

Evaluation diverser Laminatgestaltungen für Orthesenfußsohlen - Simulationskonzept und Prüfung

Masterarbeit von Mette Sybille Krippendorff

Matrikelnummer: 430027

Angefertigt am
Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik
der Technischen Universität Clausthal
im Sommersemester 2022

Erstgutachter: Prof.Dr.-Ing. Dieter Meiners

Zweitgutachter: Dr. Leif Steuernagel

27. Oktober 2022

Eidesstattliche Versicherung

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

Des Weiteren erkläre ich, dass ich mit der öffentlichen Bereitstellung meiner Abschlussarbeit in der Instituts- oder Universitätsbibliothek einverstanden bin. Ich stimme hiermit außerdem einer softwaregestützten Plagiatsprüfung zu.

Clausthal-Zellerfeld, 27.10.2022

Ort, Datum

Unterschrift

A handwritten signature in black ink, consisting of several stylized, overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Biomechanik des Fußes	2
2.2 Orthesen	3
2.3 Prüfnormen	5
2.4 Faserverbundwerkstoffe	6
2.5 Dynamisches Verhalten von Faserverbundwerkstoffen	8
3 Orthesenherstellung	10
3.1 Referenzprozess der Orthesenherstellung	10
3.2 Daten zu den verwendeten Materialien	13
3.3 Laminataufbau	14
4 Berechnung von Festigkeiten an Faserverbundwerkstoffen	16
4.1 Materialwerte	16
4.2 Steifigkeitsanalyse	18
4.3 Festigkeitsanalyse	20
4.4 Notwendige Werte	23
5 Entwicklung eines Simulationskonzeptes	24
5.1 Simulationsziel	24
5.2 Simulationsentwicklung	24
5.3 Alternative Nutzung und Ergänzung	29
6 Versuche zur Lamineinschätzung	30
6.1 Versuchskonzept	30
6.2 Mechanische und geometrische Bedingungen	31
6.3 Probengestaltung	33
6.4 Probenherstellung	35
6.5 Statische Prüfung	37
6.6 Dynamische Prüfung	37
7 Versuchsergebnisse	39
7.1 Statische Versuche	39
7.2 Dynamische Versuche	44
7.3 Kombinierte Ergebnisse	48
7.4 Fehlerbetrachtung	49

8 Zusammenfassung	51
9 Ausblick	52
Literaturverzeichnis	55
A Materialinformationen	56
A.1 Katalogauszug PA-Stumpf und PVC-Stab	57
A.2 Katalogauszug Carbonband und -gewebe	58
A.3 Datenblatt für das Carbonband	59
A.4 Sicherheitsdatenblatt für das Carbongewebe	60
A.5 Katalogauszug Carbonschlauch	66
A.6 Datenblatt für den schmalen Carbonschlauch	67
A.7 Datenblatt für den breiten Carbonschlauch	68
A.8 Katalogauszug Orthopoxgewebe	69
A.9 Katalogauszug Epoxidgemisch	70
A.10 Verarbeitungsanweisungen für das Epoxidgemisch	71
A.11 Sicherheitsdatenblatt für das Epoxidharz	73
A.12 Sicherheitsdatenblatt für den Härter	80
B Laminataufbauweisen	87
C Festigkeitsanalyse nach Puck	88
D Berechnungen von mechanischen und geometrischen Bedingungen	89
E Abschätzung des Faservolumengehaltes der Proben	91

Abbildungsverzeichnis

1	Bein-Orthese nach [1]	1
2	Knochen und Gelenke des Fußes [4]	2
3	Die Gangphasen [5] und ein typischer Kraftverlauf an einem Fuß beim Schritt [3]	3
4	Beispiele für Orthesen für untere Extremitäten	5
5	Schematische Zeichnung eines Faser-Kunststoff-Verbunds [16]	6
6	Verschiedene Faserhalbzeuge [17]	7
7	Schematische Zeichnung eines VARI-Aufbaus	7
8	Schematische Zeichnung eines Autoklaven [17]	8
9	Dynamische Belastung von Faserverbunden	9
10	Fußgelenkdummy, Gelenkanker und PVC-Stäbe am Gipsmodell	10
11	Gelegeaufbau am Bein	12
12	Bruchbild der Bruchmodi [26]	21
13	Bruchkurve mit Bruchmodiabschnitten [19]	22
14	Simulationskonzeptzeichnung	25
15	Fuß in Prüfeinrichtung [14]	27
16	Biegeprüfungen	30
17	Kräfteverhältnisse an der Probe	31
18	Winkelzusammenhänge an der Probe	32
19	Laminatvariationen zum Prüfen verschiedener Faktoren	33
20	Länge der kurzen Lagen	34
21	Draufsicht auf verwendeten VARI-Aufbau während des Harzflusses	36
22	Durchschnittliche elastische und plastische Dehnungen und Winkel nach Probenvariation - Probenbenennung: siehe Abbildung 19	40
23	Kennwerte mit Standardabweichung für Proben mit Variation der Länge der kurzen Lagen - Probenbenennung: siehe Abbildung 19	41
24	Kennwerte mit Standardabweichung für Proben mit Variation des Bands - Probenbenennung: siehe Abbildung 19	42
25	Kennwerte mit Standardabweichung für Proben mit Variation des Orthopox - Probenbenennung: siehe Abbildung 19	42
26	Maximale Schwingenspielzahl der Proben gegenüber dem maximalen Verfahrensweg - Probenbenennung: siehe Abbildung 19	44
27	Hysteresen von Proben bei einem Verfahrensweg von 5mm	45
28	Aufnahme einer sich an der Begrenzung abstützenden Probe	46
29	Kraftabfall während der ersten Schwingenspiele	46
30	Prozentualer Kraftabfall von Ober- und Unterkraft	47
31	Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Werten aus statischer und dynamischer Prüfung	48

32	Referenzprobe der Firma Sturm für einen 70 kg Patienten	49
33	Randbedingungen und Bruchbedingungen für die Bruchmodi nach Puck [19]	88
34	Bruchparameter für die Berechnung der Bruchmodi nach Puck [19]	88
35	Freischnitt der Probe	89
36	Schnittkräfte an der Probe	90

1 Einleitung

Orthesen sind Hilfsmittel für die Rehabilitation und zum Unterstützen von Körperfunktionen. Ein sehr bekanntes Beispiel ist eine Orthese, welche nach einem Kreuzbandriss genutzt wird. Es gibt aber zusätzlich zu den Standard Orthesen, die vor allem in der Rehabilitation eingesetzt werden, auch individuelle Orthesen. Diese Orthesen werden von einem Orthopädietechniker in Form und Unterstützung für das spezifische Krankheitsbild und den Körper des Patienten angefertigt. Eine Orthese besteht aus Schalen, die an den Körper angepasst sind, und den dazwischen liegenden Gelenken (Abbildung 1).



Abbildung 1: Bein-Orthese nach [1]

In dieser Arbeit wird sich mit der Gestaltung dieser individuellen Orthesen befasst. Dabei geht es um den Aufbau der Schalen. Die Schalen sind heutzutage meist aus Faserverbundkunststoffen hergestellt, da diese mechanische Eigenschaften mit einem geringen Gewicht vereinen. Das geringe Gewicht ist insbesondere in der täglichen Anwendung eine Erleichterung für Patienten. Der Aufbau der Faserverbundkunststoffe wird von dem behandelnden Orthopädietechniker bestimmt. Dieser verlässt sich bei der Gestaltung des Laminats auf seine Erfahrung.

Das weitgefasste Ziel dieses Projektes ist es, diese Erfahrung mittels wissenschaftlicher Methoden zu untersuchen. Dabei soll eine Simulation eingesetzt werden. Die Vision ist es ein Tool zu entwickeln, mit dem der Laminataufbau simuliert werden kann, um zu prüfen, wie der Aufbau am besten gestaltet werden kann. Dabei spielen Einflüsse, wie Normen, eine Rolle, aber genauso auch Materialeffizienz und -einsparung. Schlussendlich ist der Wunsch, anhand von Patientendaten Empfehlungen zum Aufbau der Orthese geben zu können. Um dieses Projekt in einem sinnvollen Maß zu beginnen, wird sich zunächst auf den Aufbau einer Orthesenfußsohle konzentriert. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept für eine Simulation der Fußsohle erstellt. Zudem werden Vorversuche über den Einfluss verschiedener verwendeten Materialien durchgeführt.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt wird auf Grundlagen zu den Themen Biomechanik des Fußes, Orthesen und Faserverbundwerkstoffe eingegangen. Des Weiteren werden notwendige Normen für die Orthesenprüfung vorgestellt.

2.1 Biomechanik des Fußes

Um eine Orthese am Fuß beurteilen zu können, muss auch der Fuß an sich betrachtet werden. Für den in dieser Arbeit begutachteten Fall ist der Abrollpunkt des Fußes besonders interessant, weil auf der Höhe von diesem große Belastungen auf die Orthese wirken. Der Abrollpunkt liegt im Zehengrundgelenk, welches zwischen den Mittelfußknochen und den Zehen ist (Abbildung 2). Auf Grund dessen, dass dieses ein Kugelgelenk ist, welches nur durch wenige Bänder in der Bewegung beschränkt ist, ist es sehr flexibel und wird beim Abrollen des Fußes stark verformt. Konkret sind in den Zehengrundgelenken, bis zu 45° Streckung und 80° Beugung möglich. [2, 3] Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Orthese von einem zu erreichenden Winkel von 40° ausgegangen.

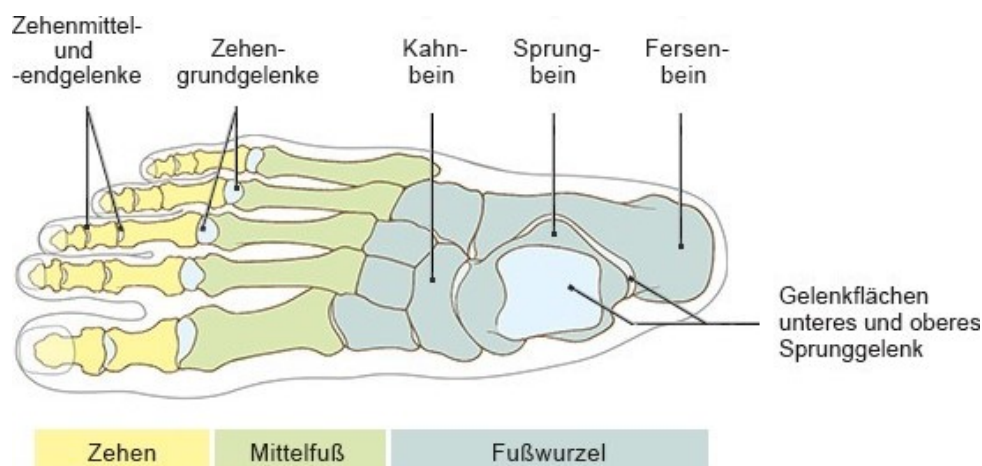


Abbildung 2: Knochen und Gelenke des Fußes [4]

Um die Belastungen einer Orthese beurteilen zu können, sollte auch die Nutzung genauer betrachtet werden. In diesem Fall muss der Gang des Menschen begutachtet werden. Ausgehend von diesem kann auf die dynamische Belastungsweise geschlossen werden. Das Laufen eines Menschen wird in der Ganganalyse in Gangzyklen eingeteilt, die einem Doppelschritt entsprechen. Das bedeutet ein Zyklus umfasst zwei Schritte, also einen Schritt pro Fuß. Während ein Fuß Bodenkontakt hat, befindet sich der andere während der Schwungphase in der Luft (Abbildung 3). Bei Bodenkontakt in der Standphase können Kräfte gemessen werden, die auf den Fuß wirken. Ein klassischer Verlauf hierfür ist in Abbildung 3 dargestellt.

Hierbei sind zwei Kraftpeaks im Zeitverlauf zu erkennen. Der erste entspricht der wirkenden Kraft beim Aufsetzen der Ferse auf den Boden. Zu diesem Zeitpunkt wird das Gewicht vom

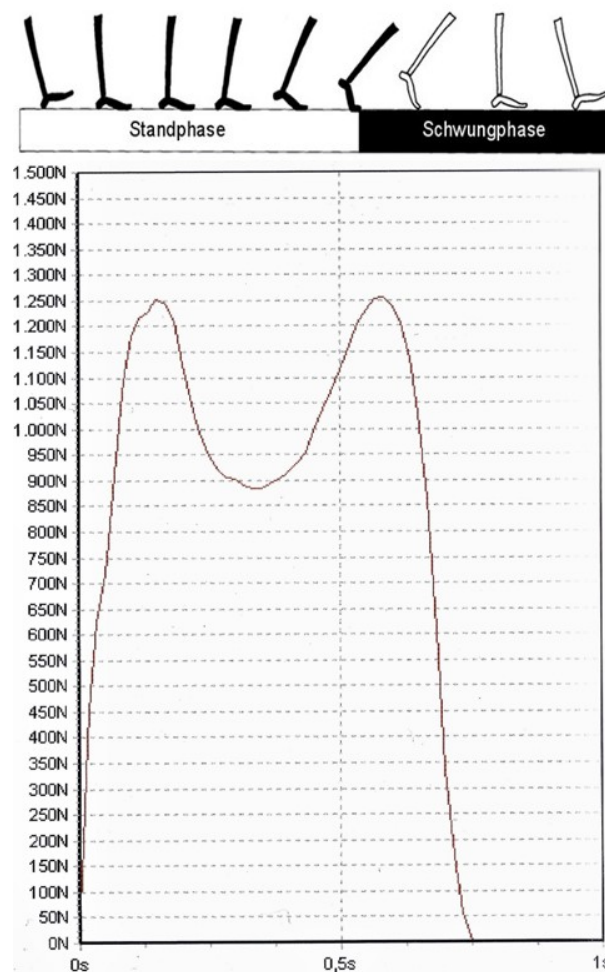


Abbildung 3: Die Gangphasen [5] und ein typischer Kraftverlauf an einem Fuß beim Schritt [3]

Fuß übernommen und der Stoß des Auftritts gedämpft. Zum Zeitpunkt des Abstoßes mit dem Vorderfuß liegt der zweite Kraftpeak. Hierbei wird das Hauptgewicht an den zweiten Fuß abgegeben. Diese Peaks stehen für die Hauptbelastungen, die auf die Fußsohle während eines normalen Ganges wirken. Zwischen dem Aufsetzen der Ferse und dem Abstoß wird der Fuß abgerollt, sodass der Fuß beim Abstoßen im Zehengrundgelenk angewinkelt ist. [3, 6]

2.2 Orthesen

Eine Orthese ist laut Klassifikation der DIN EN ISO 9999, die Hilfsmittel für Menschen mit Behinderung klassifiziert, ein „am Körper befestigtes Hilfsmittel für die Unterstützung von neuromuskuloskeletalen oder bewegungsbezogenen Funktionen“ [7]. Diese Hilfsmittel begrenzen die Bewegungen des Nutzers in Umfang und Richtung. [6]

In der DIN EN ISO 9999 werden Hilfsmittel für Menschen mit Behinderung klassifiziert und gruppiert, zu denen auch die Orthesen gehören. Nach dem dort beschriebenen dreiteiligen Code gehören Orthesen der unteren Gliedmaßen hierbei zu der Klasse 06.12., wobei die

Gruppen 06.12.06,12,18 und 19 Orthesen bezeichnen, die auch den Fuß umfassen. [7]

Bei Orthesen wird zwischen dynamischen und statischen Orthesen unterschieden. Um die Bewegung eines Gelenks in jeglicher Richtung zu beschränken, werden statische oder auch immobilisierende Orthesen, sogenannte Schienen, genutzt. Hiermit kann ein Gelenk in einer gewünschten Stellung fixiert und somit ruhiggestellt werden. [6]

Im Gegensatz zu den immobilisierenden stehen die dynamischen Orthesen, welche eine Bewegung in definiertem Maße zulassen. Damit sollen Gelenke möglichst wenig eingeschränkt geführt, unterstützt und entlastet werden. Die dynamischen Orthesen können zum Beispiel zeitlich begrenzt in Folge von Operationen eingesetzt werden. Eine Nutzung kann aber auch dauerhaft indiziert sein, zum Beispiel bei Lähmungen oder zur Vermeidung von Fehlstellungen und anderen permanenten Einschränkungen. Bei der dauerhaften Nutzung werden meist individuell angepasste Produkte verwendet, um eine optimale Anpassung der Orthesen an den Patienten zu gewährleisten. [6]

Orthesen finden an verschiedensten Körperteilen Anwendung. Es gibt Ellenbogen- und Schulter-Orthesen genauso wie verschiedene Rumpforthesen.

Diese Arbeit bezieht sich auf Orthesen der unteren Extremitäten, welche den Fuß mit einbeziehen. Beispiele hierfür sind die Sprunggelenk-Fuß-Orthesen (engl. ankle-foot-orthosis - AFO) oder auch Unterschenkel-Orthesen sowie die Knie-Knöchel-Fuß-Orthesen (engl. knee-ankle-foot-orthosis - KAFO) als auch Ganzbein-Orthesen. [6]

Die Fußsohle einer solchen Orthese kann, je nach Krankheitsbild, entweder teilflexibel oder rigide, also steif, gestaltet sein. Wenn der Patient besonders viel Unterstützung in bestimmten Bereichen benötigt, wird das gesamte Fußteil rigide gestaltet. Wird hingegen weniger Unterstützung benötigt, wird die Fußsohle im Vorderfuß flexibel gestaltet. [10, 11]

Abgesehen vom Krankheitsbild und damit auch der Muskelaktivität, wird bei der Auswahl von orthopädischen Hilfsmitteln die Mobilitätsklasse betrachtet. Diese Klasse dient der Einordnung des Aktivitätsniveaus des Patienten. Hierbei gibt es vier unterschiedliche Klassen [12]:

Mobilitätsklasse 1 Innenbereichsgeher, der sich nur auf kurzen ebenen Gehstrecken bewegt

Mobilitätsklasse 2 Eingeschränkter Außenbereichsgeher, der sich mit geringen Geschwindigkeiten auch auf unebenem Boden bewegt

Mobilitätsklasse 3 Uneingeschränkter Außenbereichsgeher, der sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten frei draußen bewegt

Mobilitätsklasse 4 Uneingeschränkte Außenbereichsgeher mit besonders hohen Ansprüchen sind zum Beispiel Sportler und Kinder

Die Mobilitätsklassen haben Einfluss auf die Höhe der Anforderungen an die Orthesen. Um den verschiedenen Anforderungen gerecht zu werden, werden Orthesen heutzutage vor



(a) Beispiel einer AF-Orthese [8]

(b) Beispiel einer KAF-Orthese [9]

Abbildung 4: Beispiele für Orthesen für untere Extremitäten

allen aus Faserverbundkunststoffen hergestellt. [6] Diese vereinen ein geringes Gewicht mit gleichzeitig hoher lokaler Festigkeit und Flexibilität.

2.3 Prüfnormen

Für die Prüfung von Orthesen gibt es mehrere Normen mit unterschiedlichen Zwecken. In der DIN EN ISO 22523 [13] werden allgemeine Anforderungen an Orthesen beschrieben. Dabei geht es zum Beispiel um Anwender- und Sicherheitsinformationen, wie Verträglichkeiten, Geräusche und elektrische Sicherheit. Über mechanische Anforderungen ist hier nichts Genaues gelistet.

Die Normen DIN EN ISO 10328 [14] und 22675 [15] betrachten die strukturelle Prüfung von Prothesen für untere Gliedmaßen. Zweitere befasst sich mit der Prüfung von Knöchel-Fuß-Passteilen von Prothesen, während sich die erste unter anderem mit dem Fuß als einzelnes Element befasst. Laut Nationalem Vorwort sind die genannten Normen und Testverfahren nicht nur auf Prothesen, sondern auch auf Orthesen anzuwenden. In den genannten Normen werden die Prüfobjekte nach verschiedenen Klassen geprüft und klassifiziert. Bei den verschiedenen Prüfungen werden unterschiedliche Belastungen aufgebracht.

Diese Belastungen werden in mehrere Prüfbelastungsgrade, P3 bis P8, eingeteilt. Die hierfür geltenden Kräfte basieren unter anderem auf Daten für verschiedene Gewichtsklassen aus dem Jahr 1977. Diese Gewichtsklassen dienen als Orientierung, aber es sollten auch Faktoren zum Bewegungsablauf nicht unterschätzt werden.

Die Prüfbelastungsgrade basieren auf den Daten der folgenden Gewichtsklassen:

- P3 unter 60 kg
- P4 unter 80 kg
- P5 unter 100 kg
- P6 unter 125 kg
- P7 unter 150 kg
- P8 unter 175 kg

Je nach Prüfung und Prüfbelastungsklasse werden die verschiedenen Prüfungen und Belastungen ausgewählt. [14]

Die für diese Arbeit relevante Prüfungen werden an den entsprechenden Stellen genauer erläutert.

2.4 Faserverbundwerkstoffe

Faserverbundwerkstoffe sind Werkstoffe, welche aus einem Verbund von Fasern mit einer Matrix, in diesem Fall Kunststoff, bestehen. Dabei umschließt letztere die Fasern und verbindet diese untereinander, überträgt die Kräfte zwischen den Fasern und gibt damit dem Material seine Form (Abbildung 5). Die Kraftübertragung im Material wird vor allem von den Fasern übernommen, während der Matrixwerkstoff die Fasern bei Druckbelastungen stützt.

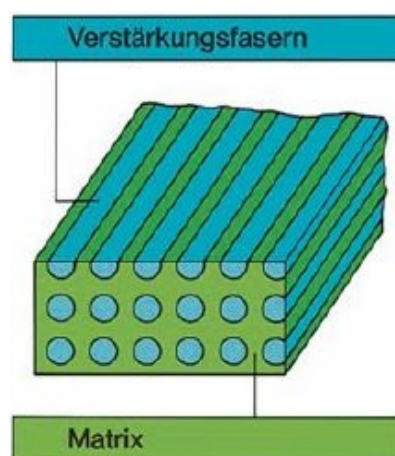


Abbildung 5: Schematische Zeichnung eines Faser-Kunststoff-Verbunds [16]

Durch die Kombination von Faser und Matrix können hohe gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften erreicht werden, die gut anpassbar sind. Des Weiteren können viele Formen frei gestaltet werden. Ein Nachteil von Faser-Kunststoff-Verbunden sind jedoch hohe Werkstoffkosten.

Die Erscheinungsform, bei der die Fasern, zum Beispiel Kohlenstoff- oder Glasfasern, die gleiche Orientierungsrichtung in einer Lage haben, wird als Gelege bezeichnet. Diese einzelnen Gelegesichten, können mit verschiedenen Orientierungen zu einem Gelegekomplex (Abbildung 6(a)) kombiniert werden. Dadurch wird eine bessere Ausnutzung der mechanischen Eigenschaften erreicht. Alternativ können Fasern als Gestricke (Abbildung 6(b)), miteinander verstrickte Fasern, oder auch als miteinander verwobene Fasern, so genannte Gewebe (Abbildung 6(c)), verarbeitet werden. Bei der Wahl des Faserhalbzeugs ist ein abwägen des Handlings gegen die Festigkeit nötig. Wenn die Faser stärker verschlungen sind, sind die Textilien besser handelbar, aber die Festigkeit nimmt ab. Bei zweidimensionaler Ausrichtung der Fasern, steigt zusätzlich die Festigkeit in die zweite Richtung. [17]

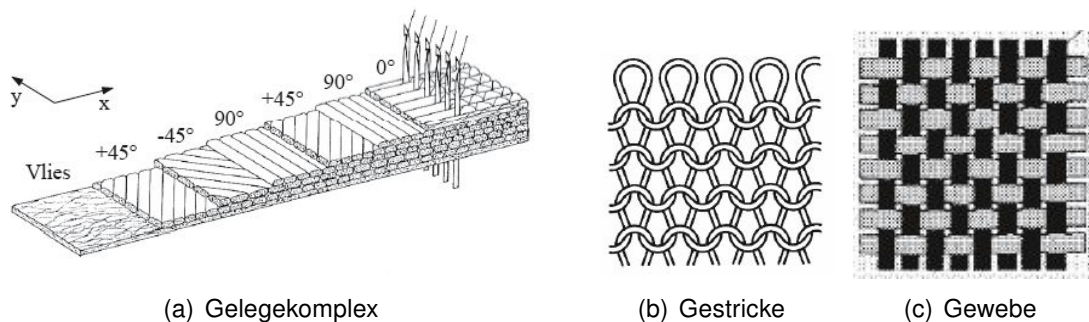


Abbildung 6: Verschiedene Faserhalbzeuge [17]

Der Zeitpunkt der Zusammenführung von Matrix und Fasern im Herstellungsprozess kann verschieden gewählt werden. Bei der Nutzung von Prepregverfahren werden die Fasermaterialien zuerst mit der Matrix getränkt, dann in Form gebracht und anschließend ausgehärtet. Dahingegen wird bei Injektionsverfahren zunächst die Formgebung vollzogen und dann werden die Fasern mit der Matrix getränkt und ausgehärtet.

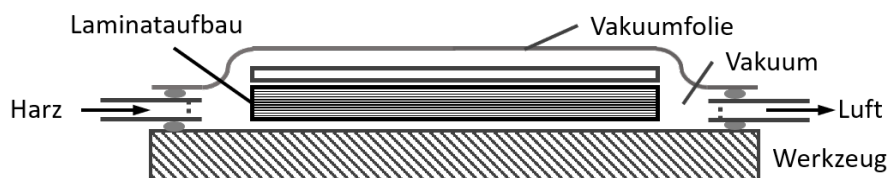


Abbildung 7: Schematische Zeichnung eines VARI-Aufbaus

Ein kostengünstiges Injektionsverfahren ist die "Vacuum assisted resin infusion"(VARI). [18] Bei diesem Verfahren wird ein einseitig anliegendes Werkzeug verwendet und es ist keine weitere äußere Druckbeaufschlagung nötig (Abbildung 7). Bei Anwendung für eine Orthese ist das Werkzeug der Gipsabdruck des Patienten. Auf das Werkzeug wird das Fasermaterial

geschichtet und anschließend mit einer Vakuumfolie abgedeckt. Über einen Zufluss wird bei diesem Verfahren das Harz mit Hilfe eines Vakuums durch den Faseraufbau hindurch gezogen und danach unter Vakuum ausgehärtet. [18]

Wird das Fasermaterial zunächst mit der Matrix imprägniert wird, wird dieses Faser-Matrix-Halbzeug Prepreg genannt. Diese Material wird in der Folge in Form gebracht und ausgehärtet. Die Aushärtung des Prepregs erfolgt in einem Autoklav, wie in dargestellt, mit dem ein Vakuum an den Laminataufbau angelegt werden kann. Gleichzeitig werden im Autoklaven Druck und Temperatur auf den Gesamtaufbau aufgebracht, die für ein Aushärten der Matrix benötigt werden. [17]

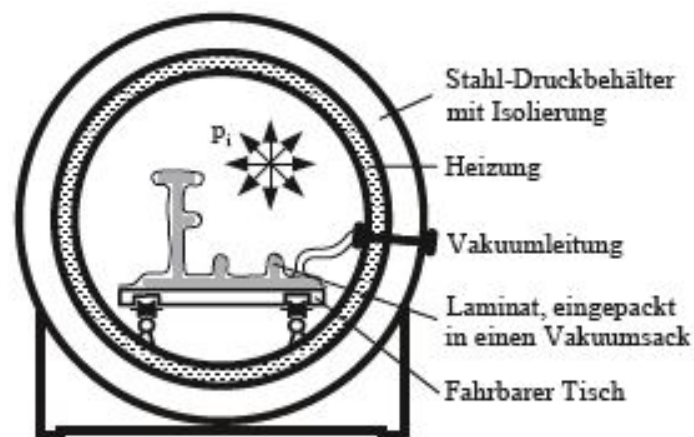


Abbildung 8: Schematische Zeichnung eines Autoklaven [17]

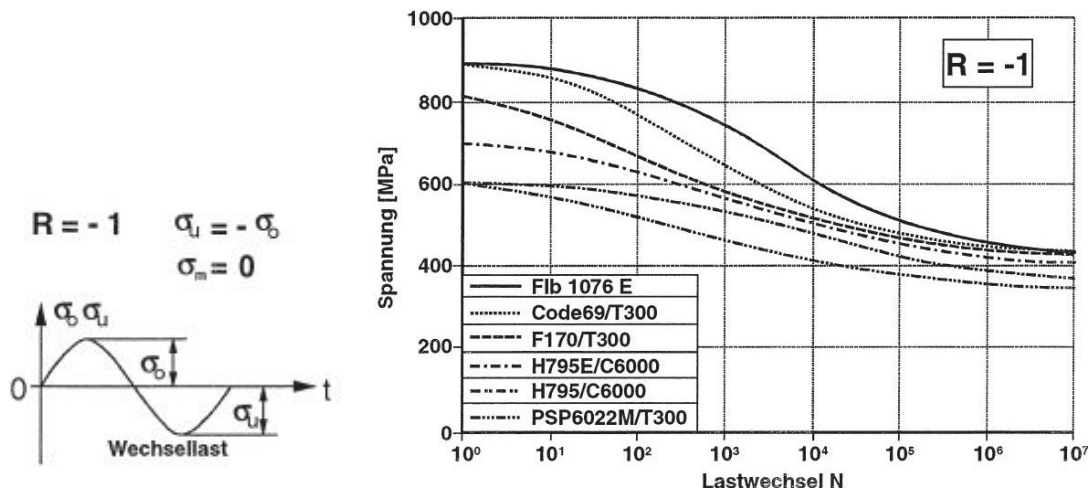
Die Injektionsverfahren bieten im Vergleich zum Prepreg den Vorteil, dass die Fasern nicht gekühlt gelagert werden müssen und auch keine verkürzte Verwendbarkeit haben. Außerdem ist der Formgebungsprozess ohne Prepreg weniger zeitkritisch, was besonders bei individuellen Bauteilen vorteilhaft ist. Ein Nachteil bei Injektionsverfahren ist die Prozessunsicherheit, da das Verhältnis von Fasern und Matrix zueinander nicht konstant ist. Prepreg ist deshalb vor allem für industrielle Produktionen geeignet bei denen konstante Ergebnisse gefordert sind, VARI hingegen ist auch für die handwerkliche Einzelstückfertigung geeignet. [17]

2.5 Dynamisches Verhalten von Faserverbundwerkstoffen

Sollen Werkstoffe in der Anwendung dynamische belastet werden, müssen die dynamischen Kennwerte bestimmt werden, um eine Abschätzung über deren Verhalten treffen zu können. Dazu wird im allgemeinen die Wöhlerlinie eines Werkstoffes bestimmt, indem das Material mit einer sinusförmig verlaufenden Last belastet wird (Abbildung 9(a)). Diese lässt sich mit Hilfe von der Amplitude und der Mittelspannung definieren. Zusätzlich kann auch das Spannungsverhältnis R herangezogen werden.

