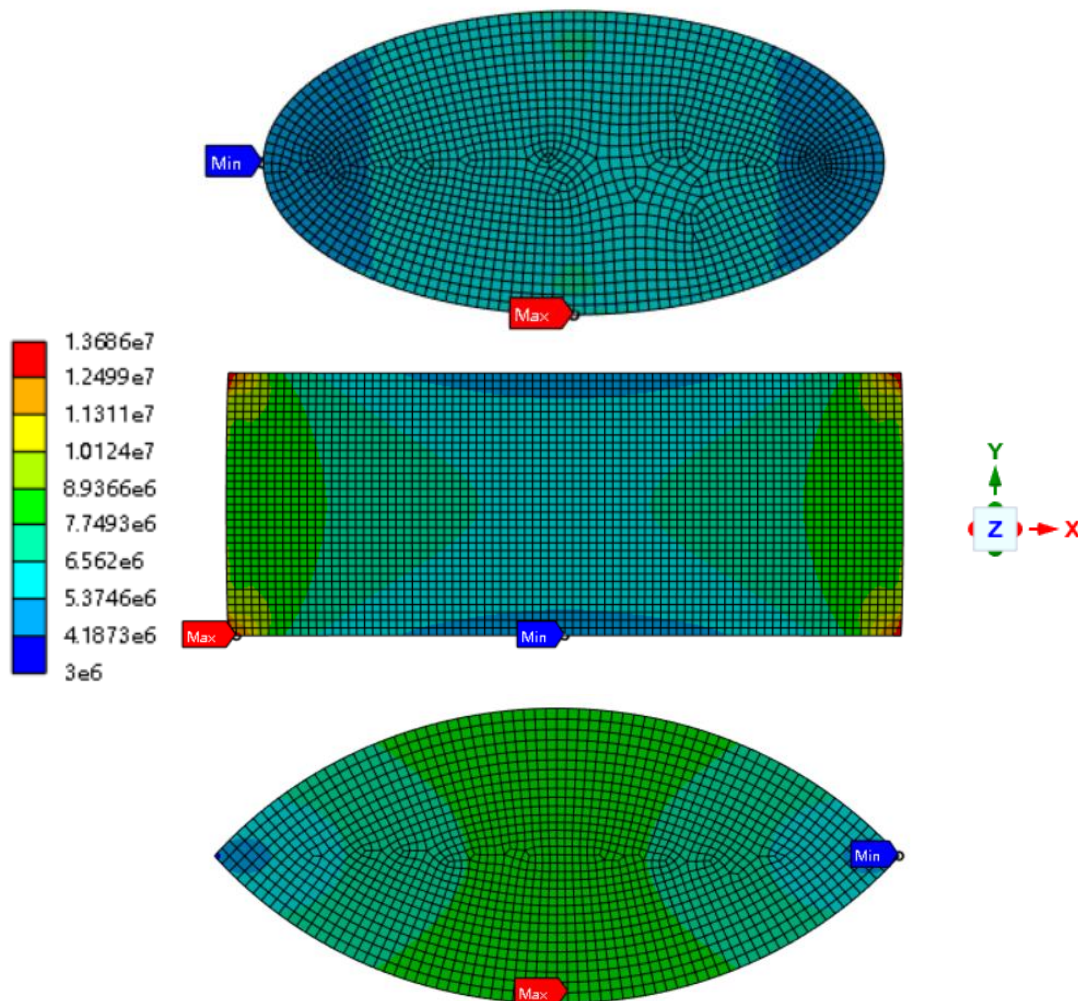


Abbildung 6-12: Die Spannungsverteilung mit der gleichen Skala von OL-, RT- und AF-Modell

Um die strukturelle Integrität zu gewährleisten, ist es wichtig, mehrere Spannungsakkumulationszonen zu vermeiden. Die experimentellen Ergebnisse im vorherigen Abschnitt zeigen eindeutig, dass der elliptische Sensor während des Tests höheren Belastungen standhalten konnte. Dies wird durch die Simulationsergebnisse weitgehend unterstützt.

Zur Referenz sind in der folgenden Tabelle die maximalen und minimalen Spannungswerte für jeden Sensortyp aufgeführt. Es ist deutlich erkennbar, dass die höchste Spannung bei dem Oval am geringsten

ist, gefolgt von der Augenform, dem Rechteck, dem Quadrat und dem Rund.

