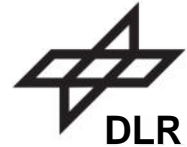




Technische
Universität
Braunschweig



Analyse des Einflusses von Art und Lokation von Voids in endlosfaserverstärkten 3D-Druckfilamenten

Studienarbeit

Master of Science (M.Sc.)

**Technische Universität
Braunschweig**

Fakultät 4

Luft- und Raumfahrttechnik

Vorgelegt von:

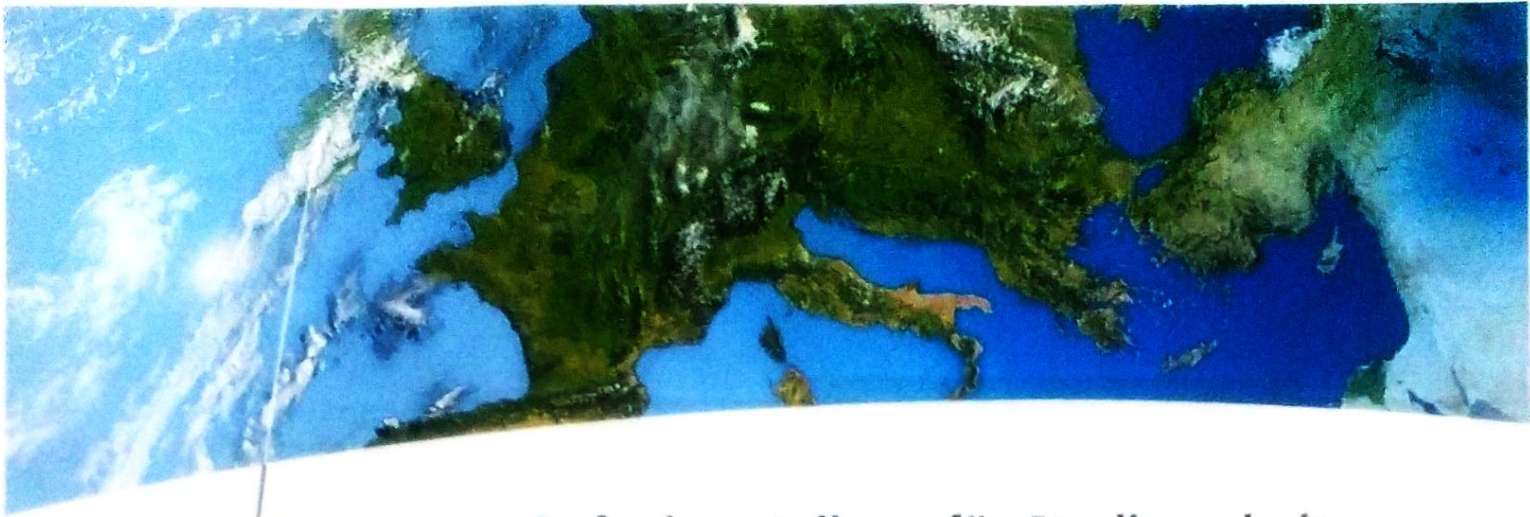
Jonas Lütjohann

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann

Betreuer: M.Sc. Jan-Uwe Reinhard Schmidt

Ausgegeben am: 08. Januar 2024

Abgegeben am: 08. Mai 2024



Aufgabenstellung für Studienarbeit

in der Fachrichtung Maschinenbau

für Jonas Lütjohann, Matrikel-Nr.

Thema:

Analyse des Einflusses von Art und Lokation von Voids in endlosfaserverstärkten 3D-Druckfilamenten

Die steigenden Leichtbauanforderungen in der Luft- und Raumfahrt führen zu neuen Herausforderungen bei der Herstellung geeigneter Bauteile. Diese Strukturen sollen zunehmend mehrskalig, multimateriell und in komplexer Geometrie ausgeführt sein. Hierfür sind geeignete Fertigungsprozesse zu etablieren, welche eine kostengünstige Generierung solcher Strukturen ermöglichen. Zusätzlich entsteht ein immer ausgeprägter Fokus auf ressourceneffiziente und nachhaltige Prozesse.

Die effiziente Erzeugung von faserverstärkten, thermoplastischen Strukturen mit komplexen Geometrien bildet einen Fokus aktueller Forschungsvorhaben. Dabei gelten unter anderem additive Extrusionsverfahren als vielversprechend. In diesem Zusammenhang wurde am Institut für Systemleichtbau des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt ein Verfahren zur Imprägnierung von endlosen Faserrovings mit hochviskosen thermoplastischen Polymeren entwickelt. Für diese Technologie stehen mehrere Ultraschallimprägnierungszellen zur Verfügung, die nach einer Co-Extrusionsheit eingebaut sind. Im Anschluss erfolgt der Einsatz verschiedener Düsen und Temperierzonen, um die finale Qualität der Filamente optimal einstellen zu können.

Es treten stets verschiedene Arten von Poren auf, die sich sowohl in Größe, als auch in der Lokation innerhalb des Filamentes unterscheiden. Eine gute Imprägnierung ist für die erfolgreiche Übertragung von Kräften des Faserverbundes unerlässlich. In Bereichen mit hohem Faseranteil entstehen teilweise trockene Bereiche, in größeren Polymeransammlungen kommt es immer wieder zu größeren Poren.

Ziel dieser Arbeit ist es nun, die Poren zu klassifizieren, die vorhandenen Poren in die Klassen einzuteilen und anhand dessen die Eigenschaftsveränderungen zu analysieren und zu bewerten. Als zweiter wichtiger Einflussparameter sollen korrelierend die Auftreteorte der entsprechenden Porenarten bewertet werden.



Die Arbeit umfasst folgende Punkte:

1. Literaturrecherche und Einarbeitung in die Aufgabenstellung
2. Definition der Porenklassen erarbeiten
3. Möglichkeit der Poreneinordnung schaffen
4. Aufbau und Durchführung relevanter Versuche zur Bewertung der Filamenteigenschaften
5. Korrelation der Versuchsergebnisse zu Porenart und Lokation im Filament
6. Darstellung und Dokumentation der Ergebnisse in Form einer gebundenen Arbeit
7. Präsentation der erzielten Ergebnisse

Die Arbeit wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Systemleichtbau, Braunschweig, durchgeführt und betreut.

Für Planung, Berechnung, Fertigung, Untersuchungen und Dokumentation können Labore, Werkzeuge, Einrichtungen, Programme und Rechenanlagen des DLR benutzt werden. Die Unterstützung durch das Institut für Systemleichtbau umfasst die Beratung sowie Hilfe bei der Einarbeitung in die Theorie und Praxis.

Die Ergebnisse sind entsprechend dem Fortschritt der Arbeit und im Bearbeitungszeitraum mehrfach vorzulegen. Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des Instituts möglich.

Die Arbeit ist elektronisch im WISA-Portal hochzuladen. Ein gebundenes Exemplar ist im Institut für Systemleichtbau einzureichen.

Beginn: 08.01.2024
Ende: 08.05.2024
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann
DLR e.V., Institut für Systemleichtbau
Betreuer: M.Sc. Jan-Uwe Reinhard Schmidt
DLR e.V., Institut für Systemleichtbau

Braunschweig, 08.01.2024



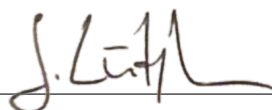
Unterschrift Prüfer

Erklärung zur Studienarbeit

Erklärung nach §9 Abs. 12 APO TU Braunschweig

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Braunschweig, 08. Mai 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Löffel', written over a horizontal line.

Ort, Datum und Unterschrift

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Studienarbeit widmet sich der Analyse des Einflusses von Poren bzw. Voids auf die mechanischen Eigenschaften von endlosfaserverstärkten Filamenten für den 3D-Druck. Viele Studien haben bereits den Einfluss von Voids in genormten Testbauteilen untersucht, beziehen diesen allerdings vor allem auf das Voidvolumengehalt. In dieser Arbeit stehen neben dem Voidgehalt die Voidform -und verteilung im Fokus der Untersuchung.

Dazu werden zunächst in einer umfassenden Literaturrecherche die Grundlagen zur Voidentstehung und -charakterisierung und deren Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften erörtert. Es wird gezeigt, dass verschiedene Voidgeometrien einen teilweise größeren Einfluss haben, als das Voidgehalt. Aus diesen Grund werden im weiteren Verlauf der Arbeit die Voids in verschiedene Voidarten unterteilt, um die verschiedenen Einflüsse zu analysieren. Zu Einteilung der Voids wird ein Bildanalyse-Tool verwendet, dass die Voids automatisiert erkennt und markiert, sodass die Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften quantifiziert werden können.

Des Weiteren werden Prüfverfahren beschrieben und entwickelt, mit denen die Druckfilamente auf ihre Eigenschaften getestet werden. Aus den Messergebnissen der Prüfverfahren und der Bildanalyse werden die Zusammenhänge zwischen Voids und mechanischen Eigenschaften ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Geometrie der Voids die mechanischen Eigenschaften der Druckfilamente maßgeblich beeinflusst.

Abstract

This study is dedicated to analysing the influence of voids on the mechanical properties of continuous fibre-reinforced filaments for 3D printing. Many studies have already investigated the influence of voids in standardised test components, but mainly focus on the void volume content. In addition to the void content, this study focuses on the void shape and distribution.

Therefore, the fundamentals of void formation and characterisation as well as their influence on the mechanical properties are first discussed in a comprehensive literature review. It is shown that different void geometries sometimes have a greater influence than the void content. For this reason, the voids are divided into different void types in order to analyse the various influences. An image analysis tool is used to classify these voids, which automatically recognises and marks the voids so that the influences on the mechanical properties can be quantified.

Furthermore, test methods are described and developed to test the properties of the printing filaments. The correlations between voids and mechanical properties are analysed from the measurement results of the test methods and the image analysis. It is shown that the geometry of the voids significantly influences the mechanical properties of the printing filaments.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	I
Erklärung	III
Kurzzusammenfassung	IV
Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Formelzeichenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Voids	2
2.1.1 Entstehung von Voids	2
2.1.2 Einfluss von Voids auf mechanische Eigenschaften	5
2.1.3 Einteilung der Voidarten	7
2.2 Charakterisierung von Voids	14
2.3 Mechanische Prüfverfahren	15
2.3.1 3-Punkt-Biegeprüfung (3PB)	16
2.3.2 Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)	17
2.3.3 Zugversuch	18
2.3.4 Scherversuch	20
3 Versuchsdurchführungen	23
3.1 3-Punkt-Biegeversuch	23
3.2 Dynamisch-Mechanische Analyse	27
3.3 Zugversuch	28
3.4 Scherversuch	30
4 Messergebnisse	33
4.1 3-Punkt-Biegeprüfung	33
4.2 Dynamisch-Mechanische Analyse	38
4.3 Zugversuch	41
4.4 Scherversuch	42
4.5 Voidanalyse	44
5 Auswertung	47
5.1 Einfluss von Voidgehalt und-art	47
5.2 3-Punkt-Biegeprüfung	48
5.3 Dynamische-Mechanische Analyse	54
5.4 Zugversuch	58
5.5 Scherversuch	61
6 Schlussfolgerung	62

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Literatur	IX
Anhang A	XIV

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
3PB	Drei-Punkt-Biegung
AFP	Automated Fiber Placement
ASTM	American Society for Testing and Materials
CT	Computer Tomography
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMA	Dynamisch Mechanische Analyse
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
ILSS	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit
ISO	Internationale Organisation für Normung
LCM	Liquid Composite Moulding
rcf	Recycltes Filament
rel. F.	relative Luftfeuchtigkeit
UD	Unidirektional
VVG	Voidvolumengehalt

Formelzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	mm^2	Fläche
b	mm	Breite
Ca	1	Kapillarzahl
Ca^*	1	modifizierte Kapillarzahl
d	mm	Durchmesser
δ	1	Phasenwinkel
E_f	MPa	Biegemodul
E^*	MPa	komplexes Dehnmodul
E'	MPa	Speichermodul
E''	MPa	Verlustmodul
ε_f	%	Dehnung
f	mm	Durchbiegung Dreipunktbiegung
F	N	Kraft
F_{max}	N	Maximalkraft
G	MPa	Schermodul
γ	MPa	Oberflächenspannung
γ	rad	Schubwinkel
h	mm	Höhe
L	mm	Stützweite
M_b	Nmm	Biegemoment
μ	$\frac{m^2}{s}$	Viskosität
ω	$\frac{1}{s}$	Kreisfrequenz
R_1	mm	Radius Druckfinne
R_2	mm	Radius Auflieger
s	mm	Durchbiegung
$s_{Vergleich}$	mm	Vergleichsdurchbiegung Scherversuch
$s_{Steigung_{max}}$	mm	Durchbiegung der maximalen Steigung Scherversuch
σ_f	MPa	Biegefestigkeit
τ	MPa	Scherfestigkeit
Θ	rad	Kontaktwinkel
U	mm	Umfang
V	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
W_{ax}	mm^3	Widerstandsmoment

1 Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung im Bereich des 3D-Drucks hat eine neue Ära in der Herstellung komplexer Bauteile eingeläutet. Insbesondere die Verwendung faserverstärkter Filamente eröffnet vielfältige Möglichkeiten für die Produktion von Bauteilen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften. Jedoch bleibt eine Herausforderung bestehen, die potenzielle Qualität und Zuverlässigkeit dieser Bauteile zu gewährleisten. Ein zentraler Aspekt, der die mechanischen Eigenschaften solcher Bauteile beeinflusst, ist das Vorhandensein von Voids innerhalb des gedruckten Materials.

Diese Studienarbeit widmet sich der Charakterisierung und Ermittlung von Voids in endlosfaserverstärkten 3D-Druckfilamenten sowie deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der resultierenden Bauteile. Voids, auch als Hohlräume oder Luft einschüsse bekannt, sind Bereiche im Material, in denen keine Matrix vorhanden sind. Ihr Vorhandensein kann zu lokalen Schwachstellen führen, die die strukturelle Integrität und Festigkeit des gedruckten Bauteils beeinträchtigen können.

Das Verständnis der Auswirkungen von Voids auf die mechanischen Eigenschaften von gedruckten Bauteilen ist von entscheidender Bedeutung für die Optimierung des Druckprozesses und die Entwicklung von Materialien mit verbesserten Leistungseigenschaften. Durch die Identifizierung von Voids und die Bewertung ihres Einflusses auf die Festigkeiten und Steifigkeiten gedruckter Bauteile können gezielte Maßnahmen zur Minimierung oder Kompensation dieser Effekte entwickelt werden.

Diese Arbeit strebt an, einen Beitrag zum Verständnis der komplexen Beziehung zwischen Voids und mechanischen Eigenschaften von faserverstärkten 3D-Druckfilamenten zu leisten. Durch eine umfassende Analyse und Bewertung dieser Zusammenhänge können neue Erkenntnisse gewonnen werden, die nicht nur die Qualität und Zuverlässigkeit gedruckter Bauteile verbessern, sondern auch das Potenzial für innovative Anwendungen in Bereichen wie Luft- und Raumfahrt und Automobilbau eröffnen.

2 Stand der Technik

2.1 Voids

Der Begriff Void bezeichnet Hohlräume bzw. Lufteinschlüsse innerhalb des Faserverbunds. Dieser Abschnitt behandelt die Entstehung, sowie den allgemeine Einfluss von Voids auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen. Im Anschluss erfolgt eine Einteilung der Voidarten, damit bei der Erprobung der Filamente der Einfluss verschiedener Voidarten verglichen werden kann.

2.1.1 Entstehung von Voids

Voids haben in ihrer Entstehung verschiedene Ursachen. Basierend auf Schmidts' Untersuchung für endlosfaserverstärkte Filamente, sind folgende Einflüsse für die Entstehung der Voids besonders relevant [1].

Imprägnierung

Das Imprägnieren ist das Tränken der Fasern mit einem Harzsystem, auch Matrix genannt. Diese dient dazu, die Fasern vor Umwelteinflüssen zu schützen, sowie in der Aufnahme mechanischer Lasten zu unterstützen [2]. Die Matrix übernimmt die Lasten quer zur Faserrichtung, stützt die Fasern bei Druckbelastung gegen Schubknicken und leitet die Kräfte von einer Faser zur anderen [2]. Dementsprechend beeinflusst die Qualität der Imprägnierung die Voidformierung. Erfolgt die Imprägnierung unzureichend, bilden sich Trockenstellen zwischen den Fasern aus. Dadurch wird die Kraftübertragung zwischen Faser und Matrix reduziert.

Kapillarität

Die Kapillarität beeinflusst das Fließverhalten, und damit auch die Imprägnierung der Fasern, der Matrix innerhalb der Fasern und kann durch die Kapillarzahl Ca quantifiziert werden, die das Verhältnis von viskosen zu kapillaren Kräften angibt [3]. Diese Gleichung der Kapillarzahl (1) beinhaltet mit μ , V und γ die Viskosität, die Geschwindigkeit und die Oberflächenspannung des Fluides an, die die Kapillarität maßgeblich beeinflussen [3].

$$Ca = \frac{\mu V}{\gamma} \quad (1)$$

Patel et al. erweitern die Kapillanzahl zur modifizierten Kapillanzahl Ca^* (2), die den Einfluss des Kontaktwinkels θ zwischen Faser und Fluid mit berücksichtigt [4].

$$Ca^* = \frac{\mu V}{\gamma \cdot \cos\theta} \quad (2)$$

Abbildung 1 zeigt schematisch den Einfluss des viskosen und kapillaren Drucks des Harzsystems, während des Liquid Composite Moldings (LCM).

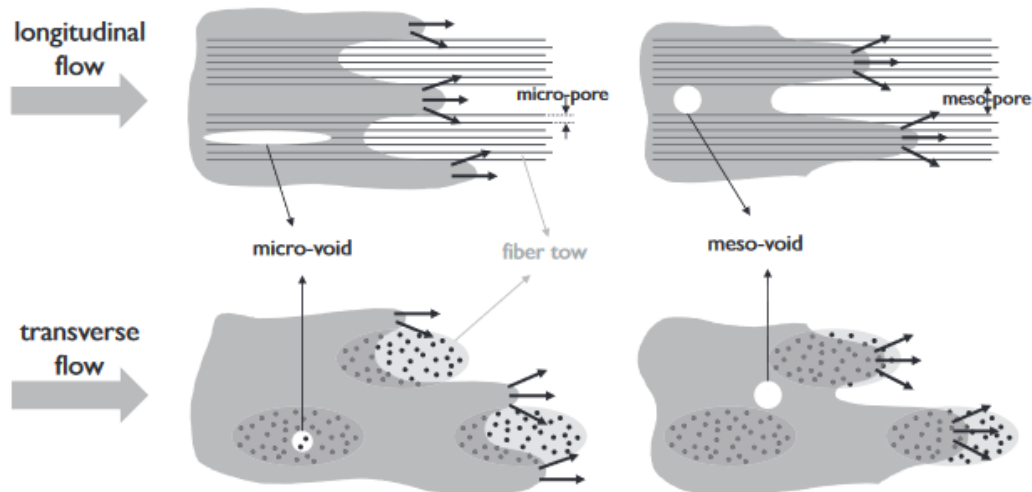


Abb. 1: Entstehung von Voids [3]

Die als Meso-Voids bezeichneten Poren resultieren aufgrund von Fließfronten, die innerhalb von Bereiche mit einer hohen Faserdichte vorausseilen und sich wieder verbinden. In diesem Fall, überwiegt die kapillare Kraft der viskosen Kraft und Ca^* wird klein [3]. Im Gegensatz dazu, wenn der viskose Druck größer ist, als der kapillare Druck, eilen Fließfronten zwischen den Faserlagen voraus und schließen Luft innerhalb der Fasern ein [3]. Diese Voids sind hier als Micro-Voids bezeichnet.

Der viskose Druck wird durch den Imprägnierdruck bestimmt, mit dem das Harz in den Verbund eingeleitet wird [1]. Ist dieser nicht mit dem Kapillardruck abgestimmt, hat dies sowohl einen Einfluss auf die Voidgeometrie, als auch auf das Voidgehalt des Materials (Abbildung 2) und damit einen Einfluss auf das mechanische Verhalten [3].

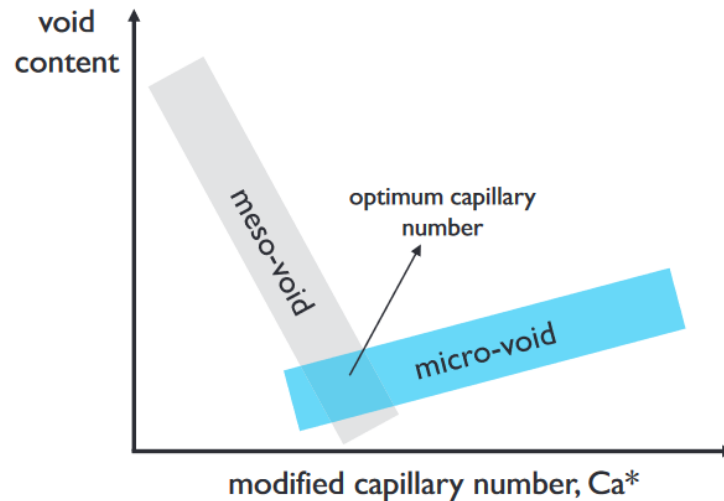


Abb. 2: Schematischer Zusammenhang Voidgehalt und modifizierte Kapillanzahl [3]

Abzugsgeschwindigkeit

Die Abzugsgeschwindigkeit beschreibt die Rate, mit der die Kohlenstofffasern von den Vorratsspulen abgewickelt werden. Hohe Abzugsgeschwindigkeiten führen zu einer höheren Produktionsrate, setzen allerdings eine schnellere Imprägnierung der Fasern und schnellere Abkühlung bzw. Verfestigung der Matrix voraus.

Song et al. zeigen, dass eine schnellere Abzugsgeschwindigkeit zu einem höheren Voidgehalt führt [5]. Während des Prozesses wird die Harzmatrix erwärmt. Dabei lösen sich flüchtige Stoffe aus der Matrix und bilden Voids [5]. Höhere Geschwindigkeiten führen dazu, dass die Wärmezufuhr signifikant reduziert wird, was zu einer höheren Viskosität der Matrix führt, wodurch die Voids in ihrer Bewegung innerhalb der Matrix eingeschränkt werden [5]. Gleichzeitig wird bei einer höheren Abzugsgeschwindigkeit die Druckwirkungszeit reduziert, in der die Voids in der Matrix migrieren können [5]. Beide Effekte führen zu einem höheren Voidgehalt im Material [5].

Schlichte

Die Schlichte übernimmt verschiedene Aufgaben in der Herstellung von Faserverbunden. Zum einen sorgt diese für eine erhöhte Haftung zwischen den Fasern und der Matrix [6]. Zusätzlich kann Schlichte die Handhabung der Fasern verbessern, indem sie den Schutz der Fasern, die Faserausrichtung sowie die Benetzbarkeit beeinflusst [6].

Es kann passieren, dass während des Fertigungsprozess der Druckfilamente, oder des Bauteils, die Temperatur überschritten wird, bei der die Schlichte degradiert. Die zerstörten Bestandteile der Schlichte können der Matrix unter Umständen nicht entweichen und werden in Folge dessen im Material eingeschlossen [7].

Weiterhin können, in Abhängigkeit der verwendeten Materialien, durch den Kontakt von Matrix und Schlichte chemische Reaktionen ausgelöst werden, wodurch im Material gelöste Gase entweichen [7]. Wie im Fall der zerstörten Bestandteile, besteht die Gefahr, dass die Gase während des Prozesses nicht aus dem Material entweichen können.

2.1.2 Einfluss von Voids auf mechanische Eigenschaften

Verschiedene Studien zeigen, dass die Existenz von Voids im Material einen signifikanten Einfluss auf das mechanische Verhalten haben und das Material schwächen. Dabei werden vor allem folgende mechanische Eigenschaften untersucht.

Interlaminare Scherfestigkeit

Die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit (ILSS) beschreibt die Schubfestigkeit eines Faserverbundwerkstoffes zwischen zwei Laminatschichten und wird im Wesentlichen von den Eigenschaften der Matrix dominiert, weshalb die ILSS durch die Existenz von Voids eher beeinflusst wird, als andere mechanische Eigenschaften [3].

Bereits viele Studien haben sich mit dem Einfluss von Voids auf die ILSS auseinandergesetzt, das Ergebnis allerdings vermehrt im Bezug auf das Voidgehalt bewertet, als auf Größe und Form.

Bowles et al. stellen fest, dass eine Verringerung des Faservolumengehalts von 60% auf 50% eine Verringerung der ILSS um 13% zur Folge hat [8]. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass die ILSS matrixdominiert ist. Gleichzeitig wird in der Studie ermittelt, dass eine Erhöhung des Voidgehalts um 11% die ILSS des Verbunds um 41% verringert [8]. Der Zusammenhang zeigt sich als nahezu linearer Verlauf mit 3 bis 4% Verlust an ILSS pro 1% Zunahme im Voidgehalt [8]. Ein Bezug zur Voidform oder -größe wird nicht gemacht.

Eine Studie von Olivier et al. stellen nicht nur einen Zusammenhang zwischen Voidgehalt und mechanischen Eigenschaften auf, sondern stellen einen Bezug auf die Größe der Voids her. Getestet werden zwei verschiedene Verbunde A und B, wobei Verbund A mit einer Verringerung der ILSS von 2,3% pro 1% Voidgehalt niedriger liegt, als Verbund B (6,5%) [9]. Die Untersuchung der Probenquerschnitte ergibt, dass Verbund B größere Voids aufweist, als Verbund A, obwohl beide Verbunde das gleiche Voidgehalt haben [9]. Die Studie zeigt, dass große Voids einen größeren Einfluss auf die ILSS haben als kleinere. Allerdings gilt diese Beobachtung zunächst für die getesteten Verbunde, die als Gewebe vorliegen, und nicht für UD-Lagen. Dennoch dient diese Beobachtung zur Orientierung für weitere Untersuchungen.

Goodwin et al. zeigen in einer Studie ebenfalls einen linearen Zusammenhang zwischen ILSS und Voidgehalt, allerdings variiert die Reduktion in Abhängigkeit des genutzten Laminats [10]. Der Verbund aus Leinwandgewebe zeigt mit 4% ILSS-Verlust pro 1% Voidgehalt einen ähnlichen Verlauf, wie die unidirektionalen Laminare von Bowles et al, während die Verbunde aus Satingewebe einer Rate von 7% ILSS-Verlust pro 1% Voidgehalt eine höhere Reduktion aufweisen [10]. Diese Unterschiede lassen sich auf die unterschiedliche Form und Größe der Voids zurückführen. Die Laminare aus Satingewebe weisen eine größere Menge an asymmetrischen Formen mit Ecken kleiner Radien auf, während zwischen den Leinwandgeweben eher symmetrische Voids mit Ecken großer Radien vorliegen [10]. Kleine Radien bei Voidecken führen dazu, dass sich dort mehr Spannungen überlagern als bei größeren Radien und dadurch zu einem früheren Versagen führen [11].

Weitere Studien zeigen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen einer Verringerung der ILSS durch eine Steigerung des Voidgehalts, gehen dabei allerdings wenig bis gar nicht auf Form oder Größe der Voids ein [12, 13, 14, 15, 16].

Biegeeigenschaften

In der bereits erwähnten Studie von Olivier et al. werden für die Verbunde A und B ebenfalls die Biegeeigenschaften untersucht. Die beiden Verbunde weisen hier ebenfalls große Unterschiede auf. Verbund B weist für ein Voidgehalt (VVG) von 1,4% eine Reduktion des Biegemoduls um 15% auf, während bei Verbund A bei VVG = 6,8% eine Reduktion von 4% vorliegt [9]. Begründet wird dieses Verhalten mit der Tatsache, dass die im Verbund B vorliegenden Voids größer sind, als im Verbund A [9].

Hagstrand et al. stellen einen Verlust Biegemoduls um 1,4% pro 1% VVG fest, während sich die Biegefestigkeit um 1,5% reduziert [17]. Verglichen mit anderen Studien liegt hier eine deutlich geringere Rate vor. Begründet wird dies damit, dass die verwendete Polypropylen-Matrix weniger als 5% der Last trägt, wodurch der Einfluss der Voids vernachlässigbar wird [17]. Gleichzeitig heißt es, dass Polypropylen als Matrix zäher ist als Polyester oder Epoxide, wodurch Voids seltener als Crack-Initiator wirken [17].

Almeida et al., Chen et al., Santulli et al. und Stamopoulos et al. können ebenfalls eine Verringerung der Biegeeigenschaften mit steigendem Voidgehalt feststellen, gehen allerdings nicht auf Einflüsse durch Geometrie, Größe oder Lage der Voids in der Matrix ein [12, 18, 19, 20].

Zugeigenschaften

Im Vergleich zu den anderen mechanischen Eigenschaften, werden die Zugeigenschaften durch die Existenz von Voids weniger beeinträchtigt, da diese durch die Fasern dominiert werden [21]. In ihren Untersuchungen ermitteln Di Landro et al, Li et al. und Olivier et al. Reduktionen der Zugfestigkeiten von 4% bei VVG = 4 bis 6%, 15,3% bei VVG = 5,4% und 12% bei VVG = 10,3% [9, 21, 22]. Diese sind im Vergleich zum Verlust an ILSS und Biegeeigenschaften deutlich geringer, was aufgrund der Faserdominanz zu erwarten ist. Abweichungen der Zugfestigkeiten bei gleichem Voidgehalt sind einerseits durch die Verwendung verschiedener Materialien sowie durch verschiedene Größen der Voids begründet [9, 22]. Zudem stellen diese Studien keine signifikante Verringerung des E-Moduls fest [9, 21, 22].