Die Proben werden in den Versuchen bis zum Versagen oder einer maximalen Schwingspielzahl belastet. Werden diese Versuche mit verschiedenen Lasten wiederholt, kann mit

Hilfe dieser Ergebnisse ein Wöhlerdiagramm erstellt werden. Hierbei ist die Belastungsamplitude über der Versagensschwingspielzahl für ein Spannungsverhältnis aufgetragen. Beispiele für Wöhlerdiagramme für verschiedene Faserverbundwerkstoffe sind in Abbildung 9(b) dargestellt.



(a) Sinusförmiger Verlauf der Belastung [19] (b) Wöhlerdiagramm für verschiedene kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe [19]

Abbildung 9: Dynamische Belastung von Faserverbunden

Im Allgemeinen werden im Wöhlerdiagramm in drei Bereiche unterschieden:

- Kurzzeitfestigkeitsbereich: Der Bereich mit geringeren Schwingspielzahlen, in dem sich die ertragbare Amplitude kaum verringert.
- Zeitfestigkeitsbereich: Der Bereich der mittleren Schwingspielzahlen. In diesem nehmen die maximal ertragbaren Lasten stetig ab.
- Dauerfestigkeit: Der Bereich, in dem das Material als dauerfest angesehen wird und eine Verringerung der Last keinen Einfluss mehr hat. Bei metallischen Werkstoffen wird der Beginn dieses Bereiches mit $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen definiert [20].

Liegt eine Last im Bereich der Dauerfestigkeit, hält das Material theoretisch unendlich lange. Bei einer Schwingspielzahl von Null entspricht die Last der statisch ertragbaren Last.

3 Orthesenherstellung

Im Folgenden wird der Herstellungsprozess einer individuellen Orthese im Sanitätshaus Sturm in Osterode beschrieben. Daneben wird auf die verwendeten Materialien und den genauen Aufbau einer kundenspezifischen Orthese eingegangen.

3.1 Referenzprozess der Orthesenherstellung

In diesem Abschnitt wird der Prozess beschrieben, in welchem eine für einen Patienten individuell angepasste KAF-Orthese hergestellt wird.

In der Vorbereitung der Herstellung wird ein Gipsmodell vom Bein des Patienten erstellt. Hierbei ist es nötig, auf eine Fußposition zu achten, die zum getragenen Schuh passt, und auf die genaue Position der eingeschlossenen Gelenke. Bevor auf dem Gipsmodell die Orthese angepasst wird, wird geprüft, ob das Modell angepasst werden muss, um einen optimalen Sitz zu gewährleisten. Dazu wird das Gipsmodell mit einem durchsichtigen Thermo-Plasten überzogen. Diese wird im Folgenden auf die Form der Zielorthese zugeschnitten. Die so entstandene Probeorthese wird mit Hilfe eines Heißluftföhns weiter an den Patienten angeformt, sodass diese eng und ohne Druckstellen anliegt. Die so entstandenen Änderungen werden anschließend auf das Gipsmodell übertragen.

Nun wird mit der Vorbereitung des Orthesenaufbaus begonnen. Dafür wird das Gipsmodell zunächst mit einem Polster überzogen, welches später direkt am Körper des Patienten anliegt. Dann werden die Gelenkbauteile eingepasst und die Form der Gelenkanker an den Körper angepasst (Abbildung 10).

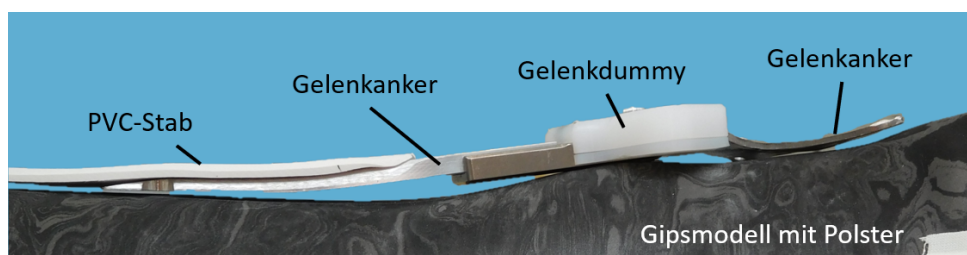


Abbildung 10: Fußgelenkdummy, Gelenkanker und PVC-Stäbe am Gipsmodell

In Verlängerung der Gelenkanker werden, wie in Abbildung 10 dargestellt, PVC-Profilstäbe an das Modell angepasst, die die Konstruktion, durch die Profilierung des Fasermaterials, stabilisieren. Solche Stäbe werden auch ums Bein laufend am Ober- und Unterschenkel angepasst. Sie stabilisieren die Beinaufnahmen und müssen gleichzeitig ein leichtes Aufbiegen zum Anlegen der Orthese möglich machen. An den Übergängen der Stäbe zum Gelenk sowie an den offenen Enden werden die Stäbe angeschliffen, um einen Sprung und eine Sollbruchstelle zu vermeiden. Das genaue Anpassen der Stäbe wird durch Biegung der vorher erhitzten Stäbe erreicht.

Nachdem die Stützstruktur vorbereitet wurde, wird die Gelenkaufnahme in das Gipsmodell eingeklebt. Diese dient als Fixpunkt für das Gelenk beim späteren Gießprozess. Außerdem werden die PVC-Stäbe an die Gelenke angeklebt und noch einmal abgeschliffen.

Zur Vorbereitung des Laminierprozesses wird ein Armierungsplan erstellt. Dieser beinhaltet den genauen Lagenaufbau des Laminats, angepasst an den jeweiligen Patienten. Nach diesem Plan werden dann die einzelnen Lagen zugeschnitten und die PVC-Stäbe werden mit den nötigen Lagen Faserschlauch überzogen. Die verwendeten Materialien sind in Kapitel 3.2 genauer beschrieben.

Bevor der Aufbau des Laminats beginnt, werden die Gelenkdummys, die das eigentliche Gelenk im Gießprozess schützen und teilweise ersetzen, eingefettet, um eindringendes Harz aufzuhalten. Dabei dürfen die Fasern jedoch nicht gefettet werden, da dies eine Haftung des Harzes verhindern würde.

Im nächsten Schritt wird der Vakuumaufbau für den Gießprozess vorbereitet. Dies bedeutet, dass das Modell und die Vakuumeinspannung eingebaut und mit einer Vakuumfolie überzogen werden. Zuvor werden noch die Ecken der Gelenkaufnahmen abgeklebt, um ein Einreißen der Folie zu vermeiden. Auf die angebrachte Folie wird nun Vakuum aufgebracht, um einen optimalen Sitz zu gewährleisten. Die Vakuumfolie wird dann mit einem Armierungsstrumpf bezogen, der als Fixierungsgrundlage für den Aufbau gedacht ist. Darauf folgend werden die verschiedenen Lagen des Laminats aufgebracht und mit Hilfe von Sprühkleber vorfixiert:

1. Orthopox, welches nur schlecht dehnbar ist, wird enganliegend und sehr genau aufgebracht. Diese erste Lage dient als Positionsorientierung für die folgenden Lagen. (siehe Abbildung 11(a)) Das Orthopoxgewebe dient dazu ein Splittern des Materials, sollte es zu einem Bruch kommen, und somit Verletzungen zu vermeiden.
2. Dann werden mehrere Lagen Carbonfaser aufgebracht.
3. Es folgt der mit Carbonschlauch überzogene Gelenkaufbau, der in den Gelenkaufnahmen und somit am Modell fixiert wird.
4. Der Gelenkaufbau wird mit weiteren Lagen, sowie einer Querverstärkung am Gelenkbeginn abgedeckt. (siehe Abbildung 11(b))
5. Über den Aufbau wird ein Damenstrumpf gezogen, um ein leichteres Überziehen der abschließenden Vakuumfolie zu gewährleisten.
6. Auf die anschließend übergezogene Vakuumfolie wird Vakuum aufgebracht und somit der Lagenaufbau vollendet.

Durch die an der Vakuumfolie vorbereitete Einfüllöffnung wird die Harz-Härter-Mischung eingegossen. Der Unterdruck zieht die Mischung langsam durch die Fasern. Dies wird durch manuelles Durchstreichen des Harzes und Ausstreichen der Luft unterstützt. Dabei



(a) Weiße Orthopoxlagen am Unterschenkel und Fuß (b) Gelegeaufbau mit Verstärkungen am Bein

Abbildung 11: Gelegeaufbau am Bein

muss besonders auf Lufteinschlüsse an Gelenken und Stäben geachtet werden. Sobald das Material voll durchgehärtet ist, wird die Orthese zugeschnitten und nachbearbeitet.

3.2 Daten zu den verwendeten Materialien

Die Materialien, welche von der Firma Sturm und auch im Zuge dieser Arbeit verwendet werden, sind hier nochmal zusammengefasst. Hierbei sind die bekannten Artikeldaten angegeben und die jeweiligen Datenblätter in Anhang A eingefügt.

- PA-Armierungsstrumpf (Artikel-Nr. VP8030-L110) von Fior und Gentz [21]
- Carbonfaserband - unidirektional, 50 mm (Artikel-Nr. 105B54) von Orthoreha Neuhof [22]
- Carbongewebe - Körperbindung (Artikel-Nr. 105B63) von Orthoreha Neuhof [22]
- Carbonschlauch (Artikel-Nr. 105B09) von Orthoreha Neuhof [22]
- PVC-Stäbe (Artikel-Nr. VP2033-L200) von Fior und Gentz [21]
- Orthopoxgewebe (Artikel-Nr. 616G181) von Ottobock [23]
- Damenstrumpf
- Epoxidgemisch (Artikel-Nr. KL1201/2) von Fior und Gentz [21]

Zusätzlich sind folgende Daten der Kohlenstofffasern bekannt:

- Materialdicke: $0,41 \pm 0,01$ mm [24]
- Zugfestigkeit der Faser: 3700 MPa [24]
- E-Modul der Faser: 230 GPa [24]

Die Faser des Orthopoxgewebe von Ottobock hat eine Zugfestigkeit von 667 MPa und ein E-Modul von 14,8 GPa [25].

3.3 Laminataufbau

Die Lamine bei individuellen Orthesen werden von den jeweiligen betreuenden Orthopädietechnikern festgelegt. Deshalb ist der Aufbau je nach Techniker unterschiedlich. Beim Sanitätshaus Sturm wird der Fußteil der beschriebene Orthese für einen 100 kg Patienten, wie in Tabelle 1 beschrieben, aufgebaut. Die dazugehörige Aufbauweisen für den Unter- und Oberschenkel sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 in Anhang B nachzulesen. Hierbei ist die Tabelle der Aufbaureihenfolge entsprechend aufgebaut. Die erste Zeile entspricht auch der ersten Lage auf der Vakuumfolie.

Tabelle 1: Laminataufbau am Fuß für einen 100 kg Patienten nach Sturm

Lagen	Orthopox- gewebe	Carbon- band	Carbon- gewebe	Carbon- schlauch	PA-Armie- rungs- strumpf	Damen- strumpf
1					X	
1	X					
1			je 1/2 außen und innen lang			
1			je 1/2 außen und innen kurz			
1		entlang der Sohle				
1		unter dem Gelenk- anker				
3				X		
1		über dem Gelenk- anker				
1			je 1/2 außen und innen kurz			
1			ganze Sohle			
1						X

Da in dieser Arbeit der Fokus auf dem Aufbau der Fußsohle liegt, ist in Tabelle 2 zusätzlich der Laminataufbau des Fußes, ohne Gelenkanker, für einen Patienten mit 70 kg Gewicht beschrieben. Bei diesem Aufbau, wie auch dem für 100 kg, ist nur die Gestaltung, die die Fußsohle im Abrollbereich betrifft, relevant für die Überlegungen in dieser Arbeit. Dieser Aufbau ist zusätzlich in Abbildung 19(1) verbildlicht.

Tabelle 2: Laminataufbau am Fuß, ohne Gelenkanker, für einen 70 kg Patienten nach Sturm

Lagen	Orthopox- gewebe	Carbon- band	Carbon- gewebe	Carbon- schlauch	PA-Armie- rungs- strumpf	Damen- strumpf
1					X	
1	X					
1			je 1/2 außen und innen lang			
1		entlang der Sohle				
1			je 1/2 außen und innen kurz			
1			ganze Sohle			
1						X

4 Berechnung von Festigkeiten an Faserverbundwerkstoffen

Wie bei den klassischen Werkstoffen kann auch bei Faserverbundwerkstoffen eine theoretische Berechnung der statischen Festigkeiten und des Versagens durchgeführt werden. Die Strukturmechanik von Faserverbunden ist jedoch in manchen Aspekten komplexer, da die Werkstoffe im Allgemeinen anisotrop und aus Einzelschichten zusammengesetzt sind. Im Folgenden wird eine Festigkeitsberechnung für Faserverbundkunststoffe beispielhaft dargestellt.

Dabei müssen verschiedenste Aspekte beachtet werden, wie die Belastung, die Materialeigenschaften und die Materialreaktion. Durch die Anisotropie der Werkstoffe ist die Belastungsrichtung der Anwendung entscheidend, weshalb in der Strukturmechanik mit Matrixdarstellung gearbeitet wird.

Des Weiteren wird für die folgenden Berechnungen von einem ebenen Spannungszustand an dünnwandigen Bauteilen ausgegangen. Dadurch können vereinfachte Berechnungsarten genutzt werden und die Matrizengröße reduziert werden. [17]

4.1 Materialwerte

Da die Werkstoffe aus verschiedenen und unterschiedlich ausgerichteten Schichten bestehen, hat jeder Werkstoff seine eigenen Kennwerte. Diese können entweder durch Versuche oder durch Berechnung bestimmt werden. Auch wenn die berechneten Werte abweichen können, bietet eine Berechnung mehr Flexibilität, insbesondere für eine erste Abschätzung. Für die strukturmechanische Berechnung müssen zunächst die Kennmatrizen für Einzelschichten der verwendeten Werkstoffe bestimmt werden: die Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix. Diese gelten jeweils für eine Einzelschicht, bestehend aus einer bestimmten Faser-Matrix-Kombination. Hierbei fließen die folgenden Einzelkennwerte in die Bestimmung mit ein, die für jede Komponente bekannt sein müssen:

- Längs-E-Modul E_l
- Quer-E-Modul E_q
- Schubmodul G_{ql}
- Querkontraktionszahl ν
- Faservolumengehalt φ

Für das Matrixmaterial ist das E-Modul in Quer- und Längsrichtung gleich, da es isotrop ist. Bei den Querkontraktionszahlen des Fasermaterials ist die Bestimmung jedoch problematisch, weshalb diese meist direkt im Faser-Matrix-Verbund bestimmt wird. Dennoch

wird im folgenden auch dessen Berechnung beschrieben. Die Werte der Einzelschichten können nach verschiedenen Gleichungen berechnet werden, wobei die Unterschiede auf experimentell bestimmten Anpassungen basieren. Die häufig angewendeten Mischungsregeln nach Puck sind im folgenden dargestellt. Dabei werden die Werte der Matrix durch den Index m und die der Faser durch f gekennzeichnet. Die Querkontraktionszahlen werden durch die Indizes 12 in Faserrichtung und 21 quer zur Faserrichtung benannt. [17, 19]

$$E_l = E_{fl} \cdot \varphi + E_m \cdot (1 - \varphi) \quad (1)$$

$$E_q = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \cdot \frac{1 + 0,85\varphi^2}{(1 - \varphi)^{1,25} + \frac{E_m}{(1 - \nu_m^2)E_{fq}} \cdot \varphi} \quad (2)$$

$$G_{ql} = \frac{G_{mql}(1 + 0,6\varphi^{0,5})}{\frac{G_{mql}}{G_{fq}} \cdot \varphi + (1 - \varphi)^{1,25}} \quad (3)$$

$$\nu_{12} = \varphi \cdot \nu_f + (1 - \varphi)\nu_m \quad (4)$$

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12}}{E_l} \cdot E_q \quad (5)$$

Mit diesen Kennwerten können in der Folge die Steifigkeitsmatrix Q und Nachgiebigkeitsmatrix S für die Einzelschichten bestimmt werden. Diese sind das Äquivalent des E-Moduls für Faserverbundwerkstoffe und verbinden die Spannung σ und die Dehnung ϵ :

$$\sigma = Q \cdot \epsilon \quad (6)$$

$$\epsilon = S \cdot \sigma \quad (7)$$

Die Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrix setzen sich, wie in Gleichung 9 und Gleichung 10 dargestellt, aus den zuvor bestimmten Werten zusammen. Durch die Betrachtung eines ebenen Spannungszustands, ergeben sich die Indizes der jeweils vorderen Matrizen. Die Indizes der Matrixelemente entsprechen den Matrixpositionen in den Matrizen ohne eine Vereinfachung durch den ebenen Spannungszustand. [17]

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_l}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_l}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_q}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_q}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{ql} \end{bmatrix} = S^{-1} \quad (8)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_l} & \frac{-\nu_{21}}{E_q} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_l} & \frac{1}{E_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{ql}} \end{bmatrix} = Q^{-1} \quad (9)$$

$$(10)$$

Für den Fall, dass die verwendeten Lagen in der Ebene gedreht verwendet werden, müssen die Matrizen dem Winkel entsprechend transformiert werden. In diesem Anwendungsfall gibt es keine gedrehten Schichten, weshalb auf die Transformation nicht näher eingegangen wird und mit den nicht transformierten Matrizen weitergearbeitet werden kann. Ausgehend von den Materialdaten für die Einzelschichten kann im Folgenden das Laminat definiert werden. [17]

4.2 Steifigkeitsanalyse

Die Auslegung und Berechnung eines Laminats nach der klassischen Laminattheorie kann in Steifigkeits- und Festigkeitsanalyse geteilt werden. In ersterer wird die Steifigkeit des Laminats bestimmt und anschließend die entstehenden Verformungen im Laminat. Damit kann auf die Spannungen in den Einzelschichten geschlossen werden. Die Spannungen werden für eine Festigkeitsanalyse nach verschiedenen Versagenskriterien benötigt werden. Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Steifigkeitsanalyse vervollständigt. Hierfür ist entscheidend, dass der Aufbau durch Lagenanzahl und Orientierung bestimmt ist. Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass die verwendete Matrix bei allen Einzelschichten die gleiche ist.

Für die Berechnung der Verformungen können verschiedene Theorien genutzt werden. In diesem Fall wird die klassische Laminattheorie für den Mehrschichtverbund als Scheiben- und Plattenelement genutzt. Diese sieht nicht nur Verformungen in der Ebene, sondern auch Krümmungen vor, wie sie auch bei Biegung auftreten. [17]

Im ersten Schritt wird hierfür die sogenannte ABD-Matrix bestimmt. Diese besteht aus den folgenden drei Matrizen:

A Scheiben-Steifigkeitsmatrix

B Koppel-Steifigkeitsmatrix

D Platten-Steifigkeitsmatrix

Mit Hilfe der ABD-Matrix kann das „Elastizitätsgesetz des kombinierten Scheiben-Plattenelements“ formuliert werden. [17] Dieses stellt den Zusammenhang zwischen auftretenden Kräften und Momenten und den Verzerrungen und Wölbungen für das Gesamtlaminat her. Hierbei bestimmen, wie zuvor, die Matrixpositionen die Indizes des Matrixelement für den ebenen Spannungszustand.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Dafür müssen jedoch zunächst die einzelnen Matrizen bestimmt werden. Hierbei spielen zusätzlich zu den Einzelsteifigkeitsmatrizen Q_k der Schichten auch die Schichtdicke t_k und der Abstand der Lage zu der Bezugsfläche z_k eine Rolle. So lassen sich Elemente für die ABD-Matrix folgender Maßen berechnen:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} \cdot t_k \quad (13)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} \cdot t_k \cdot \left(z_k - \frac{t_k}{2} \right) \quad (14)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij,k} \cdot \left(\frac{t_k^3}{12} + t_k \left(z_k - \frac{t_k}{2} \right)^2 \right) \quad (15)$$

Um im Anschluss die Gesamtverformungen berechnen zu können, muss die ABD-Matrix invertiert werden. [17] Mit Hilfe dieser invertierten Matrix können dann aus den wirkenden Kräften und Momenten die entstehenden Dehnungen und Krümmungen bestimmt werden.

$$\begin{bmatrix} \epsilon \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad (16)$$

In Anschluss an die Bestimmung der Gesamtverformungen können die Verformungen der Einzelschichten k berechnet werden (Gleichung 17). Diese sind bei einer Krümmung der Ebene von der Position der Schichten abhängig. [17]

$$\epsilon_k(z) = \begin{bmatrix} \epsilon_{kx}(z) \\ \epsilon_{ky}(z) \\ \gamma_{kxy}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} + z \cdot \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Wird nun die Dehnung der Einzelschichten mit der jeweiligen Steifigkeitsmatrix der Einzelschicht multipliziert, können die Spannungen in den Einzelschichten bestimmt werden:

$$\sigma_k(z) = Q_k \cdot \epsilon_k(z) \quad (18)$$

4.3 Festigkeitsanalyse

Nachdem die Spannungen in den Einzelschichten bestimmt wurden, kann eine Festigkeitsanalyse durchgeführt werden. Dabei gibt es verschiedene Ansätze, wobei die Fließkriterien einen zu den klassischen Kriterien vergleichbaren Ansatz wählen. Andere Ansätze betrachten die verschiedenen Brucharten, wodurch meist genauere Ergebnisse erreicht werden, aber die Berechnungen aufwändiger werden. Hierbei werden meist verschiedene die folgenden Bruchkriterien betrachtet:

Faserbruch Bruch der Fasern selbst

Zwischenfaserbruch Matrixbruch zwischen und entlang der Fasern

Bei allen Berechnungen werden für die Materialkennwerte folgende Bezeichnungen verwendet:

$X_t, R_{\parallel}^+$ Längszugfestigkeit

$X_c, R_{\parallel}^-$ Längsdruckfestigkeit

$Y_t, R_{\perp}^+$ Querkzugfestigkeit

$Y_c, R_{\perp}^-$ Querdruckfestigkeit

$S_L, R_{\perp\parallel}$ Längsschubfestigkeit

$S_T, R_{\perp\perp}$ Querschubfestigkeit

Der einfachste Ansatz zur Festigkeitsbeurteilung, ist ein Fließkriterium, das Kriterium der maximalen Spannungen. Dabei wird das Versagen mittels eines einfachen Vergleiches berechnet: [19]

$$\text{Max} \left(\left| \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| \frac{\tau_{12}}{S} \right| \right) < 1 \quad (19)$$

Wenn einer der Faktoren größer-gleich eins ist, also die wirkenden Spannungen die Festigkeiten überschreitet, ist das Versagenskriterium erfüllt und das Laminat versagt. Dieses Kriterium bildet allerdings aufgrund seiner Einfachheit nicht die Realität ab. Deshalb ist es nur als erste Abschätzung geeignet.

Um genauere Ergebnisse zu bekommen, wird eine Berechnung der Schichten nach Puck durchgeführt. Diese Berechnung beachtet den Faserbruch und den Zwischenfaserbruch und ist das aktuell empfohlene Berechnungsverfahren [19].

Das Kriterium für den Faserbruch ist im Folgenden dargestellt. Hierbei wird zwischen einer Druck und Zugbelastung unterschieden. [19]

$$\frac{\sigma_1}{R_{\parallel}^+} = 1 \text{ bei } \sigma_1 > 0 \quad (20)$$

$$\frac{\sigma_1}{R_{\parallel}^-} = -1 \text{ bei } \sigma_1 < 0 \quad (21)$$

Die Berechnungen für den Zwischenfaserbruch sind im Gegensatz hierzu deutlich aufwändiger. Beim Zwischenfaserbruch für einen ebenen Spannungszustand können nach Puck drei Bruchmodi unterschieden werden.[26] Diese sind abhängig von den jeweiligen Quer- und Schubspannungen und bilden verschiedene, in Abbildung 12 dargestellte Bruchbilder aus. Bruchmodus A beschreibt das Verhalten bei Zug- und Schubbeanspruchung. Bei Bruchmodus B und C liegen Druckbeanspruchungen in Kombination mit Schubbeanspruchung vor. Wenn die Druckbeanspruchung gegenüber der Schubbeanspruchung überwiegt, liegt das Bruchverhalten des Modus C vor.

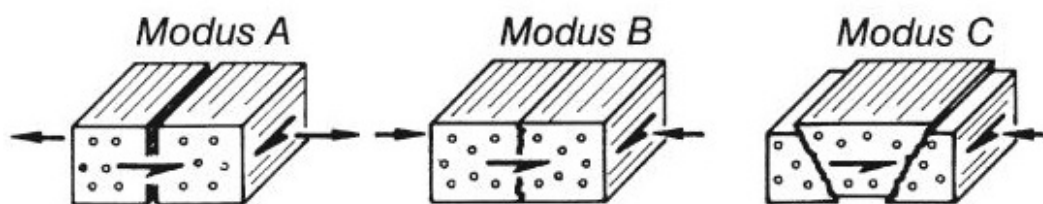


Abbildung 12: Bruchbild der Bruchmodi [26]

Welcher Bruchmodus in jedem Fall angewendet wird, kann anhand definierter Kriterien bestimmt werden. Diese sind in Anhang C in Abbildung 33 mit den dazugehörigen Bruchbedingungen dargestellt. Wenn die Ergebnisse der Bruchbedingungen unterhalb von eins liegen, ist die Festigkeit rechnerisch bewiesen. Die Grenzen für die Bruchmodi sind auf Basis der Bruchkurve für den Zwischenfaserbruch festgelegt, die in Abbildung 13 dargestellt ist.

In der Grafik sind die drei Geltungsbereiche der Bruchmodi in gekennzeichnet.

