

Untersuchung von Materialmodellen für faserverstärkte Kunststoffe auf ihre Anwendbarkeit bei additiv gefertigten leitfähigen Strukturen im Multi-Jet Modelling Verfahren

Investigation of Material Models for Fiber reinforced Plastics regarding their Applicability to additively manufactured conductive Structures by Multi-Jet Modelling

Michael Grünfelder

**Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades M.Sc.
an der Fakultät für Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie der Technischen
Universität München.**

Themenstellende/r	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler Lehrstuhl für Carbon Composites
Betreuer/in	Matthias Feuchtgruber, M.Sc. Lehrstuhl für Carbon Composites
Externer Mitarbeiter	Dipl.-Ing. Tobias Hehn Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)
Eingereicht von	Michael Grünfelder Salzbergweg 13 85368 Wang Tel.: +49 1748416491 Matr.-Nr.: 03670564
Eingereicht am	19.09.2022 in Garching bei München

Technische Universität München
Fakultät für Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie
Lehrstuhl für Carbon Composites
Boltzmannstraße 15
D-85748 Garching bei München

Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092

Fax: +49 (0) 89 / 289 – 15097

Email: info@lcc.lrg.tum.de

Web: www.lrg.tum.de/lcc

Aufgabenstellung

Untersuchung von Materialmodellen für faserverstärkte Kunststoffe auf ihre Anwendbarkeit bei additiv gefertigten leitfähigen Strukturen im Multi-Jet Modeling Verfahren

Die Arbeit soll sich mit dem Themenbereich der Additiven Fertigung von Elektronik (AME) befassen. Hierbei werden im derzeit marktführenden Verfahren eine leitfähige als auch eine nicht-leitfähige Tinte mittels Multi-Jet Modeling (MJM) verarbeitet. Die leitfähige Tinte besteht aus Silber-Nanopartikeln (AgNP), die nicht leitfähige Tinte aus einem UV-aushärtenden Photopolymer. Durch das Versintern der AgNP mittels einer IR-Lampe entsteht eine (Teil-) versinterte leitfähige Struktur aus Silber. Messungen haben gezeigt, dass das leitfähige Material (Silber) ein deutlich höheres E-Modul als das umgebene Isolationsmaterial besitzt.

Diese Masterarbeit soll die Frage behandeln, ob Materialmodelle aus dem Bereich der Faserverbundwerkstoffe (FVK) auf den Bereich der Additiven Fertigung von Elektronik mittels MJM angewandt werden können. Zunächst ist eine Recherche zu beiden Bereichen (FVK/AME) durchzuführen. Materialmodelle sollen ausgewählt und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit bewertet werden, z.B. hinsichtlich ihrer zu Grunde liegenden Annahmen. Insbesondere soll die Gültigkeit anhand von Versuchen (mechanische Test) überprüft werden.

Die Masterarbeit wird am Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB) in Erding verfasst. Zur Beantwortung dieser Fragestellung können die Einrichtungen des Hauses verwendet werden. Hierzu zählen insbesondere ein AME-3D-Drucker der Fa. NanoDimension des Modells DragonFly IV sowie umfangreiche Ausstattung für mechanische Prüfungen.

Im Rahmen der Masterarbeit sollen folgende Aufgaben bearbeitet werden:

1. Recherche zum Stand der Technik bzgl. der Additiven Fertigung von Elektronik
2. Recherche zum Stand der Technik bzgl. der Berechnung faserverstärkter Verbundwerkstoffe
3. Bewertung der Berechnungsmodelle für FVK hinsichtlich der Rahmenbedingungen bei AME-Bauteilen
4. Aufstellen eines Versuchsprogramms zur Überprüfung der Anwendbarkeit Materialmodelle
5. Überprüfung der Berechnungsmodelle mittels mechanischer Prüfungen (Durchführung des Versuchsprogramms)
6. Diskussion und Dokumentation der Ergebnisse

Ansprechpersonen WIWeB

Dipl.-Ing. Tobias Hehn
08122-9590-3224
TobiasHehn@bundeswehr.org

Dr. Felix Zimmer
08122-9590-3240
FelixZimmer@bundeswehr.org

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Übersicht

In Rahmen dieser Arbeit werden mikro- und makromechanische Materialmodelle aus dem Bereich der FVK bezüglich ihrer Anwendbarkeit bei additiv gefertigten leitfähigen Strukturen im Multi-Jet Modeling Verfahren untersucht. Hierfür werden die Materialmodelle bezüglich ihrer Anwendbarkeit auf das Fertigungsverfahren bewertet. Im Rahmen eines Versuchsprogramms werden unterschiedliche Probekörpergeometrien erstellt, gefertigt und mechanischen Prüfungen unterzogen. Die Ergebnisse werden ausgewertet und in die Materialmodelle implementiert. Darüber hinaus werden die Probekörper und ihre Bruchflächen optisch untersucht. Zudem werden numerische Berechnungen in Form von FEM-Simulationen und computergestützter Berechnungen nach der Laminattheorie durchgeführt. Die Ergebnisse werden in den Stand der Technik eingeordnet. Für Abweichungen der Messergebnisse von den Modellen werden Erklärungsansätze gegeben. Ein Ausblick über mögliche weiterführende Untersuchungen unter Berücksichtigung der gewonnenen Kenntnisse runden die Arbeit ab.

Abstract

Within the scope of this work, micro- and macro-mechanical models from the field of FRP are examined with regards to their applicability to additively manufactured conductive structures by multi-jet modeling. For this purpose, the material models are evaluated with regard to their applicability to the manufacturing process. Within the scope of a test program, different specimen geometries are created, manufactured and subjected to mechanical tests. The results are evaluated and implemented in the material models. In addition, the specimens and their fracture surfaces are examined optically. In addition, numerical calculations are carried out in the form of FEM-simulations and computer-aided calculations based on the laminate theory. The results are classified according to the state of the art. Explanations are given for deviations in the measurement results from the models. An outlook on possible further investigations, taking into account the knowledge gained, complete the work.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	III
Ehrenwörtliche Erklärung	IV
Übersicht	V
Abstract	VI
Inhaltsverzeichnis	VII
Nomenklatur	IX
Abkürzungsverzeichnis	XVI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Additive Fertigung von Elektronik	3
2.1.1 Konventionelle Elektronikfertigung	3
2.1.2 Gedruckte Elektronik.....	5
2.1.3 Additive Elektronikfertigung.....	9
2.2 Berechnung faserverstärkter Verbund-werkstoffe	23
2.2.1 Mikromechanik.....	24
2.2.2 Makromechanik	29
3 Bewertung Berechnungsmodelle	33
4 Methoden	37
4.1 Versuchsprogramm	37
4.1.1 Versuchsreihe Biegeversuch	37
4.1.2 Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben	44
4.1.3 Versuchsreihe Zugversuch Laminat-Proben	48
4.2 Numerische Untersuchung	50
4.2.1 FEM-Simulation Biegeversuch	51
4.2.2 FEM-Simulation Zugversuch UD-Proben.....	56
4.2.3 FEM-Simulation Zugversuch Laminat-Proben	60
4.2.4 CLT-Berechnung der Laminatproben	62
5 Auswertung	65
5.1 Auswertung Versuchsprogramm	65

5.1.1	Auswertung Biegeversuch	66
5.1.2	Auswertung Zugversuch UD-Proben.....	77
5.1.3	Auswertung Zugversuch Laminat-Proben	104
5.1.4	Auswertung FEM-Simulation Biegeversuch	109
5.1.5	Auswertung FEM-Simulation Zugversuch UD-Proben.....	112
5.1.6	Auswertung FEM-Simulation Zugversuch Laminatproben.....	122
5.1.7	Auswertung CLT-Berechnung der Laminatproben	124
6	Ergebnisse und Diskussion	127
7	Zusammenfassung und Ausblick	135
	LITERATURVERZEICHNIS	137
	Abbildungsverzeichnis	145
	Tabellenverzeichnis.....	149
	Anhang	151
A	Daten-CD.....	151

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Δl	[<i>mm</i>]	Längenänderung
ΔL_0	[<i>mm</i>]	Verlängerung zwischen Messpunkten
Δl_m	[<i>mm</i>]	Längenänderung der Matrix
Δl_f	[<i>mm</i>]	Längenänderung der Fasern
$\Delta l_{Verbund}$	[<i>mm</i>]	Längenänderung des Verbundes
A	[<i>mm</i> ²]	Querschnittsfläche
A_{Bild}	[<i>mm</i> ²]	Querschnittsfläche nach Bildauswertung
A_f	[<i>mm</i> ²]	Querschnittsfläche der Fasern
$A_{gemessen}$	[<i>mm</i> ²]	Gemessener Flächeninhalt
A_m	[<i>mm</i> ²]	Querschnittsfläche der Matrix
$A_{Randfehler}$	[<i>mm</i> ²]	Flächenabweichung im Randbereich
A_{real}	[<i>mm</i> ²]	Realer Flächeninhalt
$A_{Verbund}$	[<i>mm</i> ²]	Querschnittsfläche des Verbundes
$A_{Leitung}$	[<i>mm</i> ²]	Querschnittsfläche CI-Leiterbahn
b	[<i>mm</i>]	Probekörperbreite
$b_{FEM_{BP}}$	[<i>mm</i>]	Breite des Ausschnitts der Biegeproben
b_{BP}	[<i>mm</i>]	Breite Biegeproben
$b_{FEM_{LP}}$	[<i>mm</i>]	Breite des Ausschnitts der Laminatproben

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
b_{LP}	[mm]	Breite der Laminatproben
b_{ZP_1}	[mm]	Breite des engen Teils der UD-Proben
b_{ZP_2}	[mm]	Breite an den Enden der UD-Proben
d_{qh}	[mm]	Horizontaler Abstand der CI-Leiterbahnen im Packungsmuster
d_{qv}	[mm]	Vertikaler Abstand der CI-Leiterbahnen im Packungsmuster
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
E_{\parallel}	[N/mm ²]	Längs-Elastizitätsmodul
E_{\perp}	[N/mm ²]	Quer-Elastizitätsmodul
$E_{f\parallel}$	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul der Faser in Faserrichtung
$E_{f\perp}$	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul der Faser quer zur Faserrichtung
E_f	[N/mm ²]	Biegemodul
E_{fCI}	[N/mm ²]	Biegemodul CI-Material
E_{fDI}	[N/mm ²]	Biegemodul DI-Material
E_m	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul der Matrix
$E_{m\parallel}$	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul der Matrix in Faserrichtung
E_t	[N/mm ²]	Zugmodul
F	[N]	Kraft
F_{\parallel}	[N]	Kraft parallel zur Faserrichtung

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
F_{\perp}	[N]	Kraft quer zur Faserrichtung
F_f	[N]	Kraft der Faserkomponente
F_m	[N]	Kraft der Matrixkomponente
G	[N/mm ²]	Schubmodul
$G_{\perp\parallel}$	[N/mm ²]	Quer-Längs-Schubmodul
$G_{\perp\parallel_{HE}}$	[N/mm ²]	Halbempirisch ermittelter Quer-Längs-Schubmodul
$G_{f\perp\parallel}$	[N/mm ²]	Quer-Längs-Schubmodul der Faser
G_{L12}	[N/mm ²]	Schubmodul in Lagenebene
G_m	[N/mm ²]	Schubmodul der Matrix
h	[mm]	Probendicke
h_{BP}	[mm]	Dicke der Biegeproben
h_{ES}	[mm]	Schichtdicke der Einzelschicht
$h_{FEM_{LP}}$	[mm]	Dicke des Ausschnitts der Laminatprobe
h_{LP}	[mm]	Höhe der Laminatproben
h_{ZP}	[mm]	Dicke der UD-Proben
k_M	[–]	Faktor Messunsicherheit

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
L_0	[mm]	Messlänge
l_0	[mm]	Anfangslänge
l_{BP}	[mm]	Länge der Biegeproben
L_{BV}	[mm]	Stützweite
L'_{BV}	[mm]	Mittlere Stützweite
l_{FEM_LP}	[mm]	Länge des Ausschnitts aus der Laminatproben
$l_{Leitung}$	[mm]	Länge CI-Leiterbahn
l_{LP}	[mm]	Länge der Laminatproben
l_{ZP_1}	[mm]	Länge des engen Teils der UD-Proben
l_{ZP_2}	[mm]	Entfernung der breiten parallelen Seiten der UD-Proben
l_{ZP_3}	[mm]	Gesamtlänge der UD-Proben
L_{ZV}	[mm]	Klemmbackenabstand
n	[–]	Anzahl Lagen
n_{LP}	[–]	Anzahl Lagen der Laminatproben
$n_{Leitung}$	[–]	Anzahl parallel geschalteter CI-Leiterbahnen
n_p	[–]	Anzahl Proben

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
R_1	[<i>mm</i>]	Widerstand
r_{AL}	[<i>mm</i>]	Radius Auflager
R_G	[Ω]	Widerstand Messstrecke
r_{ZP}	[<i>mm</i>]	Radius der DU-Proben
s_{ABW}	[–]	Standardabweichung
s_{BV}	[<i>mm</i>]	Durchbiegung
$s_{Element_Größe}$	[<i>mm</i>]	Maß der Elementgröße
s_q	[<i>mm</i>]	Seitenlänge des Querschnitts der CI-Leiterbahn
t_p	[–]	t-Faktor
V_f	[–]	Faservolumen
V_m	[–]	Matrixvolumen
$V_{Verbund}$	[–]	Verbundsvolumen
$v_{Vorschub_BV}$	[<i>mm/min</i>]	Vorschubgeschwindigkeit Biegeversuch
$v_{Vorschub_ZV}$	[<i>mm/min</i>]	Vorschubgeschwindigkeit Zugversuch
\bar{x}	[–]	Empirischer Mittelwert
α	[°]	Winkel Orientierung der CI-Leiterbahnen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
β_{CI_Bahnen}	[°]	Winkel zwischen Leiterbahnorientierung und Druckkopf-Bewegungsrichtung
β_{Probe}	[°]	Winkel zwischen Probenlängsrichtung und Druckkopf-Bewegungsrichtung
γ_{21}	[°]	Gleitwinkel in 12-Ebene
ε_{\parallel}	[–]	Dehnung parallel zur Faserrichtung
ε_B	[–]	Bruchdehnung
ε_f	[–]	Dehnung der Randfaser
ε_{faser}	[–]	Dehnung der Faser
ε_M	[–]	Dehnung bei Biegefestigkeit
ε_m	[–]	Dehnung der Matrix
ε_q	[–]	Querdehnung
σ	[N/mm ²]	Spannung
σ_1	[N/mm ²]	Spannung in 1-Richtung
σ_2	[N/mm ²]	Spannung in 2-Richtung
σ_{\parallel}	[N/mm ²]	Spannung parallel zur Faserrichtung
σ_{\perp}	[N/mm ²]	Spannung quer zur Faserrichtung
σ_f	[N/mm ²]	Biegespannung

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
σ_{fM}	$[N/mm^2]$	Biegefestigkeit
σ_{faser}	$[N/mm^2]$	Spannung der Fasern
σ_m	$[N/mm^2]$	Spannung der Matrix
τ_{21}	$[N/mm^2]$	Schubspannung in 12-Ebene
τ_{L12}	$[N/mm^2]$	Schubspannung in Lagenebene
ν	$[-]$	Querkontraktionszahl
$\nu_{\parallel\perp}$	$[-]$	Querkontraktionszahl (Kontraktion quer zur Faserrichtung)
$\nu_{\perp\parallel}$	$[-]$	Querkontraktionszahl (Kontraktion längs zur Faserrichtung)
$\nu_{f\perp\parallel}$	$[-]$	Querkontraktion quer zur Faser
ν_m	$[-]$	Querkontraktion der Matrix
φ	$[-]$	Faservolumengehalt
ϕ	$[-]$	CI-Volumenanteil

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
ADC	Analog Digital Converter
CI	Conductive Ink
CIJ	Continuous Inkjet
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
CLT	Klassische Laminattheorie
CNC	Computerized Numerical Control
CS	Continuous Stream
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DI	Dielectric Ink
DLP	Digital Light Processing
DoD	Drop on Demand
DW	Direct-Writing
EHD	Elektrohydrodynamisch
FDM	Fused Deposition Modelling
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
ADC	Analog Digital Converter
CI	Conductive Ink

Abkürzung	Beschreibung
FEAM	Fiber Encapsulation Additive Manufacturing
FEM	Finite Elemente Methode
FFF	Fused Filament Fabrication
FVK	Faserverbundkunststoff
HF	High Frequency
IPL	Intense Pulse Light
IR	Infrarot
MEX	Material Extrusion
MJ	Material Jetting
MOD	Metal-Organic Decomposition
MSV	Mehrschichtverbund
NP	Nanopartikel
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PEN	Polyethylenaphthalat
PET	Polyethylenterephthalat
RFID	Radio-Frequency identification
SLA	Stereolithografie
TFT	Thin-Film-Transistor
UD	Unidirektional
UV	Ultraviolett
VPP	VAT Photopolymerisation

1 Einleitung

Die Additive Fertigung hat sich in den letzten Jahrzehnten rapide entwickelt. Heutzutage sind additive Fertigungsverfahren in verschiedenen Industrien etabliert [1]. Sie sind insbesondere für Bauteile mit komplexen Geometrien und zur Fertigung geringer Stückzahlen geeignet, finden aber auch in der Serienfertigung Anwendung [2].

Ein Teilbereich der Additiven Fertigung der in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat und in diesem Kontext auch als „new frontier“ bezeichnet wird, ist die Additive Fertigung von Elektronik (AME) [3]. Der Einsatz funktionaler Materialien mit elektrisch leitfähigen Eigenschaften ermöglicht die Herstellung elektronischer Anwendungen mittels Verfahren aus dem Bereich der Additiven Fertigung.

AME Verfahren bringen dabei die Vorteile der Additiven Fertigung, wie z.B. die hohe Designfreiheit und die Möglichkeit der Erzeugung komplexer Geometrien in den Bereich der Elektronikfertigung [4]. Insbesondere in Bezug auf die Herstellung von Bauteilen mit auf die Anwendung zugeschnittenen dreidimensionalen (3D) Geometrien bietet die Additive Fertigung von Elektronik Möglichkeiten, die traditionellen Verfahren wie beispielsweise der Leiterplattenfertigung verwehrt sind [5].

Neben stark gestiegenen Marktanteilen, ist auch die Anzahl der verfügbaren AME-Verfahren gewachsen [6]. AME-Verfahren die mehrere Materialien parallel verarbeiten können (auch als Multi-Material Druck bezeichnet). bieten die Möglichkeit innerhalb eines Prozesses eingebettete 3D-modellierte elektrische Strukturen zu realisieren.

Bei dem kommerziell etablierten Verfahren der Firma NanoDimension (System: Dragonfly IV) zur Erzeugung oben beschriebener 3D-Elektronik wird eine leitende Tinte bestehend aus Silbernanopartikeln sowie eine nicht leitende Tinte, bestehend aus durch UV-Strahlung aushärtbarem Photopolymer parallel mittels Material-Jetting verarbeitet. Das ermöglicht die Herstellung eingebetteter elektrischer Strukturen wie z.B. Leiterbahnen, Widerständen, Spulen und Kondensatoren. Bei mechanischen Prüfungen von Proben, die mittels oben genanntem Verfahren erzeugt wurden zeigte

sich ein deutlich erhöhtes Elastizitätsmodul des leitfähigen Materials, im Vergleich zum Elastizitätsmodul des Photopolymers. Es stellt sich folglich die Frage wie im beschriebenen Verfahren hergestellte Bauteile berechnen werden können. Im Bereich der Faserverbundkunststoffe (FVK) existieren etablierte Berechnungsmodelle, die den Sachverhalt eines Materialverbunds aus hochsteifem Fasern umgeben von einem Matrixmaterial geringerer Steifigkeit beschreiben. Die Untersuchung des mechanischen Werkstoffverhaltens des oben beschriebenen Verfahrens ist Gegenstand aktueller Forschung. Die Möglichkeit der präzisen Modellierung der mechanischen Materialeigenschaften des Verbundes ist insbesondere in Hinblick auf die möglichen Endanwendungen interessant. Anders als bei klassischen Elektronikanwendungen kann den integrierten Leitungen eine hybride Rolle zukommen, sowohl als Element der Trägerstruktur, als auch als funktionelles Element. Bei ausreichendem Kenntnisstand zu den Materialeigenschaften könnten elektrische Anwendungen mit maßgeschneiderten mechanischen und elektrischen Eigenschaften sowie einer optimierten Geometrie gefertigt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Übertragbarkeit von Materialmodellen aus dem Bereich der FVK auf den Bereich der Additiven Fertigung von Elektronik mittels dem beschriebenen Material-Jetting Verfahren. Hierfür werden im Rahmen dieser Arbeit ausgewählte Modelle auf ihre Anwendbarkeit bewertet. Ein Versuchsprogramm zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Materialmodelle wird durchgeführt. Im Rahmen des Versuchsprogramms werden Probekörper entwickelt und in oben beschriebenem Verfahren gefertigt. Anschließend werden die Proben mechanischen Prüfungen unterzogen. Die daraus hervorgehenden Werkstoffdaten werden in die Materialmodelle implementiert. Zudem werden numerische Berechnungsmodelle erstellt und ebenfalls auf ihre Anwendbarkeit untersucht.

2 Stand der Technik

Im Folgenden wird ein Überblick des Stands der Wissenschaft und Technik bezüglich der Additiven Fertigung von Elektronik (AME) gegeben. Dazu wird zunächst eine Einordnung der AME in den Bereich der Elektronikfertigung vorgenommen. Anschließend wird näher auf im Bereich der AME eingesetzten Verfahren, deren Einteilung sowie die zugrunde liegende Terminologie eingegangen. Zudem werden Anwendungen und Materialien im Kontext der AME erörtert.

Daraufhin wird auf die Grundlagen der Berechnung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen eingegangen. Hierfür werden zunächst die zugrunde liegenden mikromechanischen Modelle unidirektional (UD) verstärkter Einzelschichten erklärt. Im Anschluss wird auf die Klassische Laminattheorie eingegangen.

2.1 Additive Fertigung von Elektronik

2.1.1 Konventionelle Elektronikfertigung

Der Großteil elektrischer Komponenten und Schaltkreise wird mittels konventioneller Fertigungsverfahren hergestellt [5]. Diese Verfahren sind hochkomplex und beinhalten eine Reihe subtraktiver und additiver Prozesse. Sie werden deshalb in der Literatur auch als „Mixed Subtractive-Additive Processes“ bezeichnet [7]. Beispiele hierfür sind neben der Fotolithografie, nasschemische und trockene Ätzverfahren.

Bauelemente in der Elektronik

Elektrische Bauelemente bilden die wesentlichen Bestandteile einer elektrischen Schaltung. Sie lassen sich physisch nicht weiter aufteilen ohne Verlust ihrer spezifischen Funktion [8].

Basierend auf Funktion und Aufbau lässt sich folgende Unterteilung elektrischer Bauelemente treffen [9]:

- Passive Bauelemente
- Aktive Bauelemente
- Integrierte Schaltungen
- Leiterplatten
- Weitere Komponenten (z.B. Sensoren, Antennen)

Passive elektrische Bauelemente

Zu den passiven elektrischen Bauelementen der Elektronik zählen beispielsweise Widerstände, Kondensatoren sowie Spulen. Sie unterscheiden sich von den aktiven Bauelementen dadurch, dass sie nicht in der Lage sind eine Verstärkung innerhalb der Schaltung hervorzurufen [10].

Aktive Bauelemente

Als aktive elektrische Bauelemente werden Komponenten einer elektrischen Schaltung bezeichnet, die Ströme und Spannungen richten, schalten sowie verstärken [9]. Für die Elektrotechnik sind insbesondere Transistoren und Dioden von großer Bedeutung.

Integrierte Schaltungen

Als integrierte Schaltungen bezeichnet man funktionsfähige elektrische Schaltungen die sich auf einem einzelnen Halbleiterkristall, auch Wafer genannt, befinden [11]. Diese Schaltungen enthalten eine Kombination verschiedener elektrischer Bauelemente. Eine besonders verbreitete Anwendung ist die Verbindung einer sehr hohen Anzahl an Transistoren auf einem Halbleiterelement zu sogenannten Mikrochips. Mikrochips mit einer sehr hohen Anzahl an Transistoren werden unter anderem als Computer-Prozessoren eingesetzt.

Leiterplatten

Eine der für die Elektrotechnik relevantesten Anwendungen konventioneller Herstellungsverfahren sind Leiterplatten (engl. „Printed Circuit Boards“, kurz PCBs). Die englische Namensgebung ist jedoch irreführend [5], da bei der Leiterplattenfertigung zur Aufbringung von funktionalem oder leitfähigem Material nicht auf Druckprozesse zurückgegriffen wird, sondern auf eine Reihe additiver und subtraktiver Prozesse. Die klassische Leiterplattenfertigung gehört nicht zum Bereich der gedruckten Elektronik [12].

Leiterplatten werden primär genutzt um elektrische Bauelemente mechanisch und elektrisch miteinander zu verbinden. Sie bestehen aus einem Trägermaterial, das mit Kupferfolie beschichtet wird. Der Industriestandard des Trägermaterials ist ein Laminat bestehend aus Glasgewebe und Epoxidharz. Dieses zeichnet sich neben seinen hervorragenden elektrischen Eigenschaften durch eine hohe Steifigkeit aus. Die elektrischen Bauelemente werden in der Regel mittels Lötens auf die Leiterplatte aufgebracht, wodurch sie sowohl mechanisch als auch elektrisch mit dieser verbunden werden. Ein großer Nachteil, der aus dem Fertigungsprozess von Leiterplatten folgt, ist die erzwungene flache Bauweise. Diese führt zu einer geringeren Freiheit bei der Platzierung elektrischer Bauelemente auf der Leiterplatte sowie einem erhöhten Platzbedarf der Gesamtkomponente [13,14].

2.1.2 Gedruckte Elektronik

Als gedruckte Elektronik (engl. „Printed Electronics“) auch organische Elektronik (engl. „Organic Electronics“) [15] werden elektrische Komponenten bezeichnet, bei deren Fertigungsprozess auf Drucktechnologie zurückgegriffen wird [16,17].

In der englischsprachigen Literatur werden für das Feld der organischen bzw. gedruckten Elektronik weitere Bezeichnungen wie z.B. „plastic electronics“, „polymer electronics“, „flexible electronics“, oder „thin film electronics“ verwendet. Im weiteren Sinne beschreiben diese Begriffe Elektronik, bei deren Herstellung auf Verfahren zurückgegriffen wird, die sich nicht dem konventionellen Ansatz zur Fertigung integrierter Schaltungen zuordnen lassen [18].

Neben digitalen Druckverfahren wie z.B. dem in Kapitel 2.1.3.2 näher beschriebenen Inkjet-Drucken werden auch auf konventioneller Drucktechnologie basierte Verfahren im Bereich der gedruckten Elektronik eingesetzt, wie z.B. der Tampondruck [19].

Contact Printing und Non-Contact Printing Techniques

In der Literatur werden die Verfahren der gedruckten Elektronik, basierend auf der eingesetzten Drucktechnologie, in zwei Kategorien unterteilt. Es wird zwischen Kontakt-Druckverfahren (engl. “Contact Printing Techniques”) und kontaktlosen Druckverfahren (engl. “Non-Contact Printing Techniques”) unterschieden. [7,20–22]. Diese Unterscheidung ist vergleichbar mit der Einteilung von Drucktechnologien in konventionelle Druckverfahren mit fester Druckform und digitale Druckverfahren. Die

Kontaktlosen Druckverfahren lassen sich dabei den Verfahrenskategorien der DIN EN ISO/ASTM 52900 [23] zuordnen (siehe Kapitel 2.1.3.2).

Kontaktdruckverfahren

Unter Kontaktdruckverfahren versteht man Druckverfahren bei denen durch direkten Kontakt von mit Tinte benetzten Strukturen und dem Trägermaterial Tinte aufgebracht wird. Bei Kontaktdruckverfahren werden in der Regel zweidimensionale (2D) Substrate bedruckt. Zu den verbreitetsten Substratmaterialien gehören Polymerfolien (z.B. PET oder PEN). Diese zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität aus, woraus die Bezeichnung der flexiblen Elektronik resultiert.

Im allgemeinen drucktechnologischen Kontext gehören zu den Kontaktdruckverfahren folgende Hauptverfahren [19]:

- Flachdruck (auch Offsetdruck genannt)
- Hochdruck (z.B. Flexodruck)
- Tiefdruck (z.B. Gravurdruck)
- Durchdruck (auch Siebdruck genannt)

Im Kontext der gedruckten Elektronik sind insbesondere der Siebdruck (engl. „Screen Printing“), der Flexodruck (engl. „Flexographic Printing“), der Gravurdruck (engl. „Gravure Printing“) sowie der Offsetdruck (engl. „Offset Printing“, auch Offset Lithografie genannt) relevant. Diese Verfahren zeichnen sich durch ihre Eignung zur Massenproduktion gedruckter Elektronik aus und werden deswegen auch als Massendruckverfahren bezeichnet [24]. Dabei verbinden sie hohe Durchsätze mit geringen Stückkosten. Allerdings sind die Anschaffungskosten der benötigten Anlagen hoch und eine lange Druckvorbereitung notwendig. Der Siebdruck hebt sich durch die Möglichkeit der Realisierung vergleichsweise hoher Schichthöhen von bis zu 100 μm von den anderen Verfahren ab [20].

Anwendungen Kontaktdruckverfahren [17]

Für die in oben beschriebenen Kontakt-Druckverfahren lassen sich in der Literatur im Wesentlichen folgende fünf Anwendungsbereiche identifizieren [17,25]:

- OLED Displays
- organische / anorganische Photovoltaik
- integrierte Smarte Systeme (z.B. RFID)

- Elektronik und elektronische Bauelemente (z.B. Antennen, Leiterbahnen, Batterien)

Kontaktlose Druckverfahren

Kontaktlose Druckverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass beim Aufbringen der Tinte auf den Druckträger kein direkter Kontakt zwischen Druckkopf und Trägermaterial besteht. Es ist anders als bei den Kontaktdruckverfahren nicht notwendig eine Druckform zu erzeugen. Stattdessen wird die Tinte gezielt auf Basis digitaler Datensätze aufgebracht. Dadurch können die Verfahren flexibel eingesetzt werden. Sie eignen sich besonders gut zum Rapid Prototyping. Im Vergleich zu oben beschriebenen Kontaktdruckverfahren eignen sie jedoch schlecht für die Massenproduktion. Innerhalb des Bereichs der kontaktlosen Druckverfahren sind insbesondere der Inkjet-Druck sowie der Aerosoljet-Druck relevant. Beide lassen sich der Verfahrenskategorie des Material-Jetting zuordnen [2,26]. In Kapitel 2.1.3.2 wird genauer auf die oben genannten kontaktlosen Druckverfahren eingegangen.

Bei beiden Verfahrensgruppen (mit Kontakt und kontaktlos) wird Tinte mit speziellen elektrischen Eigenschaften auf ein Substrat aufgebracht. Sowohl für die Tinte als auch das Substrat stehen heutzutage eine Vielzahl von Materialien zur Auswahl. Dabei haben in den 2000er Jahren insbesondere Innovationen im Bereich der Nanomaterialien und die Einbindung dieser in Druckprozesse für große Fortschritte im Bereich der gedruckten Elektronik gesorgt [17]. Die Materialeigenschaften von den in der gedruckten Elektronik angewandten Werkstoffen unterscheiden sich oft stark von denen der konventionellen Elektronikfertigung. Beispielsweise durch die Möglichkeit der Verwendung flexibler Substratwerkstoffe grenzt sich die gedruckte Elektronik deutlich von konventionell gefertigter, auf Wafern basierender Elektronik ab [7,27]. Eine verbreitete Anwendung gedruckter flexibler Elektronik sind beispielsweise flexible radio-frequency-identification Transponder (RFID-Transponder) [28].

Die Anfänge der gedruckten Elektronik lassen sich auf die 1950er Jahre zurückdatieren. Heute wird dem Bereich ein großes Wachstumspotential zugesprochen [29]. Als Hauptziel der gedruckten Elektronik wird die Herstellung von aus funktioneller Sicht zur konventionellen Elektronikfertigung gleichwertiger Komponenten, bei geringeren Kosten, erhöhter Produktivität und weniger Komplexität in der Produktion genannt [7,30]. Neben monetären Anreizen wird zudem auf die im Vergleich zu konventionellen Verfahren deutlich erhöhte Umweltfreundlichkeit verwiesen. Die höhere

Umweltfreundlichkeit äußert sich durch eine reduzierte Menge an flüssigen und festen, prozessbedingten Abfallprodukten, wie sie bei z.B. bei Ätzverfahren in deutlich größeren Mengen anfallen [17]. Des Weiteren bietet die gedruckte Elektronik Vorteile gegenüber der konventionellen Elektronikherstellung in der Herstellung großflächiger Elektronikanwendungen. In der Literatur werden diese großflächigen gedruckten Elektronikanwendungen auch als „large area electronics“ bezeichnet [21]. Konkrete Anwendungen sind beispielsweise großflächige Drucksensoren oder Solarpaneele.

Nachteile der gedruckten Elektronik gegenüber der konventionellen Elektronikfertigung sind in erster Linie eine deutlich geringere Auflösung und Präzision. Dies wird insbesondere bei den erreichbaren Toleranzen in der Mikrochipherstellung deutlich. Während die mit konventionellen Elektronikfertigungsverfahren Mikrochips mit Transistoren im Größenbereich von Nanometern produziert werden, sind auf Drucktechnologie basierte Verfahren auf Größenordnungen im Mikrometerbereich begrenzt [9,25]. Des Weiteren sind Verfahren der gedruckten Elektronik auf einen zusätzlichen Prozessschritt zur Trocknung, Aushärtung oder Sinterung der verarbeiteten funktionalen Tinten (siehe Kapitel 2.1.3.3) angewiesen [5].

Einordnung der gedruckten Elektronik in den Bereich der AME

Innerhalb des Bereichs der gedruckten Elektronik werden verschiedene Unterteilungen basierend auf den Prozesseigenschaften der eingesetzten Fertigungsverfahren vorgenommen. Der Bereich der AME hat eine Schnittmenge mit dem Bereich der gedruckten Elektronik. Fertigungsverfahren der gedruckten Elektronik werden unterteilt in Verfahren, die einen ausschließlich auf additiven Prozessen basierten Ansatz verfolgen (engl. „fully additive approach“), auch als „fully additive“ bezeichnet, und Fertigungsverfahren, die sowohl additive als auch subtraktive Prozesse beinhalten [7,25,31–33]. Die rein additiven Verfahren der gedruckten Elektronik bilden gemeinsam mit weiteren zur Elektronikherstellung genutzten additiven Verfahren, die nicht wie oben beschriebene Verfahren auf Drucktechnologie, basieren den Bereich der additiven Fertigung von Elektronik, auf den im folgenden Kapitel genauer eingegangen wird [28][15]. Auf konventioneller Drucktechnologie basierte additive Verfahren fallen nicht unter die Definition additiver Fertigungsverfahren nach DIN EN ISO/ASTM 52900 [23], werden im Kontext der AME dennoch oft als additive Fertigungsverfahren bezeichnet. Wesentlicher Unterschied zu Additiven Fertigungsverfahren im engeren Sinne ist die Notwendigkeit der Erzeugung von Druckformen.

2.1.3 Additive Elektronikfertigung

Die AME wird in der englischsprachigen Literatur oft als „3D Printing of Electronics“ bezeichnet [3,34]. Der Begriff beschreibt ein interdisziplinäres Feld verschiedener Fachbereiche, wie der Materialwissenschaft, der additiven Fertigung und der Drucktechnik [35].

2.1.3.1 Ansätze zur Herstellung von 3D-Elektronik

Durch die Kombination additiver Fertigungsverfahren mit funktionalen Materialien mit speziellen elektrischen Eigenschaften ermöglicht die AME die Herstellung komplexer dreidimensionaler Objekte mit eingebetteter Elektronik in Form von passiven, aktiven Elektronikkomponenten oder Sensoren und Antennen. In der Literatur lassen sich im Wesentlichen folgende Ansätze zur Integration von Elektronik in additiv gefertigten 3D-Objekten identifizieren [36,37].

- Bedrucken von Oberflächen
- Freiform Multi-Material 3D-Drucken
- Hybride Ansätze

Bedrucken von Oberflächen

Ein Ansatz zur Herstellung von 3D Elektronik ist das additive Aufbringen von funktionalem, elektrisch leitfähigem Material auf die Oberfläche eines 3D-Bauteils. Das Bedrucken von nicht planen Oberflächen bringt zusätzliche Herausforderungen an das eingesetzte Fertigungssystem, wie beispielsweise die Positionierung des Druckkopfes mit sich [38]. Die Fertigung des zu bedruckenden Bauteils kann dabei auch getrennt vom Aufbringen des funktionalen Materials und durch ein nicht additives Verfahren erfolgen. Eine Anwendung hierfür ist beispielsweise die Integration additiv gefertigter Leitungen und Antennen in Helme [39].

Zudem werden additive Verfahren miteinander kombiniert, um vollständige elektrische Strukturen anzufertigen, was oft unter Verwendung eines einzelnen additiven Prozesses nicht möglich wäre [6]. Viele additive Fertigungssysteme sind limitiert aufgrund der fehlenden Möglichkeit eines Multimaterialdrucks oder zu geringer Materialdurchsätze. Eine Kombination verschiedener additiver bzw. konventioneller Verfahren erlaubt es Schwächen einzelner Verfahren auszugleichen. Das Bedrucken von additiv gefertigten

Bauteilen mit Direct-Writing (DW) Verfahren (siehe Kapitel 2.1.3.2) wird in der Literatur als „surface Direct Writing“ bezeichnet. Es müssen unterschiedliche Materialien sequentiell oder parallel verarbeitet werden können [37].

Freiform Multimaterial 3D-Druck

Zur Kategorie des Freiform Multimaterial 3D-Drucks zählen Verfahren, die in der Lage sind innerhalb eines Prozesses Strukturen zu erzeugen, die sich selbst stützen. Um Funktionalität in die Strukturen zu integrieren ist die Möglichkeit der Verarbeitung verschiedener Materialien notwendig. Im Bereich der AME finden hierfür in der Regel Kombinationen aus elektrisch leitfähigem und dielektrischem Material Anwendung. Das dielektrische Material dient dabei sowohl als Trägermaterial bzw. Substrat, wird jedoch auch zur Isolierung zwischen Komponenten eingesetzt. Der Freiform Multimaterial Ansatz hebt sich von den anderen Ansätzen zur Herstellung 3D Elektronik insbesondere dadurch ab, dass er die Fertigung funktionaler, eingebetteter elektrischer Strukturen ermöglicht, ohne auf vorhandene Strukturen oder Post-Processing Maßnahmen angewiesen zu sein [36].

Hybride Ansätze

Neben den oben beschriebenen Ansätzen zur Herstellung 3D Elektronik finden auch Kombinationen von additiven und nicht additiven Verfahren Anwendung. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

Ein kombinierter Ansatz zur Herstellung von 3D Elektronik ist die Integration konventioneller oberflächenmontierter Elektronikkomponenten auf einem additiv gefertigten Bauteil durch pick and place Verfahren [40][41].

Diese Methodik unterbricht den additiven Fertigungsprozess um Komponenten manuell oder automatisiert zu platzieren. Sie bietet die Möglichkeit der Einbindung kommerziell verfügbarer Elektronikkomponenten wie Mikrochips, Batterien oder Speicherelementen. Die elektrische Verbindung der platzierten Komponenten stellt eine große Herausforderung dieser Verfahrenskombination dar [37]. Einen Lösungsansatz zur Verbindung der platzierten Komponenten bietet die Extrusion von leitfähiger Paste mit Direct-Writing Verfahren in vorgefertigte Kanäle auf dem Bauteil [41]. Dabei ist jedoch im Rahmen eines Post-Processings ein Sintervorgang notwendig um die Paste auszuhärten, weswegen der Substratwerkstoff eine ausreichende

Temperaturbeständigkeit aufweisen muss. Zur Erzeugung des dielektrischen Substrats werden beispielsweise SLA- oder FFF-Verfahren (siehe Kapitel 2.1.3.2) eingesetzt [42].

Ein weiterer hybrider Ansatz zur Fertigung von 3D Elektronik ist die Kombination additiver Fertigungsverfahren mit Injektionsverfahren. Dabei werden Bauteile mittels konventioneller additiver Fertigungsverfahren aus dielektrischem Material angefertigt. In deren Geometrie sind hohle Kanäle integriert, welche im Anschluss mit leitfähigem Material gefüllt werden [43].

Eine Kombination mit einem Verfahren aus der konventionellen Elektronikfertigung stellt die Galvanisierung von additiv gefertigten Bauteilen dar [44].

2.1.3.2 Einteilungen von Herstellungsverfahren im Bereich der AME

Im Bereich der additiven Fertigung von Elektronik stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die sich teils stark in ihren Anwendungen und ihren Prozessgrenzen unterscheiden. Neben Verfahren mit vergleichsweise hoher Auflösung wie dem Inkjet Druck zählen auch Druckverfahren wie Fused Filament Fabrication (FFF) zum Bereich der AME. Während mit erster Verfahrensgruppe komplexe elektronische Bauelemente wie TFT-Transistoren gefertigt werden können [16,45] ist letzteres stark in seiner Auflösung beschränkt und eignet sich nur für eine begrenzte Auswahl von Anwendungen wie z.B. dem Druck von elektrischen Leitungen [46].

Auf die relevantesten in der Literatur vorgenommenen Einteilungen der Verfahren und die zugrundeliegende Terminologie wird im Folgenden eingegangen.

Klassifizierung 3D Druck Verfahren nach DIN EN ISO/ASTM 52900

Als internationaler Standard zur Terminologie im Bereich der Additiven Fertigung und zur Unterteilung additiver Fertigungsverfahren in Kategorien gilt die DIN EN ISO/ASTM 52900 [23].

Sie definiert die Additive Fertigung als einen Prozess der Objekte, im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungsverfahren, schichtweise, auf Basis von 3D Modelldaten, durch das Verbinden von Materialien aufbaut [23]. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden für die Additive Fertigung häufig die Begriffe 3D-Druck oder im englischen 3D-Printing verwendet.

Nach DIN EN ISO/ASTM 52900 [23] werden additive Fertigungsverfahren wie folgt in sieben Kategorien unterteilt:

- VAT Photopolymerisation
- Material Jetting
- Material Extrusion
- Binder Jetting
- Powder Bed Fusion
- Directed Energy Deposition
- Sheet Lamination

Im Folgenden wird genauer auf die im Bereich der AME relevanten Verfahrenskategorien und deren Anwendung im Bereich der additiv gefertigten Elektronik eingegangen.

VAT Photopolymerisation

VAT Photopolymerisation (VPP) ist nach DIN EN ISO/ASTM 52900 [23] als Prozess definiert, bei dem flüssiges Photopolymer in einem Bad selektiv durch lichtaktivierte Polymerisation ausgehärtet wird [23]. VPP Verfahren zeichnen sich durch ihre hohe Auflösung und Präzision aus sowie eine gute Oberflächenqualität aus [47].

Heutzutage existieren verschiedene Varianten dieses Prozesses, welche sich vorwiegend in Bezug auf die verwendete Strahlenquelle oder den Beschichtungsmechanismus unterscheiden. Die älteste Prozessvariante ist die von Charles Hull in den 80er Jahren entwickelte Stereolithografie (SLA). Bei dieser wird ein Laser verwendet, um das Photopolymer auszuhärten. Dazu fährt dieser die auszuhärtende Schicht in Bahnen ab.

Ein weiteres laserbasiertes SLA Verfahren ist die sogenannte Zwei-Photonen Lithografie. Dieses Verfahren zeichnet sich insbesondere durch eine extrem hohe Auflösung aus. Die Aushärtung des Photopolymers wird hier mittels zwei Pulslasern realisiert, die für einen kurzen Zeitbereich einen hohen Photonenstrom innerhalb eines räumlich kleinen Volumens erzeugen. Die Namensgebung beruht auf dem Grundprinzip des Verfahrens. Die Photonen weisen eine relativ hohe Wellenlänge auf, wodurch das Photopolymer mindestens zwei Photonen zeitgleich absorbieren muss um auszuhärten [48].

Einen alternativen Ansatz zur laserbasierten Aushärtung einer Schicht bietet das Digital Light Processing (DLP). Anstelle eines Lasers wird beim DLP ein digitaler Projektor eingesetzt, der die gesamte auszuhärtende Fläche einer Schicht gleichzeitig bestrahlt. Die flächige Belichtung ermöglicht eine erhebliche Zeitersparnis bei der Aushärtung der Schichten, im Vergleich zu auf Laser basierten Belichtungsverfahren [2]. Ein DLP Verfahren, das sich durch eine besonders schnelle Druckgeschwindigkeit auszeichnet, ist das sogenannte CLIP („Continuous Liquid Interface Production“) Verfahren, entwickelt von der Firma Carbon Inc. [26].

Von Verfahren des Material Jettings die ebenfalls Photopolymere verarbeiten (siehe Inkjet-Druck) unterscheiden sich VPP Verfahren durch vergleichsweise geringere Anforderungen an das verarbeitete Material. Für erstere Verfahren müssen maßgeschneiderte Materialkennwerte bzgl. Oberflächenspannung und Viskosität vorliegen um die Druckbarkeit zu gewährleisten [49].

Anwendung von VPP Verfahren in der AME

Durch die Verwendung mehrerer Bäder ist ein Multi-Material Druck möglich. Innerhalb einer Schicht können so auf Kosten von Druckgeschwindigkeit funktional unterschiedliche (auch elektrisch leitfähige) Materialien gedruckt werden [50]. Dies ermöglicht die Erzeugung eingebetteter leitfähiger Strukturen innerhalb eines Prozesses [51]. Dieser Ansatz ist dem in Kapitel 2.1.3.1 beschriebenen Freiform Multimaterial 3D-Druck zuzuordnen.

VPP Verfahren werden zudem im Rahmen hybrider Methoden eingesetzt (siehe Kapitel 2.1.3.1). Dabei werden beispielsweise dielektrische Strukturen mit hohlen Kanälen gefertigt, welche anschließend in einem separaten Prozess mit funktionalem Material gefüllt werden [43].

Ein weiterer Ansatz ist das Aufbringen von leitfähigem Material mittels DW-Verfahren auf VPP Bauteile [52].

Material Jetting [2,26]

Material Jetting (MJ) wird nach DIN EN ISO/ASTM 52900 [23] als Prozess definiert, bei dem Tröpfchen eines Baumaterials selektiv aufgetragen werden [23].

Der Druckvorgang ähnelt dem Vorgang von konventionellen 2D Tintenstrahldrucken. Mittels eines Druckkopfs wird Material über Düsen auf eine Bauplattform oder ein

Substrat aufgebracht. Die Tinte wird von einem Reservoir zum Druckkopf transportiert. Durch die Verwendung mehrerer Druckköpfe lässt sich ein Multi-Material Druck realisieren [53]. Es können Materialien mit unterschiedlichen funktionalen und mechanischen Eigenschaften parallel gedruckt werden. Im Bereich der AME mittels MJ finden dabei insbesondere elektrisch leitfähige Metall-Nanopartikel Tinten Anwendung. Wichtig für die Tröpfchenbildung und damit auch die Druckbarkeit der Tinte ist eine niedrige Viskosität der Werkstoffe. Dies wird durch Temperaturregelung, die Verwendung von Lösungsmitteln oder niederviskosen Komponenten im Fluid realisiert [26].