Zhu et al. untersuchen den Einfluss von Voids auf zwei verschiedene Laminataufbauten A $[(\pm 45)_4/(0, 90)/(\pm 45)_2]_S$ und B $[(\pm 45)/0_4/(\pm 45)(0, 90)]_S$ [23]. Die Untersuchung ergibt eine Verringerung der Zugfestigkeit um 2% (Probe A) bzw. 2,5% (Probe B) bei einer Steigerung des VVGs von 0,4% auf 8% bzw. 9% [23]. Das E-Modul der Probe A sinkt um 14%, während das Modul der Probe B nicht vom VVG beeinflusst wurde [23]. Eine Untersuchung der Schlifffbilder unter dem Mikroskop ergibt, dass Probe A größere Voids aufweist, als Probe B und aufgrund dessen das E-Modul reduziert wird [23]. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass Probe A nur eine 0°-Lage aufweist, Probe B dagegen fünf. Dadurch wird bei Probe B mehr Last durch die Fasern aufgenommen, die ein höheres E-Modul haben, als die Matrix.

Die Studien zeigen, dass Voids einen erheblichen Einfluss auf die interlaminare Scherfestigkeit, sowie die Biegeeigenschaften haben, während der Einfluss auf die Zugeigenschaften zwar vorhanden, aber nicht signifikant ist. Die Ergebnisse werden zumeist auf das Voidgehalt bezogen und nur selten in Abhängigkeit der Form oder Größe der Voids ausgewertet. Es herrscht Einigkeit darüber, dass große Voids und ein hohes VVG die mechanischen Eigenschaften stärker verringern als kleine Voids und ein niedriges VVG. Inwiefern die Form der Voids eine Rolle spielt erläutern Goodwin et al., wobei in dieser Studie keine unidirektionalen Proben, sondern Gewebe untersucht werden [10].

2.1.3 Einteilung der Voidarten

Da mehrere Studien zeigen, dass der Einfluss von Voids von Parametern wie Morphologie und Verteilung im Material abhängig ist, ist es sinnvoll eine Einteilung von verschiedenen Voidarten vorzunehmen, wenn die Einflüsse in Abhängigkeit dieser Parameter spezifiziert werden sollen.

Mehdikhani et.al. unterteilen Voids in drei Gruppen [3]:

1. Microvoids, die innerhalb von Faserbündeln entstehen
2. Mesovoids, die zwischen den Faserbündeln in der Matrix entstehen
3. Macrovoids, die sich über größere Dimension erstrecken und zum Teil ohne Mikroskop erkennbar sind

Die Abbildung 3 zeigt Micro- und Mesovoids, wie sie in einem Verbund aus UD-Lagen auftreten können. Die erste und dritte Form zeigen, dass Microvoids in der Regel eine symmetrische Form einnehmen, während Mesovoids asymmetrisch vorliegen.

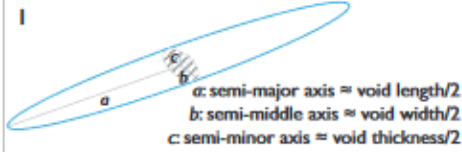


Void schematic	Type	Location
 <p> a: semi-major axis \approx void length/2 b: semi-middle axis \approx void width/2 c: semi-minor axis \approx void thickness/2 </p>	elongated micro-void (intra-laminar void)	inside the plies
	inter-laminar void	between the plies
	spherical micro-void	in resin- rich regions

Abb. 3: Schematische Form verschiedener Voids [3]

Meso- und Microvoids unterscheiden sich ebenfalls in der Größe. So sind Mesovoids 2 bis 3 Ordnungen größer, als Microvoids [24].

Hetric et al. stellen eine vergleichbare Einteilung für 3D-gedruckte Bauteile auf. Die Microvoids bilden sich innerhalb der Fasern vor dem Druckprozess und sind bereits in der Herstellung der Filamente entstanden [25]. Mesovoids entstehen zwischen den Faserbündeln bzw. den abgelegten Filamenten während des Druckvorgangs, da aufgrund des nicht perfekt runden Querschnitts der Druckfilamente Luft und Fremdstoffe eingeführt werden [25]. Macrovoids bilden sich zwischen den Schichten während des Drucks [25]. Abbildung 4 zeigt, wo sich die jeweils genannten Voids während des Druckes bilden.

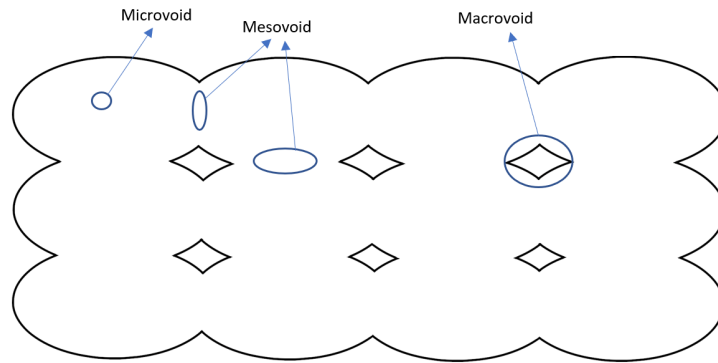


Abb. 4: Schematische Darstellung eines 3D-gedruckten Bauteils mit Regionen der Voidbildung

Da in dieser Studienarbeit keine größeren Proben gedruckt und untersucht werden, sondern die einzelnen Druckfilamente, ist eine Einteilung nach Micro-, Meso- und Macrovoids nicht sinnvoll. Im Optimalfall besteht ein Druckfilament aus einem einzigen Faserbündel, in dem die Einzelfasern gleichmäßig verteilt sind. Dadurch tritt jeder Void innerhalb eines Faserbündels auf und gilt per Definition als Microvoid. Aus diesen Grund müssen andere Faktoren zur Einteilung betrachtet werden.

Goodwin et al. entdecken, dass der Einfluss der Voids nicht nur von der Größe, sondern auch von der Querschnittsform der Voids abhängig ist [10]. Unsymmetrische Voids (Abbildung 5 rechts) haben aufgrund kleinerer Radien in den Kanten eine höhere Überlagerung von Spannungen, wodurch diese eher zur Rissbildung beitragen, als symmetrische bzw. runde Voids (Abbildung 5 links) [10].

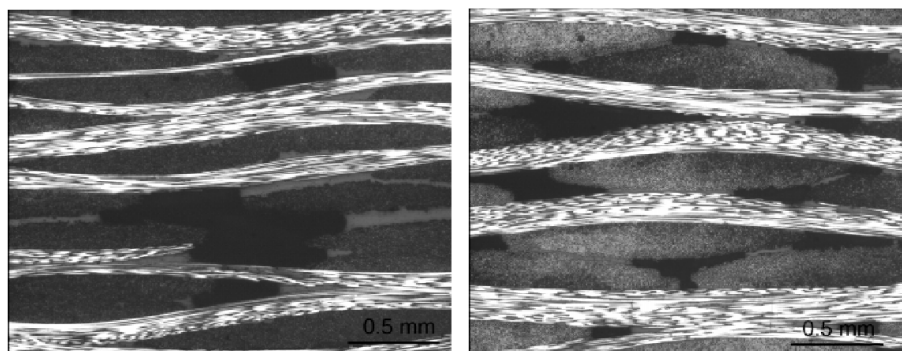


Abb. 5: links: symmetrische Voids; rechts: asymmetrische Voids [10]

Zu finden sind asymmetrische Voids in der Regel zwischen den Faserlagen, während symmetrische Voids vor allem innerhalb der Faserbündel vorkommen [10]. Zusätzlich zeigt sich, dass viele kleine asymmetrische Voids einen größeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben, als wenige große symmetrische Voids [10]. Eine Einteilung von Voids vorrangig nach Form des Querschnitts scheint daher sinnvoll.

Chambers et al. führen eine Einteilung der Querschnittsfläche nach vier Größenordnungen durch [26]:

1. $8e-6$ bis $0,004\text{mm}^2$
2. $0,004$ bis $0,01\text{mm}^2$
3. $0,01$ bis $0,03\text{mm}^2$
4. $> 0,03\text{mm}^2$

Während der Untersuchungen stellt sich heraus, dass Voids der 4. Größenordnung den größten Einfluss ausüben, obwohl diese den geringsten Anteil an Voids ausmachen [26]. Chambers et al. kommen zu dem Schluss, dass der Einfluss von Voids mit einer Querschnittsfläche unterhalb $0,03\text{mm}^2$ nicht signifikant wird [26]. Aus diesem Grund sollte neben der Einteilung der Voids nach ihrer Form zusätzlich eine Einteilung nach Größe vorgenommen werden.

Einteilung in dieser Studienarbeit

Die Studien zeigen, dass nicht nur der Voidgehalt, sondern vor allem Form und Größe der Voids die mechanischen Eigenschaften des Verbunds beeinflussen. Aus diesem Grund werden in dieser Studienarbeit die Voids zunächst nach ihrer Form und im Anschluss nach ihrer Größe bzw. Querschnittsfläche eingeteilt.

Die Voidformen werden in symmetrische und unsymmetrische Voids aufgeteilt werden. Als symmetrische Voids werden solche definiert, deren Querschnittsfläche ein gewissen Grad an Rundheit erfüllen. Die Rundheit wird in Bezug auf die optimalen Kreisfläche ermittelt, die aus dem Umfängen der Voids bestimmt wird. Dieses Vorgehen begründet sich damit, dass kreisförmige Voids weniger zur Rissbildung beitragen [10]. Zusätzlich haben Kreise unendlich viele Symmetrieachsen und sind daher perfekt symmetrisch. Daher gilt, dass je näher der Flächeninhalt des Voids an den Flächeninhalt eines optimalen Kreises gleichen Umfangs herankommt, desto runder und symmetrischer ist dieser Void.

Zur Bestimmung der Rundheit werden die Gleichungen für Fläche und Umfang eines Kreises nach dem Radius umgestellt und miteinander gleichgesetzt (Gleichung 3).

$$\frac{U}{2\pi} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3)$$

Im Anschluss wird eine Seite der Gleichung durch die andere dividiert, sodass ein Quotient gebildet wird, der 1 ergibt (Gleichung 4).

$$\frac{4\pi A}{U^2} = 1 \quad (4)$$

Diese Gleichung gilt ausschließlich für Kreise und daher runde Formen. Zum Vergleich der Rundheit von Formen, werden Fläche und Umfang in den obigen Quotienten eingesetzt und der Wert berechnet. Gleichung 5 zeigt beispielhaft die Rundheit eines Quadrats mit einem Umfang von $U = 10$.

$$\frac{4\pi \cdot 6,25}{10^2} = 0,785 \quad (5)$$

Da nicht bekannt ist, mit welcher Genauigkeit die Bildanalyse-Software arbeitet, wird der erforderliche Rundheitsgrad experimentell ermittelt. Dazu wird die Rundheitsbedingung im Code der Software implementiert und das Programm mit verschiedenen Werten für dasselbe Schliffbild ausgeführt. Als Startbedingung wird eine Rundheit von 0,8 gewählt, dessen Ergebnis in Abbildung 6 dargestellt ist.

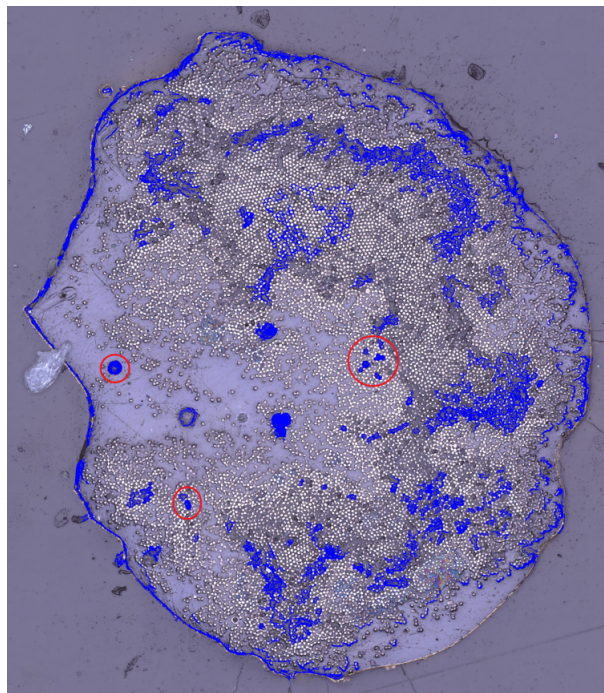


Abb. 6: Voidverteilung mit Rundheitswert = 0,8; blau < 0,8; rot > 0,8

Zu erkennen ist, dass kein Void in diesem Schliffbild als rund eingestuft wird. Dabei existieren Voids, die als annähernd rund bzw. symmetrisch eingestuft werden können (Abbildung 7).

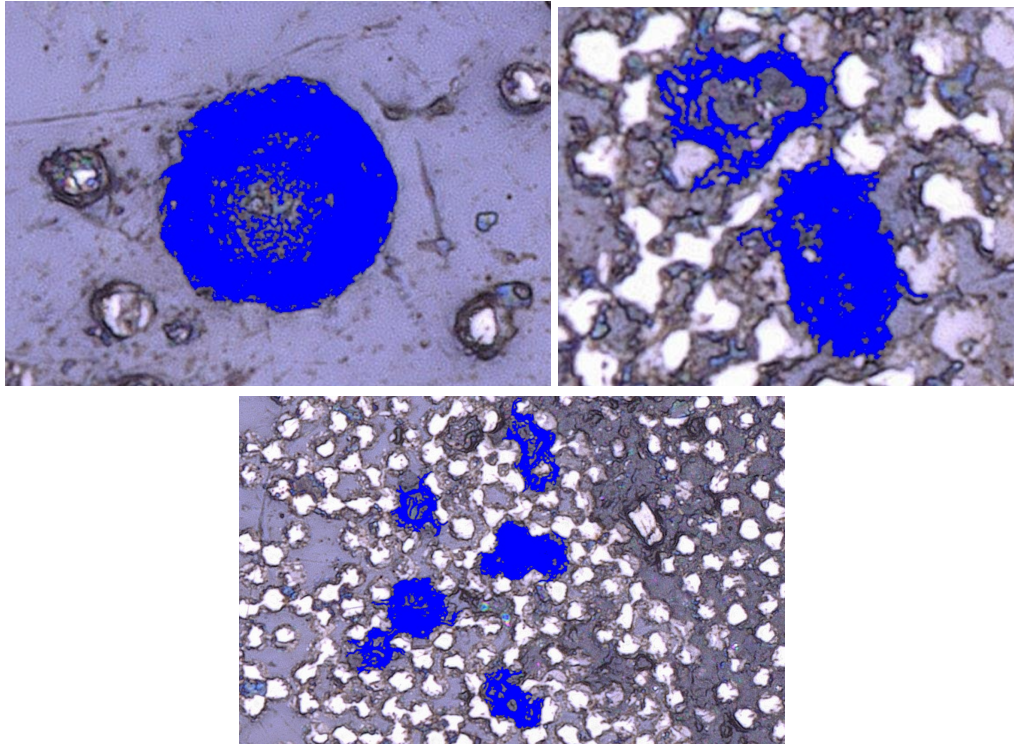


Abb. 7: Beispiel für symmetrische Voids

Um zu erreichen, dass die gezeigten Beispielveids als symmetrisch eingestuft werden, muss der Wert für die Rundheit angepasst und verringert werden. Dabei ergibt sich, dass eine Rundheitsbedingung von 0,025 notwendig ist, damit die Voids aus Abbildung 7 als symmetrisch gelten (Abbildung 8). Somit wird dieser Wert für die Auswertung der Schlibfbilder als Rundheits- bzw. Symmetriebedingung festgelegt.

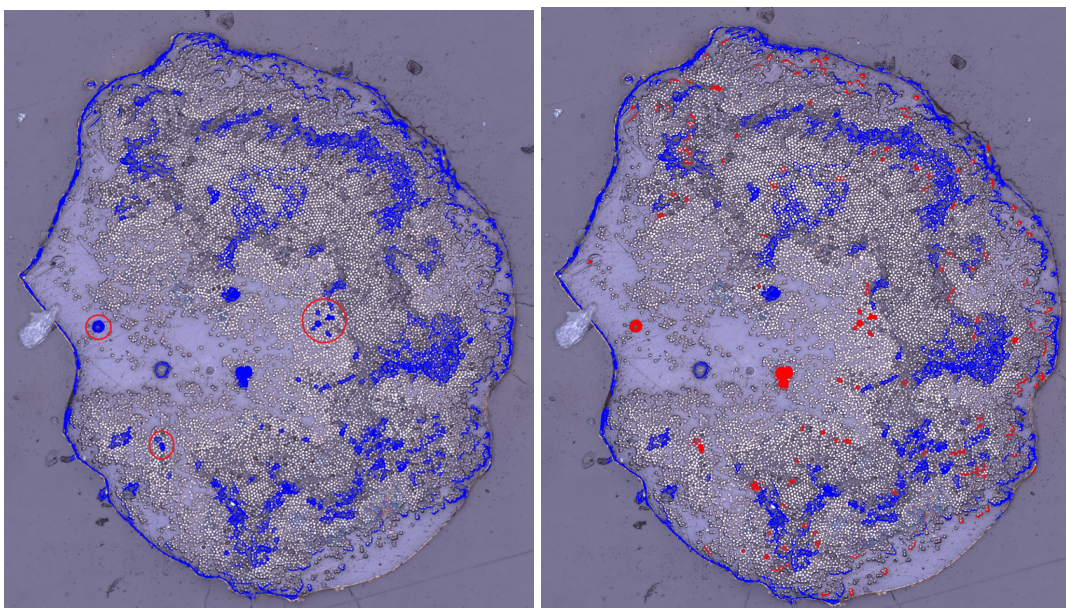


Abb. 8: Voidverteilung mit Rundheitswert; links: blau $< 0,8$; rot $> 0,8$; rechts: blau $< 0,025$; rot $> 0,025$

Da in den Studien bestätigt wird, dass verschiedene Voidgrößen einen unterschiedlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben, muss zudem eine Einteilung der Voids nach ihrer Querschnittsfläche erfolgen. Die Einteilung, die Chambers et al. vornehmen, wird dabei nicht verwendet, da deren genutzte Versuchsproben ($A = 40,64\text{mm}^2$) eine weitaus größere Geometrie aufweisen als die Druckfilamente ($A = 0,95\text{mm}^2$) [26]. Ein einzelner Void der Gruppe 4 ($A > 0,03\text{mm}^2$) hat bei Chambers et al. einen Anteil von etwa 0,07% an der Gesamtfläche. Im Druckfilament hätte dieser Void einen Anteil von 3,16%. Somit ist davon auszugehen, dass die kleinen Voids, die bei Chambers et al. keinen signifikanten Einfluss haben, in den Druckfilamenten einen größeren Einfluss haben.

Wie die Rundheitsbedingung, wird die Unterteilung nach Fläche ebenfalls experimentell bestimmt. Dabei zeigt sich, dass ein Vergleichswert von 100mal der Fläche einer Einzelfaser, ab der ein Void als 'groß' eingestuft werden soll, eine gute Einteilung ergibt. Abbildung 9 zeigt die Einteilung nach Symmetrie und Größe.

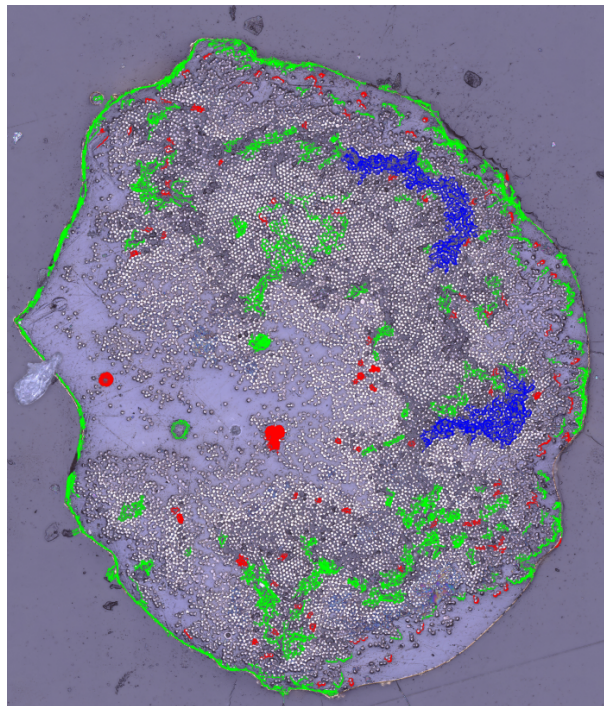


Abb. 9: Voidverteilung nach Rundheit/Größe; rot = symmetrisch; grün = asymm./klein; blau = asymm./groß

Die Analyse verschiedener Schlifffbilder mit diesen Bedingungen ergibt, dass wie in Abbildung 9 drei verschiedene Arten von Voids vorliegen. In der Regel liegen wenigen (zwei bis fünf) große und viele kleine asymmetrische Voids vor. Symmetrische Voids treten ausschließlich als kleine Voids auf. Außerdem kommt es vor, dass sehr kleine asymmetrische Voids als symmetrische Voids eingestuft werden. Da dies nur selten vorkommt und die entsprechenden

Voids keinen signifikanten Anteil ausmachen, ist dieser Fehler vernachlässigbar. Da diese Einteilung ansonsten der subjektiven Einschätzung entspricht, wird diese Einteilung für die weitere Analyse genutzt.

2.2 Charakterisierung von Voids

Die Charakterisierung von Voids ist notwendig, um eine Information über Voidgehalt, -verteilung, -form und -größe zu erhalten. Zu diesem Zweck werden verschiedene technische Mittel eingesetzt, die im Wesentlichen in zerstörende und zerstörungsfreie Mittel eingeteilt werden können. Zu den zerstörungsfreien Mitteln gehören unter anderem die Röntgen-Computertomografie (CT) oder das Ultraschallscanning, deren Vorteil darin liegt, ein ganzheitliches Bild der Voidverteilung und-morphologie über das gesamte Material zu erstellen, ohne das Objekt zu zerstören, wodurch anschließende mechanische Test ermöglicht werden [27].

Computertomografie (CT)

Bei der Computertomografie werden Objekte oder Bauteile in einem Computertomografen per Röntgenstrahlung durchleuchtet. Dabei werden über die gesamte Länge des Objekts 2D-Bilder aufgenommen, die im Anschluss zu einem dreidimensionalen Bild zusammengefügt werden [28]. Für die Analyse kann dieses 3D-Bild mittels einer Graustufenanalyse umgewandelt und auf Voids, sowie weitere Parameter, untersucht werden [29]. Ein Vorteil des CTs ist u.a. die Möglichkeit Rissbildungen und Risswachstum über die gesamte Objektlänge untersuchen zu können [30, 31]. Zu den Nachteilen gehört, dass die CT-Technologie mit hohen finanziellen Kosten verbunden ist [32].

Ultraschallmessung

Die Ultraschallmessung basiert auf einem Sender/Empfänger-Prinzip, bei dem Schallwellen durch den Sender in das Material geleitet und durch einem Empfänger wieder aufgenommen werden [33]. Besteht ein Material aus verschiedenen Medien, beispielsweise Faser, Matrix und Luft (Voids), können die Schallwellen durch entsprechende Medien reflektiert, gebrochen, umgelenkt oder gestreut werden [33]. Voids beispielsweise sorgen dafür, dass die Schallwellen in alle Richtungen gestreut werden [34]. Auf diese Art und Weise der Messung können für bestimmte Regionen zweidimensionale Bilder erstellt werden, die einen Überblick über Fehlstellen im Material geben [34]. Als Sonden werden meist piezoelektrische Wandler verwendet, die als Sender und Empfänger funktionieren [35].

Fortgeschrittene Ultraschallmessungen nutzen als Sender sogenannte Phased-Array-Sonden, die aus mehreren piezoelektrischen Kristallen bestehen und die Schallwellen in spezifischen Formen aussenden, sodass die Wellen gezielter ausgerichtet werden können, als bei einer einzigen Sonde [33].

Lichtbildmikroskopie

Im Gegensatz dazu stehen zerstörende Methoden, wie die Lichtbildmikroskopie. Anders als nichtzerstörende Methoden, kann bei der Mikroskopie ausschließlich ein spezifischer Querschnitt einer Probe untersucht werden. Hierzu wird die Probe zunächst an entsprechender Stelle zersägt, gereinigt und mit einer Schicht Gold gesputtert, bevor die Probe in einem Harzsystem eingebettet wird. Das Sputtern ist notwendig, damit in der später folgenden Analyse die Matrix des Filaments vom Harzsystem der Einbettung zu unterscheiden ist [1]. Im Anschluss wird der zu untersuchende Querschnitt in einem definierten Prozess zunächst geschliffen und anschließend poliert. Die Metallografien werden dann unter einem Mikroskop aufgenommen. Durch eine Fokussierung des Lichts, sowie der Aufnahme eines 3D-Panoramas, besteht die Möglichkeit, Effekte aufzunehmen, die in der Tiefe der Probe auftreten. Durch die Nutzung einer Bildanalyse-Software können diese Effekte quantifiziert werden, indem die Aufnahme in einer Graustufenanalyse untersucht wird.

Da sich in der Vergangenheit die Untersuchung mit der Lichtbildmikroskopie bewährt hat, wird diese Methode ebenfalls in dieser Studienarbeit verwendet.

2.3 Mechanische Prüfverfahren

Mechanische Prüfverfahren sind entscheidend für die Verständnis der mechanischen Eigenschaften von Materialien. Sie liefern wichtige Informationen über das Verhalten von Materialien unter verschiedenen Belastungsbedingungen. Da Voids insbesondere die matrixdominierten mechanischen Eigenschaften beeinflussen, werden in diesem Kapitel mechanische Prüfverfahren betrachtet, die diese Eigenschaften testen. Zu diesen matrixdominierten Eigenschaften gehören die Biege- und Schereigenschaften, weshalb die 3-Punkt-Biegeprüfung (3PB), die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) und der Scherversuch betrachtet werden. Da die Druckfilamente zudem in ihren Zugeigenschaften charakterisiert werden sollen, wird zusätzlich der Zugversuch betrachtet.

2.3.1 3-Punkt-Biegeprüfung (3PB)

Diese Prüfung dient der Ermittlung der Biegefestigkeit und des Biegemoduls eines Materials. Aufbau und Durchführung des Versuchs verläuft nach der Norm DIN EN ISO 14125. Der Aufbau ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Radien R_1 & R_2 von Druckfinne und Auflager können in ihrer Größe variiert werden. Die Standardradien sind 5 mm (R_1) und 2 mm (R_2) [36].

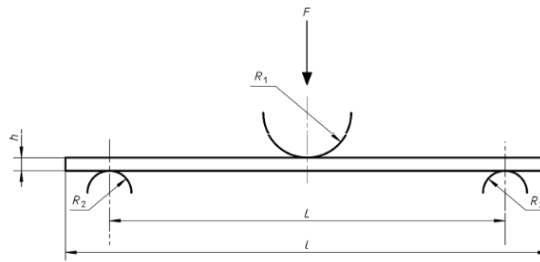


Abb. 10: Versuchsaufbau 3-Punkt-Biegeprüfung [36]

Die Norm gibt als Probengeometrie einen Quader vor. Länge, Breite und Dicke der Proben, sowie Versuchsparameter wie die Stützweite L zwischen den Auflagern, werden in Abhängigkeit der Werkstoffklasse vorgegeben [36]. Allerdings sollen die Druckfilamente direkt getestet werden. Aufgrund dessen müssen die Parameter, sowie die Formeln zur Auswertung der Messwerte, dem rundlichen Versuchsproben angepasst werden.

Die Filamente entsprechen der Werkstoffklasse IV (unidirektionale Verbundstoffe), wodurch die Stützweite mit $L = 40 \cdot h$ bestimmt wird [36]. Die Höhe h bzw. hier der Durchmesser d der Filamente liegt zwischen 1,0 und 1,1 mm. Daher ergibt sich eine Stützweite von 40 bis 44 mm. Da die Einstellung der Stützweite an der Prüfmaschine manuell erfolgt, wodurch eine exakte Änderung der Stützweite während der Prüfung nicht möglich ist, wird die Stützweite für alle Versuchsproben auf 40 mm festgelegt.

Die Norm gibt zur Berechnung von Biegefestigkeit und Biegemodul die Gleichungen 6 und 7 vor [36].