Der Modus A liegt in dieser Grafik rechts der Achse und damit, wie zuvor beschrieben, bei Zugspannungen vor. Währenddessen liegen die Bruchmodi B und C im Bereich der Druckspannungen und damit links der Y-Achse. Sobald die auftretenden Belastungen außerhalb der Bruchkurve liegen, kommt es zum Versagen des Materials durch einen Zwischenfaserbruch. [19, 26]

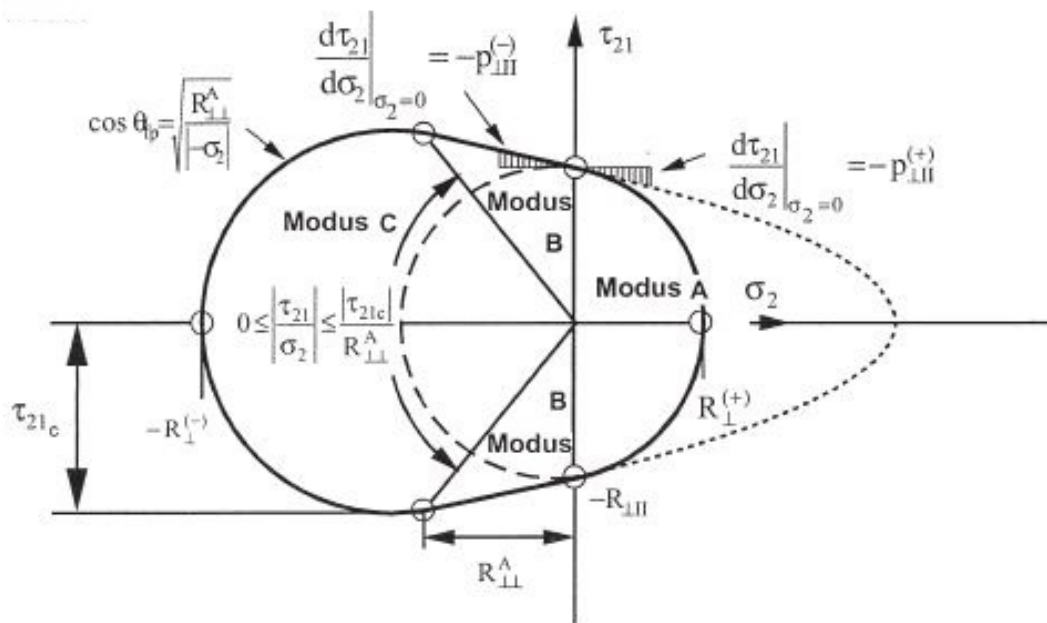


Abbildung 13: Bruchkurve mit Bruchmodiabschnitten [19]

4.4 Notwendige Werte

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Berechnungen wird versucht einzugrenzen, welche Materialkennwerte für eine händische Berechnung der Anwendung benötigt werden. Wenn hierbei von einer Belastung durch ein Biegemoment ausgegangen wird, wie in der betrachteten Anwendung, gibt es jedoch keine Reduktion der Kennwerte.

Alle Werte, welche für eine solche Berechnung bestimmt werden müssen, sind in Tabelle 3, in Reihenfolge des Recheneinsatzes, dargestellt. Da für eine umfassende Berechnung Versuche zur Kennwert-Bestimmung durchgeführt werden müssen, wird in der Tabelle von Werten für Einzelschichten aus einer bestimmten Matrix-Faser-Kombination ausgegangen.

Tabelle 3: Zu definierende Kennwerte für eine Berechnung

Definition	Wert	Informationsbeschaffung
Längs-E-Modul der Schicht	E_l	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Quer-E-Modul der Schicht	E_q	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Schubmodul der Schicht	G_{ql}	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Querkontraktionszahl der Schicht	$\nu_{12}, \nu_{\perp\parallel}$	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Querkontraktionszahl der Schicht	$\nu_{21}, \nu_{\parallel\perp}$	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Schichtdicke	t_k	Dickenmessung einer Einzelschicht
Abstand der Schicht zur Bezugsfläche	z_k	bekannt aus individuellem Aufbau
wirkendes Biegemoment	M_b	Kraftaufnahme aus Ganganalyse zur Momentenabschätzung
Längszugfestigkeit der Schicht	$X_t, R_{\parallel}^+$	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Längsdruckfestigkeit der Schicht	$X_c, R_{\parallel}^-$	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Querzugfestigkeit der Schicht	$Y_t, R_{\perp}^+$	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Querdruckfestigkeit der Schicht	$Y_c, R_{\perp}^-$	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Längsschubfestigkeit der Schicht	$S_L, R_{\perp\parallel}$	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht
Querschubfestigkeit der Schicht	$S_T, R_{\perp\perp}$	materialtechnische Untersuchung der Einzelschicht

5 Entwicklung eines Simulationskonzeptes

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Konzept für ein Simulationsprogramm, mit dem Orthesen in verschiedenen Aspekten geprüft werden können, entstehen. Während die Gestaltung der Simulation in Kapitel 5.2 dargelegt wird, werden zuvor die Ziele der Simulation in Kapitel 5.1 erläutert. Abschließend werden in Kapitel 5.3 mögliche alternative Anwendungen und damit verbundene Ergänzungen beschrieben.

5.1 Simulationsziel

Das Ziel der gewünschten Simulation ist es, an Hand von gegebenen Parameterwerten eine Empfehlung für mögliche Laminatgestaltungen einer Orthese zu generieren. Hierbei wird sich zunächst auf den Bereich der Fußsohle einer Orthese fokussiert.

Zusätzlich zu der anwenderbezogenen Nutzung soll dieses Simulations-Tool Möglichkeiten zur Optimierung eröffnen, in dem es die Austestung im Entwicklungsrahmen von neuen Laminatgestaltungen ermöglicht. Das bedeutet, es könnten neue Materialien und auch grundlegende Aufbauveränderungen mit diesem Tool überprüft werden, sodass die Entwicklung auf die aussichtsreicheren Ideen konzentriert werden kann.

Durch diese Möglichkeiten der Nutzung sollen die Arbeitszeit, die zur Planung der Laminatgestaltung nötig ist, reduziert und die nötige Materialmenge optimiert werden. Dadurch können nicht nur in der Herstellung, sondern auch in der Planung von individuellen Orthesen Geld und Zeit eingespart werden.

5.2 Simulationsentwicklung

In Abbildung 14 sind die grundlegenden Aspekte für die Simulation dargestellt. Anhand dieser Grafik wird im Folgenden das Konzept für eine Simulation beschrieben.

Für die anwendungsbezogene Nutzung der Simulation wäre eine einfache Bedienoberfläche ein wichtiger Faktor im Handling (gelber Bereich in Abbildung 14). Vom Grundsatz her muss es ermöglicht werden, über die Eingabe von verschiedenen Parametern einen Aufbauvorschlag zu bekommen. Hierbei wären zwei Varianten denkbar:

Ablesevariante Dies ist eine Möglichkeit, welche digital oder analog umgesetzt werden kann. Hierbei würden anhand vorausgewählter Parameter Laminatgestaltungen simuliert. Die Ergebnisse würden dann in einem Matrixaufbau hinterlegt werden, sodass bei Bedarf die entsprechende Information einfach abgelesen werden kann.

Eingabevariante Hierbei wäre die Benutzeroberfläche mit Ein- und Ausgabefeldern und nicht als Matrix gestaltet. Dabei würden nur die Ergebnisse angezeigt, die konkret gefordert wurden. Die Daten könnten in diesem Fall entweder, wie bei der Matrix, hinterlegt werden, oder mittels direkter Simulation neu berechnet werden.

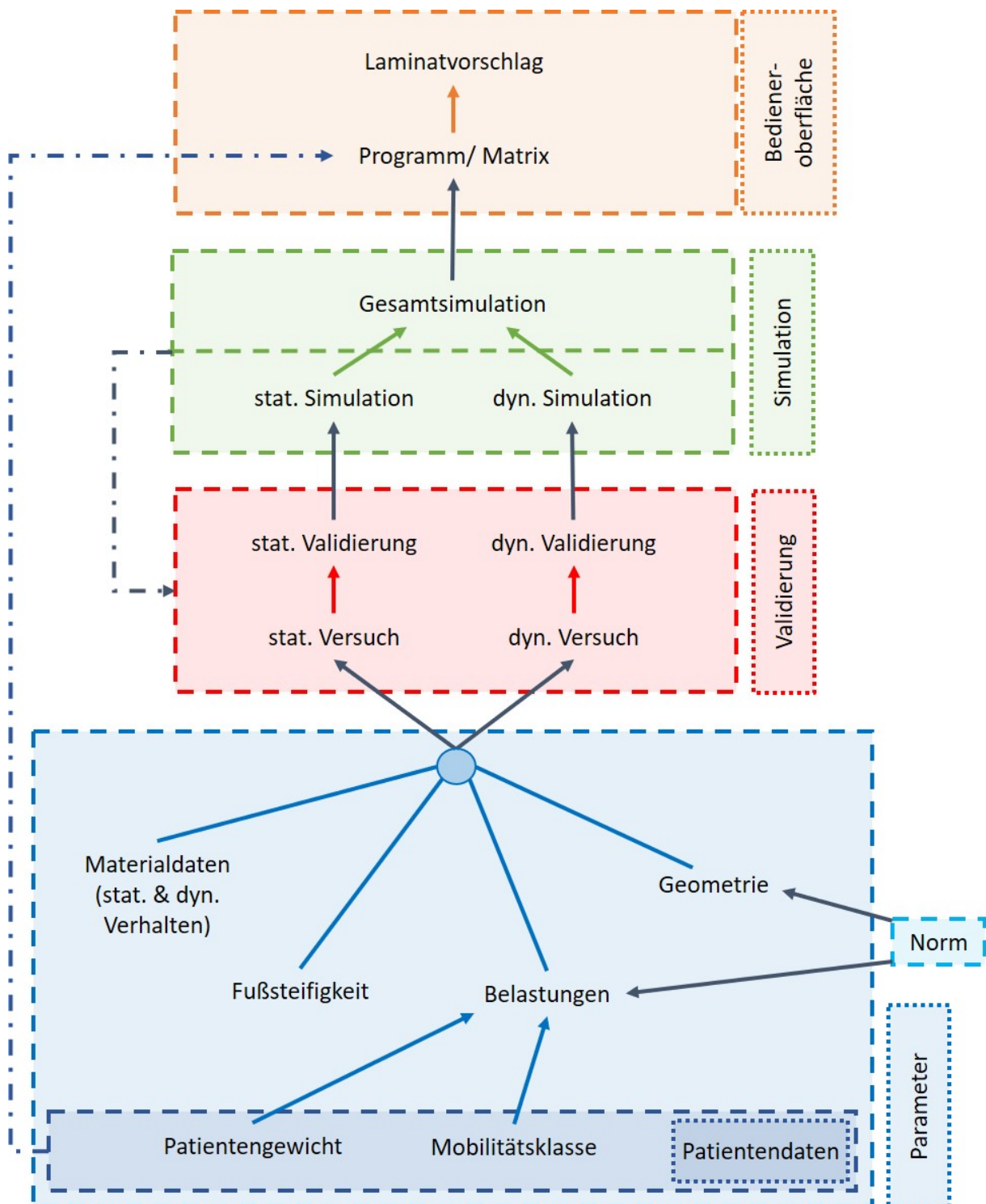


Abbildung 14: Simulationskonzeptzeichnung

Ein Vorteil der Ablesevariante ist die einfache Verfügbarkeit von Daten und der Überblick darüber. Zusätzlich ist bei dieser auch eine analoge Darstellung (z.B. als Plakat) denkbar, was besonders in Werkstätten häufig von Vorteil ist.

Bei der Eingabevariante hingegen wären die Daten konzentrierter dargestellt, sodass die Verwechslungsgefahr verringert wird.

Bei einer Variante mit hinterlegter Simulation wäre eine größere Parameterflexibilität gegeben, die allerdings eine höhere Rechenzeit benötigen kann.

In Hinblick auf eine langfristige Gestaltung der Nutzeroberfläche ist eine Eingabevariante wahrscheinlich eine bessere Wahl, da so mehr Eingabeparameter ermöglicht werden und eine kontinuierliche Bedürfnisanpassung möglich ist. Hierbei könnte zum Beispiel auch das Krankheitsbild als Parameter aufgenommen werden.

Auch bei der digitalen Variante könnte, statt einer direkten Simulation, auf eine vorbereitete Datenbank mit ausgewählten Parametern zugegriffen werden. Als begrenzte Lösungen können Dokumente zum Ablesen dennoch ergänzend vorteilhaft sein.

Zusätzlich zu der Oberfläche ist für den Nutzer auch wichtig, welche Parameter für die Vorschlagsauswahl genutzt werden (blauer Bereich in Abbildung 14). Diese sind gleichzeitig Eingabeparameter für die Nutzeroberfläche, aber damit auch die Parameter für Simulation selbst. Die wichtigsten Parameter, welche im Folgenden näher erläutert werden, sind:

- Patientengewicht
- Mobilitätsklasse
- Materialdaten (stat. und dyn. Verhalten)
- Geometrie
- Fußsteifigkeit

In der Praxis sind für die Orthesengestaltung vor allem das Patientengewicht sowie die Mobilitätsklasse und das Krankheitsbild entscheidend (dunkelblauer Bereich in Abbildung 14). Da sich diese Arbeit im ersten Schritt nur auf die Gestaltung einer teilflexiblen Fußsohle fokussiert, ist das Krankheitsbild zunächst so gesehen festgelegt. Die Mobilitätsklasse hat bisher nur einen geringeren Einfluss und wird auch in der DIN EN ISO 10328 nicht näher beachtet. Für Optimierung der Materialnutzung bei der Orthesenherstellung ist die Mobilitätsklasse aber ein wichtiger Ansatzpunkt und kann im Rahmen der dynamischen Auslegung der Orthese eine Rolle spielen. Diese Möglichkeit wird in der Folge noch näher erläutert. Sehr wichtig für die Dimensionierung ist auch das Patientengewicht. Dieses hat einen großen Einfluss auf die Beanspruchung der Orthese und wird auch in der DIN EN ISO 10328 [14] als entscheidender Faktor genutzt, um die Orthesen zu klassifizieren.

Zusätzlich zu den Patientendaten fließen weitere Parameter mit in die Simulation ein. Ein entscheidender Faktor ist die Materialauswahl, denn diese kann je nach Entwicklungsstand und Wunsch vorgegeben werden oder zur Austestung selbstständig variiert werden. Dies bedeutet, dass je nach Nutzer mehrere Masken sinnvoll wären. Von den Materialien, welche für die Herstellung verwendet werden sollen, werden die verschiedenen Materialparameter benötigt (siehe Kapitel 4.4). Es müssen in dem Simulationsprogramm alle Materialien und deren Daten gespeichert werden, sodass diese in der Simulation genutzt werden können. Diese gespeicherten Daten müssen Einzelschichtdaten sein, damit der Lagenaufbau flexibel gestaltet werden kann. Bei der Gestaltung ist darauf zu achten, dass in einem Laminat nur Materialien mit der selben Matrix verwendet werden dürfen. Hierbei besteht die größte Herausforderung darin, an die benötigten Daten zu gelangen, da die Hersteller diese Daten nicht vorliegen haben - insbesondere für bestimmte Materialkombinationen.

Weitere Parameter, welche jedoch nicht vom Nutzer beeinflusst werden sollen, sind die in den Normen genannten Belastungen, die Geometrie und die Fußsteifigkeit. Die Geometrie soll dahingehend vereinfacht werden, dass die Fußsohle in der Simulation als Ebene angesehen wird.

Außerdem muss die Geometrie der Randbedingungen festgelegt werden. Diese orientieren sich an der DIN EN ISO 10328 und legen fest, wo und wie die Lasten aufgebracht werden. In Abbildung 15 ist der Prüfaufbau aus dieser Norm dargestellt. Hierbei ist der Prothesenfuß durch die dargestellten Kräfte belastet. Diese Belastungen sollen für die Simulation dementsprechend auf die Orthesenfußsohle aufgebracht werden.

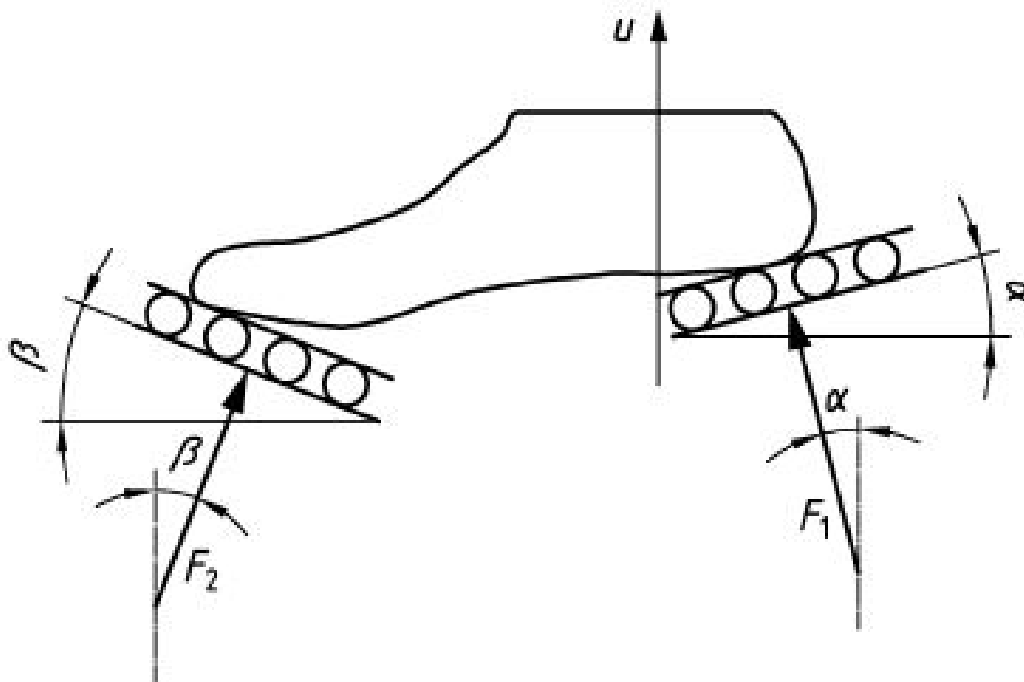


Abbildung 15: Fuß in Prüfeinrichtung [14]

Die Norm gibt als Parameter, basierend auf dem Patientengewicht, Lastwerte vor, welche minimal ausgehalten werden müssen. Es sind Lasten für eine statische und dynamische Prüfung vorgesehen. Die dynamischen Werte sind hierbei jedoch unabhängig von der Mobilitätsklasse [14]. Daher kann hierdurch, bezogen auf die Mobilitätsklasse, nur eine Aussage darüber getroffen werden, wie lange es für jede Klasse dauert, bis die in der Norm geforderten Lastwechsel erreicht werden.

In der Norm sind $2 \cdot 10^6$ Schwingspiele als Prüfziel angegeben - also die Dauerfestigkeit. Um diese Schwingspielzahlen gegenüber der Mobilitätsklasse einzuordnen, ist eine Abschätzung der Schritte pro Tag nötig. Die Überlegungen basieren darauf, dass im Alltagsgebrauch 10000 Schritte am Tag als gute Orientierung für einen erwachsenen Menschen dienen. Dies entspricht 5000 Schrittzyklen pro Tag und somit $1825 \cdot 10^3$ Belastungen pro Jahr. Da es vier verschiedene Mobilitätsklassen gibt, wird zur Abschätzung angenommen, dass ein Viertel der 10000 Schritte für die niedrigste Mobilitätsklassen gelten. Mit diesen Überlegungen ergeben sich für die verschiedenen Klassen die Belastungen in Tabelle 4.

Tabelle 4: Schritte nach Mobilitätsklassen

Mobilitätsklasse	1	2	3	4
Schritte pro Tag	2500	5000	7500	10000
Schrittzyklen pro Tag	1250	2500	3750	5000
10^3 Schrittzyklen pro Jahr	456,25	912,5	1368,75	1825
Jahre bis Erreichen von $2 \cdot 10^6$ Schrittzyklen	4,38	2,19	1,46	1,10

Eine Orthese soll laut Vorgabe der Krankenkassen zwei Jahre lang halten. [27] Wird berechnet, wie lange es bis zum Erreichen der in der Norm geforderten Schwingspielzahl dauert, ergibt sich, dass bei diesen überschlägigen Berechnungen die Mobilitätsklassen 3 und 4 den Grenzwert schon in weniger als zwei Jahren erreichen. Trotzdem ist die in der Norm angegebene Schwingspielzahl als sinnvoll einzustufen, da dies der Dauerfestigkeit entspricht.

Ein weiterer und in dieser Betrachtung letzter Parameter ist die Fußsteifigkeit. Dieser Wert stellt die größte Herausforderung für eine korrekte Simulation dar. Die Norm, welche für die Betrachtung der Belastungen genutzt wird, ist die DIN EN ISO 10328. Diese wird, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, für Prothesen genutzt. Bei der Anwendung auf Orthesen gibt es die Schwierigkeit, dass Orthesen ohne Fuß den vorgesehenen Belastungen nicht stand halten können. Orthesen sind ausschließlich für die Belastung mit Fuß vorgesehen. Dieser liefert eine gewünschte Unterstützung und Steifigkeit für die Orthesenfußsohle. Werden nun die Belastungen ohne die Steifigkeitsunterstützung durch den Fuß betrachtet, würde die Sohle der Orthese in der Simulation den Belastungsfällen nicht standhalten.

Dies bedeutet, dass die Fußsteifigkeit in der Simulation durch eine entsprechende Randbedingung ersetzt werden muss. Zu diesem Einfluss sind bisher keine Werte bekannt. Der Steifigkeitsanteil des Fußes muss einzeln untersucht werden. Dabei ist schon anhand von Kapitel 2.1 erkennbar, dass die Steifigkeit im Bereich des Zehengrundgelenks verringert,

beziehungsweise an dieser Stelle ein Gelenk vorgesehen ist. Dieses besitzt trotz der Gelenkfunktion aufgrund von Sehnen und Muskeln einen gewissen Widerstand. Im restlichen Bereich des Fußes hingegen ist die Steifigkeit deutlich erhöht.

Diese Parameter fließen direkt in die Simulation und damit auch in die Simulationsvalidierung ein (Abbildung 14).

Die Simulation (grüner Bereich in Abbildung 14) und die Validierung (roter Bereich in Abbildung 14) der Simulation sind zwei Schritte, welche Hand in Hand miteinander laufen. Die Validierung wird durch Versuche durchgeführt, die genau dem Simulationsaufbau und dessen Randbedingungen entsprechen. Hierbei werden Werte für bestimmte Belastungsparameter bestimmt und mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Die Validierungsergebnisse sind ein Feedback an die Simulation und geben einen Eindruck, wie weit entfernt das simulierte Ergebnis von dem praktischen ist. Dem entsprechend müssen Simulationsaspekte korrigiert und angepasst werden.

Aufgrund der Komplexität der Materialmodelle und Reaktionen ist eine dynamische Simulation extrem aufwändig.

Als Zwischenergebnisse der Simulationsschritte könnten verschiedene Parameter, wie zum Beispiel Spannungen und Dehnungen, ausgegeben werden sowie auch Versagensbeurteilungen. Diese Versagensparameter können auch denjenigen entsprechen, welche zuvor bei den theoretischen Berechnungen beschrieben wurden (Kapitel 4). Für die konkrete Anwendung sollte dann vor allem mit diesen gearbeitet werden, um die Ausnutzung des Materials zu optimieren. Allerdings sind die Spannungen und Dehnungen für den Vergleich mit den Validierungsversuchen besser geeignet.

Wenn alle Umsetzungsaspekte des Konzeptes (Abbildung 14) geklärt sind, von der Benutzeroberfläche über die Parameter, die Validierungsversuche und die Simulation, kann das Grundmodell erstellt werden.

5.3 Alternative Nutzung und Ergänzung

Für die Nutzungen im Bereich der Entwicklung und Verbesserung der Orthesen kann das Grundmodell weitergenutzt und zusätzlich die Parameter-Variabilität erweitert werden. Einerseits können die Belastungsparameter angepasst und somit eine weitere Optimierung der Orthesen erreicht werden. Andererseits kann das Tool durch weitere Materialien inklusive Materialdaten im Bereich der Verbesserung genutzt werden, um verschiedenste Materialien in Form und Art auszutesten und zu prüfen, ob dadurch ein Mehrwert erreicht werden kann. Und insgesamt kann durch Erweiterung der Materialkombinationen eine bessere Werkstoffnutzung erreicht werden.

Bei der Entwicklungsnutzung der Simulation kann wie zuvor mit den Versagenskriterien gearbeitet werden. Zusätzlich können zum Beispiel auch die Verformungen zu der Beurteilung der Versuche genutzt werden.

6 Versuche zur Lamineinschätzung

Da eine vollständige Simulation und Versuchsdurchführung nicht möglich ist, wurden Versuche genutzt, die als erste Abschätzung einer Eignung von Laminaten für diese Anwendung dienen sollen. Im Folgenden sind das grundlegende Konzept, mechanische Grundlagen und die einzelnen Parameter der Versuche beschrieben, sowie die Gestaltung der Proben. Im Anschluss sind die Herstellung der Proben und die Versuche selbst erläutert.

6.1 Versuchskonzept

Mit den Versuchen soll ein Ausblick auf die Biegeeigenschaften von den betrachteten Laminaten geschaffen werden. Besonders anwendungsnah wäre es, einen Versuch mit einer Zweipunktbiegung durchzuführen (Abbildung 16(a)). Alternativen dazu sind die Drei- und Vierpunktbiegung (Abbildung 16(b) und 16(c)).

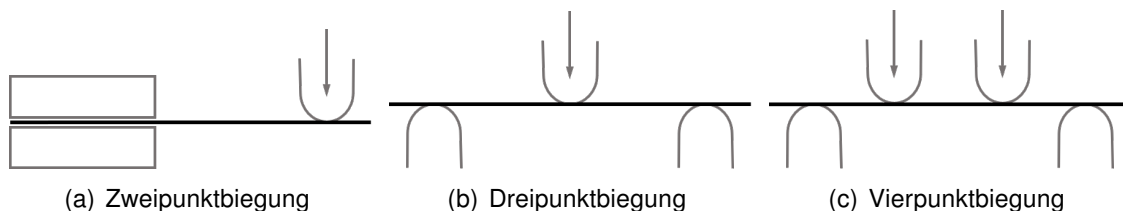


Abbildung 16: Biegeprüfungen

Die Drei- und Vierpunktbiegung sind in DIN EN ISO 14125 [28] als Verfahren zur Bestimmung der Biegeeigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden beschrieben und somit standardisiert. Da in der Anwendung eine punktuelle Biegung vorgesehen ist, bildet die Vierpunktprüfung die Belastungen nicht sinnvoll ab. Ein Vorteil der Dreipunktbiegung gegenüber der Zweipunktbiegung ist, dass für den gleichen Verformungswinkel ein geringerer Verfahrweg benötigt wird. Dadurch kann die Prüfgeschwindigkeit erhöht werden, welches besonders in der dynamischen Testung von Vorteil ist. Aus diesem Grund wird für eine Testung der Lamine eine Dreipunktbiegung genutzt. Die Testung erfolgt statisch und dynamisch in der selben Weise, sodass die Daten aus dem statischen Versuch zur Abschätzung des dynamischen Verhaltens genutzt werden können.

Vorgaben für die Bestimmung von dynamisch-mechanischen Kennwerten von Kunststoffen finden sich in der DIN EN ISO 6721 [29]. Hierin sind Verfahren zur Bestimmung von dynamischen Kennwerten bei Torsions-, Biege-, Zug- und Schubbelastung beschrieben. Sie werden im zu untersuchenden Belastungsfall, sowie der Schwingungsart - mit oder ohne Resonanz - unterschieden. Die Prüfung für die Biegung kann nach dieser Norm mit oder ohne Resonanz durchgeführt werden.[29] Die Resonanzprüfung wird vor allem für die Bestimmung von Resonanzkurven und Dämpfungseigenschaften genutzt, wenn der Kunststoff für eine Körperschallisolation vorgesehen ist. [30] Bei der Prüfung ohne Resonanz wird

mit Frequenzen zwischen 10^{-3} und 100 Hz gearbeitet. An dieser Norm kann sich orientiert werden. Sie ist jedoch nicht für faserverstärkte Kunststoffe vorgesehen.

6.2 Mechanische und geometrische Bedingungen

Um alle folgenden Überlegungen und Berechnungen vorzubereiten, werden zuvor die geometrischen Gegebenheiten und Belastungsverhältnisse betrachtet.

Zunächst einmal werden die Kräfteverhältnisse an der Probe bestimmt. Hierbei wird von den in Abbildung 17(a) dargestellten Randbedingungen ausgegangen. Damit ergeben sich nach Aufstellung des Kräftegleichgewichtes die in Abbildung 17(b) dargestellten Parameter. Die genauen Berechnungen dieser Parameter ist in Anhang D angegeben.