Auf den Druckvorgang einer Schicht folgt meist ein Aushärtungsvorgang (siehe Kapitel 2.1.3.3).

Bekannte MJ Verfahren sind der Inkjet-Druck und der Aerosoljet-Druck. Die Begriffe Multi-Jet und Poly-Jet sind Herstellerbezeichnungen für MJ-Verfahren der Firmen 3D Systems bzw. Stratasys.

Durch die Möglichkeit der parallelen Verarbeitung leitfähiger und nicht leitfähiger Materialien eignet sich MJ zur Herstellung komplexer, eingebetteter leitfähiger Strukturen [54,55].

Die Herstellung aktiver sowie passiver elektronischer Komponenten ist Forschungsgegenstand [7,20]. Konkrete Anwendungen sind beispielsweise Dünnschichttransistoren [45] und Kondensator [56].

Nach Lu et al. [3] sind MJ Verfahren am erfolgreichsten im Multi-Material Druck von AME Anwendungen. Als Hersteller kommerzieller, auf MJ-basierten Drucksystemen hat sich im letzten Jahrzehnt die Firma NanoDimensions mit ihrer DragonFly Produktserie etabliert.

Material Extrusion

Material Extrusion (MEX) ist nach DIN EN ISO/ASTM 52900 [23] als Prozess definiert, bei dem Material selektiv durch eine Düse oder Öffnung abgegeben wird [23]. MEX Verfahren sind in der Industrie, Forschung und auch im privaten Bereich weit verbreitet. Die bekannteste Prozessvariante ist das sogenannte Fused Filament Fabrication (FFF). Dieser Ansatz ist auch unter dem Markennamen Fused Deposition Modelling (FDM) der Firma Stratasys bekannt.

MEX-Systeme lassen sich im Wesentlichen durch die folgenden Prozesselemente definieren [26]:

- Laden des Materials
- Verflüssigung des Materials
- Druckausübung auf das Material, um es aus der Düse zu bewegen
- Extrusion
- Plotten eines festgelegten Pfades
- Verbindung des Materials mit sich selbst oder einem anderen Material
- Einbindung von Stützstrukturen um komplexe Geometrien zu ermöglichen

Aus der Kategorie der MEX-Prozesse finden neben FFF Verfahren auch flussbasierte Direct Writing Verfahren Anwendung im Bereich der AME.

Fused Filament Fabrication (FFF)

Im Bereich der AME sind FFF Verfahren besonders verbreitet. Sie zeichnen sich durch geringe Anschaffungskosten und eine große Auswahl an verfügbaren Systemen und Materialien aus. Zudem sind FFF-Systeme im Vergleich zu Systemen anderer Verfahrenskategorien einfach in der Bedienung. Das Basismaterial liegt meist in Form eines thermoplastischen Filaments mit rundem Querschnitt vor. Das Filament wird im sogenannten „Feeder“ mittels Schrittmotoren in Richtung Düsen geschoben. Vor der Düsenöffnung wird das Material thermisch geschmolzen. Der Druck in der Düse entsteht durch das Nachschieben von Filament. Die Auflösung des gedruckten Bauteils hängt maßgeblich vom Düsendurchmesser ab.

Zur Erzeugung der Schichtgeometrie werden vom Druckkopf Bahnen abgefahren. Die Schichtdaten werden mithilfe einer sogenannten Slicing-Software aus einem 3D-Modell generiert und in Form von Maschinencode auf das System gespielt. Das verbreitetste Format hierfür ist der G-Code [57], welcher ursprünglich für konventionelle CNC-Maschinen entwickelt wurde.

Ein Multimaterialdruck kann durch die Nutzung mehrerer Druckköpfe oder einen Wechsel des Materials während des Prozesses realisiert werden.

Die verarbeiteten Materialien basieren in der Regel auf thermoplastischen Kunststoffen. Zu den verbreitetsten verarbeiteten Kunststoffen zählen PLA und ABS. Viele Filamente lassen sich bei Raumtemperatur verarbeiten.

Um den Druck von Materialien mit elektrischer Leitfähigkeit zu ermöglichen wurden Verbundmaterialien entwickelt die aus einer Kombination von leitfähigem Material wie z.B. Metallpartikeln, Kohlenstoff Nanoröhren [58] oder Graphen und einem, das leitfähige Material umgebende, thermoplastischem Material bestehen. Eine vergleichsweise hervorragende Leitfähigkeit von $0,006 \Omega\text{cm}$ konnte mit einem auf Kupfer basierendem Filament erreicht werden [36]. Dieses ist kommerziell verfügbar und wird unter dem Markennamen Electrifi von der Firma MULTI3D geführt.

Ein Nachteil von FFF Verfahren in der Herstellung von elektrisch leitfähigen Strukturen ist neben der schlechten Oberflächenqualität der Bauteile die geringe Auflösung des Verfahrens. Letztere wird maßgeblich durch den Durchmesser der Düse bestimmt und liegt im Bereich von $\pm 0,1 \text{ mm}$ [59].

Fiber Encapsulation

Ein weiterer auf FFF basierender Ansatz der im Bereich der AME Anwendung findet ist das Fiber Encapsulation Additive Manufacturing (FEAM) [60]. Bei diesem Verfahren werden simultan Fasern platziert sowie geschmolzenes thermoplastisches Material analog zum FFF extrudiert. Die Fasern werden durch geschickte Positionierung in das geschmolzene thermoplastische Matrixmaterial eingebettet. Zu den eingesetzten Fasermaterialien gehören neben Kohlenstofffasern auch Kupferdrähte. Der große Vorteil des Verfahrens liegt in den hervorragenden elektrischen Eigenschaften der eingebetteten Fasern im Vergleich zu leitfähigen Tinten, Pasten oder Polymeren. Herausforderungen für das Verfahren stellen insbesondere die elektrische Verbindung von platzierten Fasersträngen innerhalb einer Schicht sowie zwischen Schichten in z-Richtung dar.

Direct Write Technologien

Der Begriff Direct Write (DW) lässt sich als Sammelbegriff für additive und verwandte Ansätze zur Herstellung von Komponenten mit einem sehr kleinen Formfaktor beschreiben [26]. Es können zwei- oder dreidimensionale Strukturen auf flachen oder komplexen Oberflächen gefertigt werden. Zur Herstellung werden dabei keine Werkzeuge wie Formen oder Masken verwendet [61]. Zu DW-Verfahren zählen in der Literatur sowohl additive als auch subtraktive Prozesse. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich auf rein additive Verfahren näher eingegangen. Die durch DW-Verfahren hergestellten Anwendungen zeichnen sich durch einen funktionalen Charakter aus. Für

den Bereich der AME sind DW-Technologien von großer Bedeutung. Zu den wichtigsten Anwendungsfeldern von DW zählen die Herstellung von Sensoren sowie Antennen. In der Literatur werden im Kontext des DW auch die Begriffe „Digital Writing“ oder „Digital Printing“ verwendet. Um DW-Verfahren von herkömmlichen Additiven Fertigungsverfahren abzugrenzen werden in der Literatur insbesondere folgende Charakteristika hervorgehoben [62]:

- Die Auflösungen von DW-Verfahren sind sehr hoch und liegen im Bereich von Micrometern bis Millimeter.
- Zu den verarbeiteten Materialien zählen Metalle, Keramiken und Polymere, elektrisch und optisch funktionale Materialien sowie biologische Materialien wie lebende Zellen
- Das Substrat ist ein wesentlicher Teil des Endprodukts

Neben einer Unterteilung in additive und subtraktive Prozesse lassen sich DW-Verfahren auf Basis des zugrundeliegenden Mechanismus der Materialauftragung unterteilen.

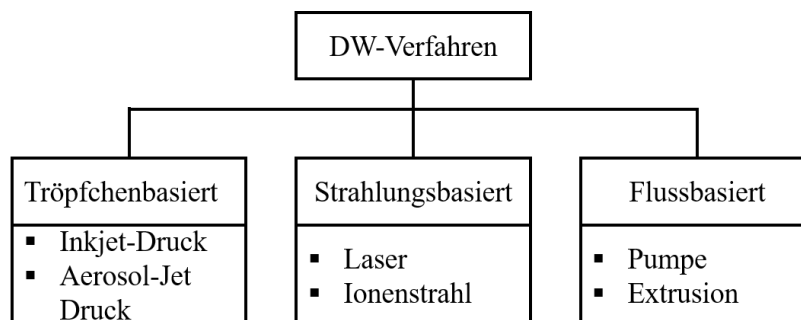


Abb. 2-1: Kategorien von DW-Verfahren

Abb. 2-1 zeigt die Einteilung der im Bereich der AME relevanten DW-Verfahren in tröpfchen-, strahlungs- und flussbasierte Fertigungsverfahren.

Inkjet-Druckverfahren

Bei Inkjet-Druckverfahren (z.B. Multi-Jet-Modeling) werden über einen oder mehrere Druckköpfe Tintentropfen präzise durch Düsen abgesetzt. Um eine höhere Produktivität der Verfahren zu erreichen, werden Druckköpfe mit einer drei- bis vierstelligen Anzahl diskreter Düsen ausgestattet [55]. Zur Bestimmung ob an einer Position in der Schicht Tinte extrahiert werden muss, dienen Pixelinformationen von Bilddateien. Die Düsen sind über Leitungen mit einem Tinten-Reservoir verbunden. Die verwendeten Tinten

haben für elektronische Anwendungen meist dielektrische oder elektrisch leitfähige Materialeigenschaften [28]. Die verarbeitbaren Tinten müssen eine niedrige Viskosität in Kombination mit einer passenden Oberflächenspannung aufweisen um druckbar zu sein [63]. Ein Multi-Material Druck ermöglicht den Druck eingebetteter elektrischer Strukturen.

Im Vergleich zu in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Kontakt-Druckverfahren weisen Inkjet-Druckverfahren einen geringeren Materialdurchsatz auf. Gegenüber dem unten beschriebenen Aerosol-Druck erreichen Inkjet-Drucker durch den Einsatz mehrerer Düsen höhere Materialdurchsätze. Neu entwickelte Inkjet-Druckverfahren ermöglichen das Bedrucken von gewölbten Oberflächen [38].

Tröpfchenextraktion

Inkjet-Druckverfahren lassen sich, auf Basis des Grundprinzips nach dem die Tinte extrahiert wird, allgemein in zwei Klassen unterteilen: „Drop-on-Demand“ (DoD) und „Continuous Inkjet“ (CIJ), auch „Continuous Stream“ (CS) genannt. Letztere extrahieren konstant Tinte aus ihren Düsen, unabhängig von der zugrundeliegenden Pixelinformation. Um die Tinte dennoch gezielt nur auf die gewünschten Stellen in der Schicht aufzubringen, werden Tintentropfen zunächst elektrisch geladen. Tropfen die nicht gedruckt werden sollen, werden über ein elektromagnetisches Feld in eine Wanne abgelenkt. Der Nachteil dabei ist die Erzeugung von Ausschussmaterial. Als Vorteil ermöglicht der CS Ansatz einen höheren Durchsatz.

Bei DoD Tröpfchenextraktion werden nur dann Tintentropfen aus den Düsen extrahiert, wenn auch die zugrundeliegende Pixelinformation dazu vorliegt. Um individuelle Tintentropfen zu formen und diese gezielt aus der Düse zu extrahieren, werden zeitlich abgestimmte Druckimpulse innerhalb der Düse ausgelöst. Zur Erzeugung der Druckimpulse werden thermische, elektrostatische, piezoelektrische oder akustische Aktuatoren eingesetzt [26]. Im Bereich der DoD Inkjet Systeme finden vorwiegend thermische Aktuatoren (auch „Bubble Jet“ genannte) und piezoelektrische Aktuatoren Anwendung. Durch die gezielte Materialextraktion sparen Inkjet Systeme mit DoD-Technik Material ein [20].

Einen alternativen Ansatz der Tröpfchenbildung verfolgen sogenannte Elektrohydrodynamische (EHD) Inkjet-Drucker [27]. Bei diesen Systemen werden anstelle der oben beschriebenen Aktuatoren elektromagnetische Felder genutzt, um das Fluid aus der Düse zu bewegen. Dies ermöglicht eine deutlich erhöhte Auflösung im

Nanometer Bereich. Zudem ist der Ansatz mit hochviskosen Tinten kompatibel und kann großflächige Substrate bedrucken.

Aerosol-Jet Druckverfahren

Beim Aerosol-Jet Verfahren wird Tinte pneumatisch oder mittels Ultraschall zu feinen Tröpfchen zerstäubt und daraufhin mithilfe eines Trägergases (z.B. Stickstoff) zur Düse des Druckkopfs transportiert. Nach einer Trennung des Trägergases vom Fluid zur Dichtereduzierung der Tröpfchen wird die Tinte mit hoher Geschwindigkeit als Aerosol auf das Substrat aufgebracht. Typische Abstände der Düse vom Substrat sind dabei 1-5 mm. Das Verfahren ermöglicht das Bedrucken von sowohl ebenen, als auch unebenen Oberflächen [2,7,20,26,64].

Für Aerosol-Jet Druckverfahren besteht eine große Auswahl an verarbeitbaren Materialien. Dazu zählen Metalle und dielektrische Materialien. Auch Graphen und Nanotubes können verarbeitet werden. Diese Vielfalt an verarbeitbaren Materialien, in Verbindung mit der hohen Auflösung und Präzision des Druckverfahrens ermöglicht die Herstellung von Endanwendungen wie z.B. Kondensatoren, Sensoren, Antennen und flexible TFTs [20,65]. Ein Multi-Material Druck ist wie auch beim Inkjet-Druck möglich.

Eine Herausforderung für Aerosol-Jet Verfahren stellen die maximal realisierbaren Schichthöhen dar. Da diese sehr dünn (0,1-2 μm [20]) sind ist das Verfahren problematisch für Anwendungen mit hohen Stromstärken oder HF Applikationen [6]. Allgemein sind Aerosol-Jet Verfahren nicht geeignet zur Anfertigung von elektrischen Strukturen mit hohem Volumen.

Bei auf Strahlung basierten DW-Verfahren wird zwischen Laser- und Ionenstrahlbasierten Verfahren unterschieden [66]. Zu den laserbasierten DW Verfahren gehören neben dem zwei Photonen SLA Verfahren das Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD) Verfahren sowie Laser Induced Forward Transfer (LIFT) Verfahren. Während ersteres nach DIN EN ISO/ASTM 52900 der Verfahrenskategorie VPP zugeordnet werden gehören letztere der DED Kategorie an.

Flussbasierte DW-Verfahren können der MEX-Kategorie zugeordnet werden, unterscheiden sich jedoch von FFF dadurch, dass das kein Erhitzen des Materials zur Extrusion notwendig ist [62]. Sie werden im Bereich der AME in Kombination mit anderen additiven Verfahren verwendet. Es wird zwischen einer Pumpenbasierten und

einer „Spritzenbasierten“ (engl. „Syringe“) Extrusionsmethode unterschieden. Zu den verbreitetsten pumpenbasierten Systemen gehört das, im Jahre 2002 von der DARPA entwickelte nScript System.

2.1.3.3 Tintenmaterialien

Der bei MJ Verfahren eingesetzte Werkstoff wird als Tinte (engl. „ink“) bezeichnet. Die im Bereich der AME eingesetzten Tinten lassen sich in die folgenden Kategorien unterteilen [35].

- Metallische Nanopartikel Tinten
- MOD-Tinten (engl. Metallic Organic Decomposition Inks)
- Leitfähige Polymere
- Dielektrische Tinten
- Halbleiter Tinten
- Kohlenstoff Nanoröhren Tinten
- Graphen Tinten

Metallische Tinten sind aufgrund ihrer, im Vergleich zu den anderen verfügbaren Tinten, hohen Leitfähigkeit für den Bereich der AME besonders relevant.

Metallische Nanopartikel Tinten

Metallische Nanopartikel Tinten basieren auf Metallen, die in Form von Nanopartikeln oder Nanodrähten, in einer Suspension mit einem flüssigen Medium vorliegen. Metallische Nanodrähte (engl. „metallic nanowires“) sind im Vergleich zu Nanopartikeln anspruchsvoller zu verarbeiten, da sie aufgrund ihrer Seitenverhältnisse leichter die Düsen des Druckkopfes verstopfen. Die Größe der Nanopartikel liegt im Bereich von 1-100 nm. Sie sind von einem organischen Additiv (engl. „Protective Agent“) umhüllt, um Agglomeration zu verhindern. Dies erschwert jedoch auch den Fluss von Ladungsträgern. Ein Sinterprozess ist notwendig, um das flüssige Medium und die Umhüllung zu entfernen und eine Koaleszenz der Metallpartikel zu ermöglichen. Der Sintervorgang ist entscheidend für die Leitfähigkeit metallischer Materialien, da er deren Mikrostruktur beeinflusst [20,67]. Je kleiner der Durchmesser der Nanopartikel ist desto geringer ist die erforderliche Sintertemperatur [68]. Der spezifische Widerstand von massivem Silber bei Raumtemperatur liegt bei ca.

1,6 $\mu\Omega\text{cm}$. Die niedrigsten erreichten spezifischen Widerstände mit Silber-Nanopartikel Tinte gedruckter Leiterbahnen liegen in etwa bei 3 $\mu\Omega\text{cm}$ [35].

Messungen des Widerstands leitfähiger Strukturen werden typischerweise durch Vierpunktmessung durchgeführt [63].

Sintern von metallischen Nanopartikelint

Der konventionelle Ansatz zur Sinterung von metallischen Nanopartikelint ist Erhitzen.

Tab. 2-1 zeigt eine Auflistung der verbreitetsten Sintermethoden für metallische Nanopartikel.

Tab. 2-1: Sintermethoden und deren Energiequellen und Sinterbereich

Sinter-Methode	Energiequelle	Sinterbereich
IR-Sintering	IR-Licht	Druckbett
IPS-Sintering	Sichtbares Licht	Druckbett
Laser-Sintering	Laser	lokal
Electrical-Sintering	Gleich-/Wechselstrom	lokal
Microwave-Sintering	Mikrowellenstrahlung	lokal

Die populärsten Ansätze sind photonische Sinter-Methoden [69]. Bei diesen erfolgt das Sintern schichtweise. Die Wellenlängen liegen dabei zwischen dem ultravioletten (UV) und infrarot (IR) Bereich [70]. Zu den photonischen Sinter-Methoden zählen IR Sintering, Intense Pulse Light (IPL) Sintering und Laser Sintering.

Beim IR Sintering wird das gesamte Bauteil mit Infrarotstrahlung erhitzt. Nachteilig ist hierbei die gleichzeitige Erhitzung des Substratwerkstoffs. Diese hängt neben der Belichtungszeit auch vom Absorptionsverhalten des Substrats und somit dem Wellenlängenbereich der Strahlung ab [71].

Metallische Nanopartikel absorbieren sichtbares Licht sehr gut. Bei einem Substratwerkstoff mit geringer Absorption sichtbaren Lichts kann die Energie selektiv auf die leitfähige Struktur gerichtet werden. Ein vielversprechender Ansatz ist das IPL Sintern. Bei diesem wird das Bauteil mehreren kurzen Lichtimpulsen im sichtbaren Bereich ausgesetzt, die das Bauteil erwärmen. Durch die Pausen zwischen den

Lichtimpulsen wird einem Überhitzen des Substratwerkstoffs entgegengewirkt. Zur Belichtung finden beispielsweise Xenon Lampen Anwendung [72].

Laser Sintern bietet den Vorteil einer gezielten Belichtung der Nanopartikelntinte, wodurch das Substrat einer geringeren Temperatur ausgesetzt ist. Der Bereich des selektiven Sinterns mit niedrigen Temperaturen ist Gegenstand aktueller Forschung. Attraktiv ist dabei die Möglichkeit der Verwendung von temperatursensitiveren Substratwerkstoffen [35].

Beim „Electrical Sintering“ wird eine Spannung an das nicht versinterte Material angelegt. Dieses weist aufgrund der fehlenden Versinterung einen hohen Widerstandswert auf, was zu einer Temperaturerhöhung und schließlich zum Sintern führt.

Auf dem Markt sind neben Silber auch Gold und Kupfer als Basismaterial der Nanopartikel verfügbar. Neben dem Preis und der Leitfähigkeit der Metalle spielen auch prozessbedingte Faktoren bei der Auswahl eine Rolle. Während Kupfer günstiger in der Anschaffung ist, neigt es zur Bildung von Kupferoxid, deshalb ist oft eine kontrollierte Atmosphäre notwendig. Silber Nanopartikelntinten gelten als am besten geeignet zur additiven Fertigung hoch leitfähiger elektrischer Strukturen. Ein wesentlicher Nachteil ist jedoch der hohe Preis [35].

Eine weitere Art metallischer Tinten sind MOD-Tinten (engl. „metal-organic decomposition inks“). Bei diesen liegt ein metallisches Salz in Kombination mit einem Lösungsmittel in Form einer chemischen Lösung vor. Im Vergleich zur Suspension mit metallischen Nanopartikeln liegt hier kein Risiko zur Agglomeration und somit auch kein Risiko verstopfter Düsen vor. Analog zu NP-Tinten ist ein Sintervorgang erforderlich.

2.2 Berechnung faserverstärkter Verbundwerkstoffe

Als Verbundwerkstoffe werden Kombinationen unterschiedlicher Materialien bezeichnet. Dabei wird das Ziel verfolgt die jeweils positiven Materialeigenschaften der verwendeten Werkstoffe zu vereinen [73]. Verbundwerkstoffe bestehen aus einer verstärkenden Phase, die von einer kontinuierlichen Matrix umgeben ist. Die verstärkende Phase kann dabei in verschiedener Form vorliegen, wie zum Beispiel in Form von Fasern, Platten oder Teilchen [74]. Zu den bekanntesten Verbundwerkstoffen zählen die FVK. Bei diesen werden Lang- oder Kurzfasern in einer Kunststoff Matrix eingebettet [75]. Die Fasern weisen hierbei eine deutlich höhere Steifigkeit als die Matrix auf.

Da bei FVK ein richtungsabhängiger (anisotroper) Werkstoffaufbau vorliegt, können diese nicht wie isotrope Werkstoffe berechnet werden.

Bei der mechanischen Betrachtung von Faserverbundwerkstoffen lässt sich zwischen einer mikromechanischen Betrachtungsebene und einer makromechanischen Betrachtungsebene differenzieren.

Die mikromechanische Betrachtung ermöglicht eine getrennte Berechnung von Faser und Matrix. Aus ihr lassen sich die Elastizitätseigenschaften des Faser-Matrix Verbunds ableiten.

Beim makromechanischen Ansatz wird der Verbund aus Faser und Matrix als homogen angenommen. Die kleinste Einheit einer makromechanischen Betrachtung ist die Einzelschicht. [76]

Im Folgenden wird zunächst auf die mikromechanische Betrachtung der unidirektionalen (UD) Einzelschicht langfaserverstärkter Kunststoffverbunde eingegangen. Anschließend wird gezeigt, wie die bei der mikromechanischen Betrachtung gewonnenen Kennwerte in makromechanische Berechnung überführt werden können.

2.2.1 Mikromechanik

Zur Betrachtung der Mikromechanik der UD-Schicht werden nach Schürmann [76] folgende idealisierte Annahmen getroffen:

- Faserquerschnitte sind konstant und Fasern parallel zueinander.
- Die Packung der Fasern ist regelmäßig.
- Die UD-Schicht wird als Kontinuum modelliert.
- Die Verformungen von Faser und Matrix sind klein und deren Materialverhalten linear elastisch

Faservolumengehalt

Aufgrund der sich stark unterscheidenden Materialeigenschaften von Faser und Matrix spielt deren Verhältnis innerhalb eines Bauteils eine entscheidende Rolle. Der volumetrische Anteil der Fasern in einem Faser-Matrix Verbund wird mit dem sogenannten Faservolumengehalt φ beschrieben. Das Gesamtvolumen des Verbunds V_{Verbund} bildet sich aus den Volumenanteilen von Faser V_f , Matrix V_m und einem dritten, hier aufgrund der Kontinuumsbedingung (siehe oben) vernachlässigten, Anteil für Fehlstellen wie z.B. Lufteinschlüssen.

$$\varphi = \frac{V_f}{V_{\text{Verbund}}} \quad (2-1)$$

Verstärkungswirkung

Ein Verstärkungswirkung liegt für einen Materialverbund vor, wenn für den Verstärkungswerkstoff und den diesen umgebenden Grundwerkstoff folgende Bedingungen gelten [77,78]:

- Die Festigkeit des Verstärkungsmaterials ist höher.
- Die Steifigkeit des Verstärkungsmaterials ist höher.
- Die Bruchdehnung des umgebenden Matrixmaterials ist höher.

Elastizitätsgesetz der UD-Einzelschicht

Zur Aufstellung des Elastizitätsgesetzes einer UD-Einzelschicht werden unter Annahme eines ebenen Spannungszustands vier Grund-Elastizitätsgrößen benötigt [76]. Diese sind der Längs-Elastizitätsmodul E_{\parallel} (parallel zur Faserreichtung), der Quer-

Elastizitätsmodul E_{\perp} (quer zur Faserrichtung), der Quer-Längs-Schubmodul $G_{\perp\parallel}$ sowie die Querkontraktionszahl $\nu_{\perp\parallel}$. Auf diese und deren formelmäßigen Zusammenhänge wird im Folgenden näher eingegangen.

Längs-Elastizitätsmodul E_{\parallel} einer UD-Einzelschicht

Der Längs-Elastizitätsmodul in einer UD-Schicht eines Faser-Matrix Verbundes lässt sich auf mikromechanischer Ebene durch die Parallelschaltung zweier linearer Federn darstellen [76,77]. Abb. 2-2 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

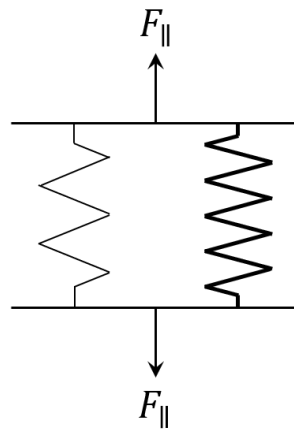


Abb. 2-2: Darstellung der Parallelschaltung zweier Federn

Aus dem Kräftegleichgewicht ergibt sich, dass eine äußere Kraft F_{\parallel} im Gleichgewicht mit den Kräften der Komponenten Faser F_f und Matrix F_m stehen muss. Es ergibt sich der formelmäßige Zusammenhang:

$$F_{\parallel} = F_f + F_m \quad (2-2)$$

Unter Einbeziehen der Querschnittsflächen von Gesamtverbund $A_{Verbund}$, Fasern A_f und Matrix A_m , mit $A_{Verbund} = A_f + A_m$, lautet das Kräftegleichgewicht:

$$\sigma_{\parallel} A_{Verbund} = \sigma_{faser} A_f + \sigma_m A_m \quad (2-3)$$

Aufgrund der Parallelschaltung von Fasern und Matrix ist die Längsdehnung von beiden Komponenten stets gleich hoch und es gilt:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_{faser} = \varepsilon_m \quad (2-4)$$

Dabei beschreibt Δl die Änderung der Länge aufgrund von Krafteinwirkung und l_0 die Anfangslänge.

Die Spannungen σ_{faser} und σ_m stehen über die Dehnungen ε_{faser} und ε_m in einem proportionalen Zusammenhang mit dem Elastizitätsmodul der Faser $E_{f\parallel}$ in Faserrichtung sowie dem Elastizitätsmodul der Matrix E_m . Wegen der als isotrop angenommenen Werkstoffeigenschaften der Matrix gilt $E_m = E_{m\parallel}$. Unter der Annahme einer gleichen Querkontraktionszahl von Faser und Matrix $\nu_f = \nu_m$ ergeben sich die Elastizitätsgesetze zu [76]:

$$\sigma_{faser} = E_{f\parallel} \cdot \varepsilon_{faser} \quad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad \sigma_{\parallel} = E_{\parallel} \cdot \varepsilon_{\parallel} \quad (2-5)$$

Setzt man die Elastizitätsgesetze für die Spannungen aus Gleichung (2-3) im Kräftegleichgewicht (Gleichung (2-2)) ein, unter Verwendung des Faservolumenanteils φ (siehe Gleichung (2-1)), ergibt sich der Elastizitätsmodul E_{\parallel} aus einer linearen Mischungsregel zu [79]:

$$E_{\parallel} = E_{f\parallel} \cdot \varphi + E_m \cdot (1 - \varphi) \quad (2-6)$$

Quer-Elastizitätsmodul E_{\perp} einer UD-Einzelschicht

Der Quer-Elastizitätsmodul eines Faser-Matrix Verbundes lässt sich anhand des sogenannten Scheibchenmodells beschreiben. Bei diesem wird ein quer zur Faserrichtung liegender infinitesimal dünner Teilbereich des Verbundes betrachtet. Dieser besteht aus einer in Serie liegenden Anordnung von Faser- und Matrixbereichen, welche mittels einzelner in Serie geschalteter Federn modelliert werden. Abb. 2-3 veranschaulicht dieses Modell.

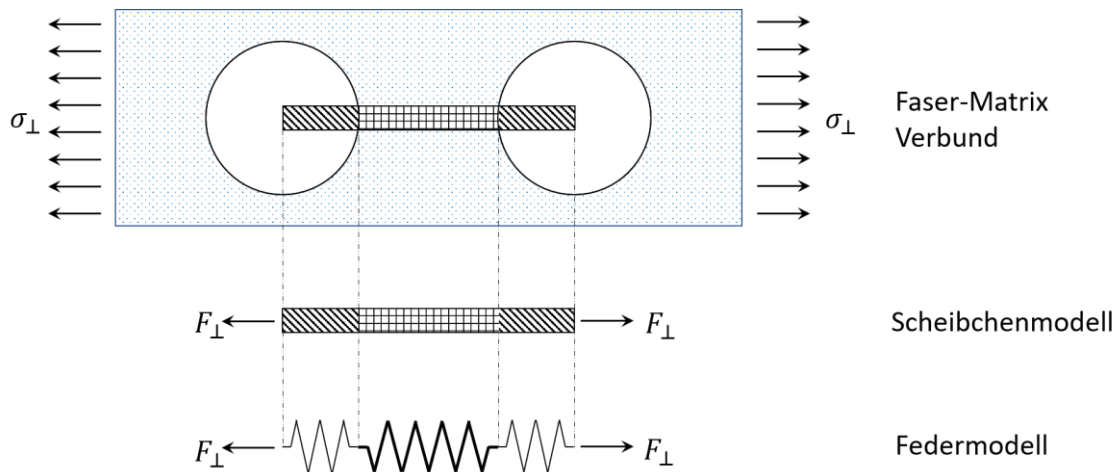


Abb. 2-3: Darstellung des Faser-Matrix Verbunds (oben), Scheibchenmodells (mitte) und Federmodells (unten) [76]

Aus der Serienschaltung ergibt sich das Kräftegleichgewicht zu:

$$F_{\perp} = F_m = F_f \quad (2-7)$$

Aufgrund der Definition des Scheibchenmodells als infinitesimal dünn sind die Flächenanteile der Querschnitte gleich groß und damit die Spannungen äquivalent:

$$\sigma_{\perp} = \sigma_m = \sigma_{faser} \quad (2-8)$$

Die Längenänderung des Verbunds $\Delta l_{verbund} = \varepsilon_{\perp} \cdot l_0$ setzt sich aus der Längenänderung Faseranteile Δl_f und der Matrixanteile Δl_m zusammen:

$$\Delta l_{verbund} = \Delta l_m + \Delta l_f \quad (2-9)$$

Die Längenänderungsanteile Δl_m und Δl_f berechnen sich jeweils aus dem Produkt ihrer Längenteile l_m und l_f und den Dehnungen von Matrix ε_m und Faser ε_{faser} .

$$\Delta l_m = \varepsilon_m \cdot l_m \quad \Delta l_f = \varepsilon_{faser} \cdot l_f \quad (2-10)$$

Analog zum Längs-Elastizitätsmodul werden die Elastizitätsgesetze gebildet. Für lineares einachsiges Verformungsverhalten gilt [77]:

$$E_m = \varepsilon_m \cdot \sigma_m \quad E_{f\perp} = \varepsilon_{faser} \cdot \sigma_{faser} \quad (2-11)$$

Stellt man diese nach ihren Dehnungen um und setzt sie in Gleichung (2-10) ein erhält man:

$$\frac{\sigma_{\perp}}{E_{\perp}} = \frac{\sigma_m}{E_m} \cdot \frac{l_m}{l_0} + \frac{\sigma_{faser}}{E_{f\perp}} \cdot \frac{l_f}{l_0} \quad (2-12)$$

Nach Gleichung (2-8) können die Spannungen gekürzt werden. Die Längenverhältnisse der Komponenten zur Gesamtlänge l_m/l_0 und l_f/l_0 lassen sich über den Faservolumenanteil beschreiben. Es ergibt sich folgender Zusammenhang [73,74,76,79]:

$$\frac{1}{E_{\perp}} = \frac{1}{E_m} \cdot (1 - \varphi) + \frac{1}{E_{f\perp}} \cdot \varphi \quad (2-13)$$

In der Praxis finden halbempirische Gleichungen Anwendung um den Quer-Elastizitätsmodul zu modellieren, da besonders für höhere Faservolumengehalte (FVG) die errechneten Werte von gemessenen Werten abweichen. Dies resultiert aus verschiedenen Faktoren die im oben beschriebenen Scheibchenmodell nicht berücksichtigt werden. Dazu zählen, neben dem Einfluss von Fehlstellen und Fasergeometrie auch die vorliegenden Packungsarten.

Querkontraktionszahlen $\nu_{\perp\parallel}, \nu_{\parallel\perp}, \nu_{\perp\perp}$ einer UD-Einzelschicht

Das Verhältnis von Längs- und Querdehnung wird bei der UD-Einzelschicht durch die Querkontraktionszahlen beschrieben. Dabei wird zwischen der großen Querkontraktionszahl (engl. „major Poisson's ratio“) $\nu_{\perp\parallel}$ und der kleinen Querkontraktionszahl (engl. „minor Poisson's ratio“) $\nu_{\parallel\perp}$ unterschieden. Der erste Indizierungswert bezieht sich dabei auf die Richtung der Kontraktion (quer oder längs zur Faser) und der zweite auf die Beanspruchungsrichtung. Eine Querdehnung der UD-Einzelschicht quer zur Faser bei Beanspruchung quer zur Faser wird mit $\nu_{\perp\perp}$ indiziert.

Berechnungsgleichungen Querkontraktionen

Die Mischungsregel angewendet auf die Querkontraktion $\nu_{\perp\parallel}$ der UD-Einzelschicht ergibt folgenden formelmäßigen Zusammenhang [75,76]:

$$\nu_{\perp\parallel} = \varphi \cdot \nu_{f\perp\parallel} + (1 - \varphi) \cdot \nu_m \quad (2-14)$$

Für eine detaillierte Herleitung wird an dieser Stelle auf Schürmann [76] verwiesen.

Die Querkontraktionszahlen bei Belastung quer- und längs zur Faserrichtung lassen sich mit den Elastizitätsmodulen in folgende Beziehung setzen:

$$\frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\perp}} = \frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}} \quad (2-15)$$

Quer-Längs Schubmodul $G_{\perp\parallel}$

Beim Quer-Längs Schubmodul $G_{\perp\parallel}$ der UD-Einzelschicht liegt analog zum Quer-Elastizitätsmodul eine Serienschaltung vor. Es ergibt sich analog zur Gleichung (2-13):

$$G_{\perp\parallel} = G_m \frac{1}{(1 - \varphi) + \frac{G_m}{G_{f\perp\parallel}} \cdot \varphi} \quad (2-16)$$

Dabei beschreibt G_m den Schubmodul der Matrix und $G_{f\perp\parallel}$ den Quer-Längs-Schubmodul der Faser. Zur Bestimmung des Quer-Längs Schubmoduls ist in der Literatur eine experimentelle Vorgehensweise empfohlen [76]. Zur Berechnung wird in der Praxis analog zur Berechnung des Quer-Elastizitätsmoduls auf halbempirische Gleichungen zurückgegriffen. Hierfür stehen eine Reihe an halbempirischer Formeln zur Auswahl. Die folgende Formel [76] zeigt ein Beispiel einer dieser Berechnungsformeln, mit dem halbempirisch berechneten Schubmodul $G_{\perp\parallel_{HE}}$:

$$G_{\perp\parallel_{HE}} = G_m \frac{1 + 0,8 \cdot \varphi^{0,5}}{(1 - \varphi)^{1,25} + \varphi \cdot \frac{G_m}{G_{f\perp\parallel}}} \quad (2-17)$$

Für die Schubmodule isotroper Materialien gilt folgender Zusammenhang [73]:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2-18)$$

Dabei beschreibt G den Schubmodul, E den Elastizitätsmodul eines isotropen Materials und ν dessen Querkontraktionszahl.

2.2.2 Makromechanik

2.2.2.1 Klassische Laminattheorie (CLT)

Die Klassische Laminattheorie ist ein Berechnungsverfahren aus dem Bereich der FVK. Sie dient dazu die mechanischen Eigenschaften von Mehrschichtverbunden (MSV) zu charakterisieren [76]. MSV bestehen in der Regel aus mehreren gestapelten UD-Einzelschichten und werden auch als Laminat bezeichnet. Um Laminat zu berechnen, werden die sogenannten Ingenieurskonstanten benötigt. Diese wurden im vorherigen Kapitel erörtert. Für die klassische Laminattheorie werden eine Reihe von Annahmen getroffen [76,80–82]:

- Es liegen kleine Verformungen vor.
- Die Dicke des Laminats ist klein im Vergleich zu den ebenen Abmessungen.
- Das Werkstoffverhalten ist linear elastisch.
- Es liegt ein ebener Spannungszustand vor.
- Einzelschichten werden als homogenes Kontinuum modelliert.
- Die Einzelschichten sind perfekt miteinander verbunden.
- Es liegen keine Fehlstellen (z.B. Lufteinschlüsse, Risse) vor.

Die Vorgehensweise bei Anwendung der klassischen Laminattheorie lässt sich in folgende acht Schritte gliedern [75,83]:

1. Bilden der Steifigkeitsmatrix der UD-Einzelschicht aus den Ingenieurskonstanten
2. Berücksichtigung der Faserorientierung der Einzelschichten im Laminat durch Transformation der Steifigkeitsmatrix in das Laminat-Koordinatensystem
3. Bildung der Gesamtsteifigkeitsmatrix mit den Daten zum Schichtaufbau
4. Aufbringen der äußeren Lasten, Invertierung der Gesamtsteifigkeitsmatrix zur Nachgiebigkeitsmatrix und Berechnung der Verzerrungen der Bezugsfläche
5. Umrechnung der Verzerrungen der Bezugsfläche in Dehnungen der Einzelschichten
6. Rücktransformation der im vorigen Schritt bestimmten Dehnungen in das Koordinatensystem der Einzelschicht
7. Spannungen in der Einzelschicht

Steifigkeitsmatrix

Die Steifigkeitsmatrix der UD-Einzelschicht wird aus den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Ingenieurskonstanten gebildet. Der formelmäßige Zusammenhang hierfür lautet [76]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{21} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{\parallel}}{1 - \nu_{\perp\parallel} \cdot \nu_{\parallel\perp}} & \frac{\nu_{\parallel\perp} \cdot E_{\parallel}}{1 - \nu_{\perp\parallel} \cdot \nu_{\parallel\perp}} & 0 \\ \frac{\nu_{\perp\parallel} \cdot E_{\perp}}{1 - \nu_{\perp\parallel} \cdot \nu_{\parallel\perp}} & \frac{E_{\perp}}{1 - \nu_{\perp\parallel} \cdot \nu_{\parallel\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{\perp\parallel} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{21} \end{Bmatrix} \quad (2-19)$$

Das mechanische Verhalten der Einzelschicht wird vollständig durch die Ingenieurskonstanten abgebildet.

Für die mathematische Ausformulierung der restlichen Schritte wird an dieser Stelle auf [75] verwiesen.

Orthotropie bei Laminaten

Wenn die Einzelschichten eines Laminats in Bezug auf die Schichtdicke und Faserorientierung eine Symmetrie zur Mittelebene aufweisen und bei einer Rotation von 180° um die Längsachse der Aufbau des Laminats unverändert bleibt, dann liegt ein orthotropes Laminate vor [76]. Bei nicht-orthotropen Laminaten führt bereits eine einachsige Belastung zu einem komplexen Spannungszustand.

3 Bewertung Berechnungsmodelle

Im Folgenden wird auf die Rahmenbedingungen des im Kontext dieser Arbeit eingesetzten MJ-Systems eingegangen. Daraufhin werden die in Kapitel 2.2 beschriebenen Materialmodelle bezüglich der Rahmenbedingungen bewertet.

Drucksystem und Materialien

Bei dem Drucksystem handelt es sich um ein DragonFly IV System der Firma NanoDimension. Dieses verarbeitet ein leitfähiges Silbernanotinten-Material, im Folgenden als CI-Material (engl. „conductive ink“) bezeichnet und ein dielektrisches Photopolymer-Material (engl. „dielectric ink“) [84].

Tab. 3-1: Materialkennungen des Drucksystems

Material	Handelsname
Conductive Ink	P/N -NND-MAT-CI-0002 [85]
Dielectric Ink	NND-MAT-DI-0003 [86]

Durch eine parallele Verarbeitung von CI- und DI-Material mit zwei den jeweiligen Materialien dedizierten Druckköpfen kann das System eingebettete elektrische Strukturen erzeugen (siehe Kapitel 2.1.3.1). Der Materialauftrag erfolgt schichtweise auf ein Substrat aus Polymer auf einem beheizbaren, ebenen Druckbett. Die Nachbehandlung des Materials in Form von Aushärtung des DI-Materials mit UV-Strahlung und Sintern des CI-Materials mittels IR-Strahlung erfolgt ebenfalls schichtweise.

Bewertung der Annahmen des Materialmodells der UD-Schicht

Die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Annahmen der UD-Schicht sind nach dem aktuellen Informationsstand des Systems nicht uneingeschränkt für dieses gegeben. Während die Annahme geringer Dehnungen maßgeblich vom gewählten Lastfall abhängt und somit bei entsprechender Belastung angenommen werden kann ist die Bewertung der restlichen Kriterien komplexer. Die erreichbare Auflösung des im Rahmen der Arbeit verwendeten Drucksystems ist im Vergleich zu anderen AME-Verfahren relativ hoch,

jedoch deutlich geringer als die bei FVK vorliegenden Dimensionen. Zu den gebräuchlichsten Fasern im Bereich der FVK zählen Glas- und Kohlenstofffasern. Deren Durchmesser liegen bei etwa $10\ \mu\text{m}$ [79]. Die vom Hersteller empfohlenen Mindestbreite der CI-Leiterbahnen liegt bei ca. $75\ \mu\text{m}$ und die empfohlene Mindestdicke bei ca. $100\ \mu\text{m}$ [87]. Die Annahme der konstanten Faserquerschnitte ist übertragen auf die Leiterbahnquerschnitte nicht untersucht. Im Vergleich zu gebräuchlichen Fasern ist die Oberflächenrauigkeit der gedruckten Leiterbahnen jedoch deutlich höher. Zudem treten beim Druckverfahren, insbesondere in den Randbereichen des Bauteils, Geometrieabweichungen auf, die die Querschnittsfläche der Leiterbahnen signifikant beeinflussen (siehe Kapitel 5.1.2.1). Diese sind auf prozess- und werkstoffbedingte Absackungseffekte zurückzuführen, welche aktuell Gegenstand der Forschung sind. Folglich gilt auch für die Annahme einer regelmäßigen Packung keine uneingeschränkte Gültigkeit. Ob und in welchem Bereich das Werkstoffverhalten als linear elastisch angenommen werden kann, wird im Rahmen der Arbeit näher untersucht. Die Annahme eines Kontinuums für den Verbund aus CI- und DI-Material ist neben dem Vorkommen von Fehlstellen im Bauteil insbesondere in Bezug auf den Bereich der Phasengrenze zwischen CI- und DI-Material fraglich. Der Kontaktbereich zwischen CI- und DI-Materials ist äußerst komplex und unterliegt dem Einfluss verschiedener werkstoff- und prozessbedingter Faktoren. Dazu zählen unter anderem:

- Benetzungsverhalten der CI- und- DI-Tröpfchen
- Sinterprozess des CI-Materials
- Aushärtungsgrad des DI-Materials
- Position und Orientierung der Grenzfläche im Druckbett
- Thermische Einflussfaktoren

Die präzise Modellierung des Kontaktbereichs ist Gegenstand aktueller Forschung. Bisherige Erfahrungen mit dem Verbundmaterial zeigten eine schlechte Haftung an der Phasengrenze der Verbundkomponenten bei flachen Strukturen (siehe Kapitel 4.1.1).

Der Einfluss der Position im Bauteil auf die Mikrostruktur des Silbermaterials ist für das Verfahren nicht näher untersucht. Außenflächen des Bauteils, die nicht normal zur Aufbaurichtung liegen, erfahren mehr IR-Bestrahlung als das Innenvolumen des Bauteils, da sie nicht durch nachfolgende Schichten verdeckt werden. Der Elastizitätsmodul von reinem Silber liegt bei ca. $81\ \text{GPa}$ [88] und wird nach bisherigen Versuchen beim verarbeiteten CI-Material nicht erreicht. Der Sintervorgang hat einen

großen Einfluss auf die Mikrostruktur des CI-Materials (siehe Kapitel 2.1.3.3) und ist aktueller Forschungsgegenstand.

Bewertung der Annahmen der klassischen Laminattheorie

Die Annahme eines dünnen Laminats ist von der Bauteilgeometrie abhängig und eignet sich für aktuelle Anwendungen des Druckverfahrens insbesondere, da die realisierbaren Bauteilabmessungen in Aufbaurichtung im Vergleich zu den ebenen Abmessungen stark beschränkt sind. Nach Herstellerangabe [87] ist die Bauteilhöhe auf 3 mm beschränkt, während der Bauraum Bauteildimensionen in der xy-Ebene von theoretisch bis zu 160 x 160 mm² erlaubt. Bezüglich der Annahme linear elastischen Verhaltens verhält es sich wie oben beschrieben. Die Einflüsse der im vorherigen Absatz beschriebenen Geometrieabweichungen auf die Annahme eines ebenen Spannungszustands sind nicht näher untersucht. Ebenso sind die Auswirkungen zeitabhängiger Temperatureinflüsse auf das mechanische Verhalten der Materialien nicht bekannt und Gegenstand aktueller Forschung. Durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile werden die unteren Schichten über eine längere Zeitperiode hohen Temperaturen durch Sinter- und UV-Bestrahlungsprozesse und das beheizte Druckbett ausgesetzt. Ob die Werkstoffeigenschaften über sämtliche Schichthöhen konstant sind, ist nicht bekannt. Für die Kontinuumsannahme verhält es sich analog zum vorherigen Absatz. Anders als bei klassischen FKV-Laminaten werden die Einzelschichten beim MJ Verfahren nicht separat verklebt. Die Verbindung der Einzelschichten ist als gleichwertig zur Verbindung innerhalb der Einzelschicht annehmbar. Fehlstellen sind prozessbedingt nicht auszuschließen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass einige der Annahmen aufgrund von prozess- und werkstoffbedingten Limitationen nicht uneingeschränkt zutreffen. Der Einfluss dieser Tatsache auf die Anwendbarkeit der Materialmodelle wird in den folgenden Kapiteln näher untersucht. Aufgrund der hohen Zahl von Einflussfaktoren die mit dem Drucksystem einhergehen besteht ein großer Forschungsbedarf.

