

BACHELORARBEIT

HOCHSCHULE FÜR WIRTSCHAFT UND RECHT BERLIN

FACHBEREICH 2 – DUALES STUDIUM

Experimentelle Untersuchung des makroskopischen Verhaltens von nachhaltigen Faserverbundwerkstoffen im Versagensfall

Name: Konrad Omar Suppes

Semester: 14

Matr.-Nr.: 626718

E-Mail: s_suppes22@stud.hwr-berlin.de

Fachsemester: 6

Studiengang: Maschinenbau – Konstruktion und Fertigung

Erstbetreuer: Mathieu Vinot (DLR)

Zweitbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Michael Schomäcker

Partnerunternehmen: Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH

Abgabe der schriftlichen Arbeit: 05. August 2025

Tag der mündlichen Prüfung: (vsl.) 23. September 2025

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich:

1. dass ich meine Bachelorarbeit selbständig verfasst habe,
2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe,
3. dass ich die Nutzung von KI gemäß Studiengangsbeschreibung der Fachrichtung Maschinenbau ordnungsgemäß dokumentiert habe und
4. dass ich meine Bachelorarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Berlin, den 1. August 2025



Konrad Omar Suppes

Kenntnisnahme

Die Bachelorarbeit „Experimentelle Untersuchung des makroskopischen Verhaltens von nachhaltigen Faserverbundwerkstoffen im Versagensfall“ wurde von den Unternehmensbetreuern zur Kenntnis genommen und die Abgabe gewährt.

Berlin, den 1. August 2025



Lars Drescher (HZB)

Stuttgart, den 1. August 2025



Mathieu Vinot (DLR)

Danksagung

Mein ausdrücklicher Dank geht an die Mitarbeiter*innen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Stuttgart. Insbesondere an Mathieu Vinot für die Ermöglichung meiner Arbeit am DLR und die großartige Betreuung von Anfang bis Ende. Tobias Behling danke ich für die kompetente Einführung in die Nutzung aller relevanten Prüfmittel und -maschinen, sowie die geduldige Unterstützung bei jeglichen Hürden in den Versuchen. Dank gebührt ebenfalls Georg Doll für den Initialkontakt und die Empfehlung an Mathieu Vinot, sowie den Kolleg*innen seiner Abteilung für die Herstellung des untersuchten Materials und den Austausch über Ergebnisse und Problematiken, Sarah Kieling und Marvin Veil. Vielen Dank an alle Kolleg*innen der Abteilung für die interessanten Gespräche, die angenehme Arbeitsatmosphäre und die gemeinsame Zeit.

Ein besonderer Dank geht ebenfalls an Lars Drescher für das Vertrauen und die Ermöglichung weitgehend selbstbestimmter Arbeit am HZB und in der Phase der Bachelorarbeit am DLR. Vielen Dank an Prof. Reimund Klünder für die gemeinsame Arbeit im Labor und die daraus gewonnene Inspiration zur Themenfindung dieser Bachelorarbeit. Ebenfalls danke ich Prof. Alexander Steinmann für die intensive Forderung und Förderung jede*r einzelnen Student*in des Maschinenbaukurses, sowie Prof. Michael Schomäcker für die andauernde, vertrauensvolle Begleitung im Studium und die Vermittlung von praxisrelevanten Wissen, welches auch bei dieser Labor- und Schreibaarbeit von großem Nutzen war. Zuletzt möchte mich bei meinen Kommiliton*innen und bei meinen Mitbewohner*innen für die Unterstützung während des Studiums bedanken.

Real stupidity beats artificial intelligence every time.

– Terry Pratchett, Hogfather (1996)

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	V
Formelzeichen	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Konventionelle faserverstärkte Kunststoffe	2
2.1.1 Verwendung	2
2.1.2 Herstellung	2
2.1.3 Verwertung	3
2.1.4 Zukunft	3
2.1.5 Allgemeine Eigenschaften	3
2.1.6 Vergleichsmaterial	4
2.2 Bio-basierte, faserverstärkte Kunststoffe	5
2.2.1 Herkunft/Herstellung	5
2.2.2 Eigenschaften	6
2.2.3 Verwertung	6
2.2.4 Verwendung	6
2.2.5 Zukunft	7
3 Material und Methoden	8
3.1 Material	8
3.1.1 Verwendetes Material	8
3.1.2 Zuliefermaterial	10
3.1.3 Prüflinge	11
3.2 Methoden	11
3.2.1 Prüfmittel	11
3.2.2 3-Punkt Biegeversuch	12
3.2.3 5-Punkt Schubversuch	13
3.2.4 Zugversuch	14
3.2.5 Impact-Versuch	15
3.2.6 Auswertungsmethoden	16

4	Versuche	17
4.1	3-Punkt Biegeversuch	17
4.1.1	Proben R034 u. R035	17
4.1.2	Proben PPFX u. PPHF	21
4.2	5-Punkt Schubversuch	24
4.2.1	Proben R034 u. R035	24
4.2.2	Proben PPFX u. PPHF	29
4.3	Zugversuch	31
4.3.1	Proben R03x	31
4.3.2	Proben PPFX u. PPHF	33
4.4	Impact-Versuch	34
5	Diskussion	39
5.1	Allgemein	39
5.2	Betrachtung des DLR-Laminats und GFK	39
5.3	Vergleich mit PPFX	40
5.4	Vergleich mit PPHF	41
5.5	Verbesserungs- und Ausweitungsmöglichkeiten der Untersuchung	42
5.6	Fazit	43
5.7	Ausblick	43
6	Zusammenfassung	44
	Anhang	i

Abkürzungen

ATL Automated Tape Laying

BGF Abteilung Bauteilgestaltung und Fertigungstechnologien

CFK carbonfaserverstärkter Kunststoff

CT Computertomografie

DIC digitale Bildkorrelation

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Stuttgart

FVK faserverstärkte Kunststoffe

GFK glasfaserverstärkter Kunststoff

NFK bio-basierte, faserverstärkte Kunststoffe

PA11 Polyamid-11

PLA Polylactide

PP Polypropylene

RTM Resin Transfer Moulding

SMC/BMC Sheet- oder Bulk-Moulding-Compound

Formelzeichen

b	Probenbreite in mm	
d	Probendicke in mm	
l	Probenlänge in mm	
F_{max}	Maximale Kraft im jeweiligen Prüfversuch in N	
t	Versuchsdauer in s	
l_L	Auflagerabstand in mm	
r_{finne}	Druckfinnenradius in mm	
r_{lager}	Auflagerradius in mm	
σ_b	Biegefestigkeit in MPa	
ΔE	Im Impact-Versuch vom Material aufgenommene Energie in J	
E_{imp}	Impact-Energie in J	
E_{kin}	Kinetische Energie in J	
E_{pot}	Potentielle Energie in J	
F_i	Kraftmessung im Impact-Versuch in N	
g	Gravitationsbeschleunigung 9,81 m/s ²	[1]
h	Fallhöhe in mm	
s	Verformungsweg der Probe im Impact-Versuch in mm	
v	Impact-Geschwindigkeit in m s ⁻¹	
W	Mechanische Arbeit in J	
τ_s	Scherfestigkeit in MPa	
A	Bruchdehnung in %	
E	Elastizitätsmodul in GPa	
R_m	Zugfestigkeit in MPa	
$R_{p0,2}$	Dehngrenze in MPa	
ϵ	Materialdehnung in %	
σ	Materialspannung in MPa	

Abbildungsverzeichnis

1	Gewebemuster Körper 2/2	4
2	Faserwerkstoffe nach [25]	5
3	Schliffbild <i>R034_b_y_1</i>	9
4	Welligkeit der längsgeschnittenen Rovings in <i>R034_b_y_1</i> bei x30 (opt.)	9
5	Querschnitte der Proben PPFX und PPHF unter optischem Mikroskop	10
6	Spannungsverteilung im 3-Punkt Biegeversuch	12
7	Kraft- und Momentenverlauf 5-Punkt Schubversuch	13
8	3-Punkt Biegeversuch an <i>R034_b_y_2</i>	17
9	3-Punkt Biegeversuche an <i>R034</i> und <i>R035</i>	18
10	Faserriss in <i>R034_b_y_1</i> bei x200 (opt.)	19
11	Faserriss in <i>R034_b_x_2</i> bei x200 (opt.)	20
12	Faserriss in <i>R035_b_x_3</i> bei x30 (opt.)	20
13	Faserknick <i>R034_b_x_2</i> bei x300 (opt.)	21
14	3-Punkt Biegeversuche an PPHF und PPFX	22
15	Faserknick in <i>PPFX_b_y_4</i> bei x200 (opt.)	22
16	Bruch der Außenschicht im 3-Punkt Biegeversuch an PPFX	23
17	5-Punkt Schubversuch an <i>R035_s_x_2</i>	24
18	5-Punkt Schubversuche an <i>R034</i> und <i>R035</i>	25
19	Scherdehnung in <i>R035_s_x_2</i> im DIC vor Versagen	26
20	Scherdehnung in <i>R035_s_x_2</i> im DIC bei Versagen	26
21	Scherdehnung in <i>R053_s_x_1</i> im DIC	27
22	Zwischenfaserrisse in <i>R034_s_x_3</i>	27
23	Zwischenfaserrisse in <i>R035_s_x_2</i>	28
24	Zwischenfaserrisse in <i>R034_s_y_1</i>	28
25	5-Punkt Schubversuche an PPHF und PPFX	29
26	Scherdehnung in <i>PPFX_s_x_3</i> vor Versagen	30
27	Scherdehnung <i>PPFX_s_x_3</i> bei Versagen	30
28	Effektive Dehnung in <i>PPHF_s_y_1</i>	30
29	Zugversuch an <i>R036_5</i>	31
30	Zugversuche an Flachsfaser-PA11 (DLR-intern)	32
31	Zugversuche an PPHF und PPFX	33
32	Mechanische Arbeit am Impact-Körper bei 5 J-Impact auf GFK	34
33	Mechanische Arbeit am Impact-Körper bei 5 J-Impact auf GFK (geglättet)	35
34	Energieaufnahme im Impact-Versuch	36
35	CT-Querschnitt der Impact-Prüflinge aus <i>R034/5</i> (XY)	36

36	CT-Querschnitt der Impact-Prüflinge aus <i>R034/5</i> , <i>PPFX</i> und <i>PPHF</i> (ZY)	37
37	Roving-Lücken in <i>PPHF</i> Probe	38
38	Impact-Schaden an GFK-Prüflingen	38
39	Prüflinge der Proben <i>R034</i> und <i>R035</i>	i
40	Versuchsaufbau und -masse der Impact-Versuche	v
41	CT an <i>Glas_i_1</i> (XZ)	vi
42	Längsschnitt der Impact-Prüflinge aus GFK	vi
43	CT an <i>PPFX_i_1</i> (XZ)	vii
44	CT an <i>PPHF_i_1</i> (XZ)	vii
45	Fehlstellen im Querschnitt der Impact-Prüflinge aus <i>R034/5</i> , <i>PPFX</i> und <i>PPHF</i> .	viii
46	CT-Scan an <i>R034_i_1</i> (XZ)	ix
47	Schwarz-weiß Transformation der CT-Scans von <i>PPHF</i> in ImageJ	ix

Tabellenverzeichnis

1	Festigkeitswerte GFK	4
2	Prüflingsbenennung	11
3	Fallhöhen im Impact-Versuch	34
4	Energien im Impact-Versuch	35
5	Durchmesser des Schadens an GFK im Impact-Versuch	38
6	Versagenswerte im 3-Punkt Biegeversuch	ii
7	Versagenswerte im 5-Punkt Schubversuch	iii
8	Versagenswerte im Zugversuch	iv
9	Übersicht der Kennwerte aus 3-Punkt und 5-Punkt-Versuchen	iv
10	Übersicht der Kennwerte der Zugversuche	iv

1 Einleitung

Seit einigen Jahren nimmt das Interesse an natürlichen Alternativen zu Glas- und Kohlenstofffaser zur Verstärkung von Kunststoffen zu. Dies spiegelt sich in einzelnen Industrieprodukten, sowie einer Vielzahl aktueller wissenschaftlicher Veröffentlichungen wieder. Das Interesse ist getrieben vom Konstruktionsprinzip des Leichtbaus und den ökologischen Vorteilen, aber auch stoß- und schalldämpfenden Eigenschaften, welche natürliche Rohstoffe gegenüber den konventionellen Fasern aufweisen. Die unterschiedlichsten natürlichen Fasern werden zur Verstärkung von Kunststoffen verwendet, einige davon sind Flachs, Kenaf, Kokosfaser, Hanf, Jute und Sisal. Sie bestechen im Allgemeinen durch einen sehr geringen Energieaufwand in der Herstellung, geringen bis negativen CO_2 -Ausstoß, allgemeine Verfügbarkeit; teilweise als Abfallprodukt anderer Industriezweige, geringe Dichte bei guten Festigkeitswerten und eine unkomplizierte Verwertung oder die Möglichkeit zum Recycling. Herausforderungen bei der Verwendung von Naturfasern sind zufriedenstellende und konsistente mechanische Eigenschaften bei einem von wechselnden Umweltbedingungen abhängigen Werkstoff zu erreichen, sowie weiterführende Fragen der Feuchtigkeitsaufnahme, des Brandschutzes und der Konservierung gegen biologische Zersetzung.

Im Kunststoffbereich gewinnen thermoplastische Werkstoffe gegenüber den meist für faserverstärkte Kunststoffe (FVK) verwendeten duroplastischen Epoxidharzen seit einigen Jahren an Bedeutung [2]. Diese bieten durch ihre schweißbarkeit Vorteile in der Verarbeitung, insbesondere bei automatisierten Verfahren wie dem Automated Tape Laying (ATL) und weisen ein duktileres Verhalten im Gegensatz zu den meist spröden Duroplasten auf. FVK aus thermoplastischen Kunststoffen besitzen somit ein verändertes Bruchverhalten gegenüber FVK auf Basis von Duroplasten.

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung der mechanischen Belastungsgrenzen eines im Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Stuttgart (DLR) gefertigten biobasierten, faserverstärkten Kunststoffs (NFK). Fokus liegt auf dem makroskopischen Verhalten des Werkstoffs im Versagensfall und dem Vergleich mit alternativen Laminaten. Hierfür werden Flachproben aus den entsprechenden Verbundmaterialien angefertigt, aus welchen die Prüflinge für vier verschiedene Testverfahren geschnitten werden. Die Prüflinge werden auf Biege-, Schub-, Zug- und Impact-Verhalten untersucht und die jeweiligen Materialkennwerte ermittelt. Qualitative Untersuchungen der Prüflinge ermöglichen eine genauere Beschreibung des mechanischen Materialversagens. Ein Vergleich mit einem glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) auf dem aktuellen Stand der Technik ermöglicht eine Einordnung der Untersuchten Materialien in potentielle Anwendungsgebiete. Das Material einer möglichen Zulieferfirma des DLR wird untersucht und vor dem Hintergrund des DLR-internen Materials bewertet. Die Betrachtung der Laminat, insbesondere der Bruch- und Versagensstellen erfolgt per optischer Mikroskopie, digitaler Bildkorrelation (DIC) und Computertomografie (CT).

Die Motivation dieser Arbeit liegt einerseits im Forschungsauftrag des DLR und der damit verbundenen Verpflichtung an der aktuellen Erforschung neuartiger Materialien mitzuwirken. Andererseits stellt das DLR mit seinen Kund*innen und Kooperationspartner*innen aus der Luft- und Raumfahrt, sowie dem Verkehrssektor eine Brücke zwischen Forschung und Industrie dar und hat somit an einigen Stellen die Möglichkeit mit nachhaltigen Materialien einen zukunftsweisenden Einfluss auf Produktentwicklungen zu nehmen.

2 Stand der Technik

2.1 Konventionelle faserverstärkte Kunststoffe

2.1.1 Verwendung

Seit den 1950er Jahren werden GFK weitreichend in der Industrie verwendet [3]. Nach Jahrzehnten der Entwicklung, gingen in den 1970er Jahren ebenfalls die ersten kommerziellen carbonfaserverstärkten Kunststoffe (CFK) in die Produktion [4]. Beide Werkstoffe finden seitdem in Bereichen diverser Industriebranchen wie dem Fahrzeugbau oder der Luft- und Raumfahrt Verwendung in Bauteilen, deren Belastungsgrenzen zwischen denen von Kunststoff und Stahl- oder Aluminiumwerkstoffen liegen. Im Konstruktionsprinzip des Leichtbaus werden FVK-Bauteile verwendet, welche gleichzeitig eine hohe Festigkeit und eine geringe Masse aufweisen müssen. Diese können Verkleidungselemente, wie Karosserieteile, aber auch mechanisch beanspruchte Funktionsteile sein. So werden die meisten Rotorblätter von Windkraftanlagen aus GFK, selten auch zu Teilen aus CFK gefertigt [5], in der Fahrzeugindustrie werden unter anderem bereits ganze Fahrgastzellen aus dem deutlich festeren CFK gefertigt [6]. Glasfaserverstärkte Kunststoffe stellen mit 2494 kT gegenüber CFK mit 63 kT den mit Abstand größten Marktanteil von NFK dar (Europa, 2023) [2]. Dies basiert auf der kosten- und energiegünstigeren Herstellung von GFK im Gegensatz zu CFK.