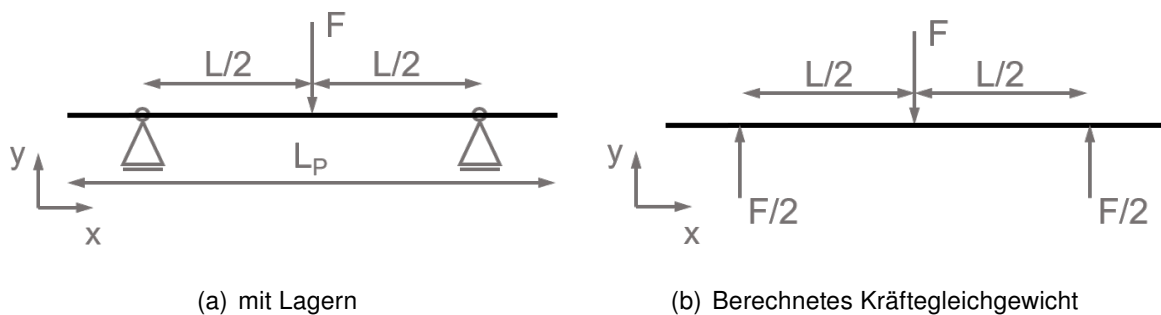


Abbildung 17: Kräfteverhältnisse an der Probe

Die herrschenden Biegespannungsbedingungen können der Norm entnommen oder berechnet werden [28]. Hierfür werden die Schnittkräfte bestimmt und das maximale Biegemoment wird für die Spannungsberechnung genutzt. Der Rechenweg für die Biegespannung σ_b (Gleichung 22) kann in Anhang D nachvollzogen werden. Für die Formeln zur Bestimmung des Biegemoduls E_f wird die DIN EN ISO 14125 herangezogen [28]. Dabei werden zu Berechnung die aufgebrachte Kraft F , die Probenlänge L , -breite b , -höhe h , sowie die Durchbiegung s herangezogen.

$$\sigma_b = \frac{3 FL}{2 bh^2} \quad (22)$$

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta s} \quad (23)$$

Zusätzlich kann bestimmt werden, wie sich die Kräfte ändern, wenn sich der Widerlagerabstand ändert. Durch diese Abstandsänderung ändert sich der für einen bestimmten Winkel benötigte Verfahrensweg. Ausgehend davon, dass dieselbe Spannung im Bauteil erreicht werden soll, können die beiden Spannungsgleichungen gleichgesetzt (Gleichung 24) und somit die Änderung der Kräfte bestimmt werden (Gleichung 26). Hierbei beschreibt der Faktor a die Abstandsänderung (Gleichung 25).

$$\sigma_1 = \frac{3 F_1 L_1}{2 b h^2} = \frac{3 F_2 L_2}{2 b h^2} = \sigma_2 \quad (24)$$

$$L_2 = a \cdot L_1 \quad (25)$$

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{1}{a} \quad (26)$$

Zusätzlich zu den Kräfte- und Spannungsgegebenheiten sind die Winkelzusammenhänge für die Testdurchführung wichtig. Dadurch kann aus dem Verfahrensweg der Biegewinkel bestimmt werden. Genauso kann überprüft werden, ob der Längenüberstand ausreicht, um ein Abrutschen der Probe zu verhindern. Der Zusammenhang zwischen dem Verfahrensweg x und dem Widerlagerabstand L bei dem Biegewinkel α ist in Gleichung 27 dargestellt.

$$x = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{L}{2} \quad (27)$$

Diese Überlegung basiert auf den in Gleichung 6.2 dargestellten Gegebenheiten.

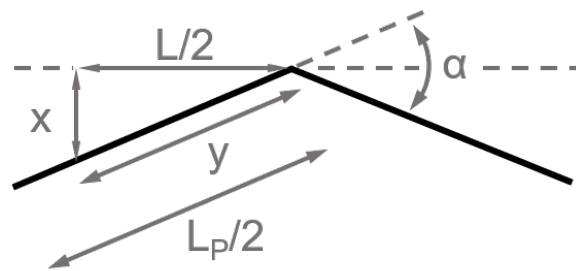


Abbildung 18: Winkelzusammenhänge an der Probe

Um sicher zu sein, dass die Probe nicht abrutscht, kann die Abrutschlänge Δy berechnet werden. Während y die schlussendlich benötigte Länge ist, ist die Abrutschlänge die Differenz aus dieser und der ursprünglichen Länge $L/2$ (Gleichung 29). Davon ausgehend kann auch auf die minimale Gesamtprobenlänge geschlossen werden, die um einen Restüberstand b ergänzt werden sollte (Gleichung 30).

$$y = \frac{L}{2} \frac{1}{\cos(\alpha/2)} \quad (28)$$

$$\Delta y = y - \frac{L}{2} = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{\cos(\alpha/2)} - 1 \right) \quad (29)$$

$$L_P = 2(y + \Delta y) + b = L \left(\frac{2}{\cos(\alpha/2)} - 1 \right) + b \quad (30)$$

6.3 Probengestaltung

Bei den beschriebenen Versuchen soll die Eignung von verschiedenen Laminataufbauweisen für die biegenden Beanspruchung geprüft werden. Als Vergleichsbasis dient die bekannte Laminataufbauweise von Sturm für 70 kg Patienten. Diese ist in Abbildung 19 (1) vereinfacht dargestellt.

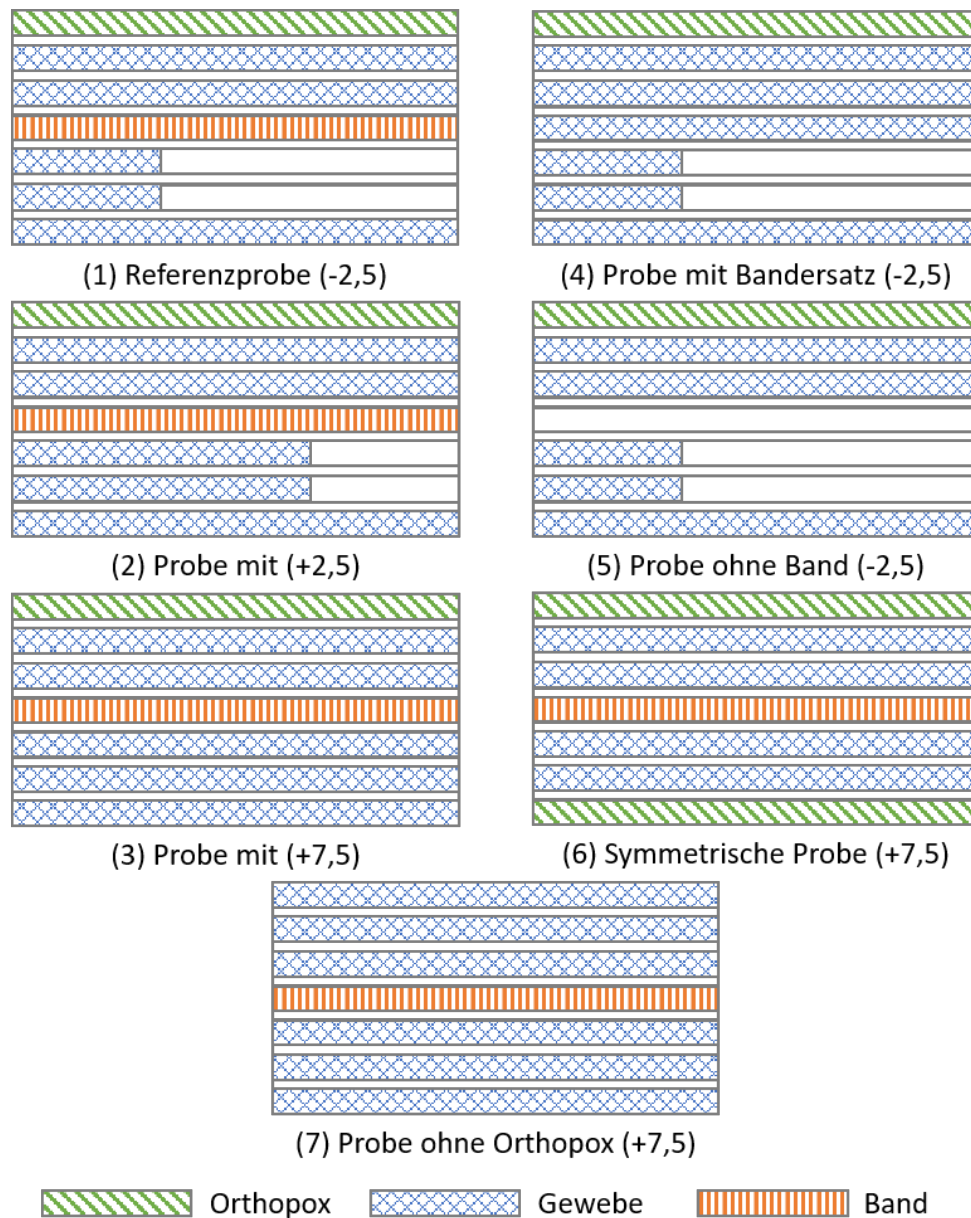


Abbildung 19: Laminatvariationen zum Prüfen verschiedener Faktoren

Die Lagen, die in Abbildung 19 (2) verkürzt dargestellt sind, entsprechen kurzen Lagen, welche nicht auf der gesamten Länge des Fußes verlaufen, sondern vor den Zehen enden. Um die Länge dieser Lagen zu definieren, wird Abbildung 20 genutzt.

Die Länge der kurzen Lage in der Referenzprobe endet vor dem Beginn des Gelenkes, also 2,5 cm vor der Probenmitte. Die Probenmitte entspricht dem Gelenkzentrum und damit dem Druckpunkt der Biegung. Während die vorderen 5 cm der Probe dem Bereich der Zehen entsprechen, liegen im Bereich der mittleren 5 cm das Gelenk und dahinter beginnt der restliche Fuß.

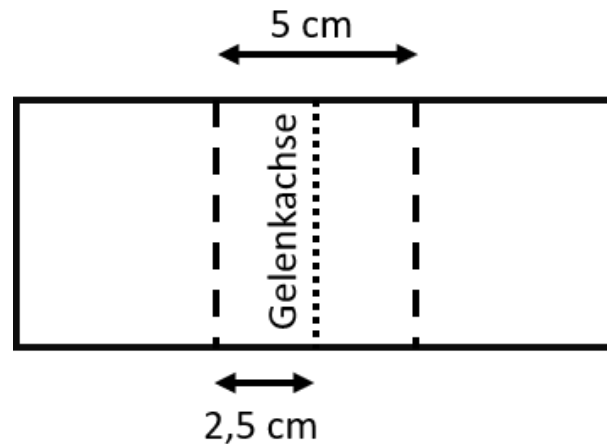


Abbildung 20: Länge der kurzen Lagen

Um den Einfluss verschiedener Faktoren zu betrachten, werden diese ausgehend von der Referenzprobe variiert. Betrachtet werden der Einfluss des unidirektionalen Bandes als auch der Länge der Lagen, sowie der Symmetrie des Laminataufbaus.

Das unidirektionale Band ist in jedem Bereich der Orthese vorgesehen. Jedoch ist die Frage, welchen Einfluss dieses auf das Laminatverhalten hat. Um dies zu betrachten, sind die Variationen (4) & (5), in Abbildung 19 dargestellt, vorgesehen. Bei der ersten der genannten Variationen wird das Band durch eine Lage Gewebe ersetzt, während es bei der zweiten weggelassen wird. Die Variation mit Ersatz ermöglicht es, die Veränderung ohne Verlust in der Probendicke zu betrachten. Erwartet wird das die Proben ohne Band eine geringere Biegefestigkeit aufweisen, da das Band durch die unidirektionalität eine höhere Festigkeit in Faserrichtung bietet.

Um den Einfluss der Länge der kurzen Lagen genauer betrachten zu können, wird die Referenzprobe, wie in Variation (2) & (3) von Abbildung 19 dargestellt, verändert. Bei Variation (2) endet die kurze Lage direkt hinter dem Gelenk, sodass die Zehen nicht mit eingeschlossen sind. Die dritte Variante hingegen, ersetzt die kurzen Lagen komplett durch lange Lagen. Durch die erhöhte Lagenanzahl im Biegepunkt werden die Variationen (2) & (3) wahrscheinlich eine höhere Steifigkeit aufweisen.

Der letzte zu betrachtenden Einflussfaktor ist der eines symmetrischen Laminataufbaus. Im Allgemeinen wird empfohlen, den Laminataufbau symmetrisch zu gestalten, um eine Platten-Verwölbung zu vermeiden [17]. Die Symmetrie hat auf das Festigkeitsverhalten vermutlich einen relativ geringen Einfluss. Um diese Vermutung zu prüfen, wird Variation (3) angepasst, indem die unterste Lage durch Orthopox ersetzt wird und damit die Variation (6)

entsteht. Da die Orthopoxfasern eine geringere Festigkeit haben als die Carbonfasern, wird die Festigkeit jedoch durch das veränderte Material geringer sein.

Ergänzend zu den sechs bestehenden Variationen wurde die Variation (7) hinzugefügt. Da es in der aktuellen Zeit immer wieder zu Materialmangel gekommen ist, mussten auch Orthesen hergestellt werden, welche ohne das Orthopoxmaterial auskommen. Dieses dient vor allem dem Schutz des Nutzers vor Splintern, sollte es zu einem Bruch kommen. Deshalb wird im Fall von Orthopox-Mangel meist eine Lage Carbongewebe mehr als Ersatz genutzt, um die Bruchwahrscheinlichkeit zu verringern. Diese Situation wird mit der siebten Variation abgebildet. Früher wurde statt Orthopox Kevlar genutzt. Dieses hat jedoch sehr schlechte Bearbeitungseigenschaften, vor allem beim Schleifen, sodass es inzwischen nicht mehr genutzt wird.

Bei den Versuchen sollen alle Proben statisch betrachtet werden und zusätzlich die Varianten (1), (2) & (4) dynamisch. Bei der statischen Prüfung beträgt der Probenumfang 6 Proben und bei der dynamischen, auf Grund der höheren Versuchsdauer, 4 Proben je Variation.

Die Probengröße wird ausgehend von der DIN EN ISO 14125 und der Anwendung bestimmt. Die Probenbreite wird anhand der Norm auf 15 mm festgelegt [28]. Damit liegt auch das Band auf der gesamten Probenbreite, sodass eventuelle Delaminationseffekte am Rand des Bandes während dieser Tests vermieden werden. Die Stützweite der Probe muss so gewählt werden, dass die auslaufenden Lagen in dieser liegen. Das bedeutet, dass die Stützweite mindestens 80 mm betragen sollte, damit der Auslaufbereich innerhalb der Widerlager liegt. Die Probenlänge sollte damit 100 mm betragen [28].

Die Erstellung der Proben soll, wie auch die Orthesenherstellung, mittels VARI-Verfahren erfolgen. Die Probenherstellung kann vereinfacht werden, indem mehrere Proben eines Laminats in einem Stück hergestellt und dann zugesägt werden (siehe Abbildung 21). Um den Fließweg des Harzes zu verkürzen und den Aufbau der Herstellung zu optimieren, wird das Harz entlang der langen Seite eingeleitet.

6.4 Probenherstellung

Die Proben für die Versuche werden mittels VARI-Verfahren (siehe Kapitel 2.4) hergestellt. Die Proben einer Laminatvariation werden zusammen hergestellt. Hierzu werden die Materialien für die verschiedenen Varianten mit einer Zugabe zugeschnitten und gestapelt. Diese werden dann in einen Aufbau, wie in Abbildung 7 dargestellt, eingebracht. Die Harz-zuleitung erfolgt hierbei entlang der langen Seite, sodass das Harz nur eine kurze Strecke durchfließen muss. Nach Aufbringen des Vakuums und der Überprüfung der Dichtigkeit des Aufbaus wird das Harz eingeleitet.

Das verwendete Harz KL1201/2 von Fior und Gentz hat laut Verarbeitungsinformationen (siehe Anhang A.10) eine Verarbeitungszeit von 2-3 h. Da bei der ersten Probenherstellung die Durchflusszeit sehr lang war und auf das Limit der Verarbeitungszeit des Har-

zes zu ging, wurden in den folgenden Versuchen ein Abreißgewebe und eine Fließhilfe in den Aufbau integriert. Dadurch wurde die Fließdauer auf fünf bis zehn Minuten. Durch die notwendige Abreißhilfe wurde jedoch auch die Oberfläche der Proben verändert. Bei der Herstellung der Orthesen wird statt einer Fließhilfe der Durchfluss mechanisch durch Durchstreichen des Harzes und Ausstreichen der Luft unterstützt, sodass der Einsatz der Fließhilfe begründet werden kann.

Nach Ende der Fließdauer wird der Harzzufluss gestoppt, während das Vakuum bei den Fließhilfeaufbauten noch 15-30 min angelegt bleibt, damit das Material sicher mit Harz durchdrungen ist. Dies ist nötig, da das Harz zunächst den Weg des geringsten Widerstandes (Fließhilfe) nimmt und erst dann in die Fasern eindringt. Der verwendete Aufbau ist in der Draufsicht in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: Draufsicht auf verwendeten VARI-Aufbau während des Harzflusses

Sobald alle Zu- und Abflüsse geschlossen sind, härtet das Harz mindestens 15 h bei Raumtemperatur aus. Anschließend wird der Aufbau für weitere 3 h in einem Ofen bei 80 °C ausgehärtet und anschließend entformt. Hierbei werden alle leicht entfernbaren Teile vom Laminat getrennt, bevor alles Weitere im Anschluss abgesägt wird. Die einzelnen Proben werden im Folgenden aus den Probenplatte ausgesägt, wobei auf die Lage der Bänder und kurzen Lagen geachtet wird.

Bevor die Proben im weiteren Verlauf statisch und dynamisch geprüft werden, wird bei allen die Dicke gemessen. Zusätzlich wird das Gewicht von je einer Probe von jeder Variation gemessen.

6.5 Statische Prüfung

Die statische Prüfung wird mit je sechs Proben pro Laminataufbau auf der Universalprüfmaschine Zwick Z100 der Firma ZwickRoell durchgeführt. Dabei wird das Versuchsprotokoll der DIN EN ISO 14125 genutzt [28]. Der Radius der Widerlager beträgt bei der Testung 5 mm und der Widerlagerabstand 60 mm. Zu Beginn der Testung wird eine Vorkraft, die zu einer Spannung von 0,2 MPa führt, aufgebracht. Die Spannung wird auf Basis der eingegebenen Probengeometrie berechnet. Die Prüfung wird mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min durchgeführt. Als Abbruchkriterium wird ein Kraftabfall von 30 Prozent genutzt, sodass ein Bruch sicher detektiert werden kann. Wenn es zu keinem entsprechendem Kraftabfall kommt, wird die Prüfung anhand des Verfahrweges, aufgrund der geometrischen Gegebenheiten, bei rund 16 mm Verfahrweg automatisch unterbrochen.

6.6 Dynamische Prüfung

Die dynamische Prüfung wird mit der zyklischen Prüfmaschine Instron 8562 durchgeführt. Bei dem Versuch wird die Probe wiederholt auf einen bestimmten Verfahrweg verformt. Dieser wird anhand der Ergebnisse aus dem statischen Versuch sowie den Prüfmöglichkeiten gewählt. Wenn der Verfahrweg größer ist, kann eine geringere Prüffrequenz realisiert werden. Um den nötigen Verfahrweg für die gleichen Verformungen zu verringern, wird der Widerlagerabstand auf 60 mm verringert. Dies hat zur Folge, dass die notwendigen Kräfte steigen.

Für die Regelung der Anlage müssen eine Frequenz, eine Amplitude und ein mittlerer Weg angegeben werden. Außerdem muss ein Abbruchkriterium definiert werden. Hierbei muss unter den gewünschten Gegebenheiten ein Kraftabfall der unteren Prüfkraft genutzt werden. Die untere Prüfkraft muss so groß gewählt werden, dass ein Kraftabfall von 30 Prozent nicht im Bereich der normalen Schwankungen liegt. Deshalb wird ein Verhältnis von unterem zum oberem Verfahrweg von 0,5 festgelegt, sodass die Probe immer belastet ist. Dadurch kann zusätzlich die Oberflächenzerrüttung, die durch ein wiederholtes Auftreffen der Druckfinne und der Widerlager auf der Probe auftritt, verringert werden.

Zusätzlich wurden verschiedene maximale Verfahrwege als Belastungen gewählt, die in Tabelle 5 dargestellt sind. Hierbei sind die Frequenzen auf Basis der Regelfähigkeit der Anlage maximal gewählt.

Tabelle 5: Regelwerte für die dynamische Prüfung

Maximaler Weg in [mm]	Amplitude in [mm]	Frequenz in [Hz]
5	1,25	1,0
7,5	1,875	0,6
10	2,5	0,5

Neben den genannten Wegen wurden bei einer Probenvariante, von der eine höhere Stückzahl verfügbar war, größere Wege als Maximum genutzt, um die Grenzen der dynamischen Belastung auszutesten.

Um den Zeitaufwand für die Abschätzung gering zu halten, wird die Prüfung nach maximal zwei bis drei Tagen unterbrochen.

7 Versuchsergebnisse

7.1 Statische Versuche

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Versuche dargestellt. Bei den Versuchen werden jeweils Materialwerte für die Gesamtlamine mit ihrem spezifischen Aufbau bestimmt. Bei der statischen Prüfung wurden Spannung und Verformung ausgegeben. Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird zwischen einer eher materialtechnischen Betrachtungsweise und der anwendungsbezogenen Betrachtung unterschieden.

Werden die Ergebnisse materialtechnisch betrachtet, wird sich eher mit den reinen Werten und ihrer Nutzbarkeit für Berechnungen befasst.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse für die Biegekennwerte nach Probenotyp dargestellt. Diese können zu einer Einordnung der Materialien dienen. Hierbei ist immer zu berücksichtigen, dass Zugversuche für eine materialtechnische Auswertung und Nutzung der Daten für eine Rechnung effektiver gewesen wären. Der Grund dafür ist, dass Festigkeitsrechnungen und somit auch Simulation größtenteils mit zugversuchsbasierten Materialkennwerten arbeiten. Es wurde dennoch ein Biegeversuch durchgeführt, da dieser der Anwendung eher entspricht und somit dann eine bessere Einordnung der Versuche durchgeführt werden kann. Des Weiteren können weiterverwendbare Simulationen auch nur unter bekannten Lasten durchgeführt werden. Da diese, wie zuvor beschrieben, jedoch nur eingeschränkt bekannt sind, könnten auch mit Materialwerten keine ordentlichen Simulationen durchgeführt werden.

Tabelle 6: Mittelwerte aus der statischen Prüfung inklusive Bruch oder Maximaler Spannung

Probe	Biegemodul [GPa]	Bruch	Spannung [MPa]	Dehnung [%]	FVG [%]
(1) Band (-2,5)	20,62		382,00	2,26	45
(2) Band (+2,5)	24,43	X	474,21	2,56	47
(3) Band (+7,5)	28,86	X	573,90	2,25	41
(4) Band ersetzt (-2,5)	17,68		319,69	2,30	42
(5) ohne Band (-2,5)	14,06		202,74	1,77	47
(6) symmetrisch (+7,5)	14,92	X	344,00	2,92	48
(7) ohne Orthopox (+7,5)	46,95	X	826,96	1,90	36

Andererseits wurden die angegebenen Werte für die gefertigten Verbunde festgestellt. Materialwerte von Verbundmaterialien sind wie in Kapitel 4 beschrieben einerseits von der Einzelwerten der Faser und Matrix abhängig, sowie von dem Faservolumengehalt (FVG) des Verbundes. Für diese Arbeit wurde ein möglicher FVG durch die in Anhang E beschriebene Weise abgeschätzt. Der FVG ist ein wichtiger Faktor zur materialtechnischen Beurteilung und Berechnung eines Verbundwerkstoffes. Der FVG, welcher auf die beschriebene Weise berechnet wurde, spricht für eine ausreichende, aber keine sehr gute Durchdringung der Fasern mit dem Harz. Auffällig ist hierbei der geringe FVG bei dem siebten Aufbau. Dies

könnte daran liegen, dass die Probe keine Orthopox enthält, welches eine sehr lockere Struktur hat. Dadurch ist das Orthopox vermutlich besser durchdringbar als das Gewebe und leitet auch das Harz besser weiter.

In der Materialtechnik wird in der Regel die Dehnung als Faktor für die Verformung betrachtet. Diese hängt im Falle der Biegeprüfung auch direkt mit der Stärke der Probe zusammen. Nach der DIN EN ISO 14125 wird die Dehnung folgendermaßen aus der Durchbiegung s , sowie der Probengeometrie berechnet.[28]

$$\epsilon = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (31)$$

Ein Thema, welches mit der materialtechnischen aber auch der anwendungsbezogenen Beurteilung der Ergebnisse eng zusammenhängt, ist die Betrachtung des elastischen Verhaltens. Bei Materialien mit annähernd elastisch-plastischem Verhalten kann für die Bestimmung der elastischen Dehnung mit dem E-Modul gearbeitet werden. Aus dem Verlauf des Spannungs- Dehnungsdiagramms kann - wenn annähernd eine Hook'sche Gerade mit der Steigung des E-Moduls erkennbar ist - bestimmt werden, wie der Anteil der plastischen und elastischen Dehnung an der Dehnung zur maximalen Spannung ist. Hierzu kann die maximale Spannung durch das E-Modul dividiert werden, um die entsprechende elastische Dehnung zu bestimmen:

$$\epsilon_{el} = \frac{\sigma_{max}}{E} \quad (32)$$

Wird die elastische Dehnung nun von der maximalen Dehnung abgezogen, ergibt sich die zugehörige plastische Dehnung. Diese Dehnungen können in der Folge wieder in entsprechende Winkel umgerechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 22 dargestellt.

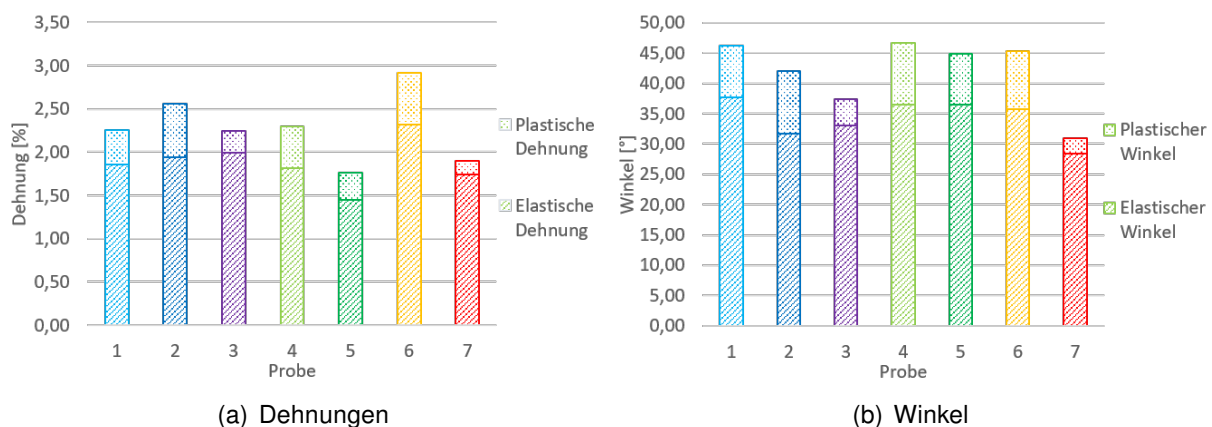


Abbildung 22: Durchschnittliche elastische und plastische Dehnungen und Winkel nach Probenvariation - Probenbenennung: siehe Abbildung 19

Hierbei ist im Vergleich der Diagramme erkennbar, wie wichtig die unterschiedliche Betrachtung der Biegewerte für die Anwendung ist. Während in Abbildung 22(a) Variation 2 für eine flexible Anwendung vorteilhafter als Variation 1 erscheint, ist es in Abbildung 22(b) gegenteilig. Die Dehnung wäre als alleiniger Wert nutzbar, wenn alle Aufbauten dieselbe Geometrie hätten. Bei dieser Auswertung sollte auf den Winkel geachtet werden, der unabhängig von der Probendicke ist. In Abbildung 22(b) ist erkennbar, dass die Proben mit einer Lagenlänge von (-2,5) seitens des elastisch erreichten Winkels am vorteilhaftesten sind.

Im Vergleich zu der materialtechnischen Betrachtung werden im Folgenden die Werte in Bezug auf die eigentliche Anwendung beurteilt. Hierbei werden die zwischen den Variationen veränderten Faktoren und die zugehörigen Proben einzeln betrachtet.

In Abbildung 23 sind die maximale Spannung, das Biegemodul und der maximale Winkel für Proben dargestellt, bei denen die Länge der kurzen Lagen variiert wurde. In der anwendungsbezogenen Betrachtung der Verformung der Probe hat der Winkel eine größere Bedeutung als die Dehnung. Auf die Berechnung der Dehnung wirkt die Dicke des Laminats ein, während der Winkel ein direkterer Indikator für die Verformung ist. Dieser zeigt unabhängig von der Laminatdicke die Verformung und ist deshalb für die Anwendung von größerem Einfluss.