Tabelle 6: Die maximalen und minimalen Spannungswerte für verschiedene Modelle

	Maximum-Spannung in MPa	Minimum-Spannung in MPa
Oval	7.962	5.489
Augenform	9.200	3.955
Rechteck	13.680	4.856
Quadrat	15.089	7.342
Rund	15.649	9.948

7 Fehlerdiskussion

Während des VARI-Prozesses wurde versucht, den Faservolumengehalt aller Proben bei 60% zu halten. Die Fasern in der Nähe der Dummy-Sensoren wurden jedoch gebogen und umgeformt, was zu einer lokalen Überfüllung der Fasern führte. Zudem entstanden durch die Lücken zwischen den Fasern und dem Dummy-Sensor Bereiche, die mit Harz angereichert waren. Daher war es schwierig, die Auswirkungen dieser Faktoren auf den FVG-Wert zu vermeiden und sicherzustellen, dass der Faservolumengehalt in jedem Teil der Verbundwerkstoffprobe konstant blieb.

Da alle Proben aus Gründen der Energieeinsparung und Gerätebeschränkungen in einer Heizdecke nachgehärtet wurden, konnten ungleiche Temperaturen auftreten, was die Qualität der endgültigen Probe beeinträchtigte.

Wie aus den Histogrammen der Biegeprüfung in Abschnitt 5.1.4 hervorgeht, weisen die rechteckigen Proben eine hohe Standardabweichung auf. Es lässt sich aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen in Abbildung 7-1 erkennen, dass die Kurve von Probe 5 von den anderen vier Proben abweicht.

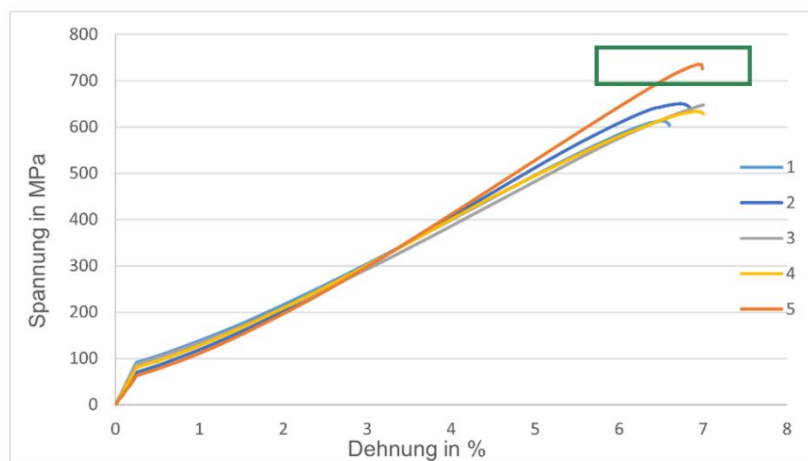


Abbildung 7-1: Die Spannungs-Dehnung-Kurven für Zugversuch von RK-Proben

Dies könnte auf Fehler bei der Einbettung des rechteckigen Dummy-Sensors zurückzuführen sein. Im Gegensatz zu Sensoren mit Krümmungen wie Ellipsen halten die geraden Kanten des Rechtecks die Fasern beim manuellen Biegen nicht an Ort und Stelle. Aufgrund der weichen und leicht beweglichen Beschaffenheit der Glasfasern werden sie von den vier Ecken des Rechtecks nicht perfekt gehalten, wodurch die Fasern zum Verrutschen neigen und die scharfen Ecken des Rechtecks verdeckt werden,

wie in der Abbildung 7-2 dargestellt. Obwohl sichergestellt wurde, dass alle rechteckigen Sensoren vor dem Bau der Vari-Vorrichtung vollständig aus dem Gewebe freigelegt wurden, konnte nicht gewährleistet werden, dass die Fasern um die rechteckigen Sensoren herum während des Harzinjektionsprozesses statisch bleiben, ohne zu verrutschen. Eine maßgeschneiderte Faserplatzierung kann dieses Problem lösen.