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (6)$$

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \cdot \left(\frac{\delta F}{\delta s} \right) \quad (7)$$

Unter der Annahme, dass die Filamente perfekt rund sind, ergeben sich für Biegefestigkeit und Biegemodul die Gleichungen 8 und 9.

$$\sigma_f = \frac{M_b}{W_{ax}} = \frac{\frac{F}{2} \cdot \frac{L}{2}}{\frac{\pi}{32} \cdot d^3} = \frac{32 \cdot FL}{4 \cdot \pi d^3} = \frac{8 \cdot FL}{\pi d^3} \quad (8)$$

$$E_f = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} = \frac{\frac{8 \cdot FL}{\pi d^3}}{\frac{6 \cdot sd}{L^2}} = \frac{4 \cdot L^3}{3 \cdot \pi d^4} \cdot \left(\frac{\delta F}{\delta s} \right) \quad (9)$$

2.3.2 Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)

Bei der DMA können verschiedene Materialeigenschaften viskoelastischer Proben ermittelt werden. In diesem Fall wird das komplexe Dehnmodul E^* eines Materials bestimmt, das dem Biegemodul entspricht. Dieses teilt sich in seine Bestandteile aus Speichermodul E' und Verlustmodul E'' auf. Das Speichermodul entspricht dem elastischen Anteil, der einen Teil der aufgetragenen Arbeit speichern und zurückgeben kann [37]. Das Verlustmodul entspricht dem Anteil, der einen Teil der Arbeit dissipiert [37].

Zur Bestimmung des Biegemoduls wird die Probe auf einem Auflager platziert und mit einer Druckfinne dynamisch belastet, sodass die Probe frei schwingt. Das Material antwortet auf die sinusförmige Anregung mit einer ebenfalls sinusförmigen Verformung, wobei diese um den Phasenwinkel δ versetzt ist (Abbildung 11) [37].

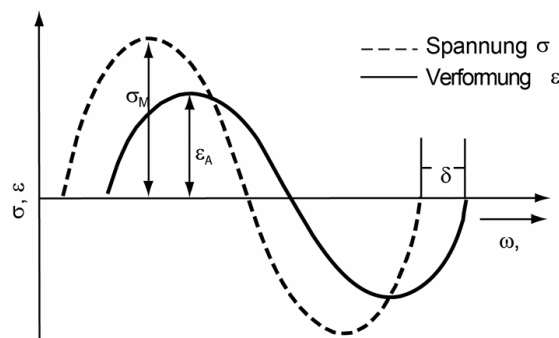


Abb. 11: Sinusförmige Anregung und Antwort [37]

Dieser Versatz kommt durch die viskosen Eigenschaften der Proben zustande, die einen Teil der verrichteten Arbeit dissipieren. Die Berechnung der komplexen Moduln ist in den Gleichungen 10 bis 13 gezeigt.

$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} \quad (10)$$

$$|E^*| = \sqrt{[E'(\omega)]^2 + [E''(\omega)]^2} \quad (11)$$

$$E'(\omega) = |E^*| \cdot \cos(\delta) \quad (12)$$

$$E''(\omega) = |E^*| \cdot \sin(\delta) \quad (13)$$

In der Regel wird diese Messung bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Durch die Änderung des Biegemoduls mit der Temperatur kann auf diese Weise die Glasübergangstemperatur von bspw. Thermoplasten bestimmt werden [37].

Für diese Studienarbeit ist diese Untersuchung nicht notwendig. Es reicht aus, die Messung bei Raumtemperatur durchzuführen, um das Biegemodul zu bestimmen. Der Vorteil gegenüber der statischen Biegeprüfung (3PB) besteht darin, dass die Probe nicht zerstört wird und somit von verschiedenen Winkeln belastet werden kann. Dadurch kann der Einfluss der Voidverteilung bzw. Lokation auf das Biegemodul bestimmt werden.

2.3.3 Zugversuch

Der Zugversuch dient der Ermittlung der Zugfestigkeit, sowie des E-Moduls. In der Regel werden dazu bei faserverstärkten Verbundwerkstoffen Testcoupons verwendet (Vergleich Abbildung 12, die an beiden Enden in einer Zugmaschine eingespannt werden).

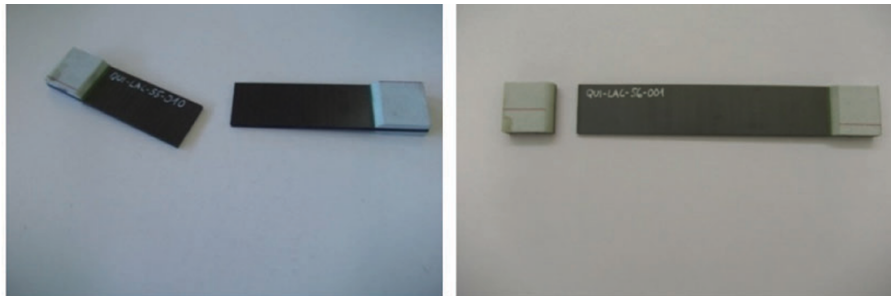


Abb. 12: Getestete und zerstörte Coupons [12]

Für das Testen von Druckfilamenten gibt es keine standardisierte Versuche. Dennoch hat sich eine Form des Testen etabliert, mit der Filamente untersucht werden können. Dazu wird das Filament an beiden Enden auf eine Rolle mit großem Durchmesser gewickelt (Abbildung 13 links). Die Rollen werden im Anschluss an der Zugmaschine befestigt, sodass das Filament auf Zug beansprucht werden kann (Abbildung 13 rechts).

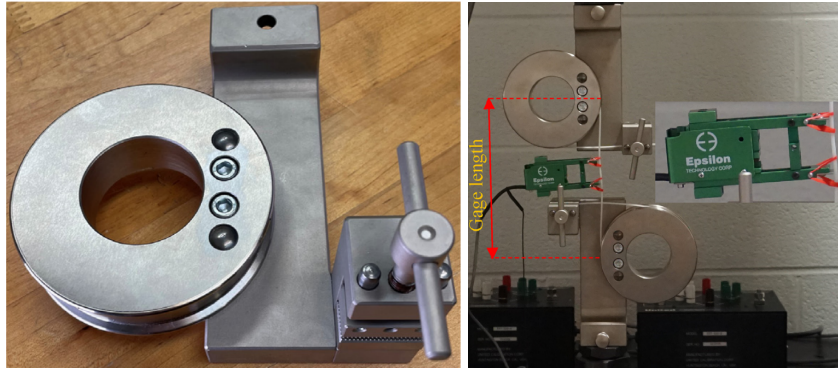


Abb. 13: Links: Rolle zur Filamentaufnahme; rechts: Aufbau Zugversuch [38]

Im weiteren Verlauf wird, wie beim standardisierten Versuch, der Kraft-Weg-Verlauf bzw. der Spannungs-Dehnungs-Verlauf aufgezeichnet.

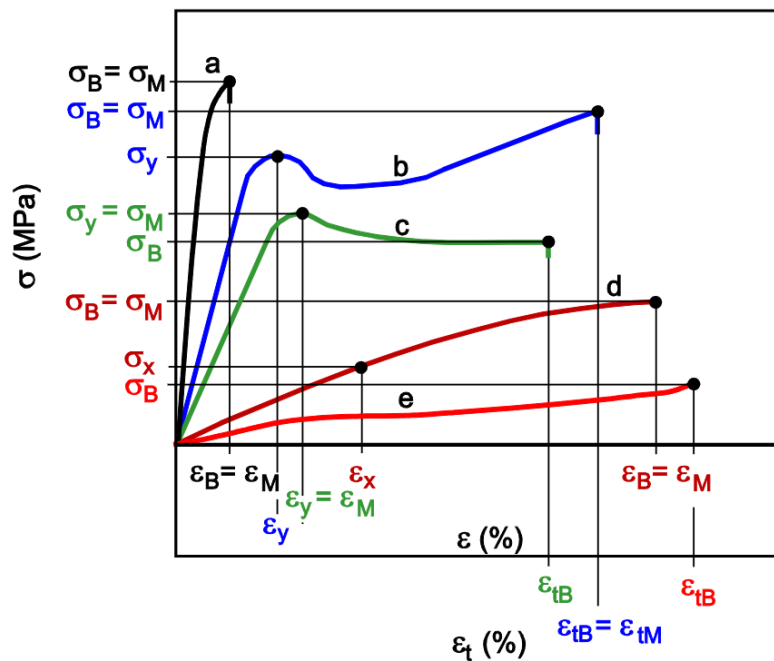


Abb. 14: Spannungs-Dehnungs-Diagramme verschiedener Kunststoffe: a) spröde Werkstoffe, b) und c) zähe Werkstoffe mit Streckpunkt, d) zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt, e) Elastomere [39]

Abbildung 14 zeigt die Spannungs-Dehnungsdiagramme für verschiedene Kunststoffe. Anhand des Verlaufs können Aussagen getroffen werden, ob die Filamente bspw. ein sprödes oder zähes Werkstoffverhalten zeigen, und ob dieses durch die Voids beeinflusst wird.

2.3.4 Scherversuch

In dieser Prüfung werden die Scherfestigkeit und das Schermodul der Versuchsproben bestimmt. Diese werden bei Faserverbunden i.d.R. durch den sogenannten V-notched rail test nach ASTM D5379 ermittelt. Dazu wird der Probenkörper mit zwei V-Auschnitten versehen und wie in Abbildung 15 eingespannt [40]. Die Scherung konzentriert sich somit an Stelle der Einkerbungen. Durch Dehnungsmessstreifen, die auf Höhe der Einkerbung am Probenkörper geklebt werden, werden die Dehnungen gemessen, die während des Versuchs auftreten.

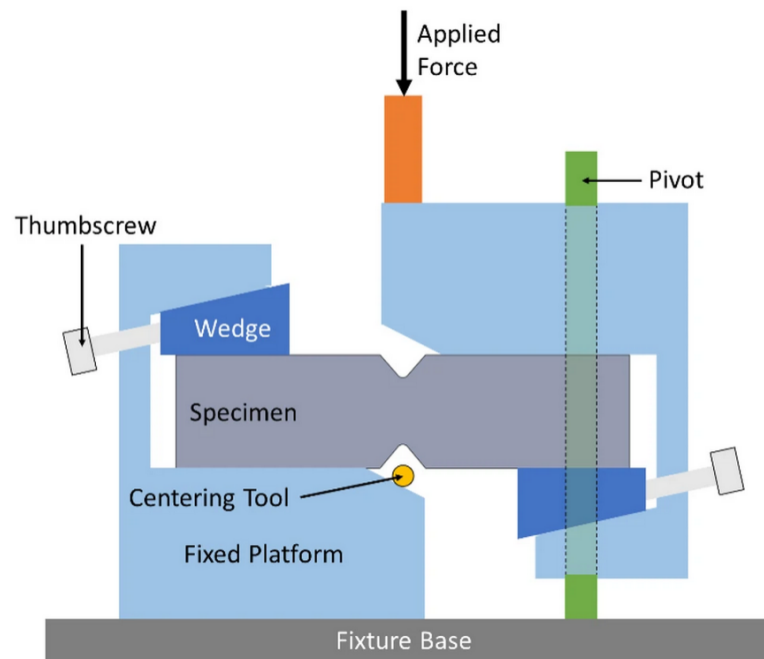


Abb. 15: Schematischer Aufbau V-notched rail test [40]

Für die Druckfilamente ist dieser Versuch in der Form nicht direkt anwendbar. Da es zudem für endlosfaserverstärkte Filamente keine ausführlich untersuchten Scherversuche gibt, muss ein alternativer Weg gefunden werden, die Druckfilamente auf das Scherverhalten zu untersuchen. Der V-notched Test soll dabei als Ansatz genutzt werden.

Die Idee besteht darin, das Druckfilament, quer zur Faser, auf Scherung zu belasten. Dazu soll das Filament durch zwei Blöcke geschoben werden, die anschließend in entgegengesetzte Richtung auf Zug belastet werden. Abbildung 16 zeigt den schematischen Aufbau des Versuchs.

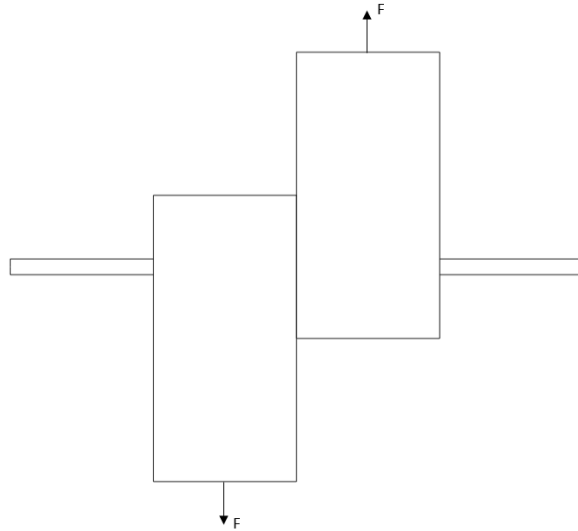


Abb. 16: Schematischer Aufbau Scherversuch

Während des Versuchs werden die wirkende Kraft und der zurückgelegte Weg aufgezeichnet, bis das Filament versagt. Aus der Kraft und dem Querschnitt des Filaments wird dann die Scherfestigkeit $\tau = \frac{F}{A}$ berechnet. Das Schermodul wird aus dem linearen Verlauf des Kraft-Weg-Diagramms mit $G = \frac{\delta\tau}{\delta\gamma}$ ermittelt (Abbildung 17) [41]. Die Bestimmung von γ erfolgt mit $\gamma = \frac{\delta L}{L}$. Dies setzt voraus, dass zwischen Beiden Blöcken ein kleiner Spalt der Länge L vorhanden sein muss [41].

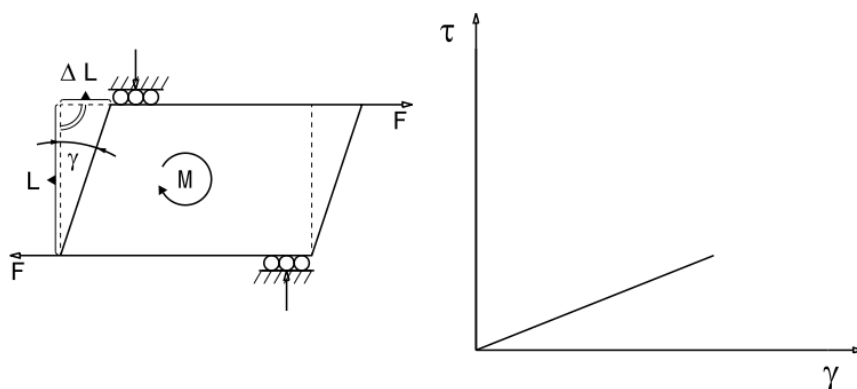


Abb. 17: Elastische Verformung mit Kraftverlauf bei Scherung [41]

Der Versuch wird an einer Zugmaschine durchgeführt. Da es für diesen Versuch kein standardisiertes Werkzeug gibt, muss dieses gefertigt werden. Die Werkzeuteile müssen eine hohe Steifigkeit aufweisen, um einer Biegebelastung entgegenzuwirken, die aufgrund des asymmetrischen Aufbaus (siehe Abb. 16) unter Zug entsteht. Gleichzeitig muss das Werkzeug in der Lage sein, seitliche Lagetoleranzen in der Maschine auszugleichen, weshalb das Werkzeug als

Kardangeln ausgelegt wird (siehe Anhang A 1 bis 3). Die einzelnen Bauteile des Werkzeugs werden mit einem Haltebolzen mit einem Durchmesser von $d = 7,95\text{mm}$ verbunden.

Während der Fertigung stellt sich heraus, dass die Bohrung eines Durchmessers von 1,2 mm über eine Dicke von 15 mm nicht möglich ist und der Bohrer abbricht. Aus diesem Grund wird zur Filamentaufnahme ein Adapter bzw. Einsatz aus Kunststoff gedruckt und das Werkzeug mit einer größeren Bohrung angepasst (siehe Anhang A 4 bis 6).

Das Werkzeug wird in doppelter Ausführung gefertigt, sodass der Aufbau an der Zugmaschine wie in Abbildung 18 erfolgt.

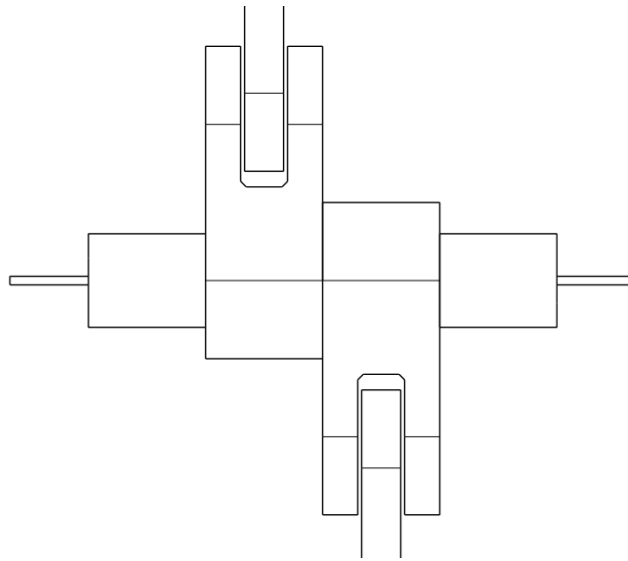


Abb. 18: Aufbau des Scherversuchs an der Zugmaschine mit Filament

Indem der Einsatz um 0,5 mm kürzer gefertigt ist als das Bauteil in dem dieses gesteckt wird, entsteht der notwendige Spalt zur Ermittlung des Schermoduls, der in diesem Fall bei 1 mm liegt.

3 Versuchsdurchführungen

Im Folgenden werden die Versuchsdurchführungen der durchgeführten Versuche mitsamt der verwendeten Versuchsparameter beschrieben.

Für die 3-Punkt-Biegemessung, der DMA und des Scherversuchs werden die zu untersuchenden Proben für jeweils vier Stunden bei 150°C in einem Ofen zurückgetrocknet, damit die Messergebnisse frei von Feuchtigkeitseinflüssen sind. Ein steigender Feuchtigkeitsgehalt führt gleichzeitig zu einer Senkung der Festigkeit und einer Steigerung der Bruchdehnung [1]. Für die Proben des Zugversuchs muss keine Vorbehandlung vorgenommen werden, da bei dem verwendeten Material keine signifikanten Einflüsse zu erwarten sind.

3.1 3-Punkt-Biegeversuch

Bei der Biegeprüfung werden vier verschiedene Druckfilamente mit je drei Proben getestet. Da allerdings bei drei der vier Filamente das ursprünglich zur Verfügung gestellte Filament nicht genügt, um je drei Proben zuzusägen, wird bei diesen ein vergleichbares Filament als dritte Probe genutzt. Dieses wird zur optischen Unterscheidung auf 50 mm Länge gesägt. Die folgenden Tabellen geben einen Überblick der getesteten Proben, deren jeweilige Probengruppe mit den Nummer 1 bis 4 benannt ist. Für die Berechnung der Biegeeigenschaften werden vor dem Versuch der Durchmesser in Belastungsrichtung gemessen. Dazu wird eine Bügelmessschraube verwendet (Abbildung 19). Da dieser von Probe zu Probe schwankt, wird für die Berechnung ein einheitlicher Durchmesser von 1,1 mm gewählt. Der Einfluss des Durchmessers wird in der Auswertung betrachtet.



Abb. 19: Messung der Durchmesser in Krafrichtung

Tabelle 1: 3PB - Probengruppe 1

1	Filament	Durchmesser d	Probenlänge l
Probe 1	10 – 50/S ↓	1,025 mm	50 mm
Probe 2	10 – 50/E ↓	1,026 mm	60 mm
Probe 3	10 – 50/E ↓	1,044 mm	60 mm

Tabelle 2: 3PB - Probengruppe 2

2	Filament	Durchmesser d	Probenlänge l
Probe 1	Tapeumformung 14.02.	1,006 mm	60 mm
Probe 2	Tapeumformung 14.02.	1,026 mm	60 mm
Probe 3	Tapeumformung 14.02.	1,031 mm	43 mm

Tabelle 3: 3PB - Probengruppe 3

3	Filament	Durchmesser d	Probenlänge l
Probe 1	20oB50S ↓	1,048 mm	50 mm
Probe 2	20oB50E ↓	1,074 mm	60 mm
Probe 3	20oB50E ↓	1,053 mm	60 mm

Tabelle 4: 3PB - Probengruppe 4

4	Filament	Durchmesser d	Probenlänge l
Probe 1	U10//E ↓	1,001 mm	50 mm
Probe 2	10//E ↓	1,007 mm	70 mm
Probe 3	10//E ↓	1,045 mm	70 mm

Der Aufbau erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 14125. Die Testproben werden mittig auf dem Auflager platziert (Abbildung 20).

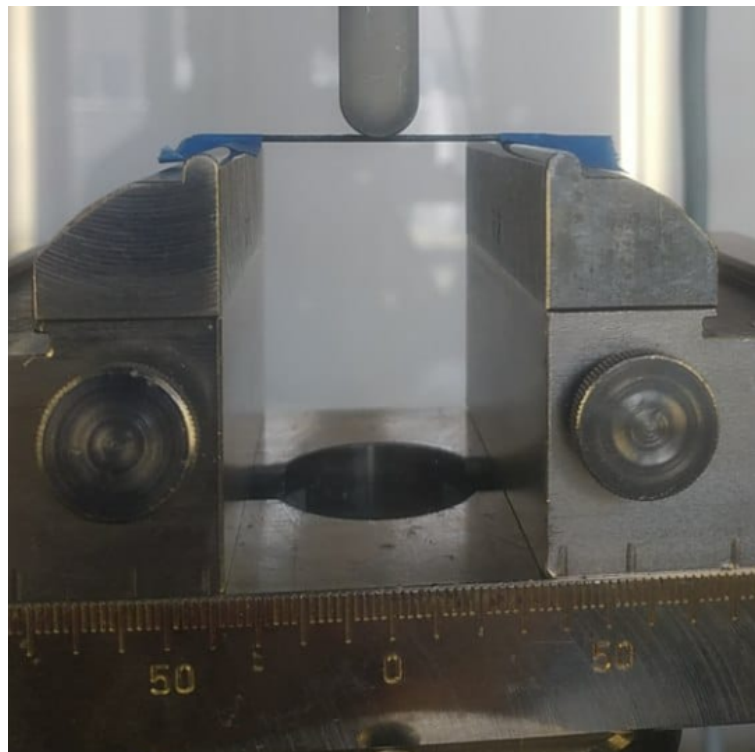


Abb. 20: Auflage Biegeprüfung (Probe 1-1)

Während des Versuchs wird das Auflager mit einer konstanten Geschwindigkeit in die Höhe gefahren, sodass die Probe mit der Druckfinne mittig belastet wird. Die Messung beginnt ab einer Vorkraft von 0,1 N und endet automatisch bei einem Kraftabfall von 70% der maximalen Kraft. Die Messung kann manuell beendet werden, wenn bei einer Messung keine signifikante Änderung der Messkurve zu erwarten ist. Gemessen werden die wirkende Kraft, sowie der Traversenweg des Auflagers. Tabelle 5 listet die Versuchsparameter und die Prüfumgebung auf.

Tabelle 5: 3PB - Versuchsparameter

Prüfnorm	i.A. an DIN EN ISO 141 25
Prüfmaschine	Zwick 1476
Kraftaufnehmer	5 kN
Konditionierung	4h bei 150°C
Prüfklima	23°C / 50% rel.F.
Vorkraft	0,1 N
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Druckfinne r1	5 mm
Auflager r2	2 mm
Stützweite L	40 mm

Um während des Testlaufs ein seitliches Abrutschen der Filamente zu verhindern wird die Probe 1-1 mit Klebeband auf dem Auflager fixiert (Abbildung 21 oben). Da diese Fixierung eine hohe Genauigkeit bei der Platzierung erfordert und der Einfluss des Klebebands auf die Messwerte unbekannt ist, werden die Proben im weiteren Testverlauf nicht direkt fixiert. Stattdessen werden links und rechts der Proben auf dem Auflager dicke Klebebänder aufgeklebt, die ein Abrutschen verhindern und keinen weiteren Einfluss auf die Probe haben (Abbildung 21 unten).

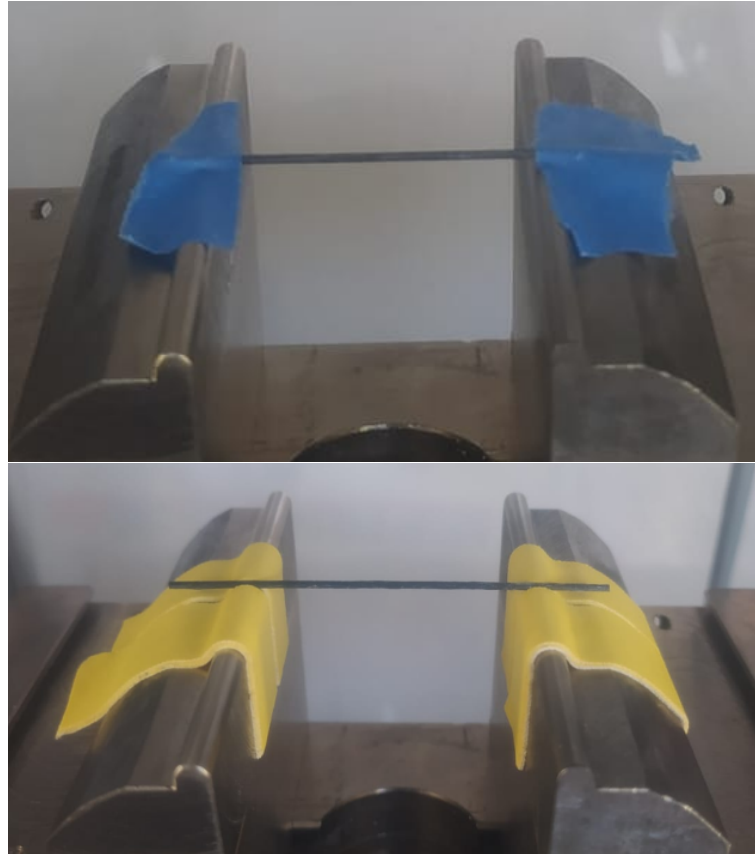


Abb. 21: Fixierung des Filaments auf dem Auflager: oben - Probe 1-1 direkt auf dem Auflager; unten - seitlich der Proben

3.2 Dynamisch-Mechanische Analyse

Bei der DMA werden insgesamt drei verschiedene Druckfilamente mit je drei Proben untersucht. Da für die Messung in der Messsoftware kein Durchmesser für runde Messobjekte eingegeben werden kann, sondern nur Breite und Höhe, werden Werte von 1 x 1 mm gewählt, die in der Auswertung für die jeweiligen Durchmesser umgerechnet werden (Tabelle 6).

Tabelle 6: Versuchsproben DMA

Probengruppe	Filament
1	10 – 50/S ↓
2	20oB50S ↓
3	rcf

Der Aufbau erfolgt in Anlehnung an der Norm DIN EN ISO 6721 als 3-Punkt-Biegeaufbau. Zusätzlich werden auf beiden Seiten des Werkzeugs Klebebänder drapiert, die dafür sorgen sollen, dass die Proben nicht seitlich abrutschen

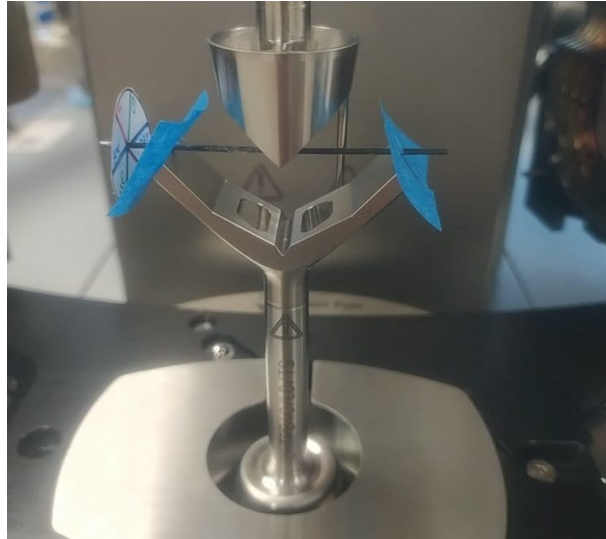


Abb. 22: Aufbau der DMA mit Fixierung gegen seitliches Abrutschen

Da die Proben von verschiedenen Belastungswinkeln getestet werden soll, werden diese vor dem Versuch mit einer Schablone versehen, auf der die Messwinkel markiert sind. Die Skalierung reicht von 0 bis 300° in 60°-Schritten. Die Proben werden manuell ausgerichtet.

Während des Versuchs wird das Auflager hochgefahren, bis die Prüfkraft von einem Newton erreicht wird. Dabei ermittelt die Messsoftware das komplexe Dehnmodul bzw. Biegemodul, sowie das Dehnspeicher- und Dehnverlustmodul, die als Messpunkte in einem Graphen dargestellt werden.

Die Prüfmaschine benötigt mehrere Versuche, um die Prüfkraft zu erreichen. Aus diesem Grund werden je Versuchsprobe und Belastungswinkel zehn Messungen getätigt, aus denen der Durchschnittswert für die weitere Auswertung genutzt wird.

Während des Versuchs bleiben nicht alle Proben in ihrer ursprünglichen Lage, sondern drehen sich unter der Belastung um ihre Achse. Dadurch verändert sich der Belastungswinkel. Aufgrund dessen muss für manche Messungen die Belastungsrichtung abgeschätzt werden.