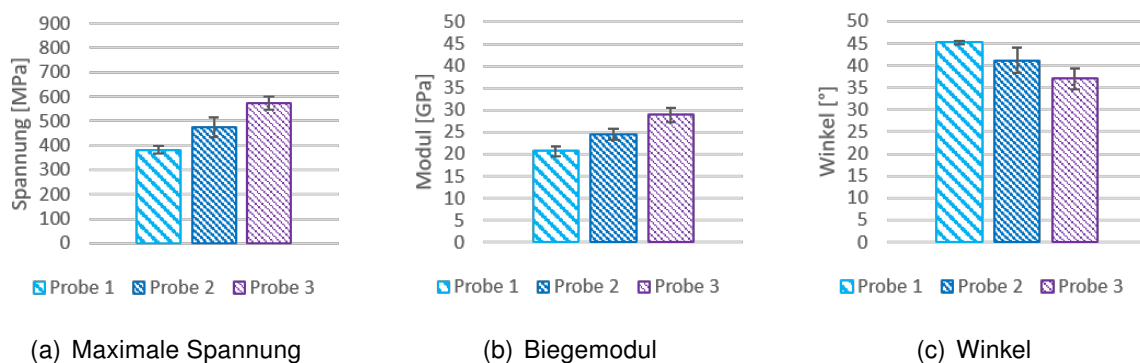


Abbildung 23: Kennwerte mit Standardabweichung für Proben mit Variation der Länge der kurzen Lagen - Probenbenennung: siehe Abbildung 19

Im Großen und Ganzen entsprechen die Ergebnisse aus der statischen Testung den Erwartungen. Dass das Modul und auch die maximale Spannung steigt, wenn die kurzen Lagen länger ausfallen, ist eine logische Beobachtung. Im Fall von längeren Lagen ist im betrachteten Bereich mehr Material vorhanden, welches das Laminat versteift. Auch eine Verlängerung der Lagen außerhalb des Mittelpunktes der Probe hat einen Einfluss darauf, da die Hauptverformung zwar im Zentrum geschieht, sich aber auch die Flanken verformen. Der maximal erreichte Winkel spiegelt genau diesen Verformbarkeitsunterschied wieder. Es kann bei der Probe mit kürzeren Lagen eine höhere Verformung erreicht werden. Wichtig hierbei ist die Beobachtung, dass bei den Variationen 2 und 3 Proben gebrochen sind. Bei der ersten Variation wurde kein Bruch erreicht, sondern die Messung wurde durch die geometrische Limitierung des Versuchsaufbaus beendet. Dies bedeutet, dass es unklar bleibt,

wie viel mehr Verformung diese Proben ausgehalten hätten.

Die Proben, bei denen die Nutzung des unidirektionalen Bandes variiert wurde, sind in Abbildung 24 dargestellt.

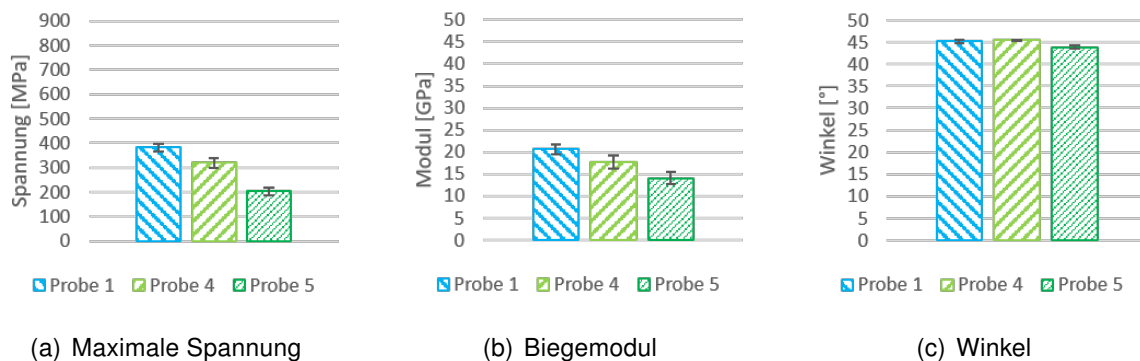


Abbildung 24: Kennwerte mit Standardabweichung für Proben mit Variation des Bands - Probenbenennung: siehe Abbildung 19

Wie auch schon bei dem zuvor betrachteten Faktor wurden hier Ergebnisse produziert, die den Erwartungen entsprechen. Das Band dient als eine Verstärkung der Proben gegen Belastung entlang der Faserrichtung. Dies zeigen auch die Werte für die Spannung und das Biegemodul. Bei der Probe 4 wurde das Band durch eine normale Gewebelage ersetzt. Dadurch wird die Probe leicht geschwächt. Im Vergleich dazu ist die Probe ohne Band und ohne Ersatz deutlich schwächer. Dennoch wurden alle Proben bis zur Versuchsbegrenzung ohne Versagen getestet. Die Flexibilität ist also auch bei der Probe mit Band gegeben, sodass diese, im betrachteten Verformungsbereich, eine höhere Festigkeit mit einer guten Verformbarkeit vereint.

Für den letzten Faktor, der direkt variiert wurde, sind in Abbildung 25 Proben mit unterschiedlich Nutzung der Orthopox-Lage dargestellt.

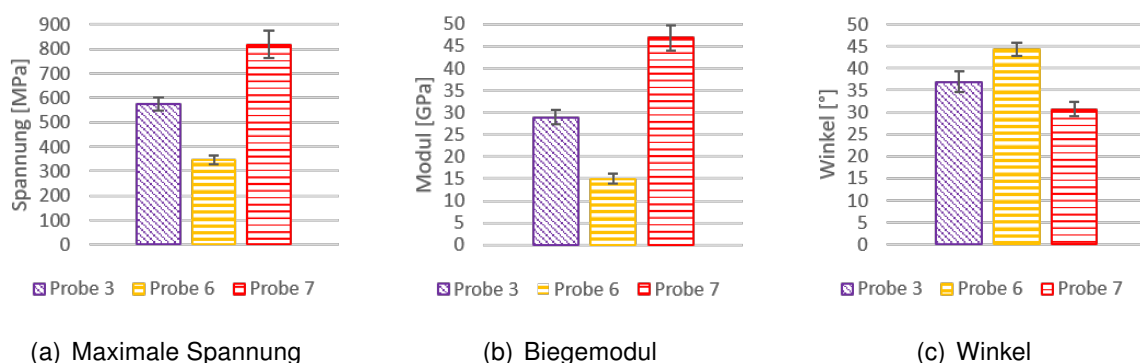


Abbildung 25: Kennwerte mit Standardabweichung für Proben mit Variation des Orthopox - Probenbenennung: siehe Abbildung 19

Um diesen Einfluss in gewissen Maße einschätzen zu können, wurde bei der Probe 7 das Material durch das Carbongewebe ersetzt. Die Probe 6 sollte ursprünglich der Abschätzung der Bedeutung der Symmetrie beim Aufbau dienen. Unabhängig von diesem Ziel sind

folgende Beobachtungen festgestellt worden: Die Orthopox-Lage hat wie erwartet zu einer geringeren Spannung und einem geringerem Modul geführt. Dies hängt damit zusammen, dass die Materialkennwerte beim Orthopox geringer sind als beim Gewebe (Kapitel 3.2). Dadurch bedeutet eine höhere Anzahl an Orthopoxlagen bei gleichbleibender Lagenanzahl automatische eine Verringerung der Moduls und der Spannung. Dennoch ist diese Lage für den Patienten unverzichtbar, da ihr eigentlicher Sinn der Schutz des Patienten im Fall eines Versagens des Laminat ist.

Symmetrie ist im Aufbau von Laminat vor allem dazu dienlich, um erhöhte Eigenspannungen und dadurch entstehende Wölbungen zu vermeiden. [17]

Ausgehend von den beschriebenen Ergebnissen scheint die Verwendung des Bandes zu Steigerung der Festigkeit sinnvoll. Außerdem sollten die kurzen Lagen vor dem Gelenk enden, um die Steifigkeit des Laminats an dieser Stelle nicht zu erhöhen. Die Orthopox-Lage schwächt die Festigkeit des Laminats, aber ist für den Schutz des Patienten unverzichtbar. Somit deuten die statischen Versuche darauf hin, dass der Referenzaufbau (Abbildung 19 (1)) für die Anwendung - ohne bekannte Lasten - gut geeignet ist.

7.2 Dynamische Versuche

Im Folgenden werden verschiedene Ergebnisse der dynamischen Prüfung betrachtet. Es werden unterschiedliche Aspekte beleuchtet, wobei manche, wie auch schon zuvor, anwendungsbezogener und manche materialtechnischer Natur sind. Bei der Auswertung der Unterschiede zwischen den Laminaten werden die Kraft und Verfahrwege betrachtet. Hierbei kann der Anwendungsbezug besser gesehen werden, als bei Spannungen und Dehnungen, welche eher für den materialtechnischen Vergleich geeignet sind.

In Abbildung 26 ist für die verschiedenen Variationen dargestellt, bei welchen Schwingspielzahlen die Prüfungen beendet wurde sowie der dazu gehörige maximale Verfahrweg. Die genutzten Prüffrequenzen sind in Tabelle 5 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Prüfungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgebrochen wurden. Die Prüfungen wurden nach maximal vier Tagen beendet. Wurde die Prüfung nach einer bestimmten Zeit abgebrochen, so ist diese Begrenzung abhängig von der Versuchsplanung (z.B. Wochenende) gewählt worden. Ansonsten wurden die Prüfungen abgeschlossen, wenn ein Kraftabfall der Unterkraft von mindestens 35 Prozent erreicht wurde. Aufgrund dieser unterschiedlichen Kriterien liegt nur eine eingeschränkte Aussagekraft vor und es können nur Tendenzen erkannt werden.

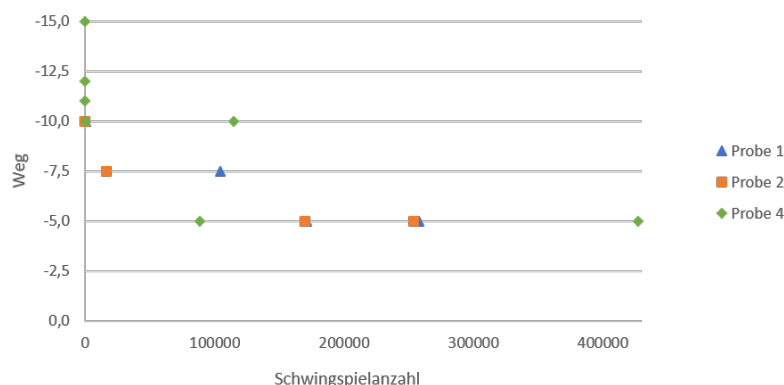


Abbildung 26: Maximale Schwingspielzahl der Proben gegenüber dem maximalen Verfahrweg - Probenbenennung: siehe Abbildung 19

Wie zu erwarten war, erreichten in der Regel diejenigen Proben, welche einer höheren Belastung ausgesetzt sind, geringere Schwingspielzahlen. Bei der vierten Variante wurden für den Verfahrweg von 10 mm zwei sehr unterschiedliche Schwingspielzahlen erreicht. Allerdings ist für dieses Verhalten kein Grund bekannt und es müsste durch weitere Testungen überprüft werden, welches Verhalten repräsentativ ist. Ansonsten ist bei den geprüften Proben die Tendenz erkennbar, dass die Probe mit kurzer Lage (Probe 1) bei höherer Verformung den Belastungen länger standhält als die mit langer Lage (Probe 2). Grundsätzlich entspricht das Verhalten jedoch dem nach den statischen Ergebnis zu erwartenden Verhalten, da das kürzere Band eine höhere Flexibilität im Biegepunkt ermöglicht.

In Abbildung 27 ist die Kraft über dem Weg für drei verschiedene Proben bei einem maximalen Verfahrweg von 5 mm dargestellt. Es sind jeweils Ausschnitte von je sechs Belastungszyklen, welche sich als Hysterese darstellen.

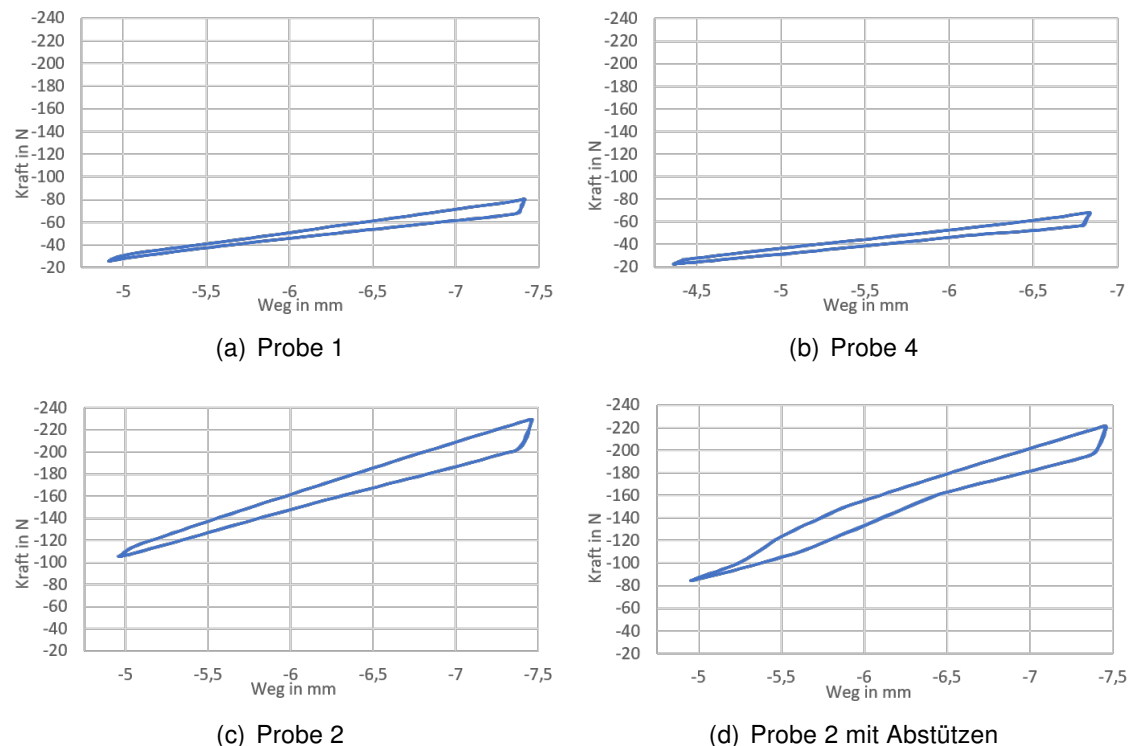


Abbildung 27: Hysteresen von Proben bei einem Verfahrweg von 5mm

Es ist für alle Variation ein vergleichbarer Verlauf erkennbar. Hierbei kommt es zunächst zu einer Belastung mit vorrangig elastischer Verformung. Sobald sich die Steigung der Hysterese ändert, tritt, bis zum Beginn der Entlastung, zusätzlich plastische Verformung auf. Sobald die Probe entlastet wird, geht der Kraftaufwand bis auf das Ausgangsniveau zurück. Bei zyklischer Belastung ist ein solches Verhalten klassisch [31]. In Abbildung 27(d) sind Verläufe für die selbe Probe wie in Abbildung 27(c) dargestellt. Jedoch ist während der in Abbildung 27(d) abgebildeten Zyklen ein Fehler aufgetreten. Die Probe hat angefangen sich an der seitlichen Begrenzung abzustützen. Bei manchen Proben ist es zu einem Wandern der Probe in der Einspannung gekommen, sodass sich Proben an der seitlichen Begrenzung abstützen konnten (siehe Abbildung 28).

Ein möglicher Grund für das Wandern der Proben ist der Steifigkeitsunterschied zwischen den Schenkeln der Proben. Wenn die Probe ausreichend belastet ist, stützt sie sich, durch eine größere Durchbiegung, nicht ab. Bei Entlastung fängt die Probe an sich abzustützen, sodass eine geringere Kraft erforderlich ist damit sich die Verformung ändert. Ansonsten sind die Verläufe wie erwartet bei allen Variationen vergleichbar und unterscheiden sich vor allem im Niveau der erforderlichen Kraft.

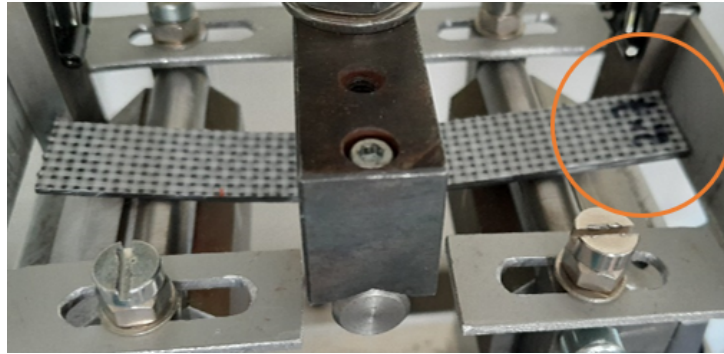


Abbildung 28: Aufnahme einer sich an der Begrenzung abstützenden Probe

In Abbildung 29 ist die Kraft bei einer beispielhaften Probe an den Peaks der Belastungen über der Zeit dargestellt. Im dargestellten Zeitabschnitt ist erkennbar, dass zu Beginn der Prüfung ein Kraftabfall in Ober- und Unterkraft vorhanden ist.

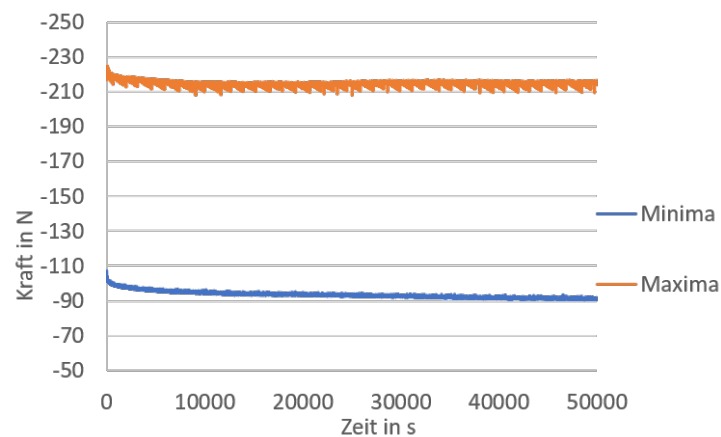


Abbildung 29: Kraftabfall während der ersten Schwingenspiele

Der Kraftabfall, also die Entfestigung, könnte auf eine Reaktion auf die dynamische Prüfung und einen entsprechenden Energieeintrag hindeuten. Hierfür spricht, dass dieses Verhalten bei einer weiteren Prüfung an der selben Probe zu einem späteren Zeitpunkt erneut auftritt. Da dieses Ereignis jedoch keiner dauerhaften Schädigung entspricht, ist es für die Anwendung vernachlässigbar.

Ein letzter zu betrachtender Aspekt, ist die Schädigung der Proben. Hierfür ist der Kraftabfall von der Anfangskraft zur Endkraft ein Indikator. In Abbildung 30 ist der prozentuale Abfall der Kräfte für die verschiedenen Proben aufgetragen. Hiervon ausgenommen sind alle Proben, die bei der ersten Belastung versagt haben, mit Ausnahme der Probe 2-9. Zusätzlich wurden die Proben, welche nicht versagt haben, nach eine Pause von mindestens einer Stunde, erneut für einige wenige Schwingenspiele belastet. Durch diese erneute Belastung kann darauf geschlossen werden, welcher Anteil des Kraftabfalls einer Schädigung entspricht.

Bei der Betrachtung dieser Werte ist entscheidend, dass es Abweichungen durch die Umpositionierung und Neueinspannung der Proben geben kann. Auffällig ist, dass der Abfall

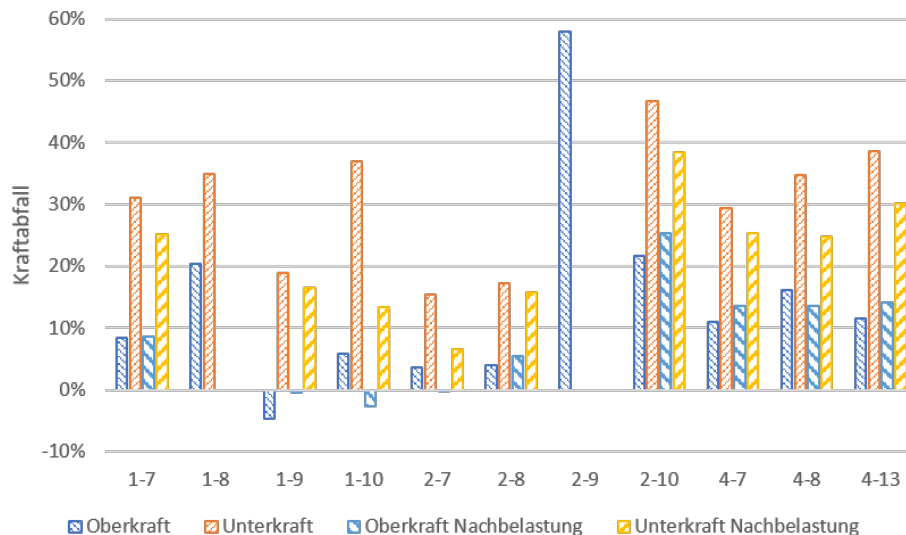


Abbildung 30: Prozentualer Kraftabfall von Ober- und Unterkraft

der Kräfte im allgemeinen für die Oberkräfte geringer ausfällt als für die Unterkräfte. Dieses liegt vor allem daran, dass sich die Abfälle absolut kaum unterscheiden. Dadurch fallen die Senkungen der Oberkraft bei prozentualer Betrachtung weniger auf.

Des Weiteren wird deutlich, dass der registrierte Unterkräftabfall mit den Werten der Nachbelastung geringer ist als am Ende der Prüfung. Auch dieses Verhalten spricht für die zuvor beschriebene Theorie des Energieeintrags ohne Schädigungseffekt. Auffallend ist jedoch, dass dieses Phänomen bei der Oberkraft nicht wiederkehrend auftritt. Darüber hinaus kommt es teilweise zu gar keinem Kraftabfall. Dieses Phänomen könnte mit einer tendenziellen Verfestigung zu Beginn der Prüfung oder der veränderten Einspannung des Prüflings zusammenhängen.

Ausgehend von den dynamischen Versuchen wird deutlich, dass die Nutzung einer kurzen Lage, die vor dem Gelenk endet, für eine höhere Flexibilität sinnvoll ist - besonders in Anbetracht der Anwendung. Gleichzeitig haben die Versuche verschiedene Herausforderungen für die dynamische Prüfung der Lamine aufgezeigt. Insbesondere den Umgang mit wandernden Proben durch unterschiedliche Schenkelsteifigkeit, sowie die Einplanung eines grundsätzlichen Kraftabfalls.

7.3 Kombinierte Ergebnisse

Die Ergebnisse der statischen und dynamischen Versuche sollen abschließend gemeinsam betrachtet werden. Da die Versuche mit unterschiedlichen Widerlagerabstand durchgeführt wurden, ist kein direkter Vergleich anhand der Verfahrwege möglich. Stattdessen müssen für die gemeinsame Betrachtung entweder der Winkel oder die Dehnung herangezogen werden.

In Abbildung 31 sind die Spannungen über den Dehnungen für die Proben der dynamisch geprüften Variationen aufgetragen. Es sind je ein statischer Verlauf mit der dazugehörigen Hook'schen Geraden sowie die Startwerte der dynamischen Prüfungen abgebildet.

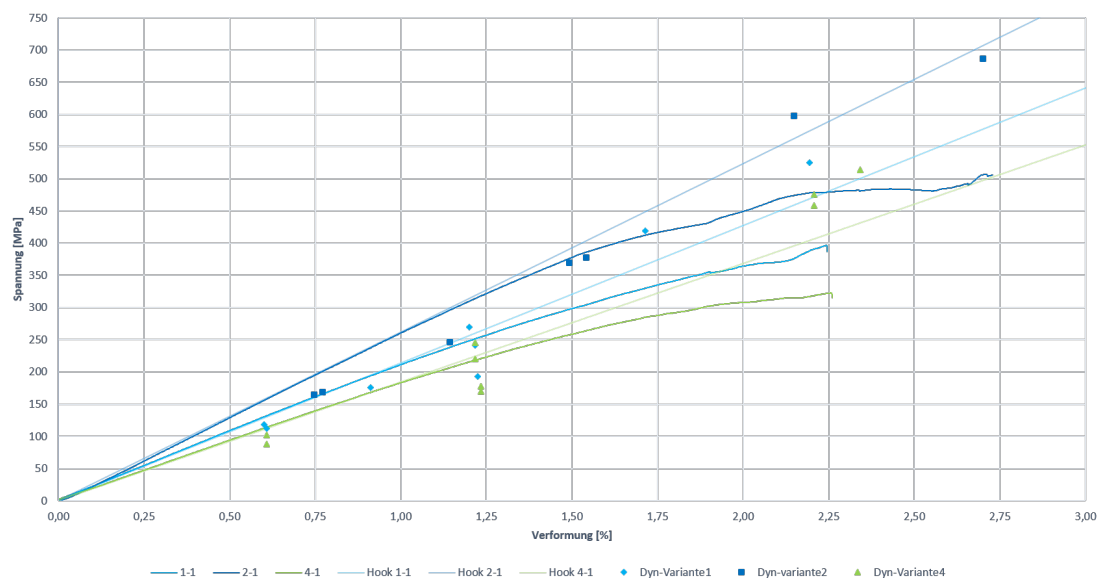


Abbildung 31: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Werten aus statischer und dynamischer Prüfung

Hierbei wird ersichtlich, dass die dynamischen Werte im niedrigeren Belastungsbereich im Vergleich eher unter denen der statischen Prüfung, während sie im höheren Belastungsbereich darüber liegen. Die Abweichungen sind im Bereich des Erwartbaren.

Insgesamt sind mehrere Erkenntnisse aus den Versuchsreihen für die spätere Anwendung zu ziehen. Die Länge der Lage hat einen Einfluss, indem die Probe durch die Lage deutlich steifer wird. Wenn die kurze Lage über den Biegepunkt geht, tritt der Bruch meist an der Stelle auf, an welcher die kurze Lage ausläuft. Dieses liegt darin begründet, dass die einzelne Lage mit allen Lagen gebogen wird, aber die Biegung nicht selbst direkt erfährt. Deshalb ist für die Anwendung keine kurze Lage empfohlen, die über das Zehengrundgelenk hinaus geht und direkt dahinter ausläuft.

Um gleichzeitig eine höhere Flexibilität im Zehenbereich zu haben, sollte dennoch ein Teil der Lagen in kurzer Form im Vorderfuß auslaufen. Der sich ergebende Steifigkeitsunterschied wird während der dynamischen Versuche ersichtlich.

Wird nun der Einfluss des unidirektionalen Bandes (Variation 1 und 4) betrachtet, zeigt sich der Vorteil, dass die Proben eine höhere Festigkeit erhalten, dabei aber die Elastizität weniger eingeschränkt wird als durch eine zusätzliche Lage im Belastungsbereich. Mit Hilfe der Variationen 6 und 7 werden der Einfluss der Symmetrie und gleichzeitig des Orthopox betrachtet. Auf das Orthopox auf der Oberfläche kann aus Patientenschutzgründen nicht verzichtet werden. Eine Asymmetrie begünstigt zwar einen Verzug der Proben, doch während der Versuche konnten keine entscheidenden Nachteile dieser Art beobachtet werden. Würde darüber hinaus eine zweite Lage Orthopox hinzugefügt werden, würde diese bei gleichbleibender Lagenanzahl zu einer Schwächung des Laminats führen. Es sollte also eine Lage Orthopox beibehalten werden.

Aus den einzelnen Empfehlungen resultiert ein Aufbau, welcher dem verwendete Referenzaufbau der Firma Sturm (Abbildung 32) entspricht.

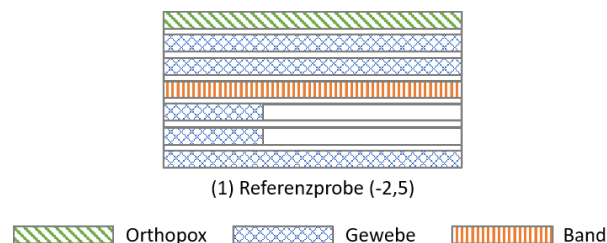


Abbildung 32: Referenzprobe der Firma Sturm für einen 70 kg Patienten

7.4 Fehlerbetrachtung

Wie schon zuvor beschrieben sollen die Versuche als Ausblick und Tendenzgeber dienen. Dennoch sind auch hierbei mögliche Fehlerquellen während der Versuche zu beachten. Besonders während der dynamischen Prüfung kam es zu verschiedenen Besonderheiten, die zu Abweichungen führen können.

Zunächst wurde bei der dynamischen Prüfung der minimale Probenumfang verwendet. Für eine genauere Untersuchung sollte ein höherer Probenumfang für jeden Prüfpunkt genutzt werden.

Des Weiteren führte die eingeschränkte Prüfzeit dazu, dass die Versuche bei geringerer Belastung nicht zu Ende geführt wurden. Damit bieten die maximalen Schwingspielzahlen nur einen Ausblick, sie sind jedoch nicht untereinander vergleichbar.

Die genutzte Prüfanlage hat von sich aus keine Möglichkeit Werte zu erfassen, deswegen wurde zusätzlich ein Datenerfassungssystem der Firma Dewesoft genutzt, um die Ergebnisse mitzuschreiben. Das Datenerfassungssystem wird nicht zusammen mit der Anlage, sondern separat kalibriert. So kann es über die Anzahl der Versuche und eine wiederholte Kalibrierung der Anlage zu Abweichungen zwischen den Werten der Anlage und den Werten des Datenerfassungssystems gekommen sein. Sollten entsprechende Versuche wiederholt werden, müsste für jeden Versuch eine Kalibrierung durchgeführt werden.