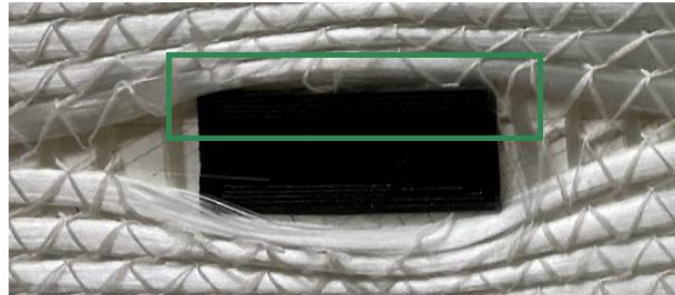


Abbildung 7-2: Umformen von Fasern neben dem rechteckigen Sensoren

Die Validierungsmethode lässt sich noch weiter verbessern. In Abschnitt 6.1 wurde die Validierungsmethode für die theoretische Annäherung vorgestellt. Diese Methode lässt sich verbessern, indem die Anzahl der Federmodelle erhöht wird, um die Genauigkeit der Berechnung zu steigern. In Abschnitt 6.2 wurde die Finite-Elemente-Modellierungsmethode eingeführt, um die Spannungsverteilung verschiedener Proben unter Zugbelastung zu simulieren. Allerdings geht der Simulationsprozess davon aus, dass sich die Fasern im durchtrennten Zustand befinden. Da die Berechnung zu komplex ist, berücksichtigt die Simulation nicht die Biegung der Fasern. Folglich werden die Kraftlinien nicht entlang der gebogenen Fasern übertragen, was zu Abweichungen bei der Validierungsmethode führen kann. Es wäre möglich, eine genauere Simulation zu erzielen, wenn während der Modellierung eine Reihe von Kontrollpunkten an den Grenzen des Sensorkörpers gesetzt werden könnte, um eine Kraftlinie zu erzeugen, die mit den Fasern übertragen wird.

Schließlich beruht die Anzahl der Proben in dieser Arbeit auf der Mindestanzahl von 5, wie sie von der Norm gefordert wird. Wenn die Anzahl der Proben erhöht wird, können fehlerhafte Daten, die von der Durchschnittskurve abweichen, während der Datenverarbeitung und statistischen Vorgehen entfernt werden. Dies würde zu genaueren experimentellen Ergebnissen führen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Einbetten von Sensoren zur Überwachung des Aushärtungsprozesses in Verbundwerkstoffe erfolgt durch Biegen, Umformen oder Schneiden der Fasern. Während dieses Prozesses ist eine Beschädigung des Materials unvermeidlich, was plötzliche Veränderungen der Faserkontinuität und der Spannungsverteilung in den betroffenen Bereichen zur Folge hat und schließlich zum Versagen der gesamten Struktur führt. Der Bereich, in dem der Sensor eingebettet ist, wird somit zum schwächsten Teil der Struktur. Eine Änderung der Geometrie der eingebetteten Sensoren kann jedoch dazu beitragen, diese Probleme zu reduzieren und zu kompensieren. Interessanterweise können Anregungen für die Sensorform durch natürliche Entwicklungen im Bereich der Bionik gewonnen werden.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die mechanischen Eigenschaften von GFRP-Strukturen, in die Dummy-Sensoren eingebettet sind. Die 3D-gedruckten Teile wurden mit Hilfe von umgeformten Fasern eingebettet und die Proben wurden mit VARI hergestellt und experimentell untersucht. Dabei wurden sowohl Zug- als auch Biegebelastungen berücksichtigt. Als Ergebnis werden die Spannungs-Dehnungskurven, Zug- und Biegefestigkeiten sowie das Beanspruchungs- und Versagensverhalten der verschiedenen Formen der Dummy-Sensoren im Vergleich zum reinen Verbundwerkstoff ohne Einbettung dargestellt und diskutiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die ovale Form sowohl im Zug- als auch im Drei-Punkt-Biegeversuch überlegene mechanische Eigenschaften aufweist. Dicht gefolgt wird sie vom augenförmigen Sensor, der dank seiner ähnlichen Form wie die Oval eine relativ starke mechanische Leistung aufweist, sowie dem rechteckigen Sensor, der die Festigkeit des Verbundwerkstoffs relativ stärker beeinflusst. Wie erwartet, zeigen die quadratischen und kreisförmigen Sensoren die schlechtesten Leistungen. Im Falle von Biegebelastungen weisen lange Oval und lange Augenformen im Vergleich zu Oval und Augenform eine bessere Integration in den Verbundwerkstoff auf. Dies liegt daran, dass sie sich besser an das Biegeprofil der Fasern anpassen können und somit den Biegewinkel der Fasern reduzieren. Dadurch haben sie weniger Einfluss auf das System.