4 Methoden

Im Folgenden wird auf die im Rahmen der Arbeit angewandten Methoden eingegangen. Zunächst wird das durchgeführte Versuchsprogramm erklärt. Dabei werden neben Versuchsaufbau und -durchführung der mechanischen Prüfungen die untersuchten Probekörper beschrieben. Im Anschluss wird auf die im Kontext der Arbeit durchgeführte computergestützten Berechnungsmodelle eingegangen. Neben dem Aufbau der FEM-Simulationen wird die Berechnung des Laminats erläutert.

4.1 Versuchsprogramm

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Versuchsprogramm ausgearbeitet und durchgeführt, um die Anwendbarkeit der in Kapitel 2.2 beschriebenen Materialmodelle zu prüfen. Hierfür wurden drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen mechanischen Prüfverfahren und Probegeometrien durchgeführt.

4.1.1 Versuchsreihe Biegeversuch

Im Rahmen der Versuchsreihe Biegeversuch wurde ein Vierpunkt-Biegeversuch durchgeführt. Dieser wurde in Bezug auf Versuchsaufbau, Versuchsdurchführung sowie die Probekörpergeometrien auf die DIN EN ISO 14125 [89] angelehnt. Zusätzlich wurde der Versuch um eine Widerstandsmessung mittels eines im Rahmen der Arbeit entwickelten Ohmmeters erweitert um die Bruchdehnung und das Bruchverhalten des CI-Materials qualitativ zu untersuchen.

Versuchsaufbau & Durchführung

Abb. 4-1 zeigt den Aufbau des Vierpunkt Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14125 [89].

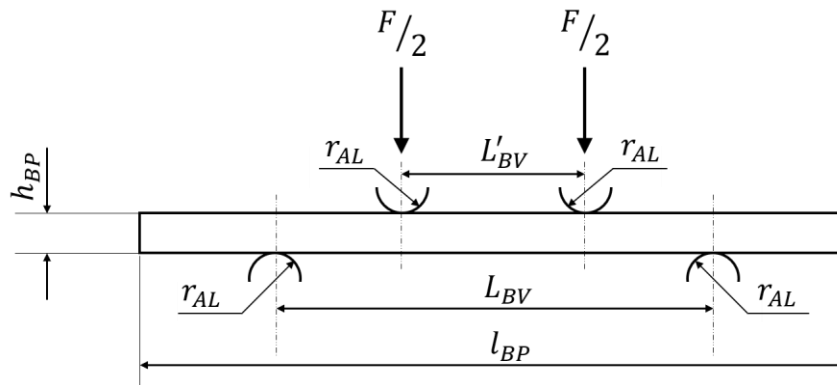


Abb. 4-1: Aufbau des Vierpunkt Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14125 [89]

Dabei beschreibt l_{BP} die Länge der Probe, h_{BP} die Dicke der Probe, r_{AL} den Radius der Auflager, L_{BV} die Stützweite und L'_{BV} die mittlere Stützweite. Die unteren Auflager sind fixiert gelagert, die oberen Auflager werden jeweils mit einer Kraft von $F/2$ belastet. Dies führt zur Durchbiegung s , gemessen vom Mittelpunkt der Seitenfläche ($h_{BP} \cdot l_{BP}$) der Probe. Die Prüfung erfolgt an einer Universalprüfmaschine. Zur Kraftmessung wird eine Kraftmessdose verwendet. Die Durchbiegung s_{BV} wird mittels eines Videoextensometers erfasst. Die Belastung der Probe erfolgt weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit $v_{Vorschub_{BV}}$ der oberen Auflager.

Tab. 4-1: Versuchsparameter des Biegeversuchs

L_{BV} (mm)	L'_{BV} (mm)	r_{AL} (mm)	$v_{Vorschub_{BV}}$ (mm/min)
45	15	2	1

Widerstandsmessung

Um die Leitfähigkeit der auf Zug belasteten Leitungen während des Versuchs zu untersuchen wurde ein Ohmmeter für die Biegeversuch Versuchsreihe entwickelt. Dieses ermöglicht die parallele Messung mehrerer Leitungen in Verbindung mit einer hohen Messauflösung. Das Ohmmeter besteht aus kommerziell verfügbaren Elektronikkomponenten und einem Arduino Mega 2560 Mikrocontroller.

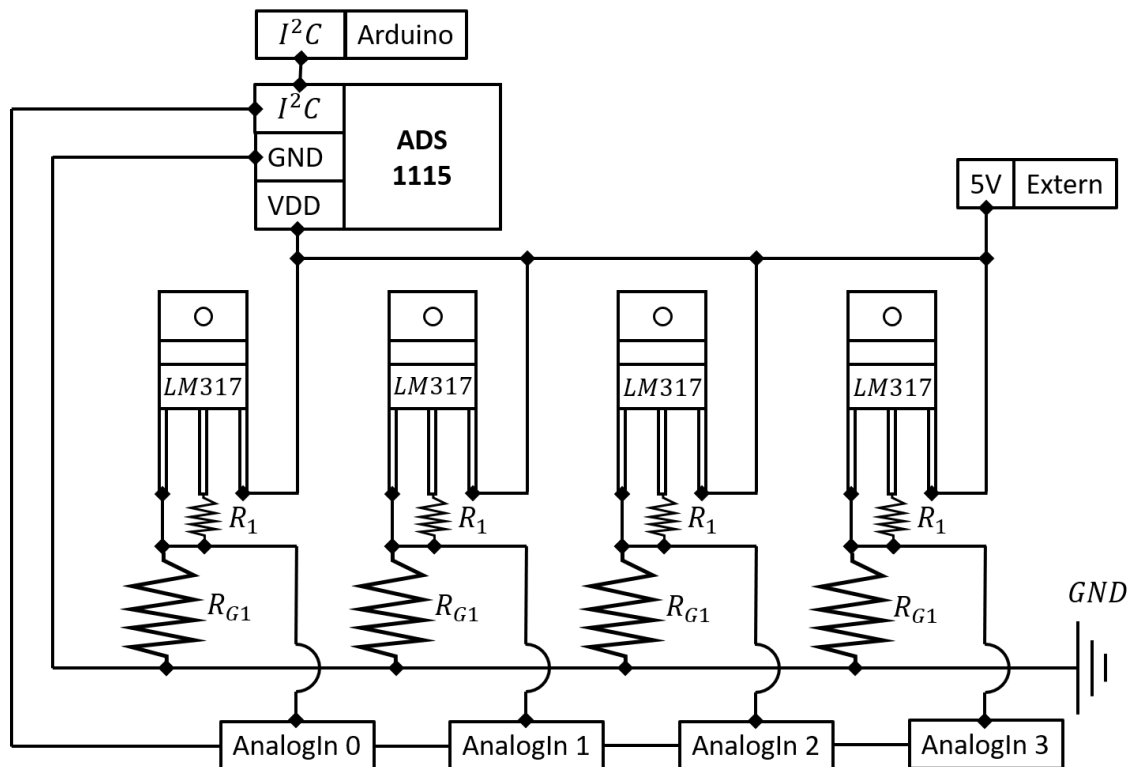


Abb. 4-2: Schaltkreis des Ohmmeters

Abb. 4-2 zeigt den Schaltkreis des Ohmmeters. Dieser setzt sich aus einem Analog Digital Wandler (ADC) vom Typ ADS 1115, vier Spannungsreglern vom Typ LM317, vier $10\ \Omega$ Widerständen R_1 und den Arduino Mikrocontroller zusammen. Die gemessenen Widerstandsstrecken werden als R_{G1} , R_{G2} , R_{G3} bzw. R_{G4} bezeichnet. Die Analogeingänge des ADC werden als AnalogIn 0, AnalogIn 1, AnalogIn 2 bzw. AnalogIn 3 bezeichnet. Der geteilte Ground Anschluss von Mikrocontroller und externer Spannungsquelle wird als GND bezeichnet. Schaltkreis und Mikrocontroller sind an eine externe 5 V Spannungsquelle angeschlossen. Über die Spannungsregler fällt eine konstante Dropout Spannung. Durch eine Verschaltung mit den $10\ \Omega$ Widerständen werden konstante Stromstärken erzeugt. Der ADC misst über die Analogeingänge die von den Widerstandsstrecken bestimmten Spannungen, woraus sich die Widerstandswerte berechnen. Unter Berücksichtigung des vorliegenden Messrauschens ergab sich eine Auflösung im Zehntel Milliohmbereich. Der Aufbau bietet den Vorteil einer parallelen Messung von vier Widerstandsstrecken in Kombination mit einer hohen Messauflösung.

Probekörper

Die Probekörper der Versuchsreihe Biegeversuch bestehen aus einem Verbund aus CI und DI Material. Das CI-Material bildet Leitungen mit quadratischem Querschnitt ($s_q \cdot s_q$) die parallel zur Länge der Proben l_{BP} verlaufen und im DI-Material eingebettet sind. Für die Versuchsreihe werden vier verschiedene Probekörpervarianten erstellt. Diese unterscheiden sich in der Seitenlänge s_q ihrer Querschnittsfläche, sowie im Volumenanteil des CI-Materials ϕ am Gesamtvolumen des Verbundes. Zudem unterscheiden sich die Lötstellen der Proben (siehe Tab. 5-1).

Packungsmuster der CI-Leiterbahnen

Bei der Anordnung der Leiterbahnen wird es vermieden Phasengrenzen des Verbundes in z-Richtung übereinander anzuordnen. Dies ist mit dem Auftreten von prozess- und materialbedingten Absackungseffekten (siehe Abb. 5-14) bei Anordnung von Phasengrenzen in Aufbaurichtung zu erklären. Abb. 4-3 zeigt einen Ausschnitt des Querschnittes eines UD-Verbundes.

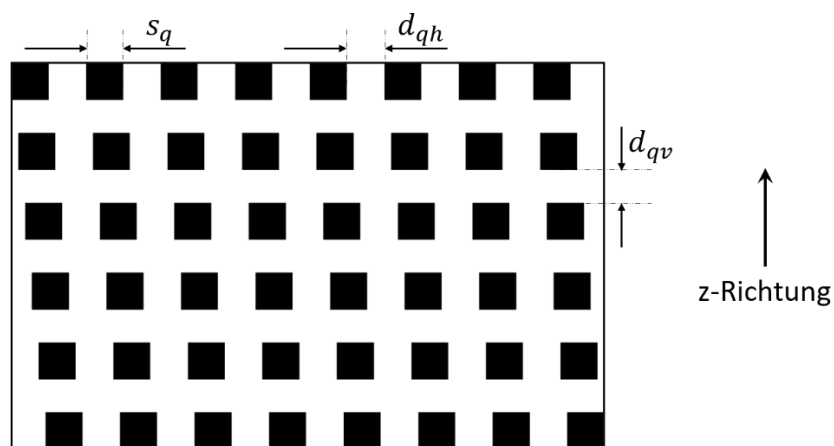


Abb. 4-3: Ausschnitt des Packungsmuster des UD-Verbund

Die Seitenlänge der quadratischen Querschnitte der Leiterbahnen s_q und die Abstände der Leiterbahnen in horizontaler Richtung d_{qh} und z-Richtung d_{qv} orientieren sich an den Designrichtlinien des Herstellers [87]. Um die Funktionalität der Leiterbahnen zu gewährleisten und um Kurzschlüsse zwischen den Leiterbahnen auszuschließen muss ein Mindestabstand eingehalten.

Probekörpergeometrie

Die Abmaße der Probekörper orientieren sich an den Vorgaben der DIN EN ISO 14125 [89]. Die konstruierten Abmaße der Probekörper betragen für die Probendicke h_{BP} 2 mm, die Probekörperbreite b_{BP} 15 mm und die Probekörperlänge L_{BP} 86 mm. Die Probekörperlänge nach obiger Norm beträgt 60 mm. Um eine Verdrahtung der Proben und Platz für Lötstellen zu ermöglichen sind die Probekörperlänge auf 86mm erhöht. Die Probenlänge l_{BP} ist für die Berechnung nicht relevant.

Tab. 4-2 gibt eine Übersicht über das Packungsmuster der Probekörper der Versuchsreihe Biegeversuch. Das Packungsmuster wird durch die konstruierten Maße der Seitenlänge s_q der quadratischen Querschnittsfläche der CI-Leiterbahnen und deren Abständen in horizontale d_{qh} und z-Richtung d_{qv} , sowie dem resultierenden CI-Volumenanteil ϕ_{CI} im Bauteil definiert.

Tab. 4-2: Packungsmuster der Probekörper der Versuchsreihe Biegeversuch

Probenbezeichnung	s_q (mm)	d_{qh} (mm)	d_{qv} (mm)	ϕ (%)
BP_0,1mm_7,4%	0,1	0,306	0,280	7,4
BP_0,1mm_27,1%	0,1	0,103	0,090	27,1
BP_0,3mm_15%	0,3	0,900	0,267	15,0
BP_0,3mm_30%	0,3	0,300	0,267	30,0

Lötstellen

Um eine Messung des elektrischen Widerstands der auf Zug belasteten Leiterbahnen während des Versuchs zu ermöglichen sind Lötstellen in das Design der Probekörper integriert. Die Lötstellen werden händisch mit kommerziellem Lötzinn verdrahtet. Je Probekörper sind acht Lötstellen vorgesehen. Diese verbinden paarweise mehrere der auf Zugspannung belasteten Leiterbahnen in Form einer Parallelschaltung. Die Lötstellen sind als CI-Quader der Dicke s_q und einer zusätzlichen Verankerung (siehe Abb. 4-4) modelliert. Die Verankerung besteht aus einer sich in negative z-Richtung Verjüngenden CI-Struktur, die von dieelektrischen Gittern durchzogenen ist, um eine optimierte formschlüssige Verankerung der Lötstellen zu gewährleisten. Eine flache Lötstelle ohne Verankerung erwies sich als unzureichend, aufgrund der geringen Schichtanhaftung der parallel zur xy-Ebene liegenden Phasengrenze.

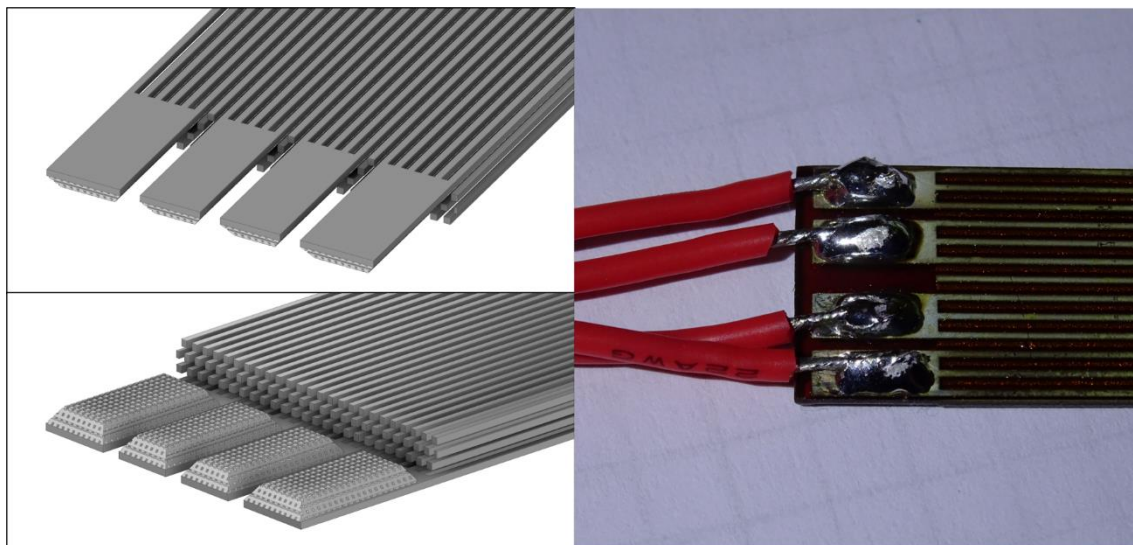


Abb. 4-4: Lötstellen im 3D-Modell (links) und am gedruckten Bauteil (rechts)

Abb. 4-4 zeigt die Lötstellen im 3D-Modell (links) sowie verdrahtet an der Probe (rechts). Auf den Bildern des 3D-Modelles ist zur Veranschaulichung ausschließlich das CI-Material eingeblendet.

Baujobs und Orientierung der Proben auf dem Druckbett

Die Probekörper der Versuchsreihe Biegeversuch sind in drei separaten Baujobs gefertigt (siehe Tab. 4-3). Das Drucksystem und die verarbeiteten Materialien (siehe Kapitel 3) sind die gleichen.

Die Probekörper der Versuchsreihe Biegeversuch sind mit Aufbaurichtung (z-Richtung) in Dickenrichtung der Proben auf dem Druckbett positioniert. Die Orientierung der Längsrichtung der Proben auf dem Druckbett (xy-Ebene) unterscheidet sich zwischen den Proben. Dabei ist, insbesondere der Winkel β_{CI_Bahnen} zwischen dem Vektor der Fahrtrichtung der Druckköpfe und der Längsrichtung der CI-Leiterbahnen von Interesse. Neben dem Winkel β_{CI_Bahnen} wird der Winkel β_{Probe} der Längsrichtung der Proben zum Vektor der Fahrtrichtung definiert.

Tab. 4-3 gibt eine Übersicht der Orientierung der Probekörper der Versuchsreihe Biegeversuch auf dem Druckbett und eine Zuweisung zum entsprechenden Baujob. Für die Proben der Versuchsreihe Biegeversuch gilt $\beta_{CI_Bahnen} = \beta_{Probe}$.

**Tab. 4-3: Orientierung der Proben auf dem Druckbett und Baujob-Nr.,
Versuchsreihe Biegeversuch**

Probenbezeichnung	β_{CI_Bahnen} (mm)	Baujob Nr. (-)
BP_0,1mm_7,4%	A	90
	B	0
	C	0
BP_0,1mm_27,1%	A	0
	B	0
BP_0,3mm_30%	A	0
	B	0
BP_0,3mm_15%	A	0
	B	0

4.1.2 Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben

Im Rahmen der Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben wurden Zugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 527 [90] durchgeführt.

Versuchsaufbau und Durchführung

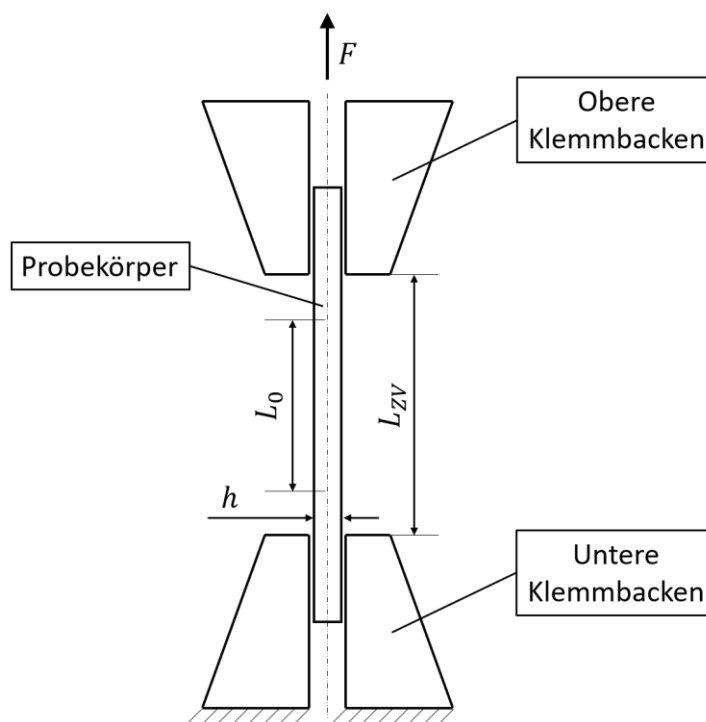


Abb. 4-5: Aufbau des Zugversuchs der UD-Proben

Abb. 4-5 zeigt den prinzipiellen Aufbau des durchgeführten Zugversuchs. Der Probekörper der Dicke h wird mit einem oberen und einem unteren Klemmbackenpaar fixiert. Das untere Klemmbackenpaar ist fest gelagert. Das obere Klemmbackenpaar wird weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit $v_{Vorschub_{ZV}}$ von 1 mm/min nach oben bewegt. Die daraus resultierende Kraft F wird mittels Kraftmessdose aufgenommen. Die Längsdehnung der Probekörper wurde mittels Videoextensometer bestimmt. Der Abstand der Messpunkte wird durch die Messlänge L_0 beschrieben. Der Klemmbackenabstand wird mit L_{ZV} bezeichnet. Zusätzlich zur Längskontraktion wird die Querkontraktion der Probekörperbreite b (siehe Abb. 4-6) ebenfalls mittels Videoextensometer aufgenommen.

Probekörpergeometrie

Die Probekörper der Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben bestehen aus einem Verbund von UD-orientierten CI-Leiterbahnen, welche in einer aus DI-Material bestehenden Matrix eingebettet sind.

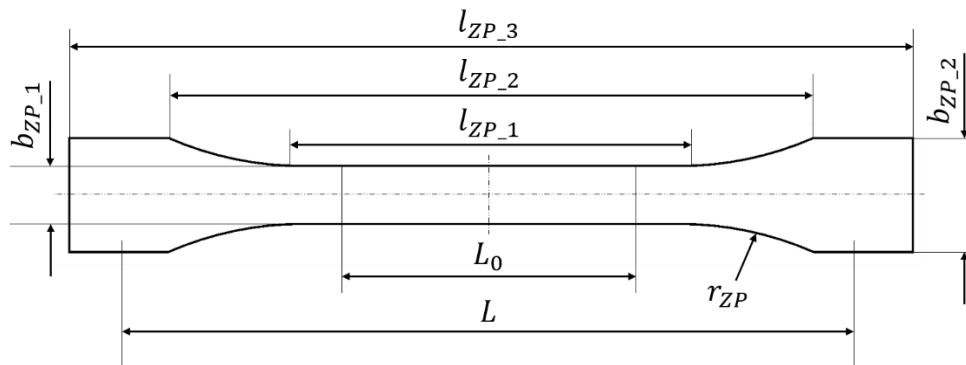


Abb. 4-6: Bemaßung der Probekörpergeometrie der UD-Proben

Abb. 4-6 stellt die Probekörpergeometrie der Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben dar. Diese orientiert sich an den Vorgaben der DIN EN ISO 527 [90]. Die äußeren Abmaße der UD-Proben sind durch die Gesamtlänge l_{ZP_3} , die Entfernung der breiten parallelen Seiten l_{ZP_2} , die Länge des engen parallelen Teils l_{ZP_1} , die Breite des engen Teils b_{ZP_1} , die Breite an den Enden b_{ZP_2} , den Radius r_{ZP} und die Dicke h_{ZP} definiert. Für die Berechnung der Spannung σ (siehe Kapitel 5.1.2) ist in erster Linie der Bereich des engen Querschnitts, der innerhalb der Länge l_{ZP_1} liegt, relevant. Die sogenannte Anfangsquerschnittsfläche A wird durch die Anfangsbreite am engen Querschnitt b_{ZP_1} und die Dicke der Zugprobe h_{ZP} (siehe Abb. 4-6) definiert. Die Messlänge L_0 wird für alle Versuchsreihe mittels eines Videoextensometers und Klebepunkten erfasst. Die Anfangsbreite b_{ZP_1} und deren Änderung wird über die Erfassung der Außenkontur mittels Videoextensometers gemessen.

Tab. 4-4 listet die im 3D-Modell der Proben festgelegten Bemaßungen nach Abb. 4-6 und die Zugprobendicke h_{ZP} auf.

Tab. 4-4: Konstruierte äußere Abmaße der UD-Proben

b_{ZP_1} (mm)	b_{ZP_2} (mm)	l_{ZP_1} (mm)	l_{ZP_2} (mm)	l_{ZP_3} (mm)	r_{ZP} (mm)	h_{ZP} (mm)
3,2	6,4	21,5	36,8	48,0	19,2	2,0

Analog zur Versuchsreihe Biegeversuch bestehen die Probekörper der Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben aus einem Verbund von CI- und DI-Material. Die Packungsmuster der Leiterbahnen entsprechen denen der Versuchsreihe Biegeversuch. Die Probekörper unterscheiden sich analog zu Versuchsreihe Biegeversuch in Varianten, basierend auf dem CI-Volumenanteil ϕ und der Seitenlänge s_q der Querschnittsfläche der Leiterbahnen. Zudem unterscheiden sich die Probekörpervarianten in Bezug auf die Orientierung der Leiterbahnen. Diese liegen entweder längs zur Längenrichtung der Proben (im Folgenden als längs-verstärkt bezeichnet), mit einem Winkel $\alpha = 0^\circ$ um die z-Achse gedreht oder quer mit einem Winkel $\alpha = 90^\circ$ um die z-Achse gedreht im Bauteil. (im Folgenden als quer-verstärkt bezeichnet),

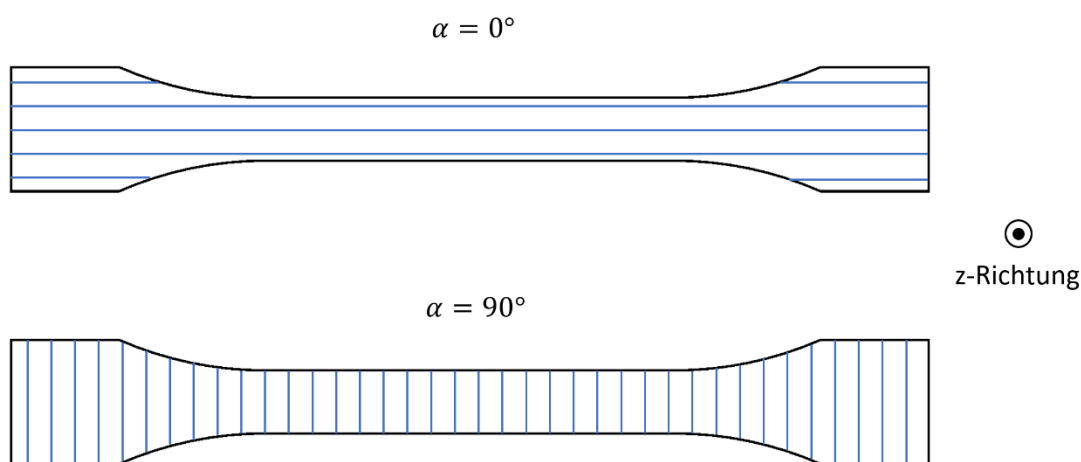
**Abb. 4-7: Darstellung der Leiterbahnorientierung der UD-Proben, längs-verstärkt (oben) und quer-verstärkt (unten)**

Abb. 4-7 zeigt eine schematische Abbildung der Probekörpervarianten mit längs liegenden Leiterbahnen (oben) und quer liegenden Leiterbahnen (unten).

Tab. 4-5 bietet eine Übersicht der Maße der Packungsmuster, CI-Volumenanteile und Leiterbahnorientierungen der UD-Proben.

Tab. 4-5: Maße der Packungsmuster, CI-Volumenanteile und Leiterbahnorientierungen der UD-Proben

Probenbezeichnung	α in (°)	s_q (mm)	d_{qh} (mm)	d_{qv} (mm)	ϕ (%)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	0	0,1	0,306	0,280	7,4
ZP_längs_0,1mm_27,1%	0	0,1	0,103	0,090	27,1
ZP_längs_0,3mm_12,2%	0	0,3	0,900	0,267	12,2
ZP_längs_0,3mm_30,7%	0	0,3	0,300	0,267	30,7
ZP_quer_0,1mm_7,4%	90	0,1	0,306	0,280	7,4
ZP_quer_0,1mm_27,1%	90	0,1	0,103	0,090	27,1
ZP_quer_0,3mm_15%	90	0,3	0,900	0,267	15,0
ZP_quer_0,3mm_30%	90	0,3	0,300	0,267	30,0

Abweichungen des CI-Volumenanteils ϕ der Zugproben mit längs liegenden Leiterbahnen, trotz gleichen Packungsmusters, resultieren aus der geringen Querschnittsfläche der Probekörpergeometrie. Die Angaben des Volumengehalts beziehen sich auf den durch die Länge l_{ZP_1} beschriebenen Abschnitt des Probekörpers.

Baujob und Orientierung der Proben auf dem Druckbett

Die Proben der Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben und Zugversuch Laminat-Proben sind bei der Firma J.A.M.E.S GmbH in Taufkirchen gefertigt. Das Druckermodell und die verarbeiteten Materialien sind analog zur Versuchsreihe Biegeversuch (siehe Kapitel 3). Die Proben sind zusammen in einem einzelnen Baujob gefertigt.

Die Probekörper der Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben sind mit Aufbaurichtung (z-Richtung) in Dickenrichtung der Proben auf dem Druckbett positioniert. Die Orientierung der Längsrichtung der Proben in der xy-Ebene unterscheidet sich zwischen den Proben. Dies ist auf eine maximale Ausnutzung des verfügbaren Bauraums zurückzuführen.

Tab. 4-6 gibt eine Übersicht der Orientierung der Probekörper der Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben auf dem Druckbett.

Tab. 4-6: Orientierung der UD-Proben auf dem Druckbett

Probenbezeichnung	β_{CI_Bahnen} (°)	β_{Probe} (°)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	0	0
ZP_längs_0,1mm_27,1%	0	0
ZP_längs_0,3mm_12,2%	0	0
ZP_längs_0,3mm_30,7%	0	0
ZP_quer_0,1mm_7,4%	A	90
	B	
	C	0
	D	
ZP_quer_0,1mm_27,1%	90	0
ZP_quer_0,3mm_15%	A	0
	B	90
	C	0
ZP_quer_0,3mm_30%	90	0

4.1.3 Versuchsreihe Zugversuch Laminat-Proben

Im Rahmen der Versuchsreihe Zugversuch Laminat-Proben wurden Zugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 14129 [91] durchgeführt.

Der Versuchsaufbau entspricht dem des in Abb. 4-5 dargestellten Zugversuchs. Als Vorschubgeschwindigkeit $v_{Vorschub_ZV}$ wurde 1 mm/min gewählt. Analog zu Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben wurde ein Videoextensometer zur Messung der Längs- und Querdehnung verwendet.

Probekörpergeometrie

Die Probekörper der Versuchsreihe Laminat-Proben bestehen aus einem Verbund von CI-Leiterbahnen mit quadratischem Querschnitt, die in einer Matrix aus DI-Material eingebettet sind. Die Probekörper haben eine quaderförmige Geometrie mit den konstruierten Außenabmaßen: Länge $l_{LP} = 125 \text{ mm}$, Breite $b_{LP} = 25 \text{ mm}$ und Dicke $h_{LP} = 2 \text{ mm}$. Die Leiterbahnen sind, anders als bei den oben beschriebenen

Versuchsreihen nicht über den gesamten Körper UD angeordnet, sondern liegen in Form eines orthotropen $45^\circ \times 45^\circ$ Laminats (siehe Kapitel 2.2.2) vor. Die zwei erstellten Probekörpervarianten unterscheiden sich insbesondere in Bezug auf die Seitenlänge s_q der quadratischen Querschnittflächen der CI-Leiterbahnen, die Anzahl der Lagen n_{LP} sowie den CI-Volumenanteil ϕ .

Tab. 4-7: Übersicht der Probekörpervarianten der Versuchsreihe Zugversuch Laminat-Proben

Probenbezeichnung		n_{LP} (-)	ϕ (%)	s_q (mm)	d_{qh} (mm)	d_{qv} (mm)
LP_0,1mm_19,7%	A	8	19,7	0,1	0,103	0,176
	B					
LP_0,3mm_30%	A	4	30,0	0,3	0,300	0,267
	B					

Tab. 4-7 gibt eine Übersicht der für die Geometrie der Laminatproben relevanten Daten. Der CI-Volumenanteil ϕ der Probekörpervariante LP_0,1mm_19,7% weicht aufgrund des Erfordernisses einer geraden Anzahl an Lagen für ein orthotropes Laminat von denen der anderen Versuchsreihen mit $s_q = 0,1\text{mm}$ ab.

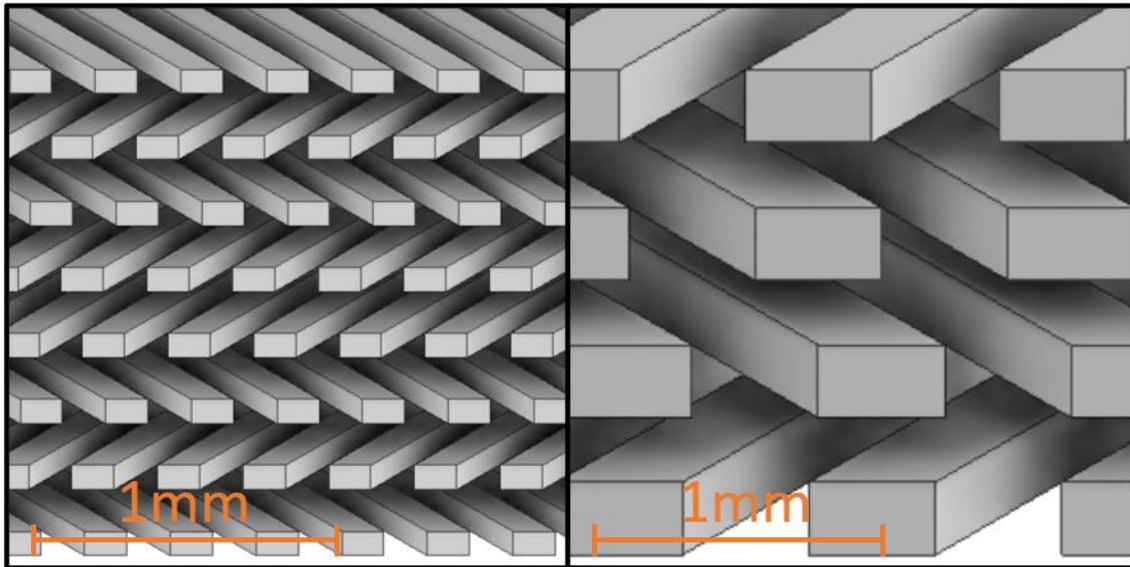


Abb. 4-8: Laminataufbau der Laminatproben mit $s_q=0,1$ mm (links) und $s_q=0,3$ mm (rechts)

Abb. 4-8 zeigt den Laminataufbau der zwei Probekörpervarianten. Links ist ein Ausschnitt des Laminats der Probekörpervariante LP_0,1mm_19,7% zu sehen, rechts ein Ausschnitt der Probekörpervariante LP_0,3mm_30%. Zur Veranschaulichung sind ausschließlich die Volumenkörper des CI-Materials eingeblendet. Die in gleicher Orientierung liegenden Lagen sind in xy-Ebene lotrecht zur Längsrichtung der Leiterbahnen versetzt zueinander angeordnet um Materialabsackungen zu reduzieren.

Baujob und Orientierung der Proben auf dem Druckbett

Die Probekörper der Versuchsreihe Zugversuch Laminatproben sind mit Aufbaurichtung (z-Richtung) in Dickenrichtung der Proben auf dem Druckbett positioniert. Die Proben wurden im gleichen Baujob wie die Proben der Versuchsreihe Zugversuch UD-Proben gefertigt. Alle Proben der Versuchsreihe Zugversuch Laminatproben wurden mit einem Winkel β_{Probe} von 90° auf dem Druckbett positioniert.

4.2 Numerische Untersuchung

Im Rahmen der Arbeit wurden die durchgeführten Versuche simulativ nachgebildet. Dazu wurde die Software ANSYS verwendet. Zudem wurde eine computergestützte Berechnung der Laminatproben nach der CLT durchgeführt. Im Folgenden wird zunächst auf den Aufbau der statisch mechanischen Analysen der Simulation eingegangen.

4.2.1 FEM-Simulation Biegeversuch

Geometrie des Simulationsmodells

Um Rechenzeit einzusparen sind für die Simulation repräsentative Ausschnitte der Biegeprobengeometrie aus der Gesamtgeometrie geschnitten. Dabei sind die Lötstellen nicht berücksichtigt. Die Biegeprobenlänge bezieht sich auf den UD-verstärkten Teil der Probe, mit $l_{BP} = 60 \text{ mm}$ (siehe Kapitel 4.1.1).

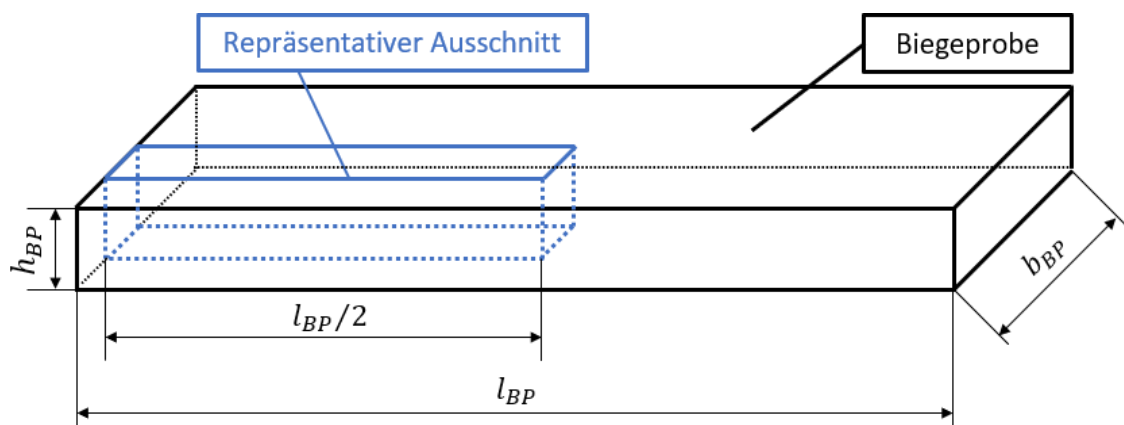


Abb. 4-9: Repräsentativer Ausschnitt aus der Biegeprobe

Abb. 4-9 veranschaulicht den repräsentativen Ausschnitt aus einer Biegeprobe. Dabei wird die durch den Probenmittelpunkt und die von $h_{BP} \cdot b_{BP}$ aufgespannte Fläche definierte Symmetrieebene ausgenutzt. Der Versuchsaufbau ist zu dieser ebenfalls symmetrisch. Die Dicke des Ausschnitts entspricht der Dicke der Biegeprobe h_{BP} . Die Breite des Ausschnitts b_{FEM_BP} wird um Rechenzeit einzusparen auf ein Maß reduziert, sodass sowohl ein gleichmäßiges Packungsmuster gewährleistet ist, als auch der CI-Volumenanteil des Ausschnitts dem des Packungsmusters der gesamten Probe entspricht.

Tab. 4-8 gibt eine Übersicht über die gewählten Maße der Ausschnitte.

Tab. 4-8: Breite b_{FEM_BP} der Ausschnitte der Biegeproben

Volumenkörper	b_{FEM_BP} (mm)
BP_0,1mm_7,4%	2,03
BP_0,1mm_27,1%	0,70
BP_0,3mm_15%	15,00
BP_0,3mm_30%	7,50

Hilfsgeometrien

Um den Biegeversuch simulativ nachzubilden ist das Modell zusätzlich zum repräsentativen Ausschnitt um zwei zylindrische Hilfsgeometrien erweitert. Diese bilden die Auflager nach, ihre Mantelflächen berühren tangential die Oberfläche der Biegeprobe. Die Abstände und Durchmesser der Auflager ergeben sich aus denen des Versuchsaufbaus (siehe Tab. 4-1). Die Breite der Auflager entspricht der des Ausschnittes b_{FEM_BP} . Der Versuchsaufbau wird an der oben beschriebenen Symmetrieebene gespiegelt.

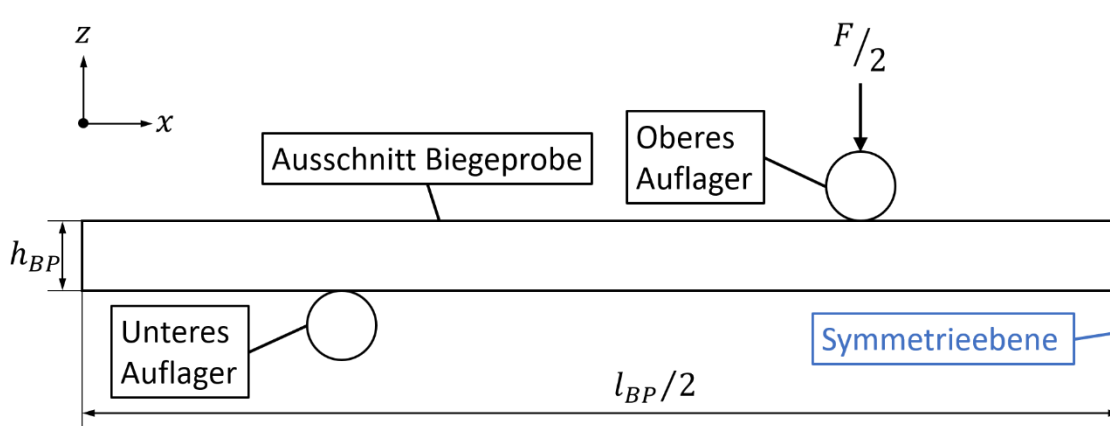


Abb. 4-10: Simulativer Aufbau des Biegeversuchs

Abb. 4-10 zeigt den simulativen Aufbau des Biegeversuchs. Das untere Auflager ist dabei analog zum realen Versuch fixiert, das obere wird mit der Kraft $F/2$ in negative z -Richtung belastet. Aufgrund der Symmetriebedingung wird die Kraft im Vergleich zum Versuchsaufbau ohne Symmetrieebene halbiert.

Werkstoffdaten

Tab. 4-9 stellt die zugewiesenen Werkstoffdaten der Auflager und CI- bzw. DI-Volumenkörper der Ausschnitte der Biegeproben dar. Das Materialverhalten wird linear-elastisch und isotrop modelliert. Die Herleitung der Materialdaten wird in Kapitel 6 diskutiert.

Tab. 4-9: Materialdaten der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der Biegeproben

Volumenkörper		E (MPa)	ν (-)
Auflager		200000	0,3
BP_0,1mm_7,4%	CI	28848	0,4
	DI	2403	
BP_0,1mm_27,1%	CI	28848	0,4
	DI	2403	
BP_0,3mm_15%	CI	28848	0,4
	DI	2403	
BP_0,3mm_30%	CI	28848	0,4
	DI	2403	

Kontakt-Bedingungen

Die Kontaktflächen der CI- und DI- Volumenkörper werden als Verbund modelliert, entsprechend der Kontinuumsannahme (siehe Kapitel 2.2.1). Die Kontaktflächen zwischen Auflager und CI- bzw. DI-Volumenkörper werden als reibungsfreier Kontakttyp modelliert. Als Zielkörper sind die CI- und DI-Volumenkörper und als Kontaktkörper die Auflager gewählt. Hierfür wurden die im Kontakt stehenden Oberflächen durch Flächenteilungen auf den für den Kontakt relevanten Bereich reduziert.

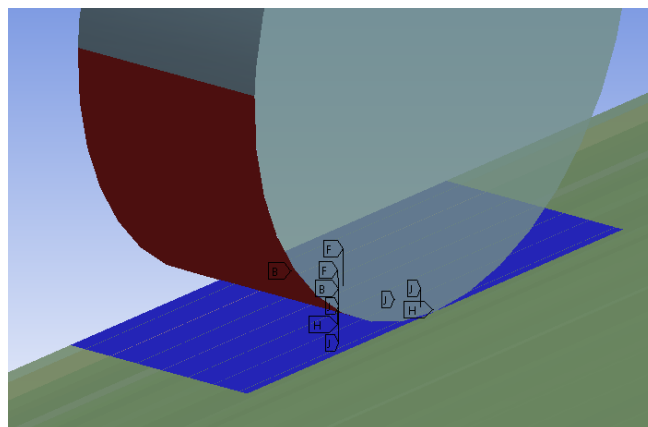


Abb. 4-11: Kontaktbereich zwischen dem Volumenkörper des oberen Auflagers und den CI- bzw. DI-Volumenkörpern

Abb. 4-11 zeigt den Kontaktbereich zwischen dem oberen Auflager und dem Ausschnitt der Biegeprobe. Blau hervorgehoben sind die für die Geometrieauswahl gewählten

Kontaktflächen des Zielkörpers, rot hervorgehoben die Kontaktfläche des Kontaktkörpers. Die Maße und Position der Kontaktflächen der Zielkörper ergeben sich aus der Projektion der Kontur der Mantelfläche des Auflagers auf die Oberfläche des Ausschnitts. Die Kontaktfläche des Auflagers ist durch die dem Zielkörper zugewandte Hälfte der Mantelfläche des Auflagers definiert.

Vernetzung

Die Vernetzung der CI- und DI-Volumen der Ausschnitte der Biegeproben wurde separat mittels Elementgrößen definiert. Die Bemaßung der Elementgröße hat einen signifikanten Einfluss auf die Elementanzahl und die benötigte Rechenzeit. Tab. 4-10 listet die verwendeten Maße der Elementgrößen $s_{Element_Größe}$ der CI- und DI-Volumen auf.

Tab. 4-10: Elementgrößen der Vernetzung der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der Biegeproben

Volumenkörper		$s_{Element_Größe}$ (mm)
BP_0,1mm_7,4%	CI	0,05
	DI	0,40
BP_0,1mm_27,1%	CI	0,05
	DI	0,50
BP_0,3mm_15%	CI	0,20
	DI	0,80
BP_0,3mm_30%	CI	0,20
	DI	0,80

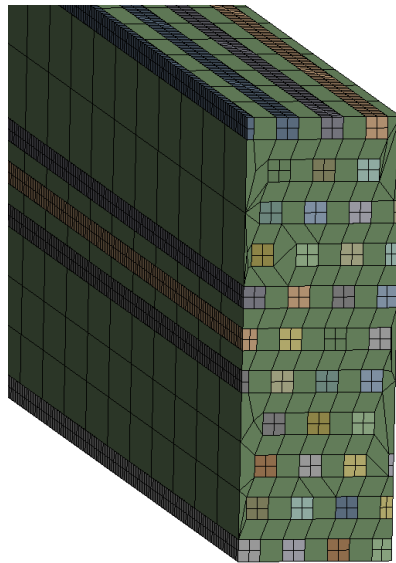


Abb. 4-12: Vernetzung der Probe BP_0,1mm_27,1%

Abb. 4-12 zeigt die Vernetzung der Probe BP_0,1mm_27,1%.

Randbedingungen

Die Lagerung des unteren Auflagers ist mittels einer externen Verschiebung realisiert. Die externe Verschiebung sperrt alle sechs Freiheitsgrade und bezieht sich auf die in Abb. 4-13 dargestellte Linie.