Eine weitere Problematik stellt die unterschiedliche Steifigkeit der Probenschenkel dar. Denn hierdurch und durch die Probengeometrie kam es zu wiederholtem Wandern und Abstützen verschiedener Proben. Zusätzlich begannen manche Proben sich zu drehen. Deshalb mussten die Prüfungen wiederholt unterbrochen und Proben neu positioniert werden. Dies führte dazu, dass sich auch während der Prüfung der beeinflusste Probenbereich ändern konnten und damit sich die Messwerte nicht auf Grund des Materialverhaltens, sondern der Prüfung veränderten.

8 Zusammenfassung

Die Arbeit befasst sich mit verschiedenen Aspekten der Gestaltung vom Faserverbundlaminat einer Orthesenfußsohle. Diese werden bei individuellen Orthesen vom Orthopädietechniker nach seiner Erfahrung an den jeweiligen Patienten angepasst.

Der Ausgangspunkt für alle Betrachtungen dieser Arbeit war die handwerkliche Herstellung einer individuellen Orthese. Hierbei wurden die Aufbauweisen und der Herstellungsprozess des begleiteten Orthopädietechnikers dokumentiert.

Eine der Hauptaufgaben dieser Arbeit war die Gestaltung eines Konzeptes für die Simulation von Orthesenfußsohlen, besonders in Hinblick auf die Laminatgestaltung entsprechend der auftretenden Belastungen. Hierfür wurden die verschiedenen Aspekte einer solchen Simulation genauer betrachtet, von der Benutzeroberfläche und den Parametern bis zu der Simulation selbst und deren Validierung. Bei der Aufstellung des Konzeptes wurden verschiedene zukünftige Herausforderungen identifiziert. So ist eine dynamische Simulation besonders von Faserverbundwerkstoffen sehr anspruchsvoll. Gleichzeitig müssen alle Parameter bekannt sein. Für Belastung und Geometrie kann auf Normen zurückgegriffen werden. Für den Einfluss der Steifigkeit des Fußes auf das System der Fußsohle sind jedoch keine Werte bekannt, die für eine Simulation genutzt werden können. Des Weiteren müssen für eine vollständige Simulation die Materialdaten bekannt sein.

Um den Einfluss der Materials ohne eine Simulation zu betrachten, wurden statische und dynamische Biegeversuche durchgeführt. So wurden verschiedene Materialvariationen geprüft, um festzustellen, welchen Einfluss bestimmte Laminatveränderungen auf das Verhalten des Laminats haben. Bei den Versuchen wurden festgestellt, dass die kurzen Lagen des Laminats vor dem Zehengrundgelenk enden sollten, um die Elastizität nicht einzuschränken. Um gleichzeitig die Festigkeit zu steigern, ist die Verwendung eines unidirektionalen Faserbandes eine Möglichkeit, welche die Elastizität weniger einschränkt, als eine zusätzliche Lage im Gelenkbereich. Des Weiteren verringert die Orthopoxlage die Festigkeit der Fußsohle zwar, diese ist jedoch für den Patientenschutz unerlässlich. Werden bei der Laminatgestaltung diese Empfehlungen berücksichtigt, resultiert der beschriebene Referenzaufbau (Abbildung 32).

9 Ausblick

Ausgehend von dieser Arbeit können in Zukunft die verschiedenen Einzelaspekte sowie die in Kapitel 5.2 beschriebenen Herausforderungen bearbeitet werden. Dabei herauszustellen sind die Darstellung der Fußsteifigkeit und die dynamische Simulation. Des Weiteren kann darauf folgend, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, die Simulation durch weitere Parameter erweitert werden.

Zur Vorbereitung auf die Simulation sollten weitere Materialuntersuchungen durchgeführt werden. Insbesondere sollten die klassischen Materialparameter für die verwendeten Materialien bestimmt werden, sodass damit Berechnungen und Simulationen durchgeführt werden können. Zusätzlich sollten die dynamischen Betrachtungen, wie schon in Kapitel 7.4 beschrieben, ergänzt werden.

Wenn das Projekt auf die Fußsohle bezogen ausgearbeitet ist, könnte es anschließend auf weitere Bereiche der Orthetik erweitert werden. Hier wären zunächst die restliche Fußschale, inklusive Fußgelenksaufnahme, und in der Folge auch Unterschenkel und weitere Körperabschnitte zu nennen. Dabei verändert sich die Herausforderung zusätzlich durch die komplexeren Formen und damit nicht mehr ebene Gestaltung des Laminats.

Literatur

- [1] Ortho Team. *Bein-Orthese*. Hrsg. von Ortho Team. 10.2022. URL: https://www.ortho-team.ch/produkte/886-thickbox_default/beinorthese-knee-ankle-foot.jpg.
- [2] W. Platzer. *Bewegungsapparat*. 11., überarbeitete Auflage. Bd. 1. Taschenatlas Anatomie. Stuttgart: Thieme, 2013. ISBN: 978-3-13492-011-6.
- [3] O. Ludwig. *Ganganalyse in der Praxis: Anwendung in Prävention, Therapie und Versorgung*. 2., erweiterte Auflage. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag, 2015. ISBN: 978-3-87517-053-5.
- [4] Gesundheitsinformation. *Knochen und Gelenke des Fußes*. Hrsg. von Gesundheitsinformation.de. 1.2022. URL: https://www.gesundheitsinformation.de/grafiken/de_fuss_knochenanatomie_replacement_image.jpg.
- [5] Orthokonzzept. *Gangphasen*. Hrsg. von Orthokonzzept. 10.2022. URL: <https://www.orthokonzzept.de/images/bewegungsanalysen/gangphasen.png>.
- [6] M. Kraft und C. Disselhorst-Klug, Hrsg. *Biomedizinische Technik ; 10*. De Gruyter Studium. Berlin: De Gruyter, 2015. ISBN: 978-3-11025-208-8.
- [7] DIN EN ISO 9999. *Hilfsmittel für Menschen mit Behinderungen-Klassifikation und Terminologie*. 3.2017.
- [8] Orthopunkt24. *Unterschenkel-Orthese*. Hrsg. von Orthopunkt24. 4.2022. URL: https://orthopunkt24.ch/media/catalog/product/cache/3/image/345x440/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/i/m/image_78945_1_95808_1_25469.jpg.
- [9] Gutgesell Cuxhaven. *Bein-Orthese*. Hrsg. von Gutgesell Cuxhaven. 4.2022. URL: <https://gutgesell-cuxhaven.de/wps/wp-content/uploads/2020/05/bein-orthese-neurotronic-gelenk-1024x1024.jpg>.
- [10] Fior & Gentz. *Teilflexibles Fußteil*. Hrsg. von Fior & Gentz. 4.2022. URL: <https://www.fior-gentz.de/online-tutorials/online-tutorials-fuer-orthopaedietechniker/teilflexibles-fussteil.html>.
- [11] Fior & Gentz. *Rigides Fußteil*. Hrsg. von Fior & Gentz. 4.2022. URL: <https://www.fior-gentz.de/online-tutorials/online-tutorials-fuer-orthopaedietechniker/rigides-fussteil.html>.
- [12] Fior & Gentz. *Allgemeine Patientenbefundung*. Hrsg. von Fior & Gentz. 4.2022. URL: <https://www.fior-gentz.de/online-tutorials/online-tutorials-fuer-orthopaedietechniker/allgemeine-patientenbefundung.html>.
- [13] DIN EN ISO 22523. *Externe Gliedmaßenprothesen und externe Orthesen – Anforderungen und Prüfverfahren*. 4.2007.

- [14] DIN EN ISO 10328. *Prothetik – Prüfung der Struktur von Prothesen der unteren Gliedmaßen – Anforderungen und Prüfverfahren*. 12.2016.
- [15] DIN EN ISO 22675. *Prothetik – Prüfung von Knöchel-Fuß-Passteilen und Fußeinheiten - Anforderungen und Prüfverfahren*. 12.2016.
- [16] P. Eyerer und H. Schüle, Hrsg. *Polymer Engineering*. 2. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer, 2020. ISBN: 978-3-662-59836-8.
- [17] H. Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen*. 2., bearb. und erw. Aufl. VDI-/Buch]. Berlin und Heidelberg: Springer, 2007. ISBN: 978-3-540-72189-5. URL: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz270578854cov.htm>.
- [18] M. Flemming, G. Ziegmann und R. Siegfried. *Faserverbundbauweisen Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. Berlin und Heidelberg: Springer, 1999. ISBN: 978-3-64263-557-1.
- [19] M. Flemming und R. Siegfried. *Faserverbundbauweisen Eigenschaften*. Berlin und Heidelberg: Springer, 2003. ISBN: 978-3-64262-459-9.
- [20] K.-H. Grote und J. Feldhusen, Hrsg. *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 23., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2011. ISBN: 978-3-64217-305-9.
- [21] Fior & Gentz. *Katalogseiten Materialien*. Hrsg. von Fior & Gentz. Lüneburg. URL: https://www.fior-gentz.de/fileadmin/user_upload/pdf/katalogseiten/Katalogseiten_Materialien.pdf.
- [22] Ortho-Reha Neuhof. *Materialkatalog*. Hrsg. von Ortho-Reha Neuhof. Nürnberg. URL: <https://www.ortho-reha-neuhof.de/wp-content/uploads/2018/04/material.pdf>.
- [23] Ottobock. *Katalog: Materialien*. Hrsg. von Ottobock. Duderstadt. URL: <https://pe.ottobock.com/de/katalog/materialien/646k1-de.pdf>.
- [24] S. Otremba. *Datenblätter: E-Mail*. Hrsg. von M. Krippendorff. 23.12.2021.
- [25] M. Segl. *Anfrage wegen Materialkenndaten: E-Mail*. Hrsg. von L. Steuernagel. 4.02.2022.
- [26] A. Puck. *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis*. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 1996. ISBN: 3-446-18194-6.
- [27] S. Otremba. *Fragen für Masterarbeit: E-Mail*. Hrsg. von M. Krippendorff. 18.11.2021.
- [28] DIN EN ISO 14125. *Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften*. 5.2011.
- [29] DIN EN ISO 6721-1. *Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften: Allgemeine Grundlagen*. 9.2019.
- [30] DIN EN ISO 6721-3. *Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften: Biegeschwingung – Resonanzkurven-Verfahren*. 5.2021.

- [31] M. Knörr. *Auslegung von Massivumformwerkzeugen gegen Versagen durch Ermüdung*. Springer eBook Collection Computer Science and Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996. ISBN: 978-3-662-05936-4.
- [32] S. Otremba. *Sicherheitsdatenblätter: E-Mail*. Hrsg. von M. Krippendorff. 20.12.2021.
- [33] Fior & Gentz. *Verarbeitung von Epoxidharz*. Hrsg. von Fior & Gentz. Lüneburg. URL: https://www.fior-gentz.de/fileadmin/user_upload/pdf/produktbeilagen/PB1200-KL-DE_Verarbeitung_von_Epoxidharz.pdf.
- [34] Fior & Gentz. *Sicherheitsdatenblatt Epoxidharz*. Hrsg. von Fior & Gentz. Lüneburg. URL: https://www.fior-gentz.de/fileadmin/user_upload/pdf/SHDB/Sicherheitsdatenblatt_Epoxidharz.pdf.
- [35] Fior & Gentz. *Sicherheitsdatenblatt Härter*. Hrsg. von Fior & Gentz. Lüneburg. URL: https://www.fior-gentz.de/fileadmin/user_upload/pdf/SHDB/Sicherheitsdatenblatt_Haerter.pdf.

A Materialinformationen

Im Folgenden sind Auszüge aus den verschiedenen Informationsquellen für die vorhandenen Materialdaten dargestellt. Hierbei sind in den jeweiligen Abschnitten folgende Informationen enthalten:

- A.1** Auszug aus dem Materialkatalog von Fior und Gentz mit Informationen über den PA-Armierungsstrumpf und die PVC-Stäbe
- A.2** Auszug aus dem Materialkatalog von Ortho-Reha Neuhof mit Informationen über das Carbongewebe und -band
- A.3** Datenblatt des Carbonbandes in 25 mm Breite (Artikel-Nr. 105B54)
- A.4** Sicherheitsdatenblatt für das Carbongewebe (Artikel-Nr. 105B63)
- A.5** Auszug aus dem Materialkatalog von Ortho-Reha Neuhof mit Informationen über den Carbonschlauch
- A.6** Datenblatt des Carbonschlauches in 20 mm Breite (Artikel-Nr. 105B09)
- A.7** Datenblatt des Carbonschlauches in 120 mm Breite (Artikel-Nr. 105B09)
- A.8** Auszug aus dem Materialkatalog von Otto Bock mit Informationen über das Orthopoxgewebe
- A.9** Auszug aus dem Materialkatalog von Fior und Gentz mit Informationen über das Epoxidgemisch
- A.10** Verarbeitungsanweisung für das Epoxidgemisch (Artikel-Nr. KL1201/2)
- A.11** Sicherheitsdatenblatt für das Epoxidharz eingefügt (Artikel-Nr. KL1201/2-0)
- A.12** Sicherheitsdatenblatt für den Härter eingefügt (Artikel-Nr. KL1202/2-H)

A.1 Katalogauszug PA-Stumpf und PVC-Stab [21]

Materialien für die Eingusstechnik – Armieren

Systemschienen und Systemanker



Abb. 1



Abb. 2



Abb. 3

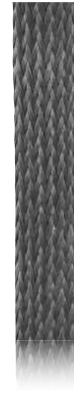


Abb. 4

Werkzeuge

Profilkerne (Abb. 1)

Artikelnummer	Bezeichnung	Länge x Breite x Dicke [cm]	ME
VP2012-L200	Profilkern aus PVC für 10 mm Systemgelenke	200 x 0,9 x 0,3	Stück
VP2021-L200	Profilkern aus PVC für 12 mm Systemgelenke	200 x 1,1 x 0,3	Stück
VP2022-L200	Profilkern aus PVC für 14 mm Systemgelenke	200 x 1,3 x 0,3	Stück
VP2032-L200	Profilkern aus PVC für 16 mm Systemgelenke	200 x 1,5 x 0,3	Stück
VP2033-L200	Profilkern aus PVC für 20 mm Systemgelenke	200 x 1,9 x 0,4	Stück

Verwendungszweck: zur Herstellung von Versteifungsprofilen in Laminaten

☑ auf unsere Systembreiten abgestimmt

PA-Armierungsstrümpfe (Abb. 2)

Artikelnummer	Bezeichnung	Länge [cm]	ME
VP8030-L110	10 x PA-Armierungsstrümpfe mit offener Spitze, weiß	110	Pack

Verwendungszweck: zur abschließenden Fixierung der Armierungslagen unter der PVA-Folie

Materialeigenschaften: Nylonstrümpf aus Endlosgestrick, in vorgegebener Länge, mit guten Gleiteigenschaften für PVA-Folien und hoher Durchlässigkeit für Gießharze; nach dem Gießen transparent

PVA-Folienschläuche (Abb. 3)

Artikelnummer	Bezeichnung	Länge x Breite [cm]	Umfang [cm]	Folienstärke [mm]	ME
KL9630	10 x PVA-Folienschläuche	100 x 15	30	0,1	Pack
KL9635	10 x PVA-Folienschläuche	100 x 18	35	0,1	Pack
KL9640	10 x PVA-Folienschläuche	100 x 20	40	0,1	Pack
KL9735	10 x PVA-Folienschläuche	130 x 18	35	0,1	Pack
KL9745	10 x PVA-Folienschläuche	130 x 23	45	0,1	Pack
KL9755	10 x PVA-Folienschläuche	130 x 28	55	0,1	Pack
KL9765	10 x PVA-Folienschläuche	130 x 33	65	0,1	Pack

Verwendungszweck: für Einguss- und Prepregtechnik

☑ extra stark und reißfest

Materialien

Carbonfaser-Flechtschläuche (Abb. 4)

Artikelnummer	Bezeichnung	Länge [m]	Breite [mm]	ME
VP1033-L1000	Carbonfaser-Flechtschlauch für 10 und 12 mm Systemgelenke	10	12	Rolle
VP1034-L1000	Carbonfaser-Flechtschlauch für 14, 16 und 20 mm Systemgelenke	10	18	Rolle

Verwendungszweck: zur Herstellung von Versteifungsprofilen in Laminaten

☑ auf unsere Systembreiten abgestimmt

K7

A.2 Katalogauszug Carbonband und -gewebe [22]

CARBONFASER



CARBONFASER-LEINWAND-BAND, UNIDIREKTIONAL

Produktinfo: Armierungsmaterial zum Laminieren

Material: Carbon

Bindung: Unidirektional

Breiten:

BREITE	GEWICHT / m ²
25 mm	250 g
50 mm	300 g
100 mm	250 g

Länge: 20 m

Lieferumfang: 1 x Rolle

Artikelnummer: **105B54** =
 Breite
 z.B. 25



CARBONFASERGEWEBE

Produktinfo: Armierungsmaterial zum Laminieren

Material: Carbon

Bindung: Körperbindung

Gewicht / m²: 205 g

Breite: 1,2 m

Längen: 1 m (gefaltet)
 2 m (auf Rolle)
 5 m (auf Rolle)

Berechnungseinheit: m

Artikelnummer: **105B63** =
 Länge
 z.B. 1



CARBONFASER-GARN

Produktinfo: Zum Vernähen von Metall- und Armierungsmaterialien

Material: Carbon

Fadenstärke: 2 x 0,3 mm

Länge: 10 m

Lieferumfang: 1 x Rolle

Artikelnummer: **105B72**

Gips- und Abformmaterial
Polstermaterial
HTV-Silikon
Kunststoff
Laminieretechnik
Verbindfasernetzwerkstoff
Textilien
Kleinteile
Leder
Klebstoff

A.3 Datenblatt für das Carbonband [24]

SILTEX



Technisches Datenblatt / Technical datasheet

Material	Carbon
----------	--------

Artikelnummer / Article number	6010
Bezeichnung / Description	25 mm carbon woven tape

Breite / Width	[mm/45°]	25 mm
Breite / Width Ømin./max.	[mm]	25 mm – 25 mm
Gewicht / Weight	[Kg/100m]	0,91
Wandstärke / Wall thickness	[mm]	0,40

Bitte beachten Sie, dass Abweichungen von den genannten Werten von bis zu +/- 10% möglich sind!
Please note that the actual values may deviate from these specifications by up to +/- 10%!

Die vorstehenden Angaben in diesem Datenblatt, insbesondere Vorschläge für die Verarbeitung und den Einsatzbereich unserer Produkte, beruhen auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Auf Grund der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten und der außerhalb unseres Einflussbereiches liegenden Einsatz- und Arbeitsbedingungen übernehmen wir keine Haftung für die Eignung unserer Produkte für die relevanten Produktionsverfahren unter den konkreten Arbeitsbedingungen sowie die beabsichtigten Verarbeitungszwecke und Ergebnisse. Um eine solche Eignung sicherzustellen, empfehlen wir in jedem Fall ausreichende vorherige Eigenversuche und Tests.

Jede aus den Hinweisen in diesem technischen Datenblatt und jede aus sonstiger schriftlicher oder mündlicher Beratung für das vorliegende Produkt resultierende Haftung ist ausdrücklich ausgeschlossen, es sei denn, dass individualvertraglich etwas anderes vereinbart wurde, ein Fall der Verletzung von Leib, Leben oder Gesundheit vorliegt, uns Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt oder eine Haftung nach zwingendem Produkthaftungsrecht besteht.

The above specifications in this data sheet, in particular the suggestions for processing and for the area of use of our products, are based on our current state of knowledge and experience. Due to the variety of usage options, and the usage and working conditions which are outside our sphere of influence, we cannot assume any liability that our products are suitable for the relevant production processes under the specific working environment and the intended purpose of processing and its outcome. In order to ensure such suitability, we recommend you always conduct sufficient prior trials and tests.

Any liability resulting from the information in this technical data sheet as well as from any written or verbal consultancy services relating to this product is hereby expressly excluded, except if an individual contract specifically provides otherwise, if such liability results from the death of an individual, from bodily injuries or adverse health effects, in the event of fraud or gross negligence on our part, or in cases of liability under mandatory product liability law.

SILTEX Flecht- & Isoliertechnologie Holzmüller GmbH & Co. KG | Palmstraße 27 | D-84387 Julbach |
Tel.: +49 8571 92297-0 | Fax: +49 8571 92297-22 | Internet: www.siltex.de | Email: siltex@siltex.de

A.4 Sicherheitsdatenblatt für das Carbonegewebe [32]



Sicherheitsdatenblatt Kohlenstofffaser-Gewebe

1. Produkt- und Herstellerangaben

1.1 Produktbezeichnung

Name des Produkts: Carbon-Gewebe
Beschreibung des Produkts: textile Halbzeuge aus Kohlenstofffasern
Inhaltsstoff/Mischung/Artikel: 100% Kohlenstofffaser mit PES Kantenfaden

1.2 Angaben zur Verwendung des Produkts:

Herstellung von Faserverbundwerkstoffen

1.3 Herstellerangaben:

CARBO-TEX GmbH
Siemensstraße 1
86695 Nordendorf / Deutschland
Tel.: +49 8273 99 800 9-0
Fax: +49 8273 99 800 9-99
E-Mail: info@carbo-tex.de

1.4 Notfallauskunft / Notfallnummer

CARBO-TEX GmbH Tel. +49 8273 99 800 9-0

2. Mögliche Gefahren

2.1 Klassifizierungen

Klassifizierung nach Richtlinie (EC) Nr. 1272/2008: Klassifizierung nicht möglich
Klassifizierung nach Direktive 1999/45/EC: R-Sicherheitssatz / nicht anwendbar
Die Klassifikation wurde vorgenommen in Übereinstimmung mit DPD (Direktive 199/45/EC) und Richtlinie (EC) Nr. 1272/2008 (CLP).

2.2 Kennzeichnungselemente

Kennzeichnung gemäß Verordnung CLP (CE) Nr. 1272/2008:
Gefahrenpiktogramm : nicht anwendbar

2.3 Besondere Gefahren / schädliche Wirkungen

- diese Gefahren haben keine Einstufung in eine bestimmte Gefahrenklasse zur Folge.
- Kohlenstofffasern sind gute elektrische Leiter und können in feinen Partikeln verteilt werden.
- fein verteilte Kohlenstofffasern können Irritationen der Haut, der Augen und der Schleimhäute auslösen.
- Kohlenstofffaserstaub kann bei Kontakt mit Elektrogeräten einen Kurzschluss verursachen.

3. Zusammensetzung und Angaben zu den Bestandteilen**3.1 Gefährliche Inhaltsstoffe oder komplexe gefährliche Inhaltsstoffe**

Dieses Produkt ist nicht als gefährlich eingestuft im Sinne der Direktive 1999/45/EC und Richtlinie (EC) Nr. 1272/2008 (CLP).

3.2 Weitere Inhaltsstoffe, die für die menschliche Gesundheit und die Umwelt nicht als gefährlich eingestuft sind

Name	CAS-Nummer	Gehalt in %
Kohlenstofffasergewebe (PAN)	7440-44-0	> 98 %
Teilweise polymerisiertes Epoxidharz	eingetragen	< 2 %

4. Erste-Hilfe-Maßnahmen**Nach Augenkontakt:**

- Bei Staub in den Augen, die Augen sofort mindestens 15 Minuten lang mit reichlich Wasser ausspülen. Den Transport zu der nächsten medizinischen Einrichtung veranlassen und so schnell wie möglich einen Arzt zur Untersuchung und Behandlung hinzuziehen.
- Ggf. Kontaktlinsen vor dem weiteren Spülen der Augen herausnehmen.
- Nicht die Augen reiben.

Nach Einatmen:

- Die Person an die frische Luft bringen. Bei anhaltenden Beschwerden den Arzt konsultieren.

Nach Hautkontakt:

- Haut bis zum Abklingen der Reizung mit reichlich Wasser abwaschen. Bei Hautreizungen den Arzt konsultieren.

Nach Verschlucken:

- Einen Arzt kontaktieren. Kein Erbrechen herbeiführen. Bei Erbrechen das Verschlucken von Erbrochenem vermeiden. Niemals Flüssigkeiten oder Nahrungsmittel geben, wenn der Verletzte bewusstlos ist oder Krämpfe hat.

5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung**Geeignete Löschmittel**

- Schaum, Trockenlöschmittel, CO₂ oder Wasserdampf bzw. Wassersprühnebel.

Gefährliche Verbrennungsprodukte und entsprechende Gefahren

- Freisetzung giftiger Gase: Stickoxide, Kohlenmonoxid.

Persönliche Schutzausrüstung

- Überdruck-Atmungsgerät

Physikalische und chemische Eigenschaften im Hinblick auf die Entzündlichkeit und die Explosionsgefahr

- Flammpunkt: > 100 °C
- Selbstentzündungstemperatur: nicht anwendbar
- Unterer Explosionspunkt: nicht anwendbar
- Oberer Explosionspunkt: nicht anwendbar

Besondere Gefahren im Hinblick auf die Maßnahmen zur Brandbekämpfung

- Das Produkt kann beim Verbrennen feine Kohlenstoffaserteilchen abgeben. Bei Kontakt mit Elektrogeräten können diese Teilchen einen Kurzschluss verursachen.

6. Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen: --

Umweltschutzmaßnahmen:

- Eine weitere Freisetzung vermeiden

Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung freigesetzter Inhaltsstoffe:

- Wegen des Risikos der Freisetzung feiner Partikel sollte das mit der Arbeit beauftragte Personal Staubschutzmasken mit P3-Filter tragen.

7. Handhabung und Lagerung

Handhabung:

- Technische Maßnahmen

Material vorsichtig handhaben. Die Kohlenstofffasern nicht unnötig schneiden. Elektrisch leitendes Material. Nicht mit elektrischen Stromquellen in Kontakt bringen.

- Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung:

Freisetzung der Fasern in die Luft vermeiden. Die Fasern an einem gut gelüfteten Ort handhaben (Absaugung mit Filtern zur Vermeidung der Freisetzung von Fasern in die Freiluft), an dem keine elektrischen Geräte vorhanden sind bzw. diese in dichten Kästen oder Kästen mit Druckausgleich geschützt sind.

Auf Elektronikarten und elektrische Anschlüsse können Isolierlacke aufgetragen werden.

- Nutzungshinweis und Unverträglichkeit:

Reibung vermeiden, durch die Partikel in die Luft freigesetzt werden können.

Lagerung:

- Es wird empfohlen, das Produkt an einem sauberen, trockenen, staubfreien Ort in seiner Originalverpackung zu lagern.

8. Expositionsbegrenzung / persönliche Schutzmaßnahmen

Grenzwerte: nicht bekannt

Art und Qualität der persönlichen Schutzausrüstung:

- Bei Staubbildung und unzureichender Belüftung sollten eine Staubschutzmaske, Augenschutz, ein sauberer und trockener Arbeitsanzug und Handschuhe getragen werden.
- Atemschutz: eine Atemschutzmaske mit Filter vom Typ P3 verwenden, falls Staub freigesetzt wird.
- Handschutz: Bei der Handhabung des Produkts grundsätzlich Schutzhandschuhe tragen, die die Anforderungen der Normen EN 374-1/2/3 und EN 420 erfüllen.
- Augenschutz: Schutzbrille oder dichtschießende Brille zum Schutz vor Staub tragen.

9. Physikalische und chemische Eigenschaften

Angaben zu den grundlegenden physikalische und chemische Eigenschaften:

- Form: Flächengebilde auf Rolle gewickelt
- Geruch: geruchlos
- Farbe: schwarz
- Dichte: 1,7 bis 1,8 g/cm³
- Siedepunkt: nicht anwendbar
- Schmelzpunkt: nicht anwendbar
- Flammpunkt: > 100 °C
- Selbstentzündungstemperatur: nicht anwendbar
- Explosionsgefahr: nicht anwendbar
- Dampfdruck: nicht anwendbar
- Dampfdichte: nicht anwendbar
- Löslichkeit: (Löslichkeit in einem Lösungsmittel)
 - in Wasser: nicht löslich
 - in Andere: in chlorhaltigen Lösungsmitteln, Aceton, DMF lösliches Schmelzmittel
- Andere:
 - elektrische Leitfähigkeit

10. Stabilität und Reaktivität**10.1 Stabilität**

Stabil, wenngleich gefährliche Reaktionen möglich sind. Die Anreicherung von Feinstaub kann in Gegenwart von Luft zu Staubexplosionen führen

10.2 Zu vermeidende Bedingungen

Extreme Hitze vermeiden. Ein schnelles Aushärten kann zur Freisetzung giftiger Gase und Entstehung gefährlicher Abbauprodukte führen.

10.3 Zu vermeidende Stoffe

Starke Oxidationsmittel, Säuren und Basen

10.4 Gefährliche Abbauprodukte

Freisetzung von Stickoxid und Kohlenmonoxid.