Bei dem in Europa verarbeiteten GFK handelt es sich bei 34 % um duroplastische Kunststoffe mit Endlosfaserverstärkung und bei 5 % um thermoplastische Kunststoffe mit Endlosfaserverstärkung, wobei insbesondere der Verkehrssektor mit 65,6 % Hauptabnehmer der thermoplastischen Variante darstellt. Duroplastische FVK finden insbesondere in der Bauindustrie Anwendung, wobei auch hier ein deutlicher Rückgang prognostiziert wird. Als treibende Kräfte in der Entwicklung und Anwendung von FVK gelten der Verkehrssektor, die Luft- und Raumfahrt und die Windkraftbranche. [2]

2.1.2 Herstellung

Glasfasern für die Herstellung von Glasfasergeweben werden durch schnelles ziehen flüssigen Glases erzeugt [7]. Da die Schmelztemperatur des Werkstoffs bei 900 °C bis 1600 °C liegt, erfordert der Prozess eine große Menge an Wärmeenergie [8]. Die Herstellung von Kohlestofffasern erfolgt in 90 % der Fällen durch die Carbonisierung von stabilisierten Polyacrylnitril-Fasern, was eine Temperatur von etwa 1500 ° erfordert. Für die Herstellung besonders widerstandsfähiger Kohlefasern werden im Graphitisierungsschritt Temperaturen bis zu 3000 ° benötigt [9].

Der Energieaufwand und Treibhausgasausstoß der Produktion von Kohlenstofffasern liegt bei 100 MJ bis 900 MJ und 24 kg CO₂eq pro Kilogramm produzierter Faser, Glasfasern liegen bei 45 MJ und bis zu 3 kg CO₂eq pro Kilogramm. Im Vergleich dazu liegt die Stahlproduktion bei etwa 25 MJ kg⁻¹ und bis zu 2,1 kg CO₂eq/kg. [10]

Während kurzfaserverstärkte Kunststoffe meist als Sheet- oder Bulk-Moulding-Compound (SMC/BMC), also pressfertige Masse aus Kurzfasern, Epoxidharz und Härter hergestellt werden (90 % des Gesamtvolumens), wird bei Gelegen aus endlos-FVK (Faserlänge > 50 mm) das Formpressen oder Resin Transfer Moulding (RTM) praktiziert. Im Fall von thermoplastischen FVK handelt es sich meist um Warmpressverfahren. [2]

2.1.3 Verwertung

Für konventionelle FVK existiert kein ökonomisches Recyclingverfahren, welches Faser- und Matrixwerkstoff voneinander trennen und ein Wiederverwenden einer oder beider Komponenten ermöglichen würde [11]. GFK werden somit meist der thermischen Verwertung in Glashütten und Zementöfen zugefügt, während für die teuren CFK Werkstoffe mittlerweile Prozesse entwickelt werden, um zumindest kurzschnittfasern zurückzuerlangen [11, 12]. Weltweit ist die Lagerung in Abfalldeponien jedoch die meistverbreitete Verwertungsmethode [11]. Dies ist seit 2005 in Deutschland verboten, da hierbei giftige Stoffe in den Erdboden gelangen. Eine EU weites Verbot wird zurzeit diskutiert [13].

2.1.4 Zukunft

Seit einiger Zeit wird die Problematik des Recyclings und der Verwertung von FVK in der Industrie intensiv behandelt. In einem laufenden Projekt unter dem Namen „ReSORT“, forscht das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) an der Pyrolyse von FVK um verwendete Glas- und Kohlefasern von den duroplastischen Matrixwerkstoffen zu trennen und diese einem Recyclingverfahren zuzuführen [14]. Siemens Gamesa verfolgt das Ziel bis 2040 eine 100 %-ige Recyclefähigkeit ihrer Windkraftanlagen zu erreichen und nutzen hierfür im Projekt „RecycleBlade“ neu entwickelte thermoplastische Kunstharze, welche 2021 in ersten Prototypen von Rotorblättern eingesetzt wurden [13]. Denselben Ansatz verfolgt die Firma LM Wind Power im Projekt „ZEBRA“, welches 2022 erste Prototypen hervorbrachte [5].

2.1.5 Allgemeine Eigenschaften

Die Zugfestigkeit von einfachem GFK-Laminat kann bei etwa 330 MPa bis 400 MPa verortet werden. Die Dichte liegt bei etwa 2 g/cm^3 . Für konventionelles CFK liegt die Zugfestigkeit bei etwa 560 MPa bis 650 MPa, bei einer Dichte von etwa $1,5 \text{ g/cm}^3$. Diese Zugfestigkeiten wurden an Prüflingen aus FVK-Proben mit bidirektionalem Gewebe und einem Faseranteil von 43 % bis 50 % des Gesamtvolumens ermittelt, welche in Epoxidharz hand-laminiert wurden. Die Festigkeit der Prüflinge hängt maßgeblich von den verwendeten Fasermatten, aber auch vom Matrixwerkstoff und den Verarbeitungsbedingungen ab. [15]

Eine einzelne Glasfaser kommt auf eine Zugfestigkeit von etwa 2300 MPa [16]. Hochleistungskohlenstofffasern kommen auf eine Zugfestigkeit von bis zu 4900 MPa, gebräuchliche Kohlestofffasern liegen bei 3500 MPa [17].

Das Funktionsprinzip der FVK ist die Übertragung von äußeren Lasten, insbesondere Zuglasten, mittels der weniger steifen Matrixwerkstoffe auf die zugfesten Verstärkungsfasern. Die Grenzflächenbindung zwischen Matrix und Faser ist somit maßgeblich entscheidend für die Festigkeit des Faserverbands. Diese Grenzflächenbindung tritt in verschiedenen Formen auf. Auf physikalischer Ebene führt die Rauheit der Fasern bei geeignetem Eindringen des Matrixwerkstoffs zu einem mechanischen Formschluss. Matrix und Faser gehen ebenfalls eine Diffusionsbindung ein, wobei Moleküle der Grenzschichten beider Stoffe, getrieben von Van-der-Waals-Kräften und entstehenden Wasserstoffbrückenbindungen, in den jeweils anderen Stoff übergehen. Das Auftreten der Grenzschichtdiffusion ist stark abhängig von den Verarbeitungsparametern Druck und Temperatur, sowie der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Materialien. [18]

2.1.6 Vergleichsmaterial

Der zu untersuchend bio-basierte, faserverstärkte Kunststoff wird mit einem DLR-intern hergestellten glasfaserverstärkten Kunststoff verglichen. Das Material wurde in ausgiebigen Prüfkampagnen untersucht und entspricht dem heutigen Stand der Technik. Es handelt sich um ein GFK mit Epoxidharz „Biresin CR170“ der Sika AG als Matrixmaterial. Unverstärkt besitzt das ausgehärtete Harz eine Zugfestigkeit von 69 MPa und eine Biegefestigkeit von 128 MPa, die Dichte liegt bei $1,17 \text{ g/cm}^3$ [19]. Die einzelnen E-Glasfasern weisen einen Durchmesser von $24 \mu\text{m}$ auf. Sie sind in unverdrillten Faserbündeln, sogenannten Rovings von etwa 1,7 mm Breite und 0,26 mm Dicke zu einem Körper-Gewebe (2/2) verarbeitet, siehe Abbildung 1. Die 2 mm-Dicken Platten wurden im Spritzpress-Verfahren/RTM gefertigt. Bei diesem Verfahren werden Harz und Härter in eine Form gepresst und tränken dabei das zuvor positionierte Fasermaterial. Das Harz härtet bei definiertem Druck und gehobener Temperatur zu duroplastischem Kunststoff aus. Für das Vergleichsmaterial wurden vier Lagen des Glasfasergewebes verwendet. [20]

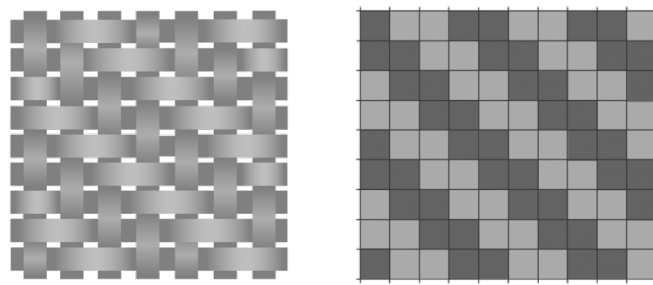


Abbildung 1: Gewebemuster Körper 2/2, 3D-Darstellung (links) und schematische 2D-Darstellung mit dunkelgrauen Kästen als Fasern in x-Richtung und hellgrauen Kästen als Fasern in y-Richtung (rechts) [17]

Die ermittelten Festigkeitswerte aus den verschiedenen Prüfverfahren sind in Tabelle 1 aufgetragen. Bei den Prüfverfahren zeigte das Material sprödes Versagen. Der Elastizitätsmodul wurde zu $(27,60 \pm 0,28) \text{ GPa}$ bestimmt [20]. Die Dichte des Materials liegt bei $(2,01 \pm 0,01) \text{ g/cm}^3$.

Tabelle 1: Festigkeitswerte des glasfaserverstärkter Kunststoff aus DLR-interner Fertigung [20]

Biegung	Schub	Zug	(Druck)
$(592 \pm 23) \text{ MPa}$	$(30 \pm 2) \text{ MPa}$	$(481 \pm 11) \text{ MPa}$	$(401 \pm 25) \text{ MPa}$

Mechanisch belastbarer glasfaserverstärkter Kunststoff in Laminatbauweise findet Anwendung in der Luftfahrt, dem Bootsbau oder der Windkraft. In Passagierflugzeugen kommt er in Form von Strukturkomponenten und Innenverkleidungen wie Kabinenwänden, Bodenplatten und Gepäckfächern zum Einsatz [21]. Hier bestehen die Platten gegenüber einer Vielzahl moderater Belastungen in Form von Vibration, Zugbelastung der Gepäckfächer oder Druck- und Biegebelastung der Bodenplatten. Beim Bau von Segelflugzeugen wird GFK als Rumpf- und Flügelmaterial verwendet [22]. Die Hauptbelastung wirkt als Biegebelastung auf die Tragflächen und damit Zug- und Druckbelastung auf die Außenhaut. Im Bootsbau kommt der Werkstoff ebenfalls als Rumpf- oder Deckmaterial zum Einsatz [23]. Die Windkraftbranche setzt auf technisches GFK im Rotorblattbau [24]. Auch hier spielt die Biegebelastung eine entscheidende Rolle, hinzu kommen Zugkräfte durch die Zentripetalkraft aus der Rotation der Rotorblätter.

2.2 Bio-basierte, faserverstärkte Kunststoffe

2.2.1 Herkunft/Herstellung

Es existiert eine Vielzahl an Faserwerkstoffen, welche sich zur Verstärkung von Kunststoffen eignen, siehe Abbildung 2. Diese lassen sich in natürliche (eng. *natural*) und synthetische (eng. *synthetic*) Fasern unterteilen. Zu den synthetischen Fasern zählen die konventionellen Verstärkungsfasern Glasfaser und Kohlenstofffaser. Die natürlichen Fasern lassen sich wiederum in tierische (eng. *animal*), mineralische (eng. *mineral*) und pflanzliche (eng. *cellulose/lignocellulose* – nach den chemischen Bestandteilen Cellulose und Lignin) gliedern. Hier finden sich auch die verwendeten Materialien Flachs und Hanf (eng. *Flax* und *Hemp*) in der Unterkategorie Bast, welche den von der Pflanze verwendeten Bestandteil beschreibt (Bast; auch innere Rinde/sekundäre Rinde).

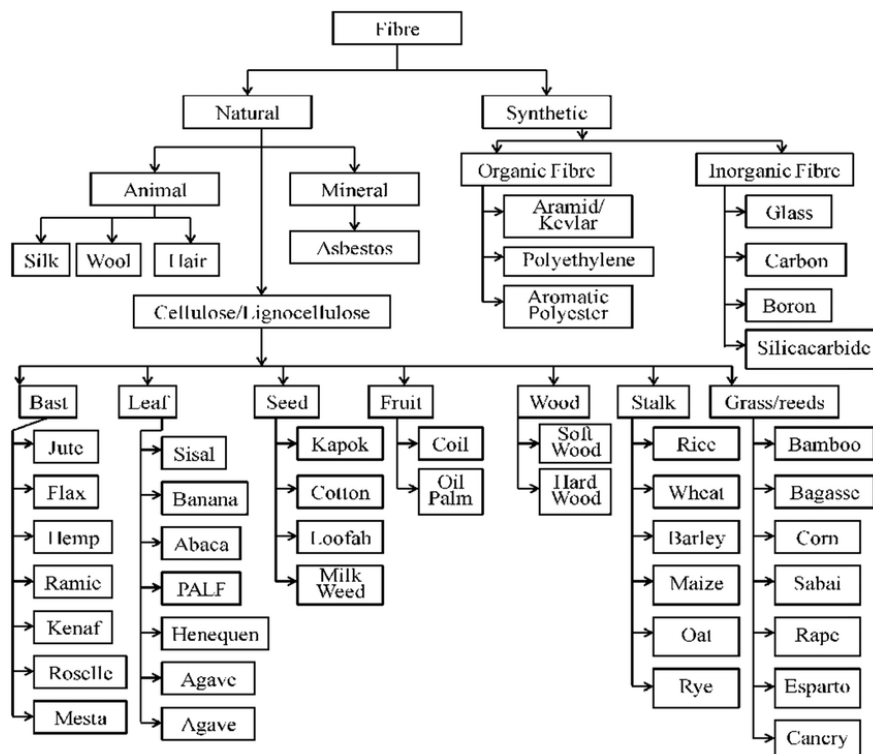


Abbildung 2: Faserwerkstoffe zur Verstärkung von Kunststoffmatrizen (Khan, Tabrej und Sultan, 2018) [25]

Abbildung 2 verdeutlicht die Vielzahl der natürlichen Alternativen zu Glas- und Kohlenstofffaser und ihre Verfügbarkeit in den unterschiedlichsten Klimazonen und Jahreszeiten. Die Gewinnung ist bei natürlichen Fasern oftmals zeit- und kostensparender als die Herstellung von synthetischen Fasern [25].

Auch natürliche Fasern werden sowohl in duroplastische Harze eingeschlossen, als auch mit thermoplastischen Kunststoffen verpresst um FVK herzustellen, wobei hier meist die thermoplastische Variante zur Anwendung kommt [2]. Um der biologischen Herkunft der Fasern zu entsprechen, können bio-basierte Kunststoffe wie Zelluloid (zellulosebasiert), Polylactide (PLA) (milchsäurebasiert) oder Polyamid-11 (PA11) (rizinusölbasiert), gegenüber erdölbasierten Produkten verwendet werden.

2.2.2 Eigenschaften

Bei den Bestandteilen der Naturfasern handelt es sich um hydrophile also polare Stoffe. Diese gehen mit unpolaren Matrixwerkstoffen wie Polypropylen und Polyethylen keine kovalenten Bindungen oder Wasserstoffbrückenbindungen ein. Eine geeignete Vorbehandlung der Fasern kann diese Bindungen ermöglichen. Es existieren eine Reihe solcher Vorbehandlung, wie die Vorbehandlung mit Wasserglas (Natriumsilikat), welches ebenfalls Parameter wie Brand- und Isolationseigenschaften der NFK beeinflusst und damit ein hohes Potential für weiterführende Untersuchungen in diesen Bereichen bietet [26]. Mit polaren Matrixwerkstoffen, wie polaren Epoxidharzen oder Polyamiden, welche polare Amidgruppen aufweisen, gehen Naturfasern diese chemischen Bindungen bei geeigneten Verarbeitungsparametern zuverlässig ein. Zur Verbesserung der mechanischen Faser-Matrix-Anbindung existieren ebenfalls diverse physikalische und chemische Verfahren zur Vorbehandlung der Naturfasern, welche Einfluss auf die Eigenschaften und mechanischen Kennwerte des NFK nehmen [27]. Diese werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet, bieten jedoch Potential zur Verbesserung möglicher Materialdefizite.

Naturfasern weisen je nach Faserart und Verarbeitung sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf. Während Baumwollfasern eine Zugfestigkeit von etwa 400 MPa aufweisen, kommen Hanffasern auf 550 MPa bis 900 MPa und Flachsfasern auf 800 MPa bis 1500 MPa. Diese Fasern stellen damit die aussichtsreichsten technischen Fasern dar. [16]

2.2.3 Verwertung

Im Gegensatz zu CFK und GFK kommt es bei der energetischen Verwertung von NFK schon bei geringen Temperaturen zu einer vollständigen Verbrennung aller Komponenten. Somit bleiben keine toxischen Feststoffe, verkürzte Faserreste oder sonstigen problematischen Reststoffe zurück. Andererseits ist das Potential von Trennverfahren zur Rückgewinnung des unbeschädigten Faseranteils aus FVK sehr gering. Verfahren wie die Pyrolyse oder chemische Trennverfahren, zerstören die Naturfasern gänzlich oder beschädigen sie so weit, dass eine Wiederverwendung ausgeschlossen ist [14]. Das Schreddern und erneute Einschmelzen von NFK mit thermoplastischen Matrix-Werkstoffen, bietet eine Möglichkeit zum Recycling zu kurzfaserverstärktem Kunststoff für die Nutzung in Spritzgussanwendungen.