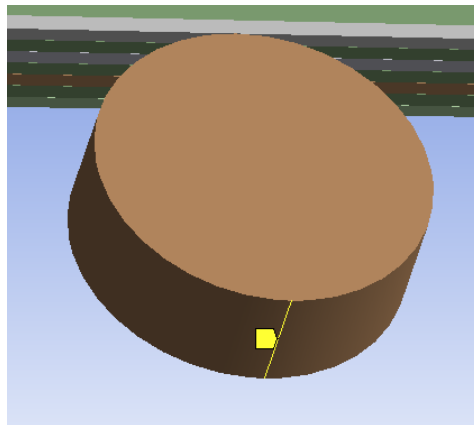


Abb. 4-13: Externe Verschiebung des unteren Auflagers

Abb. 4-13 zeigt das untere Auflager im Simulationsmodell sowie in gelb hervorgehoben die Bezugsgeometrie der externen Verschiebung. Die Bezugsgeometrie definiert sich durch die Spiegelung der Berührungslinie von Ausschnitt und Auflager an der Mittelachse des Auflagers.

Das obere Auflager wird analog zum unteren Auflager mit einer externen Verschiebung gelagert, jedoch ist für diese der Freiheitsgrad der Translation in z-Richtung frei. Zudem wird eine externe Kraft in negative z-Richtung auf das obere Auflager aufgebracht. Die Höhe der Kraft ergibt sich aus den im realen Biegeversuch vorliegenden Kräften. Die Bezugsgeometrie der externen Kraft entspricht der Kraft der externen Verschiebung.

Die Symmetriebedingung wird mittels einer reibungsfreien Lagerung der näher am oberen Auflager liegenden durch h_{BP} und $b_{A,BP}$ definierten Seitenfläche des Ausschnitts realisiert. Es ist zudem eine reibungsfreie Lagerung für eine der durch h_{BP} $l_{BP}/2$ definierten Seitenflächen des Ausschnitts festgelegt. Diese unterbindet eine Translation des Ausschnitts in Achsrichtung der Auflager.

Analyse-Einstellungen

Da es sich um ein linear elastisches Modell handelt ist die Anzahl und zeitliche Definition der Lastschritte nicht relevant.

Lösungsinformationen

Analog zum Versuchsaufbau nach Kapitel 4.1.1 wird die Durchbiegung im Mittelpunkt der durch Probenlänge und Probendicke definierten Seitenfläche bestimmt. Dies wird im Modell durch Hinzufügen einer Verschiebungskomponente mit Ausrichtung in z-Richtung realisiert. Über die Lastschritte wird die Durchbiegung mit der Kraftinformation der externen Kraft in Bezug gesetzt. Die Berechnung des Spannungsdehnungs-Zusammenhangs erfolgt analog zu Kapitel 5.1.1, unter Berücksichtigung der veränderten Probenbreite des Ausschnitts.

4.2.2 FEM-Simulation Zugversuch UD-Proben

Geometrie des Simulationsmodells

Für die Simulation der Zugproben werden repräsentative Volumenausschnitte des engen Querschnitts der Gesamtgeometrie verwendet. Die Köpfe der Zugstäbe werden nicht berücksichtigt. Tab. 4-11 gibt eine Übersicht der Abmaße der Ausschnitte.

Tab. 4-11 Abmaße der Ausschnitte der UD-Proben

Volumenkörper	b_{FEM_UD} (mm)	h_{FEM_UD} (mm)	l_{FEM_UD} (mm)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	3,20	2,00	3,00
ZP_längs_0,1mm_27,1%	3,20	2,00	3,00
ZP_längs_0,3mm_12,2%	3,20	2,00	3,00
ZP_längs_0,3mm_30,7%	3,20	2,00	6,00
ZP_quer_0,1mm_7,4%	3,20	2,00	11,32
ZP_quer_0,1mm_27,1%	1,25	2,00	3,00
ZP_quer_0,3mm_15%	3,20	2,00	6,00
ZP_quer_0,3mm_30%	3,20	2,00	6,00

Tab. 4-11 listet die gewählten Abmaße der quaderförmigen Ausschnitte der UD-Proben auf. Dabei beschreibt b_{FEM_UD} die Breite, h_{FEM_UD} die Dicke und l_{FEM_UD} die Länge des Ausschnitts.

Werkstoffdaten

Tab. 4-12 listet die zugewiesenen Werkstoffdaten der CI- bzw. DI-Volumenkörper der Ausschnitte der Zugproben auf. Das Materialverhalten wird linear-elastisch und isotrop modelliert.

Tab. 4-12: Materialdaten der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der UD-Proben

Volumenkörper		E (MPa)	ν (-)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	CI	27399,4	0,41
	DI	1840,3	0,40
ZP_längs_0,1mm_27,1%	CI	27399,4	0,41
	DI	1840,3	0,40
ZP_längs_0,3mm_12,2%	CI	27399,4	0,41
	DI	1840,3	0,40
ZP_längs_0,3mm_30,7%	CI	27399,4	0,41
	DI	1840,3	0,40
ZP_quer_0,1mm_7,4%	CI	27399,4	0,41
	DI	1840,3	0,40
ZP_quer_0,1mm_27,1%	CI	27399,4	0,41
	DI	1840,3	0,40
ZP_quer_0,3mm_15%	CI	27399,4	0,41
	DI	1840,3	0,40
ZP_quer_0,3mm_30%	CI	27399,4	0,41
	DI	1840,3	0,40

Kontakt-Bedingungen

Die Kontaktflächen der CI- und DI Volumenkörper werden als Verbund modelliert, analog zu Kapitel 4.2.1.

Vernetzung

Die Vernetzungen der CI- und DI-Volumen der Ausschnitte der Biegeproben werden separat mittels Elementgrößen definiert. Die Bemaßung der Elementgröße hat einen signifikanten Einfluss auf die Elementanzahl und die benötigte Rechenzeit. Tab. 4-13 listet die verwendeten Maße der Elementgrößen $s_{Element_Größe}$ der CI- und DI-Volumenkörper auf.

Tab. 4-13: Elementgrößen der Vernetzung der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der UD-Proben

Volumenkörper		$s_{Element_Größe}$ (mm)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	CI	0,03
	DI	0,10
ZP_längs_0,1mm_27,1%	CI	0,03
	DI	0,10
ZP_längs_0,3mm_12,2%	CI	0,03
	DI	0,05
ZP_längs_0,3mm_30,7%	CI	0,03
	DI	0,05
ZP_quer_0,1mm_7,4%	CI	0,025
	DI	0,05
ZP_quer_0,1mm_27,1%	CI	0,03
	DI	0,10
ZP_quer_0,3mm_15%	CI	0,03
	DI	0,05
ZP_quer_0,3mm_30%	CI	0,03
	DI	0,05

Randbedingungen

Die quaderförmigen Ausschnitte sind an drei Seitenflächen, welche sich in einem Eckpunkt des Gesamtkörpers schneiden, reibungsfrei gelagert.

Die Kraft wird flächig auf der normal zur Zugrichtung nach Versuch liegenden Seitenfläche (gegenüber der reibungsfreien Lagerung) aufgebracht. Das Verhalten der Kraft ist als verformbar definiert. Der Kraftvektor ist normal zur Fläche definiert.

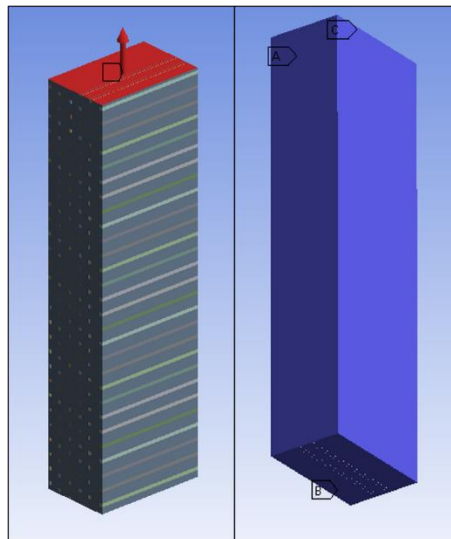


Abb. 4-14: Randbedingungen am Ausschnitt der UD-Proben, externe Kraft (links) und reibungsfreie Lagerung (rechts)

Abb. 4-14 zeigt die oben beschriebenen Randbedingungen am Ausschnitt der Probekörpervariante ZP_quer_0,1mm_7,4%. Links ist die externe Kraft und ihre Bezugsgeometrie zu sehen. Rechts sind die als reibungsfreien Lager definierten Seitenflächen blau hervorgehoben erkennbar.

4.2.3 FEM-Simulation Zugversuch Laminat-Proben

Der prinzipielle Aufbau des Simulationsmodells der Laminat-Proben entspricht dem des vorherigen Kapitels.

Tab. 4-14 Abmaße der Ausschnitte der Laminat-Proben

Volumenkörper	b_{FEM_LP} (mm)	h_{FEM_LP} (mm)	l_{FEM_LP} (mm)
LP_0,1mm_19,7%	3	1	3
LP_0,3mm_30%	6	2	6

Tab. 4-14 listet die Maße der Ausschnitte aus den Laminatproben auf. Die Schnittebene für LP_0,1mm_19,7% ist durch die xy-Ebene und den Bauteilmittelpunkt definiert.

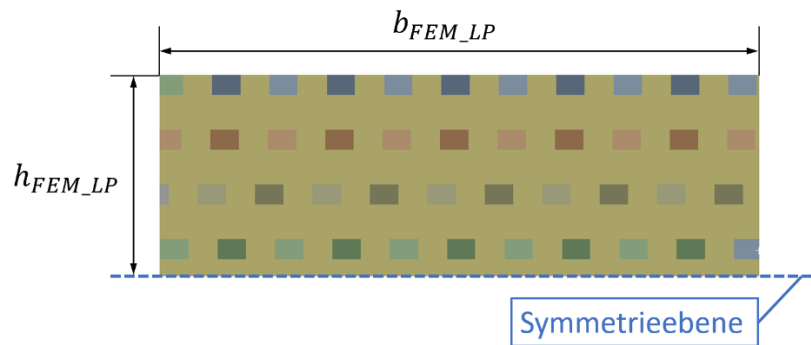


Abb. 4-15: Seitenansicht des Ausschnitts der Probekörpervariante LP_0,1mm_19,7%

Abb. 4-15 zeigt die Seitenansicht des Ausschnitts der Probekörpervariante LP_0,1mm_19,7% sowie dessen Symmetrieebene.

Tab. 4-15: Materialdaten der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der Laminatproben

Volumenkörper		E (MPa)	ν (-)
LP_0,1mm_19,7%	CI	1840,3	0,41
	DI	27399,4	0,40
LP_0,3mm_30%	CI	1840,3	0,41
	DI	27399,4	0,40

Tab. 4-15 listet die im Modell für das CI- bzw. DI-Material verwendeten Materialdaten auf. Analog zu den in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Modellen wird das Materialverhalten als isotrop elastisch angenommen.

Tab. 4-16: Elementgrößen der Vernetzung der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der Laminatproben

Volumenkörper		$s_{Element_Größe}$ (mm)
LP_0,1mm_19,7%	CI	0,03
	DI	0,05
LP_0,3mm_30%	CI	0,06
	DI	0,10

Tab. 4-16 gibt eine Übersicht der verwendeten Maße der Elementgrößen $s_{Element_Größe}$ für die CI- bzw. DI-Volumenkörper.

4.2.4 CLT-Berechnung der Laminatproben

Zur Berechnung der Laminatproben wurde die Software Altair ESAComp 2020 verwendet. Die Berechnung erfolgt nach der CLT [92].

Definition der UD-Einzelschicht

Zur Beschreibung der UD-Einzelschicht werden die Größen nach der Steifigkeitsmatrix (2-19) benötigt. Die Werkstoffdaten der Elastizitätsmodule ergeben sich aus Gleichung (2-6) und (2-13). Für den Quer-Längs-Schubmodul wird der Wert nach Grundgleichung (2-16) und der halbempirischen Gleichung (2-17) verwendet. Für die Querkontraktionszahl wird ein Wert von 0,4 verwendet (siehe Kapitel 5.1.2.1).

Die Werte der Schubmodule des CI- und DI-Materials ergeben sich unter der Annahme eines isotropen Materialverhaltens nach Gleichung (2-18).

Der Werte der Schichtdicke h_{ES} wurde nach der folgenden Formel bestimmt:

$$h_{ES} = \frac{h}{n} \quad (4-1)$$

Dabei beschreibt h die Dicke des Laminats (2 mm) und n die Anzahl der Lagen.

Tab. 4-17: Werkstoffdaten der UD-Einzelschichten der Laminatproben in der CLT-Berechnung

Probe	E_{\parallel} (MPa)	E_{\perp} (MPa)	G_{12} (MPa)	$G_{12_{HE}}$ (MPa)	h_{ES} (mm)	$\nu_{\perp\parallel}$ (-)
LP_0,1mm_19,7%	6875,4	3980,0	805,2	1151,6	0,25	0,4
LP_0,3mm_30%	9212,4	4667,2	912,6	1348,5	0,5	0,4

Tab. 4-17 gibt eine Übersicht der im Rahmen der CLT-Berechnung verwendeten Werkstoffdaten der UD-Einzelschicht.

Definition des Laminats

Die Definition des Laminats ergibt sich aus dem in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Aufbau. Dabei sind die CI-Leiterbahnen in einem orthotropen $\pm 45^\circ$ Aufbau im Bauteil orientiert. Das Laminat der Probe LP_0,1mm_19,7% besteht aus acht Lagen und das der Probe LP_0,3mm_30% aus vier Lagen.

Lastfall

Als Last wurde eine Normalkraft in Höhe von 70000 N/m in x-Richtung definiert.

5 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.1 beschriebenen Versuche ausgewertet und die Ergebnisse mit den in vorangegangenen Kapiteln beschriebenen computergestützten Berechnungen verglichen. Zudem werden die in Kapitel 2.2 beschriebenen Materialmodelle auf ihre Anwendbarkeit, unter Berücksichtigung der ermittelten Materialkennwerte, überprüft.

5.1 Auswertung Versuchsprogramm

Prozessbedingte Geometrieabweichungen

Bedingt durch den Fertigungsprozess kommt es neben Maßabweichungen auch zu geometrischen Abweichungen der Seitenflächen der Proben. Die Abweichungen erzeugen für ein quaderförmig konstruiertes Bauteil vereinfacht einen trapezförmigen Querschnitt. Um diesen Effekt auszugleichen, wird die Breite b der im Rahmen dieser Arbeit geprüften Proben auf mittlerer z -Höhe vermessen.

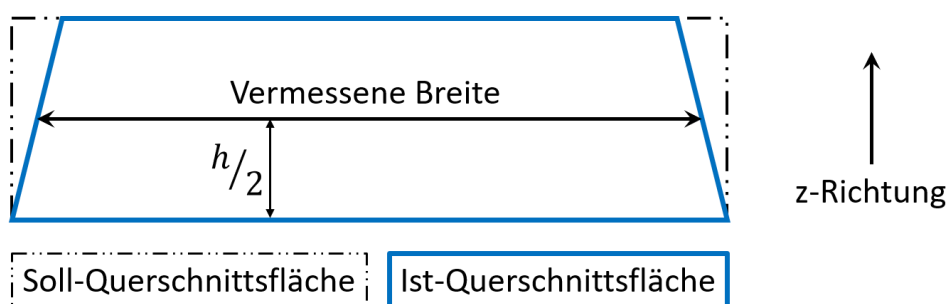


Abb. 5-1: Vermessungsmethode unter der Annahme eines trapezförmigen Querschnitts

Abb. 5-1 veranschaulicht einen rechteckig konstruierten Querschnitt (Soll-Querschnittsfläche), den real vorliegenden Querschnitt (Ist-Querschnittsfläche) sowie die vermessene Breite.

5.1.1 Auswertung Biegeversuch

Im Folgenden wird auf die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe Biegeversuch eingegangen. Zunächst werden die gemessenen Widerstandswerte der mit den Lötstellen verbundenen Leiterbahnen aufgelistet.

Widerstandsmessung

Die Leitfähigkeitsmessung wurde mittels eines Metrahit IM XTRA Multimeters und 4-Punkt Messsonden durchgeführt. Die Messsonden wurden hierbei auf den Lötstellen, möglichst nahe zu den Leiterbahnen platziert.

Tab. 5-1: Ergebnisse der Widerstandsmessung der Biegeproben

Probenbezeichnung	$n_{Leitung}$ (Stück)	$A_{Leitung}$ (mm ²)	$l_{Leitung}$ (mm)	$R_{Leitung}$ (mΩ)
BP_0,1mm_7,4%B	9	0,01	70	29,4
	8			31,7
	8			31,7
	9			30,5
BP_0,1mm_7,4%C	9	0,01	70	30,3
	8			33,1
	8			32,9
	9			32,2
BP_0,3mm_30%A	6	0,09	70	4,8
	5			5,5
	5			5,5
	6			5,1
BP_0,3mm_30%B	6	0,09	70	4,7
	5			5,5
	5			5,5
	6			4,5
BP_0,3mm_15%A	3	0,09	70	9,5
				9,1
				9,1
				9,9
BP_0,3mm_15%B	3	0,09	70	9,9
				8,8
				8,9
				9,2

Tab. 5-1 listet die Länge der CI-Leiterbahnen $l_{Leitung}$, die Querschnittsfläche der Leiterbahnen $A_{Leitung}$, die Anzahl der parallel geschalteten Leiterbahnen $n_{Leitung}$ zwischen den entsprechenden Lötstellen (siehe Abb. 4-4) sowie den gemessenen Widerstandswert $R_{Leitung}$ auf.

Die Angaben der Länge der Leiterbahnen sowie der Querschnittsfläche der Leiterbahnen beziehen sich auf die Maße des 3D-Modells. Fertigungsbedingte Abweichungen sind nicht berücksichtigt. Die Leitungen der Proben BP_0,1mm_27,1%A und BP_0,1mm_27,1%B sind kurzgeschlossen. Dies ist neben dem geringen Abstand der Leiterbahnen auf deren Position im Bauraum zurückzuführen. Die Oberfläche der betroffenen Leitungen entspricht der ersten Schicht im Baujob. Die Seitenlänge s_q der Leiterbahnen in xy-Ebene ist in der Anfangsschicht erhöht. Dies ist möglicherweise auf das Benetzungsverhalten des CI-Materials auf der Oberfläche der PET-Substratfolie des Druckbettes zurückzuführen.

Berechnung Vierpunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125 [89]

Nach DIN EN ISO 14125 berechnet sich die Biegespannung σ_f beim Vierpunkt-Biegeversuch wie folgt:

$$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2} \quad (5-1)$$

Dabei bezeichnet F die gemessene Kraft (siehe Kapitel 4.1.1), L_{BV} die Stützweite, b die Probenbreite und h die Probendicke. Das Biegemodul E_f wird bei einer Versagensdehnung größer als 0,0025 bei den Randfaserdehnungen $\varepsilon_f' = 0,0005$ und $\varepsilon_f'' = 0,0025$ bestimmt. Die Dehnung der Randfaser ε_f hängt dabei nach Gleichung (5-2) von der Durchbiegung der Balkenmitte s , der Probendicke h und der Probenlänge L ab:

$$\varepsilon_f = \frac{4,7sh}{L^2} \quad (5-2)$$

Für die Berechnung des Biegemoduls gibt DIN EN ISO 14125 zwei mögliche Berechnungsformeln an. Die erste lautet:

$$E_f = \frac{0,21L^3}{bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (5-3)$$

Dabei bezeichnet ΔF die Differenz der Kräfte F' und F'' bei den Durchbiegungen s' und s'' . Die Alternative Formel ergibt sich aus den Biegespannungen σ_f' und σ_f'' bei den Durchbiegungen s' bzw. s'' .

$$E_f = 500 \cdot (\sigma_f'' - \sigma_f') \quad (5-4)$$

Für die Werte des Biegemoduls wird Gleichung (5-4) verwendet.

Im Falle von großen Durchbiegungen mit $s > 0,1L$ werden von der Norm für die Biegespannung und Dehnung folgende korrigierte Gleichungen vorgeschrieben:

$$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2} \left\{ 1 + 8,78 \left(\frac{s}{L} \right)^2 - 7,04 \left(\frac{sh}{L^2} \right) \right\} \quad (5-5)$$

$$\varepsilon_f = \frac{h}{L} \left\{ 4,70 \frac{s}{L} - 14,39 \left(\frac{s}{L} \right)^3 + 27,70 \left(\frac{s}{L} \right)^5 \right\} \quad (5-6)$$

Aufgrund der niedrigen erreichten Durchbiegungen der Proben sind diese für die Auswertung nicht relevant.

Probekörperabmessungen

Tab. 5-2 zeigt die für die Berechnung relevanten Abmessungen der Biegeproben.

Tab. 5-2: Probekörperabmessungen der Biegeproben

Probenbezeichnung		h_{BP} (mm)	b_{BP} (mm)
BP_0,1mm_7,4%	A	2,02	14,84
	B	1,87	14,82
	C	1,87	14,82
BP_0,1mm_27,1%	A	1,71	14,80
	B	1,74	14,80
BP_0,3mm_30%	A	1,85	14,80
	B	1,85	14,80
BP_0,3mm_15%	A	1,87	14,80
	B	1,87	14,80

Spannungs-Dehnungs Verläufe der Biegeproben

Im Folgenden werden die Verläufe der Biegespannung über der Dehnung der Biegeproben dargestellt. Zudem werden die nach Norm berechneten Werte der Biegemodule und Bruchdehnungen in Tab. 5-3 aufgelistet. Die Verläufe werden dabei nach Probenvarianten geordnet präsentiert.

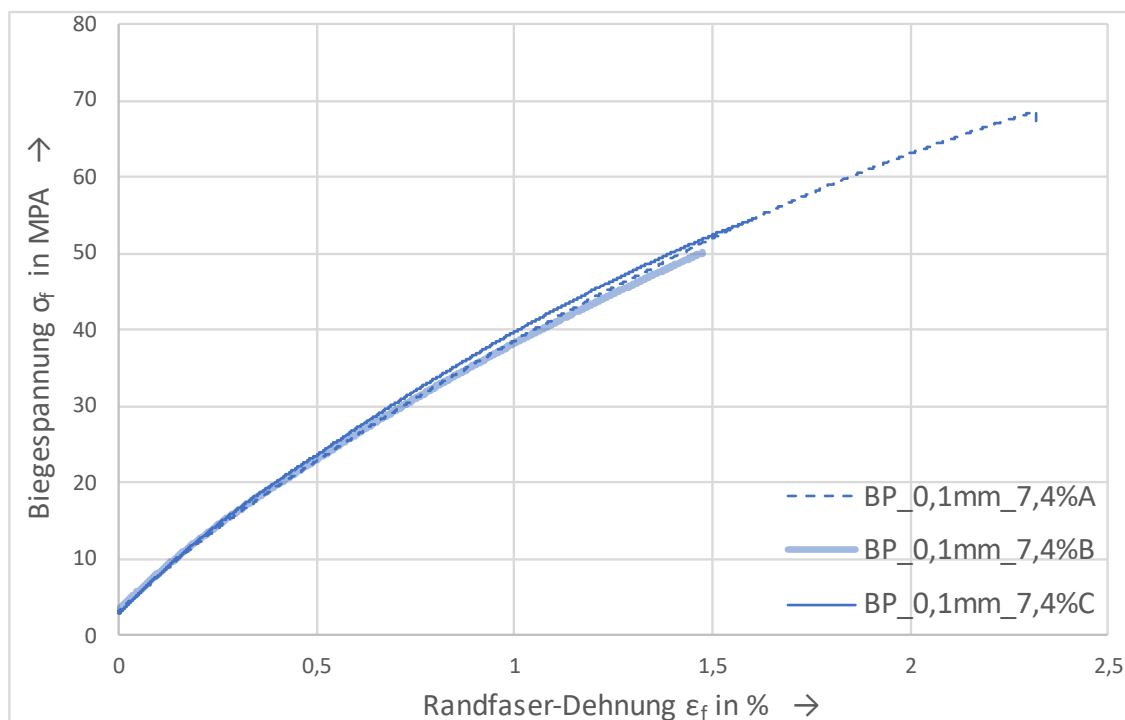


Abb. 5-2: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ϵ_f der Proben BP_0,1mm_7,4%

Abb. 5-2 zeigt den Verlauf der Biegespannung σ_f über der Dehnung der Randfaser ϵ_f der Probekörpervariante BP_0,1mm_7,4%. Die Probe BP_0,1mm_7,4%A ist in einem anderen Baujob als die Proben BP_01_7_4%B und BP_0,1mm_7,4%C gefertigt. Zudem ist Probe BP_0,1mm_7,4%A 90° gedreht zur Bewegungsrichtung des Druckkopfs orientiert. Auffällig ist die deutlich höhere Bruchdehnung von BP_0,1mm_7,4%A. Die Verläufe zeigen eine hohe Übereinstimmung.

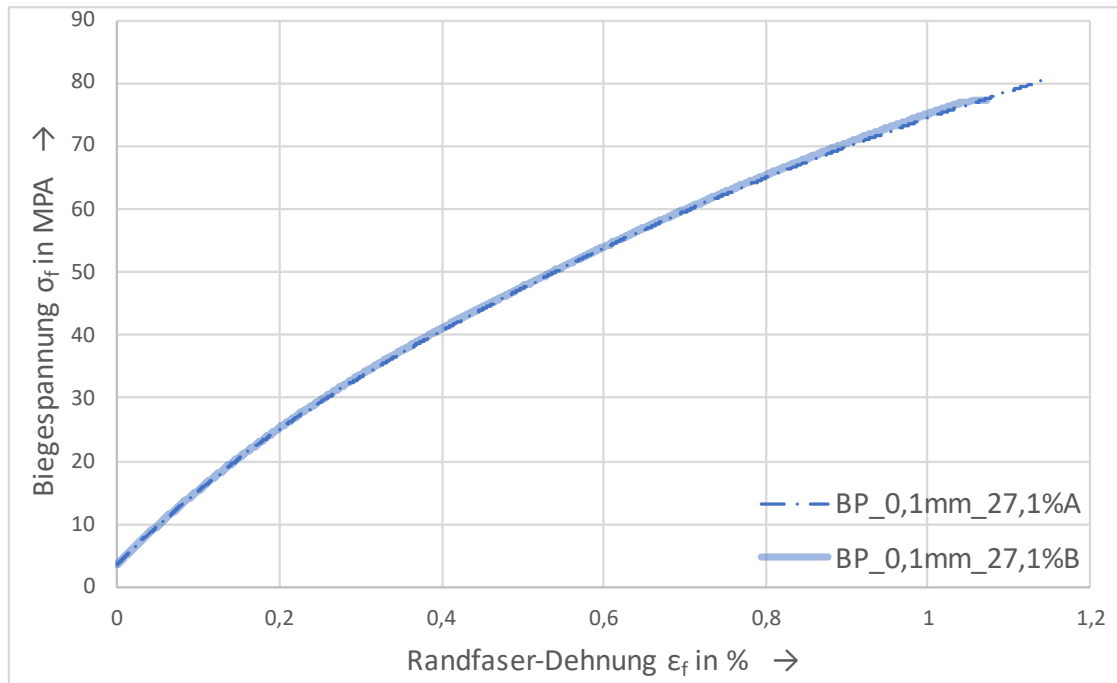


Abb. 5-3: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ϵ_f BP_0,1mm_27,1%

Abb. 5-3 zeigt den Verlauf der Biegespannung σ_f über der Dehnung der Randfaser ϵ_f der Probekörpervariante BP_0,1mm_27,1%. Analog zu den Verläufen der vorgehenden Probekörpervariante weichen die Verläufe nur sehr geringfügig voneinander ab.

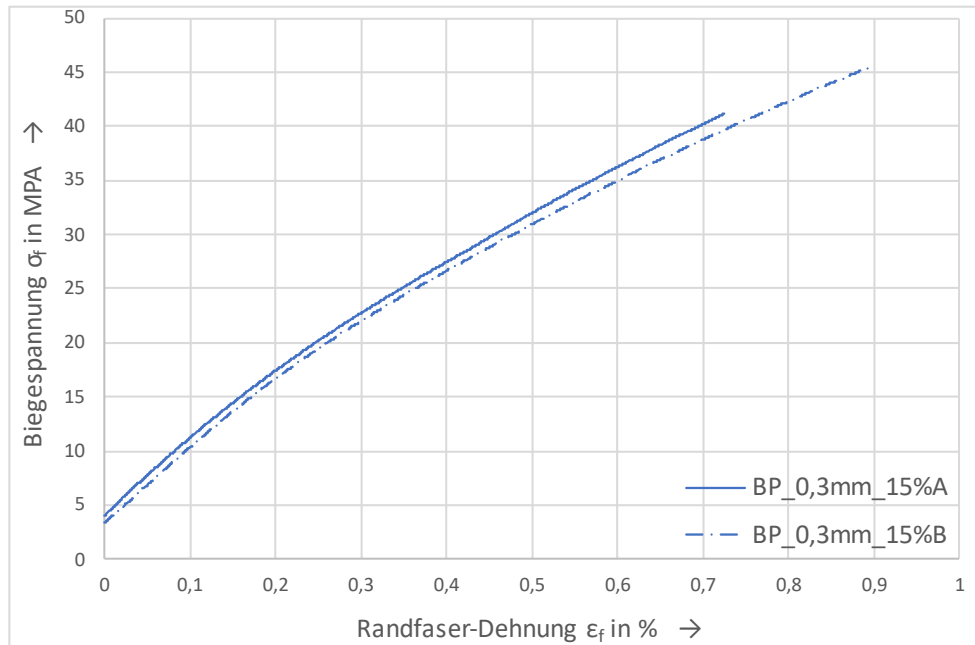


Abb. 5-4: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ϵ_f BP_0,3mm_15%

Abb. 5-4 zeigt den Verlauf der Biegespannung σ_f über der Dehnung der Randfaser ϵ_f der Probekörpervariante BP_0,3mm_15%. Die Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung miteinander.

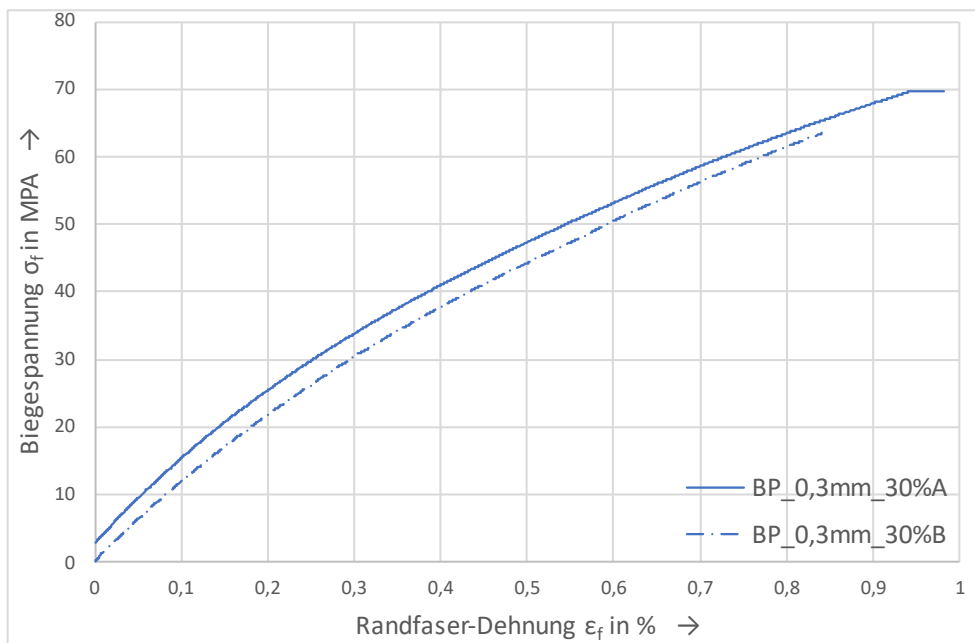


Abb. 5-5: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ϵ_f BP_0,3mm_30%

Abb. 5-5 zeigt den Verlauf der Biegespannung σ_f über der Dehnung der Randfaser ϵ_f der Proben BP_0,3mm_30%A und BP_0,3mm_30%B.

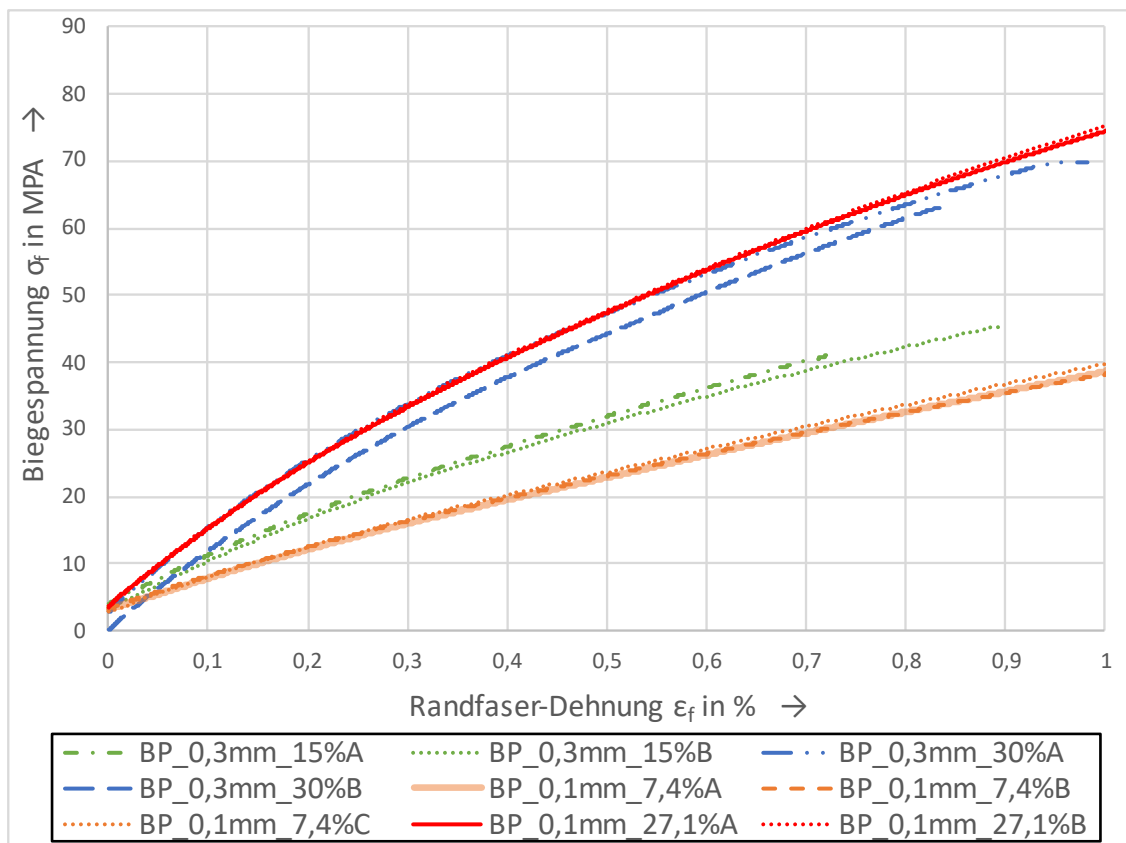


Abb. 5-6: Gesamtübersicht Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f der Biegeproben

Abb. 5-6 stellt eine Gesamtübersicht der Verläufe der Biegespannung über der Randfaser-Dehnung der Biegeproben dar. Die Verläufe der Probekörpervariante BP_0,1mm_27,1% verlaufen ab einer Randfaserdehnung von ca. 0,6 % leicht steiler als die der Probekörpervariante BP_0,3mm_30%.

Tab. 5-3 listet, die für die Proben der Versuchsreihe ermittelten Werte der Biegemodule E_f (siehe Gleichung (5-4)), der Biegefestigkeiten σ_{fM} sowie der Dehnung bei Biegefestigkeit ε_M auf. Letztere entsprechen den Werten bei Bruch.

Tab. 5-3: Messergebnisse der Versuchsreihe Biegeversuch

Probekörper		E_f (Gpa)	σ_{fM} (Mpa)	ε_M (%)
BP_0,1mm_7,4%	A	4,31	68,67	2,32
	B	4,28	50,14	1,47
	C	4,55	54,67	1,61
BP_0,1mm_27,1%	A	9,80	80,62	1,15
	B	9,86	77,14	1,14
BP_0,3mm_15%	A	6,21	41,16	0,72
	B	6,30	45,49	0,89
BP_0,3mm_30%	A	10,14	69,77	1,04
	B	9,93	63,49	0,84

Materialmodell Längs-Elastizitätsmodul

Bei den Probekörpern der Versuchsreihe Biegeversuch handelt es sich um einen UD-verstärkten Verbund, der parallel zu den CI-Leitungen belastet wurde. Um die Anwendbarkeit der linearen Mischungsregel nach Gleichung (2-6) zu prüfen wird der Zusammenhang zwischen den Biegemodulen E_f (siehe Tab. 5-3) und den zugehörigen CI-Volumenanteilen ϕ untersucht. Dabei werden die Proben nach CI-Leiterbahn-Querschnittsfläche getrennt betrachtet ($s_q = 0,1 \text{ mm}$ oder $s_q = 0,3 \text{ mm}$). Bei Einsetzen der durchschnittlich ermittelten Biegemodule und den zugehörigen CI-Volumenanteilen in Gleichung (2-6) ergibt sich für die Probekörpervarianten mit $s_q = 0,1 \text{ mm}$ bzw. $s_q = 0,3 \text{ mm}$ je ein lineares Gleichungssystem mit zwei Unbekannten.

Die Lösung dieses Gleichungssystems ergibt für die Biegeelastizität des als Matrix betrachteten DI-Materials E_{f_DI} :

$$E_{f_DI} = \frac{E_{f_A} - E_{f_B} \cdot \frac{\phi_A}{\phi_B}}{\left(1 - \frac{\phi_A}{\phi_B}\right)} \quad (5-7)$$

Dabei bezieht sich die Indizierung A auf die Daten einer der Probekörpervarianten mit $s_q = 0,1 \text{ mm}$ bzw. $s_q = 0,3 \text{ mm}$ und B auf die Daten der jeweils anderen mit gleichem Wert für s_q . Für die Biegeelastizität des CI-Materials E_{f_CI} lautet der Zusammenhang:

$$E_{f_CI} = \frac{E_f - E_{f_DI} \cdot (1 - \phi)}{\phi} \quad (5-8)$$

Für die Biegesteifigkeit E_f und den CI-Volumenanteil ϕ werden ausschließlich die Werte einer Indizierung eingesetzt.

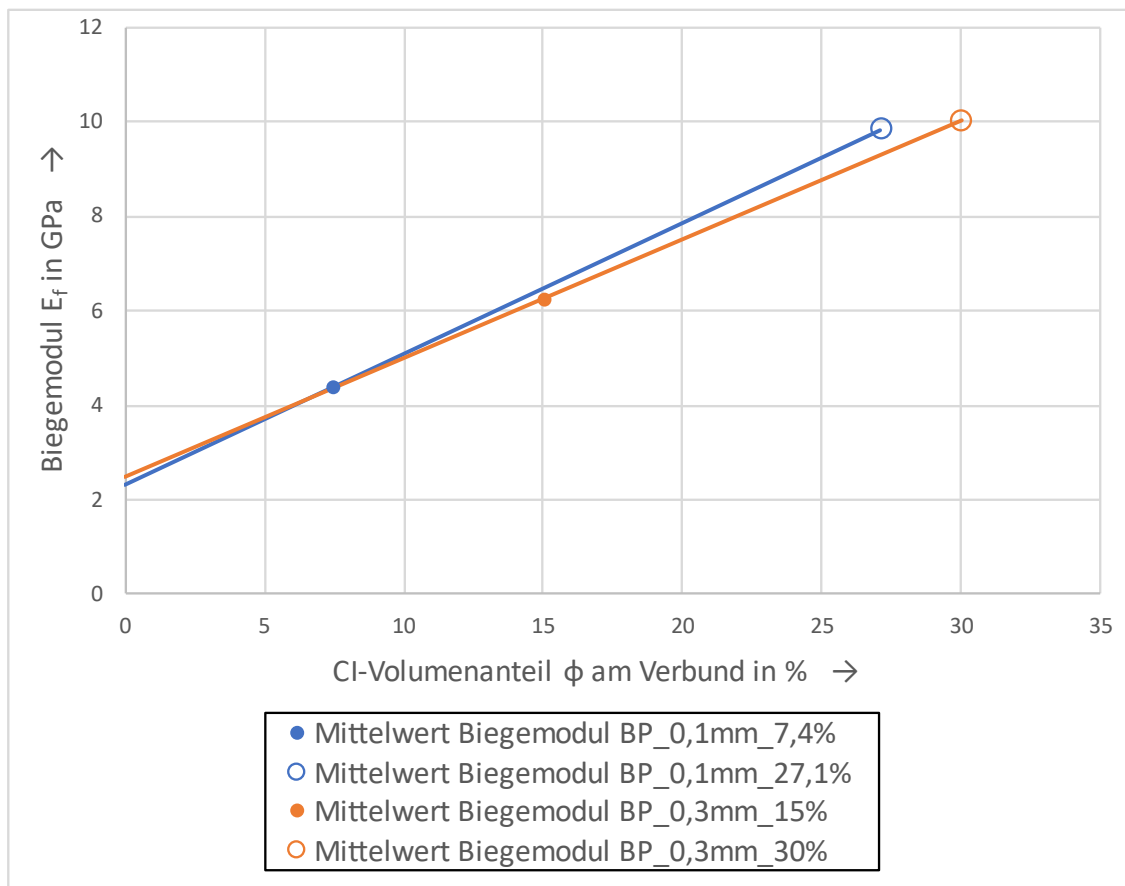


Abb. 5-7: Biegemodul E_f über CI-Volumenanteil ϕ der Biegeproben

Abb. 5-7 zeigt die Mittelwerte der Biegemodule E_f der Biegeproben über den, den Proben zugehörigen CI-Volumenanteilen ϕ . Die Mittelwerte der Biegemodule werden dabei nach Querschnittsfläche der CI-Leiterbahnen getrennt zu linearen Verläufen verbunden. Die sich daraus ergebenden Verläufe zeigen eine hohe Übereinstimmung. Die interpolierten Werte für $\phi = 0\%$ entsprechen der Rückrechnung für ein Bauteil aus reinem DI-Material.

Tab. 5-4 zeigt die nach Gleichung (5-7) und (5-8) errechneten Werte der Biegeelastizität für einen CI-Volumenanteil von 0 % bzw. 100 %.

Tab. 5-4: Rückrechnung der Biegemodule E_f für $\phi=0\%$ und $\phi=100\%$

ϕ (%)	s_q (mm)	E_f (MPa)
0	0,1	2329
	0,3	2477
100	0,1	30028
	0,3	27668

Auswertung der Widerstandsmessung

Die Widerstandsmessung übermittelte bei allen Proben über die Prüfdauer bis zum Bruch der Probe einen konstanten Widerstandswert. Ein Bruch oder Teilbruch einzelner Leiterbahnen mit daraus resultierendem Anstieg des Widerstandes konnte vor dem Bruch des gesamten Bauteils nicht detektiert werden. Bei Bruch der Probe erhöhte sich der Widerstandswert sprunghaft auf den Maximalwert des ADC.

Optische Auswertung der Biegeproben

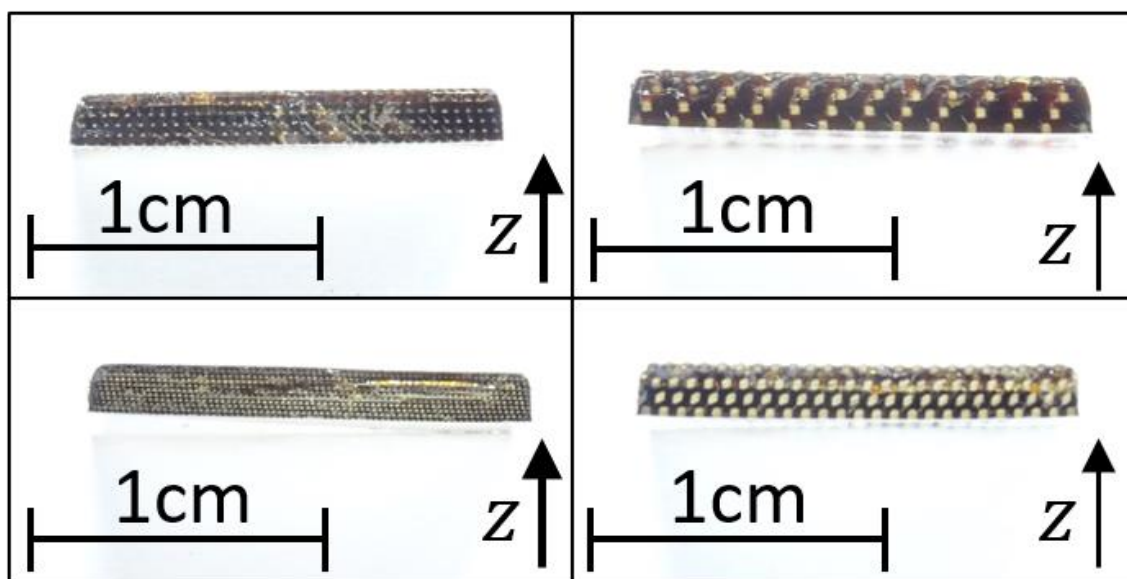


Abb. 5-8: Bruchfläche der Probe BP_0,1mm_7,4%A (oben links), BP_0,1mm_27,1%A (unten links), BP_0,3mm_15%A (oben rechts), BP_0,3mm_30%A (unten rechts)

Abb. 5-8 zeigt die Bruchflächen der Proben BP_0,1mm_7,4%A (oben links), BP_0,1mm_27,1%A (unten links), BP_0,3mm_15%A (oben rechts), BP_0,3mm_30%A (unten rechts).



Abb. 5-9: Bruchflächen der Proben BP_0,1mm_7,4%A (links) und BP_0,1mm_7,4%B (rechts)

Abb. 5-9 zeigt die Bruchflächen der Proben BP_0,1mm_7,4%A (links) und Probe BP_0,1mm_7,4%B (rechts). Die Probe BP_0,1mm_7,4%B ist im Versuch nicht vollständig gebrochen. In der Abbildung der Probe BP_0,1mm_7,4%A ist eine relativ glatte Bruchoberfläche der auf Zug belasteten Bereiche (unten im Bild) zu erkennen. Im mittleren Bereich ist ein Versagen zwischen den Schichten zu erkennen. Zudem fällt die oben beschriebene kurzgeschlossene Oberfläche durch ihre starke Reflexion auf.

Im rechten Bild ist die oben liegende Seite der Bruchfläche auf Zug belastet und im linken Bild die unten liegende.