3.3 Zugversuch

Für den Zugversuch sind drei verschiedene Proben vorgesehen. Bei den ersten beiden Proben handelt es sich um unterschiedlich gefertigte rcf-Proben. Bei der dritten Probe handelt es sich um eine tapeumgeformte Probe. Für die Messung der Spannung wird ein Durchmesser der Filamente von 1,1 mm gewählt (Tabelle 7). Für die Auswertung können die Flächenquerschnitte der Proben am Mikroskop ermittelt werden.

Tabelle 7: Versuchsproben Zugversuch

Probennummer	Material
1	rcf 1
2	rcf 2
3	Tapeumformung

Der Aufbau des Versuchs erfolgt wie in 2.3.3 beschrieben, indem das Filament an beiden Enden auf eine Rolle mit großem Durchmesser gewickelt wird (Abbildung 23 links). Das Filament wird mit mehreren Keilblöcken und Schraubzwingen in den Rollen befestigt (Abbildung 23 rechts).

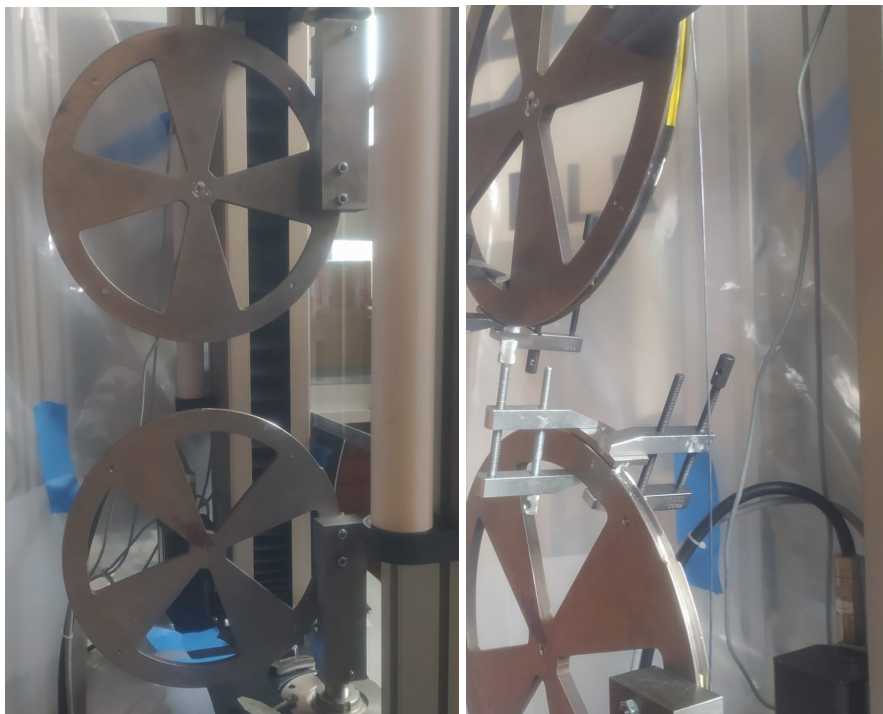


Abb. 23: links: Aufbau Zugversuch; rechts: Einspannung des Filaments

Vor dem Versuch ist die erste rcf-Probe in der Nähe eines Ende gebrochen. Aus diesem Grund kann die Probe nicht über die volle Länge auf der oberen Rolle befestigt werden. Dies führte während des Versuchs zu einem Abrutschen der Probe. Tabelle 8 zeigt die Versuchsparameter. Gemessen werden die Kraft und der Traversenweg der Zugmaschine.

Tabelle 8: Zug - Versuchsparameter

Prüfnorm	ohne
Prüfmaschine	Zwick Z005
Kraftaufnehmer	5 kN
Konditionierung	ohne
Prüfklima	23°C / 50% rel.F.
Vorkraft	20 N
Prüfgeschwindigkeit	2 mm/min
Freie Länge L	380 mm

3.4 Scherversuch

Bei dem Scherversuch sollten insgesamt drei Materialien mit je drei Proben untersucht werden. Bei den Proben handelt es sich um dieselben Probengruppen, wie bei der DMA (Tabelle 6). Allerdings hat sich während des Versuchs herausgestellt, dass die Proben der Gruppe 3 (rcf) nicht durch die Bohrung der Kunststoffeinsätze passen, dabei wurden zwei der drei Proben zerstört. Aufgrund von zeitlichen Gründen konnte die dritte Probe nicht gemessen werden. Abbildung 24 zeigt den Aufbau des Scherversuchs. Als Prüfmaschine wird eine Zugmaschine verwendet, in der das Werkzeug eingespannt und mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min auf Zug belastet wird.

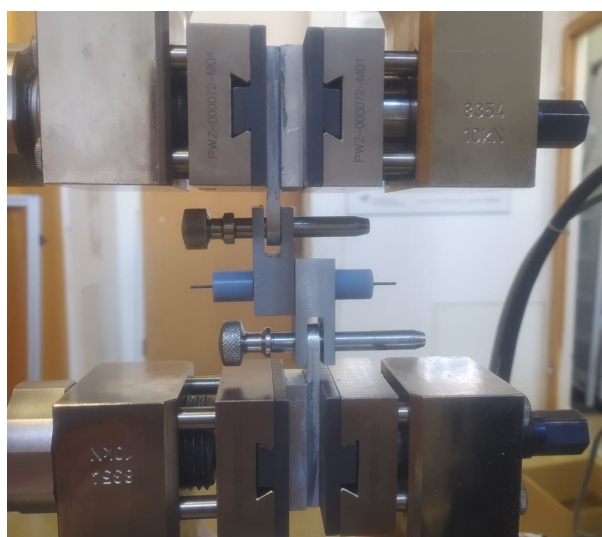


Abb. 24: Aufbau Scherversuch

Während des Versuchs zeigte sich weiterhin, dass sich durch die eingebrachten Kräfte ein Spalt

zwischen den Stahlblöcken bildet. Dies lässt sich damit begründen, dass aufgrund des asymmetrischen Aufbaus durch die Zugkräfte ein Drehmoment erzeugt wird. Dadurch und aufgrund des Spielraums der Gelenke biegen sich die Stahlblöcke auseinander. Um die Gelenke zu versteifen, wird der Spielraum mit jeweils einer Unterlegscheibe aus Aluminium geschlossen. Dennoch reicht diese Maßnahme nicht aus, um die Entwicklung des Spalts zu verhindern (Abbildung 25).

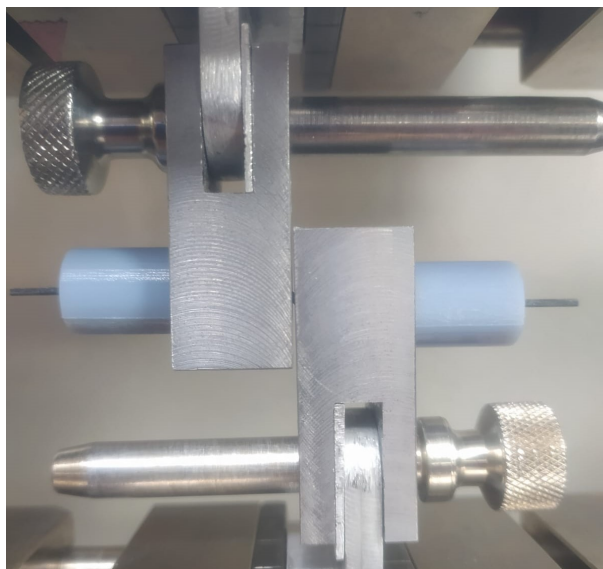


Abb. 25: Spaltentwicklung während des Scherversuchs

Da die Größe des Spalts sich während des Versuchs ändert, kann für die Auswertung der Spalt nicht gemessen und zu dem ursprünglich konstruierten Spalt aufaddiert werden. Dennoch werden die verbleibenden Probengruppen 1 & 2 getestet, um zu ermitteln, ob dieser Scherversuch in verbesserter Form ein geeigneter Versuch zur Ermittlung der Schereigenschaften sein kann. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Scherversuch - Versuchsparameter

Prüfnorm	ohne
Prüfmaschine	Zwick Z005
Kraftaufnehmer	5 kN
Konditionierung	4h bei 150°C
Prüfklima	23°C / 50% rel.F.
Vorkraft	ohne
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min

Gemessen werden während des Versuchs Kraft und Traversenweg der Zugmaschine. Die Kräfte reichen nicht aus, um die Proben zu zerreißen. Daher werden die Messungen abgebrochen,

sobald der linear elastische Bereich überschritten wird. Da Voids vor allem das mechanische Scherverhalten der Matrix bestimmen, kann der Einfluss der Voids durch den Vergleich des linear elastischen Bereichs bestimmt werden.

4 Messergebnisse

In diesem Kapitel werden Messergebnisse der jeweiligen Prüfung dargestellt und Auffälligkeiten beschrieben.

4.1 3-Punkt-Biegeprüfung

Die Abbildungen 26 bis 29 zeigen den Kraftverlauf über den Traversenweg während der Biegung. Die Diagramme werden von der Messsoftware erstellt. Um die Kurven voneinander unterscheiden zu können, wird der Beginn jedes Kraftverlaufs um 2mm versetzt. Die Tabellen 10 bis 13 beinhalten die Absolutwerte der Messung, die für den Durchmesser von 1,1 mm bestimmt wurden.

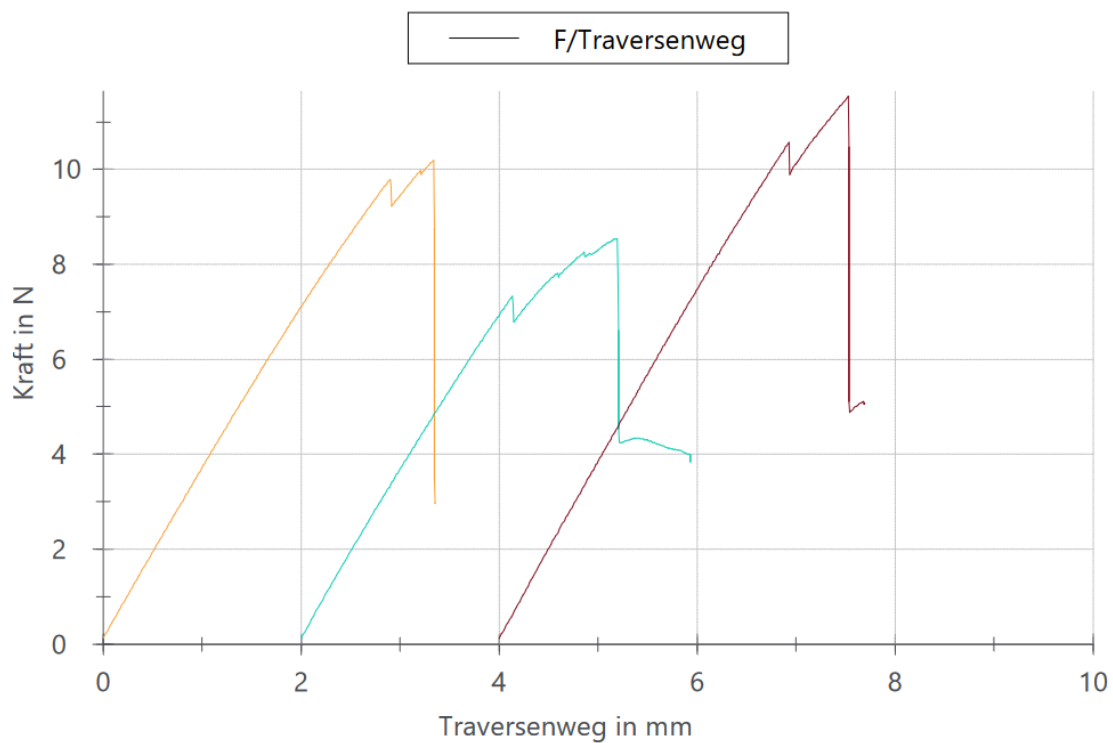


Abb. 26: Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 1. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3

Tabelle 10: Messergebnisse Probengruppe 1

1	d [mm]	F_{max} [N]	σ_{3PB} [MPa]	E_{3PB} [GPa]	f_{max3PB} [mm]
Probe 1	1,025	10,20	780,55	67,34	3,34
Probe 2	1,026	8,54	653,35	66,74	3,19
Probe 3	1,044	11,54	883,19	70,67	3,53

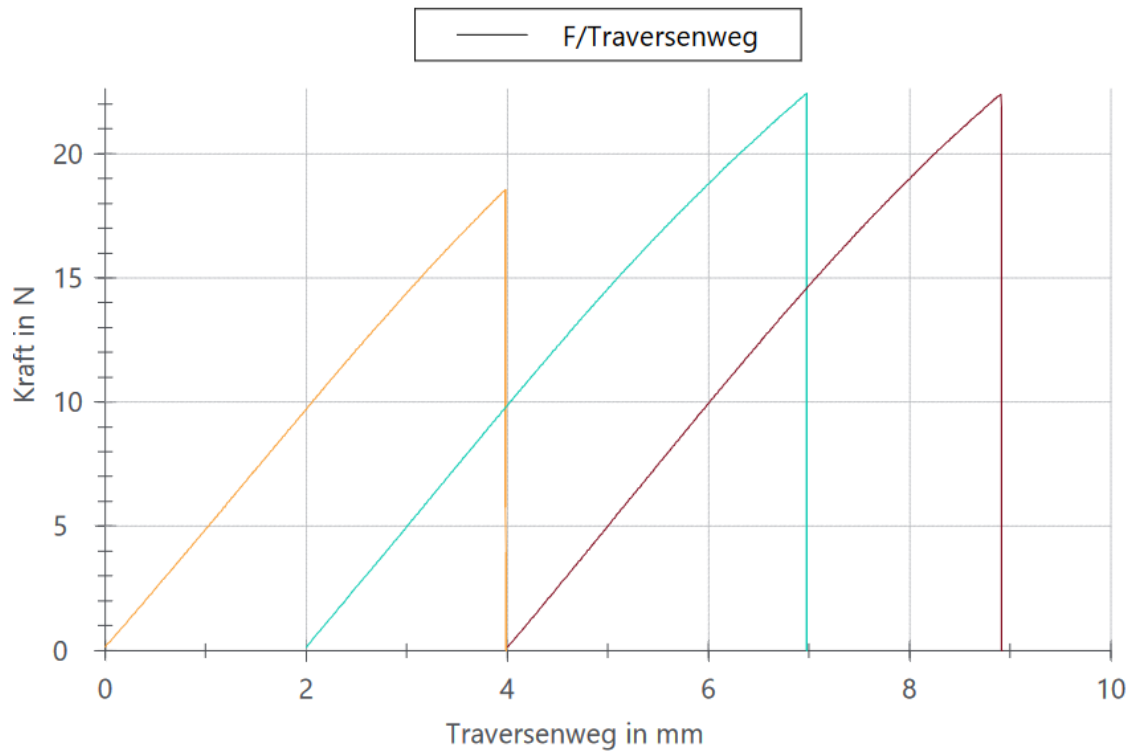


Abb. 27: Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 2. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3

Tabelle 11: Messergebnisse Probengruppe 2

2	d [mm]	F_{max} [N]	σ_{3PB} [MPa]	E_{3PB} [GPa]	f_{max3PB} [mm]
Probe 1	1,006	18,55	1.419,52	87,92	3,98
Probe 2	1,026	22,41	1.715,04	89,73	4,98
Probe 3	1,031	22,41	1.714,63	90,36	4,91

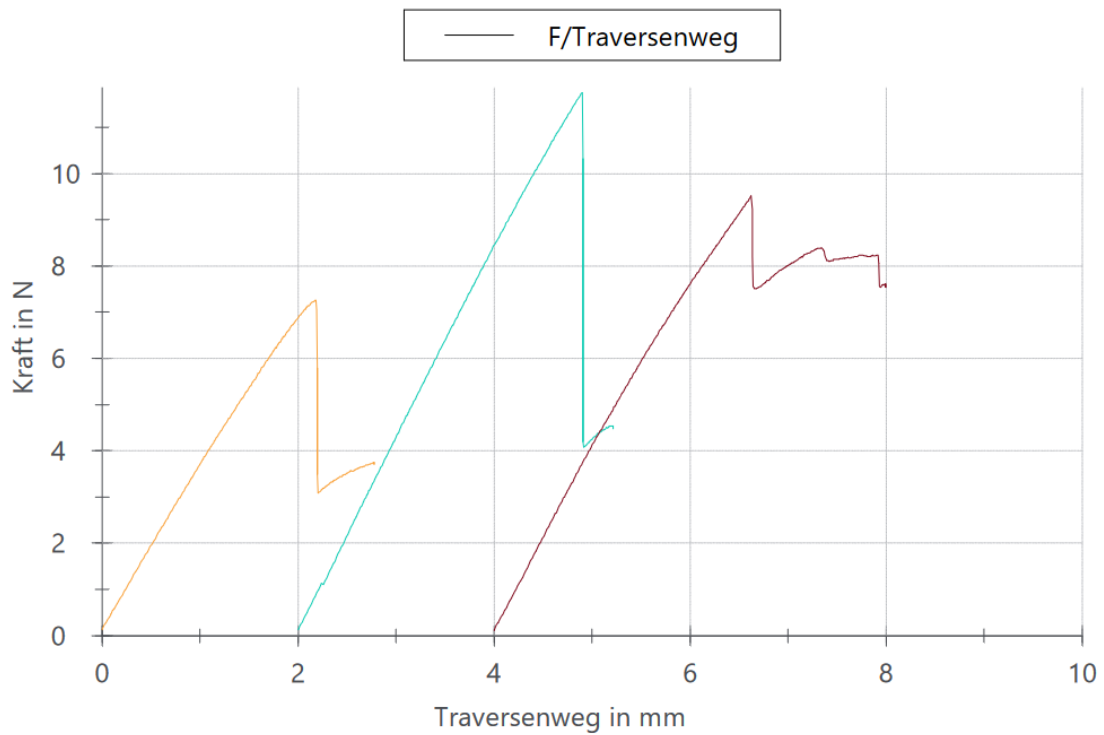


Abb. 28: Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 3. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3

Tabelle 12: Messergebnisse Probengruppe 3

3	d [mm]	F_{max} [N]	σ_{3PB} [MPa]	E_{3PB} [GPa]	f_{max3PB} [mm]
Probe 1	1,048	7,26	555,44	67,23	2,19
Probe 2	1,074	11,75	899,25	76,66	2,90
Probe 3	1,053	9,52	728,44	74,92	2,63

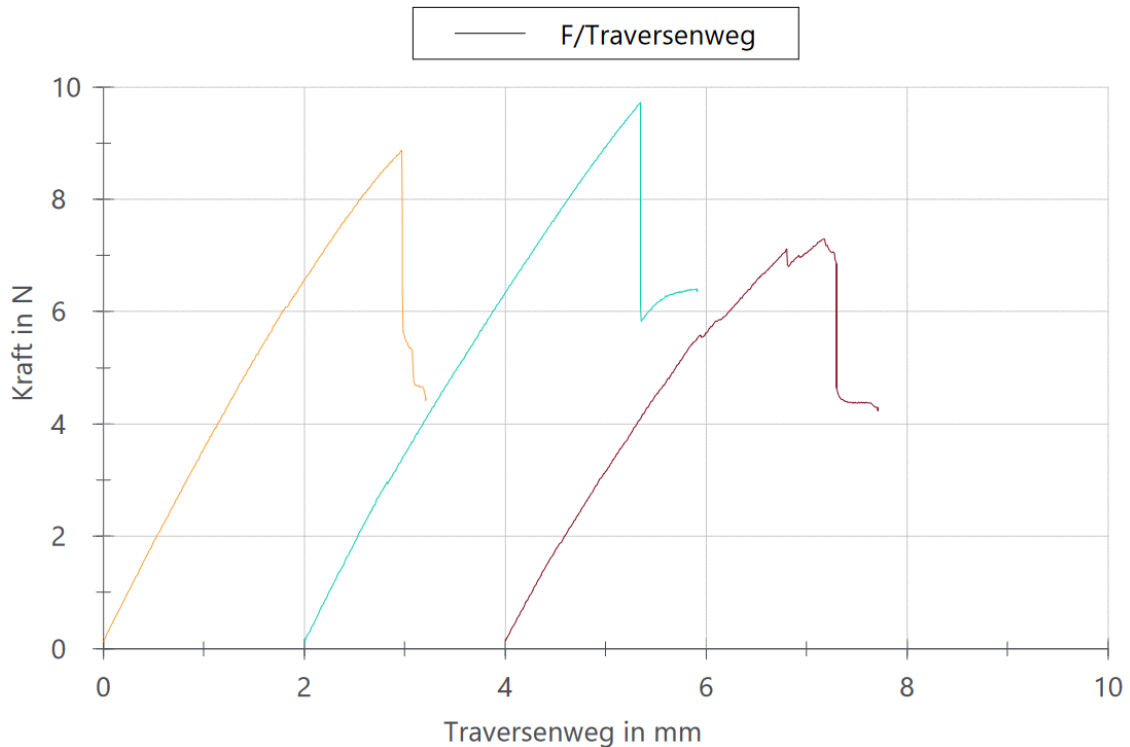


Abb. 29: Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 4. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3

Tabelle 13: Messergebnisse Probengruppe 4

4	d [mm]	F_{max} [N]	σ_{3PB} [MPa]	E_{3PB} [GPa]	f_{max3PB} [mm]
Probe 2	1,007	9,72	678,84	64,09	3,35
Probe 3	1,045	7,29	743,60	57,67	3,18

Die Kraftverläufe aller Proben zeigen ein sprödes Werkstoffverhalten. Bei der Probengruppe 1 zeigen die Verläufe einen kleinen Einbruch kurz vor Erreichen der Maximalkraft. Dieses Verhalten ist ebenfalls bei der Probe 4-3 zu beobachten. Nach Erreichen der Maximalkraft erfolgt ein großer Krafteinbruch. Sofern die Prüfung nicht automatisch von der Zugmaschine gestoppt wird, ist bei den Probengruppen 1, 3 & 4 ein Wiederanstieg der Kraft erkennbar, bevor die Prüfung manuell gestoppt wird.

Die Probe 3-1 weist als Ort der größten Durchbiegung nicht den Ort der Krafteinleitung durch die Druckfinne auf, sondern ist versetzt daneben (Abbildung 30).

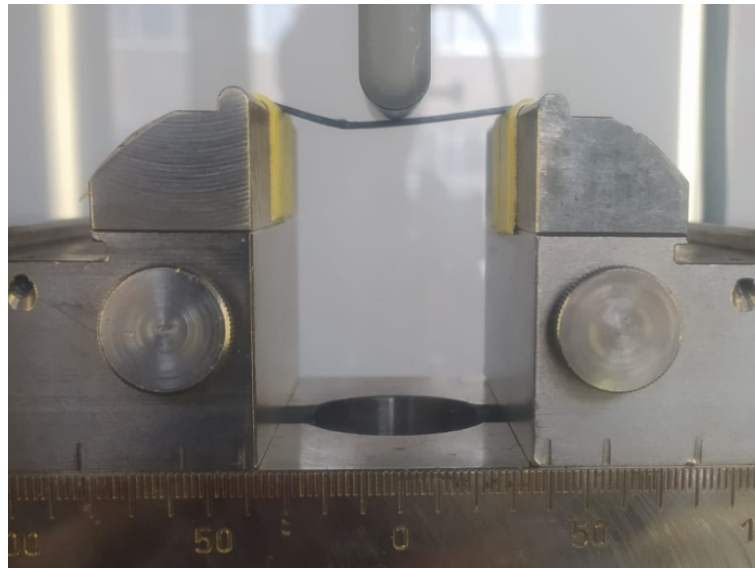


Abb. 30: Probe 3-1 unter Belastung

Dieses Verhalten bedeutet, dass die gemessene Durchbiegung geringer ist als die tatsächliche Durchbiegung, da die Wegmessung im Bezug auf den Krafteinleitungspunkt erfolgt.

Aus den Werten lässt sich erkennen, dass die Probengruppe 2 im Mittel die höchsten mechanischen Kennwerte aufweist. Da keine Vergleichsprobe zum Testen zur Verfügung stand, um die Proben untereinander vergleichen zu können, werden die Messwerte relativ zu den Werten der Probe 2-3 bezogen, da diese sowohl die größte Biegefestigkeit, als auch Biegemodul aufweist (der Unterschied der Biegefestigkeit zur Probe 2-2 ist vernachlässigbar).

Tabelle 14: relative Messwerte bezogen auf Probe 2-3

Probe	relative Biegefestigkeit	relatives Biegemodul
1 – 1	0,46	0,75
1 – 2	0,38	0,74
1 – 3	0,52	0,78
2 – 1	0,83	0,97
2 – 2	1,00	0,99
2 – 3	1,00	1,00
3 – 1	0,32	0,74
3 – 2	0,52	0,85
3 – 3	0,42	0,83
4 – 2	0,40	0,71
4 – 3	0,43	0,64

Tabelle 14 zeigt, dass die Biegefestigkeit relativ betrachtet zum Höchstwert stärker beeinflusst wird, als das Biegemodul. Außerdem ist zu erkennen, dass die Biegefestigkeit im Wesentlichen zwischen 32 und 83% des Höchstwertes stärker schwankt, als das Biegemodul zwischen 64 und 97% des Höchstwertes. Auffällig ist auch, dass die niedrigste Biegefestigkeit bei der Probe 3-1 auftritt, die nicht am Ort der Krafteinleitung versagt ist.

4.2 Dynamisch-Mechanische Analyse

Bei der DMA werden pro Probe und Belastungswinkel zehn Messwerte aufgenommen. Zur Auswertung wird daher jeweils der Mittelwert des komplexen Biegemoduls gebildet. Die Messwerte werden relativ zum höchsten Messwert innerhalb einer Versuchsprobe ermittelt, um den Einfluss der Belastungsrichtung einfacher vergleichen zu können (Tabellen 15 bis 17). Die Tabellen enthalten ebenfalls den Durchmesser der Filamente in Belastungsrichtung, die während der Mikroskopie der Versuchsporben ausgemessen wurden.

Tabelle 15: DMA Dehnspeichermoduln Probengruppe 1

Probe & Winkel	Dehnspeichermodul [GPa]	rel. Dehnspeichermodul	Durchmesser [mm]
1 – 30°	58,4	0,68	1,023
1 – 120°	85,48	1	1,154
1 – 210°	65,83	0,77	1,023
1 – 270°	70,66	0,83	1,158
2 – 0°	76,48	0,82	0,978
2 – 60°	93,35	1	1,157
2 – 120°	81,46	0,87	1,272
2 – 180°	68,75	0,74	0,978
2 – 240°	84,34	0,9	1,157
2 – 330°	72,69	0,78	1,074
3 – 0°	67,73	0,67	0,977
3 – 120°	101,73	1	1,121
3 – 195°	68,88	0,68	0,98
3 – 255°	97,94	0,96	1,1

Tabelle 16: DMA Dehnspeichermoduln Probengruppe 2

Probe & Winkel	Dehnspeichermodul [GPa]	rel. Dehnspeichermodul	Durchmesser [mm]
1 – 0°	65,09	0,74	1,151
1 – 60°	88,41	1	1,04
1 – 120°	76,02	0,86	1,136
1 – 180°	66,05	0,75	1,151
1 – 240°	86,59	0,98	1,04
1 – 315°	67,85	0,77	0,985
2 – 135°	65,81	0,64	1,2
2 – 165°	59,02	0,58	1,1
2 – 240°	102,62	1	1,184
2 – 330°	61,05	0,59	1,1
3 – 0°	41,76	0,4	0,931
3 – 60°	103,52	1	1,232
3 – 120°	44,74	0,43	1,305
3 – 300°	41,31	0,4	1,305

Tabelle 17: DMA Dehnspeichermoduln Probengruppe 3

Probe & Winkel	Dehnspeichermodul [GPa]	rel. Dehnspeichermodul	Durchmesser [mm]
1 – 0°	68,1	0,8	1,146
1 – 60°	82,98	1	1,273
1 – 120°	63,18	0,76	1,262
1 – 180°	62,70	0,75	1,146
1 – 250°	74,74	0,9	1,3
1 – 310°	66,75	0,8	1,24
2 – 0°	66,87	0,85	1,209
2 – 60°	76,9	0,98	1,258
2 – 120°	68,8	0,88	1,22
2 – 180°	69,71	0,89	1,209
2 – 240°	78,41	1	1,258
2 – 300°	70,15	0,89	1,22
3 – 60°	68,73	0,98	1,318
3 – 180°	56,58	0,81	1,162
3 – 300°	66,98	0,96	1,302
3 – 315°	69,99	1	1,25
3 – 345°	62,36	0,89	1,2

Die Messwerte zeigen, dass sich das Dehnspeichermodul in Abhängigkeit des Belastungswinkel verändert. Dabei weisen gegenüberliegende Winkel in der Regel einen vergleichbaren, aber nicht gleichen Modul auf. Abbildung 31 zeigt einen typischen Verlauf des relativen Dehnspeichermoduls in Abhängigkeit des Belastungswinkel.