2.2.4 Verwendung

In der Industrie finden sich seit der Jahrtausendwende immer mehr Beispiele zur Verwendung von NFK. Am häufigsten werden diese Werkstoffe in Spritzgussbauteilen der Automobilbranche verwendet. Bei den hier genutzten natürlichen Fasern handelt es sich um Kurzfasern verschiedener natürlicher Quellen, welche mit einem thermoplastischen Kunststoff vermengt in die jeweilige Form gespritzt werden. Die Bauteile weisen einen geringeren CO_2 -Ausstoß in der Produktion gegenüber Bauteilen aus reinem Kunststoff auf und resultieren gleichzeitig in einer Gewichtsreduktion um durchschnittlich 20 %, welche über die Nutzdauer des Fahrzeugs zu erneuter CO_2 -Einsparung führt. Bei den Bauteilen handelt es sich um mechanisch gering belastete Elemente, wie Türverkleidungen oder Armaturenbretter. [28, 29]

Schon der DDR-Hersteller VEB Sachsenring verwendete 46 % Baumwollfasern in den Karosserieteilen des Trabantens um das Gesamtgewicht des Fahrzeugs zu reduzieren [30].

Die Türverkleidung im Fahrgastraum des 2013 von der BMW AG eingeführten BMW i3 aus FVK nutzt Kenaf-Fasern als Verstärkung [31]. Die Verwendung von deutlich sichtbarem NFK soll hier besonders das nachhaltige Bild des Elektrofahrzeugs stärken. Auch der Fahrzeughersteller Ford Motor Company verwendet vermehrt NFK-Bauteile in Neufahrzeugen. Seit 2019 werden die Schalen von Kaffeebohnen, welche ansonsten ein Abfallprodukt darstellen, in FVK von Verkleidungsteilen und Gehäusen verwendet [29].

Seit einigen Jahren wächst das Interesse und somit die Forschung an NFK auch als Alternative für klassische FVK-Anwendungen. Um höheren mechanischen Belastungen standzuhalten, wird bio-basiertes Fasermaterial verwendet, welches dem Aufbau von gewobenem CFK oder GFK gleicht, siehe Abschnitt 2.1.6. Es werden Lang- bis Endlosfasern zu Fäden gesponnen und in gebündelten Rovings zu Gelegematten verwebt.

Der Automobilhersteller Polestar Automotive Holding entwickelt zusammen mit dem Gewebehersteller Bcomp Sitzschalen aus Flachsfasergewebe und Polypropylen-Matrix, welche im Polestar 3 und künftigen Modellen eingesetzt werden. Die hier Verwendeten Fasermatten werden durch sogenannte powerRibs verstärkt. Das weitmaschige Netz an kreuzweise angeordneten Flachsschnüren wird auf die Innenseite der Schale aufgepresst. Die Verstärkungsrippen sorgen für eine deutlich höhere Steifigkeit des Materials und sollen künftig in weiteren mechanisch beanspruchten Bauteilen Verwendung finden. [32]

Auch der Fahrzeughersteller BMW Group testet im Motorsportbereich den Einsatz von NFK-Bauteilen auf Basis der Laminat von Bcomp anstelle von Karosserieteilen aus CFK. Hier steht das geringe Gewicht der Bauteile im Fokus, weshalb GFK keine Anwendung findet. Da die Verkleidungsteile jedoch keine hohen mechanischen Lasten aufnehmen, eignen sich auch weniger feste NFK als Alternative zum CFK. [33]

Weitere Produkte existieren unter Anderem im Wassersport. Die Firma Greenboats GmbH entwickelt seit 2013 Schiffsrümpfe auf Basis von NFK und hat bereits Segelyachten, Kajaks und kleine Motorboote ausgestattet. Durch eine Wissensvernetzung mit anderen Unternehmen, wurde ebenfalls der Prototyp einer Windkraftgondel aus NFK gefertigt, welche sich im Anwendungstest auf einer 600 kW Windkraftanlage befindet. [34]

2.2.5 Zukunft

In den meisten Industriebranchen ist die Nachhaltigkeit von Produkten zu einem Schlüsselthema geworden. Unter den Begriff „Nachhaltigkeit“ zählen die bisher erwähnten Aspekte der Materialgewinnung und -verarbeitung, Vor- und Nachteile während der Nutzdauer und die Verwertung des Verbundmaterials. In allen Teilbereichen der Nachhaltigkeit zeigen NFK Vorteile gegenüber den konventionellen FVK. Um eine breite Nutzung von NFK zu ermöglichen, bedarf es einer engen Zusammenarbeit von Industrie und Forschung um, die mechanischen Eigenschaften von NFK genauer zu charakterisieren und neue Verarbeitungs- und Behandlungsmethoden zu erarbeiten. Die Verwendung von NFK bei Strukturbauteilen zu etablieren und somit eine nachhaltigere Alternative zu Kunststoffen und FVK, insbesondere GFK einzuführen ist relevant für eine nachhaltige Entwicklung der Zukunft.

Das in Abschnitt 2.2.4 beschriebene Material der Firma Greenboats GmbH wird neben den bereits erwähnten Projekten ebenfalls als mögliche Innenauskleidung für Flugzeugkabinen untersucht. Konventionell werden vornehmlich GFK-Bauteile verwendet. Die flachsfaserbasierte Alternative befindet sich jedoch aufgrund der hohen Zulassungsbedingungen der Luft- und Raumfahrttechnik, beispielsweise im Hinblick auf Brandeigenschaften weiterhin in der Entwicklung [32].

3 Material und Methoden

3.1 Material

3.1.1 Verwendetes Material

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Untersuchung von FVK auf Basis von Flachsfasergeweben. Flachsfasern weisen eine sehr hohe Festigkeit im Vergleich mit anderen Naturfasern auf und sind in unserer Klimazone allgemein verfügbar, wodurch lange Transportwege wegfallen. Die Flachsfaser ist eine der ältesten Textilfasern der Welt. Bereits 5000 v.u.Z. wurden die Naturfaser in Ägypten genutzt um Leinenstoff herzustellen. Als technische Faser wurde Flachs unter anderem in der Schifffahrt für Seile, Fangnetze und Segel verwendet. Bis zur Massenproduktion von synthetischen Fasern Mitte des 20. Jahrhunderts stellte Flachs einen wichtigen Grundstoff dar, wurde jedoch seitdem kontinuierlich vom Markt verdrängt. [28]

Die zu untersuchenden Proben mit der Benennung *R034* und *R035* wurden am DLR von der Abteilung Bauteilgestaltung und Fertigungstechnologien (BGF) des DLR im Warmpressverfahren gefertigt. Sie sind aus je neun Schichten Polyamid-11-Folie und acht Schichten Flachsfasergewebe aufgebaut. Insgesamt liegen je Probe 300 mm × 300 mm an Versuchsmaterial vor.

Bei dem verwendeten Kunststoff PA11 Rilsan FMNO handelt es sich um einen teilkristallinen, thermoplastischen Kunststoff der Firma Arkema auf der Basis von Rizinusöl. Dieser wurde für den Pressvorgang zu Folien extrudiert. Die Zugfestigkeit wird vom Hersteller mit 39 MPa bei einer Bruchdehnung von 5 % angegeben. Die Schmelztemperatur des Kunststoffs liegt bei 189 °C. [35]

Als Flachsfasermaterial wird das Gewebe ampliTex 0540 der Firma Bcomp verwendet. Die Fasern liegen als Endlofasern (länger als 50 mm) vor und sind zu unverdrillten Rovings zusammengefasst. Bei der Gewebeart handelt es sich ebenfalls um das in Abschnitt 2.1.6 beschriebene Körper-Gewebe (2/2) mit einem Flächengewicht von 300 g/m². Die Zugfestigkeit der Einzelfasern wird vom Hersteller mit 650 MPa angegeben, sie liegt damit bei 28,3 % einer einzelnen Glasfaser. Die Bruchdehnung von konsolidierten Prüfkörpern wird mit 1,05 % beschrieben. [36]

Die PA11-Folien und Flachsfasergewebematten wurden im Werkzeug bei einem Druck von 333 kPa auf (200 ± 5) °C erhitzt, für 4 min bei 2 MPa gehalten und im Abkühlvorgang bei 5 MPa gepresst. Überschüssiges Matrixmaterial und etwaige Lufteinschlüsse können im Pressvorgang am Rand der Pressform austreten. Der Unterschied der beiden Proben liegt in der Abkühlrate. Diese entsprach 3 K/min bei *R034* und 8 K/min bei *R035*. Die Abkühlrate kann einen Einfluss auf die Kristallbildung im PA11 haben und diese wiederum auf die mechanischen Eigenschaften. Erhöhte Kristallinität hat einen steigenden Einfluss auf die Dichte und die Steifigkeit eines Kunststoffs und mindern den Einfluss auf die Dehnbarkeit. Die Untersuchung der Kristallinität der Proben ergaben einen Unterschied von 1,7 % mit 23,9 % bei *R034* und 25,6 % bei *R035* (Untersuchung der BGF). Die Dichte beider Lamine liegt bei $(1,30 \pm 0,05)$ g/cm³.

Kleine Proben des Materials werden ausgeschnitten und an den Schnittträgern geschliffen. Hierfür wird händisch im Nassschleifverfahren mit Körnungen von P400, P800 und zuletzt P1500 gearbeitet. Die Schliffbilder werden im Mikroskop betrachtet, siehe Abbildung 3. Im Schliffbild werden Bereiche von reinem Matrixwerkstoff beobachtet. Diese liegen an den Außenkanten von quergeschnittenen Rovings, folgen also den Rovings in Längsrichtung durch das Laminat. Es werden keine Poren oder Luftporen zwischen den Fasern oder im Bereich von Matrixansammlungen beobachtet. Längsliegende Rovings erscheinen im Schliffbild porös. Dies ist dem Schleifprozess geschuldet, bei welchem einzelne Fasern aus dem Längs-Roving gezogen werden. Eine tatsächliche Porosität wäre auch bei den quergeschnittenen Fasern beobachtbar.

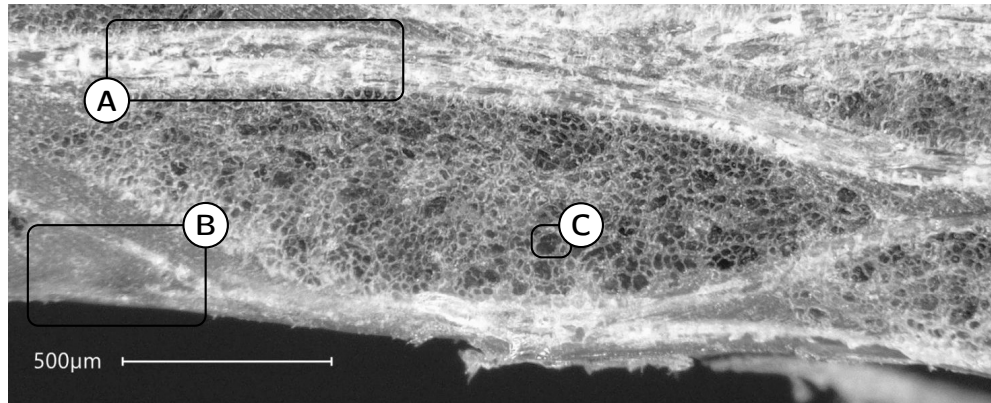


Abbildung 3: Schliffbild des Prüflings *R034_b_y_1* vor dem 3-Punkt-Biegeversuch bei 150-facher optischer Vergrößerung, (A) längsgeschnittenes Faser-Roving, (B) Ansammlung von Matrixmaterial, (C) quergeschnittene Fasern

Mit Hilfe des Fiji Plug-ins für das Bildauswertungsprogramm ImageJ werden im Bild Maße genommen. Die Durchmesser der Fasern weisen eine Spanne von einigen hundertstel Millimetern auf. Der Durchschnitt von 50 gemessenen Faser-Durchmessern liegt bei $(19 \pm 6) \mu\text{m}$. Der Querschnitt der Rovings weist eine Breite von etwa $2000 \mu\text{m}$ und eine Dicke von $200 \mu\text{m}$ bis $400 \mu\text{m}$ auf.

Die Winkel in der Welligkeit der Rovings im Längsschnitt werden mittels ImageJ auf $(12,2 \pm 2,7)^\circ$ bestimmt. Der Winkel wird zur horizontalen Außenkante der Probe bestimmt, siehe Abbildung 4. Dies ist für die Betrachtung der Spannungsverläufe, insbesondere im 5-Punkt Schubversuch relevant. Werden Spannungsspitzen oder Risse in diesem Winkel beobachtet, lässt sich hieraus ein Materialversagen entlang der längsliegenden Rovings vermuten.

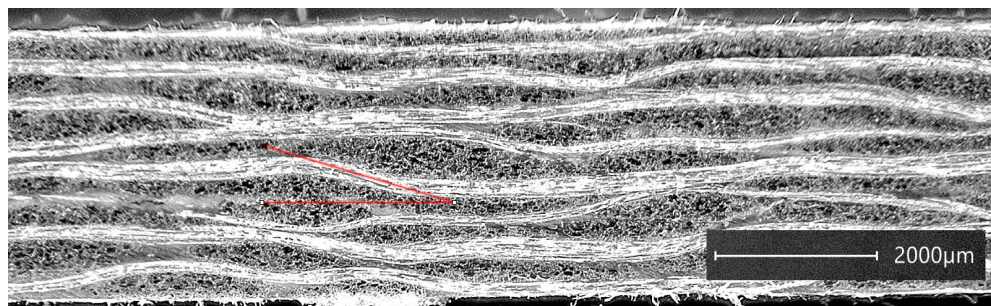


Abbildung 4: Außenkante des Prüflings *R034_b_y_1* vor dem Prüfversuch mit markierter Winkelmessung des Roving-Verlaufs in Längsrichtung

3.1.2 Zuliefermaterial

Bei dem potentiellen Zuliefermaterial handelt es sich um zwei verschiedene NFK auf Polypropylene-Basis. Die Fasermaterialien sind Flachs- (Probe *PPFX*) und Hanffaser (Probe *PPHF*). Die Fasern liegen als Lang- bis Endlosfasern in flachen Rovings von $(25,0 \pm 1,8)$ mm Breite und $(0,60 \pm 0,04)$ mm Dicke vor, wobei die Gewebeart ein Körper-Gewebe (2/2) darstellt, siehe Abschnitt 2.1.6. Die Proben wurden als Platten auf einer Durchlaufpresse mit einem Pressdruck von 200 kPa und einer Durchlaufgeschwindigkeit von 1 m/min hergestellt. Die Vorheiztemperatur, sowie die Temperatur während des Pressvorgangs lagen bei 190 °C. Durch die Einstellung des Pressspalts auf 2 mm, liegt die Probendicke bei $(2,00 \pm 0,05)$ mm, die Dichte des PPFX-Laminats liegt bei $(0,92 \pm 0,01)$ g/cm³, die des PPHF-Laminats bei $(0,81 \pm 0,05)$ g/cm³.

Bei Polypropylene (PP) handelt es sich um einen teilkristallinen Kunststoff mit einer Dichte zwischen 0,895 g/cm³ bis 0,92 g/cm³, damit ist PP der Kunststoff mit der geringsten Dichte. Der Elastizitätsmodul von PP liegt bei 1,45 GPa und die Fließspannung bei ca. 23 MPa. Die Schmelztemperatur ist bei etwa 160 °C zu verorten. [37]

Unter dem optischen Mikroskop werden die Querschnitte der Proben PPFX und PPHF untersucht, siehe Abbildung 5. Hier ist im Vergleich zum DLR-Material ein geringes Verhältnis zwischen Fasern und Matrix zu erkennen, vgl. Abb. 3. Die mit ImageJ bestimmte Faserdicke des Flachsmaterials (PPFX) liegt bei (18 ± 7) µm, die Faserdicke des Hanfmaterials (PPHF) bei (20 ± 7) µm.

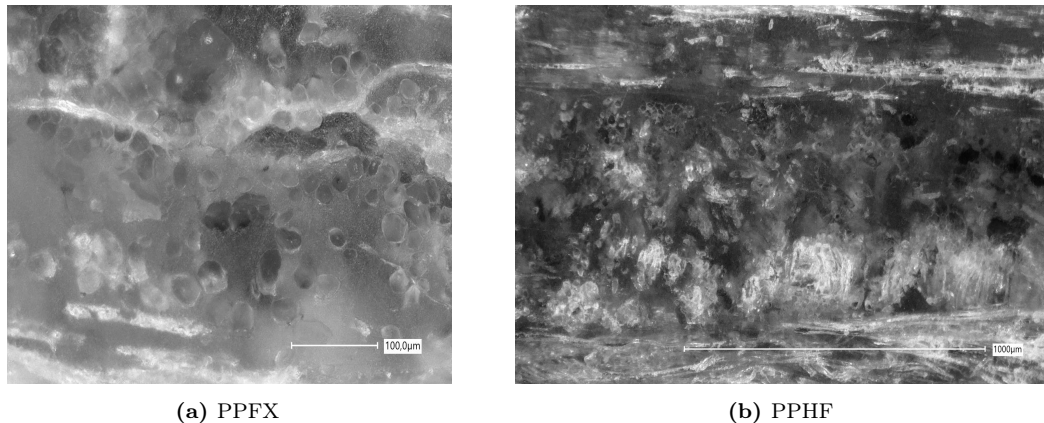


Abbildung 5: Querschnitte der Proben PPFX und PPHF bei 500-facher opt. Vergrößerung, Skala 100 µm (links) und 1000 µm (rechts)

Die erhöhte Roving-Breite und reduzierte Roving-Dicke gegenüber dem verwendeten Material (Abschnitt 3.1.1) führt zu einer deutlich geringeren Welligkeit der Rovings im Materialquerschnitt. Dies kann sich positiv auf die Kraftübertragung und damit auf die Festigkeit des FVK auswirken.