5.1.2 Auswertung Zugversuch UD-Proben

Berechnung Zugversuch nach DIN EN ISO 527 [90]

Nach obiger Norm berechnet sich die Spannung σ im durch L_0 festgelegten Querschnitt des Probekörpers aus der Kraft F und der Anfangsquerschnittsfläche A (siehe Kapitel 4.1.2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5-9)$$

Die Dehnung ε ergibt sich aus dem Quotienten der Verlängerung des Probekörpers zwischen den Messpunkten ΔL_0 und der Messlänge L_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (5-10)$$

Im Rahmen der Arbeit wird der Zugmodul E_t mittels Regressionsgerade berechnet. Diese wird nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate im Dehnungsbereich $0,0005 \leq \varepsilon \leq 0,0025$ bestimmt. Die Steigung der Regressionsgerade $d\sigma/d\varepsilon$ definiert den Zugmodul:

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (5-11)$$

Die Querkontraktionszahl ν ergibt sich aus dem Quotienten der Querdehnung ε_q und der Längsdehnung ε .

$$\nu = -\frac{L_0}{\Delta L_0} \cdot \frac{\Delta L_{0_quer}}{L_{0_quer}} \quad (5-12)$$

Dabei bezeichnet ΔL_{0_quer} die Änderung der Messlänge in Querrichtung L_{0_quer} .

Probekörperabmessungen

Die Probekörperabmessungen Probenlänge l_{ZP_3} und Probenbreite b_{ZP_1} sind mittels Messschieber ermittelt. Die Probendicke h_{ZP} ist mittels Messschraube bestimmt. Die Messlänge L_0 über das Messsystem bestimmt (siehe Kapitel 4.1.2).

Die Vermessung der längs-verstärkten UD-Proben ergibt für die berechnungsrelevanten Abmessungen und die Gesamtlänge l_{ZP_3} die in Tab. 5-5 dargestellten Messwerte.

Tab. 5-5: Probekörperabmessungen der längs-verstärkten UD-Proben

Probenbezeichnung		h_{ZP} (mm)	b_{ZP_1} (mm)	l_{ZP_3} (mm)	L_0 (mm)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	A	2,05	3,06	47,57	20,46
	B	2,04	3,06	47,58	20,55
	C	2,02	3,08	47,58	20,44
ZP_längs_0,1mm_27,1%	A	1,79	3,03	47,69	19,95
	B	1,81	3,07	47,70	20,78
	C	1,80	3,05	47,70	19,98
	D	1,74	3,04	47,69	20,53
	E	1,80	3,06	47,69	20,27
ZP_längs_0,3mm_12,2%	A	2,09	3,12	47,68	20,20
	B	2,09	3,07	47,69	20,26
	C	2,06	3,14	47,69	19,97
ZP_längs_0,3mm_30,7%	A	1,92	3,11	47,72	20,41
	B	1,91	3,10	47,73	20,14
	C	1,91	3,12	47,71	20,42
	D	1,91	3,14	47,70	20,33
	E	1,90	3,12	47,74	20,31

Für die quer-verstärkten UD-Proben ergeben sich die Messwerte in Tab. 5-6.

Tab. 5-6: Probekörperabmessungen der quer-verstärkten UD-Proben

Probenbezeichnung		h_{ZP} (mm)	b_{ZP_1} (mm)	l_{ZP_3} (mm)	L_0 (mm)
ZP_quer_0,1mm_7,4%	A	1,92	2,88	47,45	20,24
	B	2,08	3,05	47,47	20,53
	C	2,02	3,08	47,44	20,44
	D	2,07	3,07	47,48	19,86
ZP_quer_0,1mm_27,1%	A	1,79	3,09	47,53	20,19
	B	1,81	3,06	47,56	20,38
	C	1,80	3,07	47,56	20,04
ZP_quer_0,3mm_15%	A	2,04	3,11	47,45	20,66
	B	2,06	3,11	47,44	20,22
	C	1,97	3,02	47,40	20,51
ZP_quer_0,3mm_30%	A	1,91	3,15	47,50	20,30
	B	1,92	3,07	47,48	20,54
	C	1,89	3,11	47,44	20,41

5.1.2.1 Längs-verstärkte UD-Proben

Spannungs-Dehnungs-Verläufe der längs verstärkten UD-Proben

Im Folgenden werden die Verläufe der Zugspannung über der Längs- und Querdehnung, der längs-verstärkten UD-Proben dargestellt. Die Verläufe der Probekörpervarianten werden nach Leiterbahnquerschnittsflächen getrennt präsentiert. Längs- und Querdehnung werden ebenfalls getrennt präsentiert.

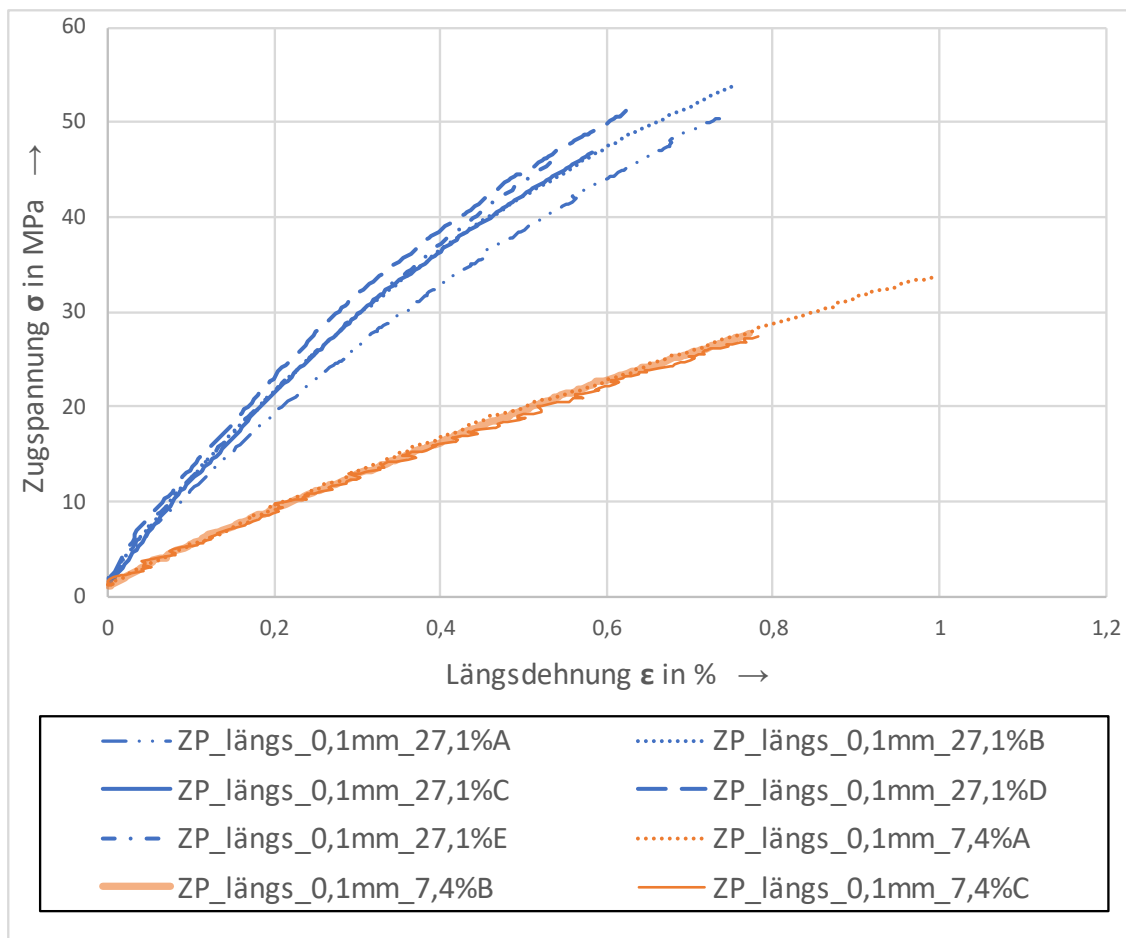


Abb. 5-10: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Probekörpervarianten ZP_längs_0,1mm

Abb. 5-10 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Probekörpervarianten ZP_längs_0,1mm_7,4% und ZP_längs_0,1mm_27,1%. Auffällig sind die deutlich steileren Verläufe der Proben mit höherem CI-Volumenanteil. Zudem weisen die Verläufe der Proben mit einem CI-Volumenanteil ϕ von 7,4 % einen sehr geringeren Rückgang der Steigung auf, während die Verläufe der Proben mit 27,1 % CI-Volumenanteil einen im Vergleich starken Rückgang der Steigung zeigen. Zudem weisen die Verläufe der Probekörpervariante ZP_längs_0,1mm_7,4% wesentlich geringere Abweichungen untereinander auf. Die Verläufe der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% weichen teilweise stark voneinander ab.

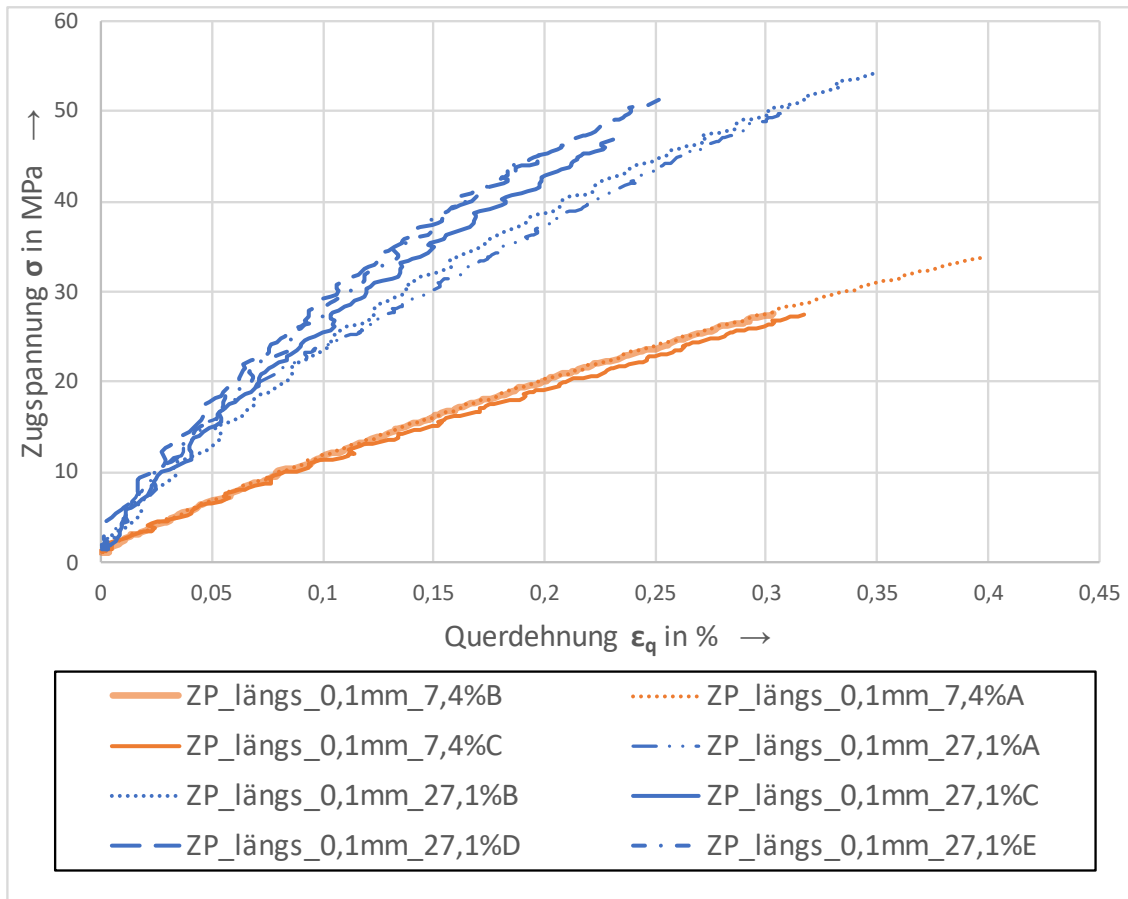


Abb. 5-11: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Probekörpervarianten ZP_längs_0,1mm

Abb. 5-11 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Probekörpervarianten ZP_längs_0,1mm_7,4% und ZP_längs_0,1mm_27,1%. Analog zu den Längsdehnungen weichen die Verläufe der Proben mit 27,1 % CI-Volumenanteil deutlich stärker voneinander ab als die der Proben mit 7,4 % CI-Volumenanteil. Auch das Krümmungsverhalten der Verläufe ist vergleichbar mit dem den Verläufen der Spannung über der Längsdehnung der gleichen Probekörpervariante.

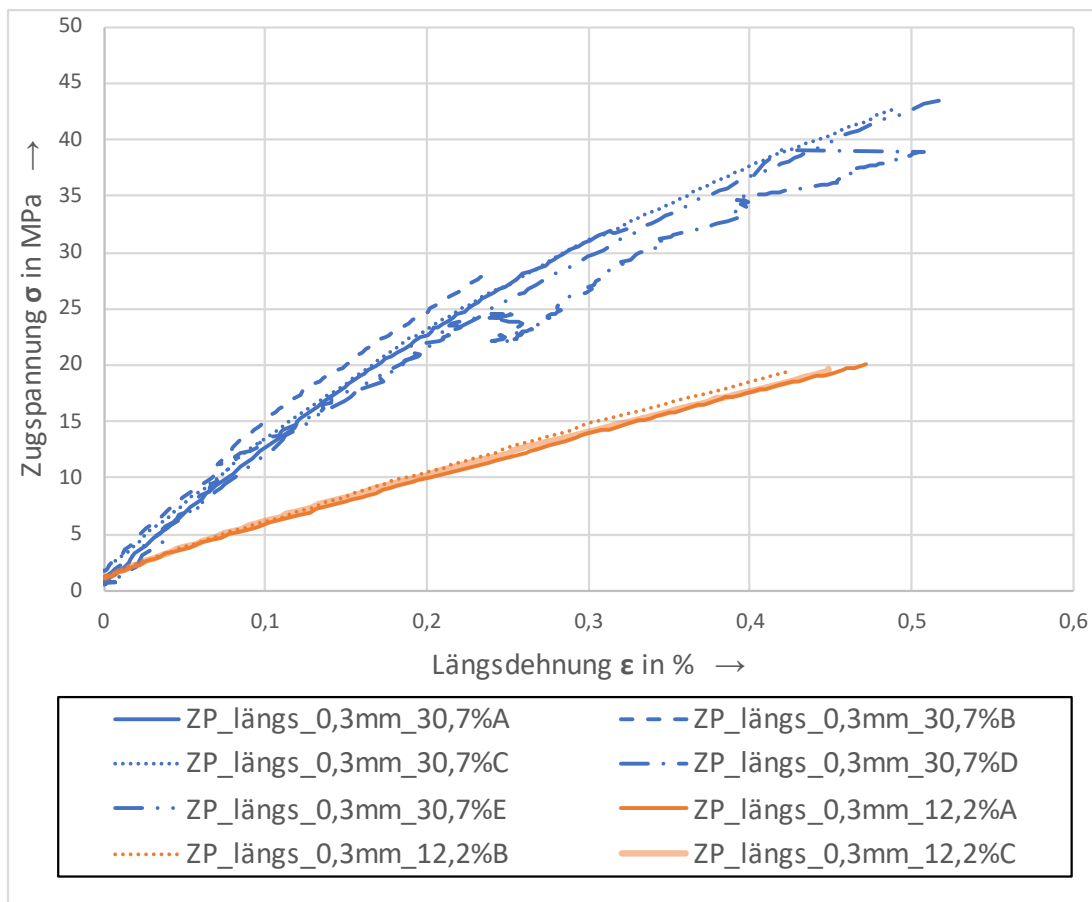


Abb. 5-12: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Probekörpervarianten ZP_längs_0,3mm

Abb. 5-12 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Probekörpervarianten ZP_längs_0,3mm_12,2% und ZP_längs_0,3mm_30,7%. Die Verläufe letzterer Probekörpervarianten ($\phi = 30,7\%$) zeigen eine deutlich höhere Anfangssteigung als die der Probekörpervarianten mit $\phi = 12,2\%$.

Die Verläufe der Probekörpervariante ZP_längs_0,3mm_12,2% zeigen einen sehr geringen Rückgang der Steigung. Die Verläufe der Probenkörpervarianten ZP_längs_0,3mm_30,7% weisen einen deutlichen Rückgang der Steigung auf. Zudem weisen die Verläufe der Probekörpervariante ZP_längs_0,3mm_12,2% im Vergleich zu den Verläufen der Probekörpervariante ZP_längs_0,3mm_30,7% sehr geringere Abweichungen untereinander auf.

Der Verlauf der Probe ZP-längs_0,3mm_30,7%D knickt bei einer Längsdehnung von ca. 0.25 % ein, was auf ein Rutschen des Probekörpers in der Aufnahme zurückgeführt werden kann.

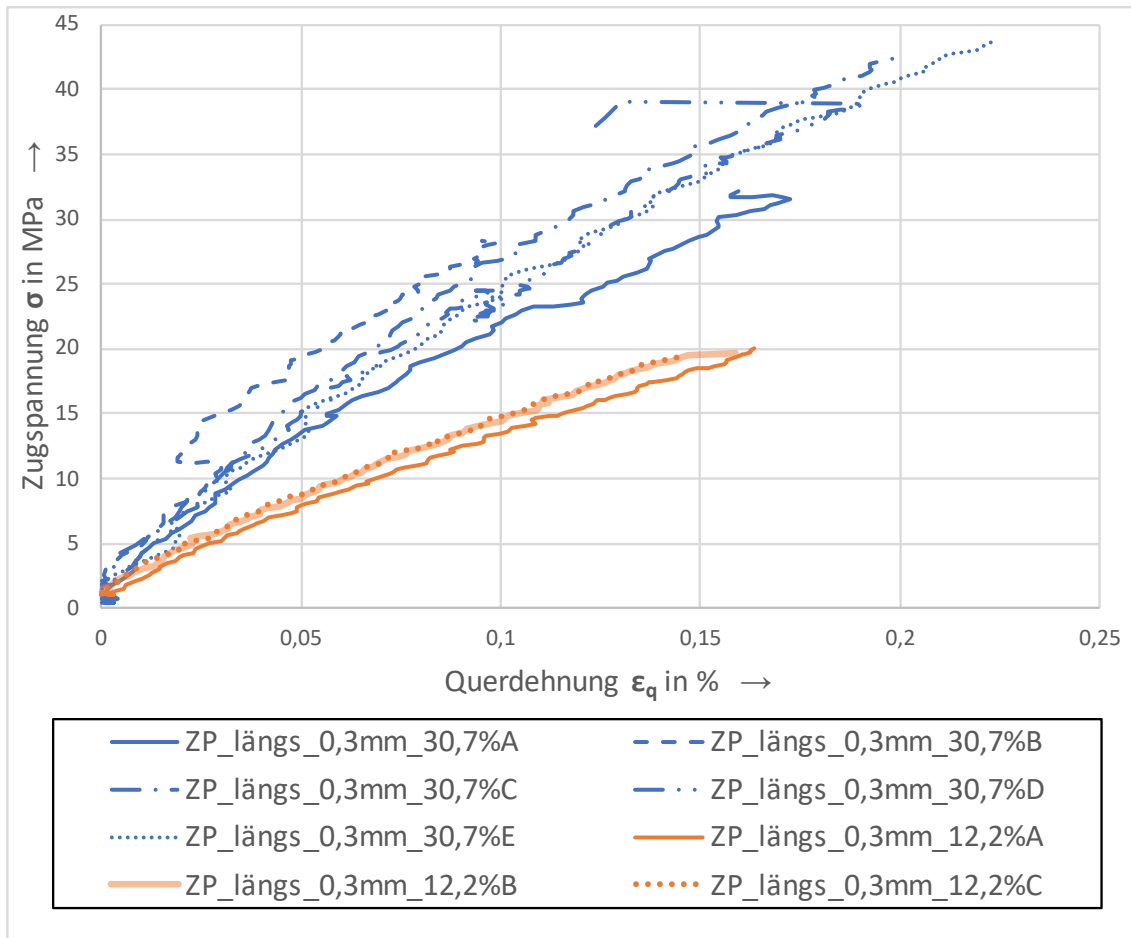


Abb. 5-13: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Probekörpervarianten ZP_längs_0,3mm

Abb. 5-13 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Probekörpervarianten ZP_längs_0,3mm_12,2% und ZP_längs_0,3mm_30,7%. Wie bei Abb. 5-12 weichen die Verläufe der Probekörper mit $\phi = 12,2\%$ weniger stark voneinander ab als die der Probekörper mit $\phi = 30,7\%$. Der Verlauf der Probe ZP_längs_0,3mm_30,7%B weist einen Knick sowie eine rückläufige Dehnung im Bereich einer Querdehnung von ca. 0,025 % auf. Dies kann auf einen Messfehler des Videoextensometers zurückgeführt werden.

Tab. 5-7: Messergebnisse der Versuchsreihe Zugversuch, längs-vertärkte UD-Proben

Probenbezeichnung		E_{\parallel} (GPa)	$\nu_{\perp\parallel}$ (-)	ε_B (mm)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	A	3,97	0,40	0,99
	B	3,77	0,38	0,77
	C	3,72	0,42	0,78
ZP_längs_0,1mm_27,1%	A	8,02	0,41	0,74
	B	9,16	0,44	0,76
	C	9,34	0,40	0,58
	D	9,63	0,39	0,62
	E	9,07	0,38	0,54
ZP_längs_0,3mm_12,2%	A	4,05	0,32	0,47
	B	4,37	0,33	0,43
	C	4,16	0,32	0,45
ZP_längs_0,3mm_30,7%	A	10,11	0,50	0,32
	B	10,21	0,28	0,24
	C	9,78	0,43	0,49
	D	8,82	0,40	0,51
	E	9,55	0,39	0,52

Tab. 5-7 listet die für die Proben mit $\alpha = 0^\circ$ der Versuchsreihe 2 ermittelten Werkstoffdaten für den Längs-Elastizitätsmodul E_{\parallel} , die Querkontraktionszahl $\nu_{\perp\parallel}$ und die Bruchdehnung ε_B auf.

Materialmodell Längs-Elastizitätsmodul

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit der linearen Mischungsregel nach Gleichung (2-6) zur Berechnung des Längs-Elastizitätsmoduls für die oben beschriebenen Versuchsergebnisse untersucht. Die Berechnung erfolgt analog zur Anwendung der Mischungsregel auf die Ergebnisse der Biegeproben (siehe Kapitel 5.1.1). Für die Elastizität des DI-Materials E_{DI} ergibt sich der Zusammenhang:

$$E_{DI} = \frac{E_A - E_B \cdot \frac{\varphi_A}{\varphi_B}}{\left(1 - \frac{\varphi_A}{\varphi_B}\right)} \quad (5-13)$$

Analog zur Herleitung aus Kapitel 5.1.1 bezieht sich die Indizierung A auf die Daten einer der Probekörpervarianten mit gleicher CI-Leiterbahn-Querschnittsfläche und B auf die Daten der anderen.

Die Elastizität des CI-Materials E_{CI} steht mit der Elastizität des DI-Materials in folgendem Zusammenhang:

$$E_{CI} = \frac{E - E_{DI} \cdot (1 - \varphi)}{\varphi} \quad (5-14)$$

Tab. 5-8 zeigt die Werte der Längs-Elastizitätsmodule nach Gleichung (5-13) und (5-14) für CI-Volumenanteile von 0 % bzw. 100 %.

Tab. 5-8: Rückrechnung der Längs-Elastizitätsmodule der längs verstärkten UD-Proben für $\phi=0$ % und $\phi=100$ %

ϕ (%)	s_q (mm)	E_{\parallel} (MPa)
0	0,1	1863,24
	0,3	563,18
100	0,1	28370,11
	0,3	30305,48

Optische Auswertung der Querschnittsflächen

Die Bruchflächen der Zugstäbe werden fotografiert und mittels der Open Source Bildanalyse Software ImageJ untersucht. Bei Zugproben die nicht im engen Querschnitt gebrochen sind werden die Proben händisch im engen Querschnitt nachgebrochen, um die berechnungsrelevante Querschnittfläche bestimmen zu können. Die Proben werden nach der Belastung untersucht, jedoch liegen die im Zugversuch erreichten Querdehnungen der längs-verstärkten UD-Proben bei unter 0,5 %. Ein Einfluss plastischer Verformungen durch den Zugversuch wird vernachlässigt.

Die Bestimmung der Querschnittsfläche durch Auswertung von Bildaufnahmen der Querschnittsflächen bietet gegenüber dem oben beschriebenen Verfahren insbesondere den Vorteil der Berücksichtigung komplexer Außenkonturen des Querschnitts. Es werden neben den Absackungen in z-Richtung auch die Konturen der nicht normal zur Aufbaurichtung liegenden Seitenflächen erfasst. Zudem bietet das Verfahren die

Möglichkeit die Flächenanteile von CI- bzw. DI-Material am Querschnitt zu untersuchen. Allerdings ist das Verfahren auch mit Messunsicherheiten behaftet. Zunächst geht die Messunsicherheit bei der Festlegung des Referenzmaß für die Pixelgröße proportional in das Messergebnis mit ein. Darüber hinaus wird die Betrachtung als orthogonal angenommen, nach Referenzmessungen ist dies gerechtfertigt und perspektivische Abweichungen werden vernachlässigt. Eine weitere Messunsicherheit des Verfahrens liegt in der präzisen Erfassung der Kantenkontur. Wie genau eine Kante erkennbar ist hängt maßgeblich von den folgenden Faktoren ab:

- Pixeldichte
- Kontrast
- Lichtreflexionen

Die Bruchflächen sind nicht plan und weisen eine unregelmäßige Oberfläche auf. Vereinzelt können Lichtreflexionen das Erfassen der Kante erschweren. Die Pixeldichte liegt ca. bei 10000 Pixeln/mm². Der Kontrast ist insbesondere an den Phasengrenzen zwischen CI- und DI-Material niedrig, was eine präzise Bestimmung des CI-Volumenanteils erschwert.

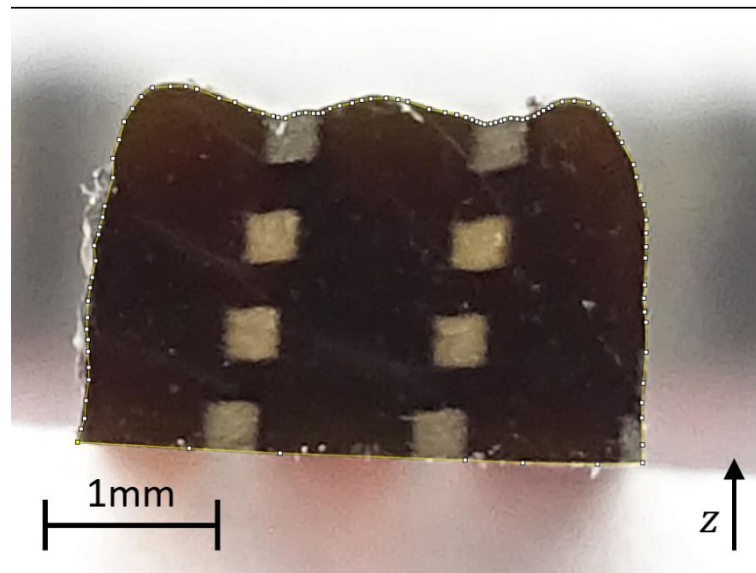


Abb. 5-14: Analyse der Querschnittsfläche von Probe ZP_längs_0,3mm_12,2%A mittels ImageJ

Abb. 5-14 zeigt die Querschnittsfläche der Probe ZP_längs_0,3mm_12,2%A. Zudem ist die in ImageJ markierte Außenkontur der Probe erkennbar. Der Querschnitt der Probe

zeigt deutliche Absackungen des Materials. Insbesondere die in z-Richtung obere Seite des Querschnitts weist aufgrund der Absackungen einen stark gewölbten Verlauf auf. Zudem fällt auf, dass die nach 3D-Modell konstruierte CI-Leiterbahn in der Ecke oben links nicht erkennbar ist.

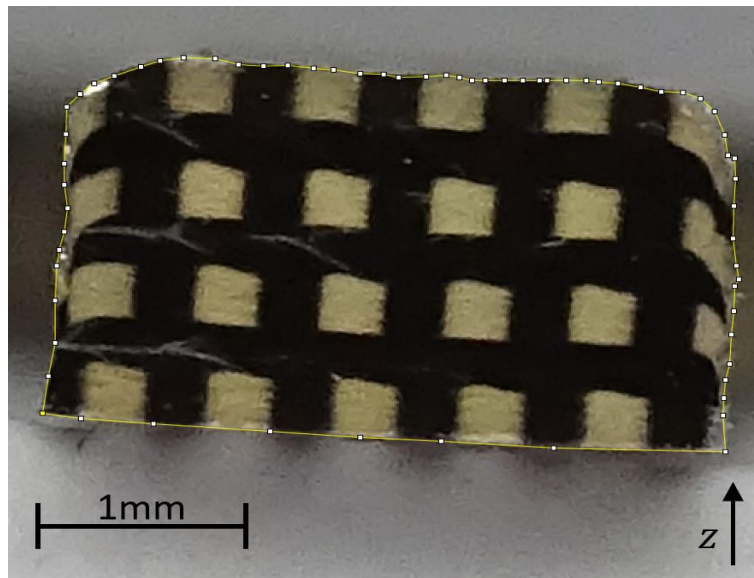


Abb. 5-15: Analyse der Querschnittsfläche von Probe ZP_längs_0,3mm_30,7%B mittels ImageJ

Abb. 5-15 zeigt die Querschnittsfläche der Probe ZP_längs_0,3mm_30,7%B. Analog zu Abb. 5-14 ist die Markierung der Außenkontur mittels ImageJ zu erkennen. Auffällig ist, dass die Konturen des Querschnitts deutlich geradliniger verlaufen als bei Abb. 5-14. Die quadratische Geometrie der CI-Leiterbahnen ist am seitlichen Rand der Querschnittsfläche nicht akkurat realisiert worden. Mit abnehmendem Abstand zum Rand in horizontaler Richtung zeigt sich eine stark zunehmende Absackung des CI-Materials. Die insbesondere im linken Bereich der Abbildung erkennbaren hellen Streifen im DI-Material resultieren aus Lichtreflexion der Bruchfläche.

ImageJ wertet zur Vermessung von Flächen die Pixelanzahl der ausgewählten Fläche aus. Um die Pixelgröße in Bezug zur real vorliegenden Maßeinheit zu setzen wurde als Referenzelement die maximale Breite des Querschnitts mittels Messschieber vermessen.

Tab. 5-9: Querschnittsflächenmessung nach der Auswertemethode mit ImageJ (A_{Bild}) und der Vermessung der mittleren Bauteilbreite

Probenbezeichnung		A_{Bild} (mm ²)	A (mm ²)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	A	6,46	6,27
	B	6,36	6,24
	C	6,39	6,22
ZP_längs_0,1mm_27,1%	A	5,61	5,41
	B	5,60	5,54
	C	5,63	5,50
	D	5,56	5,29
	E	5,72	5,50
ZP_längs_0,3mm_12,2%	A	6,28	6,51
	B	6,29	6,42
	C	6,31	6,46
ZP_längs_0,3mm_30,7%	A	6,11	5,97
	B	6,15	5,93
	C	6,09	5,94
	D	6,22	5,99
	E	6,10	5,92

Tab. 5-9 listet die berechneten Werte für die Querschnittsfläche der Probekörper nach der in Abb. 5-1 beschriebenen Methode A und nach der Bildauswertung mittels ImageJ A_{Bild} auf. Es bestehen systematische Abweichungen zwischen den Messergebnissen der Methoden.

Materialmodell Längs-Elastizitätsmodul mit A_{Bild}

Die Werte der Längs-Elastizitätsmodule, unter Berücksichtigung der nach ImageJ ermittelten Querschnittsflächenwerte werden analog zu oben auf das Materialmodell (siehe Gleichung (2-6)) angewendet. Es ergeben sich die in Tab. 5-10 dargestellten Werte für die Rückrechnung der Längs-Elastizitätsmodule:

Tab. 5-10: Rückrechnung der Längs-Elastizitätsmodule der quer verstärkten UD-Proben für $\phi=0\%$ und $\phi=100\%$ mit der Querschnittsfläche nach A_{Bild}

ϕ (%)	s_q (mm)	$E_{ }$ (MPa)
0	0,1	1840,25
	0,3	944,35
100	0,1	27399,43
	0,3	28504,62

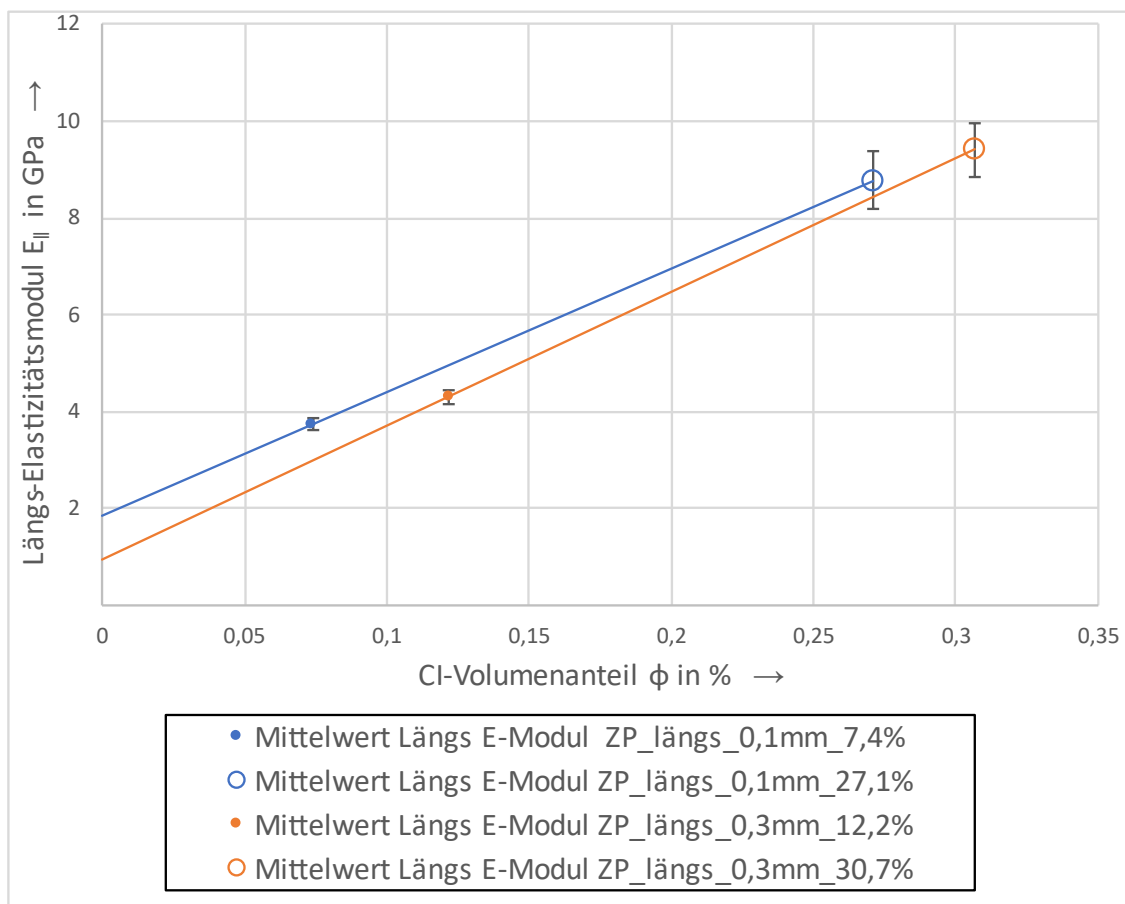


Abb. 5-16: Gemittelter Längs-Elastizitätsmodul $E_{||}$ über CI-Volumenanteil ϕ der längs verstärkten UD-Proben

Abb. 5-16 zeigt die Mittelwerte der Längs-Elastizitätsmodule unter Berücksichtigung der Flächen nach A_{Bild} der längs verstärkten UD-Proben über dem zugehörigen CI-Volumenanteil ϕ aufgetragen. Die Durchschnittswerte der E-Module der Probekörpervarianten mit gleicher Seitenlänge s_q des CI-Leiterbahnquerschnittes werden zu einem linearen Verlauf verbunden dargestellt. Es fällt auf, dass die Messwerte mit zunehmendem CI-Volumenanteil eine höhere Streuung aufweisen. Zur

Veranschaulichung ist die Standardabweichung der Messdaten der Elastizitätsmodule (siehe Tab. 5-11) als Fehlerindikator dargestellt.

Statistische Analyse der Messergebnisse

Tab. 5-11 listet die Standardabweichungen der Längs-Elastizitätsmodule der oben beschriebenen Probekörper auf.

Tab. 5-11: Standardabweichungen $s_{\text{Abweichung}}$ der Längs-Elastizitätsmodule der längs verstärkten UD-Proben

Probenvariante	$s_{\text{Abweichung}}$ (MPa)
ZP_längs_0,1mm_7,4%	119,2
ZP_längs_0,1mm_27,1%	598,0
ZP_längs_0,3mm_12,2%	141,6
ZP_längs_0,3mm_30,7%	565,2

Nach der Student'schen t-Verteilung bildet sich das Vertrauensintervall um den empirischen Mittelwert \bar{x} zu:

$$\bar{x} \pm t_p \cdot \frac{s_{ABW}}{\sqrt{n_p}} \quad (5-15)$$

Dabei bezeichnet t_p den tabellarisch [93] ermittelten t-Faktor, s_{ABW} die Standardabweichung (siehe Tab. 5-11) und n_p die Probenanzahl. Für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit p ergibt sich für die Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und ZP_längs_0,3mm_30,7% die in Tab. 5-12 dargestellten Vertrauensintervalle. Für die übrigen Proben wurde aufgrund der geringen Probenanzahl kein Vertrauensintervall gebildet.

Tab. 5-12: Grenzwerte des Vertrauensintervalls und die resultierenden Werte für E_{DI} der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und ZP_längs_0,3mm_30,7%

Probenvariante	p (%)	$E_{\parallel_{min}}$ (MPa)	$E_{\parallel_{max}}$ (MPa)	$E_{DI_{min}}$ (MPa)	$E_{DI_{max}}$ (MPa)
ZP_längs_0,1mm_27,1%	68,3	8462	9072	1726	1954
	95	8023	9510	1562	2118
ZP_längs_0,3mm_30,7%	68,3	9117	9693	754	1134
	95	8703	10108	481	1408

Tab. 5-12 listet die Minimal- und Maximalwerte der Längs-Elastizitätsmodule ($E_{\parallel_{min}}$ und $E_{\parallel_{max}}$) der Vertrauensintervalle für die Überdeckungswahrscheinlichkeiten p , sowie die für diese Werte berechnete Rückrechnung für die Minimal und Maximalwerte der Elastizitätsmodule des DI-Materials ($E_{DI_{min}}$, $E_{DI_{max}}$) auf.

Analyse der Sensibilität gegenüber Messunsicherheiten

Die Messunsicherheit aufgrund der Vermessung der Querschnittsfläche ist nicht bekannt. Bei einer geschätzten Messunsicherheit k_M von 5 % ergeben sich folgende Grenzwerte für die Rückrechnung des Elastizitätsmoduls des DI-Material.

Tab. 5-13: Worst Case Betrachtung der Abweichung von $E_{DI_{min}}$ und $E_{DI_{max}}$ durch Messunsicherheit der Querschnittsfläche

Probenvariante	ϕ (%)	k_M (%)	$E_{DI_{min}}$ (MPa)	$E_{DI_{max}}$ (MPa)
ZP_längs_0,1mm	7,4	5	277	1612
	27,1	5		
ZP_längs_0,3mm%	15,0	5	1420	2260
	30,7	5		

Tab. 5-13 gibt eine Übersicht der Worst Case Betrachtung der Abweichung von den rückgerechneten Elastizitätsmodulen $E_{DI_{min}}$ und $E_{DI_{max}}$ durch die Messunsicherheit der Querschnittsfläche.

Das Vorzeichen des Korrekturfaktors ergibt sich aus der Betrachtung des Worst Case Szenarios der Abweichungen. Gleichung (5-16) beschreibt den Formelmäßigen Zusammenhang.

$$A_{real} = (1 \pm k_M) \cdot A_{gemessen} \quad (5-16)$$

Analog wird die Sensibilität gegenüber Messunsicherheiten von Abweichungen des CI-Volumengehalts untersucht. Die Abbildungen der Bruchflächen zeigen, dass im Randbereich Geometrieabweichungen sowohl des CI-Materials, als auch des DI-Materials bestehen. Die Abweichung des CI-Volumengehalts wird auf 2,5 % geschätzt.

Tab. 5-14: Worst Case Betrachtung der Abweichung von $E_{DI_{min}}$ und $E_{DI_{max}}$ durch Messunsicherheit durch Abweichungen des CI-Volumenanteils

Probenvariante	ϕ (%)	k_M (%)	$E_{DI_{min}}$ (MPa)	$E_{DI_{max}}$ (MPa)
ZP_längs_0,1mm	7,4	2,5	1705	1964
	27,1	2,5		
ZP_längs_0,3mm%	15,0	2,5	648	1208
	30,0	2,5		

Tab. 5-14 gibt eine Übersicht der Worst Case Betrachtung der Abweichung von den rückgerechneten Elastizitätsmodulen $E_{DI_{min}}$ und $E_{DI_{max}}$ durch Abweichungen des CI-Volumengehalts.

Für beide Worst-Case Betrachtungen zeigt sich, dass die Rückrechnung für ZP_längs_0,3mm% deutlich stärkere Abweichungen bei gleichen Messunsicherheiten aufweist, insbesondere bei der Betrachtung von Messunsicherheiten bzgl. des CI-Volumenanteils.

Materialmodell Querkontraktionszahlen $\nu_{\perp\parallel}$

Die Anwendung der linearen Mischungsregel auf die Querkontraktionszahlen (siehe Gleichung (2-14)) ergibt für die Rückrechnung der Querkontraktionszahlen der Probekörpervarianten ZP_längs_0,1mm_7,4% und ZP_längs_0,1mm_27,1% (Tab. 5-7) einen Wert der Querkontraktionszahl $\nu_{\perp\parallel}$ von 0,40 für $\phi = 0$ % einen Wert der Querkontraktionszahl von 0,41 für $\phi = 100$ %.

Für die Probekörpervariante ZP_längs_0,3mm ergibt die durchschnittliche Querkontraktion der Probekörpervariante ZP_längs_0,3mm_12,2% zu 0,33 und der Probekörpervariante ZP_längs_0,3mm_30,0% zu 0,40. Eine Rückrechnung der Querkontraktion des für $\phi = 0$ % bzw. $\phi = 100$ % ergibt einen Wert von 0,28 bzw. 0,40.

5.1.2.2 Quer-verstärkte UD-Proben

Spannungs-Dehnungs Verläufe quer verstärkten UD-Proben

Im Folgenden werden die Verläufe der Zugspannung über der Längs- und Querdehnung, der quer-verstärkten UD-Proben dargestellt. Die Verläufe der Probekörpervarianten werden nach Leiterbahnquerschnittsflächen getrennt präsentiert. Längs- und Querdehnung werden ebenfalls getrennt präsentiert.

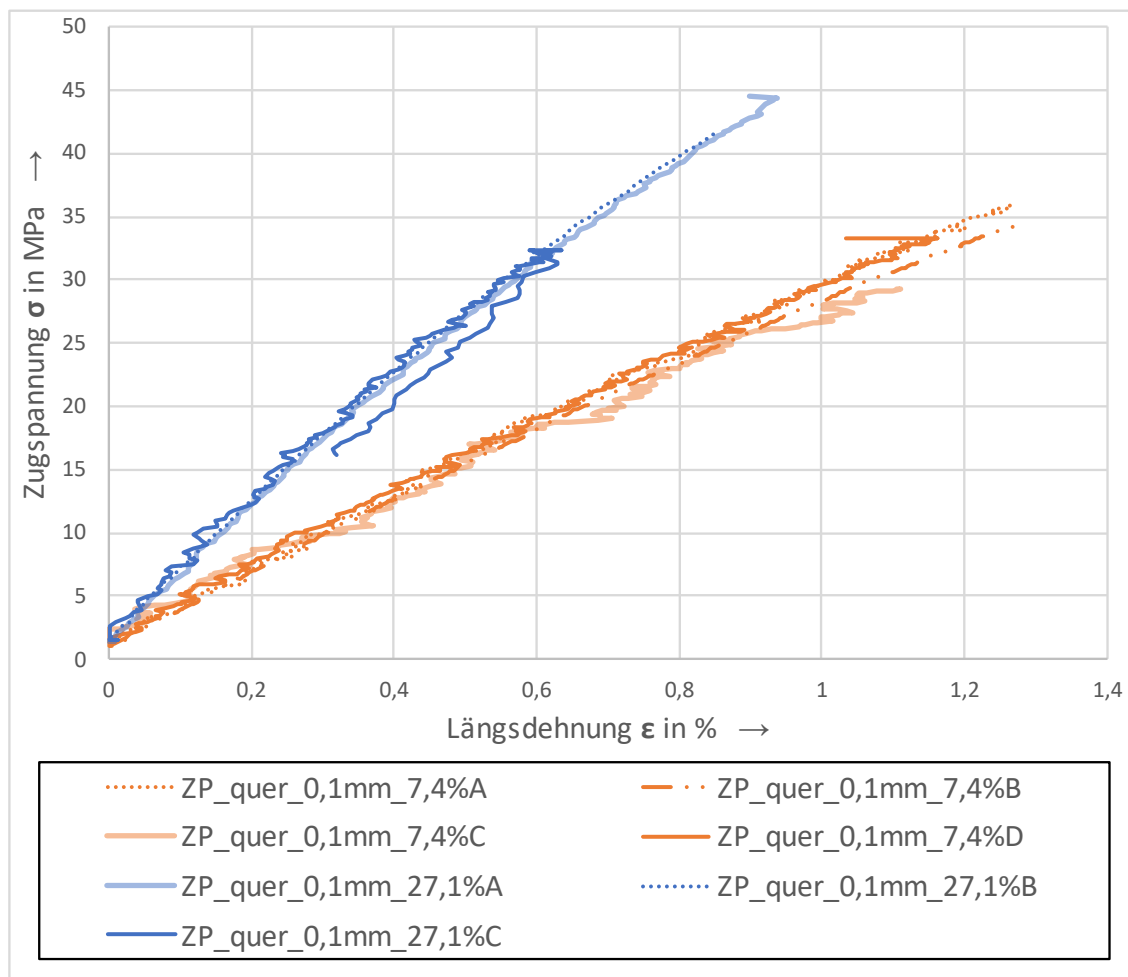


Abb. 5-17: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Probekörpervarianten ZP_quer_0,1mm

Abb. 5-17 zeigt die Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Probekörpervarianten ZP_quer_0,1mm_7,4% und ZP_quer_0,1mm_27,1%. Die Verläufe der Probekörpervariante mit 7,4 % CI-Volumenanteil verlaufen annähernd linear. Die Verläufe der Probekörpervariante mit 27,1 % CI-Volumenanteil weisen mit zunehmender Längsdehnung einen leichten Rückgang der Steigung auf, die

Anfangssteigung ist deutlich höher als die der Probekörpervariante ZP_quer_0,1mm_7,4%.

Bei Probe ZP_quer_0,1mm_27,1%C wurde während des Versuchs ab einer Dehnung von ca. 0,6% Rutschen festgestellt. Deswegen ist für diese Probe kein Wert für die Bruchdehnung vorhanden. Ein Nachversuch wurde durchgeführt, führte jedoch zu einem deutlich abweichendem E-Modul (5,03 GPa) und wurde deswegen nicht berücksichtigt.