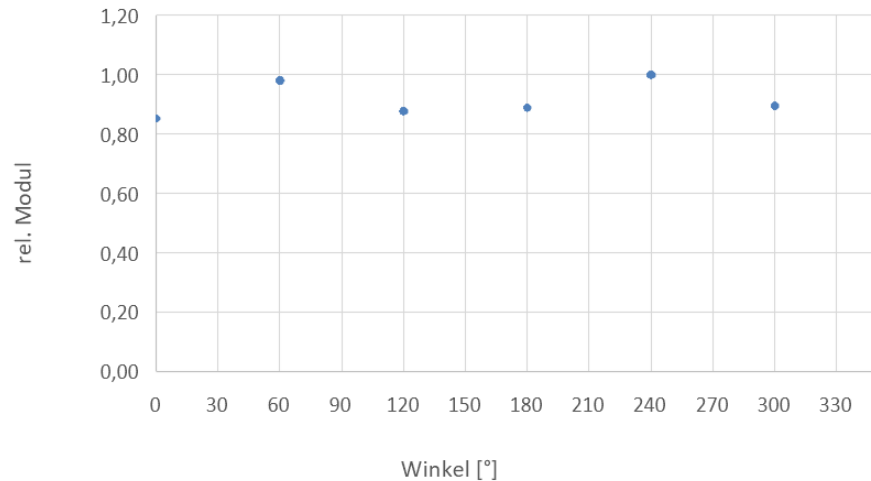


Abb. 31: Verlauf des rel. Dehnspeichermodul über den Belastungswinkel der Probe 3 – 2

4.3 Zugversuch

Abbildung 32 zeigt die Kraft-Weg-Verläufe der drei Zugproben. Die Diagramme werden von der Messsoftware erstellt. Um die Kurven voneinander unterscheiden zu können, wird der Beginn jedes Kraftverlaufs um 60mm versetzt. Der Verlauf der ersten ref-Probe zeigt einen unregelmäßigen Verlauf. Dieser resultiert daher, dass die Probe aufgrund des Defekts an einem Ende der Einspannung nicht über die gesamte Länge der Einspannrolle eingespannt werden konnte und dadurch angefangen hat abzurutschen. Alle drei Versuchsproben zeigen ein sprödes Materialverhalten.

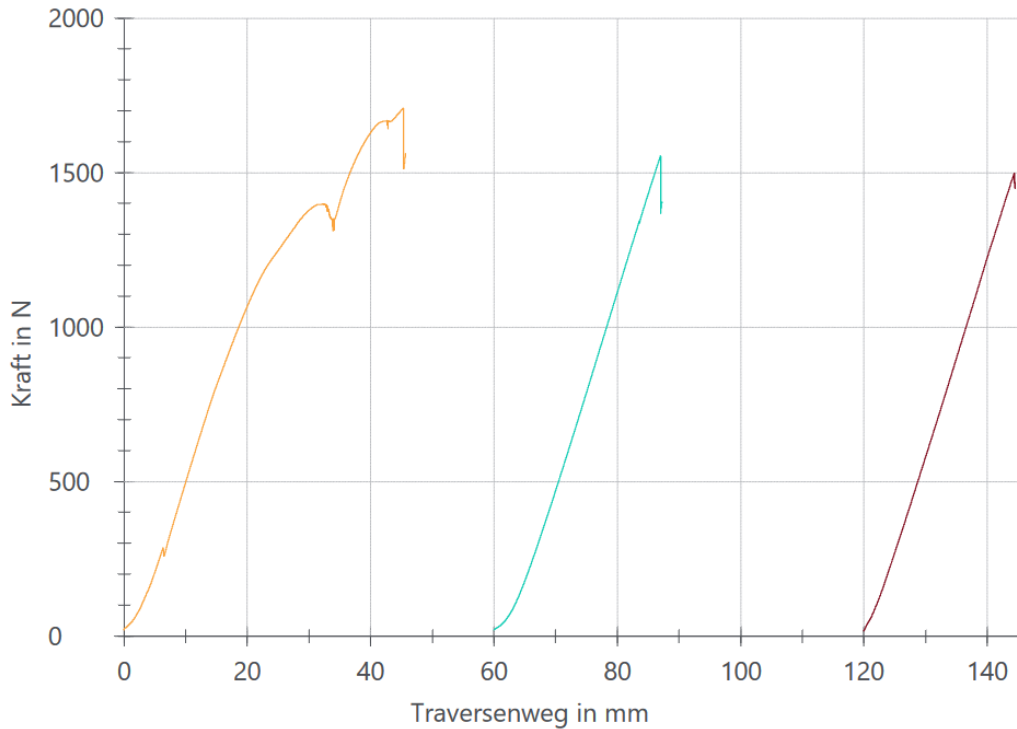


Abb. 32: Kraft-Weg-Verlauf der Zugproben. Gelb - rcf 1; Blau - rcf 2; Rot - Tapeumformung

Tabelle 18 zeigt die Messwerte des Zugversuchs bei Versagen der Proben. Zur Berechnung der Zugfestigkeit, werden von den Schliffbildern der Filamente zunächst mehrere Durchmesser am Mikroskop gemessen, aus denen im Anschluss der durchschnittliche Durchmesser bestimmt wird. Mit diesem Durchmesser wird dann die Querschnittsfläche der Filamente und somit die Zugfestigkeit bestimmt.

Tabelle 18: Messwerte Zugversuch

Probe	Durchmesser [mm]	max. Kraft [N]	Zugfestigkeit [MPa]
rcf 1	1,127	1.708,46	1.712,64
rcf 2	1,161	1.554,29	1.468,17
Tapeumformung	1,008	1.498,61	1.877,92

Es zeigt sich, dass das Filament der Tapeumformung die größte Zugfestigkeit aufweist. Zudem ist die Zugfestigkeit der ersten rcf-Probe etwa 16% größer als die der zweiten Probe.

4.4 Scherversuch

Die Abbildungen 33 und 34 zeigen die Kraft-Weg-Verläufe der ersten und zweiten Proben-
gruppen. Die Diagramme werden von der Messsoftware erstellt. Um die Kurven voneinander

unterscheiden zu können, wird der Beginn jedes Kraftverlaufs um 0,2mm versetzt.

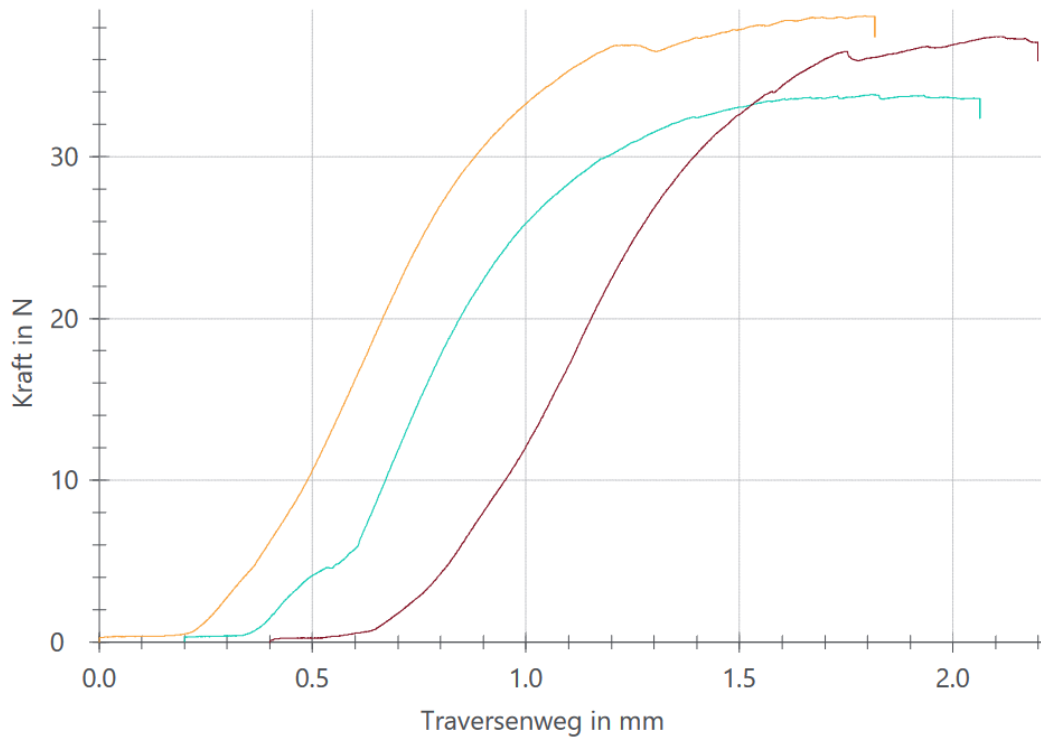


Abb. 33: Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 1. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3

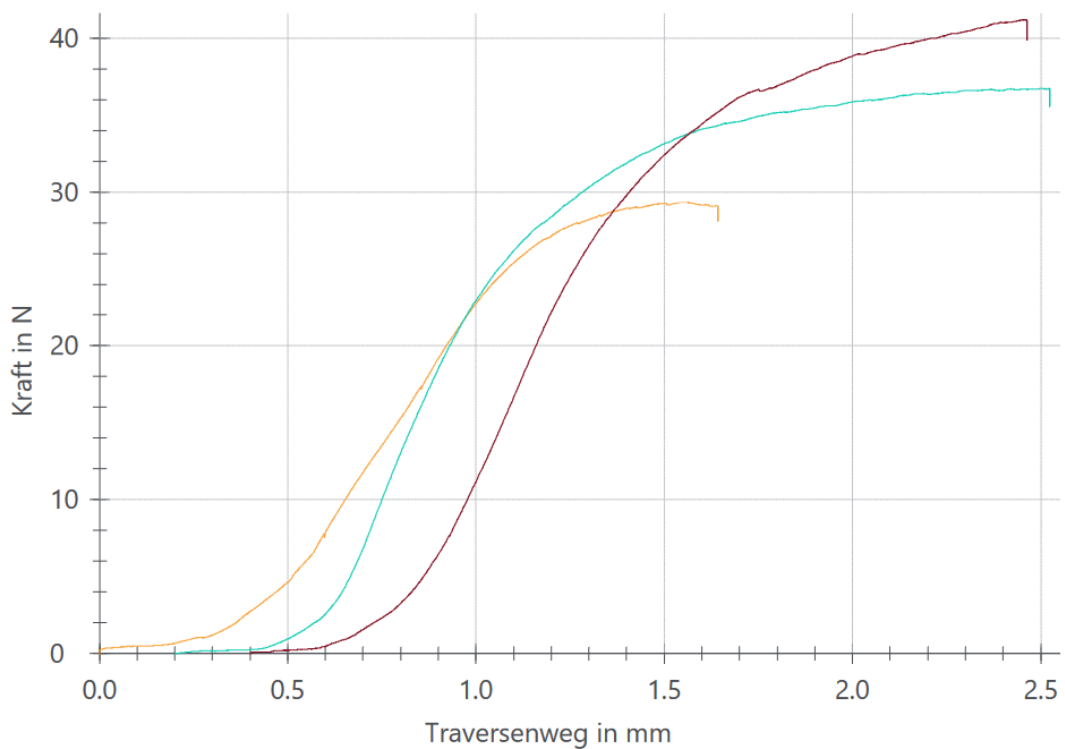


Abb. 34: Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 2. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3

Die Kraftverläufe der ersten Probengruppe zeigen einen vergleichbaren Verlauf des elastischen Bereichs. Die Proben 1 & 2 beginnen sich bei vergleichbarer Kraft zu verformen, während sich die zweite Probe bei einer geringeren Kraft verformt. Die zweite Probengruppe zeigt größere Unterschiede im Kraftverlauf. Die erste Probe verformt sich bei der geringsten Kraft, die dritte bei der größten. Zudem ist der Unterschied elastische Bereich der drei Proben größer.

Die Dehnung der Proben ist zu gering, um aus dem elastischen Bereich ein Schubmodul bestimmen zu können, da der Wert durch die Dehnung der Einspannwerkzeuge der Zugmaschine zu stark beeinflusst wird. Aus diesem Grund wird für die Proben ein Punkt im Kraftverlauf bestimmt, der zum Vergleich dienen soll. Dazu wird ein Punkt hinter der größten Steigung bestimmt, ab dem der elastische Bereich endet. Der Punkt wird mit $s_{Vergleich} = 0,94 \cdot s_{Steigung_{max}}$ festgelegt.

Tabelle 19 zeigt die Kraft, den Traversenweg und die berechnete Schubspannung für $s_{Vergleich}$. Die Schubspannung wird mit dem durchschnittlichen Durchmesser der Filamente bestimmt, die aus den Schlibfbildern gemessen werden.

Tabelle 19: Messwerte Scherversuch

Probe	Kraft [N]	Traversenweg [mm]	Schubspannung [MPa]	Durchmesser [mm]
1 – 1	22,72	0,712	25,22	1,071
1 – 2	20,21	0,649	20,92	1,109
1 – 3	22,17	0,794	24,43	1,075
2 – 1	17,85	0,868	18,38	1,112
2 – 2	19,53	0,721	18,26	1,167
2 – 3	23,25	0,823	20,76	1,194

4.5 Voidanalyse

Für jeden Versuch wurde von den Proben ein Schlibfbild mit dem Mikroskop angefertigt. Diese wurden in der bereits benannten Bildanalyse-Software auf Voids untersucht und markiert. Dabei wird das Voidvolumengehalt (VVG), sowie der Anteil der jeweiligen Voidart an der Gesamtvoidmenge ermittelt und auf dem Schlibfbild markiert.

Eine Betrachtung der analysierten Schlibfbilder zeigt, dass bei einigen Bildern nicht alle Voids von der Software erkannt und markiert worden sind, wodurch das Ergebnis verfälscht wird (Bsp: Abbildung 35). Eine Änderung der Bildparameter (bspw. Helligkeit) führte nicht dazu, dass die

Voids erkannt werden. Aufgrund von mangelnden Kenntnissen und aus zeitlichen Gründen, konnte die Software nicht mehr angepasst werden.

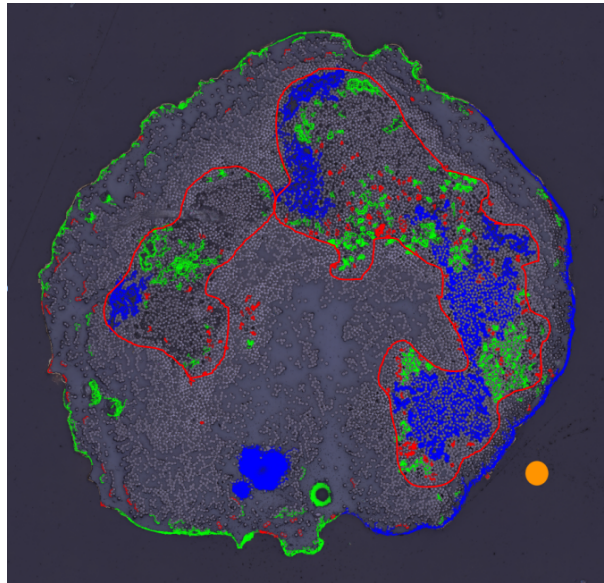


Abb. 35: Analysebild Probe 3PB JL1-2: die rote Umrandung zeigt den Bereich, wo Voids (dunkle Stellen) nicht erkannt worden sind

Des Weiteren zeigen alle Analysebilder einen Ring aus Voids, am Rand der Filamente, die das Ergebnis zusätzlich verfälschen. Diese können zwar durch eine Anpassung der Analyseparameter verringert werden, allerdings werden dadurch auch Voids innerhalb des Filaments beeinflusst und teilweise nicht markiert.

Aufgrund dieser Unsicherheiten in der Bildanalyse, wird in der Auswertung kein Bezug zu den daraus ermittelten Werten genommen. Stattdessen werden die markierten Bilder ausschließlich zur Auswertung bezüglich Größe und Verteilung der Voids im Material verwendet.

Bei der Untersuchung der Schlifffbilder auf Voids ist zu erkennen, dass grundsätzlich drei verschiedene Voidverteilungen in den Druckfilamenten auftreten (Abbildung 36).

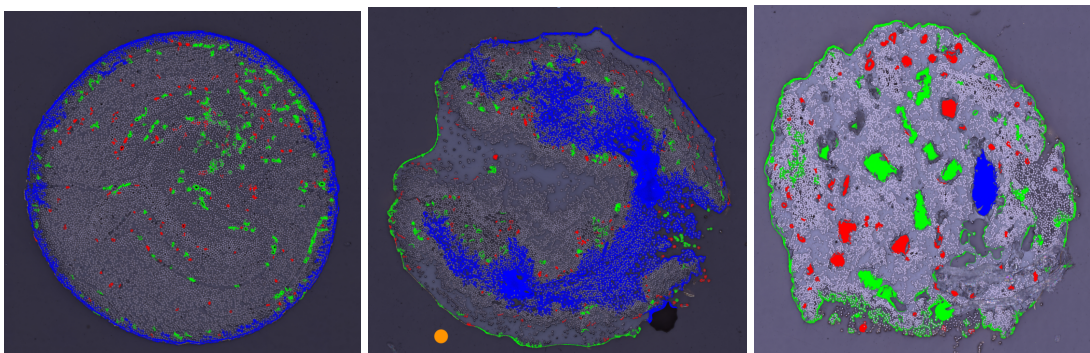


Abb. 36: Vergleich Querschnitt Tapeumformung, Standardverfahren & Recycelt

Da die Filamente der Tapeumformung aus pre-imprägnierten Tapes geformt werden, sind die Fasern bereits gut mit der Matrix benetzt, sodass sich während der Fertigung der Filamente nur wenige Voids im Material formen. Die Voids sind in der Regel kleiner und gleichmäßiger im Material verteilt. Bei der Fertigung mit dem Standardverfahren bildet sich immer ein sichelförmiger Bereich, der entweder durch wenige große Voids dominiert wird, oder sich in viele kleine und mittelgroße Voids aufteilt. Bei den recycelten Filamenten ist die Verteilung der Voids gleichmäßig im Querschnitt. Es bilden sich vor allem mittelgroße Voids und nur selten große, wie beim Standardverfahren.

5 Auswertung

Das gezielte Drapieren der Druckfilamente in den Einbettungshalterungen erfordert ein hohes Maß an Präzision. Diese Präzision kann aus verschiedenen Gründen nicht eingehalten werden, weshalb während des Einbettens die Filamente aus ihrer ursprünglichen Position rotiert und die Belastungsrichtungen nicht eindeutig zu identifizieren sind. Zwar können die Belastungsrichtung bspw. bei der statischen Biegeprüfung durch das Messen der zuvor bestimmten Durchmesser, oder bei der DMA durch eine Markierung der 0°-Lage abgeschätzt werden, allerdings ist diese Ungenauigkeit zu berücksichtigen. Des Weiteren besteht für die gesamte Probengruppe 2 bei der statischen Biegeprüfung (3PB) keine Kenntnis darüber, aus welcher Richtung die Proben belastet werden, da diese während des Versuchs zerbrochen und zu Boden gefallen sind. Allerdings zeigen die Analysebilder, dass sich die Voids bei diese Probengruppe gleichmäßig im Material verteilen, weshalb die Belastungsrichtung vernachlässigt werden kann.

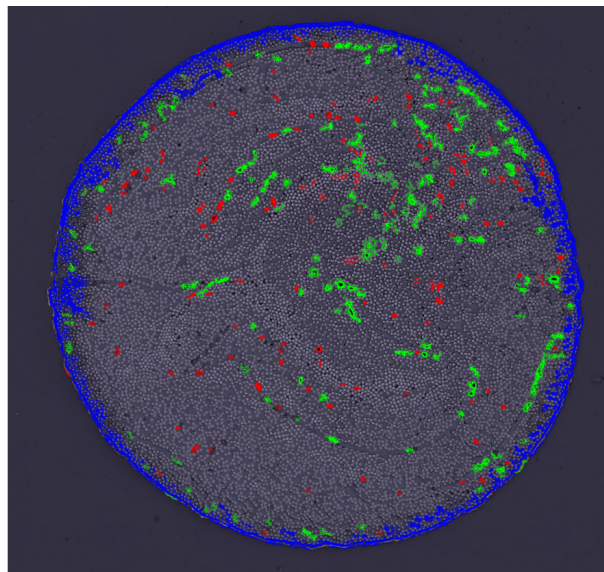


Abb. 37: Analysebild 3PB Probe 2-2 - 3PB

Des Weiteren arbeitet das Bildanalyse-Tool ungenau, wodurch die Erkennung und Einordnung der Voids verfälscht wird. Aus diesen Grund können Zusammenhänge zwischen Voids und mechanischem Verhalten nicht quantifiziert werden.

5.1 Einfluss von Voidgehalt und-art

Zu Beginn dieser Arbeit wird eine Einteilung der Voidarten in symmetrische und asymmetrische Voids vorgenommen. Es wird argumentiert, dass symmetrische Voids aufgrund ihrer Form

einen geringen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben, als asymmetrische Voids. Aus diesem Grund sollte der Einfluss der jeweiligen Voidart untersucht werden. Allerdings hat sich während der Auswertung herausgestellt, dass das Bildanalyse-Tool für diese spezifische Einteilung der Voids nicht geeignet ist. Es werden des Öfteren Voids als asymmetrisch eingestuft, obwohl diese subjektiv betrachtet als symmetrisch eingestuft werden müssten. Andererseits werden ebenfalls viele asymmetrische Voids als symmetrische Voids eingeteilt. Dieses Problem ist insbesondere bei den Analysebildern der rcf-Proben zu erkennen (Abbildung 54). Weiterhin ist die Voidverteilung in den meisten Druckfilament geprägt durch einen einzigen, dominanten und asymmetrischen Void, der den Großteil des Voidvolumens einnimmt. Dadurch bedingt fällt der Einfluss kleinerer Voids weniger ins Gewicht, wodurch eine Unterscheidung derer Einflüsse nicht möglich ist.

Aus diesen Gründen kann der Einfluss der jeweiligen Voidart nicht eindeutig bestimmt werden.

5.2 3-Punkt-Biegeprüfung

Die Abbildungen 38 und 39 zeigen die mechanischen Biegeeigenschaften relativ zum gemessenen Höchstwert und in Abhängigkeit des Voidgehalts.

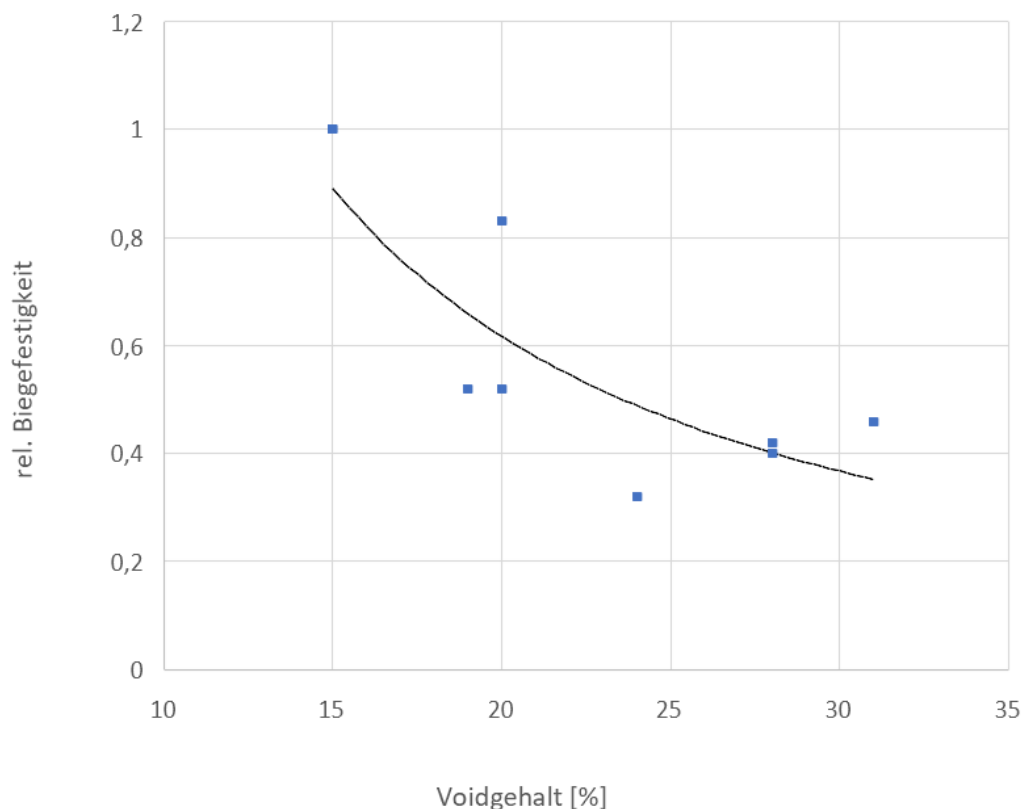


Abb. 38: Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom Voidgehalt - 3PB

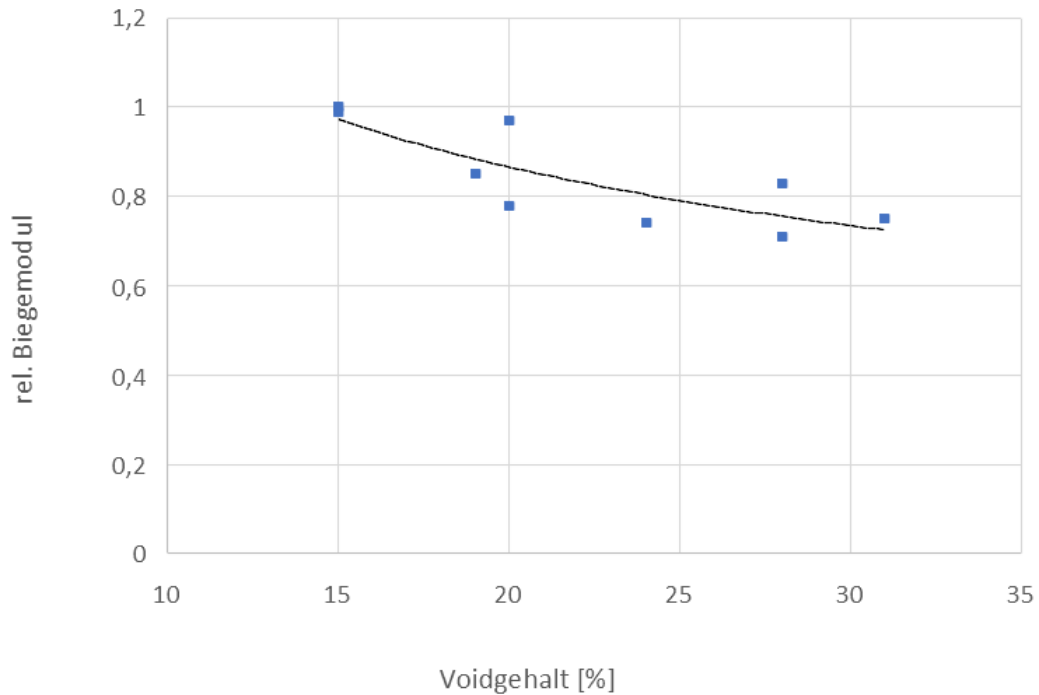


Abb. 39: Abhängigkeit des Biegemoduls vom Voidgehalt - 3PB

Aus beiden Diagrammen ist ein Trend zu erkennen, dass die jeweilige Biegeeigenschaft mit zunehmenden Voidgehalt abnimmt. Allerdings ist die Streuung der Werte, insbesondere bei der Biegefestigkeit, sehr groß. Wird die Trendlinie als Mittelwert festgelegt, ergibt sich für die relative Biegefestigkeit eine Standardabweichung von 0,044 und für das relative Biegemodul von 0,021. Diese Streuung kann einerseits durch die fehlerbehaftete Messung des Voidgehalts zustande kommen, andererseits unterscheiden sich die Querschnitte der Druckfilamente in ihrer Geometrie. Da Biegefestigkeit und -modul mit dem Durchmesser der Probe berechnet werden, werden die Messwerte in einem Diagramm über den gemessenen Durchmesser in Belastungsrichtung aufgetragen (Abbildungen 40 und 41).