Bei subjektiver Betrachtung des Materials fällt eine glatte Oberfläche auf, welche jedoch nicht vollständig mit Matrixmaterial durchtränkt ist, wie es bei dem DLR-internen Material der Fall ist. An einzelnen Stellen lösen sich Fasern aus der Oberfläche. Zudem werden zwischen den Rovings teilweise Lücken beobachtet. Eine genauere Betrachtung erfolgt in Abschnitt 4.4. Das Material wirkt leicht und biegsam.

3.1.3 Prüflinge

Die Geometrie der Prüflinge entspricht in allen Prüfverfahren der einer Flachprobe mit einer Probendicke d , Probenbreite b und Probenlänge l .

Um eine mögliche Abweichung der mechanischen Eigenschaften des verwendeten Materials in X- und Y-Richtungen in die Betrachtung einzubeziehen, werden Prüflinge in unterschiedlichen Orientierungen entnommen (Schnittmuster *R034* und *R035*; Abb. 39 im Anhang).

Die Benennung der Prüflinge folgt einem Muster, welches die genaue Identifizierung der einzelnen Prüflinge ermöglicht, wobei die möglichen Werte Tabelle 2 entnommen werden können:

Probenmaterial_Kürzel-Versuch_Orientierung_Nummerierung_Anmerkung

Tabelle 2: Mögliche Werte der Prüflingsbenennung

Probenmaterial	Kürzel-Versuch	Ori.	Num.	Anmerkung
R034 = PA11 - Flachs (Abkühlrate 3 K/min)	b = 3-Punkt-Biegev. (Abs. 3.2.2)	x	1	* = Fehler
R035 = PA11 - Flachs (Abkühlrate 8 K/min)	s = 5-Punkt-Schubv. (Abs. 3.2.3)	y	2	int = Abbruch
PPFX = PP - Flachs	z = Zugversuch (Abs. 3.2.4)		3	cont = fortges.
PPHF = PP - Hanf	i = Impact-Versuch (Abs. 3.2.5)		4	
Glas = Glasfaser - Epoxid			5	

3.2 Methoden

3.2.1 Prüfmittel

Die Prüfverfahren werden (ausgenommen der Impact-Versuche) auf einer mit testControl II modernisierten Zwick/Roell 1475 mit dem jeweiligen Prüfaufbau durchgeführt. Eine 5 kN-DMS-Kraftmessdose dient zur Kraftmessung der Biege- und Schubversuche, eine 100 kN-DMS-Kraftmessdose zur Kraftmessung der Zugversuche. Die Bedienungssoftware testXpert III (v1.61) von Zwick/Roell ermöglicht einen Export des Verlaufs in mm und der gemessenen Kraft in N in Intervallen von 100 ms. Im Versuchsraum herrschen Laborbedingungen und damit eine konstante Temperatur von 20 °C, sowie 60 % Luftfeuchtigkeit.

Die Impact-Versuche werden an einem DLR-intern gefertigten Fallturm in einer großen Testhalle durchgeführt (Fallturm; siehe Anhang Seite v; Abb. 40a). Hier liegt die Temperatur über der Standardtemperatur, bleibt jedoch während der Versuche konstant bei etwa 26 °C. Eine erhöhte Temperatur kann eine steigernde Wirkung auf die Duktilität und damit die Energieaufnahmefähigkeit der Matrixwerkstoffe haben, was Vergleiche mit Literaturdaten erschwert. Eine qualitative Untersuchung der Prüflinge nach dem Versuch, sowie ein Vergleich der Prüflinge untereinander bleibt aussagekräftig.

3.2.2 3-Punkt Biegeversuch

Im 3-Punkt Biegeversuch wird ein Prüfling auf zwei Auflager mit dem Auflagerradius $r_{lager} = 2 \text{ mm}$ aufgelegt, welche sich im Auflagerabstand $l = 66 \text{ mm}$ befinden. Der Prüfling wird mittig mit einer Druckfinne mit dem Finnenradius $r_{finne} = 5 \text{ mm}$ belastet. Die Verfahrensgeschwindigkeit wird angepasst, sodass die Dauer der Versuche bei etwa einer Minute liegt. Die gemessene Gegenkraft wird über den Verfahrensweg der Prüfmaschinentraverse und über die Zeit aufgenommen. Der Versuch ist angelehnt an DIN EN ISO 178: „Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften“ [38]. Aus Rücksicht auf die Anisotropie des FVK, wird eine breitere Probengeometrie verwendet.

Aus der maximalen Gegenkraft F_{max} vor dem Versagen der Probe ergibt sich über die Probengeometrie die Biegefestigkeit σ_b :

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l_L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3.1)$$

[1]

Im 3-Punkt Biegeversuch entstehen innerhalb des Prüflings durch die zunehmende Durchbiegung, idealisiert betrachtet, zwei Dreiecksspannungsbereiche. Die Spannung um die neutrale Faser tritt als zunehmende Druckspannung in Richtung des Biegestempels und als zunehmende Zugspannung in entgegengesetzter Richtung auf. Bei möglichem Matrixfließen kommt es durch diese Querschnittsverteilung der Spannung, schon vor dem globalen Versagen zu plastischer Verformung der Randfasern des Prüflings, siehe Abbildung 6. Die Krümmung der Spannungsverläufe stellt die plastische Verformung durch das Matrixfließen dar.

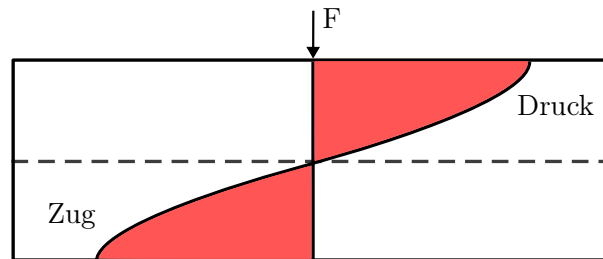


Abbildung 6: Spannungsverteilung im 3-Punkt Biegeversuch bei Angreifender Kraft F

Zusätzlich zur Bruchkraft wird die Fließkraft $F_{0,2}$ bestimmt, um den Moment der ersten plastischen Verformung der Randfaser zu beschreiben. Diese liegt vor, wenn sich die Biegedehnung des Prüflings um 0,2 % vom extrapolierten, linearen Bereich der Biegung ablöst [38]. Aus der Fließkraft wird analog zu Formel 3.1 die Fließgrenze unter Biegung σ_{bF} bestimmt.

$$\sigma_{bF} = \frac{3 \cdot F_{0,2} \cdot l_L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3.2)$$

[38]

Das Versagen der Probe wird vom Messsystem erkannt sobald ein Lastabfall von 50 % (anfangs 80 %) auftritt. Sobald dieser vorliegt, fährt die Prüfmaschine wieder in Ausgangsposition, der Prüfling wird entlastet.

3.2.3 5-Punkt Schubversuch

Der 5-Punkt Schubversuch wird entsprechend ISO 19927: „Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung von interlaminarer Festigkeit und E-Modul durch Doppelbalken-Scherversuch“ [39] durchgeführt. Im Versuch wird die Schubprobe an zwei Stellen belastet, bis es zu einer Verformung von etwa 5 % der Prüflingsdicke kommt. Die Auflager und Druckfinnen sind hierbei in einem Abstand von $l_{2,5d} = 2,5 \cdot d$ positioniert, sodass näherungsweise ausschließlich eine Schubkraft im Material auftritt, siehe Abbildung 7. Durch diese Schubkraft, tritt ein Versagen in Form von Delamination im Laminat auf.

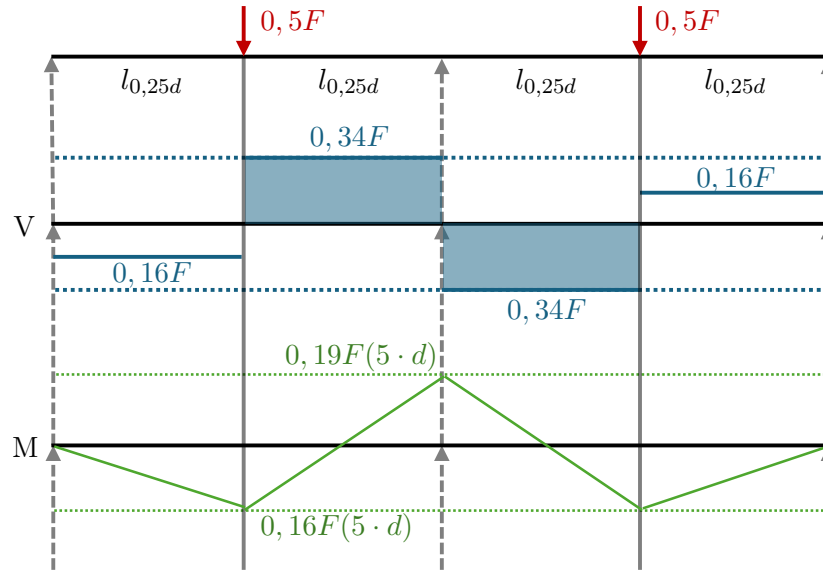


Abbildung 7: Querkraftverlauf V und Biegemomentenverlauf M eines 5-Punkt-Schubversuchs mit eingebrachter Last F auf eine Flachprobe mit der Dicke d , Verläufe berechnet mit Sky-Civ Balkenrechner [40]

Im Moment des Versagens wird die Scherfestigkeit τ_s überschritten:

$$\tau_s = \frac{33 \cdot F_{max}}{64 \cdot b \cdot d} \quad (3.3)$$

[41]

Bei einem linearen Anstieg der Schubspannung τ zur Scherverformung γ in % kann der Schubmodul G bestimmt werden:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.4)$$

[1]

Die Betrachtung im DIC ermöglicht eine Beschreibung des Materialversagens auf makroskopischer Ebene. Hier werden Stellen der höchsten Dehnung erkennbar, wodurch der Spannungsverlauf und mögliche Schwachstellen im Material sichtbar werden, noch bevor ein Versagen auftritt. Eine genaue Beschreibung der Auswertung mittels DIC, findet sich in Abschnitt 3.2.6.

3.2.4 Zugversuch

Im Zugversuch, angelehnt an Airbus Norm AITM1-0007; „Zugversuche an multidirektionalen Laminaten“ wird der Prüfling in zwei Parallelzwingen mit Reibungsflächen eingespannt und auf Zug belastet [42]. Im Gegensatz zur Norm wird auf die Aufleimer an den Einspannenden der Prüflinge verzichtet, um den Vorbereitungsaufwand gering zu halten. Die Aufleimer verhindern starke Spannungsspitzen an den Einspannungen, welche zu dreidimensionalen Spannungsverläufen und einem Versagen der Prüflinge an dieser Stelle führen können. Die Ergebnisse zeigen ein zufriedenstellendes Versagensverhalten außerhalb der Einspannung, siehe Abschnitt 4.3. Die aufgewendete Kraft F wird über den Verfahrweg s aufgezeichnet. Parallel wird der Versuch per Kamera verfolgt um im DIC die Dehnung ϵ des Materials genau zu bestimmen, siehe Abschnitt 3.2.6. Beim Erreichen der Versagenskraft F_{max} , kommt es zum Versagen des Prüflings. Die Zugfestigkeit R_m kann aus der Versagenskraft bestimmt werden:

$$R_m = \frac{F_{max}}{b \cdot d} \quad (3.5)$$

[1]

Im Bereich der elastischen Verformung, verlaufen Verfahrweg und Prüfkraft proportional. Wird dieser Bereich der Linearität verlassen, kommt es zum plastischen Werkstofffließen. Diesen Punkt beschreibt die Streckgrenze. Die Bestimmung der Streckgrenze erschwert sich bei einer kontinuierlich einsetzenden Plastizität. In diesem Fall wird anstelle der Streckgrenze die Dehngrenze $R_{p0,2}$ verwendet. Hier liegt eine Abweichung der Messkurve um 0,2 % der Dehnung von der extrapolierten elastischen Linearen vor:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{b \cdot d} \quad (3.6)$$

Im linearen Bereich elastischer Verformung lässt sich aus bekannter Spannung σ und Dehnung ϵ der Elastizitätsmodul E des Werkstoffs bestimmen:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.7)$$

[1]

Die Zug-Versuche am vom DLR gefertigten Flachsfaser-PP11-Material werden von der Abteilung Bauteilgestaltung und Fertigungstechnologien an Zugproben durchgeführt, welche mit denselben Parametern der Probe *R035* hergestellt wurden. Die Messung erfolgt an derselben Universalprüfmaschine, zur Dehnungsbestimmung wird die beschriebene DIC-Technik verwendet, siehe Abschnitt 3.2.6. Die BGF betrachtet die Feuchtigkeitsaufnahme des untersuchten Materials in einem parallelen Projekt und stellt die Kraftverläufe und DIC-Dateien der Zugversuche an der Kontrollgruppe zur weiteren Auswertung in dieser Arbeit zur Verfügung.

3.2.5 Impact-Versuch

Im Impact-Versuch, angelehnt an DIN ISO 18352: „Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe – Ermittlung der Compression-After-Impact-Eigenschaften bei spezifischer Aufprallenergie“ [43], wird ein Impact-Körper der Masse m , versehen mit einer definierten Impact-Spitze; eine Halbkugel mit Durchmesser $d_i = 16$ mm aus einer definierten Höhe h auf den Impact-Prüfling ($b \times l = 100$ mm $\times$ 150 mm) fallengelassen. Über die Bilanzierung (Blz.) der potentiellen Energie zu Beginn des Versuchs E_{pot} und der kinetischen Energie E_{kin} beim Auftreffen auf die Probe, kann die Impact-Energie $E_{imp} = E_{kin}$ bestimmt werden:

$$E_{imp} \stackrel{Blz.}{=} E_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (3.8)$$

[1]

mit der Gravitationsbeschleunigung $g = 9,81$ m/s² [1].

Ebenfalls relevant für die Betrachtung des Impact-Verhaltens, ist die Impact-Geschwindigkeit v . Diese ergibt sich durch erneute Bilanzierung der potentiellen und kinetischen Energie bei bekannten Versuchsparametern:

$$E_{imp} = \frac{m}{2} \cdot v^2 \stackrel{Blz.}{=} m \cdot g \cdot h = E_{pot} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.9)$$

Der Weg des Impact-Körpers kann im Versuch in den letzten Zentimetern des Falls durch einen Distanz-Laser mit dazugehörigem Zeitstempel aufgenommen werden. Aus dem Wegverlauf über die Zeit lässt sich die Geschwindigkeit des Impact-Körpers kurz vor dem Aufprall bestimmen. Mittels Formel 3.9 kann hieraus die kinetische Energie des Impact-Körpers und damit die Impact-Energie bestimmt werden.

Während des Aufpralls des Impact-Körpers wird ebenfalls die Kraft an einer Piezo-Kraftmessdose im Impact-Körper gemessen. Über die Integration der Kraft F_i über den per Distanz-Laser gemessenen Verformungsweg s ab Kraftmessung kann die verrichtete mechanische Arbeit W bestimmt werden. Die ins Material eingebrachte Energie ΔE entspricht der im System verbleibenden Arbeit W_{ende} :

$$W = \int_s F_i \cdot s \, ds \quad (3.10)$$

[1]

Bei der numerischen Integration werden die kleinsten Distanz-Messschritte multipliziert mit den Kraftmessungen an jeweiliger Stelle aufsummiert. Hierdurch ergibt sich der Verlauf der Arbeit über die Zeit. Bei Auftreffen des Impact-Körpers wird Arbeit in das System eingefügt. Das Maximum stellt die tatsächliche Impact-Energie $E_{imp} = W_{max}$ des Versuchs dar. Durch die (Teil-) Elastizität der Impact-Prüflinge, wird der Impact-Körper wieder entgegen der Fallrichtung beschleunigt. Die wirkende Kraft ab dem Kraftmaximum fügt dem Impact-Körper wieder einen Teil der Arbeit in Form von kinetischer Energie hinzu. Da es sich hierbei um einen Anteil der Impact-Energie handelt, fällt der Verlauf der Arbeit im Diagramm nicht zurück auf null. Die verbleibende Arbeit im System ΔE wurde vom Material aufgenommen, die Differenz der Impact-Energie und der aufgenommenen Energie stellt die an den Impact-Körper zurückgeführte kinetische Energie E'_{kin} dar.

3.2.6 Auswertungsmethoden

Bei den Prüfverfahren handelt es sich um zerstörende Prüfverfahren. Die Betrachtung der Proben, insbesondere der Versagensstellen erfolgt während des Versuchs mittels DIC (Kameras der Limes Messtechnik & Software GmbH mit 10 MP Sensorauflösung) oder nach dem jeweiligen Versuch per optischer Mikroskopie mit 20-2000-facher Vergrößerung am VH-ZST (digitales Mikroskop der Keyence AG) oder per Computertomografie. Das Versagen von FVK kann in drei Versagensarten kategorisiert werden; das Faserversagen, Adhäsionsversagen und Kohäsionsversagen. Auch Kombinationen der Versagensarten können beim globalen Versagen der Prüflinge auftreten. Beim Faserversagen reißen die Verstärkungsfasern quer oder in Längsrichtung, bevor es zu einer Schädigung der Matrix kommt. Adhäsionsversagen tritt auf, wenn die Faser-Matrix-Anbindung die geringste Festigkeit des Verbunds aufweist. Beim Versagen kommt es zu einer Ablösung der Fasern von der Matrix, auch Delamination genannt. Kommt es zu einer Rissbildung in der Matrix, während Fasern und Grenzschichten intakt bleiben, wird Kohäsionsversagen, also ein Versagen des Matrixwerkstoffs beobachtet. Bei gleicher Spannung an den möglichen Versagensstellen, tritt erstes Versagen dort auf, wo die geringste Materialfestigkeit zu verorten ist. Da es sich bei FVK um einen anisotropen Werkstoff handelt und die verwendeten Laminatkomponenten unterschiedliche Elastizitätsmodule aufweisen, verteilt sich die Dehnung ϵ aufgrund eingebrachter Spannung σ im Prüfling ungleichmäßig, siehe Formel 3.7.