Die Validierung der Tests durch die ANSYS Finite-Elemente-Methode und die Federmodell-Methode, sowohl in Form von Simulationen als auch von theoretischen Berechnungen, bestätigt die Zuverlässigkeit der Experimente und stützt die oben genannten Schlussfolgerungen.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, sieben Formen von Dummy-Sensoren hinsichtlich ihrer Integration in das Verbundsystem zu vergleichen und die Sensorform zu finden, die sich in Bezug auf Zug- und Biegeeigenschaften am besten eignet. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten weitere Testtypen einbeziehen, wie zum Beispiel Schertests. Die Schereigenschaften von Verbundwerkstoffen in der Ebene sind ein Schlüsselparameter für Verbundwerkstoffstrukturen. Durch die Einbeziehung von Daten aus Schertests wäre es möglich, einen umfassenderen Vergleich der Auswirkungen der Einbettung auf die Verbundstoffstruktur durchzuführen.

Das in dieser Arbeit verwendete Gewebe war unidirektionales Glasfasergewebe. Es wäre möglich, in späteren Arbeiten auch multidirektionale Glasfasergewebe und Kohlefasergewebe einzubeziehen, um die Auswirkungen von eingebetteten Sensoren auf Verbundwerkstoffe umfassender zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [1] Sauer, M., Kühnel, M., & Witten, E. (2018). Composites-Marktbericht 2018–Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. Hrsg: AVK–Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe und Carbon Composites eV.
- [2] R. Lässig, M. Eisenhut, A. Mathias, R. T. Schulte, F. Peters, T. Kühmann, T. Waldmann und W. Begemann. „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen“. In: Roland Berger Strategy Consultants (2012).
- [3] Kunststoffe eV, AVK–Industrievereinigung Verstärkte. "Handbuch Faserverbundkunststoffe." Vieweg+ Teubner, Wiesbaden 3 (2010).
- [4] Hufenbach, W.: Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus. Dresden: SDV-Die Medien AG 2007.
- [5] Zhang, Bing, et al. "An experimental and numerical investigation into damage mechanisms in tapered laminates under tensile loading." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 133 (2020): 105862.
- [6] Tuncol, G.; Danisman, M.; Kaynar, A.; Sozer, E.M. Constraints on monitoring resin flow in the resin transfer molding (RTM) process by using thermocouple sensors. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*
- [7] Yenilmez, Bekir, and E. Murat Sozer. "A grid of dielectric sensors to monitor mold filling and resin cure in resin transfer molding." *Composites part a: applied science and manufacturing* 40.4 (2009): 476-489.
- [8] Du, W., Tao, X. M., Tam, H. Y., & Choy, C. L. (1998). Fundamentals and applications of optical fiber Bragg grating sensors to textile structural composites.
- [9] Bremer, Kort; Weigand, Frank; Zheng, Yulong; Alwis, Lourdes; Helbig, Reinhard; Roth, Bernhard (2017). Structural Health Monitoring Using Textile Reinforcement Structures with Integrated Optical Fiber Sensors. *Sensors*, 17(2), 345–. doi:10.3390/s17020345
- [10] Tifkitsis, K. I., & Skordos, A. A. (2019). A novel dielectric sensor for process monitoring of carbon fibre composites manufacture. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.
- [11] Mijović, Jovan, et al. "The principles of dielectric measurements for in situ monitoring of