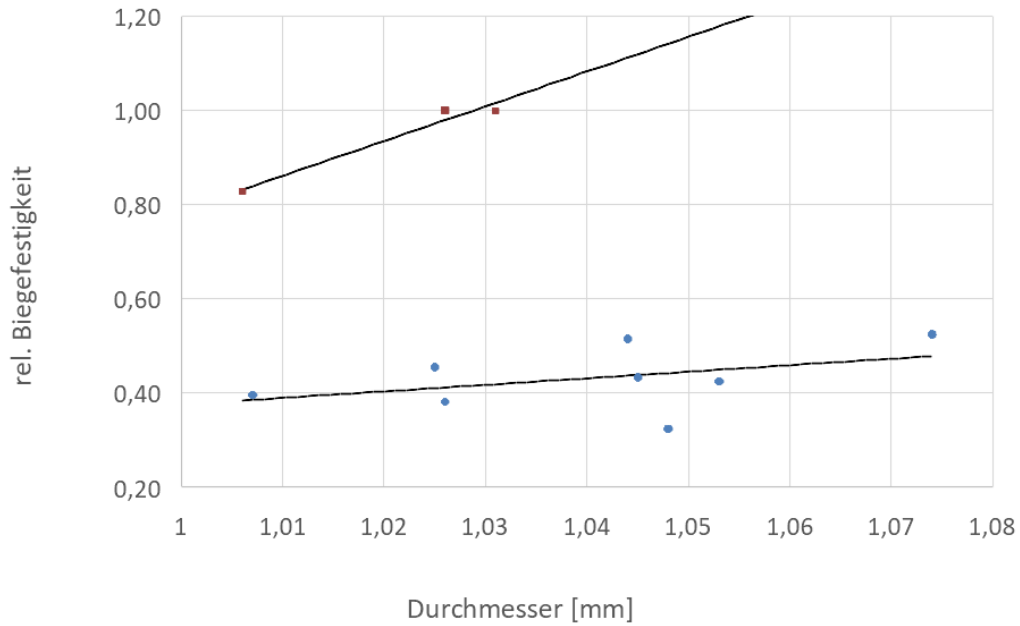


Abb. 40: Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom Durchmesser - 3PB

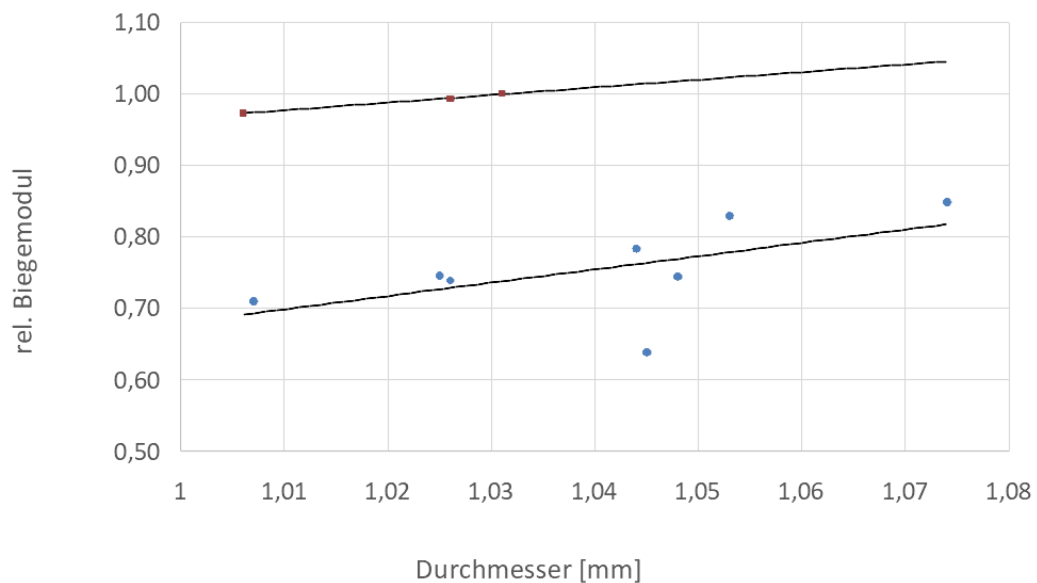


Abb. 41: Abhängigkeit des Biegemoduls vom Durchmesser - 3PB

Bei den roten Messpunkten handelt es sich um die Werte der Probengruppe 2 (Tapeumformung). Da sich diese Werte stark von den anderen Probengruppe unterscheiden, werden diese separat betrachtet. Aus beiden Diagrammen ist eine Abhängigkeit der Biegeeigenschaften vom Durchmesser zu beobachten. Die Streuung der Werte ist dabei geringer, als bei der Abhängigkeit des Voidgehalts. Die Standardabweichung liegt bei 0,019 für die relative Biegefestigkeit und bei 0,017 für das Biegemodul. Für die Probengruppe 2 ergeben sich Abweichungen von 0,003 für die Biegefestigkeit und 0,0002 für das Biegemodul.

Aufgrund dessen lässt sich aussagen, dass der Einfluss des Durchmessers auf die Biegeeigenschaften größer ist, als der Einfluss des Voidgehalts. Allerdings ist ein Einfluss des Voidgehalts nicht zu vernachlässigen, da sich dadurch der Unterschied zwischen der Probengruppe 2 zu den anderen Gruppen erklären lässt (Vergleich Abbildung 36). Allerdings lässt sich aus den Messwerten kein Wert für das Voidgehalt ableiten, ab dem dieser signifikant wird.

Im weiteren Verlauf wird untersucht, ob die Positionierung und Form der Voids einen Einfluss auf die Biegeeigenschaften haben. Dazu werden Proben mit einem ähnlichen Durchmesser verglichen, damit deren Einfluss für den Vergleich keine Signifikanz hat. Abbildung 42 zeigt die Analysebilder der Proben 1-1 und 1-2. In beiden Bildern ist eine Voidverteilung in Sichelform zu erkennen, allerdings wird diese Sichel unterschiedlich beansprucht.

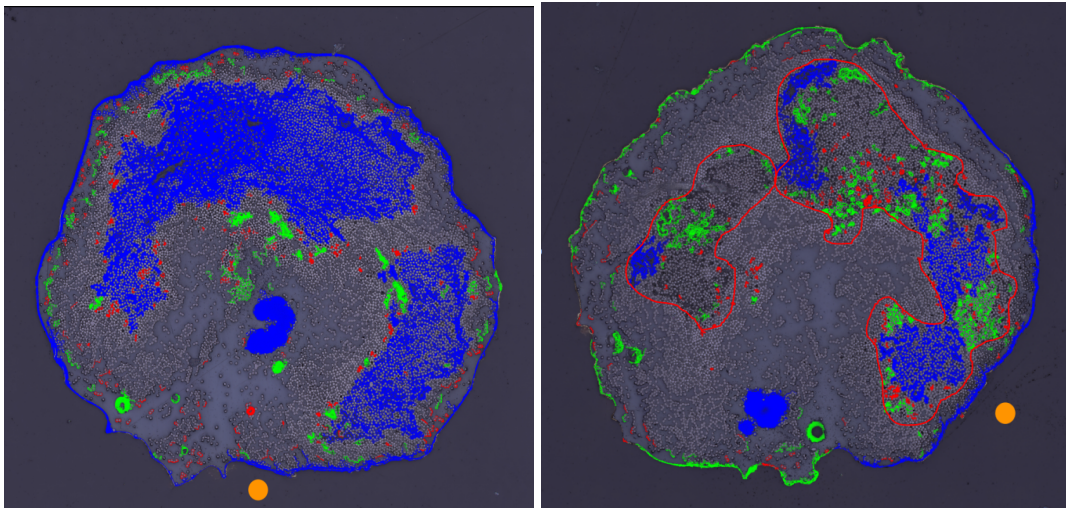


Abb. 42: Links: Analysebild Probe 1-1; rechts: Analysebild Probe 1-2 - 3PB

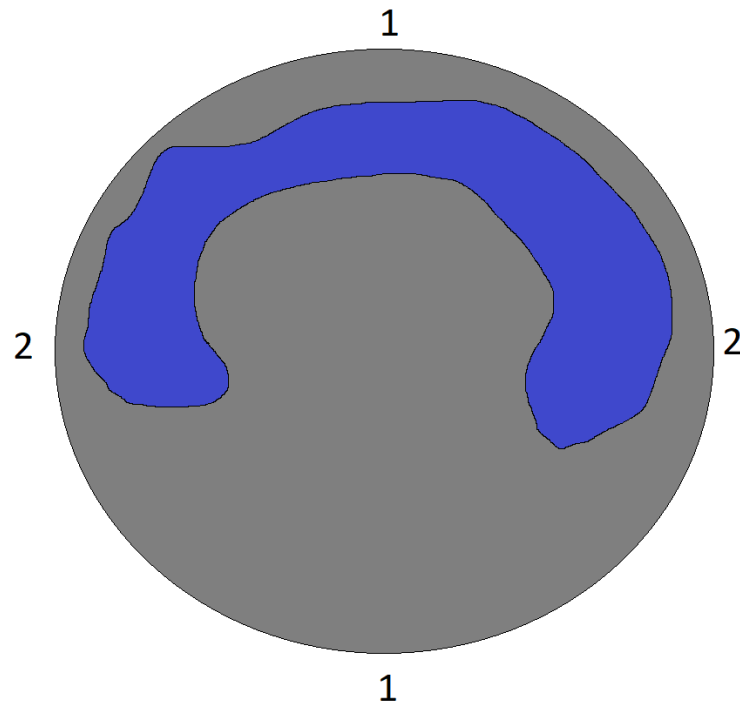


Abb. 43: Schematischer Sichelvoid mit Beanspruchungsrichtungen 1 & 2

Die Probe 1-1 wird in 1-Richtung (Vergleich Abbildung 43) beansprucht, die Probe 1-2 in 2-Richtung. (Abbildung 44) zeigt, dass die Randfaser auf Seite der Beanspruchung auf Druck und die Randfaser auf der Gegenseite auf Zug beansprucht werden. Bei der Probe 1-2 ist die Druckseite frei von Matrix. Dadurch knicken die Fasern unter der Druckbelastung seitlich aus und nehmen weniger Kräfte auf [2]. Die Fasern auf der Zugseite werden durch die Voids weniger bis gar nicht beeinflusst. Im Gegensatz dazu ist bei der Probe 1-1 die Druckseite mit Matrix gefüllt. Dadurch werden die Druckkräfte besser aufgenommen, sodass die Zugfestigkeit der Probe 1-1 fast 20% größer ist als bei Probe 1-2.

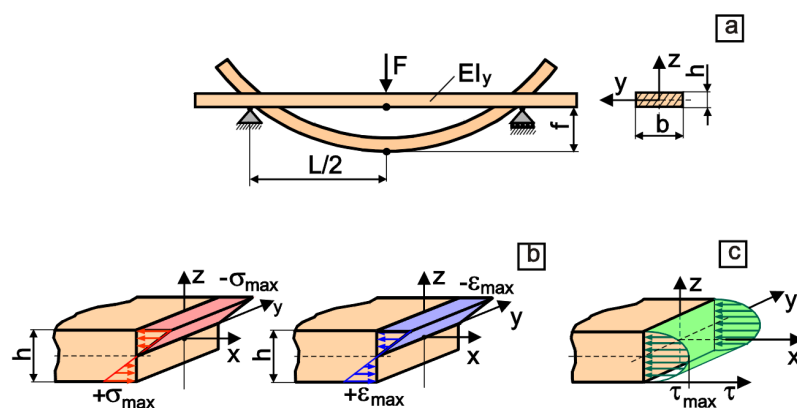


Abb. 44: 3P-Biegeprüfung: a) Normalspannungsverteilung; b) Dehnungsverteilung; c) Schubspannungsverteilung [39]

Die Proben 1-3 und 4-3 werden beide in 2-Richtung der Sichel belastet (Abbildung 45), allerdings weist die Probe 1-3 eine um knapp 19% größere Biegefestigkeit auf.

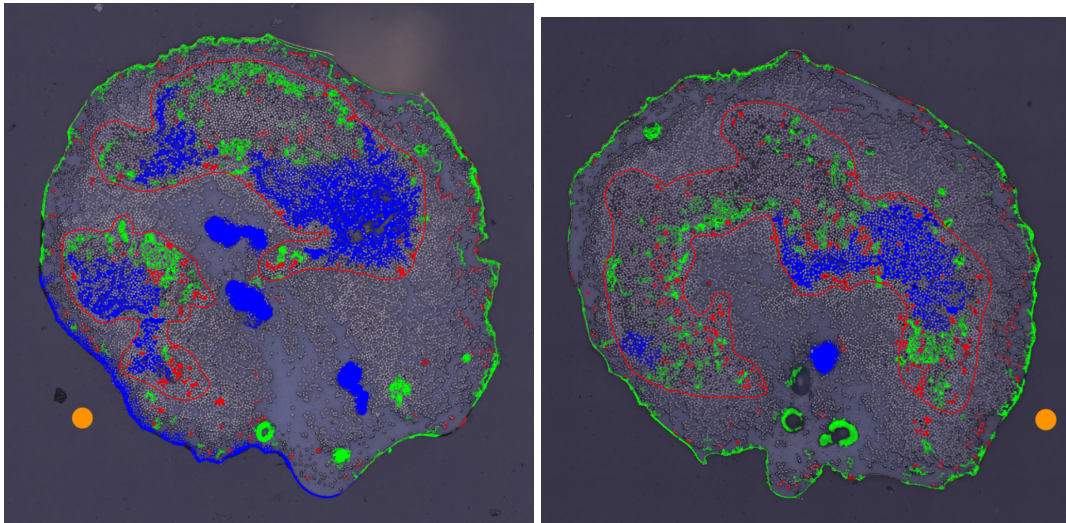


Abb. 45: Links: Analysebild Probe 1-3; rechts: Analysebild Probe 4-3 - 3PB

Eine Erklärung dafür ist, dass die Voidsichel bei der Probe 1-3 aus zwei großen Voidregionen besteht, die nicht miteinander verbunden sind, während bei der Probe 4-3 eine durchgängige Sichel vorliegt. Da im zentralen Bereich der Filamentquerschnitte die größte Schubspannung vorliegt (Abbildung 44), hält die Probe 1-3 größeren Kräften stand.

Die Schubspannungsverteilung im Querschnitt erklärt zudem, warum die Probe 3-1 nicht am Ort der Krafteinleitung versagt. Abbildung 46 zeigt, dass die Probe in 2-Richtung belastet wird.

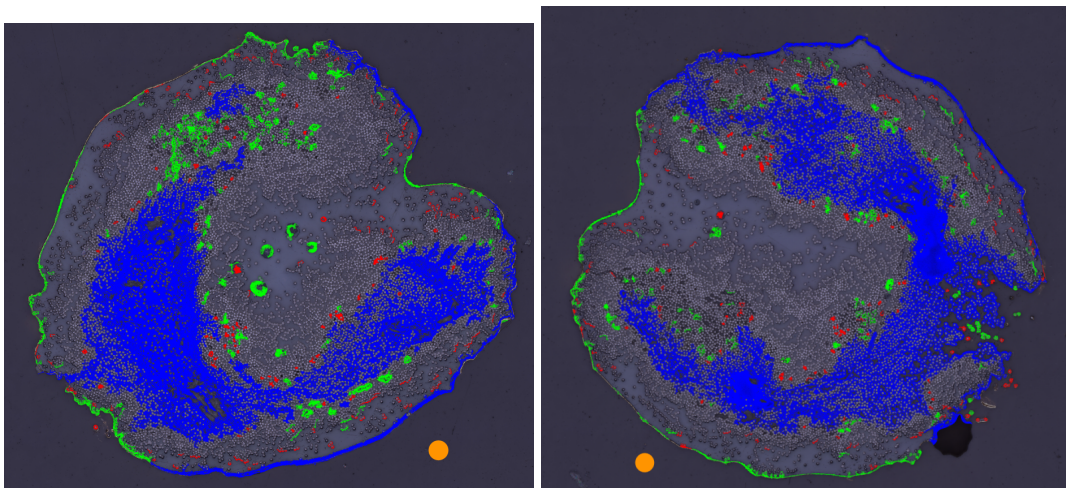


Abb. 46: Links: Analysebild Probe 3-1 (Krafteinleitung), rechts: Analysebild Probe 3-1 (Bruchstelle) - 3PB

Zusätzlich reicht der Void bis an die Oberfläche des Filaments. Die Konzentration der Schubspannung an dieser Position führt dazu, dass das Filament aufbricht und frühzeitig versagt.

5.3 Dynamische-Mechanische Analyse

Da die Auswertung der statischen Biegeprüfung zeigt, dass die Biegeeigenschaften im Wesentlichen von dem Durchmesser in Belastungsrichtung abhängig sind und die Bestimmung des Voidgehalts fehlerhaft ist, werden die Messwerte der DMA in Abhängigkeit der Durchmesser ausgewertet.

Die Probengruppen 1 und 3 der DMA bestätigen die lineare Abhängigkeit der Messwerte vom Durchmesser der Belastungsrichtung (Abbildungen 47 und 49) mit einer Standardabweichung von 0,037 bzw. 0,031. Damit ist die Streuung größer, als bei der statischen Biegeprüfung.

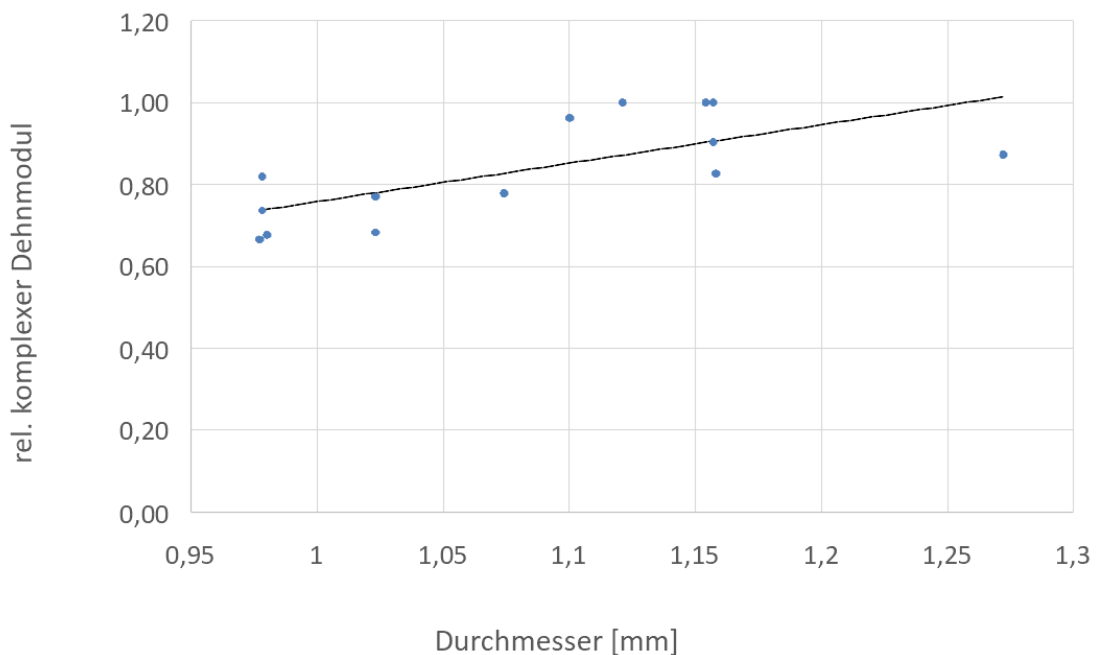


Abb. 47: Abhängigkeit komplexer Dehnmodul vom Durchmesser Probengruppe 1 - DMA

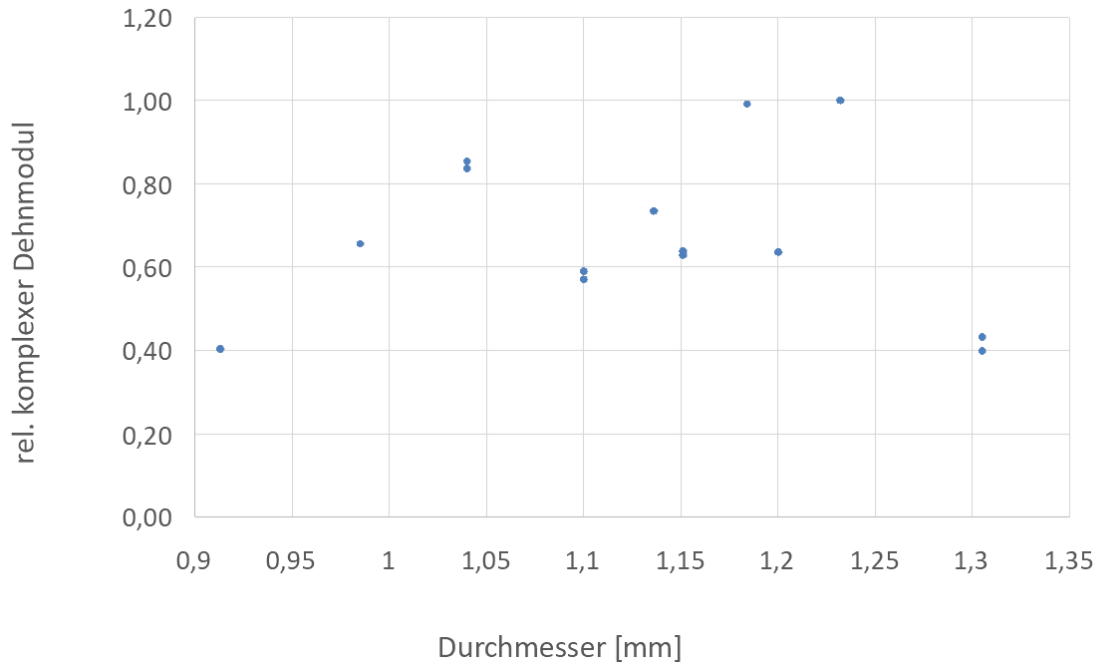


Abb. 48: Abhängigkeit komplexer Dehnmodul vom Durchmesser Probengruppe 2 - DMA

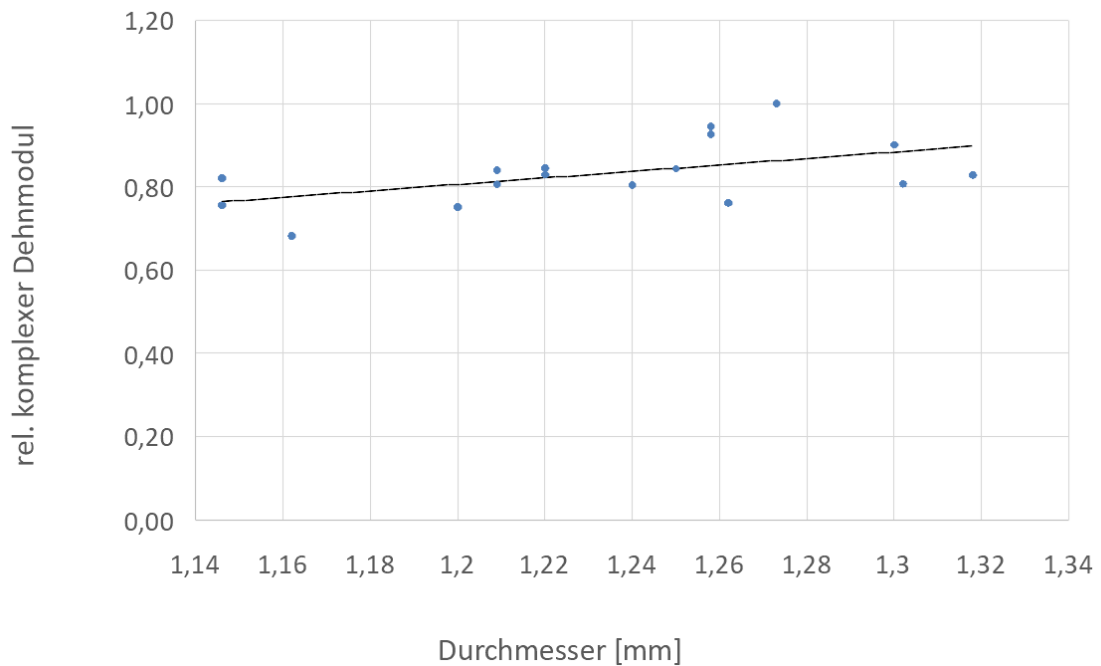


Abb. 49: Abhängigkeit komplexer Dehnmodul vom Durchmesser Probengruppe 3 - DMA

Die Probengruppe 2 zeigt keine Abhängigkeit der Biegeeigenschaften vom Durchmesser (Abbildung 48). Eine Erklärung dafür ist eine ungenaue Verarbeitung der Proben beim Einbetten, sowie einer ungenauen Messung der Durchmesser am Mikroskop.

Zur Auswertung der Analysebilder bezüglich des Belastungswinkels wird auf die Bilder ein Kompass gelegt, der von 0 bis 360° mit 30°-Schritten skaliert ist. Dabei bedeutet eine Belastung

bzw. Messung in 0° -Richtung, dass die Probe aus der Richtung der 0° -Markierung belastet bzw. gemessen wird. Abbildung 50 zeigt die Analysebilder der Proben 1-1 und 1-2.

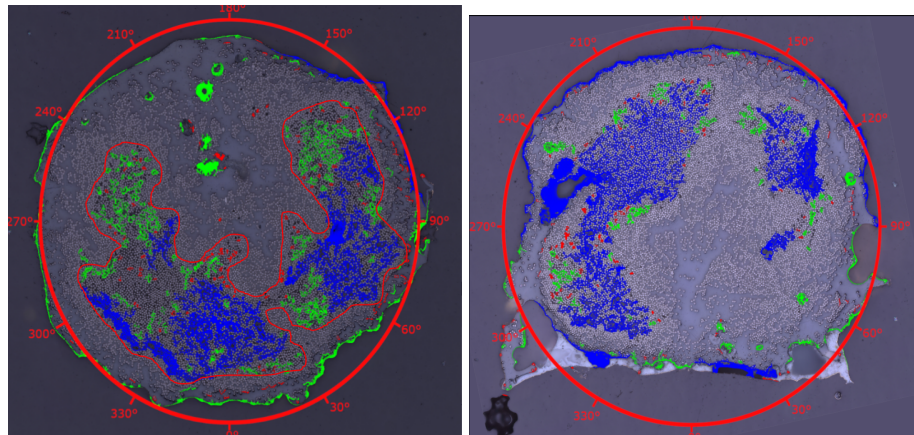


Abb. 50: Links: Analysebild Probe 1-1; rechts: Analysebild Probe 1-2 - DMA

Beide Proben zeigen, dass mit steigendem Durchmesser das Dehnmodul ansteigt. Allerdings liegt bei beiden Proben das größte Dehnmodul nicht bei dem größten Durchmesser. Für die Probe 1-1 liegt der größte Durchmesser in 270° -Richtung, das größte Dehnmodul in 120° -Richtung. Dieses Verhalten lässt sich mit der Beobachtung aus der statischen Biegemessung begründen. Einerseits ist das Voidgehalt auf der 270° -Seite größer bzw. über einen breiteren Abschnitt verteilt, andererseits ist das Voidgehalt am Ort der größten Schubspannung (90° -Versatz) für die 270° -Richtung größer.

Bei der Probe 1-2 liegt der größte Durchmesser in 120° -Richtung, das größte Dehnmodul in 60° -Richtung. Grund dafür ist, dass auf der 60° -Seite wenige und, im Verhältnis betrachtet, kleine Voids liegen. Außerdem kann dieses Verhalten mit der in 3-Punkt-Biegeprüfung beschriebenen Belastungsrichtung der Voidsichel beschrieben werden. Die 60° -Richtung entspricht der Richtung der Sichelöffnung (1-Richtung). Damit lässt sich ebenfalls erklären, dass die 240° -Richtung, also die Richtung gegensätzlich zu den 60° , das zweitgrößte Dehnmodul aufweist. Die Probengruppe 2 zeigt anders als die anderen Gruppen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Durchmesser und Dehnmodul. Die Analysebilder der Proben 2-2 und 2-3 zeigen, dass dies an einer anderen dominierenden Voidform liegen kann (Abbildung 51).

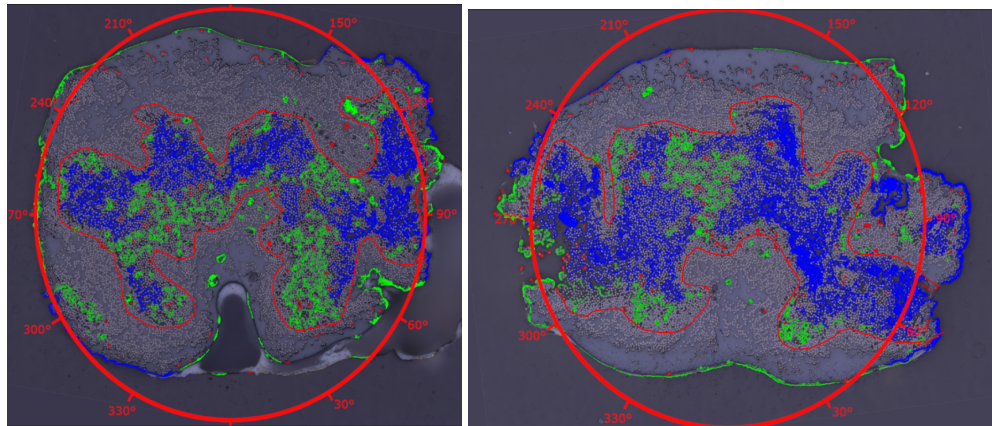


Abb. 51: Links: Analysebild Probe 2-2; rechts: Analysebild Probe 2-3 - DMA

Anders als bei den anderen Proben, liegt der dominierende Void nicht als Sichel vor. Stattdessen zieht sich der Void von einer Seite des Filaments zur gegenüberliegenden als eine Ebene. Dabei entspricht die Richtung, in der der Void liegt, der Richtung des größten Durchmessers. Zudem bricht der Void bei der Probe 2-3 durch die Oberfläche des Filaments.