11. Angaben zur Toxikologie**Gefahren im Fall einer Exposition**

- Verschlucken: Reizungen im Hals möglich
- Einatmen: Reizungen der Atemwege möglich
- Hautkontakt: Hautreizungen möglich
- Augenkontakt: Reizungen möglich

12. Angaben zur Ökologie

Die Umweltexposition der Bestandteile dieses Produkts ist aufgrund der physischen Form des Produkts eingeschränkt.

Die Kohlenstofffaser ist ein elektrischer Leiter. Bei Kontakt mit einem Elektrogerät kann die Faser Kurzschlüsse verursachen, und zwar vor allem bei einer Freisetzung der Faser in die Umgebungsluft.

Produkt nicht verbrennen.

13. Hinweise zur Entsorgung

Produktreste sind unter Beachtung der Abfallrichtlinie 2008/98/EG sowie nationalen und regionalen Vorschriften zu entsorgen. Für dieses Produkt kann keine Abfallschlüssel-Nummer gemäß europäischen Abfallkatalog (AVV) festgelegt werden, da erst der jeweilige Verwendungszweck durch den Verarbeiter eine Zuordnung erlaubt. Die Abfallschlüssel-Nummer ist innerhalb der EU in Absprache mit dem beauftragten Entsorger festzulegen.

Produkt entsprechend den behördlichen Vorschriften entsorgen:

- CED (Catalogue Européen des Déchets, Europäisches Abfallverzeichnis): Empfehlung: 16 03 06
- 16 Abfälle, die nicht anderswo im Verzeichnis aufgeführt sind
- 16 03 Fehlchargen und ungebrauchte Erzeugnisse
- 16 03 06 organische Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 03 05* fallen

Verunreinigte Verpackungen entsprechend der behördlichen Vorschriften entsorgen:

- CED (Catalogue Européen des Déchets, Europäisches Abfallverzeichnis): Empfehlung: 15 01 105
- 15 Verpackungsabfall, Aufsaugmassen, Wischtücher, Filtermaterialien und Schutzkleidung (a.n.g.)
- 15 01 Verpackungen (einschließlich getrennt gesammelter kommunaler Verpackungsabfälle)
- 15 01 05 Verbundverpackungen

Je nach Herkunft und Zustand des Abfalls gelten u. U. auch andere CED-Nummern.

14. Angaben zum Transport

Den internationalen Vorschriften entsprechende Codes und Klassen: nicht anwendbar / kein Gefahrgut

Spezifische Transportbedingungen: nicht anwendbar / kein Gefahrgut

15. Angaben zu Rechtsvorschriften

Kennzeichnung nach EU-Richtlinien

- Kennbuchstabe: nicht anwendbar
- R-Sätze: nicht anwendbar
- EINECS-Nr:

Alle Bestandteile dieses Produkts werden in der Liste EINECS bzw. ELINCS aufgeführt, sofern sie hiervon nicht gemäß der EU-Richtlinie 67/548/EWG ausgenommen sind.

16. Sonstige Angaben

Die Angaben im Sicherheitsdatenblatt basieren auf folgenden Richtlinien und Vorschriften:

D.67/548/EWG, Änderung: D.92/32/EWG

D.1999/45/EG

2001/118/EG

D.2004/73/EG

(EG) Nr. 1907/2006 (REACH)

(CE) Nr. 1272/2008 (CLP)

Die Angaben in diesem Sicherheitsdatenblatt entsprechen nach bestem Wissen unseren Erkenntnissen zum Zeitpunkt der Erstellung. Sie gelten als unverbindlicher Hinweis und enthalten weder ausdrückliche noch stillschweigende Zusicherungen noch eine Garantie bestimmter Eigenschaften. Es liegt in der Verantwortung des Benutzers, über die Eignung des Materials für einen bestimmten Verwendungszweck zu entscheiden. Alle Materialien bergen u. U. unbekannte Gefahren und sind daher mit Vorsicht zu handhaben. Auch wenn auf dem vorliegenden Sicherheitsdatenblatt eine Reihe von Gefahren beschrieben sind, können wir nicht garantieren, dass es sich dabei um die einzigen Gefahren handelt. Die Angaben in diesem Sicherheitsdatenblatt entsprechen dem Stand der Kenntnisse des Ausfüllenden zum Herausgabedatum. Die Daten der gefährlichen Inhaltstoffe wurden jeweils dem letztgültigen Sicherheitsdatenblatt des Vorlieferanten entnommen. Wir sind jedoch nicht in der Lage, die Vollständigkeit der Angaben zu garantieren und übernehmen keinerlei Haftung mit Bezug auf ihre Verwendung. Wir empfehlen Ihnen in jedem Fall eigene Tests durchzuführen, um die Sicherheit und die Eignung einzelner Produkte oder einer Kombination der Produkte für den jeweiligen Verwendungszweck zu bestimmen.

A.5 Katalogauszug Carbonschlauch [22]

CARBONFASER

Gips- und Abformmaterial	 	CARBONFASER-FLECHTSCHLAUCH																	
Polstermaterial		Produktinfo:	Armierungsmaterial zum Laminieren																
HTV-Silikon		Material:	Carbon																
Kunststoff		Bindung:	Körperbindung																
Laminieretechnik	 	Abmessungen:	<table><tr><th>BREITE</th><th>GEWICHT / m²</th><th>LÄNGE</th></tr><tr><td>20 - 40 mm</td><td>345 g</td><td>25 m</td></tr><tr><td>60 - 200 mm</td><td>335 g</td><td>10 m</td></tr><tr><td>70 - 300 mm</td><td>325 g</td><td>10 m</td></tr><tr><td>120 - 350 mm</td><td>315 g</td><td>10 m</td></tr></table>		BREITE	GEWICHT / m²	LÄNGE	20 - 40 mm	345 g	25 m	60 - 200 mm	335 g	10 m	70 - 300 mm	325 g	10 m	120 - 350 mm	315 g	10 m
BREITE		GEWICHT / m²	LÄNGE																
20 - 40 mm		345 g	25 m																
60 - 200 mm		335 g	10 m																
70 - 300 mm	325 g	10 m																	
120 - 350 mm	315 g	10 m																	
Verbundfaserverkstoff	Lieferumfang:	1 x Rolle																	
Textilien	Artikelnummer:	105B09 = Breite z.B. 20																	
Kleinteile	 	CARBONFASER-FLECHTSCHLAUCH, EXTRAFEIN																	
Leder		Produktinfo:	Armierungsmaterial zum Laminieren																
Klebstoff		Material:	Carbon																
		Bindung:	Körperbindung																
	Breiten:	<table><tr><th>BREITE</th><th>GEWICHT / m²</th></tr><tr><td>80 - 120 mm</td><td>400 g</td></tr><tr><td>100 - 160 mm</td><td>385 g</td></tr><tr><td>120 - 200 mm</td><td>360 g</td></tr><tr><td>140 - 240 mm</td><td>345 g</td></tr><tr><td>160 - 280 mm</td><td>330 g</td></tr><tr><td>180 - 320 mm</td><td>310 g</td></tr></table>		BREITE	GEWICHT / m²	80 - 120 mm	400 g	100 - 160 mm	385 g	120 - 200 mm	360 g	140 - 240 mm	345 g	160 - 280 mm	330 g	180 - 320 mm	310 g		
BREITE	GEWICHT / m²																		
80 - 120 mm	400 g																		
100 - 160 mm	385 g																		
120 - 200 mm	360 g																		
140 - 240 mm	345 g																		
160 - 280 mm	330 g																		
180 - 320 mm	310 g																		
	Länge:	15 m																	
	Lieferumfang:	1 x Rolle																	
	Artikelnummer:	105B10 = Breite z.B. 80																	

A.6 Datenblatt für den schmalen Carbonschlauch [24]

SILTEX



Technisches Datenblatt /Technical Datasheet

Artikelnummer / Item code	:	2377
Artikelbezeichnung / Type	:	Flechtschlauch

Material / Material [Anteile / parts in %]	Carbon
Nenndimension/ Nominal dimension [mm]	24
Gewicht/Weight (gezogen/stretched) [kg/100m]	1,960
Wandstärke/ Wall thickness [mm]	0,41

Bitte beachten Sie, dass Abweichungen von den genannten Werten von bis zu +/- 10% möglich sind!

Die vorstehenden Angaben in diesem Datenblatt, insbesondere Vorschläge für die Verarbeitung und den Einsatzbereich unserer Produkte, beruhen auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Auf Grund der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten und der außerhalb unseres Einflussbereiches liegenden Einsatz- und Arbeitsbedingungen übernehmen wir keine Haftung für die Eignung unserer Produkte für die relevanten Produktionsverfahren unter den konkreten Arbeitsbedingungen sowie die beabsichtigten Verarbeitungszwecke und Ergebnisse. **Um eine solche Eignung sicherzustellen, empfehlen wir in jedem Fall ausreichende vorherige Eigenversuche und Tests.**

Jede aus den Hinweisen in diesem technischen Datenblatt und jede aus sonstiger schriftlicher oder mündlicher Beratung für das vorliegende Produkt resultierende Haftung ist ausdrücklich ausgeschlossen, es sei denn, dass individualvertraglich etwas anderes vereinbart wurde, ein Fall der Verletzung von Leib, Leben oder Gesundheit vorliegt, uns Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt oder eine Haftung nach zwingendem Produkthaftungsrecht besteht.

The above specifications in this data sheet, in particular the suggestions for processing and for the area of use of our products, are based on our current state of knowledge and experience. Due to the variety of usage options, and the usage and working conditions which are outside our sphere of influence, we cannot assume any liability that our products are suitable for the relevant production processes under the specific working environment and the intended purpose of processing and its outcome. **In order to ensure such suitability, we recommend you always conduct sufficient prior trials and tests.**

Any liability resulting from the information in this technical data sheet as well as from any written or verbal consultancy services relating to this product is hereby expressly excluded, except if an individual contract specifically provides otherwise, if such liability results from the death of an individual, from bodily injuries or adverse health effects, in the event of fraud or gross negligence on our part, or in cases of liability under mandatory product liability law.

SILTEX Flecht und Isoliertechnologie Holzmüller GmbH & Co.KG Palmstraße 27 / D-84387 Julbach
Tel.: +49 8571 92297-0 Fax: +49 8571 92297-22 Internet: www.siltex.de Email: siltex@siltex.de

A.7 Datenblatt für den breiten Carbonschlauch [24]

SILTEX



Technisches Datenblatt / Technical datasheet

Material	Carbon
-----------------	---------------

Artikelnummer / Article number	4840
Bezeichnung / Description	Carbon/Flechtschlauch

Durchmesser / Diameter	[mm/45°]	180 mm
Durchmesser / Diameter Ømin./max.	[mm]	30 mm – 220 mm
Gewicht / Weight	[Kg/100m]	14,12
Wandstärke / Wall thickness	[mm]	0,73

Fasereigenschaften / Fiber properties		
Dichte / Density	[g/cm³]	1,76 – 1,78
Zugfestigkeit / Tensile Strength	[N/mm²]	3530 – 4210
Temperaturbeständigkeit / Temperature resistance	[°C]	>700
E-Modul / Tensile Modulus	[N/mm²]	230.000
Chemikalienbeständigkeit / Chemical Resistance		Gut (Basen & Säuren) / Well (Bases & Acids)

Bitte beachten Sie, dass Abweichungen von den genannten Werten von bis zu +/- 10% möglich sind!
Please note that the actual values may deviate from these specifications by up to +/- 10%!

Die vorstehenden Angaben in diesem Datenblatt, insbesondere Vorschläge für die Verarbeitung und den Einsatzbereich unserer Produkte, beruhen auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Auf Grund der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten und der außerhalb unseres Einflussbereiches liegenden Einsatz- und Arbeitsbedingungen übernehmen wir keine Haftung für die Eignung unserer Produkte für die relevanten Produktionsverfahren unter den konkreten Arbeitsbedingungen sowie die beabsichtigten Verarbeitungszwecke und Ergebnisse. **Um eine solche Eignung sicherzustellen, empfehlen wir in jedem Fall ausreichende vorherige Eigenversuche und Tests.**

Jede aus den Hinweisen in diesem technischen Datenblatt und jede aus sonstiger schriftlicher oder mündlicher Beratung für das vorliegende Produkt resultierende Haftung ist ausdrücklich ausgeschlossen, es sei denn, dass individualvertraglich etwas anderes vereinbart wurde, ein Fall der Verletzung von Leib, Leben oder Gesundheit vorliegt, uns Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt oder eine Haftung nach zwingendem Produkthaftungsrecht besteht.

The above specifications in this data sheet, in particular the suggestions for processing and for the area of use of our products, are based on our current state of knowledge and experience. Due to the variety of usage options, and the usage and working conditions which are outside our sphere of influence, we cannot assume any liability that our products are suitable for the relevant production processes under the specific working environment and the intended purpose of processing and its outcome. In order to ensure such suitability, we recommend you always conduct sufficient prior trials and tests.

Any liability resulting from the information in this technical data sheet as well as from any written or verbal consultancy services relating to this product is hereby expressly excluded, except if an individual contract specifically provides otherwise, if such liability results from the death of an individual, from bodily injuries or adverse health effects, in the event of fraud or gross negligence on our part, or in cases of liability under mandatory product liability law.

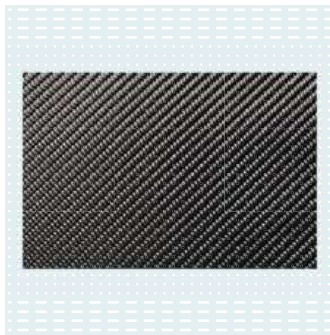
SILTEX Flecht- & Isoliertechnologie Holzmüller GmbH & Co. KG | Palmstraße 27 | D-84387 Julbach |
Tel.: +49 8571 92297-0 | Fax: +49 8571 92297-22 | Internet: www.siltex.de | Email: siltex@siltex.de

A.8 Katalogauszug Orthopoxgewebe [23]

Laminiertechnik

Epoxid Laminierharze

3



Orthopox Carbondgewebe

Kennzeichen 616G12

- Verstärkungsfasern für Orthopox Epoxidharz 617H5 sowie Harzfolie 616B60
- Nicht verwendbar mit Acrylharzen
- Kein Ausfransen der Fasern
- Kein doppelseitiges Klebeband notwendig

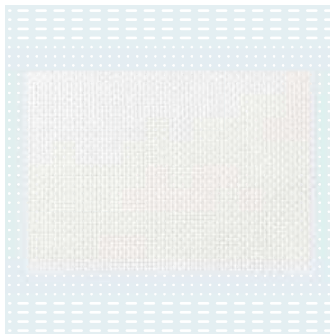
Technische Daten

Artikelnummer	Länge	Breite
616G12=H5.1	1 m	1,20 m
616G12=H5.5	5 m	1,20 m

Informationsmaterialien

646F351=DE_DE

Poster Laminierharze



Orthopox Gewebe flex

Kennzeichen 616G181

- Verstärkungsfasern für Orthopox Epoxidharz 617H5 sowie Harzfolie 616B60
- Nicht verwendbar mit Acrylharzen
- Dyneema-Ersatz mit besserer Harzhaftung
- Dient dem Bruchschutz
- Sehr gute Nachbearbeitung möglich (z. B. Schleifen)

Technische Daten

Artikelnummer	Länge	Breite
616G181=H5.2	2 m	1,25 m

Informationsmaterialien

646F351=DE_DE

Poster Laminierharze

A.9 Katalogauszug Epoxidgemisch [21]

Materialien für die Eingußtechnik – Gießen und Sichern

Systemschienen und Systemanker



Abb. 1



Abb. 2



Abb. 3



Abb. 4

Set Epoxidharz und Härter (Abb. 1)

Abb.	Artikelnummer	Bezeichnung	Inhalt	ME
-	KL1201	Set aus Epoxidharz und Härter	1 kg Harz und 0,19 kg Härter	Set
1	KL1202	Set aus Epoxidharz und Härter	5 kg Harz und 0,96 kg Härter	Set

Verwendungszweck: zum Laminieren von Orthesen

👍 speziell auf unsere Materialien abgestimmt und getestet

Materialeigenschaften: Die Verklebung lässt nach dem Aushärten

keine thermoplastische Verformung zu.

Werkzeuge

Farbpasten (Abb. 2)

Artikelnummer	Bezeichnung	Inhalt [g]	ME
KL1910	Farbpaste für Epoxidharz, blau	250	Dose
KL1911	Farbpaste für Epoxidharz, schwarz	250	Dose
KL1912	Farbpaste für Epoxidharz, weiß	250	Dose
KL1913	Farbpaste für Epoxidharz, gelb	250	Dose
KL1914	Farbpaste für Epoxidharz, orange	250	Dose
KL1915	Farbpaste für Epoxidharz, rot	250	Dose
KL1916	Farbpaste für Epoxidharz, grün	250	Dose

Verwendungszweck: zum Einfärben von Epoxidharzen

Materialeigenschaften: zur individuellen Gestaltung von Gießharzorthesen. Die verschiedenen Farben sind miteinander kombinierbar.

Der Farbanteil in der Farb-Epoxidharz-Mischung sollte bei 2-5 % liegen und 5 % nicht übersteigen.

Materialien

Kleber AGOMET® F330 (Abb. 3)

Artikelnummer	Bezeichnung	Inhalt [g]	ME
KL1100	Kleber, AGOMET® F330	800	Dose

Härter AGOMET® F330 (Abb. 4)

Artikelnummer	Bezeichnung	Inhalt [g]	ME
KL1100-H	Härter, AGOMET® F330	30	Tube

Set AGOMET® F330

Abb.	Artikelnummer	Bezeichnung	Inhalt [g]	ME
-	KL1101	Set aus Kleber und Härterpulver, AGOMET® F330	5	Dose

Verwendungszweck: zum Verkleben von CTC und CTS Materialien untereinander sowie mit Metallen

Materialeigenschaften: Die Verklebung lässt nach dem Aushärten

keine thermoplastische Verformung zu.

K5

A.10 Verarbeitungsanweisungen für das Epoxidgemisch [33]

Verarbeitung von Epoxidharz KL1201/2–O mit Härter KL1201/2–H

Verwendungszweck:

Zum Laminieren von Orthesen (speziell auf unsere Materialien abgestimmt und getestet).

Anwendungshinweise:

Mischungsverhältnis: 192 g Härter auf 1000 g Harz

Achten Sie auf ein exaktes Mischungsverhältnis (siehe Tabelle 1). Wird dieses Verhältnis nicht eingehalten, erreichen Sie nicht die optimale Festigkeit und ungebundene Härter- und Harzbestandteile treten aus und könnten bei Hautkontakt zu Gesundheitsschäden führen.

Achten Sie auf eine gute Vermengung. Fügen Sie nur speziell auf Epoxidharze abgestimmte Farben hinzu. Verwenden Sie diese mit einem maximalen Anteil von 2–5 %. Alle Zugaben von Fremdstoffen stellen eine Verunreinigung des Harzes dar und können seine Eigenschaften verändern.

Harz [g]	Härter [g]
100	19
150	29
200	38
250	48
300	58
350	67
400	77
450	86
500	96

Tabelle 1

Das Harz-Härter-Gemisch hat bei Raumtemperatur eine Verarbeitungszeit von 2–3 Stunden. Bei höheren Temperaturen verringern sich sowohl Viskosität als auch Verarbeitungszeit deutlich. Auch wenn das Harz-Härter-Gemisch länger steht, beispielsweise im Topf oder Einfüllschlauch, verringert sich die Verarbeitungszeit aufgrund der exothermen Reaktion und gleichzeitig verringerter Oberfläche.

Sie benötigen eine dauerlauffähige Unterdruckanlage, da das Laminat 8–10 Stunden bei Raumtemperatur unter Unterdruck auf dem Gipspositiv verbleiben muss. Nach insgesamt 10–12 Stunden können die Orthesenteile vom Gipspositiv geschnitten werden.

Die volle Endfestigkeit erreichen die Orthesenteile durch den Tempervorgang. Verwenden Sie zum Tempern einen Umluftofen, der gleichmäßig heizt. Die Orthese sollte montiert getempert werden, um einem Verformen der Orthesenteile vorzubeugen. Entfernen Sie jedoch alle Bestandteile, die

die Hitze nicht vertragen (z. B. Höhenausgleiche aus Hartschaum, Steuereinheitenaufnahme, Steuereinheit, Sensor etc.), ebenso wie Folien, Harz- und Wachsreste.

Legen Sie die Orthesenteile in den kalten Ofen und heizen diesen dann auf (Temperatur siehe Tabelle 2). Da durch das Erhitzen die Oberflächen weicher werden, vermeiden Sie Beschädigungen, indem Sie die Orthesenteile auf ihre Kanten legen.

Die Orthesenteile verbleiben für eine bestimmte Zeit (siehe Tabelle 2) im Ofen und werden erst entnommen, wenn die Temperatur des Ofens nach dem Ausschalten wieder auf Raumtemperatur abgesunken ist.

Die thermische Behandlung des Laminates ist unabdingbar zur Ausschöpfung der Materialeigenschaften. Erhitzen Sie die Orthesenteile jedoch niemals über 140°C!

Temperatur*	Mindestdauer
120 °C	1 Stunde
100 °C	2 Stunden
80 °C	3 Stunden

* Stellen Sie mit einem Thermometer sicher, dass die Temperatur die richtige ist, da die tatsächliche Ofentemperatur von der eingestellten abweichen kann.

Tabelle 2

Sonstige Hinweise:

Epoxidharz ist ein Duroplast. Beachten Sie daher bei der Wahl Ihrer Arbeitstechnik, dass ein erneutes Laminieren nicht empfohlen wird. Bereits ausgehärtete Flächen können vom Epoxidharz nicht angelöst werden und somit kann keine Verbindung entstehen.

Ein anschließendes Verformen durch Erwärmen des Laminates ist nicht möglich.

A.11 Verarbeitungsanweisungen für das Epoxidharz [34]

Seite 1 von 7

23.10.2015
Epoxidharz

Sicherheitsdatenblatt gemäß Richtlinie 1907/2006/(EG)1272/2008/(EU)215/830

1. Bezeichnung des Stoffes bzw. des Gemisches und des Unternehmens

Artikelnummer: KL1201-0, KL1202-0**Artikelbezeichnung:** Epoxidharz**Hersteller:** IBS Group
Porschestra. 17
51381 LeverkusenTel.: +49 2171 58107-0
Fax: +49 2171 58107-13**Lieferant:** Firma FIOR & GENTZ Gesellschaft für Entwicklung und
Vertrieb von orthopädietechnischen Systemen mbH
Dorette-von-Stern-Straße 5
21337 LüneburgTel.: +49 4131 24445-0
Fax: +49 4131 24445-57**Notrufnummer:**

Giftinformationszentrale Berlin	Tel.: +49 30 19240
Giftinformationszentrale Bonn	Tel.: +49 288 19240
Giftinformationszentrale München	Tel.: +49 89 19240

2. Mögliche Gefahren

Gefahrenbezeichnung: Xi – Reizend
N – UmweltgefährlichGHS07
AchtungGHS09
Achtung**Besondere Gefahrenhinweise für Mensch und Umwelt:** siehe Abschnitt 15

3. Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen

Chemische Charakterisierung: flüssiges, modifiziertes Epoxidharz auf Basis Bisphenol
A/F
mittleres Molekulargewicht <= 700**FIOR & GENTZ**Gesellschaft für Entwicklung und Vertrieb
von orthopädietechnischen Systemen mbHDorette-von-Stern-Straße 5
D-21337 Lüneburg☎ +49 4131 24445-0
☎ +49 4131 24445-57✉ info@fior-gentz.de
🌐 www.fior-gentz.de**FIOR & GENTZ**
ORTHOPÄDIETECHNIK MIT SYSTEM

Seite 2 von 7

23.10.2015
Epoxidharz

Gefährliche Inhaltsstoffe	CAS-Nr.	Gehalt [%]	EINECS-Nr.:	EG-Nr.:
Epoxidharzderivate	25068-38-6	15 - 30	500-033-5	603-074-008
Bisphenol-A- Epichlorhydrinharze	25068-38-6	> 50	500-033-5	603-074-008
Bisphenol-F- Epichlorhydrinharze	9003-36-5	25 - 50	500-033-5	603-074-008

Gefahrensymbol:	Xi – reizend, N – umweltgefährdend
R-Sätze:	R36/37/38, R43, R51/53 (siehe Abschnitt 15)
GHS:	Gemisch H315, H317, H319, H411 P280, P262, P264, P273
PBT und vPvB:	nicht anwendbar

4. Erste-Hilfe-Maßnahmen

Allgemeine Hinweise:	Beschmutzte und getränkte Kleidung sofort wechseln.
Nach Einatmen:	Bei Reizung der Atemwege für viel Frischluft sorgen. Arzt aufsuchen.
Nach Hautkontakt:	Mit viel Wasser und Seife abwaschen; ggf. Arzt aufsuchen.
Nach Augenkontakt:	Vorsichtig und gründlich bei geöffnetem Lid mit Wasser spülen; sofort Augenarzt konsultieren.
Nach Verschlucken:	Mund ausspülen und reichlich Wasser nachtrinken. Sofort Arzt aufsuchen.

5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung

Geeignete Löschmittel:	Trockenlöschpulver, Kohlendioxyd, alkoholbeständiger Schaum, Wassersprühstrahl
Besondere Schutzausrüstung:	Vollschutanzug tragen, Atemschutzgerät mit unabhängiger Luftzufuhr.
Weitere Angaben:	Bei Brand Entstehung von Kohlenmonoxid (CO) oder Spuren von Chlorwasserstoff (HCl) möglich. Löschwasser und Brandrückstände entsprechend den behördlichen Vorschriften entsorgen.

6. Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen:	Für ausreichend Belüftung sorgen. Ungeschützte Personen fernhalten.
Umweltschutzmaßnahmen:	Nicht in Kanalisation/Oberflächenwasser/Grundwasser gelangen lassen.

Seite 3 von 7

23.10.2015
Epoxidharz**Verfahren zur
Reinigung/Aufnahme:**

Mechanisch entfernen; Rest mit inerten Materialien wie z. B. Sägemehl, Sand oder Calciumsilikat-Hydrat abdecken. Weitere Entsorgung durch lizenzierte Entsorgungsunternehmen.

7. Handhabung und Lagerung**Handhabung****Hinweise zum sicheren Umgang:**

Für ausreichende Lüftung oder Absaugung am Arbeitsplatz sorgen. Luftabsaugung bei Sprühverarbeitung erforderlich. Berührung mit der Haut und den Augen vermeiden.

**Hinweise zum Brand- und
Explosionsschutz:**

Von Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.

Lagerbedingungen**Anforderungen an Lagerräume
und Behälter:**

Behälter kühl (10 - 25 °C) trocken und dicht verschlossen an gut gelüftetem Ort aufbewahren.

Zusammenlagerungshinweise:

nicht erforderlich

Lagerklasse:

10 (brennbare Flüssigkeiten; VCI-Konzept)

VbF-Klasse:

entfällt

**8. Begrenzung und Überwachung der Exposition und persönliche
Schutzausrüstung****Zusätzliche Hinweise zur
Gestaltung technischer Anlagen:**

keine weiteren Angaben (siehe Abschnitt 7)

**Allgemeine Schutz- und
Hygienemaßnahmen:**

Nicht essen, trinken oder rauchen beim Umgang. Vor den Pausen und bei Arbeitsende Hände waschen. Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden.

Persönliche Schutzausrüstung**Atemschutz:**

Bei Sprühapplikation und unzureichender Belüftung erforderlich.

Handschutz:

Schutzhandschuhe

Handschuhmaterial:

aus NBR, IIR, FKM oder Gummi

Augenschutz:

dicht schließende Schutzbrille

Körperschutz:

Arbeitsschutzkleidung

9. Physikalische und chemische Eigenschaften

Form:	flüssig
Farbe:	klar
Geruch:	geruchlos

Zustandsänderung

Schmelzpunkt/Schmelzbereich:	nicht bestimmt
Siedepunkt/Siedebereich:	nicht bestimmt
Thermische Zersetzung:	190 - 200 °C
Flammpunkt:	160 °C (DIN 51758)
Explosionsgrenzen:	nicht bestimmt
Zündtemperatur:	nicht bestimmt
Dampfdruck:	bei 20 °C < 1 (mbar)
Dichte:	bei 20 °C ca. 1,12 - 1,18 g/cm ³
Wasserlöslichkeit:	unlöslich
pH-Wert:	nicht bestimmt
Verteilungskoeffizient n- Oktanol/Wasser (log POW):	nicht bestimmt
Viskosität 20 °C:	1000 - 1200 mPa

10. Stabilität und Reaktivität

Thermische Zersetzung/zu vermeidende Bedingungen:	bei sachgemäßer Handhabung keine
Zu vermeidende Stoffe:	starke Säuren, Basen oder andere Oxidationsmittel, Hitze, offene Flamme
Gefährliche Zersetzungsprodukte:	reizende Gase/Dämpfe

11. Toxikologische Angaben

Akute Toxizität

Einstufungsrelevanter LD/LC50-Wert:	LD 50 oral Ratte: > 11.200 mg/kg
25068-38-6	LC 50 inhalativ Ratte: > 2000 mg/kg
Bisphenol-A/F- Epichlorhydrinharze:	MG ≤ 700

Primäre Reizwirkung

An der Haut:	reizt die Haut und die Schleimhaut
Am Auge:	Reizwirkung
Sensibilisierung:	durch Hautkontakt möglich

Zusätzliche toxikologische Hinweise:
keine Hinweise auf mutagene Wirkung

Seite 5 von 7

23.10.2015
Epoxidharz**Besondere Eigenschaften/Wirkung:**

Bei sachgemäßem Umgang und bestimmungsgemäßer Verwendung verursacht das Produkt nach unseren Erfahrungen und den uns vorliegenden Informationen keine gesundheitsschädlichen Wirkungen.