Für die optische Auswertung mittels digitale Bildkorrelation müssen die im Verfahren betrachteten Oberflächen der Prüflinge zunächst mit einem Muster versehen werden, welches vom Auswertungsprogramm Istra 4D (v4.4.7) von Dantec Dynamics erkannt und in den einzelnen Bildschritten verfolgt werden kann. Hierfür wird die Oberfläche zunächst flächendeckend mit einem dünnen Film weißen Lacks versehen, welcher im trockenen Zustand mit einem schwarzen Lack übersprüht wird, bis gleiche Anteile weiße und schwarze Flächen auf der Oberfläche zu erkennen sind. Hierbei ist besonders die Tröpfchengröße des schwarzen Lacks entscheidend, da die Größe der entstandenen Flecken die minimale Pixelgröße der Analyseauflösung im DIC bestimmt. Es werden duktile, wasserbasierte Lacke verwendet und jeweils möglichst dünne Filme aufgesprüht, um die Dehnungen im Material zuverlässig abzubilden. Eine dicke oder spröde Lackschicht würde dazu führen, dass beobachtete Dehnungen und Risse das Materialverhalten des Lacks abbilden und zu Fehlannahmen über das Verhalten des geprüften Materials führen.

Im DIC der 5-Punkt Schubversuche wird vornehmlich die Scherdehnung (eng. True (tangential) Shear Strain) untersucht. Diese gibt in mrad an, wie weit sich die orthogonalen Kanten des Referenzmusters zu ihrer vorherigen Ausrichtung geneigt haben. Zur Betrachtung der Scherung wird ebenfalls die effektive Scherdehnung (eng. True effective Strain (von Mises)) verwendet. Diese gibt in absoluten mrad an, wie weit sich zwei zueinander orthogonale Kanten des Referenzmusters zueinander geneigt haben.

Die Berechnung der Standardabweichungen s erfolgt über die Formel zur Berechnung der Standardabweichung einer Stichprobe, da nur wenige Prüflinge je Prüfverfahren vorliegen:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.11)$$

[1]

4 Versuche

4.1 3-Punkt Biegeversuch

4.1.1 Proben R034 u. R035

Die einzelnen Kraftmesspunkte der 3-Punkt Biegeversuche werden über den Verfahrweg aufgezeichnet, siehe Abbildung 8. Im betrachteten Versuch steigt die Kraft bis zu einem Verfahrweg von etwa 0,5 mm nicht-linear an. Hier geht die Kraft zunächst in die Oberfläche der Prüflinge und in das Spiel der Vorrichtung. Ab etwa 0,5 mm Verfahrweg wird die Kraft vollständig in die Prüflinge eingeleitet, hier steigt die Kraft zum Verfahrweg proportional, was eine elastische Verformung des Prüflings bedeutet. Die Messkurve löst sich bei einem Verfahrweg von etwa 1,5 mm vom linearen Verlauf. Durch die graduelle Abflachung der Kurve kann hier von einem Matrixfließen ausgegangen werden. Die Abflachung der Messkurve setzt sich bis zu einem Verfahrweg von etwa 4,6 mm fort. Dort kommt es zu einem spröden Versagen des Prüflings, welches durch einen plötzlichen Abfall der Kraft charakterisiert wird. Die Versagenskraft F_{max} entspricht der maximal aufgenommenen Kraft des Versuchs. Um die Fließkraft $F_{0,2}$ zu ermitteln wird mittels MS-Excel eine Ausgleichsgerade im linearen Bereich des Biegeversuchs erzeugt. An der Stelle wo Ausgleichsgerade und Messwerte um 0,2 % der Probendicke auseinander liegen, ist die Fließkraft zu verorten.

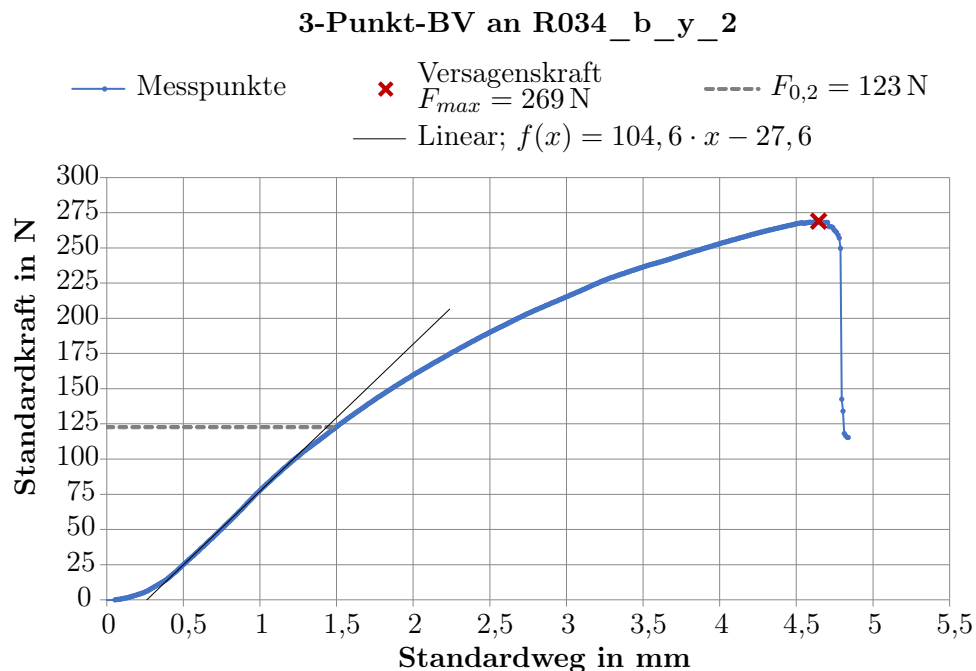


Abbildung 8: Kraftmesspunkte im 3-Punkt Biegeversuch an NFK-Probe *R034_b_y_2* mit extrapolierte Ausgleichsgerade $f(x) = 104,6 \cdot x - 27,6$ im Bereich 0,4 mm bis 1,0 mm, Versagenskraft $F_{max} = 269 \text{ N}$ und Fließkraft $F_{0,2} = 123 \text{ N}$

Mittels der Formeln 3.2 und 3.1 werden aus den Probengeometrien und den jeweiligen Kräften die Fließgrenzen unter Biegung σ_{bF} und die Biegefestigkeiten σ_b der einzelnen Proben berechnet. Am Beispiel von *R034_b_y_2*:

$$\sigma_{bF} = \frac{3 \cdot 123 \cdot 60}{2 \cdot 19,95 \cdot 2,81^2} = 70,06 \text{ MPa} \quad , \quad \sigma_b = \frac{3 \cdot 269 \cdot 60}{2 \cdot 19,95 \cdot 2,81^2} = 144,4 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

Die einzelnen Werte der Fließgrenzen und Biegefestigkeiten unterliegen der Fehlerfortpflanzung der Fehler der zu ihrer Berechnung verwendeten Größen. Da aus ihnen durchschnittliche Materialkennwerte gebildet werden, und durch die Anisotropie des Laminats mit einer breiten Streuung um den Erwartungswert gerechnet werden kann, wird im Folgenden stattdessen die Standardabweichung nach Formel 3.11 als ausschlaggebende Fehlergröße verwendet. Die Streuung der Messdaten wird im kumulativen Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche ersichtlich, siehe Abbildung 9.

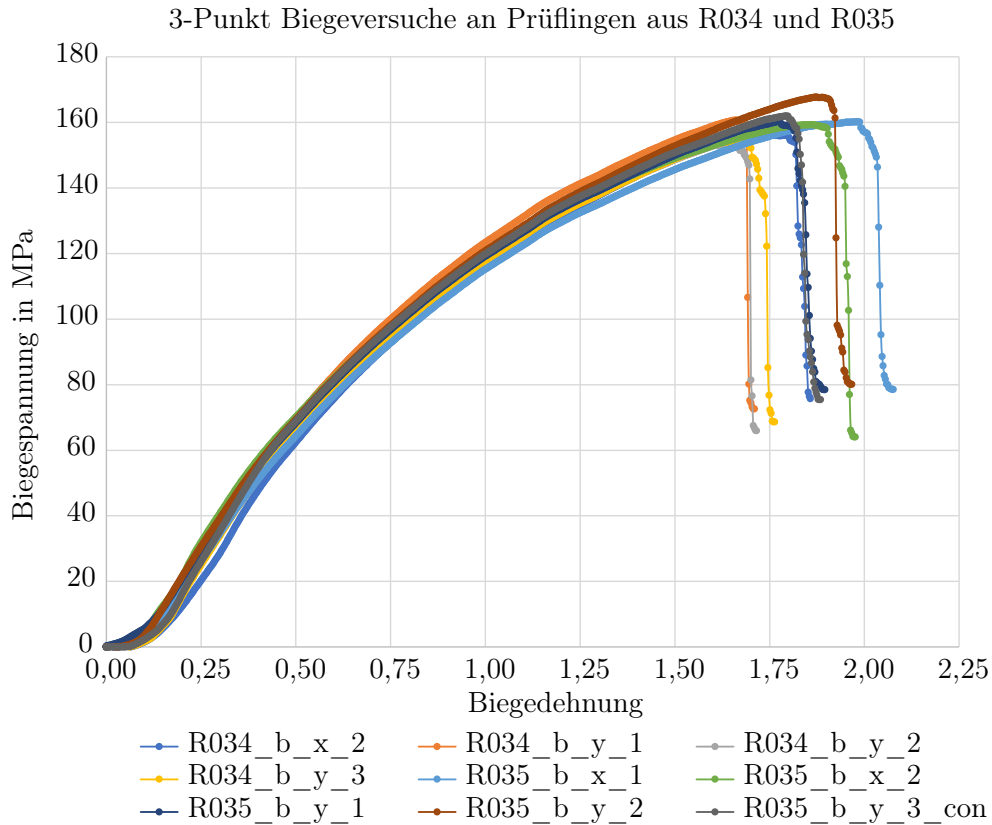


Abbildung 9: Spannungsverläufe der 3-Punkt Biegeversuche der Prüflinge aus den Proben *R034* und *R035*

Im Versuch werden zwei Prüflinge getestet, welche aus Randstücken der Flachproben gefertigt wurden. Im Randbereich weist die Probe einen höheren Matrixanteil auf. Dieser spiegelt sich in einer geringeren Biegefestigkeit wieder; etwa 5,3 % unter dem Durchschnitt der übrigen Prüflinge. Die Werte der Randstücke werden aus der Berechnung der durchschnittlichen Biegefestigkeit ausgeschlossen. Einen weiteren Ausreißer bildet der Prüfling *R034_b_x_1* mit einer um 11,5 % höheren Biegefestigkeit. Der Prüfling wurde im ersten Versuch mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 10 mm/min getestet, alle weiteren Versuche erfolgten mit angepasster Verfahrensgeschwindigkeit von 5 mm/min. Aus dieser erhöhten Biegefestigkeit bei erhöhter Verfahrensgeschwindigkeit, lässt sich ein scherverzähendes Verhalten des NFK, speziell der verwendeten PA11-Matrix vermuten. Dies ist insbesondere bei schnellen Belastungen, wie im Impact-Versuch relevant.

Es werden die durchschnittlichen Biegefestigkeiten der Prüflinge aus den jeweiligen Proben *R034* und *R035* und die zugehörigen Standardabweichungen nach Formel 3.11 berechnet:

$$\sigma_{b;R034} = (146 \pm 3) \text{ MPa} \quad , \quad \sigma_{b;R035} = (145,5 \pm 2,2) \text{ MPa} \quad (4.2)$$

Die Standardabweichung der Biegefestigkeit von *R034* mit 4 Prüflingen liegt bei 3 MPa und damit bei 2,0 % der durchschnittlichen Biegefestigkeit. Im Versuch an *R035* mit 5 Prüflingen liegt sie bei 2,2 MPa und damit 1,5 % der durchschnittlichen Biegefestigkeit.

Die Durchschnitte der Biegefestigkeiten der zwei Proben weichen um 0,3 % voneinander ab. Somit kann kein deutlicher Unterschied der Biegefestigkeiten aufgrund der unterschiedlichen Abkühlrate während der Fertigung markiert werden. Es wird ein zusammengefasster Durchschnitt des NFK-Materials berechnet. Dieser ermöglicht eine höhere statistische Sicherheit des Kennwerts. Die gesamtdurchschnittliche Biegefestigkeit des Materials liegt bei:

$$\sigma_{b;R} = (145,7 \pm 2,3) \text{ MPa} \quad (4.3)$$

Die durchschnittliche Fließgrenze unter Biegung aller Prüflinge wird bestimmt:

$$\sigma_{bF;R} = (65 \pm 5) \text{ MPa} \quad (4.4)$$

Da die Genauigkeit der Fließkraft der exakten Auswahl des linearen Bereichs im Diagramm unterliegt und sich mögliche Ungenauigkeiten in die Fließgrenze auswirken, liegt die Standardabweichung hier mit 5 MPa bei 7,7 %. Die nach Probe differenzierten Fließgrenzen liegen um 4 MPa auseinander und im jeweiligen Bereich der ersten Standardabweichung:

$$\sigma_{bF;R034} = (67 \pm 6) \text{ MPa} \quad , \quad \sigma_{bF;R035} = (63 \pm 4) \text{ MPa} \quad (4.5)$$

Die Betrachtung der Bruchstellen erfolgt im optischen Mikroskop. Die dehnungsbelasteten Seiten der Prüflinge weisen Brüche in der äußersten Laminatschicht auf, siehe Abbildung 10. Dies ist in den quergeschnittenen Rovings deutlich erkennbar, in den längsgeschnittenen Rovings kann keine klare Versagensart definiert werden. Deutlich ist, dass es zu keinem glatten Faserbruch der längsliegenden Fasern kommt.

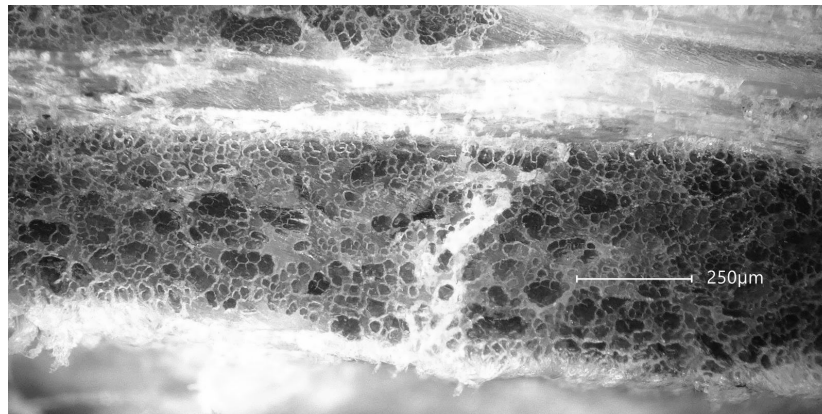


Abbildung 10: Riss in der äußeren Gewebeschicht der 3-Punkt-Biegeprüflings *R034_b_y_1* bei 200-facher optischer Vergrößerung

Die Risse werden am Rand der einzelnen Rovings oder innerhalb von quergeschnittenen Rovings beobachtet, siehe Abbildung 11. Sie werden als Zwischenfaserrisse identifiziert, also Risse zwischen einzelnen in der Matrix eingebetteten Fasern eines Rovings. Fasern innerhalb der Risse weisen einen intakten Querschnitt auf; es tritt kein Faserversagen

in Längsrichtung auf. Da jede Faser innerhalb eines Rovings eine Umlenkung der eingeleiteten Spannung bedeutet, wird die Rissbildung hier erschwert. Am Rand der Rovings verläuft die Spannung gradliniger, was eine Rissbildung wie in Abbildung 11 erleichtert. In Bereichen größerer Matrix-Materialansammlung sind keine Risse zu erkennen, was einerseits der höheren Dehnbarkeit des PA11 geschuldet ist. Andererseits deutet es darauf hin, dass die Festigkeit der Faser-Matrix-Anbindung der Festigkeit des PA11 unterliegt. Die beobachtete Rissbildung deutet auf Adhäsionsversagen hin.