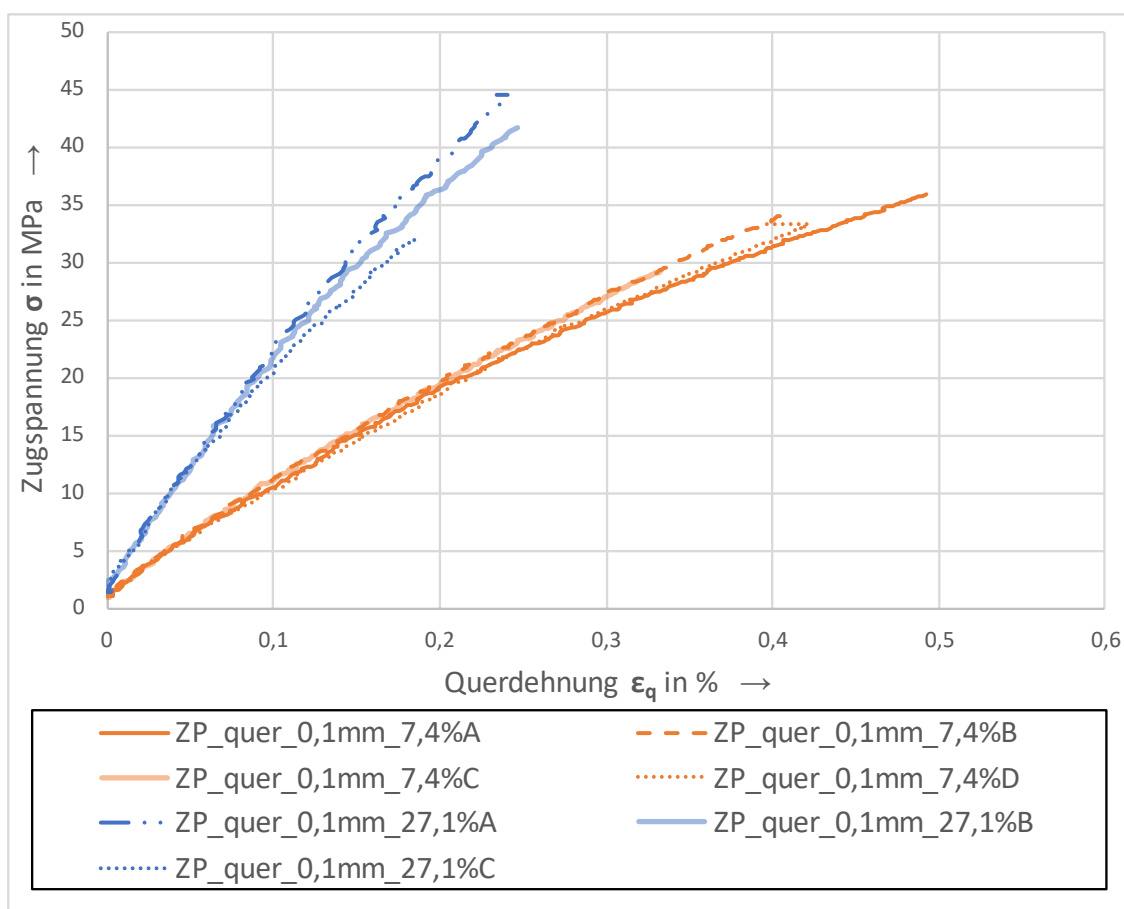


Abb. 5-18: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Probekörpervarianten ZP_quer_0,1mm

Abb. 5-18 zeigt die Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Probekörpervarianten ZP_quer_0,1mm_7,4% und ZP_quer_0,1mm_27,1%. Die Verläufe beider Probekörpervarianten weisen einen leichten Rückgang der Steigung mit zunehmender Querdehnung auf. Die durchschnittlich erreichten Querdehnungen bei Bruch sind für die Proben mit CI-Volumenanteil von 27,1 % deutlich höher als die der Proben mit $\phi =$

7,4 %. Die Verläufe der jeweiligen Varianten weisen eine vergleichsweise geringe Streuung auf.

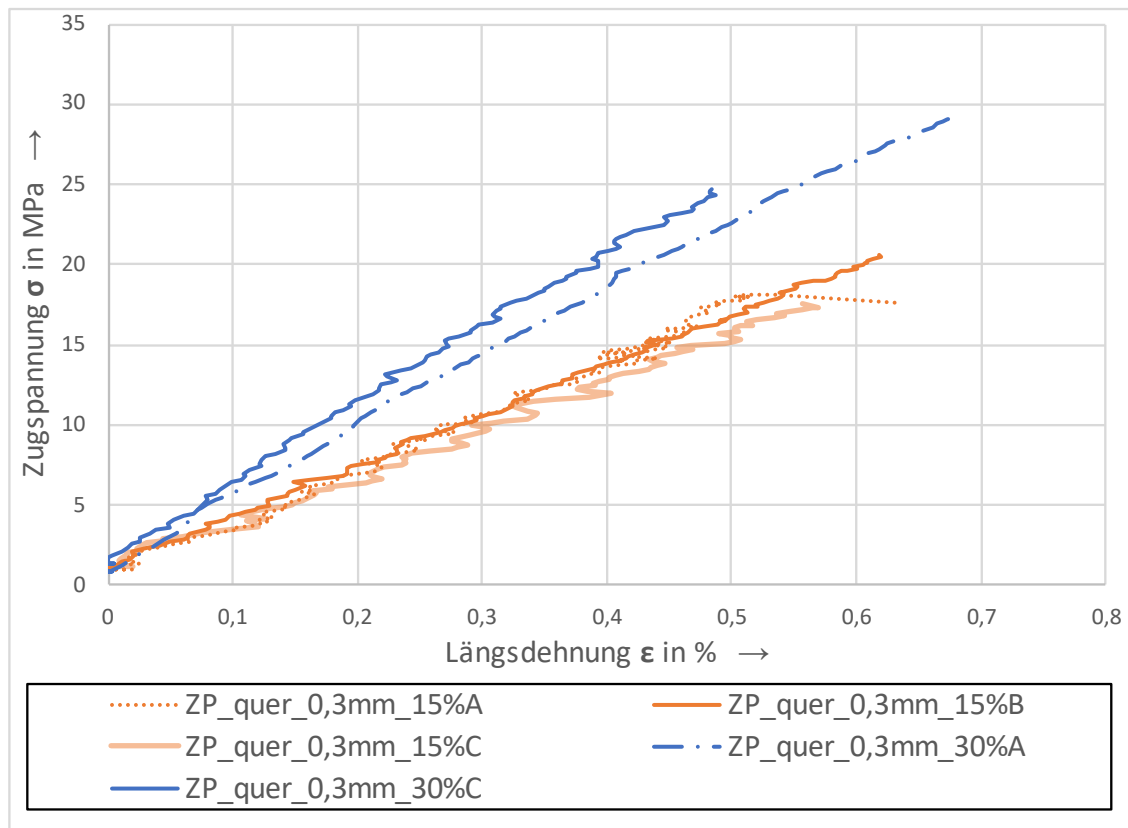


Abb. 5-19: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Probekörpervarianten ZP_quer_0,3mm

Abb. 5-19 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Probekörpervarianten ZP_quer_0,3mm_15% und ZP_quer_0,3mm_30%. Auffällig ist im Vergleich zu den Verläufen aus Abb. 5-17 eine höhere Abweichung der Verläufe. Die Verläufe weisen einen annähernd linearen Verlauf auf.

Aufgrund von Messfehlern wurde die Probe ZP_quer_0,3mm_30%B für die Längsdehnung nicht berücksichtigt.

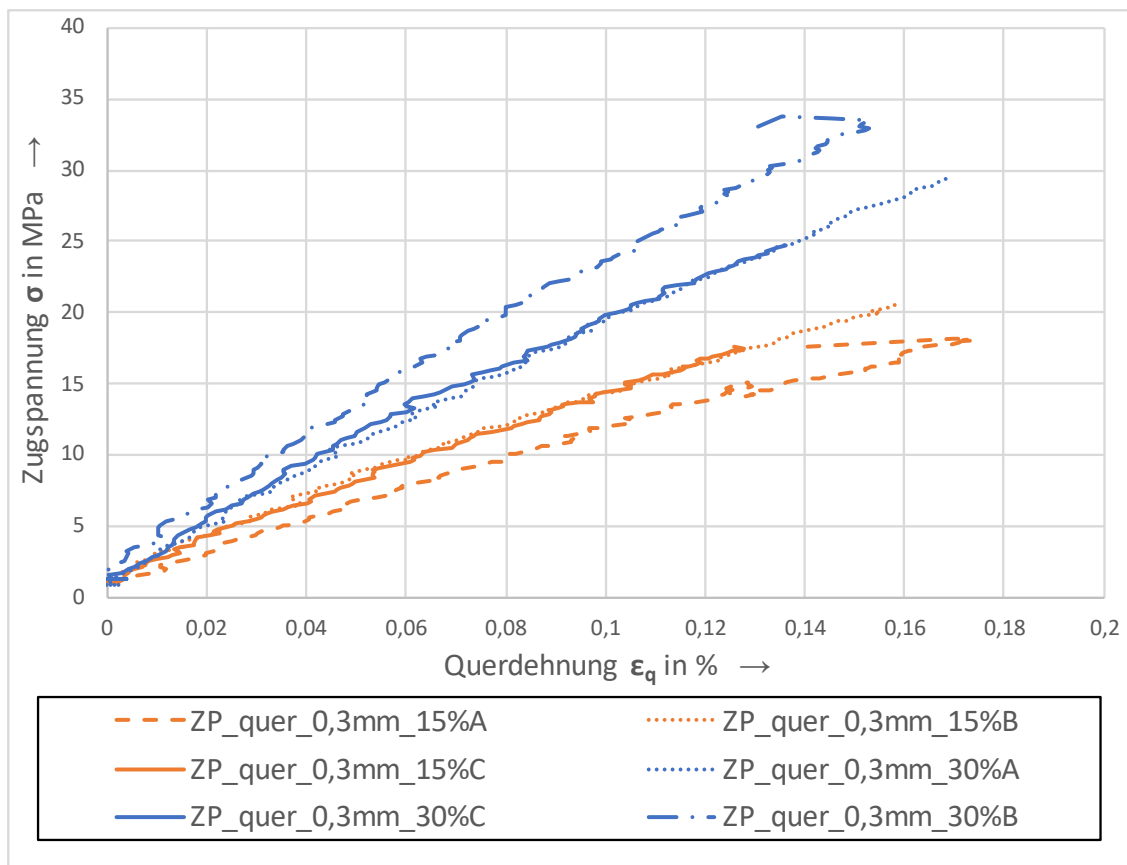


Abb. 5-20: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Probekörpervarianten ZP_quer_0,3mm

Abb. 5-20 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Probekörpervarianten ZP_quer_0,3mm_15% und ZP_quer_0,3mm_30%.

Die Steigungen der Verläufe von Probekörpervariante ZP_quer_0,3mm_30% sind höher. Die Verläufe beider Probekörpervarianten weisen im Vergleich zu den Verläufen der Abb. 5-18 deutliche Abweichungen voneinander auf.

Tab. 5-15: Messergebnisse der Versuchsreihe Zugversuch, quer verstärkte UD-Proben

Probenbezeichnung		E_{\perp} (GPa)	$\nu_{\parallel\perp}$ (-)	ε_B (mm)
ZP_quer_0,1mm_7,4%	A	2,84	0,35	1,27
	B	2,93	0,31	1,27
	C	2,97	0,28	1,11
	D	3,14	0,35	1,16
ZP_quer_0,1mm_27,1%	A	5,35	0,25	0,94
	B	5,37	0,27	0,85
	C	5,37	0,31	n/a
ZP_quer_0,3mm_15%	A	3,47	0,26	0,63
	B	3,22	0,21	0,62
	C	2,81	0,18	0,56
ZP_quer_0,3mm_30%	A	4,51	0,24	0,68
	B	n/a	n/a	n/a
	C	5,10	0,24	0,48

Tab. 5-15 listet die für die quer-verstärkten UD-Proben ermittelten Kennwerte für den Quer-Elastizitätsmodul E_{\perp} , die Querkontraktionszahl $\nu_{\parallel\perp}$ und die Bruchdehnung ε_B auf.

Materialmodell Querelastizität E_{\perp}

Im Folgenden werden die Daten der Quer-Elastizitätsmodule in das Materialmodell nach Gleichung (2-13) eingesetzt. Analog zur Prüfung der linearen Mischungsregel in Kapitel 5.1.2.1 werden die Probekörpervarianten nach CI-Leiterbahnquerschnittsfläche getrennt betrachtet.

Die ermittelten Werkstoffdaten (siehe Tab. 5-15) werden in Gleichung (2-13) eingesetzt und das resultierende Gleichungssystem gelöst. Es ergibt sich folgender formelmäßiger Zusammenhang für die Querelastizität des CI-Materials $E_{\perp,CI}$:

$$E_{\perp,CI} = \frac{\phi_B - \phi_A}{\frac{1}{E_{\perp B}}(1 - \phi_A) - \frac{1}{E_{\perp A}}(1 - \phi_B)} \quad (5-17)$$

Die Indizierung A bezieht sich dabei auf die Daten einer der Probekörpervarianten mit gleicher CI-Leiterbahn-Querschnittsfläche und die Indizierung B auf die Daten der anderen. Die Formel für den Elastizitätsmodul des DI-Materials lautet:

$$E_{DI} = \frac{1 - \phi}{\frac{1}{E_{\perp}} - \frac{1}{E_{\perp CI}}} \cdot \phi \quad (5-18)$$

Tab. 5-16 zeigt die Werte der Quer-Elastizitätsmodule nach Gleichung (5-17) und (5-18) für CI-Volumenanteile von 0 % bzw. 100 %.

Tab. 5-16: Rückrechnung der Quer-Elastizitätsmodule E_{\perp} der quer-verstärkten UD-Proben für $\phi=0$ % und $\phi=100$ % mit der Querschnittsfläche nach A

ϕ (%)	s_q (mm)	E_{\perp} (GPa)
0	0,1	2,542
	0,3	2,362
100	0,1	-2,697
	0,3	-3,400

Optische Auswertung der Bruchflächen

Analog zur Auswertung der längs-verstärkten UD-Proben wird eine optische Auswertung der Bruchflächen vorgenommen.

Tab. 5-17: Querschnittsflächenmessung nach der Auswertemethode mit ImageJ A_{Bild} und nach Vermessung nach der Methode in Abb. 5-1

Probenbezeichnung		A_{Bild} (mm ²)	A (mm ²)
ZP_quer_0,1mm_7,4%	A	5,96	5,53
	B	6,56	6,35
	C	6,43	6,30
	D	6,42	6,34
ZP_quer_0,1mm_27,1%	A	5,68	5,54
	B	5,78	5,52
	C	5,70	5,53
ZP_quer_0,3mm_15%	A	6,69	6,34
	B	6,63	6,40
	C	6,07	5,96
ZP_quer_0,3mm_30%	A	6,08	6,01
	B	6,24	5,90
	C	6,15	5,87

Tab. 5-17 listet die berechneten Werte für die Querschnittsfläche der Probekörper nach der in Abb. 5-1 beschriebenen Methode A und nach der Bildauswertung mittels ImageJ A_{Bild} auf. Es bestehen systematische Abweichungen zwischen den Messergebnissen der Methoden.

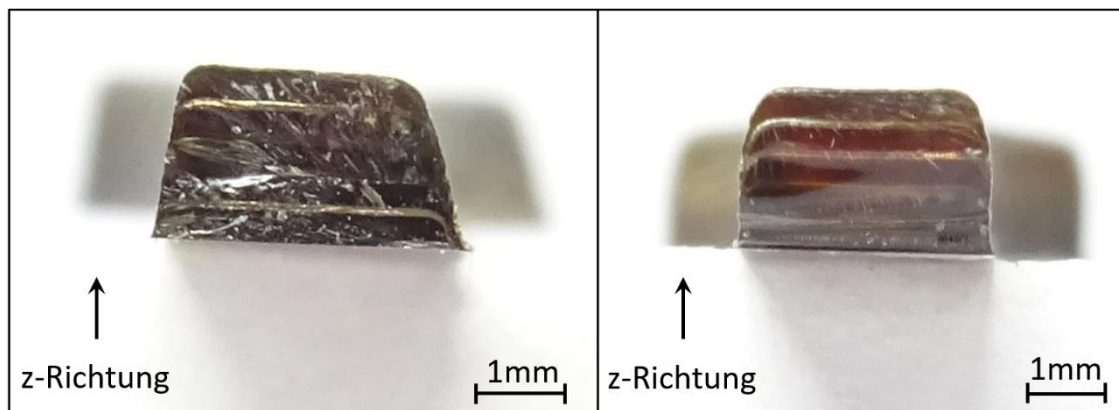
Einfluss der Druckkopfbewegungsrichtung und Absackungen der Leiterbahnen

Abb. 5-21: Bruchfläche der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4%A (links) und ZP_quer_0,1mm_7,4%D (rechts)

Abb. 5-21 zeigt die Bruchflächen der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4%A links und ZP_quer_0,1mm_7,4%D rechts. Es ist erkennbar, dass die rechte Seitenfläche des Querschnitts der ZP_quer_0,1mm_7,4%D deutlich steiler abfällt als die linke. Zudem ist der Querschnitt rechts im Bild deutlich symmetrischer zu seiner Mittelachse in z-Richtung. Die Bewegungsrichtung des Druckkopfs im Bauprozess ist quer zur Längsrichtung der Probe ZP_quer_0,1mm_7,4%A und längs zur Längsrichtung der Probe ZP_quer_0,1mm_7,4%D. Auffällig ist außerdem ein Absacken der quer liegenden CI-Leiterbahnen im Randbereich (im linken Bild unten rechts im Probenquerschnitt und im rechten Bild oben links und rechts gut zu erkennen).

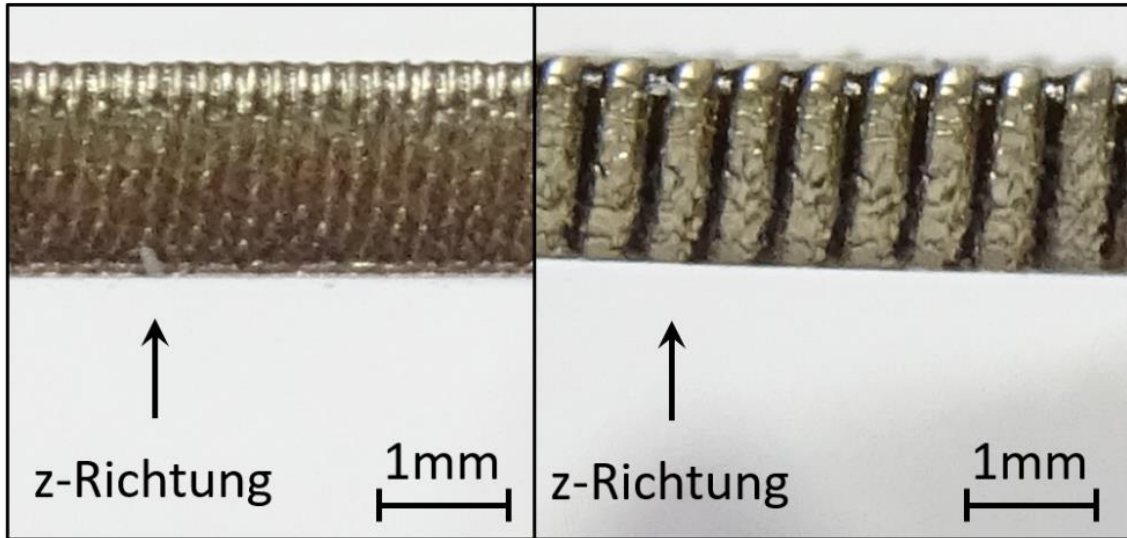


Abb. 5-22: Seitenansicht der Proben ZP_0,1mm_27,1%C (links) und ZP_0,3mm_30%A (rechts)

Abb. 5-22 zeigt die Seitenflächen der Proben ZP_0,1mm_27,1%C (links) und ZP_0,3mm_30%A (rechts). Das CI-Material ist sichtbar verbunden. Zudem sind im Bild rechts Absackungseffekte auf der oberen Seitenfläche der Probe erkennbar.

Materialmodell Quer-Elastizitätsmodul unter Berücksichtigung von A_{Bild}

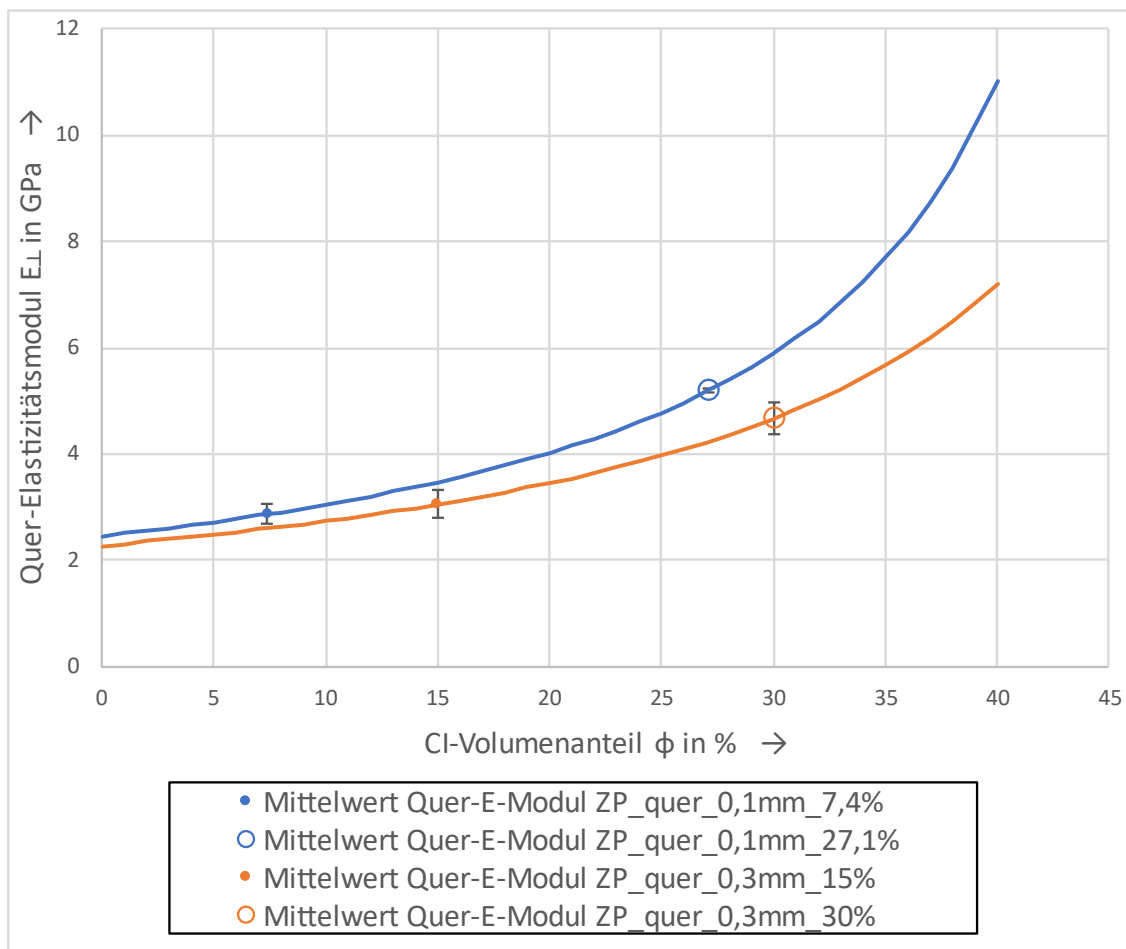


Abb. 5-23: Gemittelte Quer-Elastizitätsmodul E_{\perp} über CI-Volumenanteil ϕ der quer verstärkten UD-Proben

Abb. 5-23 zeigt die gemittelten Quer-Elastizitätsmodule E_{\perp} unter Berücksichtigung von A_{Bild} über den entsprechenden CI-Volumenanteilen ϕ der quer-verstärkten UD-Proben. Die nach Gleichung (2-13) ermittelten Verläufe des Quer-Elastizitätsmodul werden für die Probekörpervarianten mit $s_q = 0,1\text{ mm}$ und $s_q = 0,3\text{ mm}$ dargestellt.

Tab. 5-18 zeigt die Werte der Rückrechnung der Quer-Elastizitätsmodule nach Gleichung (5-17) und (5-18) für CI-Volumenanteile von 0% bzw.100%.

Tab. 5-18: Rückrechnung der Quer-Elastizitätsmodule E_{\perp} der quer-verstärkten UD-Proben für $\phi=0\%$ und $\phi=100\%$ mit der Querschnittsfläche nach A_{Bild}

ϕ (%)	s_q (mm)	E_{\perp} (GPa)
0	0,1	2,457
	0,3	2,271
100	0,1	-2,607
	0,3	-3,192

5.1.3 Auswertung Zugversuch Laminat-Proben

Berechnung Zugversuch an 45° -Laminaten nach DIN EN ISO 14129 [91]

Nach obiger Norm berechnet sich die Schubspannung in der Lagenebene τ_{L12} aus der Kraft F , der Probenbreite b und der Probendicke h nach dem folgenden formelmäßigen Zusammenhang:

$$\tau_{L12} = \frac{F}{2bh} \quad (5-19)$$

Die Schubverformung γ_{12} ergibt sich aus der Differenz von Längsdehnung ε_x und Querdehnung ε_y .

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (5-20)$$

Der Schubmodul in der Lagenebene G_{L12} wird nach folgendem Zusammenhang berechnet:

$$G_{L12} = \frac{\tau''_{12} - \tau'_{12}}{\gamma''_{12} - \gamma'_{12}} \quad (5-21)$$

Dabei bezeichnet τ'_{12} die Schubverformung bei $\gamma'_{12} = 0,001$ und τ''_{12} die Schubverformung bei $\gamma''_{12} = 0,005$. Der Schubmodul in der Lagenebene wird im Rahmen der Arbeit mittels linearer Regression nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet.

Die Elastizitätsmoduln, Längs- und Querdehnungen und die Querkontraktionszahl berechnen sich analog zur Berechnung des Zugversuchs nach Kapitel 5.1.2.

Probekörperabmessungen

Tab. 5-19: Abmaße der Laminatproben

Probenbezeichnung		h_{LP} (mm)	b_{LP} (mm)	L_0 (mm)
LP_0,1mm_19,7%	A	1,815	24,53	49,772
	B	1,794	24,61	49,831
LP_0,3mm_30%	A	1,851	24,42	50,156
	B	1,836	24,66	50,546

Tab. 5-19 zeigt die vermessenen berechnungsrelevanten Abmaße der Probekörper der Versuchsreihe Zugversuch Laminatproben.

Spannungs-Dehnungs Verläufe der Versuchsreihe Zugversuch Laminat-Proben

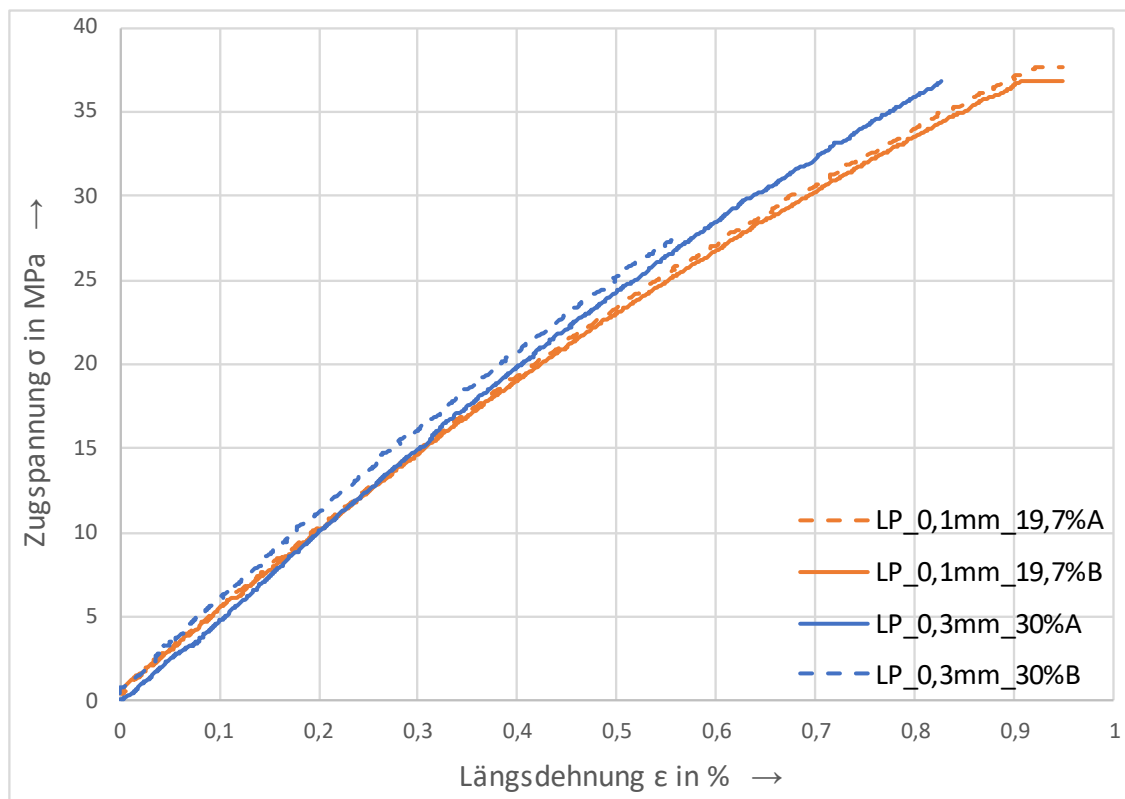


Abb. 5-24: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Laminatproben

Abb. 5-24 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Laminatproben. Die Anfangssteigung der Proben ist vergleichbar. Die Verläufe der Probekörpervariante LP_0,1mm_19,7% weisen einen leichten Rückgang der Steigung mit zunehmender Längsdehnung auf. Auch die Steigung der Verläufe der Probekörpervariante LP_0,1mm_30% nimmt mit zunehmender Dehnung leicht ab, jedoch weniger stark ausgeprägt als bei den zuvor beschriebenen Verläufen.

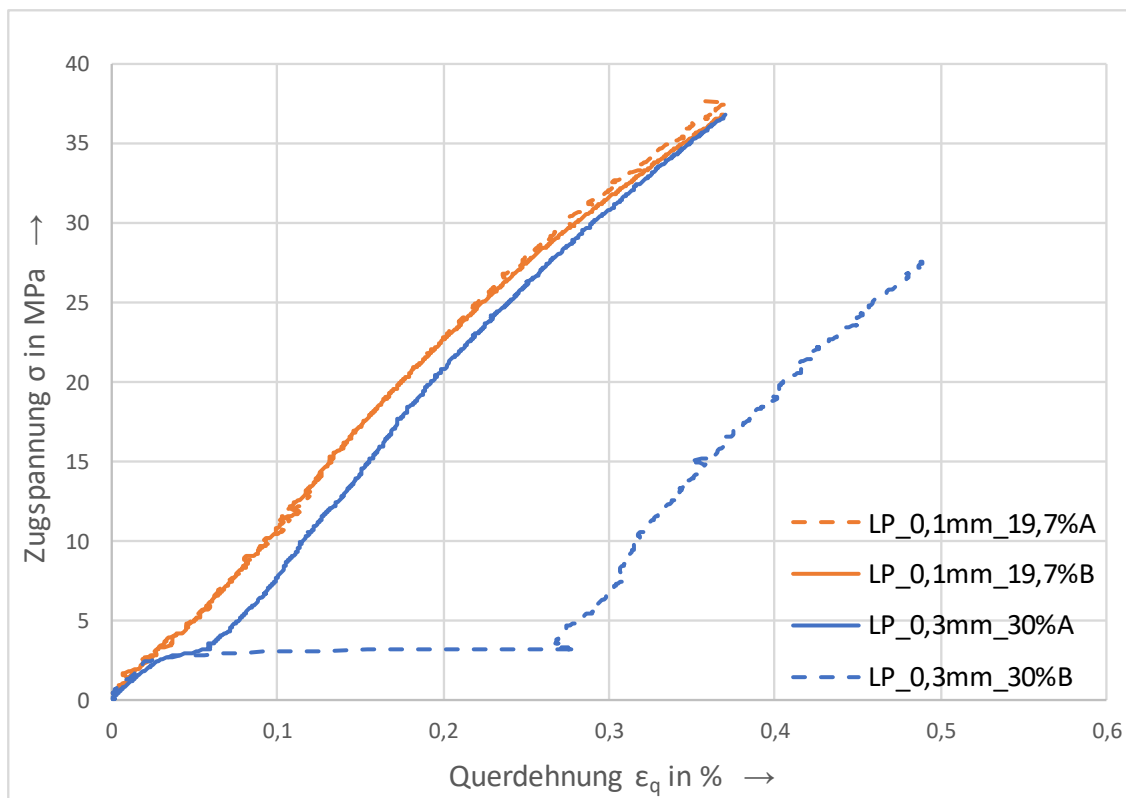


Abb. 5-25: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Laminatproben

Abb. 5-25 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ε_q der Laminatproben. Bei den Verläufen der Probekörpervariante LP_0,3mm_30%, insbesondere bei LP_0,3mm_30%B ist eine sprunghafte Zunahme der Querdehnung bei einer Zugspannung von ca. 3 MPa erkennbar. Dies ist auf Messfehler des Videoextensometers zurückzuführen.

Tab. 5-20 gibt eine Übersicht der für die Laminatproben ermittelten Größen des des Elastizitätsmoduls E , des Schubmoduls in Lagenebene G_{L12} der Querkontraktion ν und der Bruchdehnung ε_B .

Tab. 5-20: Messergebnisse der Versuchsreihe Zugversuch Laminat-Proben

Probenbezeichnung		E (GPa)	G_{L12} (Mpa)	ν (-)	ε_B (mm)
LP_0,1mm_19,7%	A	4,63	3144	0,39	0,92
	B	4,58	3153	0,40	0,91
LP_0,3mm_30%	A	5,08	n/a	n/a	0,83
	B	5,14	n/a	n/a	0,57

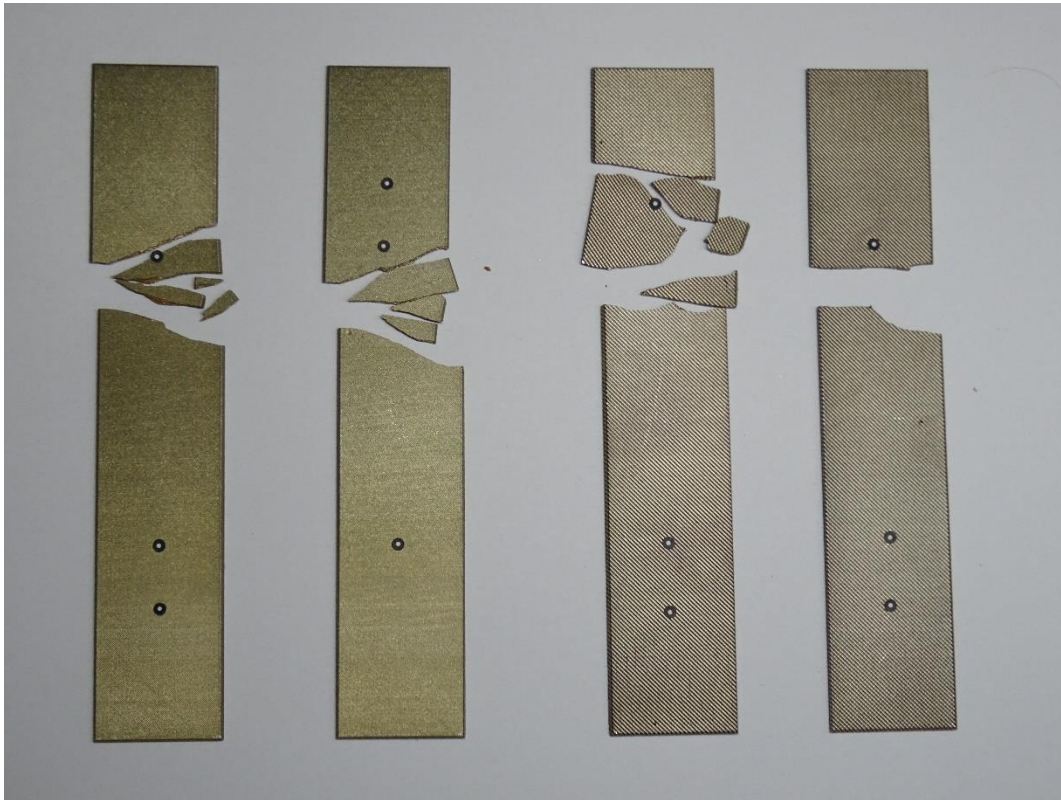


Abb. 5-26: Bruchverhalten der Laminatproben

Abb. 5-26 zeigt die Laminatproben LP_0,1mm_19.7%A, LP_0,1mm_19.7%B, LP_0,3mm_30%A und LP_0,3mm_30%B (von links nach rechts) nach Bruch.

5.1.4 Auswertung FEM-Simulation Biegeversuch

Im Folgenden werden die Ergebnisse der FEM-Simulation des Biegeversuchs in Form von Spannungs-Dehnungsdiagrammen präsentiert.

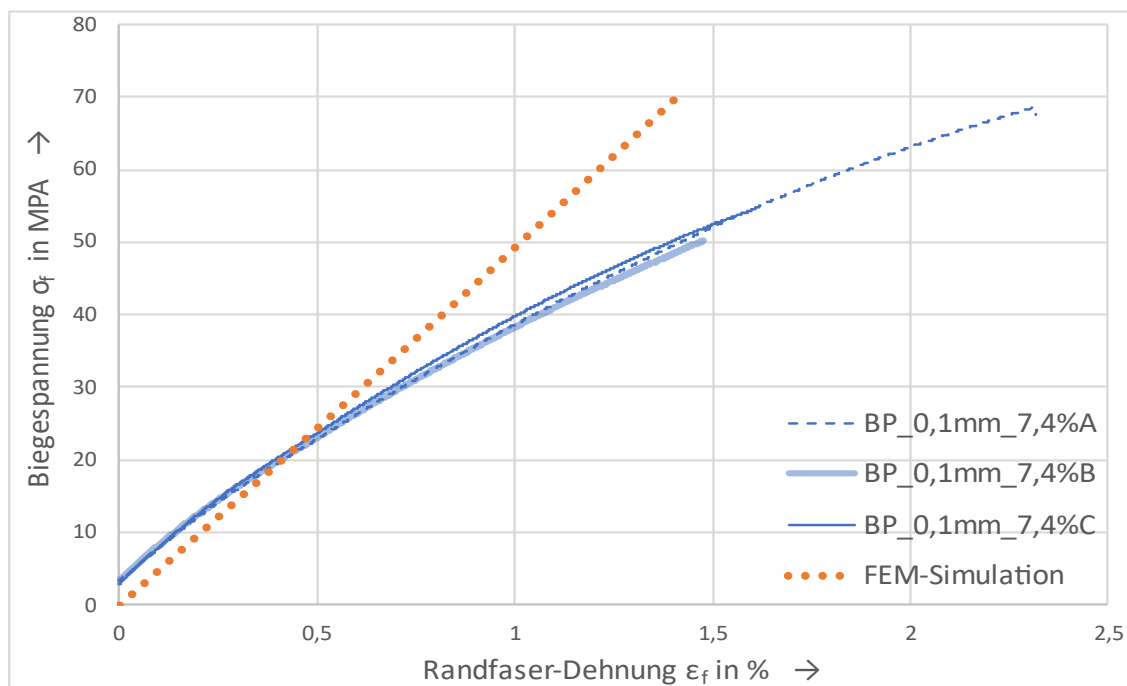


Abb. 5-27: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ϵ_f der Proben BP_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-27 zeigt die Biegespannung σ_f über der Randfaser-Dehnung ϵ_f der Proben BP_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation.

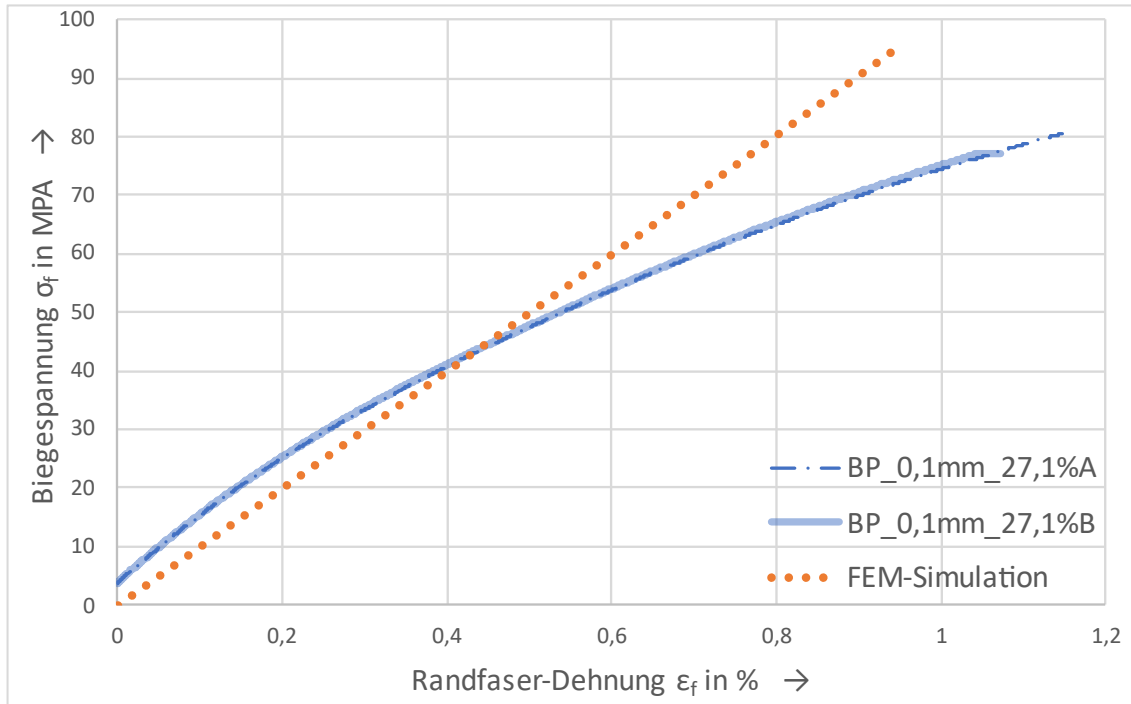


Abb. 5-28: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ϵ_f BP_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-28 zeigt die Biegespannung σ_f über der Randfaser-Dehnung ϵ_f der Proben BP_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation.

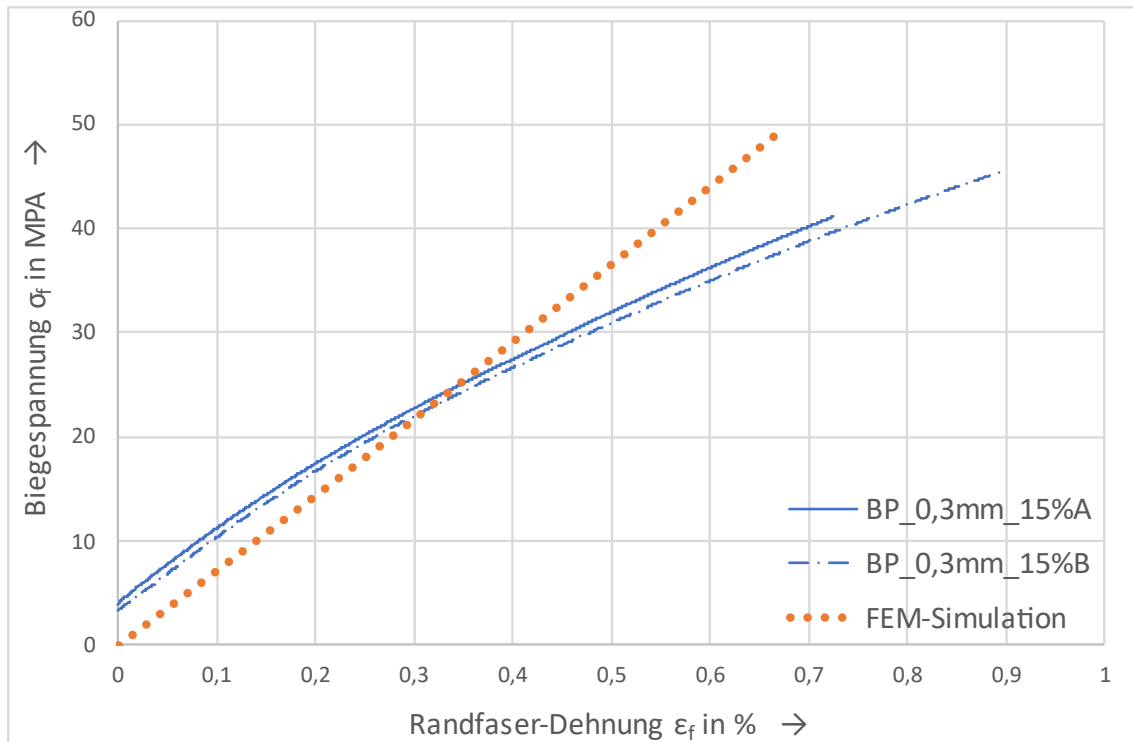


Abb. 5-29: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ϵ_f BP_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-29 zeigt die Biegespannung σ_f über der Randfaser-Dehnung ϵ_f der Proben BP_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation.

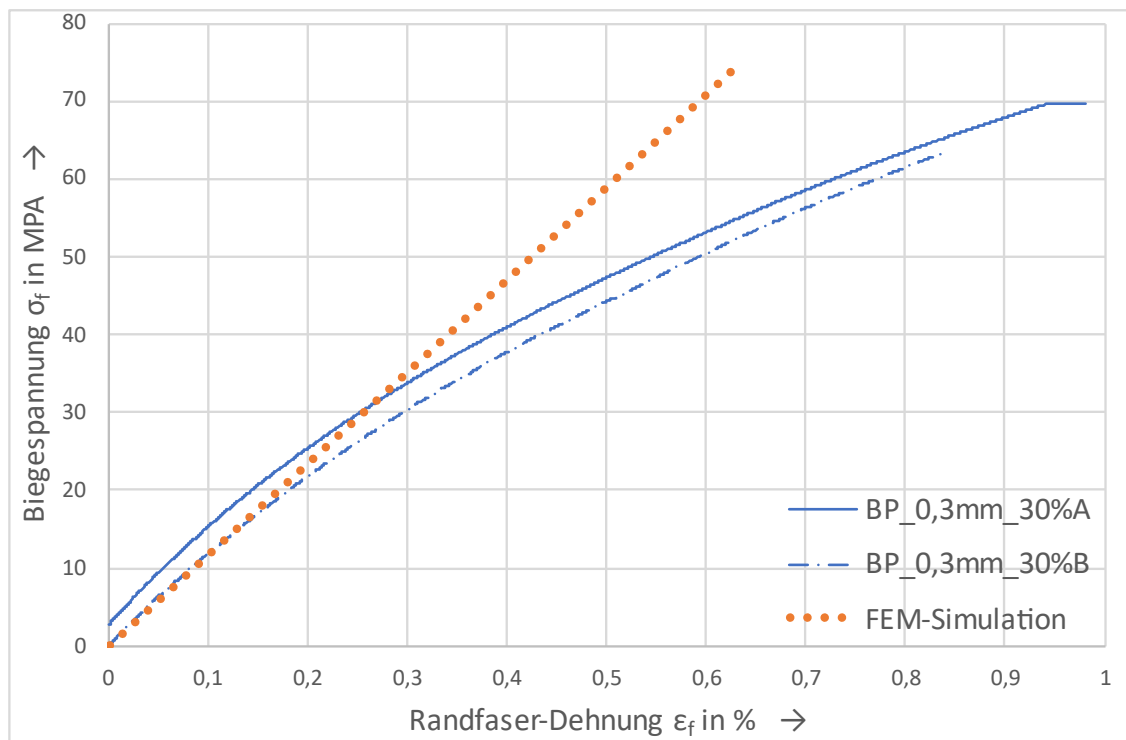


Abb. 5-30: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ϵ_f BP_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-30 zeigt die Biegespannung σ_f über der Randfaser-Dehnung ϵ_f der Proben BP_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation. Für den betrachteten Bereich kleiner Dehnungen zeigt für die in den Abbildungen Abb. 5-27 bis Abb. 5-30 dargestellten Verläufe eine gute Übereinstimmung. Für größere Dehnungen weicht der Verlauf der Simulation aufgrund der Nichtlinearität der Verläufe der Biegeproben zunehmend ab.