12. Umweltbezogene Angaben**Angaben zur Elimination:**

Produkte sind schwer biologisch abbaubar.

Ökotoxische Wirkungen:**Aquatische Toxizität:**

Testart	Wirkkonzentration	Methode/Bewertung
Regenbogenforelle	LC50 (96 h)	1,5 - 7,7 mg/l
Daphnia magna	EC50 (24 h)	1,1 - 3,6 mg/l
Grünalge	EC50 (96 h)	220 mg/l

(Bisphenol-A/F-Epichlorhydrinharze MG ≤700)

Allgemeine Hinweise

Da die Verbindung biologisch nicht abbaubar ist, muss mit längeren Verweilzeiten des Produktes im Wasser gerechnet werden. Nicht in Grundwasser, in Gewässer oder in die Kanalisation gelangen lassen.

13. Hinweise zur Entsorgung

Produkt: Epoxidharz

Empfehlung: Kann unter Beachtung der behördlichen Vorschriften in geeigneten Anlagen verbrannt werden.

Europäischer Abfallkatalog:

Ungereinigte Verpackungen: Entsorgung der Leergebinde nur unter Beachtung der behördlichen Vorschriften.
Die Verwertung muss gemäß nationaler Gesetzgebung und Umweltschutzbestimmungen erfolgen.

14. Angaben zum Transport**Landtransport - ADR/RID**

Klasse: 9
Verpackungsgruppe: III
Gefahrnummer: 90
UN-Nr.: 3082
Bezeichnung des Gutes: Umweltgefährdender Stoff, flüssig, n. a. g. (Epoxidderivate)

Seite 6 von 7

23.10.2015
Epoxidharz**Seeschiffstransport - IMDG/GGVSee**

Klasse:	9
UN-Nr.:	3082
PG:	III
EMS:	no
MPO:	yes
MFAG:	no
ADNR Kl.:	-

Deklaration

Environmentally hazardous substance, liquid, n.o.s. (containing epoxide derivatives)

Lufttransport - ICAO/IATA:

Klasse:	9
UN/ID-Nr.:	UN 3082
PG:	III

Deklaration Luft

Environmentally hazardous substance, liquid, n.o.s. (containing epoxide derivatives)

15. Angaben zu Rechtsvorschriften**Kennzeichnung gemäß der Gefahrstoffverordnung und EG-Richtlinien**

Kennbuchstabe:	Xi – reizend
	N – umweltgefährdend

Gefahrenbezeichnung:	GHS09, GHS07
-----------------------------	--------------

R-Sätze:	R36/37/38	Reizt die Atmungsorgane, die Augen und die Haut.
	R42/43	Sensibilisierung durch Einatmen und Hautkontakt möglich.
	R51/53	Giftig für Wasserorganismen, kann in Gewässern längerfristig schädliche Wirkung haben.

S-Sätze:	S24	Berührung mit der Haut vermeiden.
	S26	Bei Berührung mit den Augen sofort abspülen und Arzt aufsuchen.
	S37/38/39	Bei der Arbeit geeignete Schutzhandschuhe, Schutzbrille tragen. Bei Berührung mit der Haut sofort mit viel Wasser und Seife abwaschen.
	S45	Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen.
	S61	Freisetzung in die Umwelt vermeiden. Besondere Anweisungen einholen.

Besondere Kennzeichnung bestimmter Zubereitungen:

Enthält epoxidhaltige Verbindungen.

FIOR & GENTZGesellschaft für Entwicklung und Vertrieb
von orthopädietechnischen Systemen mbHDorette-von-Stern-Straße 5
D-21337 Lüneburg☎ +49 4131 24445-0
☎ +49 4131 24445-57✉ info@fior-gentz.de
🌐 www.fior-gentz.de


ORTHOPÄDIETECHNIK MIT SYSTEM

Seite 7 von 7

23.10.2015
Epoxidharz**Nationale Vorschriften:**

Störfallverordnung:	Die Mengenschwellen laut Störfallverordnung sind zu beachten.
Klassifizierung nach VbF:	entfällt
Wassergefährdungsklasse:	WGK 2 wassergefährdend (KBwS-Beschluss)
Dokument der APME:	„Epoxidharze und Härter (Toxikologie, Arbeitssicherheit, Umwelt)“
BG-Merkblatt:	M023 „Polyester- und Epoxid-Harze“ (ZH 1/301)

16. Sonstige Angaben**Mitgeltende EG-Richtlinien**

Zubereitungsrichtlinien (1999/45/EG), zuletzt geändert durch die Richtlinie 2006/8/EG;
Stoffrichtlinie (67/548/EWG), zuletzt geändert durch die Richtlinie 2006/121/EG.
Gemäß Richtlinie 1907/2006 (REACH)/(EG)1272/2008/(EU)215/830

Gründe für Änderungen

Anpassung gemäß REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

Die vorstehenden Angaben stützen sich auf den heutigen Stand unserer Kenntnisse und Erfahrungen. Sie stellen jedoch keine Zusicherung von Produkteigenschaften dar und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis.

A.12 Verarbeitungsanweisungen für den Härter [35]

Seite 1 von 7

23.10.2015
Härter

Sicherheitsdatenblatt gemäß Richtlinie 1907/2006/ (EG)1272/2008/(EU)215/830/(EC)453/2010/(EU)1999/45/EG

1. Bezeichnung des Stoffes/der Zubereitung und des Unternehmens

Artikelnummer: KL1201-H, KL1202-H

Artikelbezeichnung: Härter

Hersteller: IBS Group
Porschestr. 17
51381 Leverkusen

Tel.: +49 2171 58107-0
Fax: +49 2171 58107-13

Lieferant: Firma FIOR & GENTZ Gesellschaft für Entwicklung und
Vertrieb von orthopädietechnischen Systemen mbH
Dorette-von-Stern-Straße 5
21337 Lüneburg

Tel.: +49 4131 24445-0
Fax: +49 4131 24445-57

Notrufnummer:
Giftnformationszentrale Berlin Tel.: +49 30 19240
Giftnformationszentrale Bonn Tel.: +49 288 19240
Giftnformationszentrale München Tel.: +49 89 19240

2. Mögliche Gefahren

Einstufung Nr. 1272/2008: Gemisch

Piktogramme:



GHS08
Gesundheitsgefahr



GHS05
Ätzwirkung

Signalwort: Gefahr
N = umweltgefährlich; C = ätzend

H-Sätze:

H302: gesundheitsschädlich beim Verschlucken
H312: gesundheitsschädlich bei Hautkontakt
H317: Kann allergische Hautreaktionen verursachen.
H412: schädlich für Wasserorganismen, langfristig
H304: Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.
H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.

FIOR & GENTZ

Gesellschaft für Entwicklung und Vertrieb
von orthopädietechnischen Systemen mbH

Dorette-von-Stern-Straße 5
D-21337 Lüneburg

☎ +49 4131 24445-0
☎ +49 4131 24445-57

✉ info@fior-gentz.de
🌐 www.fior-gentz.de

FIOR & GENTZ
ORTHOPÄDIETECHNIK MIT SYSTEM

Seite 2 von 7

23.10.2015
Härter**R-Sätze:**

- R50/53: giftig für Wasserorganismen, langfristig
 R43: Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich.
 R21/22: gesundheitsschädlich bei Berührung mit der Haut
 R34: Verursacht Verätzungen.
 [C] 1999/45/EG
 R65: Gesundheitsschädlich; kann beim Verschlucken Lungenschäden verursachen.
 [Xn] 1999/45/EG
 R52/53: schädlich für Wasserorganismen, langfristig schädigende Wirkung

S-Sätze:

- S26: Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren.
 S36/37/39: Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung, Schutzhandschuhe, Schutzbrille/ Gesichtsschutz tragen.
 S45: Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen.
 S60: Produkt und Behälter als gefährlichen Abfall entsorgen.
 S61: Freisetzung in die Umwelt vermeiden.

Enthält: Pentaethylenhexamin, Isophorondiamin, Hexaethylenpolyamin
 Gefährliche Inhaltsstoffe: PEHA, IPA, HEPA

Gefahren/Sicherheitshinweise: H315, H319, H317, H411 / P262, P273, P264, P280
 H411: giftig für Wasserorganismen, auch langfristig
 P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen
 P262: Nicht in die Augen, auf die Haut oder auf die Kleidung gelangen lassen.
 P273: Freisetzung in die Umwelt vermeiden.
 P 264: Nach Gebrauch gründlich waschen.

Zusätzliche Hinweise:

- P 305+351+338: Bei Kontakt mit den Augen sofort mit Wasser spülen, Kontaktlinsen entfernen.
 P303+361+353: Bei Kontakt mit Haut und Haaren alle betroffenen Kleidungsstücke ausziehen, mit Wasser duschen.
 P405: unter Verschluss aufbewahren
 P501: Inhalt/Behälter behördlich in genehmigten Anlagen entsorgen.

Sonstige Gefahren:

- PBT: nicht anwendbar
 vPvB: nicht anwendbar

3. Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen**Chemische Charakterisierung:****HEPA**

	CAS-Nr.	Gehalt [%]	GHS
Index Nr. 612-121-00-1	68131-73-7 (NLP-Nummer)	5 - 20	GHS 07, 09

PEHA

	CAS-Nr.	Gehalt [%]	GHS
Index Nr. 612-064-00-2	4067-16-7 (NLP-Nummer)	20 - 60	GHS 05, 08

IPA

	CAS-Nr.	Gehalt [%]	GHS
Index Nr. 612-067-00-9	2855-13-2 (NLP-Nummer)	20 - 60	GHS 07, 05

FIOR & GENTZ

Gesellschaft für Entwicklung und Vertrieb
 von orthopädietechnischen Systemen mbH

Dorette-von-Stern-Straße 5
 D-21337 Lüneburg

☎ +49 4131 24445-0
 ☎ +49 4131 24445-57

✉ info@fior-gentz.de
 🌐 www.fior-gentz.de



Seite 3 von 7

23.10.2015
Härter

Einstufung Nr. 1272/2008: Gemisch
Gefahrensymbol: Xi – reizend; N – umweltgefährlich (N/Xi)

4. Erste-Hilfe-Maßnahmen

Allgemeine Hinweise:	Beschmutzte und getränkte Kleidung sofort wechseln.
Nach Einatmen:	Bei Reizung der Atemwege für viel Frischluft sorgen, Arzt aufsuchen.
Nach Hautkontakt:	Sofort mit viel Wasser abwaschen; sterilen Schutzverband anlegen, Arzt aufsuchen.
Nach Augenkontakt:	Vorsichtig und gründlich bei geöffnetem Lid mit Wasser spülen, sofort Augenarzt konsultieren.
Nach Verschlucken:	Mund ausspülen und reichlich Wasser nachtrinken, sofort Arzt aufsuchen.

5. Maßnahmen zur Brandbekämpfung

Geeignete Löschmittel:	Trockenlöschpulver, Kohlendioxid, Schaum, Wassersprühstrahl
Besondere Schutzausrüstung:	Atemschutzgerät mit unabhängiger Luftzufuhr, Chemieschutzanzug
Weitere Angaben:	Löschwasser und Brandrückstände entsprechend den behördlichen Vorschriften entsorgen.

6. Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung

Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen:	Einatmen (Dampf/Aerosol) vermeiden. Ungeschützte Personen fernhalten.
Umweltschutzmaßnahmen:	Nicht in die Kanalisation gelangen lassen. Zündquellen fernhalten.
Verfahren zur Reinigung/Aufnahme:	Mit inerten Materialien (z. B. Sägemehl, Sand oder Kalziumsilikathydrat) aufnehmen. Größere Mengen eindämmen und in Behälter pumpen.

7. Handhabung und Lagerung

Handhabung

Hinweise zum sicheren Umgang:	Gefäße nicht offen stehen lassen. Für ausreichende Lüftung oder Absaugung am Arbeitsplatz sorgen. Luftabsaugung bei Sprühverarbeitung erforderlich. Berührung mit der Haut und den Augen vermeiden
Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz:	Von Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.

Seite 4 von 7

23.10.2015
Härter**Lagerbedingungen****Anforderung an Lagerräume und Behälter:**

Behälter trocken und dicht verschlossen bei Raumtemperatur, <20> °C, an gut gelüftetem Ort aufbewahren. Vor Säure und säurebildenden Stoffen schützen, Aerosolbildung vermeiden.

VbF-Klasse:

entfällt

Lagerklasse:

nach (BetrSichV)

8. Begrenzung und Überwachung der Exposition und persönliche Schutzausrüstung**Zusätzliche Hinweise zur Gestaltung technischer Anlagen:**

keine weiteren Angaben; siehe Abschnitt 7

Persönliche Schutzausrüstung**Atemschutz:**

Filter A/P2

Handschutz:

Schutzhandschuhe aus NBR, IIR, FKM oder Gummi

Augenschutz:

dicht schließende Schutzbrille

Körperschutz:

Geschlossene Arbeitsschutzkleidung, Chemieschutzanzug tragen.

Allgemeine Schutz- und Hygienemaßnahmen:

Nicht essen, trinken oder rauchen beim Umgang.
Vor den Pausen und bei Arbeitsende Hände waschen.
Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden.

9. Physikalische und chemische Eigenschaften**Form:**

flüssig, viskos

Farbe:

farblos - gelb

Geruch:

aminartig

Zustandsänderung**Schmelzpunkt/Schmelzbereich:**

nicht anwendbar

Siedepunkt/Siedebereich:

> 200 °C, nicht bestimmt (Stockpunkt: - 16 °C)

Flammpunkt:

ca. 200 °C (EU A.9)

Explosionsgrenzen:

untere: nicht bestimmt obere: nicht bestimmt

Zündtemperatur:

ca. 455 °C (DIN 51794)

Dampfdruck:

bei 20 °C ca. 0,0000046 hPa

Dichte:bei 20 °C ca. 1,180 g/cm³**Löslichkeit in Wasser:**

bei 20 °C ca. 0,0069 g/l

Löslichkeit in anderen**Lösemitteln:**

nicht bestimmt

Lösemittel:

mit organischen Lösemitteln mischbar

pH-Wert:

bei 100 g/l, bei 20 °C = 11

Verteilungskoeffizient n-Oktanol/**Wasser (log POW):**

3,242 log POW

Viskosität, dynamisch:

bei 25 °C ca. 10 -14 mPa·s

Seite 5 von 7

23.10.2015
Härter**10. Stabilität und Reaktivität**

Thermische Zersetzung/zu vermeidende Bedingungen:	nicht bestimmt
Gefährliche Zersetzungsprodukte:	reizende Gase/Dämpfe
Zu vermeidende Stoffe:	nicht bestimmt

11. Toxikologische Angaben**Primäre Reizwirkung**

An der Haut:	reizend
Am Auge:	reizend
Sensibilisierung:	durch Hautkontakt möglich

Zusätzliche toxikologische Hinweise: Fischtoxizität LC 50/96 h *Leuciscus idus*: 2,0 mg/l/96 h

Besondere Eigenschaften/Wirkung: Keine experimentellen Hinweise auf mutagene Wirkung vorhanden.

12. Umweltspezifische Angaben

(Richtwerte orientiert an chemisch ähnlichen Verbindungen)

Angaben zur Elimination: Produkte sind schwer biologisch abbaubar.

Verhalten in Umweltkompartimenten: Wassergefährdendes Produkt
WGK 2: wassergefährdend

Allgemeine Hinweise: Das Produkt ist eine Lauge. Vor Einleiten eines Abwassers in Kläranlagen ist eine Neutralisation erforderlich. Bei sachgemäßer Einleitung geringer Konzentrationen in adaptierte biologische Kläranlagen sind Störungen der Abbaubarkeit von Belebtschlamm nicht zu erwarten.

13. Hinweise zur Entsorgung

Produkt: Härter

Empfehlung: Kann unter Beachtung der behördlichen Vorschriften in geeigneten Anlagen verbrannt werden.

**Europäischer Abfallkatalog
Ungereinigte Verpackungen:** Entsorgung der Leergebinde nur unter Beachtung der behördlichen Vorschriften.
Die Verwertung muss gemäß nationaler Gesetzgebung und Umweltschutzbestimmungen erfolgen.

Seite 6 von 7

23.10.2015
Härter**14. Angaben zum Transport****Landtransport - ADR/RID:**

Klasse:	8
Verpackungsgruppe:	III
Kemler-Zahl:	80
UN-Nr.:	2735
Klassifizierung:	C7
Bezeichnung des Gutes:	AMINE, liquid, CORROSIVE, N.O.S., (poly amine)

Seeschiffstransport - IMDG/GGVSee:

Klasse:	8
UN-Nr.:	2735
Verpackungsgruppe, PG:	III
EMS:	F-A, S-B
MPO:	no
MFAG:	A-F
ADNR Klasse:	III
Marine pollutant:	GHS05, GHS08
Richtiger technischer Name:	3-Aminomethyl-3,5,5-trimethyl-cyclohexylamine

Expressgut gemäß GGVE zugelassen: Deutschland**Lufttransport - IATA-DGR/ ICAO-T1:**

Klasse:	8
UN-Nr.:	UN 2735
Verpackungsgruppe, PG:	III
Deklaration Luft:	3-Aminomethyl-3,5,5-trimethyl-cyclohexylamine PBT: nicht anwendbar, vPvB: nicht anwendbar

Tunnelbeschränkungscode: E

UN "Model Reg.": UN 2735, AMINE, liquid, CORROSIVE, N.O.S., (poly amine)

15. Angaben zu Rechtsvorschriften**Kennzeichnung gemäß Gefahrstoffverordnung und EG-Richtlinien**

Kennbuchstabe:	Xi – reizend N – umweltgefährlich
-----------------------	--------------------------------------

Gefahrenbezeichnung

Wassergefährdungsklasse:	WGK 2 wassergefährdend nach VwVwS
Klassifizierung nach VbF:	entfällt

16. Sonstige Angaben**Mitgeltende EG-Richtlinien**

Zubereitungsrichtlinien (1999/45/EG), zuletzt geändert durch die Richtlinie 2006/8/EG;
Stoffrichtlinie (67/548/EWG), zuletzt geändert durch die Richtlinie 2006/121/EG.
REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

Seite 7 von 7

23.10.2015
Härter

Gründe für Änderungen:

Anpassung gemäß REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

Die vorstehenden Angaben stützen sich auf den heutigen Stand unserer Kenntnisse und Erfahrungen. Sie stellen jedoch keine Zusicherung von Produkteigenschaften dar und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis.

B Laminataufbauweisen

Tabelle 7: Laminataufbau am Oberschenkel für einen 100 kg Patienten nach Sturm

Lagen	Orthopox- gewebe	Carbon- band	Carbon- gewebe	Carbon- schlauch	PVC- Stäbe	PA- Armie- rungs- strumpf	Damen- strumpf
1						X	
1	X						
1			X				
1			3/4 Lage				
1		unter den Stäben					
3				X	X		
2		über den Stäben					
1			X				
1							X

Tabelle 8: Laminataufbau am Unterschenkel für einen 100 kg Patienten nach Sturm

Lagen	Orthopox- gewebe	Carbon- band	Carbon- gewebe	Carbon- schlauch	PVC- Stäbe	PA- Armie- rungs- strumpf	Damen- strumpf
1						X	
1	X						
1			X				
1			3/4 Lage				
1		unter den Stäben					
3				X	X		
2		über den Stäben					
1			X				
1							X

C Festigkeitsanalyse nach Puck

In diesem Abschnitt sind die genauen Randbedingungen und Berechnungen für die verschiedenen Bruchmodi nach Puck aufgeführt. In Abbildung 33 sind der Gültigkeitsbereich sowie die Bruchbedingungen aufgeführt. Die für die Berechnung nötigen Parameter werden wie in Abbildung 34 dargestellt bestimmt. Die nötigen Variablen für Spannungen (σ_2, τ_{12}) und Festigkeiten ($R_{\perp}, R_{\perp\parallel}, R_{\perp\perp}$) sind wie in Kapitel 4.3 vergeben.

Modus	Bruchbedingung	Gültigkeitsbereich
A $\theta_{fp} = 0$	$\sqrt{\left(1 - p_{\perp\parallel}^{(+)} \frac{R_{\perp}^{(+)}}{R_{\perp\parallel}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_2}{R_{\perp}^{(+)}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{21}}{R_{\perp\parallel}}\right)^2} + p_{\perp\parallel}^{(+)} \frac{\sigma_2}{R_{\perp\parallel}} = 1$	$\sigma_2 \geq 0$
B $\theta_{fp} = 0$	$\frac{1}{R_{\perp\parallel}} \left(\sqrt{\tau_{21}^2 + \left(p_{\perp\parallel}^{(-)} \cdot \sigma_2\right)^2} + p_{\perp\parallel}^{(-)} \cdot \sigma_2 \right) = 1$	$\sigma_2 < 0$ und $0 \leq \left \frac{\sigma_2}{\tau_{21}} \right \leq \frac{R_{\perp\perp}^A}{ \tau_{21c} }$
C $\cos \theta_{fp} = \sqrt{\frac{R_{\perp\perp}^A}{-\sigma_2}}$	$\left[\left(\frac{\tau_{21}}{2(1 + p_{\perp\parallel}^{(-)}) R_{\perp\parallel}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{R_{\perp}^{(-)}} \right)^2 \right] \frac{R_{\perp}^{(-)}}{(-\sigma_2)} = 1$	$\sigma_2 < 0$ und $0 \leq \left \frac{\tau_{21}}{\sigma_2} \right \leq \frac{ \tau_{21c} }{R_{\perp\perp}^A}$

Abbildung 33: Randbedingungen und Bruchbedingungen für die Bruchmodi nach Puck [19]

Definitionen		
$p_{\perp\parallel}^{(+)} = - \left. \frac{d\tau_{21}}{d\sigma_2} \right _{\sigma_2=0}$ der (σ_2, τ_{21}) -Kurve für $\sigma_2 \geq 0$		
$p_{\perp\parallel}^{(-)} = - \left. \frac{d\tau_{21}}{d\sigma_2} \right _{\sigma_2=0}$ der (σ_2, τ_{21}) -Kurve für $\sigma_2 \leq 0$		
Parameter-Beziehungen		
$p_{\perp\perp}^{(-)} = p_{\perp\parallel}^{(-)} \frac{R_{\perp\perp}^A}{R_{\perp\parallel}}$	$R_{\perp\perp}^A = \frac{R_{\perp\parallel}}{2p_{\perp\parallel}^{(-)}} \left(\sqrt{1 + 2p_{\perp\parallel}^{(-)} \frac{R_{\perp}^{(-)}}{R_{\perp\parallel}}} - 1 \right)$	$\tau_{21c} = R_{\perp\parallel} \sqrt{1 + 2p_{\perp\parallel}^{(-)}}$

Abbildung 34: Bruchparameter für die Berechnung der Bruchmodi nach Puck [19]

D Berechnungen von mechanischen und geometrischen Bedingungen

Im Folgenden werden die benötigten Berechnungen genauer erläutert. Die mechanischen Grundlagen basieren hierbei auf Formeln aus dem Dubbel [20]. Zur Berechnung der genauen Kräfteumstände an der Probe ist das Aufstellen des Kräftegleichgewichts nötig. Die Probe muss dafür freigeschnitten werden, sodass die in Abbildung 35 dargestellten Kräfte erkennbar sind.

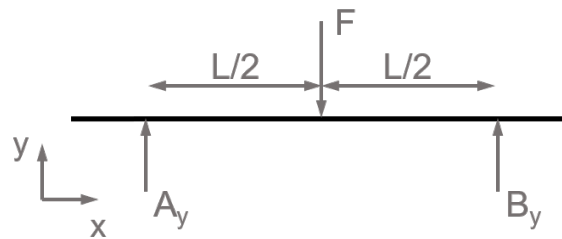


Abbildung 35: Freischnitt der Probe

Auf dieser Basis können die auftretenden Lagerkräfte A_y und B_y , unter Zunahme der aufgebrachten Kraft F und dem Lagerabstand L , berechnet werden:

$$\Sigma M_A = 0 = -F \cdot \frac{L}{2} + B_y \cdot L \quad (33)$$

$$\rightarrow B_y = \frac{F}{2} \quad (34)$$

$$\Sigma F_y = 0 = F - A_y - B_y \quad (35)$$

$$\rightarrow A_y = \frac{F}{2} \quad (36)$$

Um das Biegemoment M_z zu bestimmen, werden die Schnittkräfte an den drei Krafteinleitungspunkten der Probe berechnet:

$$x_A = 0 : Q_y(0) = \frac{F}{2} \quad (37)$$

$$M_z(0) = 0 \quad (38)$$

$$x_F = \frac{L}{2} : Q_y\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{F}{2} - F = -\frac{F}{2} \quad (39)$$

$$M_z\left(\frac{L}{2}\right) = -F \frac{L}{4} \quad (40)$$

$$x_B = L : Q_y(L) = -\frac{F}{2} \quad (41)$$

$$M_z(L) = 0 \quad (42)$$

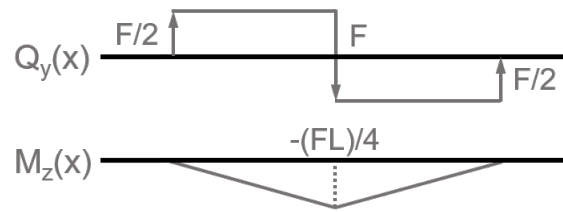


Abbildung 36: Schnittkräfte an der Probe

Mit Hilfe des berechneten maximalen Biegemomentes kann die maximale Biegespannung σ_{bmax} berechnet werden. Diese ist zusätzlich abhängig von dem Widerstandsmoment W_z der Probe gegen Biegung und damit von der Probenbreite b und -höhe h .

$$W_z = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (43)$$

$$\sigma_{bmax} = \frac{|M_z(\frac{L}{2})|}{W_z} = \frac{3 FL}{2 bh^2} \quad (44)$$

E Abschätzung des Faservolumengehaltes der Proben

Um für die materialtechnische Betrachtung einen Faservolumengehalt zu ermitteln, wurde hierfür eine Abschätzung durchgeführt.

Hierfür wurden zunächst je eine Probe pro Variation und ein definierter Ausschnitt pro Faser gewogen. Basierend auf der Masse pro Fläche der Fasern wurde für jeden Aufbau eine Fasermasse m_F berechnet. Hierbei entspricht n_x der Anzahl an Lagen dieser Faser und m_x der entsprechenden Masse:

$$m_F = n_{Orth} \cdot m_{Orth} + n_{Band} \cdot m_{Band} + n_{Ge-2,5} \cdot m_{Ge-2,5} + n_{Ge+2,5} \cdot m_{Ge+2,5} + n_{Ge+7,5} \cdot m_{Ge+7,5} \quad (45)$$

Dieses Gewicht wurde im Folgendem von der gewogenen Masse der Probe abgezogen, um das vermutliche Matrixgewicht m_M zu bekommen. In Ermangelung von Daten für die Dichte des ausgehärteten Harzes oder der Fasern wurde mit der in Kapitel A angegebenen Dichte für das nicht ausgehärtete Harz weiter gerechnet. Durch Teilung der berechneten Masse durch die Matrixdichte ρ_M wurde ein theoretisches Volumen der Matrix V_M berechnet. Des Weiteren wurde ein Volumen der Gesamtprobe V_P berechnet, unter Annahme eines sprunghaften Wechsels der Probendicke vom dickeren (h_{dick}) auf den dünneren (h_{dnn}) Bereich:

$$V_{P+7,5} = b \cdot L \cdot h_{dick} \quad (46)$$

$$V_{P+2,5} = b \cdot L \cdot \left(\frac{3}{4} h_{dick} + \frac{1}{4} h_{dnn} \right) \quad (47)$$

$$V_{P+7,5} = b \cdot L \cdot \left(\frac{1}{4} h_{dick} + \frac{3}{4} h_{dnn} \right) \quad (48)$$

Ausgehend von diesen Volumina wurde ein möglicher Faservolumengehalt abgeschätzt:

$$FVG_P = \frac{V_P - V_M}{V_P} = \frac{1}{V_P} \frac{m_P - m_F}{\rho_M} \quad (49)$$