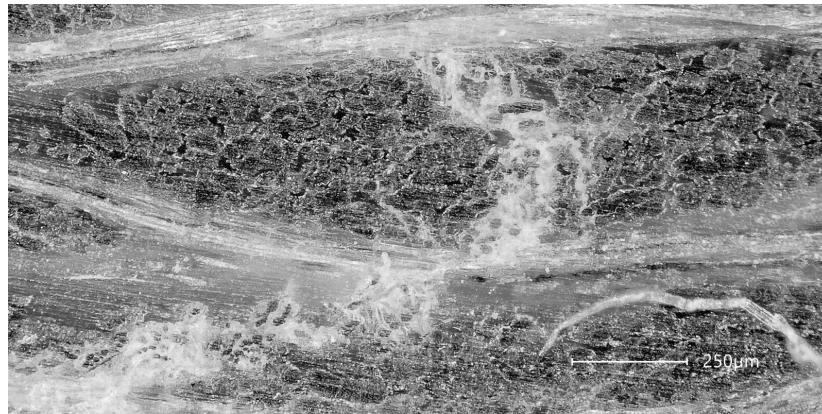


Abbildung 11: Rissbildung in zugbelasteten, inneren Schichten im Prüfling *R034_b_x_2* nach 3-Punkt-Biegeversuch unter 200-facher optischer Vergrößerung

In der Betrachtung der zugbelasteten Oberfläche der Prüflinge können Adhäsionsversagen und Faserrisse im NFK identifiziert werden, siehe Abbildung 12. Hier ist an oberer und unterer Bildkante die gerade Ausbreitung der Risse als Zwischenfaserrisse längs der Rovings zu erkennen. Die querliegenden Rovings zentral im Bild zeigen ein zackiges Rissmuster. Hier haben Matrix und Fasern in Längsrichtung versagt indem einzelne Fasern gerissen sind (Faserriss) oder aus dem Matrixmaterial gezogen wurden (Adhäsionsversagen). Neben Faserrissen in den Längsfasern liegt möglicherweise ein Versagen an den Enden der einzelnen Flachfasern vor, was das zackige Rissmuster zu einzelnen Faserenden erklären könnte. Eine genauere Betrachtung der Risse und Beurteilung der Fasern wäre unter einem Rasterelektronenmikroskop möglich.

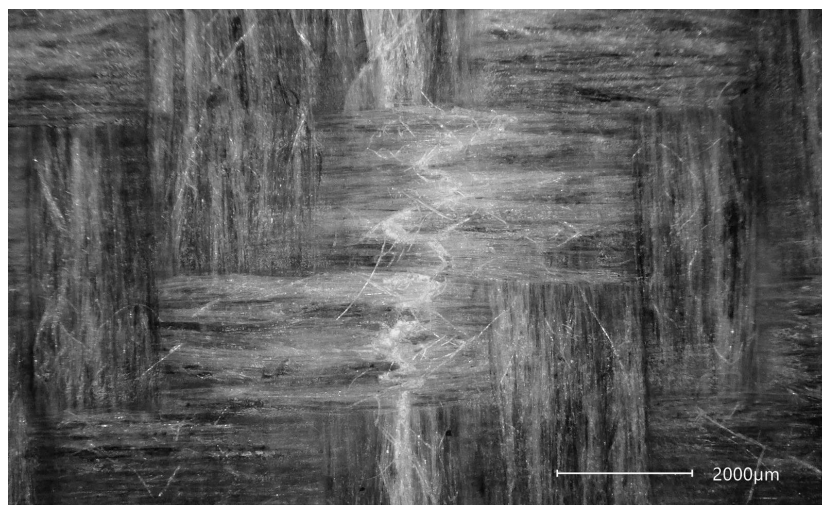


Abbildung 12: Rissausbreitung auf der zugbelasteten Oberfläche des Prüflings *R035_b_x_3* nach 3-Punkt-Biegeversuch bei 30-facher optischer Vergrößerung

Es kann ebenfalls eine Knickbildung der längsgeschnittenen Fasern in der druckbelasteten Grenzschicht einzelner Prüflinge beobachtet werden, siehe Abbildung 13. Das sogenannte „Faser-Kinking“ beschreibt ein Faserversagen aufgrund mangelnder Unterstützung des Rovings durch den umliegenden Matrixwerkstoff. Diese ist durch den Elastizitätsmodul und die Fließgrenze des PA11 gegeben. Das Faser-Kinking entsteht an Stellen an welchen die Fasern des Rovings nicht ideal in Längsrichtung belastet werden.

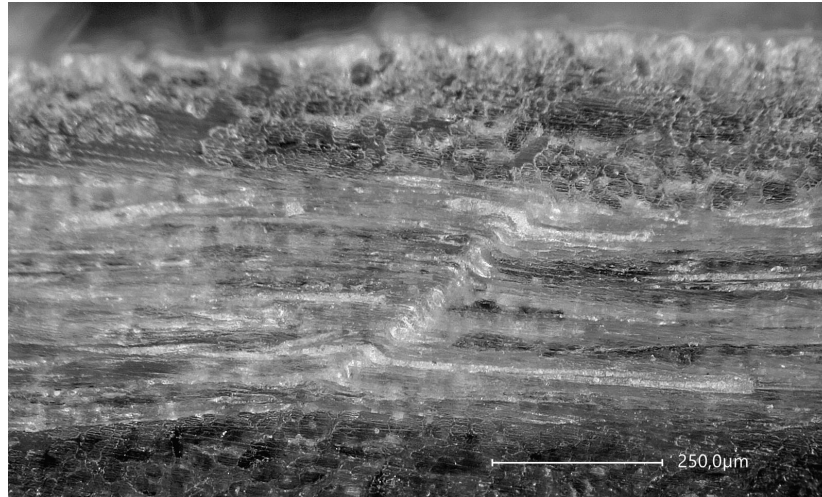


Abbildung 13: Knickbildung in druckbelasteter, äußerer Schicht im Prüfling *R034_b_x_2* nach 3-Punkt-Biegeversuch unter 300-facher optischer Vergrößerung

4.1.2 Proben PPFX u. PPHF

Die Biegefestigkeiten und Fließgrenzen unter Biegung der Prüflinge aus den Proben PPFX und PPHF werden analog zum vorangegangenen Abschnitt 4.1.1 bestimmt:

$$\sigma_{b;PPFX} = (55 \pm 8) \text{ MPa} \quad , \quad \sigma_{bF;PPFX} = (15 \pm 2) \text{ MPa} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{b;PPHF} = (41 \pm 7) \text{ MPa} \quad , \quad \sigma_{bF;PPHF} = (13 \pm 3) \text{ MPa} \quad (4.7)$$

Die Standardabweichungen der Fließgrenzen unter Biegung liegen bei 13 % im Versuch an PPFX und bei 19 % im Versuch an PPHF. Die Streuung der Fließkräfte lässt sich im gemeinsamen Kraft-Weg-Diagramm der Versuche erkennen, siehe Abbildung 14; folgende Seite. Auch bei den Prüflingen der Proben PPFX und PPHF ist zunächst ein linearer Anstieg der Kraft gegenüber dem Verfahrweg und damit eine elastische Verformung zu beobachten. Die Kurven flachen ebenfalls nach dem linearen Anstieg ab. Bei PPFX tritt ein fließendes Versagen auf. Die Prüflinge aus PPHF versagen fließend mit einzelnen Sprüngen. Hier kann davon ausgegangen werden, dass einzelne Fasern und Faserbündel reißen, wobei kein globales Versagen der Prüflinge auftritt. Dies deutet darauf hin, dass eine ungleichmäßige Verteilung der Spannungen und Festigkeiten im Material vorliegt. Die Fließgrenzen unter Biegung der Prüflinge beider Lamine liegen mit $\sigma_{bF;PPFX} = (15 \pm 2) \text{ MPa}$ und $\sigma_{bF;PPHF} = (13 \pm 3) \text{ MPa}$ bei 65 % und 57 % der Fließgrenze des Matrixwerkstoffs Polypropylene mit 23 MPa. Bei der Annahme eines Matrixvolumens von 50 % werden etwa 15 % und 7 % der Biegespannung von den jeweiligen Fasern aufgenommen. Die Biegefestigkeit liegt in einzelnen Versuchen an PPHF nur knapp über der Fließgrenze des Matrixwerkstoffs. Im Mittel liegt sie mit $(41 \pm 7) \text{ MPa}$ unter dem Zweifachen.

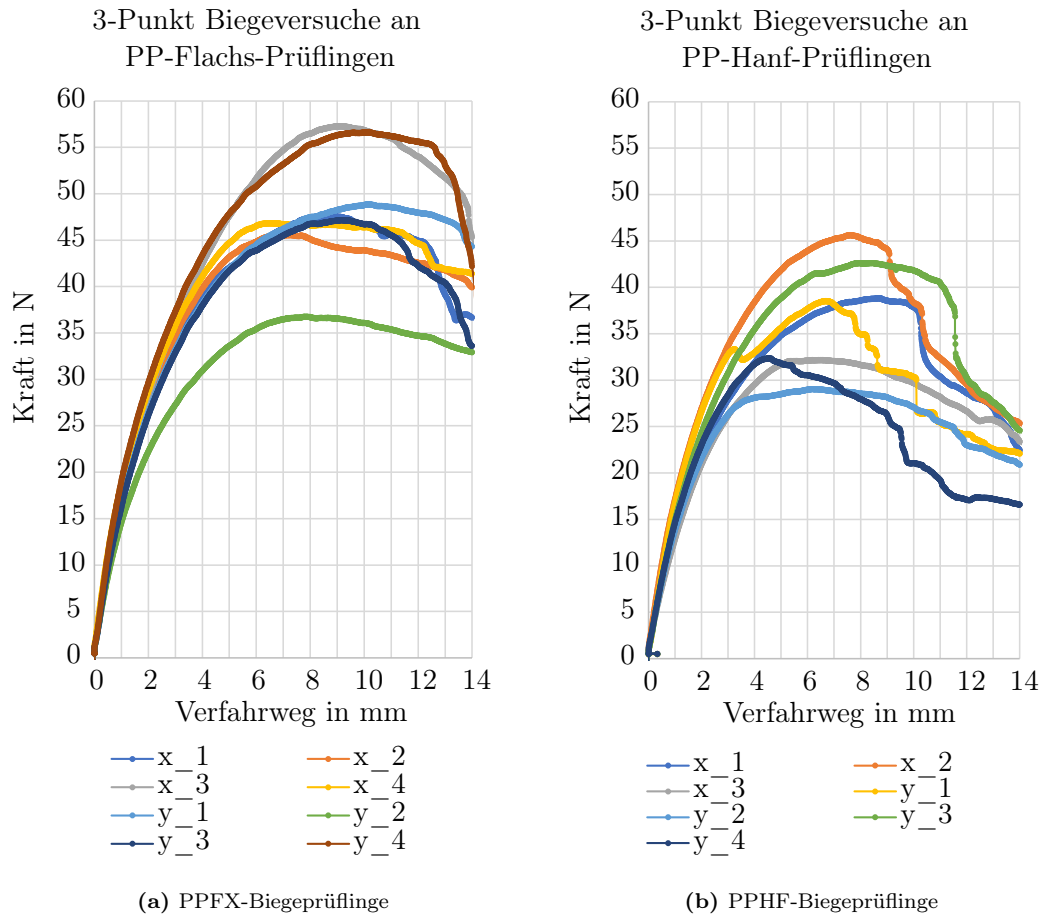


Abbildung 14: Kraft-Weg-Verläufe der 3-Punkt Biegeprüfung der Proben PPHF und PPFX, gekürzte Prüflingsbenennung; „PPFX_b_x_1“ → „x_1“

Lokales Versagen kann im Mikroskop in Form von Zwischenfaserrissen und Roving-Knicken nachgewiesen werden, siehe Abbildung 15. Im Gegensatz zum Faser-Kinking tritt ein Einknicken des gesamten Rovings im Material auf, wobei eine lokale Delamination entsteht. Das Einknicken kann im Kraft-Weg-Diagramm als Abflachen oder Einbrechen der Kurve beobachtet werden. Da in den Biegeverläufen der PPFX-Prüflinge kein sprödes Versagen zu beobachten ist, ist davon auszugehen, dass die Knickbildung und begleitete Delamination kontinuierlich und nicht schlagartig auftreten.

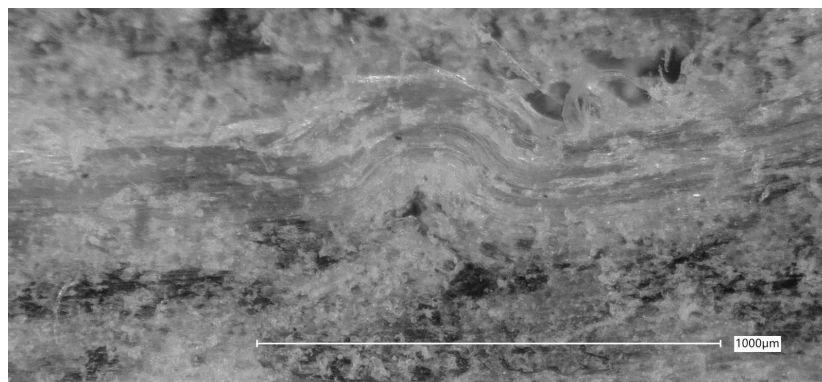


Abbildung 15: 3-Punkt Biegeprüfling PPFX_b_y_4 nach Prüfung bei 200-facher optischer Vergrößerung

Das sprunghafte Versagen der PPHF-Prüflinge könnte Hinweis dafür sein, dass die Zugfestigkeit der Hanffasern in Teilen unter der Zugfestigkeit des Matrixwerkstoffs liegt. Während bei den zugfesteren Flachsfasern eine plastische Verformung, basierend auf einem Dehnen und anschließendem Matrixfließen zu beobachten ist, kommt es bei den Hanffasern teilweise zu spröden Rissen, schon bevor der Matrixwerkstoff versagt. Die Hanffasern liegen zudem bei subjektiver Betrachtung ungeordneter vor, als die Flachsfasern, was die Abweichung der Versagenskurven erklären könnte.

Bei der Prüflingsbreite von 20 mm ist zu beachten, dass kein vollständiges Roving ($b = (25,0 \pm 1,8) \text{ mm}$) in einer Lage des Prüflings vorliegt. Besonders bei dem Versagen der auf Zug belasteten Faser, spielt die Orientierung der äußersten Fasern eine erhebliche Rolle im Versagensfall. Da hier die Spannung am höchsten ist, kann von einem ersten Versagen der Randfasern ausgegangen werden. Diese tritt bei querliegenden Fasern als Zwischenfaserriss und bei längsliegenden Fasern als Faserriss auf. Da die Matrix- und Matrixanbindungsfestigkeit sich von der Zugfestigkeit der Fasern unterscheidet, werden somit unterschiedliche Versagenskräfte beobachtet.

Bei den Prüflingen der Probe PPFX ist dieser Effekt verifizierbar. Die zwei Prüflinge mit den höchsten Biegefestigkeiten, x_3 und y_4 weisen in der äußersten Schicht des Laminats ausschließlich Längsfasern auf, siehe Abbildung 16. Der Prüfling mit der geringsten Biegefestigkeit, y_2 hingegen zeigt ausschließlich querliegende Fasern. Die im Diagramm einer Gruppe liegenden restlichen Prüflinge besitzen in der äußersten Schicht eine Mischung aus Längs- und Querfasern. Kohäsions-/Adhäsionsversäge treten bei einer geringeren Krafteinwirkung auf, als das Faserversagen. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Zugfestigkeit der Flachsfaser über der Festigkeit der Matrix/Matrixanbindung liegt.

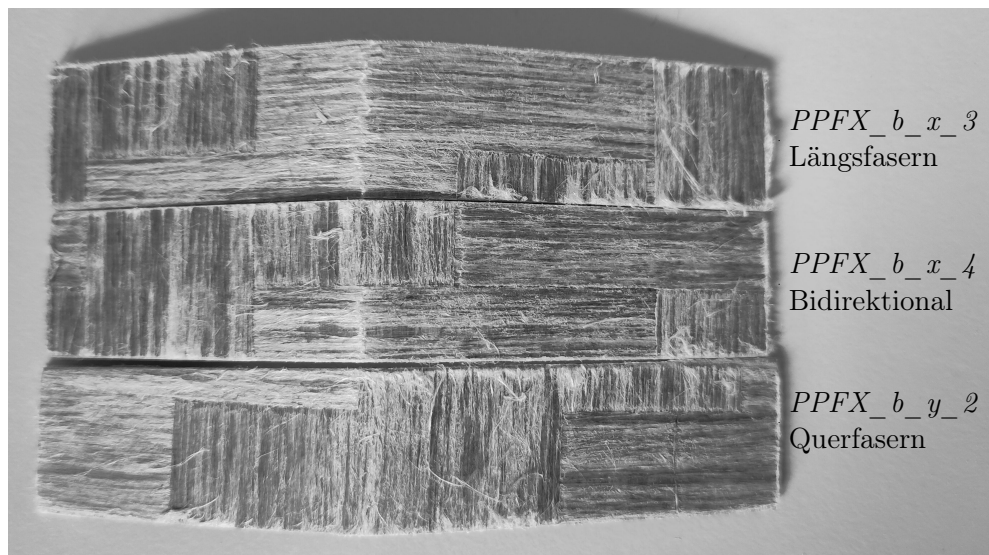


Abbildung 16: Bruch der äußeren Schichten von 3-Punkt Biegeprüflingen aus PPFX

Zur Reduktion von Streuungen in den Untersuchungen der Biegefestigkeit, sollten mehrere Rovings in der Breite des Prüflings liegen. Bei dem untersuchten Material, würde dies zu einer starken Abweichung der Norm-Geometrie einer Langprobe führen, andererseits einen hohen Materialverbrauch bedeuten.

4.2 5-Punkt Schubversuch

4.2.1 Proben R034 u. R035

Im Kraft-Weg-Diagramm der 5-Punkt Schubversuche ist, nach einem kurzen nicht-linearen Abschnitt bei erster Krafteinbringung, ein linearer Verlauf zu erkennen, siehe Abbildung 17. Hier befindet sich das Material, analog zu Abschnitt 4.1.1, in einer elastischen Verformung.