- composite processing." *Composites science and technology* 49.3 (1993).
- [12] Groh, Jannis, et al. "Design, Calibration and Validation of 24 GHz Resonators for Epoxy Resin Cure Monitoring Systems in the Fibre-Reinforced Plastics Fabrication." *Proc. World Conference on Non-Destructive Testing* 2016.
- [13] Ghezzi, Fabrizio, Anthony F. Starr, and David R. Smith. "Integration of networks of sensors and electronics for structural health monitoring of composite materials." *Advances in Civil Engineering* 2010 (2010).
- [14] Konka, Hari P., M. A. Wahab, and K. Lian. "The effects of embedded piezoelectric fiber composite sensors on the structural integrity of glass-fiber-epoxy composite laminate." *Smart materials and Structures* 21.1 (2011): 015016.
- [15] Masmoudi, Sahir, Abderrahim El Mahi, and Saïd Turki. "Use of piezoelectric as acoustic emission sensor for in situ monitoring of composite structures." *Composites Part B: Engineering* 80 (2015): 307-320.
- [16] Hufenbach, W., et al. "Mechanical behaviour of textile-reinforced thermoplastics with integrated sensor network components." *Materials & Design* 32.10 (2011).
- [17] Hufenbach, W., et al. "Effect of integrated sensor networks on the mechanical behaviour of textile-reinforced thermoplastics." *Procedia Materials Science* 2 (2013).
- [18] 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.
- [19] K. Schulte, *Faserverbundwerkstoffe mit Polymermatrix –Aufbau und Mechanische Eigenschaften-*, DLR Institut für Werkstoff-Forschung Köln, Forschungsbericht 1991.
- [20] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer-Verlag, Berlin (2007).
- [21] Sathishkumar, T.; Satheeshkumar, S.; Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- [22] Ku, A. I. V. (Ed.). (2014). *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. Springer-Verlag.
- [23] Pangboonyanon, Woramon. A study of contactless localised positioning of carbon fibres using electrical and magnetic fields for reinforced plastics applications. Diss. 2021.

-
- [24] Sathishkumar, T.; Satheeshkumar, S.; Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- [25] Cameron, N. M., and C. F. Rapp. "Fiberglass, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*." (2001).
- [26] Beaumont, P. W., Zweben, C. H., Gdutos, E., Talreja, R., Poursartip, A., Clyne, T. W., ... & Soutis, C. (Eds.). (2018). *Comprehensive composite materials II* (Vol. 6). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- [27] J. Schlichting, G. Elssner, K.H. Grünthaler, W. Günther, D. Kehr, G. Niederstadt, P.R.Sahm, Dr.D. Stöckel in: *Verbundwerkstoffe, Grundlagen und Anwendung*, Grafenau, Lexika,1978.
- [28] Bergmann, Heinrich W. *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile*. Springer-Verlag, 2013.
- [29] Mallick, Pankar K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press, 2007.
- [30] Muminovic, S. (2022). Das Hookesche Gesetz. In *Kanonische Experimente der Physik: Fachliche Grundlagen und historischer Kontext* (pp. 9-34). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [31] Sathishkumar, T.; Satheeshkumar, S.; Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- [32] Macherauch, E., Zoch, HW. (2019). V44 Biegeverformung. In: *Praktikum in Werkstoffkunde*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [33] Yang, Y., Chiesura, G., Vervust, T., Bossuyt, F., Luyckx, G., Degrieck, J., & Vanfleteren, J. (2016). Design and fabrication of a flexible dielectric sensor system for in situ and real-time production monitoring of glass fibre reinforced composites. *Sensors and Actuators A: Physical*, 243, 103-110.
- [34] Mattheck, Claus. *Die Körpersprache der Bauteile: Enzyklopädie der Formfindung nach der Natur*. Karlsruher Institut für Technologie, 2017.
- [35] Heywood, Roland Bryon. *Photoelasticity for Designers: International Series of Monographs in Mechanical Engineering*. Vol. 2. Elsevier, 2013.
- [36] Garcia Filho, F.d.C.; Luz, F.S.d.; Nascimento, L.F.C.; Gundappa Satyanarayana, K.; Wieslaw

- Drelich, J.; Neves Monteiro, S. Mechanical Properties of Boehmeria nivea Natural Fabric Reinforced Epoxy Matrix Composite Prepared by Vacuum-Assisted Resin Infusion Molding. *Polymers* 2020, 12, 1311. <https://doi.org/10.3390/polym12061311>
- [37] ISO 527-1:2019(en) Plastics — Determination of tensile properties
- [38] ISO 178:2019 - Plastics — Determination of flexural properties
- [39] Farah, Shady, et al. “Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review.” *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, Dec. 2016.
- [40] Abdellaoui, Hind (2019). Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites || Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. doi:10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4