Bei der Probe 2-2 wird ein Dehnodul von 88 GPa in 240°-Richtung gemessen und ist damit zwischen 54 und 72% größer, als bei den anderen Belastungswinkeln, obwohl die zugehörigen Durchmesser nicht groß variieren. Für die Probe 2-3 verhält es sich ähnlich. Das größte Modul wird für einen Belastungswinkel von 60° gemessen, während die anderen Moduln bis zu 60% geringer sind und der größte Durchmesser für den Belastungswinkel von 120° gemessen wird. Eine Erklärung für dieses Ergebnis ist, dass Proben während dem Prozess der Einbettung ungenau markiert worden sind und die Ausrichtung des Kompass dadurch falsch ist. Wird der Kompass bei beiden Proben um jeweils 30° in die positive Richtung gedreht (von 240° auf 270° und von 60° auf 90°), passen Durchmesser und Messwerte zu den bisherigen Beobachtungen.

Die Probengruppe 3 zeigt eine Abhängigkeit des Dehmoduls vom Durchmesser, wobei das Material mehr von mittelgroßen Voids dominiert wird, als von großen, die zudem gleichmäßiger verteilt sind. Abbildung 52 zeigt das Analysebild der Probe 3-2.

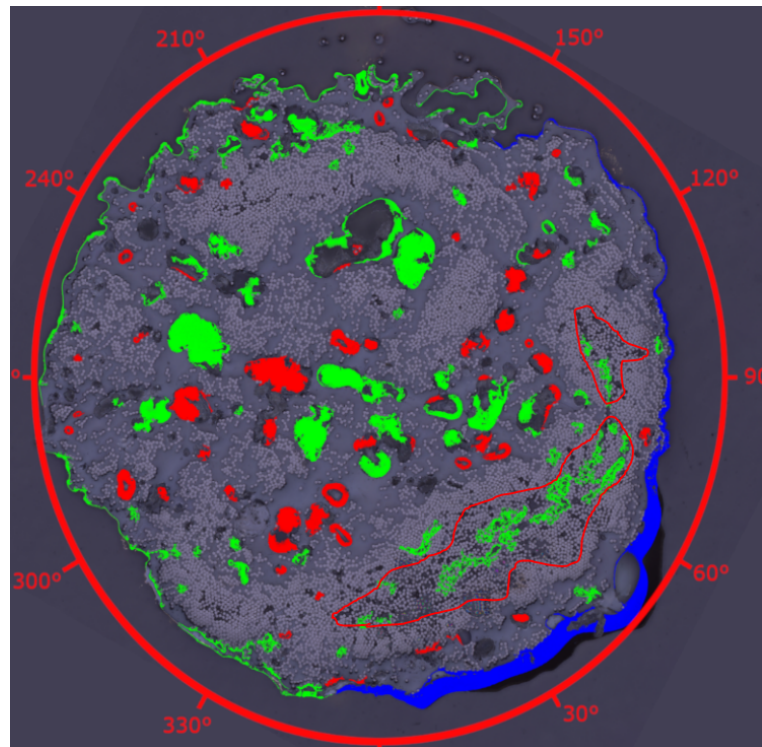


Abb. 52: Analysebild Probe 3-2 - DMA

Das größte Dehnmodul wird in 240°- bzw. 60°-Richtung über den größten Durchmesser gemessen, wobei aufgrund der Positionierung des großen Voids (rote, nachgezogene Umrandung) das Modul in 60°-Richtung geringer ist. Des Weiteren lassen sich keine neuen Erkenntnisse aus der DMA gewinnen.

5.4 Zugversuch

Aus den Datenblättern für Fasern und Matrix sind minimale Zugfestigkeiten von 4.830 MPa für die Fasern und 30 MPa für die Matrix zu entnehmen. Für ein Faservolumengehalt von 50% ergibt sich somit eine Zugfestigkeit der endlosfaserverstärkten Druckfilamente von 2.430 MPa. Die Zugprobe 3 (Tapeumformung) zeigt die höchste Zugfestigkeit aller Zugproben und erreicht gut 77% des Literaturwertes. Die erste Zugprobe 1 (rcf 1) kommt auf einen Wert von 70% und Zugprobe 2 (rcf 2) auf 60% des Literaturwertes. Der Vergleich der Analysebilder (Abbildungen 53 bis 55) zeigt, dass Zugprobe 3 zum einen den niedrigsten Voidgehalt und zum anderen vor allem kleine Voids aufweist. Die Voidgehalte der Proben 1 und 2 sind miteinander vergleichbar, allerdings unterscheiden sich die Voids in der Verteilung.

Die Fasern in der Probe 1 sind ungleichmäßiger verteilt als bei der Probe 2 und treten vermehrt in Bündeln auf. Dadurch bilden sich die Voids vor allem in matrixreichen Regionen. Die dort geformten Voids weisen Kanten auf, die runder sind als bei Voids, die innerhalb der Faserbündel

vorliegen. Dies zeigt sich bei der Probe 2, wo aufgrund der gleichmäßigeren Faserverteilung, weniger Voids in Matrixregionen vorliegen. Die Voids in dieser Probe haben Kanten mit eher kleinen Radien.

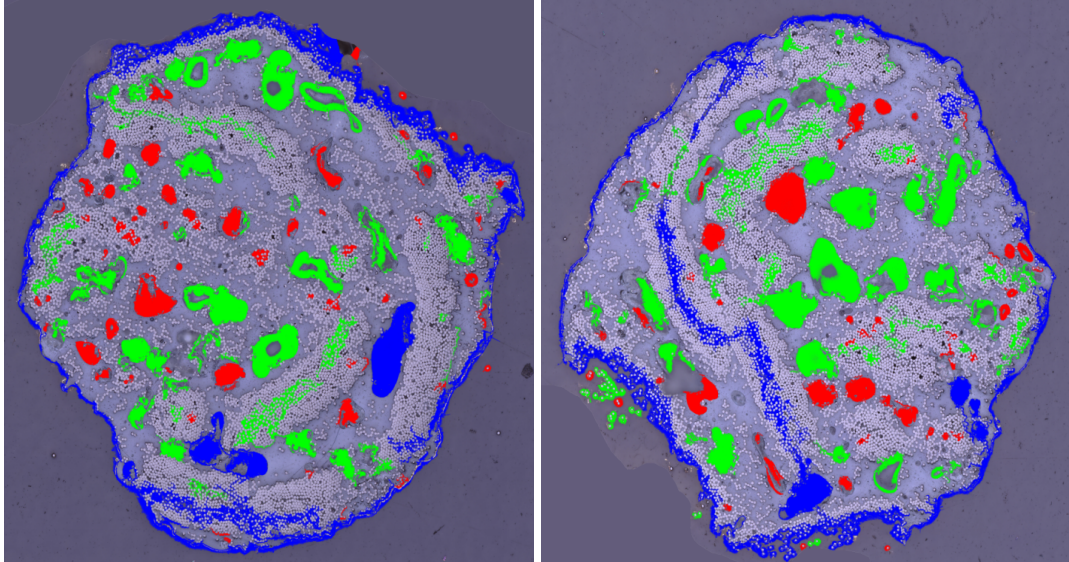


Abb. 53: Analysebilder Zugprobe 1 - Zug

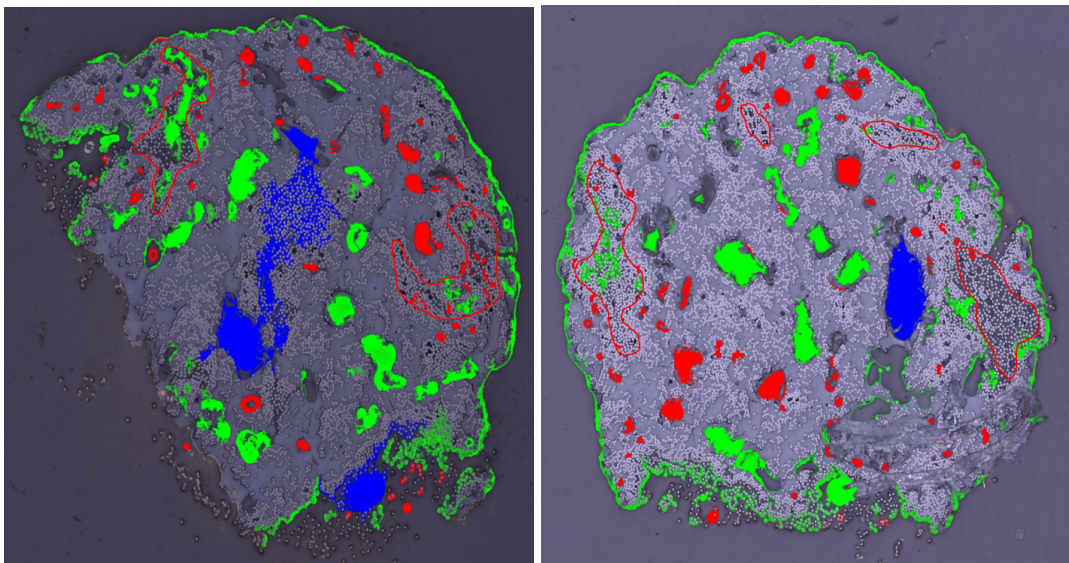


Abb. 54: Analysebilder Zugprobe 2 - Zug

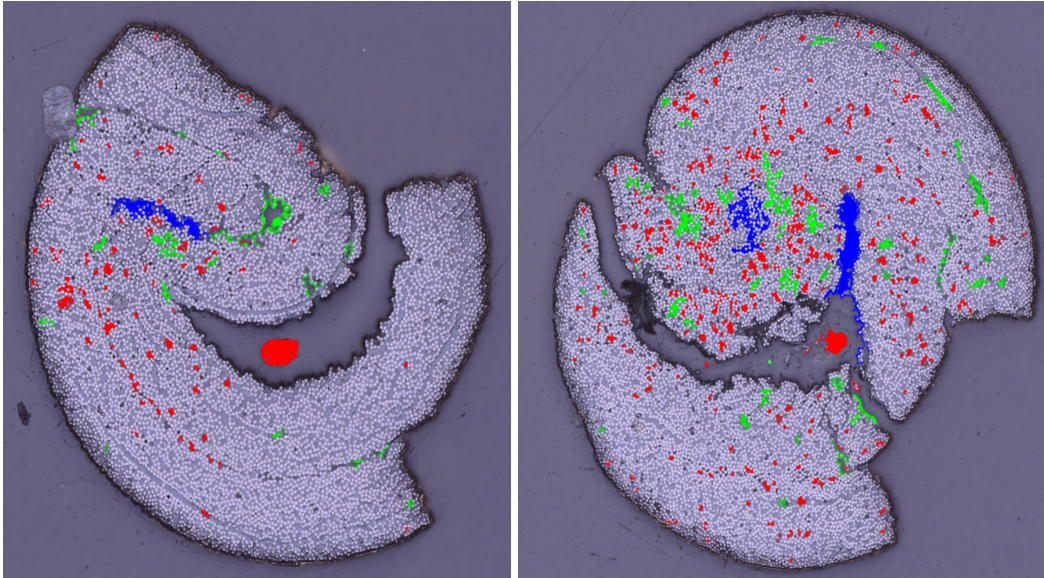


Abb. 55: Analysebilder Zugprobe 3 - Zug

Im Kapitel Einteilung der Voidarten wird beschrieben, dass sich bei Voids mit kleineren Kantennradien eher Risse bilden, als bei Voids mit großen Radien. Dadurch bedingt bilden sich bei der Probe 2 früher Risse, als bei Probe 1, wodurch Probe 2 schneller versagt. Dementsprechend, macht die Untercheidung in symmetrische und asymmetrische Voids keinen signifikanten Unterschied. Vielmehr ist eine Einteilung nach dem Radius der Kanten sinnvoller.

Bei der Zugprobe 3 fällt zudem auf, dass die meisten Voids im Filament entlang der Tape-grenzen bilden. Dies führt dazu, dass die Probe entlang der Tape-grenzen versagt, was auf den Schlibfbildern zu erkennen ist.

5.5 Scherversuch

Die Proben 1-1 und 1-3 zeigen die größte Schubspannung aller Proben. Abbildung 56 zeigt die Analysebilder beider Proben, die Belastungsrichtung ist die Vertikale.

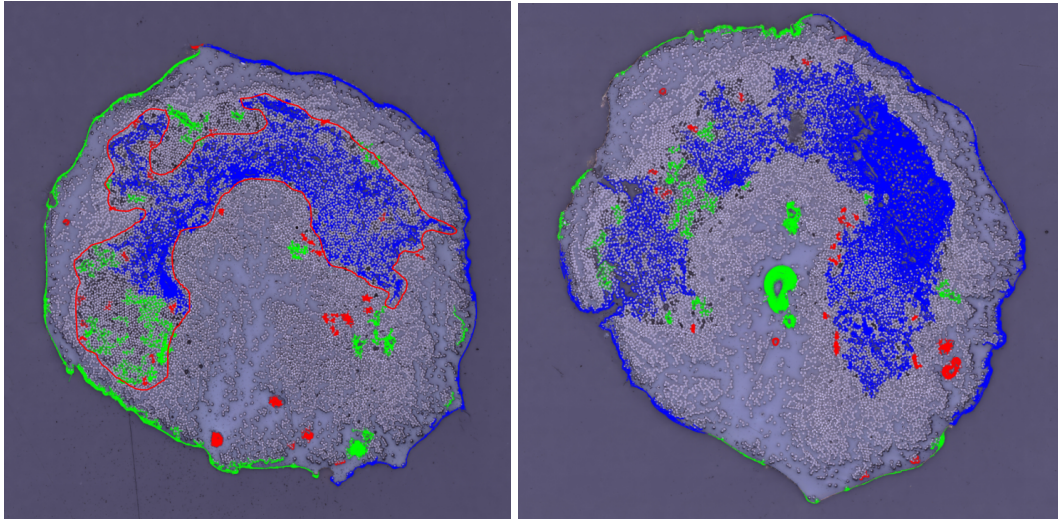


Abb. 56: Links: Analysebild Probe 1-1, rechts: Analysebild 1-3 - Scher

Es ist zu erkennen, dass beide Proben die typische Voidsichel beinhalten. Die Belastung erfolgt in Richtung der Sichelöffnung (1-Richtung). Die Proben 1-2, 2-2 und 2-3 zeigen hingegen eine Belastung quer zur Sichelöffnung, sowie eine um bis zu 27% geringe Schubspannung. Dieses Verhalten korreliert mit den Beobachtungen aus den Biegeversuchen, dass die Ausrichtung der Voidsichel zur Belastung entscheidend ist für die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften.

6 Schlussfolgerung

In dieser Studienarbeit werden die Einflüsse von Voids hinsichtlich ihres Volumengehalts, ihrer Geometrie und Verteilung auf die mechanischen Eigenschaften von endlosfaserverstärkten Druckfilamenten untersucht. Dazu werden die Voids zunächst in symmetrische und asymmetrische unterteilt, da andere Studien bereits zeigen, dass eine asymmetrische Querschnittsform der Voids zu einer erhöhten Rissbildung im Material führt [10]. Die Unterteilung erfolgt nach dem Rundheitsgrad der Voidquerschnitte. Voids mit einem Rundheitsgrad über 80% gelten als symmetrisch, darunter als asymmetrisch.

Die Bestimmung und Einteilung der Voids erfolgt mittels eines Bildanalyse-Tools, das durch eine Graustufenanalyse aus einem Schlifffbild die Voids erkennt, auswertet und auf dem untersuchten Bild markiert. Tests zeigen, dass eine Unterteilung nach symmetrischen und asymmetrischen Voids mit einem Rundheitsgrad von 80% nicht funktioniert, da kein Void die Rundheit erfüllt. Aus diesem Grund wird der Wert angepasst, bis runde Voids als rund eingestuft werden. Der somit ermittelte Rundheitsgrad liegt bei 2,5%.

Da mehrere Studien zeigen, dass Voids insbesondere die mechanischen Eigenschaften beeinflussen, die durch die Matrix bestimmt sind, werden zur Untersuchung Prüfverfahren gewählt, die diese Eigenschaften testen. Mittels einer statischen 3-Punkt-Biegemessung werden die Biegefestigkeit sowie das Biegemodul der Versuchsproben ermittelt. Dabei werden die Proben allerdings zerstört, weshalb zusätzlich eine DMA durchgeführt wird, bei der das komplexe Dehnm modul gemessen wird. Da die Proben bei der DMA nicht zerstört werden, können diese zusätzlich von verschiedenen Winkeln gemessen werden. Dies ermöglicht eine Aussage über den Einfluss der Voidverteilung. Durch einen Scherversuch, bei dem die Proben quer zur Zugrichtung in einer Zugmaschine eingespannt werden, sollen Schubspannung und Schubmodul der Proben ermittelt werden. Allerdings zeigt sich während der Versuche, dass die Dehnung der Proben zu gering ist, um den Einfluss der Dehnung der Zugmaschine und Werkzeuge zu verringern. Daher muss für die Auswertung ein Vergleichspunkt gewählt werden, anhand dessen die Proben verglichen werden können. Dieser Vergleichspunkt wird am Ende des linear-elastischen Bereichs gewählt. Des Weiteren werden die Versuchsproben auf ihre Zugeigenschaften untersucht.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass Voids grundsätzlich einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Aus beiden Biegemessverfahren ist zu erkennen, dass ein steigendes Voidvolumengehalt die Biegeeigenschaften verringert. Allerdings kann dieser Einfluss bzw. Zusammenhang nicht quantifiziert werden, da das Bildanalyse-Tool nicht alle Voids im Mate-

rial korrekt erkennt und markiert. Dadurch ist die Messung des Voidgehalts ungenau und wird nicht weiter als Vergleichswert verwendet. Zudem zeigt sich, dass die Biegeeigenschaften eine starke Abhängigkeit der Geometrie haben. Die Druckfilamente sind im Querschnitt nicht rund und variieren im Durchmesser. Dabei zeigen die Messungen, dass Proben mit einem größeren Durchmesser in Belastungsrichtung i.d.R. höhere Biegeeigenschaften aufweisen. Eine Ausnahme bilden die Proben aus der Tapeumformung, die auf den Analysebildern im Vergleich einen deutlich geringen Voidgehalt aufweisen. Daher ist zu vermuten, dass ein Wert für das Voidgehalt existiert, ab dem die Biegeeigenschaften erheblich verringert werden. Dieser Wert kann aus den Versuchen allerdings nicht bestimmt werden.

Weiterhin zeigt sich, dass bei Proben mit einem vergleichbaren Durchmesser die Belastungsrichtung der Voids entscheidend ist. Im Großteil der Proben die untersucht worden sind, liegen die Voids als Sichel vor (Vergleich Abbildung 57).

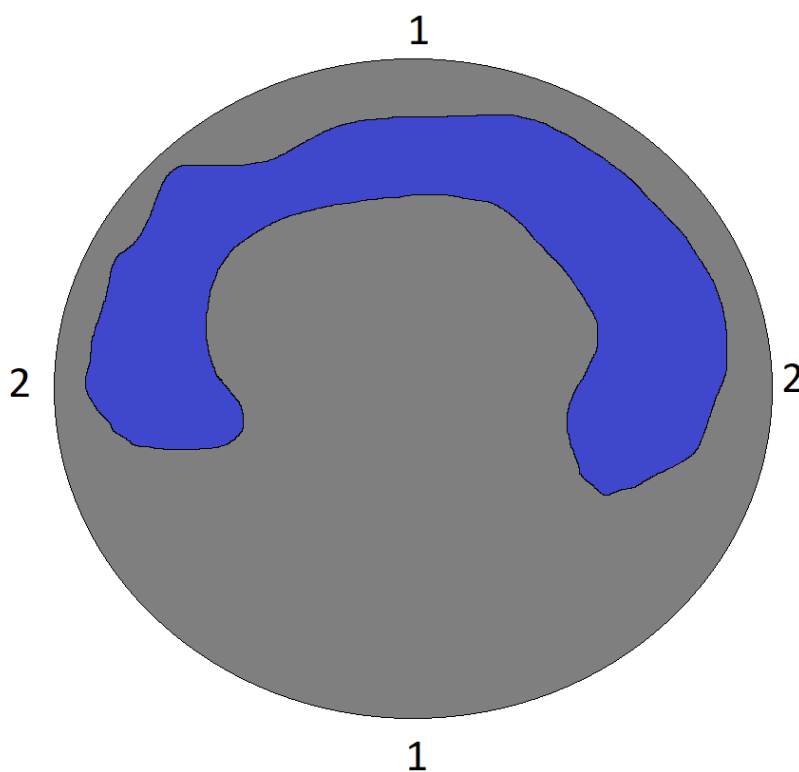


Abb. 57: Schematische Voidverteilung in den Proben

Proben, die bei der Biegung in 1-Richtung belastet werden, zeigen höhere Biegeeigenschaften, als Proben, die in 2-Richtung belastet werden. Innerhalb der 1-Richtung ist zudem ein Unterschied erkennbar, ob die Proben von Seiten der Sichelöffnung oder entgegengesetzt belastet werden. Die Randfaser des Filaments am Kräfteinleitungspunkt wird auf Druck belastet, die

entgegengesetzte Randfaser auf Zug. Da die Zugeigenschaften im Faserverbund von der Faser dominiert werden, die Druckeigenschaften allerdings von der Matrix, zeigen die Proben in Richtung der Sichelöffnung die höchsten Biegeeigenschaften. Dieses Ergebnis wird von dem Scherversuch bestätigt, dass ansonsten keine weiteren Erkenntnisse zeigt.

Der Zugversuch zeigt, dass sowohl der Voidgehalt, als auch die Verteilung der Voids die Zugeigenschaften beeinflussen. Die Zugfestigkeit sinkt mit steigendem Voidgehalt und stimmt insofern mit der Literatur überein. Bezüglich der Voidverteilung ist zu erkennen, dass Voids mit größeren Radien einen geringeren Einfluss auf die Zugfestigkeit haben, als Voids mit kleineren Radien. Dabei ist die Unterscheidung in symmetrische und asymmetrische Voids nicht von Bedeutung, zumal eine Einteilung mit dem Analyse-Tool nicht möglich ist.

Um für die Zukunft aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, können verschiedene Verbesserungen vorgenommen werden. Beispielsweise muss das Bildanalyse-Tool verbessert bzw. angepasst werden. Dadurch, dass Voids im Material nicht erkannt werden, während Voids am Rand des Druckfilaments gekennzeichnet und mit in die Statistik aufgenommen wurden, werden die Werte für den Voidgehalt zu stark verfälscht, um für die Auswertung genutzt zu werden. Des Weiteren zeigte sich die Einteilung der Voidarten als unzureichend, da symmetrische und asymmetrische Voids in Teilen als das jeweilige Andere erkannt wurden. Zudem scheint eine Einteilung in Abhängigkeit der Kantenradien der Voids sinnvoller, da tendenziell nur wenige symmetrische Voids in den Druckfilamenten vorliegen. Ebenfalls kann eine Verbesserung der Prüfverfahren vorgenommen werden. Diese Arbeit zeigt, dass die Ergebnisse der statischen Biegeprüfung, der DMA und des Scherversuchs zu den gleichen Rückschlüssen führen. Dementsprechend können zwei dieser drei Verfahren künftig weggelassen werden. Dadurch, dass bei der DMA dieselbe Probe von verschiedenen Seiten getestet werden kann, ohne diese zu zerstören, empfiehlt es sich, die DMA als bevorzugtest Prüfverfahren zu verwenden. Allerdings muss dafür der Aufbau angepasst werden. Zum einen wurden Klebestreifen verwendet, um die Probe gegen seitliches Abrutschen abzusichern, zum anderen sind die Versuchsproben im Querschnitt nicht rund. Dies führt dazu, dass sich die Proben unter der Lasteinwirkung während des Versuchs bewegen und selbst ausrichten, wodurch die Messungen beeinflusst werden. Um dem entgegenzuwirken, sollte das Werkzeug angepasst werden. Ein Einbringen zweier Kerben in die Auflager, in die die Proben dann platziert werden, kann genügen, um Bewegungen zu minimieren. Alternativ können die Proben an beiden Enden fest eingespannt werden. Dadurch liegen die Probe allerdings nicht mehr frei auf und das Ergebnis wird beeinflusst.

Abbildungsverzeichnis

1	Entstehung von Voids [3]	3
2	Schematischer Zusammenhang Voidgehalt und modifizierte Kapillardzahl [3] . .	4
3	Schematische Form verschiedener Voids [3]	8
4	Schematische Darstellung eines 3D-gedruckten Bauteils mit Regionen der Void- bildung	9
5	links: symmetrische Voids; rechts: asymmetrische Voids [10]	9
6	Voidverteilung mit Rundheitswert = 0,8; blau < 0,8; rot > 0,8	11
7	Beispiel für symmetrische Voids	12
8	Voidverteilung mit Rundheitswert; links: blau < 0,8; rot > 0,8; rechts: blau < 0,025; rot > 0,025	12
9	Voidverteilung nach Rundheit/Größe; rot = symmetrisch; grün = asymm./klein; blau = asymm./groß	13
10	Versuchsaufbau 3-Punkt-Biegeprüfung [36]	16
11	Sinusförmige Anregung und Antwort [37]	17
12	Getestete und zerstörte Coupons [12]	18
13	Links: Rolle zur Filamentaufnahme; rechts: Aufbau Zugversuch [38]	19
14	Spannungs-Dehnungs-Diagramme verschiedener Kunststoffe: a) spröde Werk- stoffe, b) und c) zähe Werkstoffe mit Streckpunkt, d) zähe Werkstoffe ohne Streckpunkt, e) Elastomere [39]	19
15	Schematischer Aufbau V-notched rail test [40]	20
16	Schematischer Aufbau Scherversuch	21
17	Elastische Verformung mit Kraftverlauf bei Scherung [41]	21
18	Aufbau des Scherversuchs an der Zugmaschine mit Filament	22
19	Messung der Durchmesser in Krafrichtung	24
20	Auflage Biegeprüfung (Probe 1-1)	25
21	Fixierung des Filaments auf dem Auflager: oben - Probe 1-1 direkt auf dem Auflager; unten - seitlich der Proben	27
22	Aufbau der DMA mit Fixierung gegen seitliches Abrutschen	28
23	links: Aufbau Zugversuch; rechts: Einspannung des Filaments	29
24	Aufbau Scherversuch	30
25	Spaltentwicklung während des Scherversuchs	31
26	Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 1. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3	33
27	Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 2. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3	34
28	Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 3. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3	35
29	Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 4. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3	36
30	Probe 3-1 unter Belastung	37
31	Verlauf des rel. Dehnspeichermodul über den Belastungswinkel der Probe 3 – 2	41
32	Kraft-Weg-Verlauf der Zugproben. Gelb - rcf 1; Blau - rcf 2; Rot - Tapeumfor- mung	42
33	Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 1. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3	43
34	Kraft-Weg-Verlauf der Probengruppe 2. Gelb - Probe 1; Blau - Probe 2; Rot - Probe 3	43

35	Analysebild Probe 3PB JL1-2: die rote Umrandung zeigt den Bereich, wo Voids (dunkle Stellen) nicht erkannt worden sind	45
36	Vergleich Querschnitt Tapeumformung, Standardverfahren & Recycelt	45
37	Analysebild 3PB Probe 2-2 - 3PB	47
38	Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom Voidgehalt - 3PB	48
39	Abhängigkeit des Biegemoduls vom Voidgehalt - 3PB	49
40	Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom Durchmesser - 3PB	50
41	Abhängigkeit des Biegemoduls vom Durchmesser - 3PB	50
42	Links: Analysebild Probe 1-1; rechts: Analysebild Probe 1-2 - 3PB	51
43	Schematischer Sichelvoid mit Beanspruchungsrichtungen 1 & 2	52
44	3P-Biegeprüfung: a) Normalspannungsverteilung; b) Dehnungsverteilung; c) Schubspannungsverteilung [39]	52
45	Links: Analysebild Probe 1-3; rechts: Analysebild Probe 4-3 - 3PB	53
46	Links: Analysebild Probe 3-1 (Krafteinleitung), rechts: Analysebild Probe 3-1 (Bruchstelle) - 3PB	53
47	Abhängigkeit komplexer Dehnmodul vom Durchmesser Probengruppe 1 - DMA	54
48	Abhängigkeit komplexer Dehnmodul vom Durchmesser Probengruppe 2 - DMA	55
49	Abhängigkeit komplexer Dehnmodul vom Durchmesser Probengruppe 3 - DMA	55
50	Links: Analysebild Probe 1-1; rechts: Analysebild Probe 1-2 - DMA	56
51	Links: Analysebild Probe 2-2; rechts: Analysebild Probe 2-3 - DMA	57
52	Analysebild Probe 3-2 - DMA	58
53	Analysebilder Zugprobe 1 - Zug	59
54	Analysebilder Zugprobe 2 - Zug	59
55	Analysebilder Zugprobe 3 - Zug	60
56	Links: Analysebild Probe 1-1, rechts: Analysebild 1-3 - Scher	61
57	Schematische Voidverteilung in den Proben	63

Tabellenverzeichnis

1	3PB - Probengruppe 1	24
2	3PB - Probengruppe 2	24
3	3PB - Probengruppe 3	24
4	3PB - Probengruppe 4	25
5	3PB - Versuchsparameter	26
6	Versuchsproben DMA	27
7	Versuchsproben Zugversuch	29
8	Zug - Versuchsparameter	30
9	Scherversuch - Versuchsparameter	31
10	Messergebnisse Probengruppe 1	34
11	Messergebnisse Probengruppe 2	34
12	Messergebnisse Probengruppe 3	35
13	Messergebnisse Probengruppe 4	36
14	relative Messwerte bezogen auf Probe 2-3	37
15	DMA Dehnspeichermoduln Probengruppe 1	38
16	DMA Dehnspeichermoduln Probengruppe 2	39
17	DMA Dehnspeichermoduln Probengruppe 3	40
18	Messwerte Zugversuch	42
19	Messwerte Scherversuch	44

Literatur

- [1] Jan-Uwe Reinhard Schmidt. “Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung der Porosität von endlosfaserverstärkten Halbzeugen für die Additive Extrusion”. Masterarbeit. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.
- [2] Helmut Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. VDI. Berlin und Heidelberg: Springer, 2005. ISBN: 3-540-40283-7.
- [3] Mahoor Mehdikhani u. a. “Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance”. In: *Journal of Composite Materials* 53.12 (2019), S. 1579–1669. ISSN: 0021-9983. DOI: 10 . 1177 / 0021998318772152.
- [4] N. Patel, V. Rohatgi und L. James Lee. “Micro scale flow behavior and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat”. In: *Polymer Engineering & Science* 35.10 (1995), S. 837–851. ISSN: 0032-3888. DOI: 10 . 1002/pen.760351006.
- [5] Qinghua Song u. a. “Research on Void Dynamics during In Situ Consolidation of CF/High-Performance Thermoplastic Composite”. In: *Polymers* 14.7 (2022). DOI: 10 . 3390 / polym14071401.
- [6] Soo-Jin Park. *Carbon fibers*. Second edition. Bd. 210. Springer series in materials science. Singapore: Springer, 2018. ISBN: 978-981-13-0538-2.
- [7] Alexander Brack. “Continuous manufacturing of miniaturized thermoplastic fiber-reinforced components”. Diss. RWTH Aachen University, 2018. DOI: 10 . 18154 / RWTH - 2019 - 01520.
- [8] Kenneth J. Bowles und Stephen Frimpong. “Void Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite-Fiber-Reinforced Composites”. In: *Journal of Composite Materials* 26.10 (1992), S. 1487–1509. ISSN: 0021-9983. DOI: 10 . 1177/00219983920260100
- [9] P. Olivier, J. P. Cottu und B. Ferret. “Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates”. In: *Composites* 26.7 (1995), S. 509–515. ISSN: 00104361. DOI: 10 . 1016/0010-4361(95)96808-J.