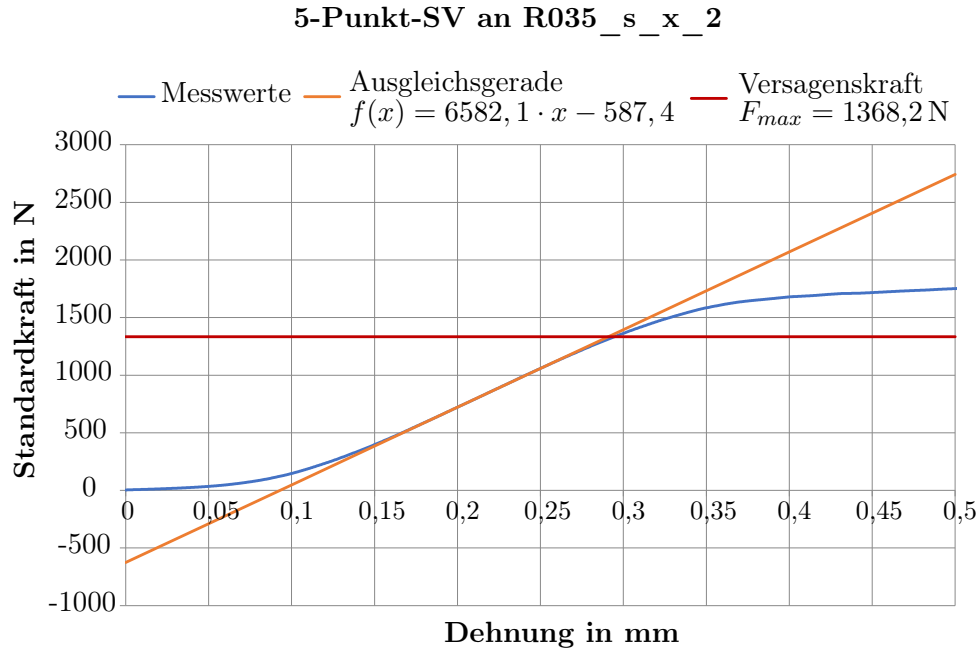


Abbildung 17: Kraft-Weg-Diagramm im 5-Punkt-Schubversuch an Prüfling *R035_s_x_2*, mit in MS-Excel kalkulierter Ausgleichsgerade $f(x) = 6582,1 \cdot x - 587,4$ im linearen Versuchsbereich und bestimmter Versagenskraft $F_{max} = 1368,2 \text{ N}$ bei Ablösung der Messwerte von der Ausgleichsgerade um 25 N

Die Steigung in diesem Bereich kann über die Einzelmesswerte bestimmt werden, wobei ein möglichst breites Intervall an Messwerten gewählt wird, welche gleichzeitig sicher im linearen Bereich liegen, um lokale Schwankungen auszugleichen. Anhand eines bekannten Messwerts im Zentrum des linearen Bereichs, wird der y-Achsen-Abschnitt ermittelt. Der Punkt der Ablösung der Messwerte von der Ausgleichsgerade wird als Fließpunkt bei einer Differenz von 0,2 % der Dehnung definiert. Aus den so bestimmten Versagenskräften, werden mittels Formel 3.3 die Schubfestigkeiten ermittelt. Aus diesen wird ein Gesamtdurchschnitt gebildet:

$$\tau_s = (12,4 \pm 0,4) \text{ MPa} \quad (4.8)$$

Die Standardabweichung der Schubfestigkeit liegt bei 0,4 MPa, was 3,2 % entspricht. Die Durchschnittliche Schubfestigkeit nach den zwei Proben *R034* und *R035* beträgt:

$$\tau_{s;R034} = (12,6 \pm 0,4) \text{ MPa} \quad , \quad \tau_{s;R035} = (12,2 \pm 0,4) \text{ MPa} \quad (4.9)$$

Auch hier kann kein Unterschied in der Schubfestigkeit aufgrund unterschiedlicher Abkühlraten während der Fertigung markiert werden. Die ermittelten Schubfestigkeiten liegen im Bereich der jeweiligen Standardabweichung. Die Streuung lässt sich im kumulativen Diagramm der 5-Punkt Schubversuche erkennen, siehe Abbildung 18.

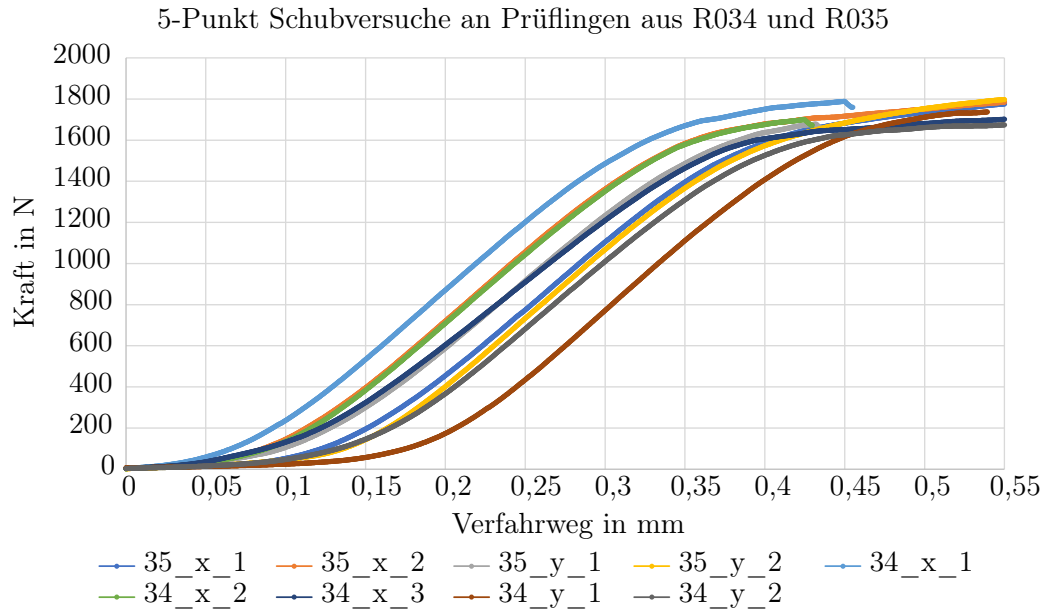


Abbildung 18: Kraftmesspunkte aller 5-Punkt Schubversuche der Prüflinge aus den Proben R034 und R035, gekürzte Prüflingsbenennung; „R034_s_x_1“ → „34_x_1“

Die Parallelität der linearen Abschnitte der Messkurven ermöglicht neben der Standardabweichung der Schubfestigkeiten eine Einschätzung der Konsistenz im Materialverhalten. Die Steigung im linearen Bereich ergibt ins Spannungs-Dehnungs-Diagramm übersetzt den Schubmodul des Materials nach Formel 3.4. Der Versatz der Kurven auf der x-Achse entspricht der Schwankung der Probendicken und damit dem Kontaktmoment der Prüfeinrichtung mit der Probe. Der Versatz besitzt keine direkte Aussagekraft über die Materialkennwerte.

Der durchschnittliche Schubmodul G wird nach Formel 3.4 für das Material bestimmt:

$$G_R = (171 \pm 6) \text{ MPa} \quad (4.10)$$

Per DIC wird das Dehnungsprofil während des Versuchs über die gesamte Probenbreite betrachtet. Es zeigen sich schon bei geringer Verformung und Krafteinwirkung am Beginn des linearen Bereichs einzelne Dehnungsspitzen über den Querschnitt des NFK-Prüflings, siehe Abbildung 19; folgende Seite. Allgemein läuft der Dehnungsverlauf von den belasteten Außenflächen zur zentralen Faser des Prüflings hin an. Die Dehnungsspitzen treten aber ebenfalls am Rand der Prüflinge auf, wie in Abb. 19 bei 1,7 mm bis 1,9 mm zu erkennen ist. Im Längsverlauf des Prüflings ist eine Ausbreitung der Bereiche maximaler Dehnung entlang der Horizontalen zu erkennen. Es gilt zu charakterisieren, in welcher Weise sich die Dehnung im Längsverlauf ausbreitet um die Versagensart bei Schubbelastung zu bestimmen.

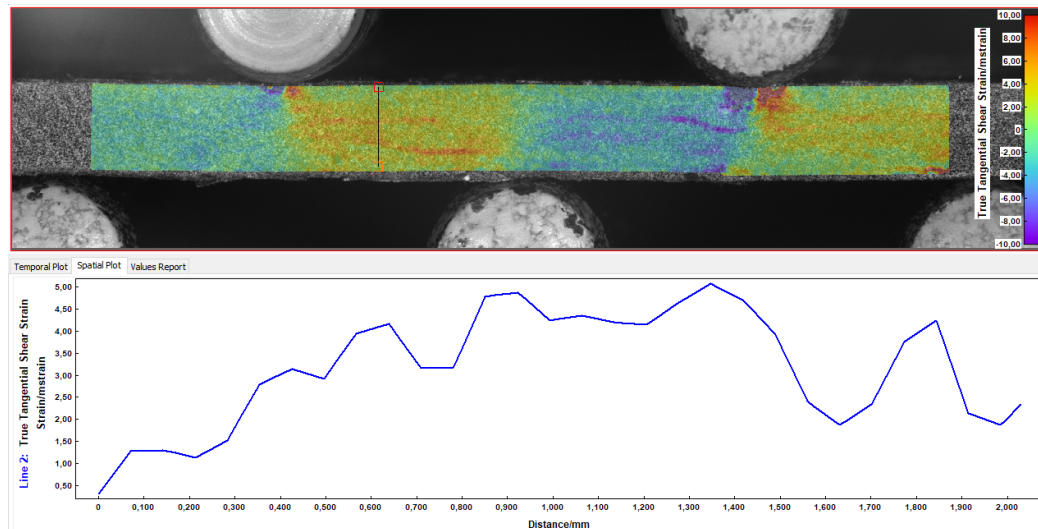


Abbildung 19: Scherdehnung über den Querschnitt des Prüflings *R035_s_x_2*, betrachtet im DIC-Programm über die eingezeichnete Gerade (oben nach unten) im 5-Punkt-Schubversuch bei 0,13 mm Verfahrweg und 261,3 N Krafteinwirkung

Im Moment der Einwirkung der Versagenskraft, sind Dehnungsspitzen an denselben Stellen zu beobachten, welche zu Beginn des linearen Bereichs die höchste Dehnung aufwiesen, siehe Abbildung 20. Die Längsausbreitung der Bereiche maximaler Dehnung ist deutlich zu erkennen. Eine Bestimmung unterschiedlicher Winkel in der Ausbreitung der Dehnung zeigt, dass diese nicht zwingend der Welligkeit der Rovings folgt. Es werden Winkel im Bereich von etwa 7° bis 25° gemessen. Zusätzlich breitet sich die Dehnung primär zwischen den Faserschichten aus. Bei den 5-Punkt Schubversuchen kommt es nicht zum spröden Bruch, was durch den Kraftverlauf in Abbildung 17 deutlich wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass Faserversagen nicht die Hauptversagensart darstellt. Das Ausbreiten der Dehnung und Abflachen der Kraft-Weg-Kurve deuten auf ein Strecken und anschließendes Fließen des Matrixmaterials, sowie kontinuierliches Kohäsions- oder Adhäsionsversagen hin.

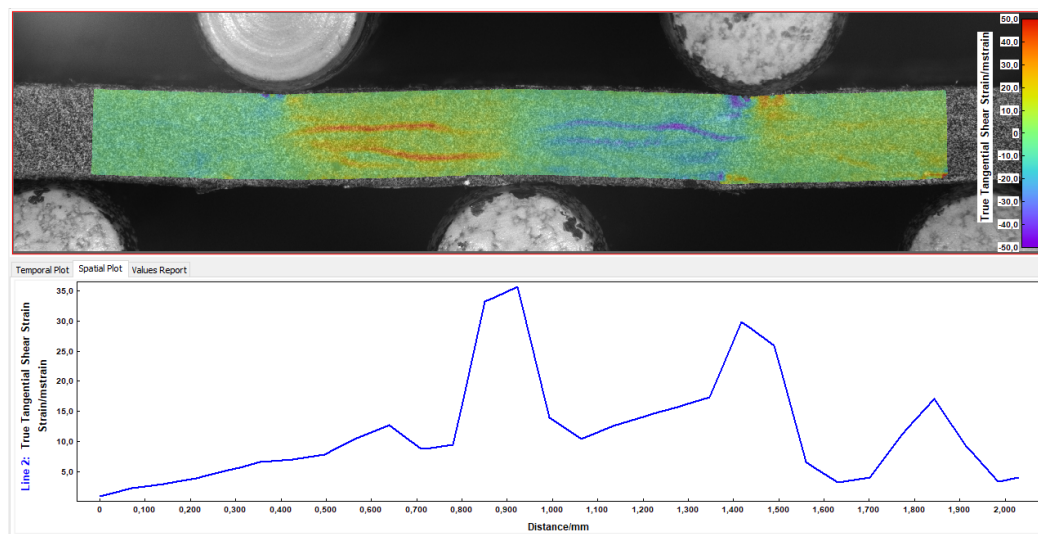


Abbildung 20: Scherdehnung über den Querschnitt des Prüflings *R035_s_x_2*, betrachtet über die eingezeichnete Gerade (oben nach unten) im 5-Punkt-Schubversuch bei 0,29 mm Verfahrweg und 1334,6 N Krafteinwirkung

Ein Springen der Zonen hoher Dehnung über Schichten hinweg kann in einzelnen Prüflingen beobachtet werden. Dies ist als Dehnungsverlauf im 45° bis 60° -Winkel zu beobachten, siehe Abbildung 21. Der Dehnungsverlauf wird hier durch die Laminatschichten leicht unterbrochen, kann sich aber durch etwa die Hälfte des Querschnitts ausbreiten.

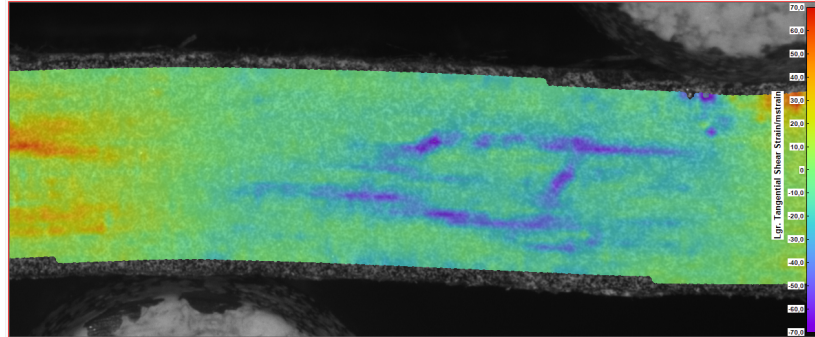


Abbildung 21: Visuelle Darstellung der Scherdehnung über den Querschnitt des Prüflings *R053_s_x_1* im 5-Punkt-Scherversuch

Nach den 5-Punkt Schubversuchen werden die entstandenen Brüche im optischen Mikroskop betrachtet. Klar erkenntlich sind Zwischenfaserbrüche in den quergeschnittenen Rovings, siehe Abbildung 22. Risse wie dieser sind Resultat der beobachteten Dehnungsausbreitung, welche einen höheren Winkel zur Horizontalen aufweisen, als die Welligkeit der längsliegenden Rovings. Die Ausbreitung des Risses ist unterbrochen von einzelnen querliegenden Fasern und Faserbündeln.

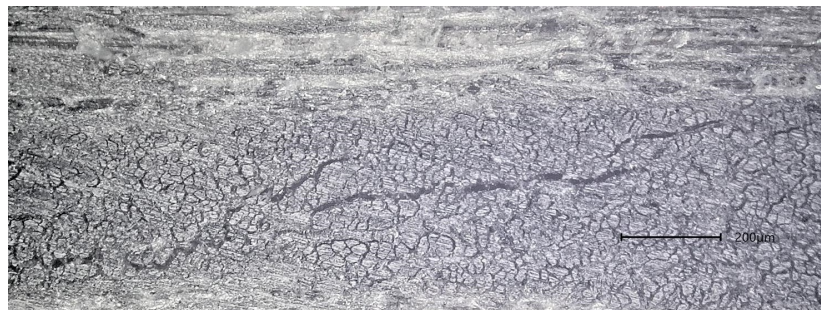


Abbildung 22: Zwischenfaserrisse eines Rovings im Prüfling *R034_s_x_3* nach Materialversagen im 5-Punkt-Schubversuch

Auch zu beobachten sind horizontal ausgebreitete Risse, welche die quergeschnittenen Rovings in Längsrichtung spalten, siehe Abbildung 23; folgende Seite. Hier fällt auf, dass die Risse entlang der Gewebeschichten, jedoch innerhalb der quergeschnittenen Rovings laufen. Die Risse sind in übereinanderliegenden, durch längsgeschnittene Rovings getrennten, quergeschnittenen Rovings zu finden. Mögliche Risse in den längsgeschnittenen Rovings sind nicht auszuschließen und mit den erstellten Schlibbildern nicht zu erkennen, da beim Schleifen einzelne Längsfasern aus dem Material gezogen werden. Aus den DIC-Aufnahmen ist erkenntlich, dass über den Querschnitt der Probe in etwa eine Anzahl an Brüchen auftritt, welche weniger oder gleich der Gelegeanzahl ist. Dies lässt die Vermutung zu, dass es sich bei den betrachteten Rissen durch die quergeschnittenen Rovings um die Hauptversagensstellen handelt, da ansonsten im DIC eine höhere Anzahl an Rissen beobachtbar wäre.