5.1.5 Auswertung FEM-Simulation Zugversuch UD-Proben

Im Folgenden werden die Ergebnisse der FEM-Simulation des Zugversuchs der UD-Proben in Form von Spannungs-Dehnungsdiagrammen präsentiert.

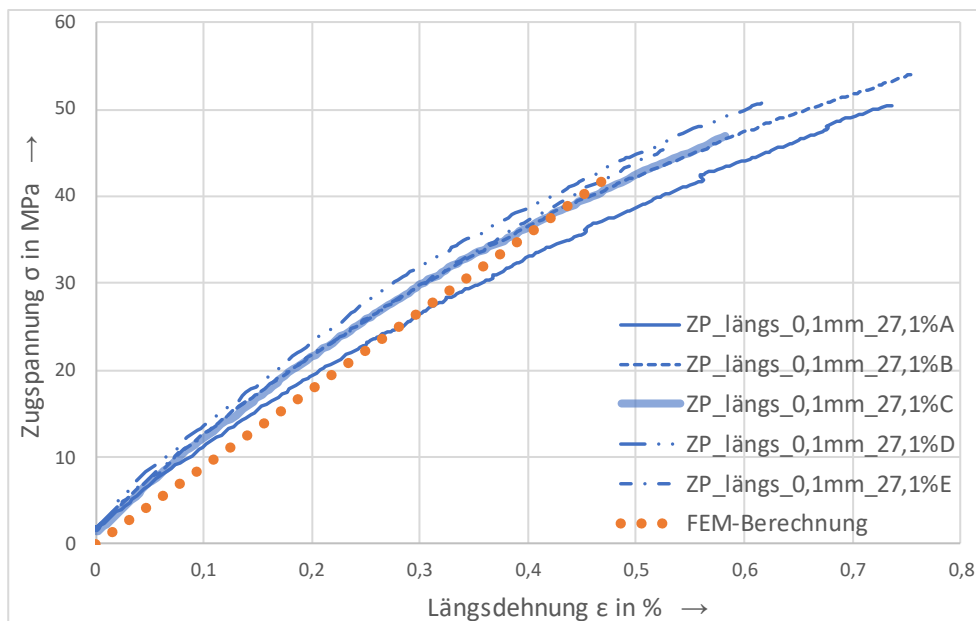


Abb. 5-31: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-31 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation.

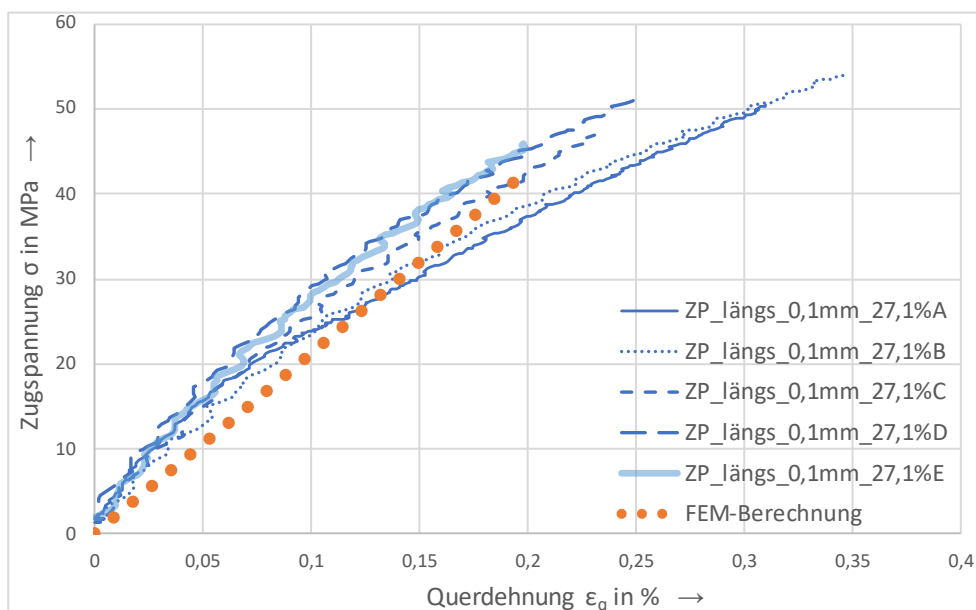


Abb. 5-32: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-32 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation.

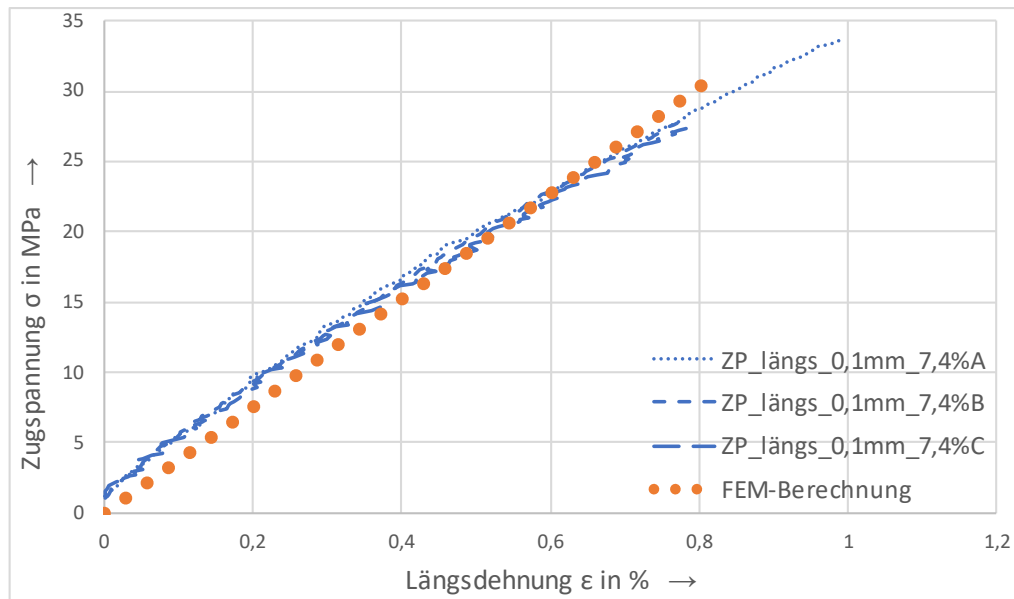


Abb. 5-33: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Proben ZP_längs_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-33 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Proben ZP_längs_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation.

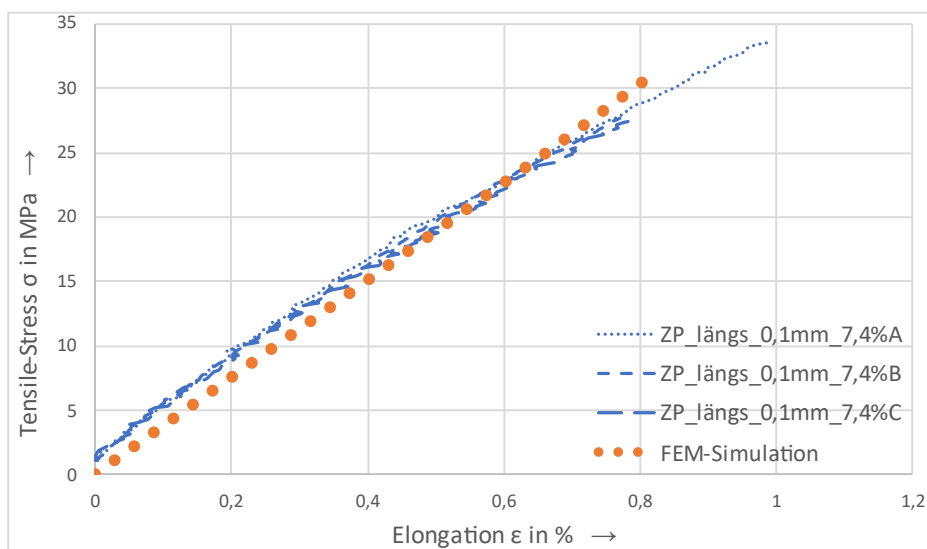


Abb. 5-34: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_längs_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-34 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_längs_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation.

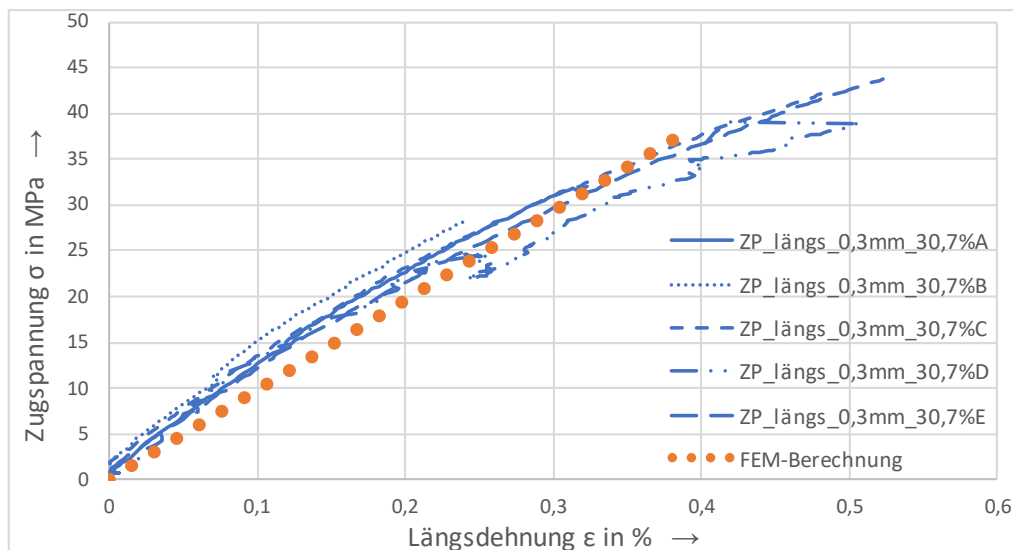


Abb. 5-35: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Proben ZP_längs_0,3mm_30,7% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-35 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Proben ZP_längs_0,3mm_30,7% und der zugehörigen FEM-Simulation.

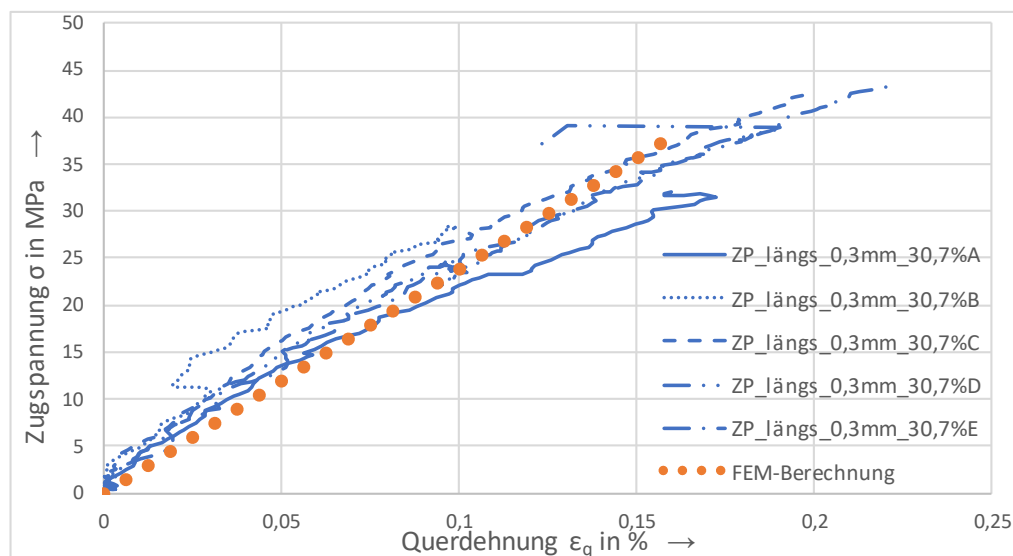


Abb. 5-36: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_längs_0,3mm_30,7% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-36 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_längs_0,3mm_30,7% und der zugehörigen FEM-Simulation. Für die in Abbildung Abb. 5-31 bis Abb. 5-36 dargestellten Verläufe ist eine gute Übereinstimmung erkennbar.

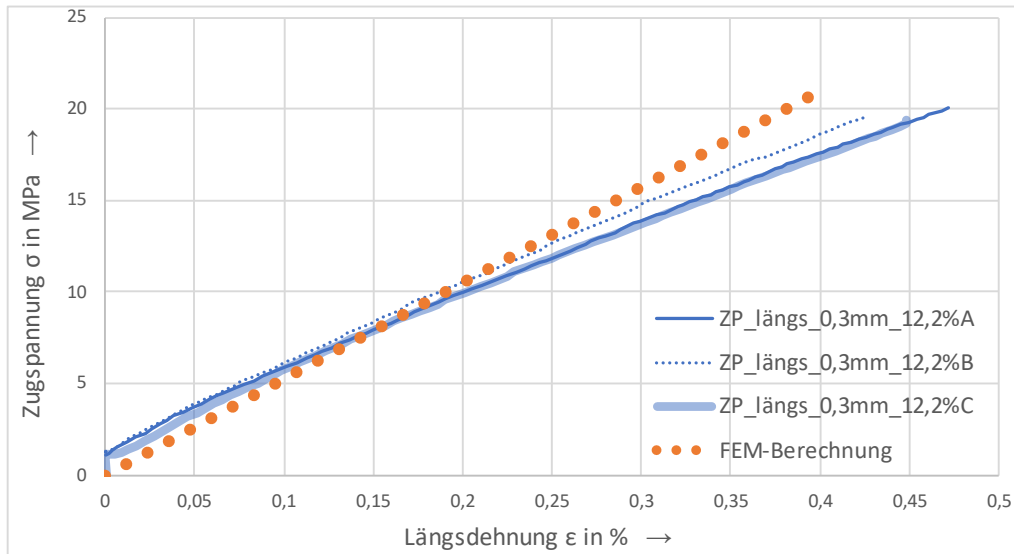


Abb. 5-37: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Proben ZP_längs_0,3mm_12,2% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-37 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Proben ZP_längs_0,3mm_12,2% und der zugehörigen FEM-Simulation.

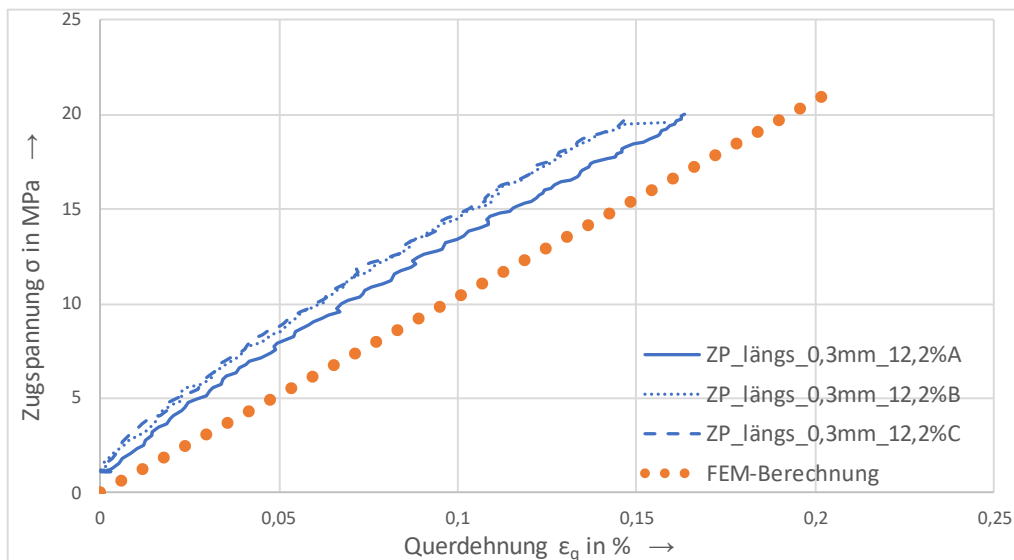


Abb. 5-38: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_längs_0,3mm_12,2% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-38 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_längs_0,3mm_12,2% und der zugehörigen FEM-Simulation. Es ist ein Versatz der im Zugversuch ermittelten Verläufe in positive Ordinatenrichtung im Vergleich zu denen der Simulation zu erkennen. Die Verläufe von Simulation und Versuchen weisen eine ähnliche Steigung auf.

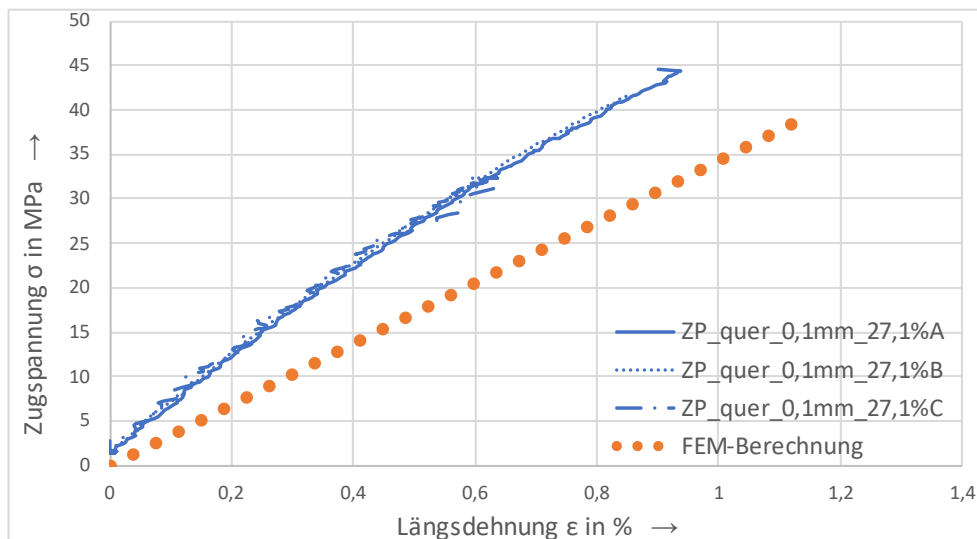


Abb. 5-39: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Proben ZP_quer_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-39 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Proben ZP_quer_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation. Auffällig ist eine im Vergleich zu den gemessenen Versuchen deutlich geringere Steigung des Verlaufs der FEM-Simulation.

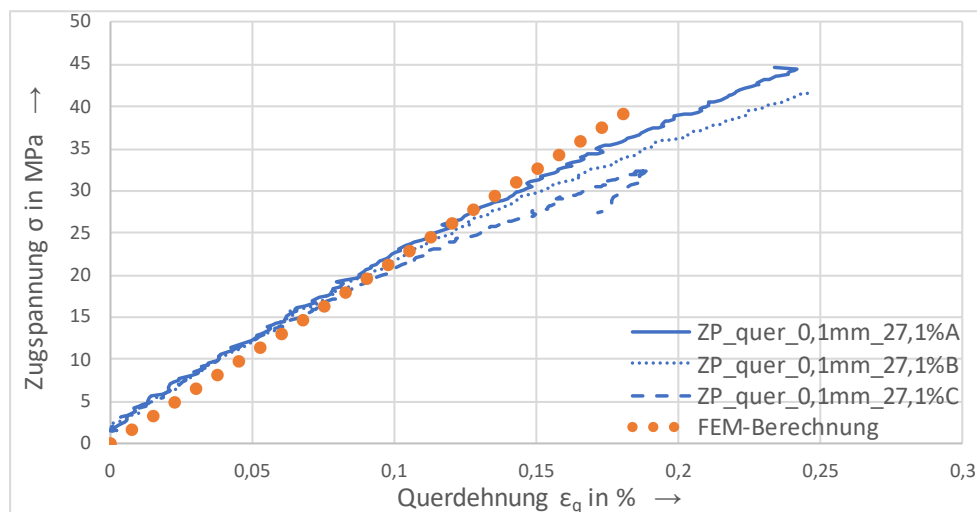


Abb. 5-40: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_quer_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-40 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_quer_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Verläufe.

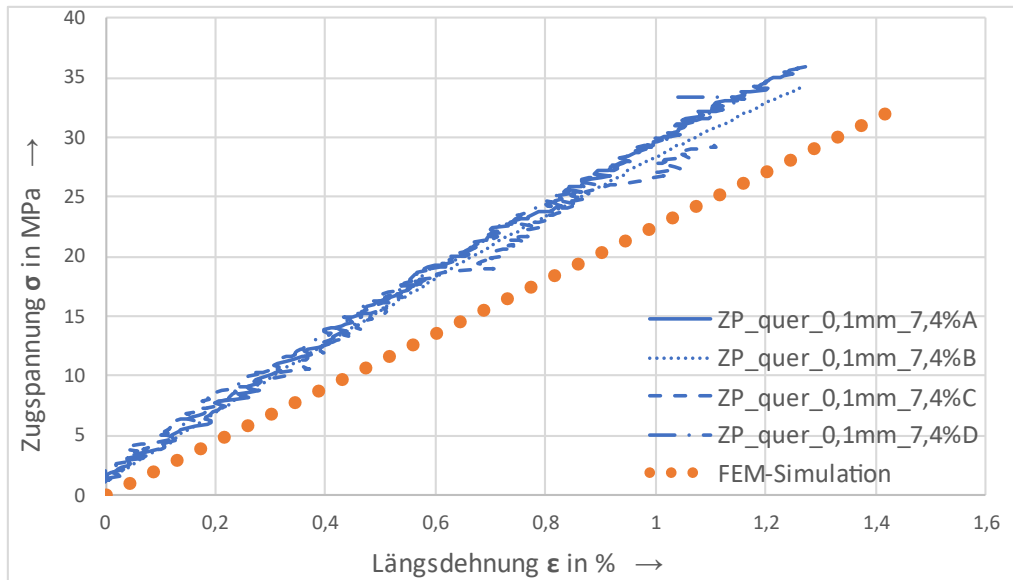


Abb. 5-41: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-41 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation. Auffällig ist, analog zu Abb. 5-39, eine im Vergleich deutlich geringere Steigung des Verlaufs der FEM-Simulation.

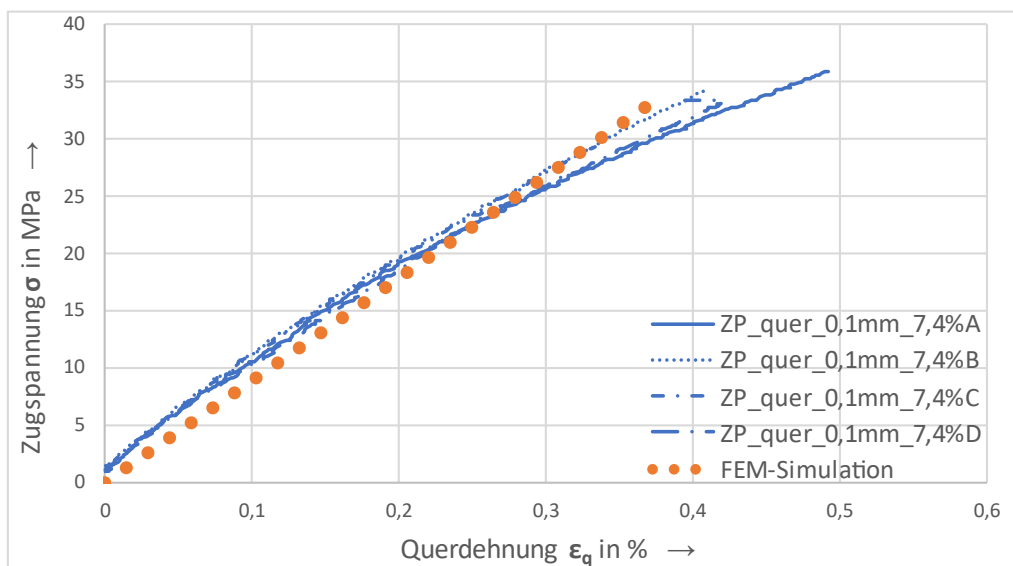


Abb. 5-42: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-42 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation. Die Verläufe stimmen gut miteinander überein.

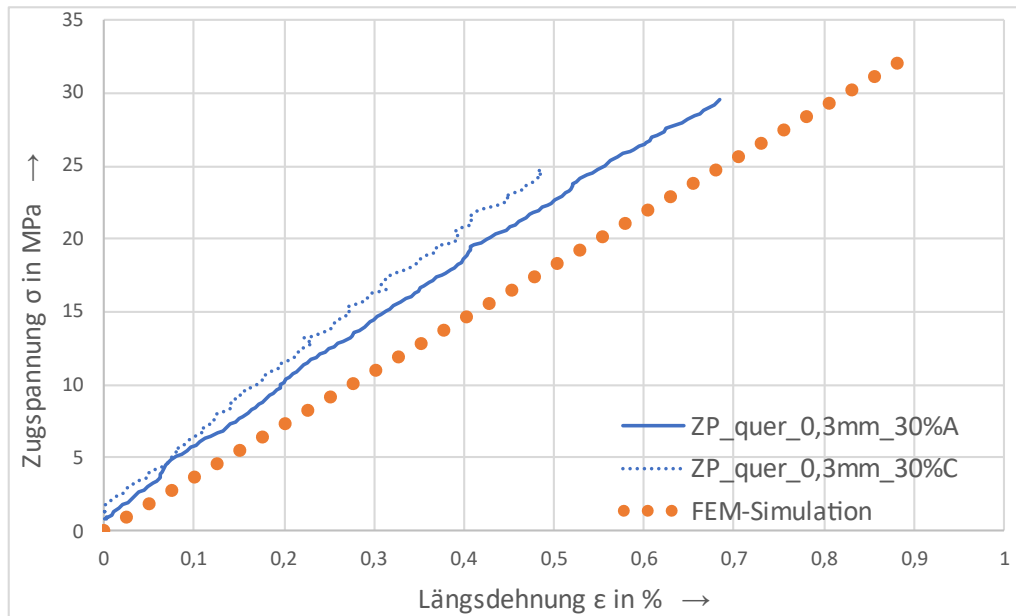


Abb. 5-43: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Proben ZP_quer_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-43 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Proben ZP_quer_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation. Die Steigung des Verlaufs der FEM-Simulation ist leicht geringer.

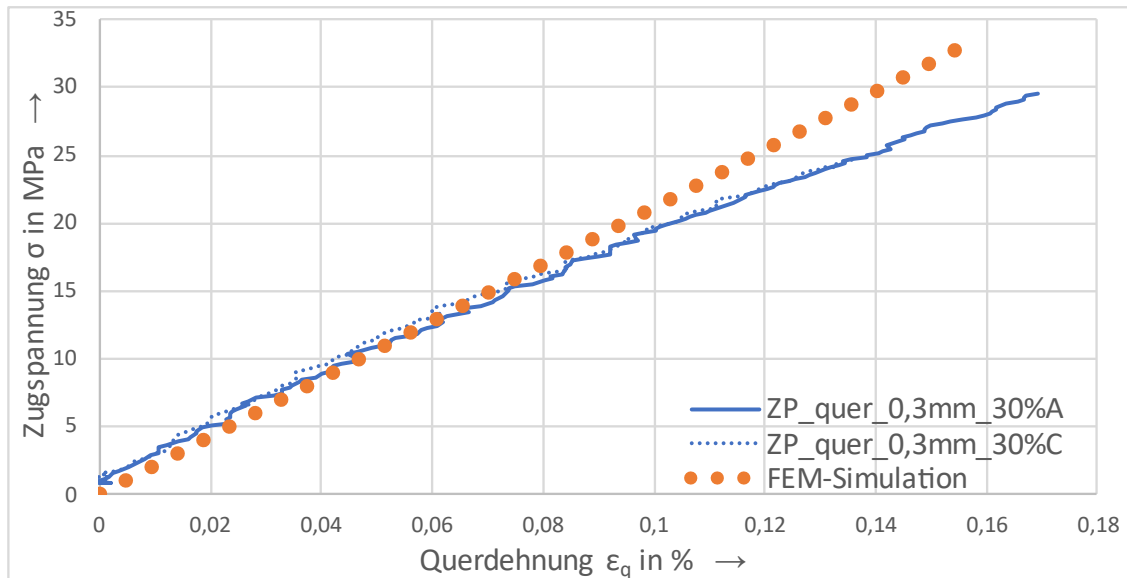


Abb. 5-44: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_quer_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-44 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_quer_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

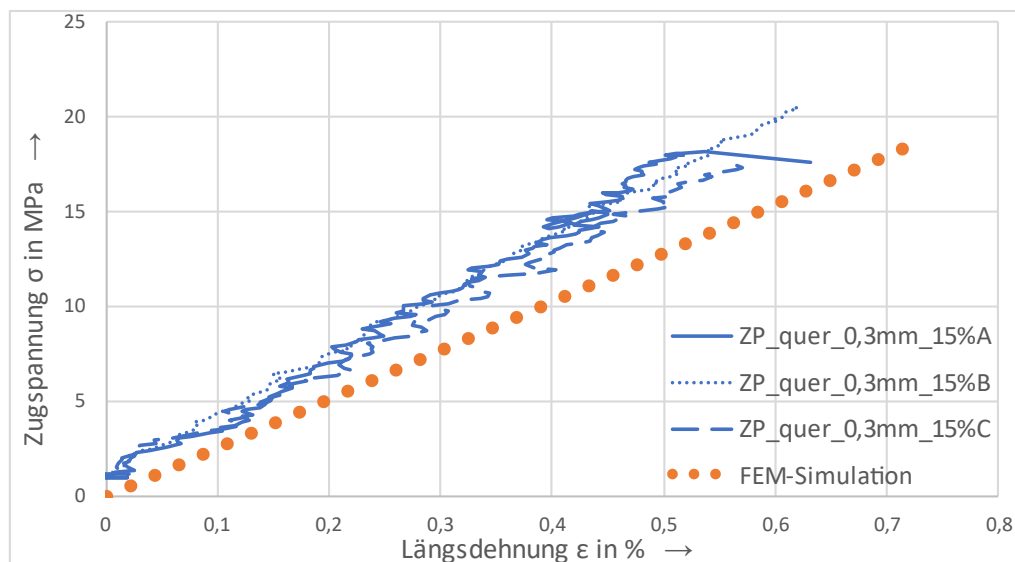


Abb. 5-45: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Proben ZP_quer_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-45 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Proben ZP_quer_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation. Analog zu Abb. 5-43 ist die Steigung des Verlaufs der FEM-Simulation leicht geringer.

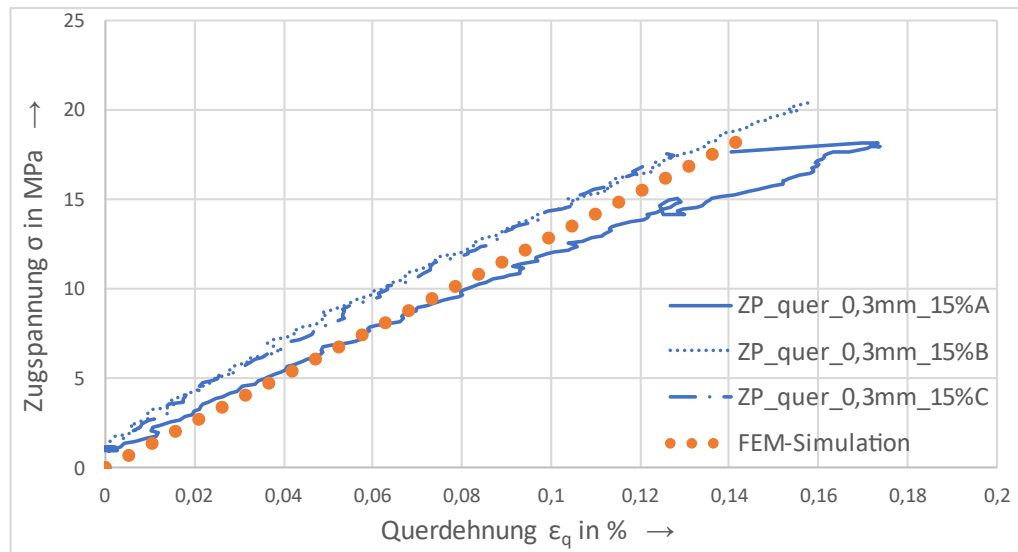


Abb. 5-46: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_quer_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation

Abb. 5-46 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Proben ZP_quer_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation. Die Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung.

5.1.6 Auswertung FEM-Simulation Zugversuch Laminatproben

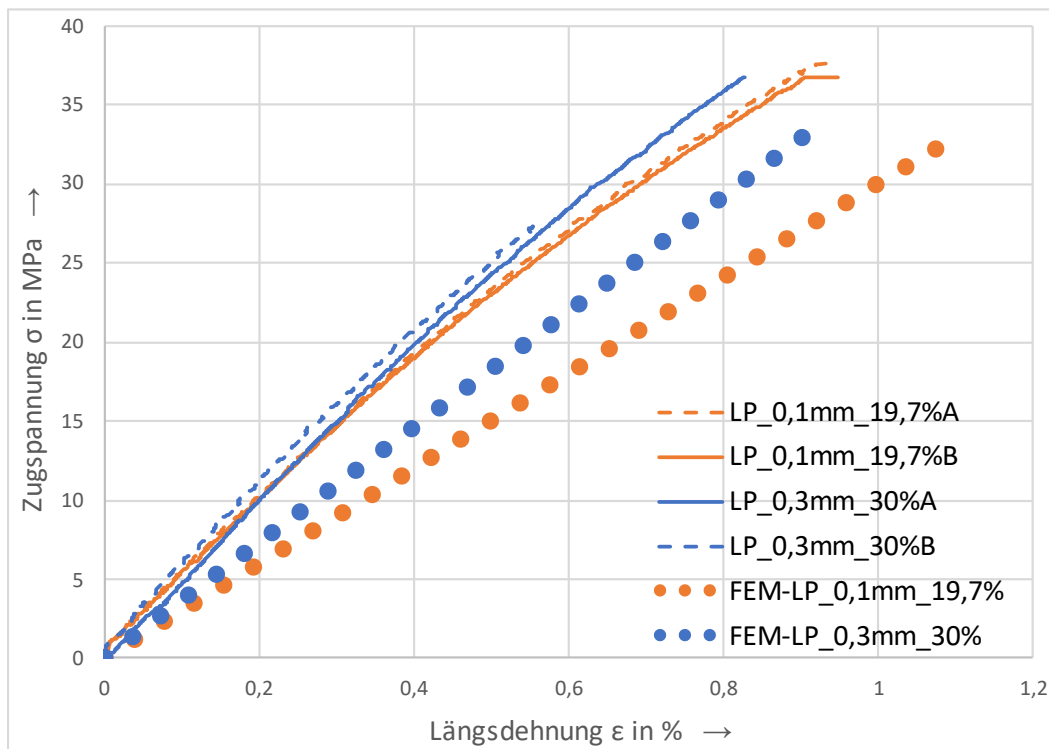


Abb. 5-47: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Laminatproben und der FEM-Simulation der Laminatproben

Abb. 5-47 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Längsdehnung ϵ der Laminatproben und der zugehörigen FEM-Simulationen. Auffällig ist eine insbesondere bei den Proben LP_0,1mm_19,7% deutlich geringere Steigung der Verläufe der FEM-Simulation.

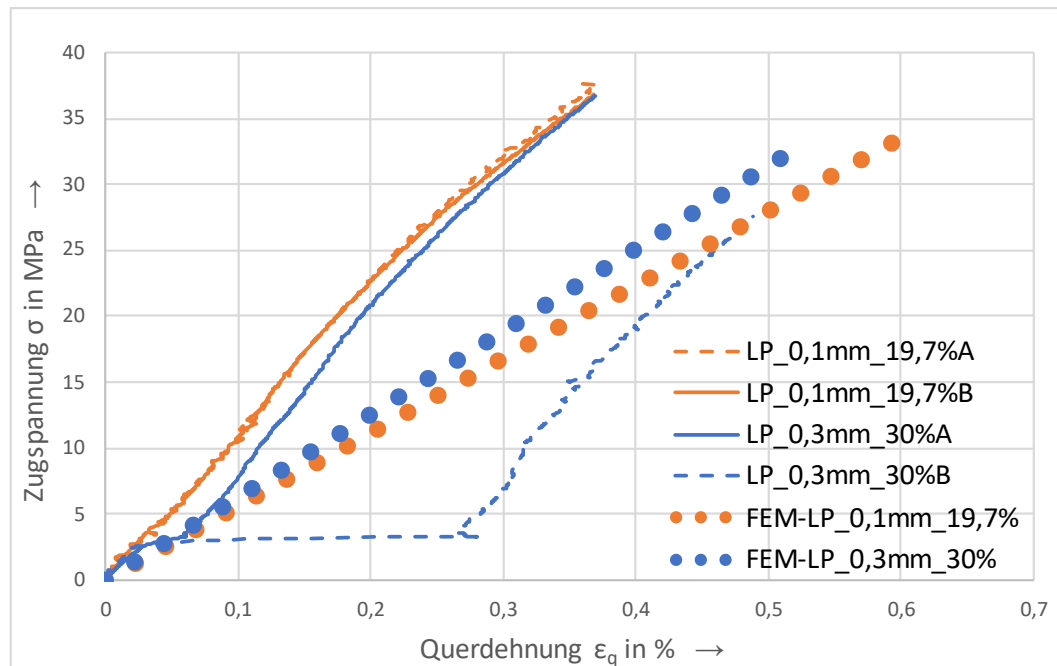


Abb. 5-48: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Laminatproben und der FEM-Simulation der Laminatproben

Abb. 5-48 zeigt die Verläufe der Zugspannung σ über der Querdehnung ϵ_q der Laminatproben und der zugehörigen FEM-Simulationen. Auffällig ist eine deutlich geringere Steigung der Verläufe der FEM-Simulation analog zu Abb. 5-48.

5.1.7 Auswertung CLT-Berechnung der Laminatproben

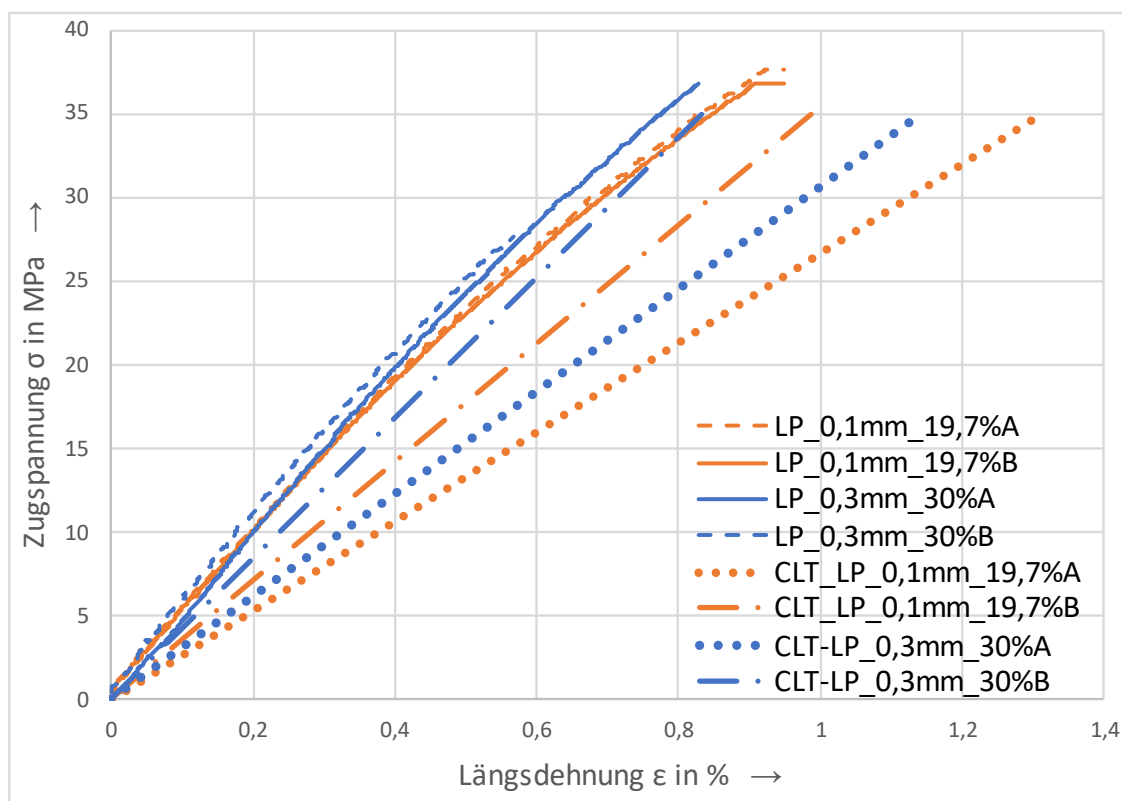


Abb. 5-49: Zugspannung σ über Längsdehnung ϵ der Laminatproben und der CLT-Berechnung der Laminatproben

Abb. 5-49 zeigt die Werte der Zugspannung über der Längsdehnung für die Laminatproben (LP_0,1mm_19,7% und LP_0,1mm_30%) sowie die CLT-Berechnung der Probekörpervarianten mit Quer-Längs Schubmodul nach Grundgleichung (2-16) und nach halbempirischer Näherungsgleichung (2-17).

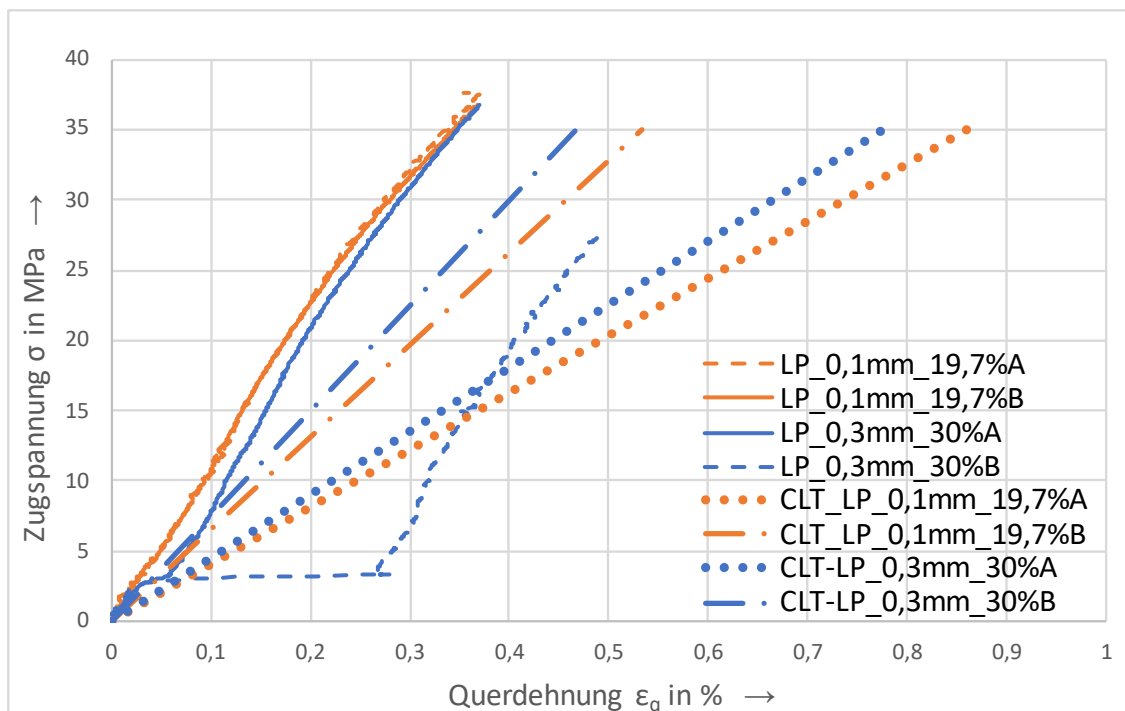


Abb. 5-50: Zugspannung σ über Querdehnung ϵ_q der Laminatproben und der CLT-Berechnung der Laminatproben

Abb. 5-50 zeigt die Werte der Zugspannung über der Querdehnung für die Laminatproben (LP_0,1mm_19,7% und LP_0,1mm_30%), die CLT-Berechnung der Probekörpervarianten mit Quer-Längs Schubmodul nach Grundgleichung (2-16) und nach halbempirischer Näherungsgleichung (2-17).

6 Ergebnisse und Diskussion

Biegeversuch

Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der Probekörpervarianten der Biegeproben zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Auffällig ist die im Vergleich zu den Verläufen der Zugproben stärker ausgeprägte Nichtlinearität der Verläufe. Insbesondere für Proben mit geringerem CI-Volumenanteil weicht das Verhalten der Biegeproben dahingehend von dem der restlichen Proben ab. Die Biegeproben wurden mit einem anderen System als die restlichen betrachteten Proben gefertigt. Das Druckermodell und die verwendeten Materialtypen sind gleich. Die Prozessparameter sind ebenfalls abgestimmt. Ein Einfluss auf das Werkstoffverhalten kann jedoch weder ausgeschlossen noch quantifiziert werden. Beim Biegeversuch treten neben Zugspannungen auch Druck- und Schubspannungen auf. Nichtlineares Verhalten der UD-Einzelschicht bei Druck- bzw. Schubbelastung ist im Bereich der FVK bekannt [75]. Mikroschädigungen aufgrund von Schubspannungen und Druckbelastung senkrecht zur Faserrichtung können Erklärungsansätze bieten.

Auffällig ist zudem die leicht höhere Steigung der Verläufe der Probekörpervariante BP_0,1mm_27,1% im Vergleich zu denen der Probekörpervariante BP_0,3mm_30% (siehe Abb. 5-6). Abb. 5-9 zeigt, dass die Biegeproben Versagen zwischen den Lagen des UD-Packungsmusters aufweisen. Eine Korrelation zwischen den größeren Seitenlängen der CI-Leiterbahn Querschnittsflächen und niedrigeren Steifigkeiten bei Schubbelastung ist, aufgrund des geringen Unterschieds der CI-Volumenanteile der oben genannten Biegeproben insbesondere aufgrund der Verläufe der Laminatproben auffällig (siehe Diskussion der Laminatproben unten).