- [10] A. A. Goodwin, C. A. Howe und R. J. Paton. “The role of voids in reducing the interlaminar shear strength in RTM laminates”. In: *Proceedings of ICCM-11* (1997), S. 11–19.
- [11] Trevor William Clyne und Derek Hull. *An introduction to composite materials*. Third edition. Cambridge u. a.: Cambridge University Press, 2019. ISBN: 9780521860956. DOI: 10.1017/9781139050586.
- [12] A. G. Stamopoulos u. a. “Evaluation of porosity effects on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced plastic unidirectional laminates by X-ray computed tomography and mechanical testing”. In: *Journal of Composite Materials* 50.15 (2016), S. 2087–2098. ISSN: 0021-9983. DOI: 10.1177/0021998315602049.
- [13] L. DAVIES u. a. “Effect of cure cycle heat transfer rates on the physical and mechanical properties of an epoxy matrix composite”. In: *Composites Science and Technology* 67.9 (2007), S. 1892–1899. ISSN: 02663538. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.10.014.
- [14] H. Jeong. “Effects of Voids on the Mechanical Strength and Ultrasonic Attenuation of Laminated Composites”. In: *Journal of Composite Materials* 31.3 (1997), S. 276–292. ISSN: 0021-9983. DOI: 10.1177/002199839703100303.
- [15] Michael R. Wisnom, Tom Reynolds und Nigel Gwilliam. “Reduction in interlaminar shear strength by discrete and distributed voids”. In: *Composites Science and Technology* 56.1 (1996), S. 93–101. ISSN: 02663538. DOI: 10.1016/0266-3538(95)00128-X.
- [16] H. Yoshida, T. Ogasa und R. Hayashi. “Statistical approach to the relationship between ILSS and void content of CFRP”. In: *Composites Science and Technology* 25.1 (1986), S. 3–18. ISSN: 02663538. DOI: 10.1016/0266-3538(86)90018-7.
- [17] P.-O. Hagstrand, F. Bonjour und J.-A.E. Månson. “The influence of void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fibre reinforced polypropylene composites”. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36.5 (2005), S. 705–714. ISSN: 1359835X. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.03.007.
- [18] Sérgio Frascino Müller de Almeida und Zabulon dos Santos Nogueira Neto. “Effect of void content on the strength of composite laminates”. In: *Composite Structures* 28.2 (1994), S. 139–148. ISSN: 02638223. DOI: 10.1016/0263-8223(94)90044-2.

- [19] Zhewu Chen, Liansheng Peng und Zhi Xiao. “Experimental Characterization and Numerical Simulation of Voids in CFRP Components Processed by HP-RTM”. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 15.15 (2022). ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma15155249.
- [20] C. Santulli u. a. “Influence of microstructural voids on the mechanical and impact properties in commingled E-glass/polypropylene thermoplastic composites”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 216.2 (2002), S. 85–100. ISSN: 1464-4207. DOI: 10.1177/146442070221600204.
- [21] Luca Di Landro u. a. “Detection of Voids in Carbon/Epoxy Laminates and Their Influence on Mechanical Properties”. In: *Polymers and Polymer Composites* 25.5 (2017), S. 371–380. ISSN: 0967-3911. DOI: 10.1177/096739111702500506.
- [22] S. J. Li u. a. “The influence of cure pressure on microstructure, temperature field and mechanical properties of advanced polymer-matrix composite laminates”. In: *Fibers and Polymers* 15.11 (2014), S. 2404–2409. ISSN: 1229-9197. DOI: 10.1007/s12221-014-2404-0.
- [23] Hongyan Zhu u. a. “Influence of Voids on the Tensile Performance of Carbon/epoxy Fabric Laminates”. In: *Journal of Materials Science & Technology* 27.1 (2011), S. 69–73. ISSN: 10050302. DOI: 10.1016/S1005-0302(11)60028-5.
- [24] Chunyang Zhao u. a. “Three-Dimensional Numerical Simulation of Meso-Scale-Void Formation during the Mold-Filling Process of LCM”. In: *Applied Composite Materials* 26.4 (2019), S. 1121–1137. ISSN: 0929-189X. DOI: 10.1007/s10443-019-09770-w.
- [25] Dakota R. Hetrick, Seyed Hamid Reza Sanei und Omar Ashour. “Void Content Reduction in 3D Printed Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites through Temperature and Pressure Consolidation”. In: *Journal of Composites Science* 6.5 (2022), S. 128. DOI: 10.3390/jcs6050128.
- [26] A. CHAMBERS u. a. “The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications”. In: *International Journal of Fatigue* 28.10 (2006), S. 1389–1398. ISSN: 01421123. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.02.033.
- [27] Reinhold Oster. “Non-destructive testing methodologies on helicopter fiber composite components challenges today and in the future”. In: *18th World Conference on Nondestructive Testing*. 2012, S. 16–20.

- [28] A. MORALESRODRIGUEZ u. a. “Porosity analysis of long-fiber-reinforced ceramic matrix composites using X-ray tomography”. In: *Scripta Materialia* 60.6 (2009), S. 388–390. ISSN: 13596462. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.11.018.
- [29] Matthias Domm, Jens Schlimbach und Peter Mitschang. “Characterization method for continuous fiber reinforced thermoplastic strands”. In: *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 34.3 (2021), S. 328–352. ISSN: 0892-7057. DOI: 10.1177/0892705719838590.
- [30] Johann Kastner u. a. “Advanced applications of computed tomography by combination of different methods”. In: *Proceedings of the European conference on nondestructive testing, Berlin, Germany*. 2006.
- [31] S. M. Sisodia u. a. “The effects of voids in quasi-static indentation of resin-infused reinforced polymers”. In: *Journal of Composite Materials* 53.28-30 (2019), S. 4399–4410. ISSN: 0021-9983. DOI: 10.1177/0021998319858024.
- [32] Nisrin Abdelal und Steven L. Donaldson. “Comparison of methods for the characterization of voids in glass fiber composites”. In: *Journal of Composite Materials* 52.4 (2018), S. 487–501. ISSN: 0021-9983. DOI: 10.1177/0021998317710083.
- [33] F. Honarvar und A. Varvani-Farahani. “A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control”. In: *Ultrasonics* 108 (2020), S. 106227. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106227.
- [34] R. A. Smith. “COMPOSITE DEFECTS AND THEIR DETECTION”. In: 2011. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:11549722>.
- [35] Ahmad Safari und E. Koray Akdogan, Hrsg. *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications*. New York, NY: Springer, 2008. ISBN: 978-0-387-76538-9.
- [36] DIN EN ISO. *Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften*. Deutsche Norm, 2011.
- [37] Gottfried W. Ehrenstein. *Thermische Analyse: Brandprüfung, Wärme- und Temperaturleitfähigkeit, DSC, DMA, TMA*. Erlanger Kunststoff-Schadensanalyse. München: Hanser, 2020. ISBN: 978-3-446-46424-7.
- [38] Santiago Rodrigues u. a. “Towards optimization of polymer filament tensile test for material extrusion additive manufacturing process”. In: *Journal of Materials Research and Technology* 24 (2023), S. 8458–8472. ISSN: 22387854. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.05.088.

- [39] Wolfgang Grellmann und Sabine Seidler, Hrsg. *Kunststoffprüfung*. 3., [aktualisierte] Aufl. München: Hanser, 2015. ISBN: 978-3-446-44350-1. DOI: 44350.
- [40] R. T. Haluza u. a. “Shear Strain Measurement Techniques in Composite V-Notch Shear Testing”. In: *Experimental Mechanics* 62.9 (2022), S. 1655–1671. ISSN: 0014-4851. DOI: 10.1007/s11340-022-00897-9.
- [41] Hubert Hinzen. *Maschinenelemente*. 3., überarb. Aufl. München: Oldenbourg, 2011. ISBN: 978-3-486-70438-9.

Anhang A

D

C

B

A

4

4

3

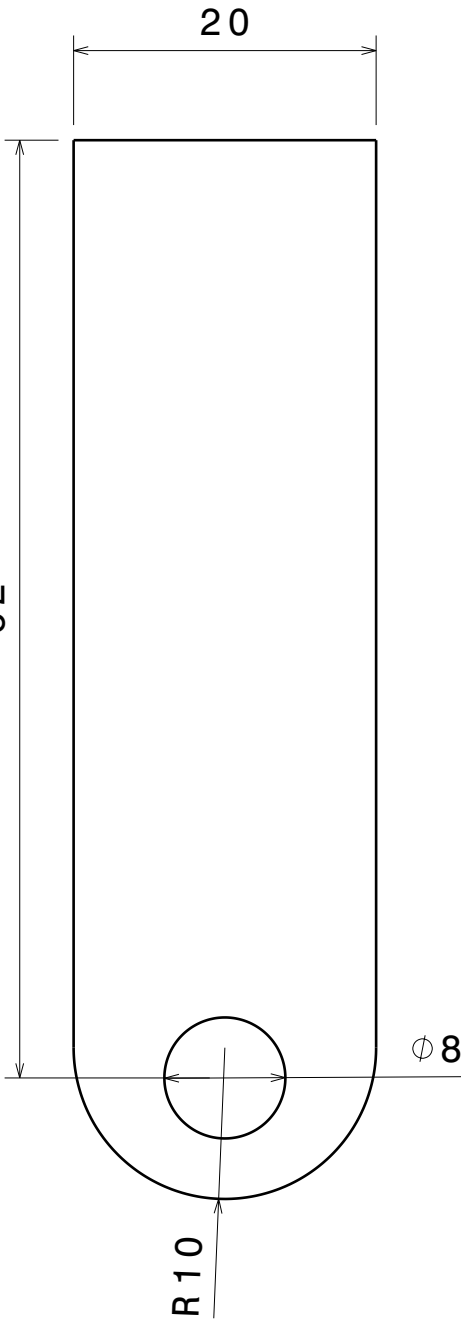
3

2

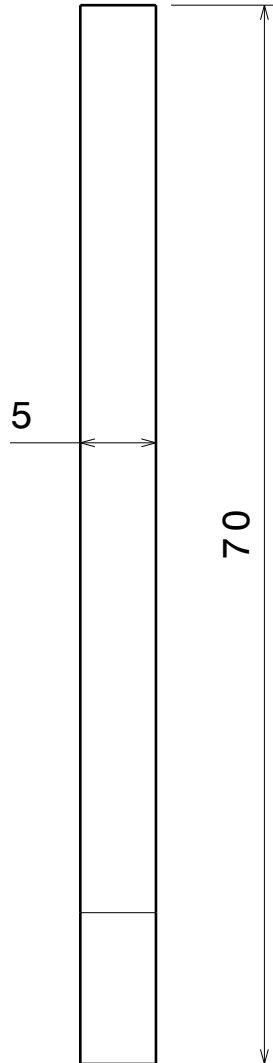
2

1

1



Vorderansicht

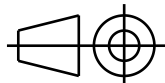


Seitansicht

DESIGNED BY:
luet_jo
DATE:
27.02.2024

CHECKED BY:
DATE:

SIZE
A4



SCALE
2:1

WEIGHT (kg)
0,01

DRAWING NUMBER

SHEET
1 / 1

Kardan_Einspannung

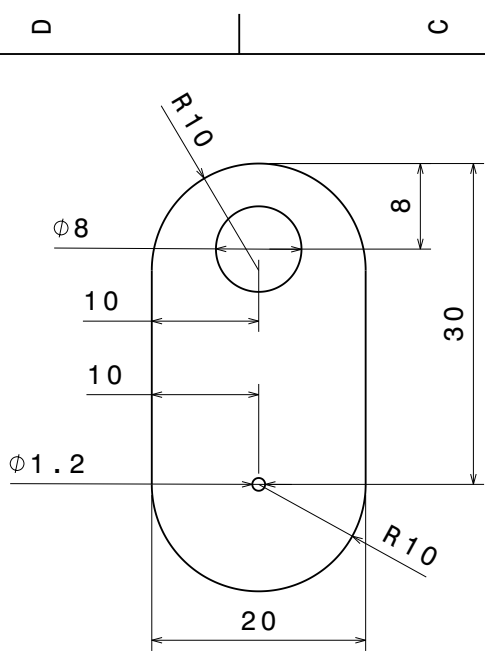
DASSAULT SYSTEMES

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

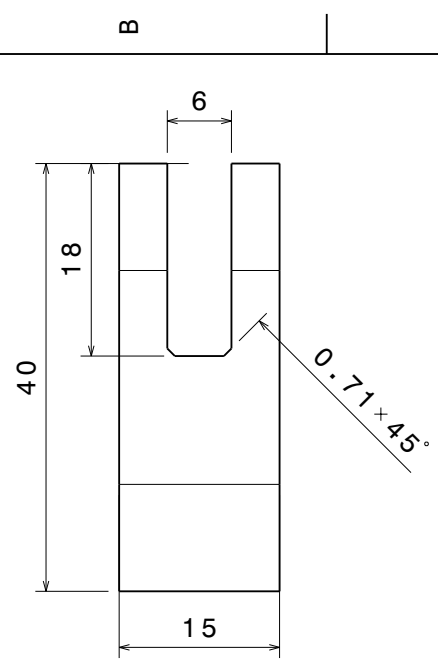
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A



Vorderansicht



Seitansicht

DESIGNED BY: luet_jo		<h1>Kardan_Filament</h1>		I	-
DATE: 28.02.2024				H	-
CHECKED BY: XXX				G	-
DATE: XXX		<h2>DASSAULT SYSTEMES</h2>		F	-
SIZE A4				E	-
SCALE 2:1	WEIGHT (kg) XXX			D	-
DRAWING NUMBER XXX		SHEET 1/1		C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				B	-
				A	-

D

A

D

C

B

A

4

4

3

3

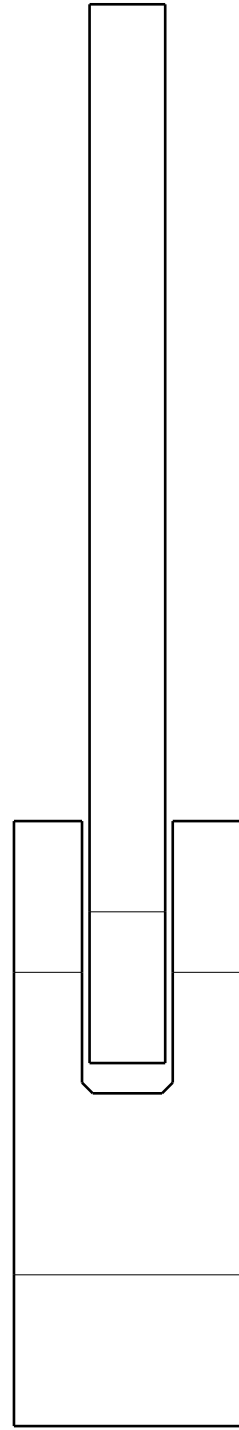
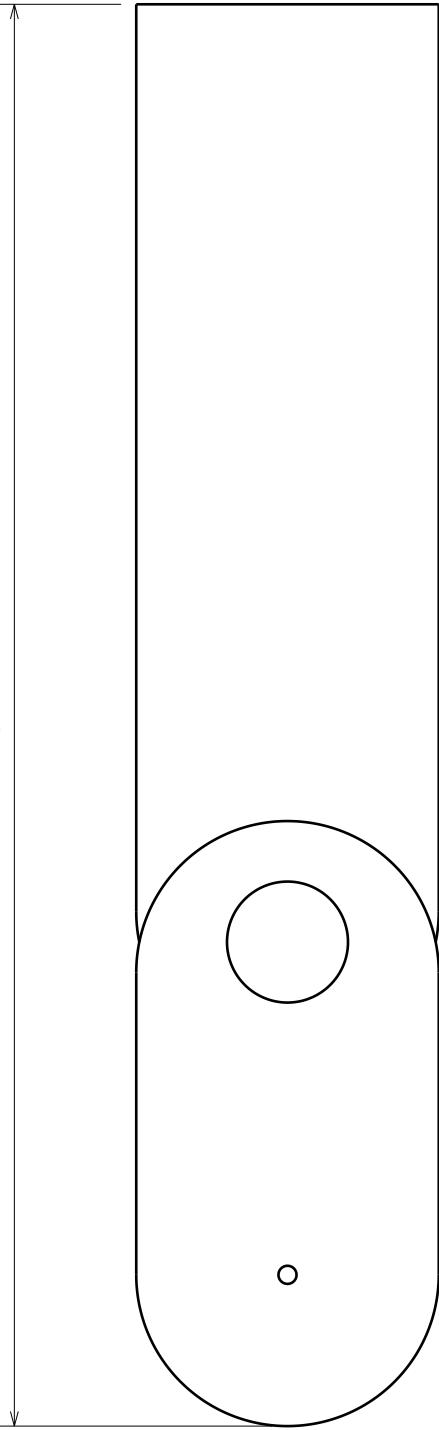
2

2

1

1

94



Vorderansicht

Seitenansicht links

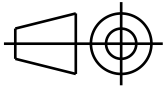
DESIGNED BY:
luet_jo
DATE:
17.04.2024
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX

Maßstab: 2:1

Maßstab: I 2:1

Karden_Zusammenbau

SIZE
A4



DASSAULT SYSTEMES

SCALE
2:1

WEIGHT (kg)
XXX

DRAWING NUMBER
XXX

SHEET
1 / 1

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A

D

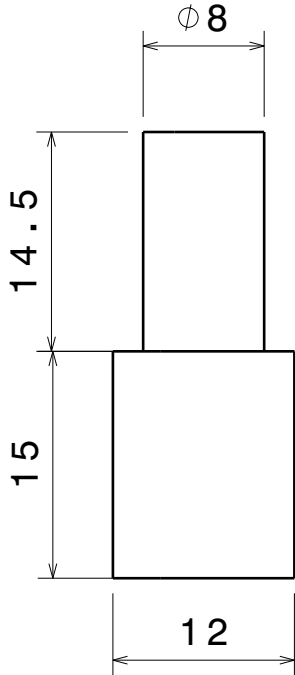
C

B

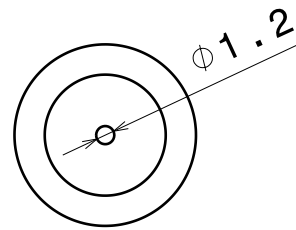
A

4

4



Seitansicht



Draufsicht

3

3

2

2

DESIGNED BY:
luet_jo
DATE:
17.04.2024
CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX

Einsatz_Filament

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

SIZE
A4

DASSAULT SYSTEMES

SCALE
2:1

WEIGHT (kg)
XXX

DRAWING NUMBER
XXX

SHEET
1 / 1

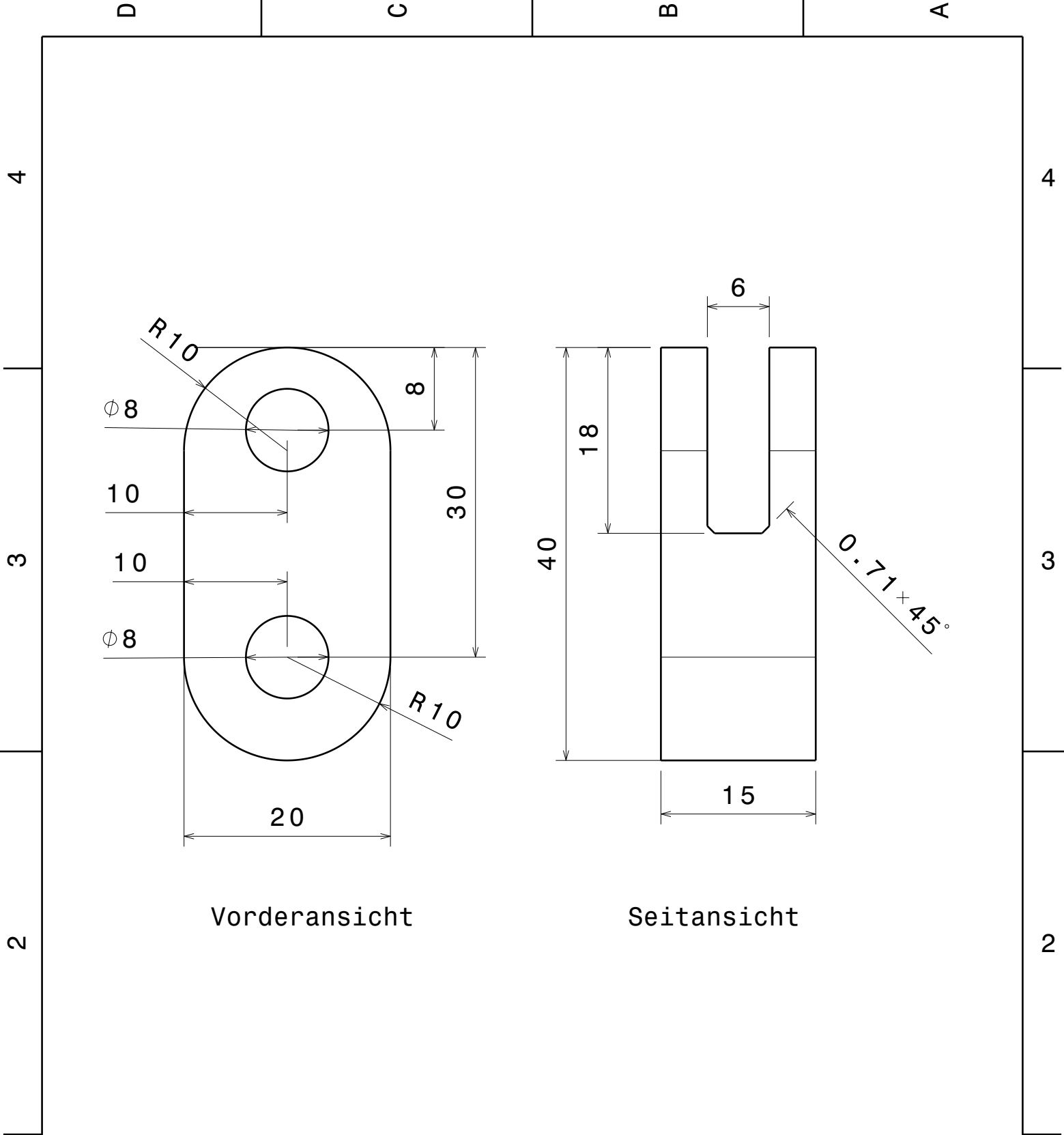
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A

1

1



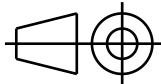
Vorderansicht

Seitansicht

DESIGNED BY:
luet_jo
 DATE:
17.04.2024
 CHECKED BY:
XXX
 DATE:
XXX

Kardan_Filament 2.0

SIZE
A4



DASSAULT SYSTEMES

SCALE
2:1

WEIGHT (kg)
XXX

DRAWING NUMBER
XXX

SHEET
1 / 1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

C

B

A

4

4

3

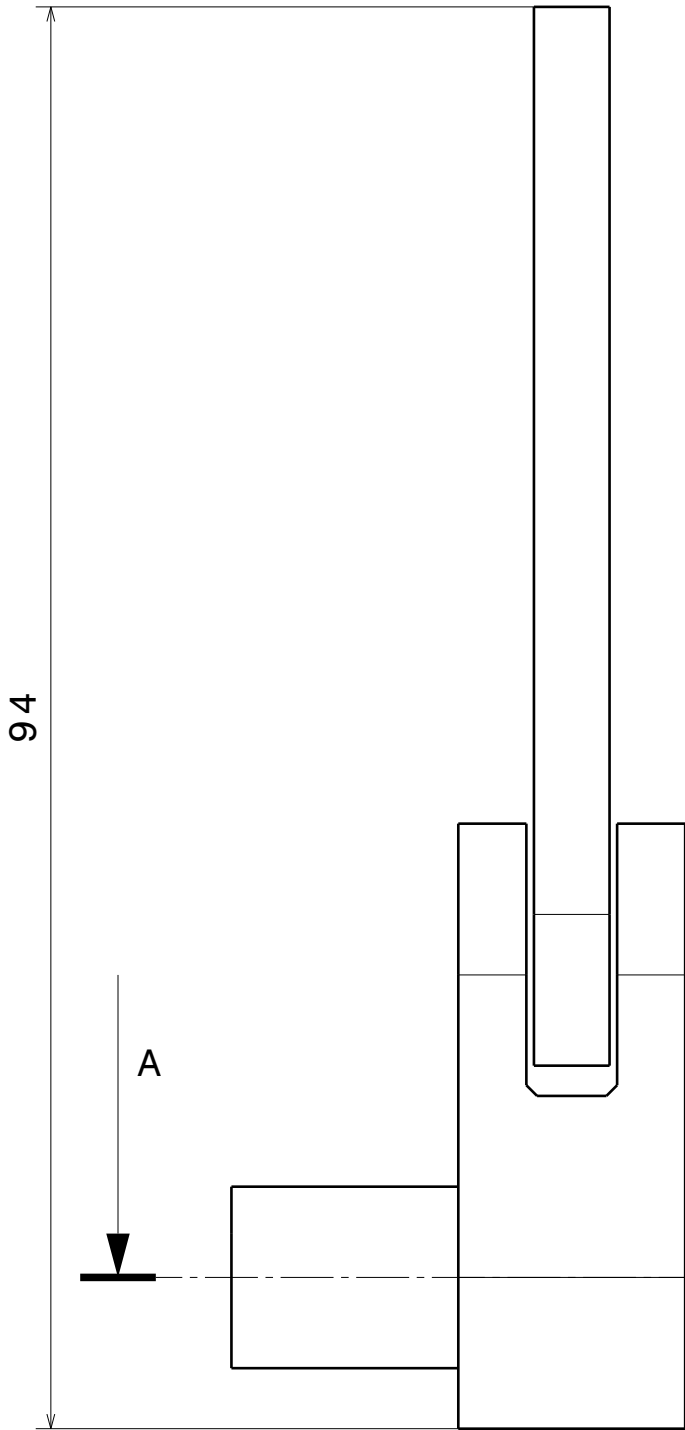
3

2

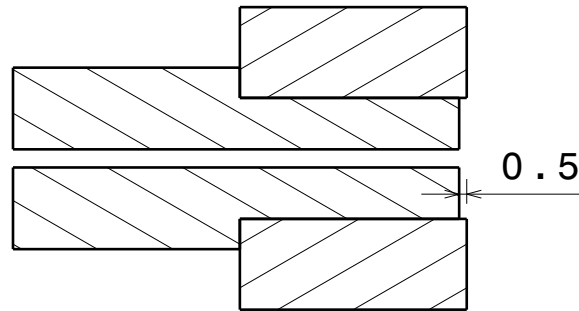
2

1

1



Seitansicht

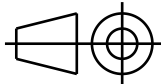


Schnittebenenansicht A-A

DESIGNED BY:
luet_jo
DATE:
17.04.2024

CHECKED BY:
XXX
DATE:
XXX

SIZE
A4



SCALE
2:1

WEIGHT (kg)
XXX

**Kardan_Zusammenbau
2.0**

DASSAULT SYSTEMES

DRAWING NUMBER
XXX

SHEET
1 / 1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A