Die Anwendung der linearen Mischungsregel nach Gleichung (2-6) zeigt eine hohe Übereinstimmung der Verläufe (siehe Abb. 5-7). Die Materialwerte der Rückrechnung für einen CI-Volumenanteil von 0 % bzw. 100 % (siehe Tab. 5-4) weisen eine geringe

Abweichung voneinander auf. Deswegen werden für die Simulation der Biegeproben die Mittelwerte der Rückrechnung verwendet.

Widerstandsmessung

Die Widerstandsmessung der CI-Leiterbahnen weist auf eine höhere Bruchdehnung des CI-Materials hin. Der Widerstandswert verläuft für die untersuchten Leiterbahnen konstant bis zum abrupten Anstieg bei Bruch der gesamten Probe. Es können folglich auch keine Risse mit Auswirkung auf den Widerstand vor Versagen des gesamten Bauteils detektiert werden. Bei Zutreffen dieser Annahme ist die Bedingung einer höheren Bruchdehnung des Matrixmaterials, für die Faserverstärkung (siehe Kapitel 2.2.1) nicht erfüllt.

Untersuchung der Querschnittsflächen

Optische Untersuchungen der Querschnittsflächen (siehe Kapitel 5.1) haben gezeigt, dass es insbesondere im Randbereich in xy -Richtung der Bauteile zu geometrischen Abweichungen kommt, welche sich durch eine Messung der Bauteilbreite in mittlerer Höhe nicht ideal ausgleichen lassen. Die geometrischen Abweichungen im Randbereich sind für Proben mit kleinen Querschnittsflächen besonders relevant, da bei diesen die schwer zu bestimmende Abweichung der Fläche des Randbereichs relativ zum gesamten Flächeninhalt des Querschnitts eine höhere Gewichtung hat.

$$A_{real}(h, b) = k_M \cdot A_{gemessen}(h, b) \pm A_{Randfehler}(h) \quad (6-1)$$

Gleichung (6-1) beschreibt vereinfacht den Zusammenhang zwischen der real vorliegenden Querschnittsfläche A_{real} , der gemessenen Querschnittsfläche $A_{gemessen}$, dem Korrekturfaktor k_M der Messung der Querschnittsfläche (ohne Berücksichtigung der Abweichung aufgrund des Randbereichs) und der Flächenabweichung aufgrund des Randbereichs $A_{Randfehler}$. Dabei hängt die reale und gemessene Fläche von Bauteilbreite b und Bauteildicke h ab, die Flächenabweichung $A_{Randfehler}$ jedoch nur von der Bauteildicke. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Bauteildicke in Aufbaurichtung liegt und der durch $h \cdot b$ definierte Querschnitt des Bauteils betrachtet wird.

Für größere Probekörperquerschnitte bei gleicher Bauteildicke fallen die Randbereiche folglich weniger stark ins Gewicht, was eine mögliche Erklärung für die niedrigen

Abweichungen der Spannungs-Dehnungs-Verläufe der Biegeproben und Laminatproben darstellen kann.

Zudem berücksichtigt die Messung der Probendicke mit Messschraube bzw. Messschieber keine Geometrieabweichungen in z-Richtung auf der Oberseite des Bauteilquerschnitts, wie sie in Abb. 5-14 deutlich sichtbar sind.

Die Messwerte der Querschnittsflächen mittels Pixelzählung weichen systematisch von denen der in Abb. 5-1 beschriebenen Messmethode ab.

Die Absackungen des CI-Materials im Randbereich in xy-Richtung, in Verbindung mit den Abweichungen der Geometrie in diesem Bereich, erschweren eine Bestimmung des CI-Volumenanteils. Analog zur Bestimmung des Flächeninhalts fällt die Messunsicherheit bzgl. des CI-Volumenanteils für kleinere Querschnittsgeometrien stärker ins Gewicht. Die Sensitivität des Materialmodells nach der linearen Mischungsregel bezüglich der Messunsicherheit wird in Tab. 5-13 und Tab. 5-14 dargestellt.

Neben den teils drastischen Abweichungen zur konstruierten Geometrie der CI-Leiterbahnen (siehe Abb. 5-15) fällt auf, dass auch im mittleren Querschnittsbereich kein exakt quadratischer Querschnitt vorliegt. Für die FEM-Simulation wurde von quadratischen Querschnittsflächen der Leiterbahnen ausgegangen. Ein Nachbilden der Abweichungen vom ideal quadratischen Querschnitt oder der Absackungen würde die Komplexität extrem erhöhen.

Untersuchung der längs-verstärkten UD-Proben

Die Spannungs-Dehnung Verläufe der längs-verstärkten UD-Proben weisen für höhere CI-Volumenanteile eine im Vergleich zu Proben mit niedrigerem CI-Volumenanteil höhere Nichtlinearität auf (siehe Abb. 5-10). Zudem weichen die Verläufe mit höheren Volumenanteilen deutlich stärker voneinander ab.

Proportional zum Volumenanteil steigt auch die Fläche der Phasengrenzen. Ein weiterer Unterschied sind die bei den Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und ZP_längs_0,3mm_30,7% deutlich ausgeprägteren Absackungen des CI-Materials im Randbereich. Nichtlineare Effekte des in negative z-Richtung abgesackten CI-Materials (siehe Abb. 5-15) im Randbereich in Kombination mit nichtlinearen Effekten im Bereich der Phasengrenzen könnten Erklärungsansätze für die Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungs Verläufe bei hohem CI-Volumenanteil bieten. Zudem könnten

die Bildung von Mikrorissen in der Struktur des CI-Materials für ein nicht-lineares Verhalten verantwortlich sein. Die Bildung von Mikrorissen in mit Silbernanopartikelintinten gedruckten Leiterbahnen ist Gegenstand aktueller Forschung [94].

Für die längs-verstärkten UD-Proben mit $s_q = 0,3 \text{ mm}$ weichen die Werte der Rückrechnung des Längs-Elastizitätsmoduls für reines DI-Material stark vom Erwartungswert ab. Eine statistische Analyse ergibt eine große Unsicherheit der Rückrechnungswerte für $\phi = 0 \%$. Zudem ergibt eine Analyse der Sensibilität der Rückrechnung gegenüber Messunsicherheiten bei den Proben mit $s_q = 0,3 \text{ mm}$ deutlich stärker abweichende Grenzwerte für $\phi = 0 \%$. Insbesondere Schwankungen des CI-Volumenanteils zeigen einen erheblichen Einfluss bei den Proben mit $s_q = 0,3 \text{ mm}$, während der Einfluss für die Proben mit $s_q = 0,1 \text{ mm}$ deutlich geringer ausfällt. Aus diesen Gründen werden die Werte der linearen Rückrechnung der längs verstärkten UD-Proben mit $s_q = 0,1 \text{ mm}$ für die Simulation und die Berechnung des Schubmoduls nach CLT verwendet.

Auffällig ist zudem die Abweichung der linearen Rückrechnung der Querelastizitätsgrößen der längs-verstärkten UD-Proben mit $s_q = 0,3 \text{ mm}$ (siehe Kapitel 5.1.2.1) von der der längs-verstärkten UD-Proben mit $s_q = 0,1 \text{ mm}$. Aufgrund der hohen Abweichungen der Messwerte der Proben ZP_längs_0,3mm_30,7% in Verbindung mit der geringen Probenanzahl der Probekörpervariante ZP_längs_0,3mm_12,2% (Tab. 5-7) ist eine Interpretation schwierig. Eine unterschiedliche Höhe der Querkontraktionszahlen des DI-Materials innerhalb des gleichen Baujobs ist fraglich.

Untersuchung der quer-verstärkten UD-Proben

Die Spannung-Dehnungs-Verläufe der quer-verstärkten UD-Proben zeigen für die Verläufe der Proben mit $s_q = 0,3 \text{ mm}$ auffällig hohe Abweichungen im Vergleich zu den Proben mit $s_q = 0,1 \text{ mm}$. Bei den längs belasteten UD-Proben ist dieser Zusammenhang nicht zu beobachten. Aufgrund der geringen Probenanzahl ist es schwer festzustellen, ob dies auf Ausreißer oder einen Effekt zurückzuführen ist.

Da die in an den Phasengrenzen in z-Richtung auftretenden Absackungseffekte mit der Höhe der Phasengrenze zunehmen, ist es möglich, dass sie für die mit dickeren

Leiterbahnen quer verstärkten UD-Proben einen erhöhten Einfluss haben. Zudem liegen hier die betroffenen Phasengrenzen, anders als bei parallel zur Leiterbahnorientierung belasteten Proben, normal zur Lastrichtung. Die Analyse der Quer-Elastizitätsmodule (siehe Abb. 5-23) zeigt einen flacheren Anstieg des Quer-Elastizitätsmodul, mit zunehmendem CI-Volumenanteil für die Proben mit dickeren Leiterbahnen. Auch dies könnte mit oben beschriebenem Sachverhalt zusammenhängen. Ein höherer Wert an normal zur Probenlängsrichtung liegender Phasengrenzfläche pro mm Probenlänge könnte in einer niedrigeren Steifigkeit bei Belastung in Probenlängsrichtung resultieren.

Die Anwendung des Materialmodells der Serienschaltung (siehe Abb. 2-3) erweist sich für die gemessenen Werte als nicht zielführend, da die Rückrechnung für $\phi = 100\%$ negative Werte ergibt. Abweichungen vom Materialmodell nach Gleichung (2-13) sind aus der Literatur bekannt, weswegen in der Praxis auf halbempirische Näherungsgleichungen zurückgegriffen wird. Eine Aussage zur Approximierbarkeit mittels einer halbempirischen Näherungsgleichung ist aufgrund der wenigen vorliegenden Messdaten schwer zu treffen. Insbesondere für den Bereich sehr hoher CI-Volumenanteile haben Vorversuche die Neigung des CI-Materials zur Rissbildung gezeigt. Zudem ist der Quotient der Elastizitätsmodule von CI- und DI-Material (ca. 15) deutlich geringer als der von Faser- und Matrixmaterial auf deren Basis die halbempirischen Gleichungen ermittelt sind. Zum Vergleich beträgt der Quotient für einen Kohlenstoffaser Polycarbonat Verbund ca. 300 (Kohlenstoffaser: 700 GPa; Polycarbonat 2,35 GPa [88]).

Bei der Analyse der Bruchflächen der quer-verstärkten UD-Proben fällt zudem ein Absacken der quer-liegenden CI-Leiterbahnen im Randbereich auf. Insbesondere an den nicht normal zur Aufbaurichtung liegenden Seitenflächen der Proben besteht eine ungewollte Verbindung des CI-Materials (siehe Abb. 5-22) in z-Richtung. Der Einfluss dieser geometrischen Abweichung auf das Materialmodell und die Berechnung des FEM-Modells ist nicht bekannt.

Untersuchung der Laminatproben

Bei der Untersuchung der Spannungs-Dehnungs Verläufe der Laminatproben fällt insbesondere auf, dass diese eine hohe Übereinstimmung aufweisen Abb. 5-24. Auch die Elastizitätsmodule weichen nur geringfügig voneinander ab (Tab. 5-20). Der Unterschied im Faservolumengehalt der Proben ist relativ hoch. Für die Proben mit

dünnen Leiterbahnen ($s_q = 0,1mm$) ist der CI-Volumengehalt mit 19,7 % relativ zu den Proben mit dickeren Leiterbahnen ($s_q = 0,3mm$), und einem CI-Volumengehalt von 30 %, um ca. 34 % niedriger. Die Laminatproben erfahren aufgrund der Orientierung der Leiterbahnen im Laminat Schubspannungen. Die normal zur Aufbaurichtung liegenden Phasengrenzen liegen zudem in einer Ebene. Eine Korrelation zwischen der höheren Seitenlänge der CI-Leiterbahnquerschnitte und somit größeren zusammenhängenden Phasengrenzen und einer geringeren Steifigkeit erscheint plausibel. Eine zusätzliche Überprüfung des Zusammenhangs z.B. durch Zugversuche von Laminatproben mit invertierten Werten für s_q und ϕ (größere Seitenlänge und geringerer CI-Volumenanteil gegenüber geringerer Seitenlänge und höherem CI-Volumenanteil) ist jedoch notwendig um die Theorie zu validieren. Aufgrund der Messfehler bei der Bestimmung des Schubmoduls in Lagenebene der Laminatproben ist ein Vergleich schwierig (siehe Tab. 5-20)

FEM-Simulation des Biegeversuchs

Die FEM-Simulation des Biegeversuchs zeigt eine gute Approximation für den betrachteten Bereich geringer Dehnungen. Für höhere Dehnungen weichen die gemessenen und simulierten Verläufe jedoch aufgrund der in den im Rahmen des Biegeversuchs auftretenden Nichtlinearitäten (siehe oben) voneinander ab.

FEM-Simulation des Zugversuchs UD-Proben

Die FEM-Simulation des Zugversuchs zeigt für die längs-verstärkten UD-Proben gute Ergebnisse, sowohl für die Abbildung der Längs- als auch der Querdehnungen.

Aufgrund der oben beschriebenen Unsicherheiten bezüglich der Rückrechnung der Elastizitätsmodule liegen die Abweichungen in einem akzeptablen Rahmen.

Für die Berechnung der quer-verstärkten UD-Proben zeigen sich auffällige Abweichungen der simulierten Werte bei Längsdehnung. Die betroffenen Verläufe der Spannung über der Längsdehnung der FEM-Simulationen weisen systematisch eine geringere Steigung auf. Neben dem Einfluss von Messunsicherheiten auf den im FEM-Modell verwendeten Wert des DI-Materials könnte das steifer als erwartete Verhalten bei Belastung quer zur Faserrichtung durch geometrische Abweichungen zu erklären sein. Das Simulationsmodell bildet perfekt quadratische Querschnittsflächen der Leiterbahnen ab, während die Leiterbahnen der Proben im Randbereich deutlich absacken und keinen perfekt quadratischen Querschnitt aufweisen. Die in Abb. 5-22

gezeigten Seitenflächen erwecken den Eindruck von längs zur Probenrichtung verbundenem CI-Material. Jedoch treten die Abweichungen auch bei den Proben mit größeren Abständen der Absackungen in Probenlängsrichtung auf. Aufgrund der größeren Abstände im Packungsmuster lässt sich bei diesen eine Verbindung des CI-Materials in Längsrichtung ausschließen.

FEM-Simulation des Laminats

Die FEM-Simulation der Laminatproben zeigt für den Verlauf der Spannung über der Längs- und auch der Querdehnung deutlich flachere Verläufe. Mögliche Ursachen hierfür können in den oben beschriebenen Unsicherheiten bei der Rückrechnung des Elastizitätsmoduls des DI-Materials liegen.

Zudem ist analog zur CLT-Berechnung eine höhere Steifigkeit der Laminatprobe mit 30 % CI-Volumenanteil im Vergleich zur alternativen Probekörpervariante mit 19,7 % CI-Volumenanteil erkennbar. Dies entspricht dem nach Berechnung erwarteten Verhalten, entspricht jedoch nicht den Verläufen der im Zugversuch ermittelten Messwerte.

CLT-Berechnung

Da für den Wert des Quer-Längs Schubmoduls der UD-Einzelschicht keine Werte bekannt sind wird dieser nach der Grundgleichung (2-16) und einer exemplarisch ausgewählten halbempirischen Näherungsgleichung (2-17) berechnet. Es zeigt sich ein deutlich besseres Ergebnis bei Verwendung der Näherungsformel. Die Verwendung von halbempirischen Näherungsgleichungen für den Schubmodul ist in der Literatur gängige Praxis. Die verwendete Näherungsformel gibt hier jedoch lediglich qualitativ einen Eindruck der Auswirkung der Anpassung des Schubmoduls nach einer üblichen Näherungsgleichung. Andere halbempirische Gleichungen aus der Literatur führen ebenfalls zu einer Erhöhung des Schubmoduls im Vergleich zur Berechnung nach Grundgleichung. Aufgrund der wenigen vorliegenden Messdaten ist die Bildung einer angepassten Gleichung für den vorliegenden Verbund nicht möglich. Auffällig ist die analog zur FEM-Berechnung erwartete, aber im Zugversuch nicht auftretende, deutlich höhere Steifigkeit der Probekörpervariante mit einem CI Volumenanteil von 30 %.

Die Unsicherheiten bezüglich der Bestimmung der Elastizitätsmodule des CI- und DI-Materials gehen in die Berechnung des Schubmoduls mit ein.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mikro- und makromechanische Materialmodelle aus dem Bereich der FVK bezüglich ihrer Anwendbarkeit bei additiv gefertigten leitfähigen Strukturen im Multi-Jet Modeling Verfahren untersucht. Hierfür wurden ausgewählte Materialmodelle zunächst auf Basis der Rahmenbedingungen des Verfahrens bewertet. Daraufhin wurde ein Versuchsprogramm zur Validierung der Materialmodelle erstellt. In diesem Kontext wurden verschiedene Probekörpergeometrien entwickelt und mittels dem in Kapitel 3 beschriebenen MJ-Verfahren gefertigt. Die Probekörper wurden im Rahmen des Versuchsprogramms mechanischen Prüfungen unterzogen. Sie unterscheiden sich insbesondere in Bezug auf die Dicke der Leiterbahnen und deren Orientierung. Neben UD-verstärkten Proben wurden Proben mit einem orthotropen Laminataufbau konstruiert. Die Probekörper wurden zudem optisch untersucht. Dabei wurden material- und prozessbedingte Geometrieabweichungen festgestellt. Insbesondere im Bereich nicht normal zur Aufbaurichtung liegender Seitenflächen wurden Abweichungen, welche zu Unsicherheiten bezüglich der Vermessung der Fläche führen, festgestellt. Der Effekt ist für kleine Bauteile besonders relevant. Aufgrund der geringen Anzahl der Probekörpervarianten haben Messunsicherheiten einen hohen Einfluss auf die Anwendung der Materialmodelle. Die Versuchsergebnisse des Prüfprogramms wurden ausgewertet und in die Materialmodelle implementiert. Abweichungen von den Materialmodellen wurden auf mögliche Ursachen zurückgeführt.

Unter anderem die geringe Probenanzahl stellte sich dabei als mögliche Fehlerquelle heraus. Das Materialmodell der parallel geschalteten Längs-Elastizitätsmodule zeigte gute Ergebnisse. Auch die Implementierung der daraus abgeleiteten Werkstoffdaten, in die im Rahmen der Arbeit erstellten FEM-Simulationsmodelle, zeigte gute Ergebnisse. Die Rückrechnung auf Basis der CLT wurde aufgrund mangelnder Daten bezüglich des Schubmoduls der UD-Einzelschicht vergleichsweise mit verschiedenen

Berechnungsformeln des Schubmoduls durchgeführt. Zudem wurde ein möglicher Einfluss der Seitenlänge der CI-Leiterbahnen auf den Schubmodul in Lagenebene der Laminatproben, bei gleichem CI-Volumenanteil festgestellt.

Ausblick

Um präzisere Aussagen bezüglich der Gültigkeit des Materialmodells nach dem Scheibchenmodell treffen zu können, und gegebenenfalls eine halbempirische Näherung herzuleiten ist die Untersuchung einer aussagekräftigen Anzahl quer-verstärkter Proben mit gleichmäßig über ein großes Intervall verteilten CI-Volumenanteilen empfehlenswert. Durch die gewonnenen Messwerte könnten, neben der Herleitung einer Näherungsgleichung, Erkenntnisse bezüglich des Einflusses normal belasteter Phasengrenzen, auf einen quer vertärkten Verbund, gewonnen werden.

Um die Einflüsse der Absackungen des CI-Materials auf die Berechnungsmodelle zu minimieren, sollten angepasste Probekörpergeometrien untersucht werden. Eine Möglichkeit des Ausschließens von Einflüssen der Absackungen auf die Messergebnisse wäre beispielsweise ein mechanisches Abtrennen der Randbereiche. Eine Möglichkeit der Reduzierung der negativen Effekte der Messunsicherheiten im Randbereich und damit einhergehender Messunsicherheiten stellt die Verwendung von Proben mit größeren Querschnittsflächen dar.

Eine Studie zur Bestimmung des Schubmoduls der UD-Einzelschicht ist für die Validierung der CLT interessant. Untersuchungen des Materialverhaltens bei Schubbelastung sind auch in Hinblick auf die Modellierung der Phasengrenzen des CI-DI-Verbundes interessant. Zudem ist die Überprüfung eines Zusammenhangs zwischen der Seitenlänge der Querschnittsflächen der CI-Leiterbahnen und dem resultierenden Schubmodul von Interesse.

Im Allgemeinen ist die Untersuchung des im Rahmen des Versuchsprogramms aufgetreten nichtlinearen Materialverhaltens für eine eine präzisere Modellierung der FEM-Modelle von großem Interesse. Hier bietet sich, neben einer Betrachtung des Materialverhaltens der Phasengrenzen des Verbunds, die Untersuchung des Materialverhaltens bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten an.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Thakar CM, Parkhe SS, Jain A, Phasinam K, Murugesan G, Ventayen RJM. 3d Printing: Basic principles and applications. *Materials Today: Proceedings* 2022;51:842–9.
- [2] Lachmayer R, Lippert RB, Kaielerle S. *Additive Serienfertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018.
- [3] Lu B-H, Lan H-B, Liu H-Z. Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics. *Opto-Electronic Advances* 2018;1(1):17000401–10.
- [4] MacDonald E, Salas R, Espalin D, Perez M, Aguilera E, Muse D et al. 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics. *IEEE Access* 2014.
- [5] Chee Kai Chua, Wai Yee Yeong, Hong Yee Low, Tuan Tran, Hong Wei Tan. Introduction to Conventional Electronics Manufacturing and 3D Printing of Electronics. In: Chua CK, Yeong WY, Low HY, Tran T, Tan HW, editors. *3D Printing and Additive Manufacturing of Electronics: WORLD SCIENTIFIC*; 2021, p. 1–29.
- [6] Persad J, Rocke S. A Survey of 3D Printing Technologies as Applied to Printed Electronics. *IEEE Access* 2022;10:27289–319.
- [7] Tan HW, Tran T, Chua CK. A review of printed passive electronic components through fully additive manufacturing methods. *Virtual and Physical Prototyping* 2016;11(4):271–88.
- [8] IEC. *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch: IEC 60050(60050)*: International Electrotechnical Commission.
- [9] Winzker M. *Elektronik für Entscheider*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2017.
- [10] Rost A. *Grundlagen der Elektronik*. Vienna: Springer Vienna; 1983.
- [11] Heywang W, Müller R (eds.). *Bauelemente der Halbleiter-Elektronik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1987.

-
- [12] Cui Z. Printed Electronics. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd; 2016.
- [13] Joe Lopes A, MacDonald E, Wicker RB. Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication. *Rapid Prototyping Journal* 2012;18(2):129–43.
- [14] Bernstein H. *Elektronik und Mechanik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2020.
- [15] Chang J, Ge T, Sanchez-Sinencio E (eds.). *Challenges of Printed Electronics on Flexible Substrates*. [Place of publication not identified]: IEEE; 2012.
- [16] Wu W. Inorganic nanomaterials for printed electronics: a review. *Nanoscale* 2017;9(22):7342–72.
- [17] Suganuma K. *Introduction to Printed Electronics*. New York, NY: Springer New York; Imprint; Springer; 2014.
- [18] Cantatore E. *Applications of Organic and Printed Electronics*. Boston, MA: Springer US; 2013.
- [19] Christina Bodenstein. *Untersuchung des Tampondrucks und dessen Kantengenauigkeit für die Anwendung in der gedruckten Elektronik*. Dissertation. Darmstadt; 2020.
- [20] Saengchairat N, Tran T, Chua C-K. A review: additive manufacturing for active electronic components. *Virtual and Physical Prototyping* 2017;12(1):31–46.
- [21] Khan S, Lorenzelli L, Dahiya RS. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors J*. 2015;15(6):3164–85.
- [22] Zavanelli N, Yeo W-H. Advances in Screen Printing of Conductive Nanomaterials for Stretchable Electronics. *ACS omega* 2021;6(14):9344–51.
- [23] DIN EN ISO/ASTM. *DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03, Additive Fertigung_- Grundlagen_- Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021); Deutsche Fassung EN_ISO/ASTM 52900:2021. 52900th ed;52900(52900)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. doi:10.31030/3290011.

-
- [24] Risse A. *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag; 2012.
- [25] Chang JS, Facchetti AF, Reuss R. A Circuits and Systems Perspective of Organic/Printed Electronics: Review, Challenges, and Contemporary and Emerging Design Approaches. *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.* 2017;7(1):7–26.
- [26] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer International Publishing; 2021.
- [27] Yin Z, Huang Y, Duan Y, Zhang H. *Electrohydrodynamic Direct-Writing for Flexible Electronic Manufacturing*. Singapore: Springer Singapore; 2018.
- [28] Espera AH, Dizon JRC, Chen Q, Advincula RC. 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Prog Addit Manuf* 2019;4(3):245–67.
- [29] Zhou J, Ge T, Chang JS. Fully-additive printed electronics: Process Development Kit. In: 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Montréal, QC, Canada, 22.05.2016 - 25.05.2016.
- [30] Erika Hrehorova. *Materials and Processes for Printed Electronics: Evaluation of Gravure Printing in Electronics Manufacture*. Dissertation. Michigan; 2007.
- [31] Chang J, Zhang X, Ge T, Zhou J. Fully printed electronics on flexible substrates: High gain amplifiers and DAC. *Organic Electronics* 2014;15(3):701–10.
- [32] Zhang X, Ge T, Chang JS. Fully-Additive Printed Electronics: Transistor model, process variation and fundamental circuit designs. *Organic Electronics* 2015;26:371–9.
- [33] Ge T, Zhou J. An Open Platform for Fully-Additive Printed Electronics. *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.* 2017;7(1):123–32.
- [34] Hoerber J, Glasschroeder J, Pfeffer M, Schilp J, Zaeh M, Franke J. Approaches for Additive Manufacturing of 3D Electronic Applications. *Procedia CIRP* 2014;17:806–11.
- [35] Tan HW, An J, Chua CK, Tran T. Metallic Nanoparticle Inks for 3D Printing of Electronics. *Adv. Electron. Mater.* 2019;5(5):1800831.

- [36] Flowers PF, Reyes C, Ye S, Kim MJ, Wiley BJ. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament. *Additive Manufacturing* 2017;18:156–63.
- [37] Additive Manufacturing of Ceramics. In: Bandyopadhyay A, Bose S, editors. *Additive Manufacturing*: CRC Press; 2015, p. 156–97.
- [38] Yoshida Y, Wada H, Izumi K, Tokito S. Highly conductive metal interconnects on three-dimensional objects fabricated with omnidirectional ink jet printing technology. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2017;56(5S2):05EA01.
- [39] Castillo S, Muse D, Medina F, MacDonald E, Wicker R. *Electronics Integration in Conformal Substrates Fabricated with Additive Layered Manufacturing*: University of Texas at Austin; 2009.
- [40] Valentine AD, Busbee TA, Boley JW, Raney JR, Chortos A, Kotikian A et al. Hybrid 3D Printing of Soft Electronics. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.) 2017;29(40).
- [41] Maalderink HHH, Bruning FBJ, Schipper MMR de, van der Werff JJJ, Germs WWC, Remmers JJC et al. 3D Printed structural electronics: embedding and connecting electronic components into freeform electronic devices. *Plastics, Rubber and Composites* 2018;47(1):35–41.
- [42] Espalin D, Muse DW, MacDonald E, Wicker RB. 3D Printing multifunctionality: structures with electronics. *Int J Adv Manuf Technol* 2014;72(5-8):963–78.
- [43] Vatani M, Lu Y, Engeberg ED, Choi J-W. Combined 3D printing technologies and material for fabrication of tactile sensors. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2015;16(7):1375–83.
- [44] Lazarus N, Bedair SS, Hawasli SH, Kim MJ, Wiley BJ, Smith GL. Selective Electroplating for 3D-Printed Electronics. *Adv Materials Technologies* 2019;4(8):1900126.
- [45] Paul KE, Wong WS, Ready SE, Street RA. Additive jet printing of polymer thin-film transistors. *Appl. Phys. Lett.* 2003;83(10):2070–2.
- [46] Veres J, Bringans RD, Chow EM, Lu JP, Mei P, Ready SE et al. Additive manufacturing for electronics “Beyond Moore”. In: 2016 IEEE International

- Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 03.12.2016 - 07.12.2016.
- [47] Lee J-Y, An J, Chua CK. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today* 2017;7:120–33.
- [48] Ge Q, Li Z, Wang Z, Kowsari K, Zhang W, He X et al. Projection micro stereolithography based 3D printing and its applications. *Int. J. Extrem. Manuf.* 2020;2(2):22004.
- [49] Layani M, Wang X, Magdassi S. Novel Materials for 3D Printing by Photopolymerization. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 2018;30(41):e1706344.
- [50] Kuang X, Wu J, Chen K, Zhao Z, Ding Z, Hu F et al. Grayscale digital light processing 3D printing for highly functionally graded materials. *Science advances* 2019;5(5):eaav5790.
- [51] Mu Q, Wang L, Dunn CK, Kuang X, Duan F, Zhang Z et al. Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing* 2017;18:74–83.
- [52] Li J, Wasley T, Nguyen TT, Ta VD, Shephard JD, Stringer J et al. Hybrid additive manufacturing of 3D electronic systems. *J. Micromech. Microeng.* 2016;26(10):105005.
- [53] Gülcan O, Günaydın K, Tamer A. The State of the Art of Material Jetting-A Critical Review. *Polymers* 2021;13(16).
- [54] Zhang F, Saleh E, Vaithilingam J, Li Y, Tuck CJ, Hague RJ et al. Reactive material jetting of polyimide insulators for complex circuit board design. *Additive Manufacturing* 2019;25:477–84.
- [55] Khan A, Rahman K, Ali S, Khan S, Wang B, Bermak A. Fabrication of circuits by multi-nozzle electrohydrodynamic inkjet printing for soft wearable electronics. *Journal of Materials Research* 2021;36(18):3568–78.
- [56] Li Y, Torah R, Beeby S, Tudor J. An all-inkjet printed flexible capacitor on a textile using a new poly(4-vinylphenol) dielectric ink for wearable applications. In: 2012 IEEE Sensors, Taipei, Taiwan, 28.10.2012 - 31.10.2012.

- [57] Winkelmann A, Flath C, Thiesse F. *Sharing Economy in der Industrie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2021.
- [58] Postiglione G, Natale G, Griffini G, Levi M, Turri S. Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2015;76:110–4.
- [59] Kluska E, Gruda P, Majca-Nowak N. The Accuracy and the Printing Resolution Comparison of Different 3D Printing Technologies. *Transactions on Aerospace Research* 2018;2018(3):69–86.
- [60] Cox B, Saari M, Xia B, Richer E, Krueger PS, Cohen AL. Fiber Encapsulation Additive Manufacturing: Technology and Applications Update. *3D Printing and Additive Manufacturing* 2017;4(2):116–9.
- [61] Mortara L, Hughes J, Ramsundar PS, Livesey F, Probert DR. Proposed classification scheme for direct writing technologies. *Rapid Prototyping Journal* 2009;15(4):299–309.
- [62] Hon K, Li L, Hutchings IM. Direct writing technology—Advances and developments. *CIRP Annals* 2008;57(2):601–20.
- [63] Nir MM, Zamir D, Haymov I, Ben-Asher L, Cohen O, Faulkner B et al. Electrically Conductive Inks for Inkjet Printing. In: Magdassi S, editor. *The Chemistry of Inkjet Inks: WORLD SCIENTIFIC*; 2009, p. 225–54.
- [64] King BH, O'Reilly MJ, Barnes SM. Characterizing aerosol Jet[®] multi-nozzle process parameters for non-contact front side metallization of silicon solar cells. In: 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Philadelphia, PA, USA, 07.06.2009 - 12.06.2009.
- [65] Cai F, Pavlidis S, Papapolymerou J, Chang YH, Wang K, Zhang C et al. Aerosol jet printing for 3-D multilayer passive microwave circuitry. In: 2014 44th European Microwave Conference, Rome, 06.10.2014 - 09.10.2014.
- [66] Piqué A. Laser-Based Micro-Additive Manufacturing Technologies. In: *Three-Dimensional Microfabrication Using Two-photon Polymerization*: Elsevier; 2016, p. 1–19.

- [67] Kawahara Y, Hodges S, Cook BS, Zhang C, Abowd GD. Instant inkjet circuits. In: Mattern F, Santini S, Canny JF, Langheinrich M, Rekimoto J, editors. Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing. New York, NY, USA: ACM; 2013, p. 363–72.
- [68] Kamyshny A. Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics. TOAPJ 2011;4(1):19–36.
- [69] Fesenko O, Yatsenko L. Nanooptics, Nanophotonics, Nanostructures, and Their Applications. Cham: Springer International Publishing; 2018.
- [70] Mo L, Guo Z, Yang L, Zhang Q, Fang Y, Xin Z et al. Silver Nanoparticles Based Ink with Moderate Sintering in Flexible and Printed Electronics. International journal of molecular sciences 2019;20(9).
- [71] Cherrington M, Claypole TC, Deganello D, Mabbett I, Watson T, Worsley D. Ultrafast near-infrared sintering of a slot-die coated nano-silver conducting ink. J. Mater. Chem. 2011;21(21):7562.
- [72] Hwang H-J, Oh K-H, Kim H-S. All-photonic drying and sintering process via flash white light combined with deep-UV and near-infrared irradiation for highly conductive copper nano-ink. Scientific reports 2016;6:19696.
- [73] Rösler J, Harders H, Bäker M. Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2019.
- [74] Chawla KK. Composite Materials. Cham: Springer International Publishing; 2019.
- [75] Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2013.
- [76] Schürmann H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Springer Berlin Heidelberg; 2007.
- [77] Ehrenstein GW. Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. 2nd ed. München: Hanser; 2006.
- [78] Puck A. Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis. München, Wien: Hanser; 1996.

-
- [79] Moser K. Faser-Kunststoff-Verbund. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1992.
- [80] Mittelstedt C, Becker W. Strukturmechanik ebener Lamine. 1st ed. Darmstadt: Studienbereich Mechanik, Technische Universität Darmstadt; 2016.
- [81] Basan R. Untersuchung der intralaminaren Schubeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen mit Epoxidharzmatrix unter Berücksichtigung nichtlinearer Effekte. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM); 2011.
- [82] Markus Götz. Grundelastizitätsgrößen am Mehrschichtverbund. Diplomarbeit. Graz; 2012.
- [83] May D. Integrierte Produktentwicklung mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2020.
- [84] NanoDimension. DragonFly LDM Inks User Guide; 2021.
- [85] NanoDimension. Safety Data Sheet AgCite; 2020.
- [86] NanoDimension. Safety Data Sheet OSHA HCS; 2019.
- [87] NanoDimension. Design Rules for DragonFly IV; 2022.
- [88] Weißbach W. Werkstoffkunde: Vieweg Verlag; 2007.
- [89] DIN EN ISO 14125; 2011.
- [90] DIN EN ISO 527-2; 2012.
- [91] DIN EN ISO 14129; 1998.
- [92] Altair ESAComp 2020. Theoretical Background - Analyses; 2020.
- [93] Brell. Statistik von Null auf Hundert: Springer Berlin Heidelberg; 2017.
- [94] Dalal N, Gu Y, Hines DR, Dasgupta A, Das S. Cracks in the 3D-printed conductive traces of silver nanoparticle ink. *J. Micromech. Microeng.* 2019;29(9):97001.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Kategorien von DW-Verfahren	17
Abb. 2-2: Darstellung der Parallelschaltung zweier Federn	25
Abb. 2-3: Darstellung des Faser-Matrix Verbunds (oben), Scheibchenmodells (mitte) und Federmodells (unten)	27
Abb. 4-1: Aufbau des Vierpunkt Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14125	38
Abb. 4-2: Schaltkreis des Ohmmeters	39
Abb. 4-3: Ausschnitt des Packungsmuster des UD-Verbund	40
Abb. 4-4: Lötstellen im 3D-Modell (links) und am gedruckten Bauteil (rechts)	42
Abb. 4-5: Aufbau des Zugversuchs der UD-Proben	44
Abb. 4-6: Bemaßung der Probekörpergeometrie der UD-Proben	45
Abb. 4-7: Darstellung der Leiterbahnorientierung der UD-Proben, längs-verstärkt (oben) und quer-verstärkt (unten)	46
Abb. 4-8: Laminataufbau der Laminatproben mit $s_q=0,1$ mm (links) und $s_q=0,3$ mm (rechts)	50
Abb. 4-9: Repräsentativer Ausschnitt aus der Biegeprobe	51
Abb. 4-10: Simulativer Aufbau des Biegeversuchs	52
Abb. 4-11: Kontaktbereich zwischen dem Volumenkörper des oberen Auflagers und den CI- bzw. DI-Volumenkörpern	53
Abb. 4-12: Vernetzung der Probe BP_0,1mm_27,1%	55
Abb. 4-13: Externe Verschiebung des unteren Auflagers	55
Abb. 4-14: Randbedingungen am Ausschnitt der UD-Proben, externe Kraft (links) und reibungsfreie Lagerung (rechts)	60
Abb. 4-15: Seitenansicht des Ausschnitts der Probekörpervariante LP_0,1mm_19,7%	61
Abb. 5-1: Vermessungsmethode unter der Annahme eines trapezförmigen Querschnitts	65
Abb. 5-2: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f der Proben BP_0,1mm_7,4%	70
Abb. 5-3: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f BP_0,1mm_27,1%	71
Abb. 5-4: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f BP_0,3mm_15%	72
Abb. 5-5: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f BP_0,3mm_30%	72
Abb. 5-6: Gesamtübersicht Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f der Biegeproben	73

Abb. 5-7: Biegemodul E_f über CI-Volumenanteil ϕ der Biegeproben.....	75
Abb. 5-8: Bruchfläche der Probe BP_0,1mm_7,4%A (oben links), BP_0,1mm_27,1%A (unten links), BP_0,3mm_15%A (oben rechts), BP_0,3mm_30%A (unten rechts)	76
Abb. 5-9: Bruchflächen der Proben BP_0,1mm_7,4%A (links) und BP_0,1mm_7,4%B (rechts).....	77
Abb. 5-10: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Probekörpervarianten ZP_längs_0,1mm.....	81
Abb. 5-11: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Probekörpervarianten ZP_längs_0,1mm.....	82
Abb. 5-12: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Probekörpervarianten ZP_längs_0,3mm.....	83
Abb. 5-13: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Probekörpervarianten ZP_längs_0,3mm.....	84
Abb. 5-14: Analyse der Querschnittsfläche von Probe ZP_längs_0,3mm_12,2%A mittels ImageJ	87
Abb. 5-15: Analyse der Querschnittsfläche von Probe ZP_längs_0,3mm_30,7%B mittels ImageJ	88
Abb. 5-16: Gemittelter Längs-Elastizitätsmodul E_l über CI-Volumenanteil ϕ der längs verstärkten UD-Proben.....	90
Abb. 5-17: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Probekörpervarianten ZP_quer_0,1mm.....	94
Abb. 5-18: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Probekörpervarianten ZP_quer_0,1mm.....	95
Abb. 5-19: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Probekörpervarianten ZP_quer_0,3mm.....	96
Abb. 5-20: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Probekörpervarianten ZP_quer_0,3mm.....	97
Abb. 5-21: Bruchfläche der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4%A (links) und ZP_quer_0,1mm_7,4%D (rechts)	101
Abb. 5-22: Seitenansicht der Proben ZP_0,1mm_27,1%C (links) und ZP_0,3mm_30%A (rechts).....	102
Abb. 5-23: Gemittelte Quer-Elastizitätsmodul E_{\perp} über CI-Volumenanteil ϕ der quer verstärkten UD-Proben.....	103

Abb. 5-24: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Laminatproben	106
Abb. 5-25: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Laminatproben.....	107
Abb. 5-26: Bruchverhalten der Laminatproben	108
Abb. 5-27: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f der Proben BP_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation	109
Abb. 5-28: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f BP_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation.....	110
Abb. 5-29: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f BP_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation.....	111
Abb. 5-30: Biegespannung σ_f über Randfaser-Dehnung ε_f BP_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation.....	112
Abb. 5-31: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation	113
Abb. 5-32: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation	113
Abb. 5-33: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Proben ZP_längs_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation	114
Abb. 5-34: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Proben ZP_längs_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation	114
Abb. 5-35: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Proben ZP_längs_0,3mm_30,7% und der zugehörigen FEM-Simulation	115
Abb. 5-36: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Proben ZP_längs_0,3mm_30,7% und der zugehörigen FEM-Simulation	115
Abb. 5-37: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Proben ZP_längs_0,3mm_12,2% und der zugehörigen FEM-Simulation	116
Abb. 5-38: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Proben ZP_längs_0,3mm_12,2% und der zugehörigen FEM-Simulation	116
Abb. 5-39: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Proben ZP_quer_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation	117
Abb. 5-40: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Proben ZP_quer_0,1mm_27,1% und der zugehörigen FEM-Simulation	117
Abb. 5-41: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation	118

Abb. 5-42: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Proben ZP_quer_0,1mm_7,4% und der zugehörigen FEM-Simulation	118
Abb. 5-43: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Proben ZP_quer_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation	119
Abb. 5-44: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Proben ZP_quer_0,3mm_30% und der zugehörigen FEM-Simulation	120
Abb. 5-45: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Proben ZP_quer_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation	120
Abb. 5-46: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Proben ZP_quer_0,3mm_15% und der zugehörigen FEM-Simulation	121
Abb. 5-47: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Laminatproben und der FEM-Simulation der Laminatproben	122
Abb. 5-48: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Laminatproben und der FEM-Simulation der Laminatproben	123
Abb. 5-49: Zugspannung σ über Längsdehnung ε der Laminatproben und der CLT-Berechnung der Laminatproben	124
Abb. 5-50: Zugspannung σ über Querdehnung ε_q der Laminatproben und der CLT-Berechnung der Laminatproben	125

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Sintermethoden und deren Energiequellen und Sinterbereich	21
Tab. 3-1: Materialkennungen des Drucksystems.....	33
Tab. 4-1: Versuchsparameter des Biegeversuchs	38
Tab. 4-2: Packungsmuster der Probekörper der Versuchsreihe Biegeversuch.....	41
Tab. 4-3: Orientierung der Proben auf dem Druckbett und Baujob-Nr., Versuchsreihe Biegeversuch.....	43
Tab. 4-4: Konstruierte äußere Abmaße der UD-Proben	46
Tab. 4-5: Maße der Packungsmuster, CI-Volumenanteile und Leiterbahn-orientierungen der UD-Proben	47
Tab. 4-6: Orientierung der UD-Proben auf dem Druckbett.....	48
Tab. 4-7: Übersicht der Probekörpervarianten der Versuchsreihe Zugversuch Laminat- Proben	49
Tab. 4-8: Breite b_{FEM_BP} der Ausschnitte der Biegeproben	51
Tab. 4-9: Materialdaten der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der Biegeproben	53
Tab. 4-10: Elementgrößen der Vernetzung der CI- und DI-Volumenkörper der FEM- Simulation der Biegeproben	54
Tab. 4-11 Abmaße der Ausschnitte der UD-Proben.....	57
Tab. 4-12: Materialdaten der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der UD- Proben	58
Tab. 4-13: Elementgrößen der Vernetzung der CI- und DI-Volumenkörper der FEM- Simulation der UD-Proben	59
Tab. 4-14 Abmaße der Ausschnitte der Laminat-Proben	60
Tab. 4-15: Materialdaten der CI- und DI-Volumenkörper der FEM-Simulation der Laminatproben	61
Tab. 4-16: Elementgrößen der Vernetzung der CI- und DI-Volumenkörper der FEM- Simulation der Laminatproben	61
Tab. 4-17: Werkstoffdaten der UD-Einzelschichten der Laminatproben in der CLT- Berechnung	62
Tab. 5-1: Ergebnisse der Widerstandsmessung der Biegeproben.....	67
Tab. 5-2: Probekörperabmessungen der Biegeproben	69
Tab. 5-3: Messergebnisse der Versuchsreihe Biegeversuch.....	74

Tab. 5-4: Rückrechnung der Biegemodule E_f für $\phi=0\%$ und $\phi=100\%$	76
Tab. 5-5: Probekörperabmessungen der längs-verstärkten UD-Proben.....	79
Tab. 5-6: Probekörperabmessungen der quer-verstärkten UD-Proben	80
Tab. 5-7: Messergebnisse der Versuchsreihe Zugversuch, längs-vertärkte UD-Proben.	85
Tab. 5-8: Rückrechnung der Längs-Elastizitätsmodule der längs verstärkten UD-Proben für $\phi=0\%$ und $\phi=100\%$	86
Tab. 5-9: Querschnittsflächenmessung nach der Auswertemethode mit ImageJ (A_{Bild}) und der Vermessung der mittleren Bauteilbreite.....	89
Tab. 5-10: Rückrechnung der Längs-Elastizitätsmodule der quer verstärkten UD-Proben für $\phi=0\%$ und $\phi=100\%$ mit der Querschnittsfläche nach A_{Bild}	90
Tab. 5-11: Standardabweichungen $s_{Abweichung}$ der Längs-Elastizitätsmodule der längs verstärkten UD-Proben.....	91
Tab. 5-12: Grenzwerte des Vertrauensintervalls und die resultierenden Werte für E_{DI} der Proben ZP_längs_0,1mm_27,1% und ZP_längs_0,3mm_30,7%	92
Tab. 5-13: Worst Case Betrachtung der Abweichung von $E_{DI_{min}}$ und $E_{DI_{max}}$ durch Messunsicherheit der Querschnittsfläche	92
Tab. 5-14: Worst Case Betrachtung der Abweichung von $E_{DI_{min}}$ und $E_{DI_{max}}$ durch Messunsicherheit durch Abweichungen des CI-Volumenanteils.....	93
Tab. 5-15: Messergebnisse der Versuchsreihe Zugversuch, quer verstärkte UD-Proben	98
Tab. 5-16: Rückrechnung der Quer-Elastizitätsmodule E_{\perp} der quer-verstärkten UD- Proben für $\phi=0\%$ und $\phi=100\%$ mit der Querschnittsfläche nach A	99
Tab. 5-17: Querschnittsflächenmessung nach der Auswertemethode mit ImageJ A_{Bild} und nach Vermessung nach der Methode in Abb. 5-1	100
Tab. 5-18: Rückrechnung der Quer-Elastizitätsmodule E_{\perp} der quer-verstärkten UD- Proben für $\phi=0\%$ und $\phi=100\%$ mit der Querschnittsfläche nach A_{Bild}	104
Tab. 5-19: Abmaße der Laminatproben	105
Tab. 5-20: Messergebnisse der Versuchsreihe Zugversuch Laminat-Proben	107

Anhang

A Daten-CD

Die Daten-CD enthält die folgenden Ordner:

- Schriftliche Ausarbeitung (Arbeit als Word und PDF)
- Literatur (PDF)
- CAD Modelle
- Numerische Simulationen
- Arduino IDE-Code
- Testdaten