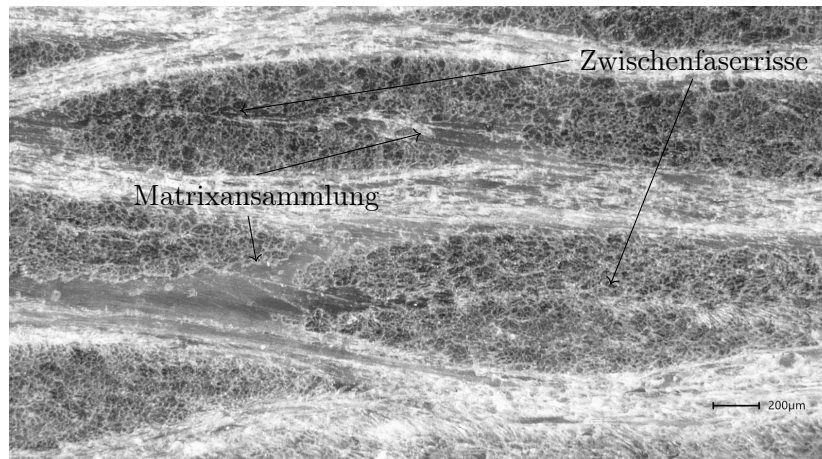


Abbildung 23: In Matrixansammlungen mündende Zwischenfaserrisse in zwei Gewebeschichten des Prüflings *R035_s_x_2* nach Materialversagen im 5-Punkt-Schubversuch

Die Ausbreitung einzelner untersuchter Risse, wie in Abb. 23, beginnt und endet an Matrixwerkstoffansammlungen. Die Ausbreitung ist hier geradliniger als in der vorangegangenen Betrachtung. Der Matrixwerkstoff weist eine geringere Festigkeit, einen geringeren Elastizitätsmodul und eine höhere Bruchdehnung auf. Durch die erhöhte Dehnbarkeit von Matrixansammlungen wird die eingebrachte Spannung in umliegendes Material eingebracht. Übersteigt diese die Festigkeit der Matrix-Faser-Anbindung, kommt es zum Adhäsionsversagen und zu Zwischenfaserrissen. Hierbei kann nicht klar differenziert werden, ob es zuvor zu einer plastischen Verformung des Matrixmaterials vorliegt.

Es wird Materialversagen in Form von Zwischenfaserrissen beobachtet, welches keinen geraden Ausbreitungsverlauf zeigt, siehe Abbildung 24. Hier versagt das Material ungeordnet in einzelnen kurzen Brüchen. Diese Versagensausbreitung entspricht möglicherweise den in Abbildung 21 beobachteten Schichtsprüngen und Dehnungsausbreitungen in höheren Winkeln.

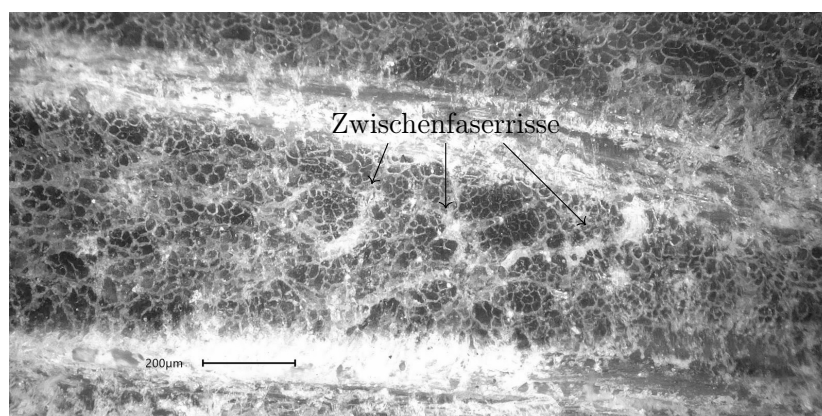


Abbildung 24: Ungeordnete Zwischenfaserrisse eines Rovings im Prüfling *R034_s_y_1* nach Materialversagen im 5-Punkt-Schubversuch

4.2.2 Proben PPFX u. PPHF

Aus den Messdaten der 5-Punkt Schubversuche werden die Kraft-Weg-Diagramme der Lamine PPFX und PPHF erstellt, siehe Abbildung 25. Der Verlauf der Kurven weist für beide Proben Abweichungen in der Steigung auf, was eine Varianz im Schubmodul bedeutet. Ein ausgeprägter linearer Bereich ist nur bei einzelnen Messkurven zu erkennen. Bei den meisten Prüflingen tritt eine leichte Abflachung der Messkurve und damit eine plastische Verformung des Materials schon vor dem vollständigen Versagen auf. Die Scherfestigkeiten variieren sichtlich. Das Abflachen der Kurven und damit verbundene Materialversagen setzt innerhalb beider Prüfkampagnen bei unterschiedlichen Verfahrenswegen und Kräften ein.

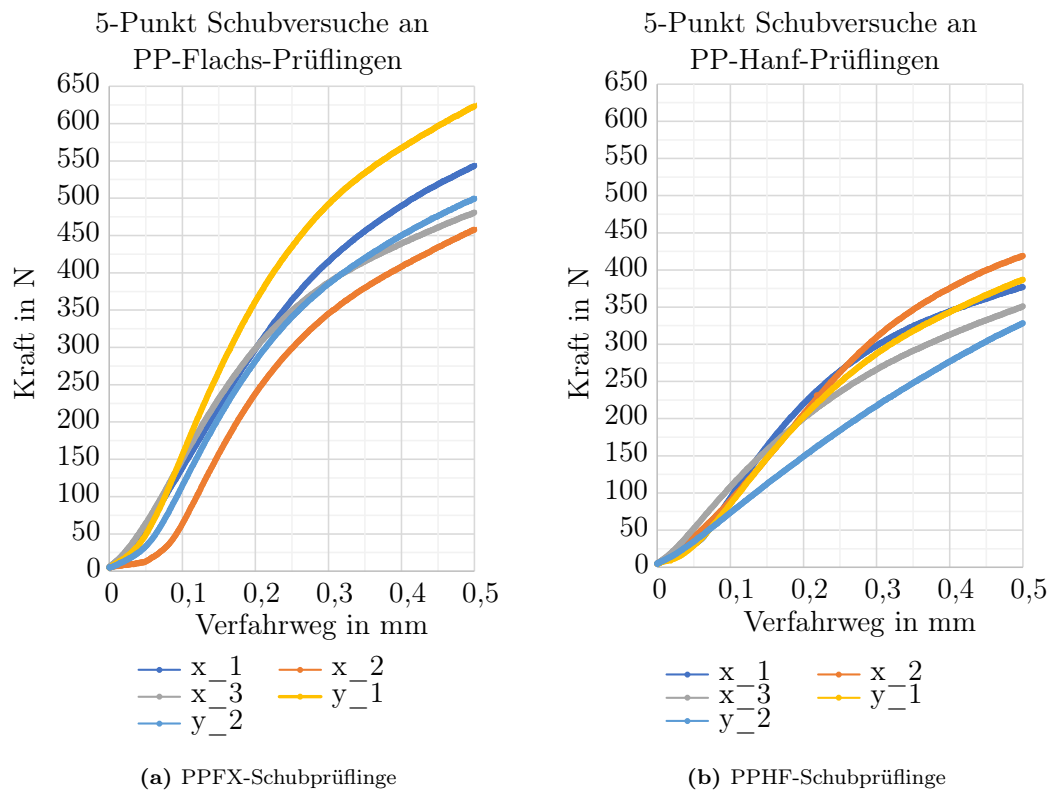


Abbildung 25: Kraft-Weg-Verläufe der 5-Punkt Schubversuche der Proben PPHF und PPFX, gekürzte Prüfingsbenennung; „PPFX_b_x_1“ → „x_1“

Analog zum vorangegangenen Abschnitt 4.2.1 werden die Scherfestigkeiten der Prüflinge aus PPFX und PPHF ermittelt, wobei die Definition der Bereiche linearer Kraft-Weg-Verläufe je Prüfling eine Herausforderung darstellt:

$$\tau_{s;PPFX} = (3,38 \pm 0,05) \text{ MPa} \quad , \quad \tau_{s;PPHF} = (2,67 \pm 0,08) \text{ MPa} \quad (4.11)$$

Die Standardabweichung der Scherfestigkeit des PPFX Laminats liegt mit 0,5 MPa bei 13 %. Bei PPFX sind es mit 0,8 MPa 31 % des Kennwerts.

Der Schubmodul der beiden Lamine liegt bei:

$$G_{PPFX} = (47 \pm 7) \text{ MPa} \quad , \quad G_{PPHF} = (30 \pm 7) \text{ MPa} \quad (4.12)$$

Die DIC-Auswertung zeigt auch beim Materialversagen der PPFX-Prüflinge eine Delamination der einzelnen Schichten, siehe Abbildung 26. Diese zeigt lokale Ausbreitungen an einer Vielzahl einzelner Stellen, anstatt sich ununterbrochen über längere Abschnitte zu erstrecken. Eine Erklärung hierfür könnte eine noch zu untersuchende Porosität, Abschnitt 4.4 darstellen. Die Poren stellen lokal begrenzte Risse dar, welche Dehnungen aufnehmen. Die Ausbreitung der Bereiche maximaler Dehnung erfolgt entlang der Horizontalen.

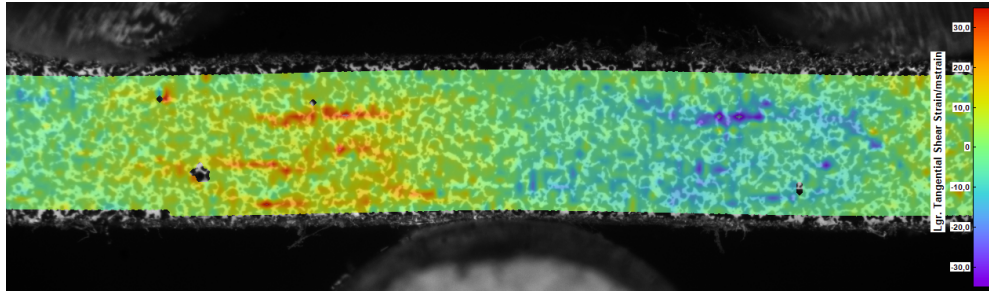


Abbildung 26: Scherdehnung im 5-Punkt Schubversuch an Prüfling *PPFX_s_x_3*

Bei den PPHF-Prüflingen ist eine ausgeprägte Delamination zu beobachten, siehe Abbildung 27. Die Bereiche maximaler Dehnung treten an lokalen Fehlstellen im Material auf, und breiten sich entlang der Horizontalen aus. Aufgrund der hohen Roving-Breite kann nicht differenziert werden, ob es sich dabei um eine Delamination der einzelnen Laminatschichten oder wie beim DLR-Material um Zwischenfaserrisse handelt.

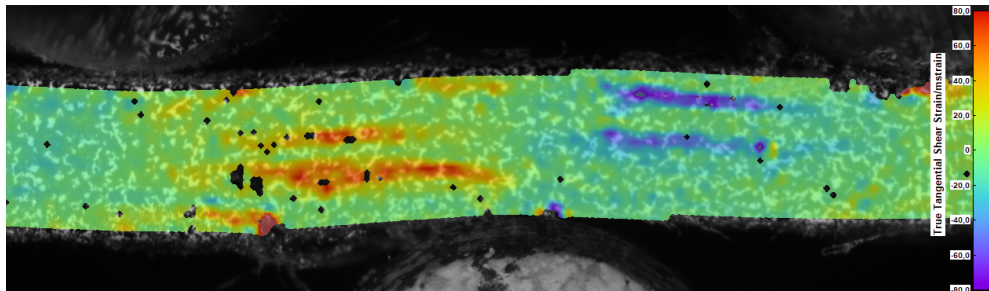


Abbildung 27: Scherdehnung im 5-Punkt Schubversuch an Prüfling *PPHF_s_x_3*

Bei einzelnen Prüflingen, insbesondere der PPHF-Probe ist eine stark ungleiche Verteilung der Dehnung und den auftretenden Rissen im Material zu beobachten, siehe Abbildung 28. Dies verdeutlicht die Anisotropie des NFK. Aufgrund der hohen Abweichungen, ist eine detaillierten Untersuchung der Versagensmuster zunächst nicht aussagekräftig.

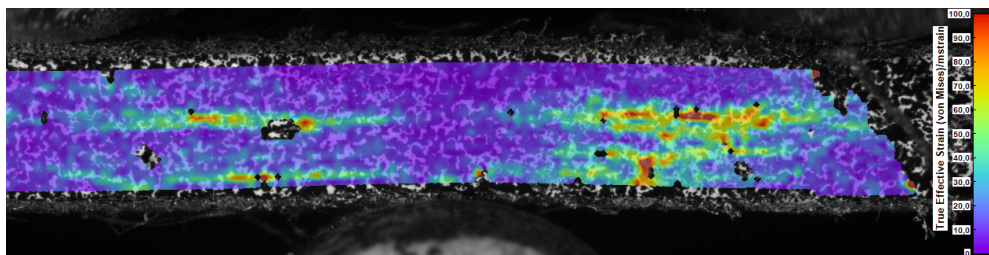


Abbildung 28: Effektive Dehnung im 5-Punkt Schubversuch an Prüfling *PPHF_s_y_1*, Versagenszentrum rechts im Bild

4.3 Zugversuch

4.3.1 Proben R03x

Aus den Kraftmessungen im Zugversuch der Abteilung Bauteilgestaltung und Fertigungstechnologien an den Flachfaser-PA11-Prüflingen (*R03x*: *R036_1*, *R036_5*, *R037_3*, *R037_4* und *R038_2*) werden die Spannungs-Dehnungs-Verläufe berechnet, siehe Abbildung 29. Aus diesen werden nach Abschnitt 3.2.4 die Dehngrenzen der Prüflinge bestimmt.

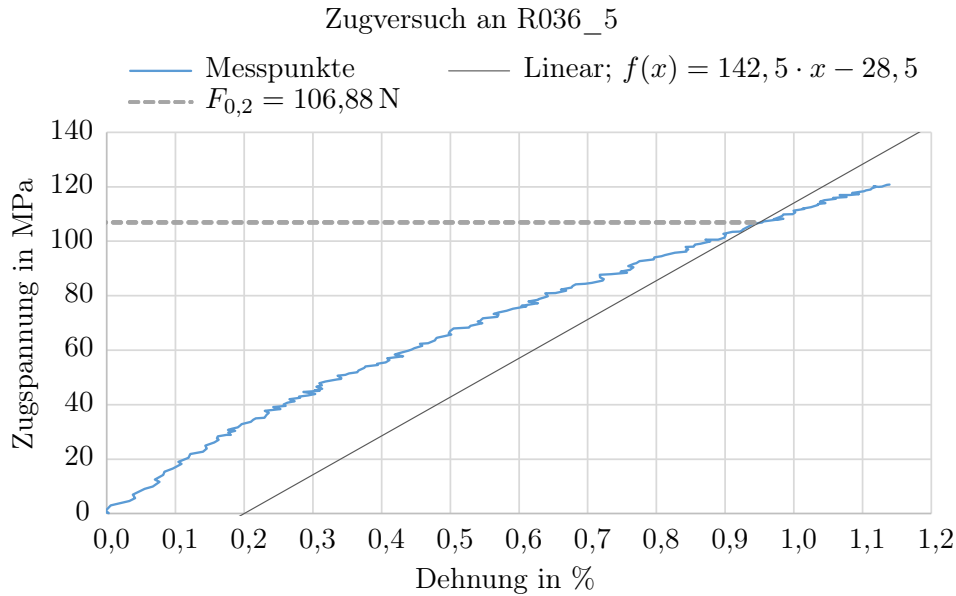


Abbildung 29: Messkurve des Zugversuchs an einem Prüfling der Probe *R036_5* im Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die gemessenen Zugfestigkeiten der Prüflinge ergeben eine gemittelte Zugfestigkeit R_m für das betrachtete Material:

$$R_m = (121 \pm 9) \text{ MPa} \quad , \quad R_{p0,2} = (91 \pm 9) \text{ MPa} \quad (4.13)$$

Die Zugfestigkeit der Einzelfaser liegt laut Hersteller bei 650 MPa. Das Faser-Matrix-Verhältnis wird bei 50 % angenommen. Im Gewebe liegt derselbe Anteil an Fasern längs und quer zur Zugrichtung. Bei reiner Aufnahme der Zugspannung durch die Längsfasern des Gewebes läge die zu erwartende Zugfestigkeit des NFK bei einem Viertel der Zugfestigkeit laut Hersteller und damit bei 162,5 MPa. Die Differenz von 41,5 MPa oder 34,3 % zur betrachteten Zugfestigkeit kann primär als Resultat der Welligkeit der Rovings gewertet werden. Hier entstehen dreidimensionale Spannungszustände im Material, da die Faserorientierung nicht in Richtung der eingebrachten Spannung liegt.

Aus den Spannungen und Dehnungen im elastischen Bereich der Zugversuche, wird mit Formel 3.7 der Elastizitätsmodul des Materials bestimmt:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = (12,7 \pm 1,0) \text{ GPa} \quad (4.14)$$

Die Bruchdehnung A beschreibt die Dehnung im Moment des Versagens und berechnet sich im Mittel für das Material zu:

$$A = (1,07 \pm 0,18) \% \quad (4.15)$$

Aus dem kumulierten Spannungs-Dehnungs-Diagramm aller Zugversuche am Flachsfaser-PA11-Material wird die Standardabweichung der Materialkennwerte deutlich, siehe Abbildung 30. Die Standardabweichung der Zugfestigkeiten liegt bei 7,4 %, bei der Dehngrenze liegt der Wert bei 9,9 %. Die Bruchdehnung wird mit einer Abweichung von absoluten 0,18 %-Dehnung und 16,8 % der beobachteten Bruchdehnung ermittelt.

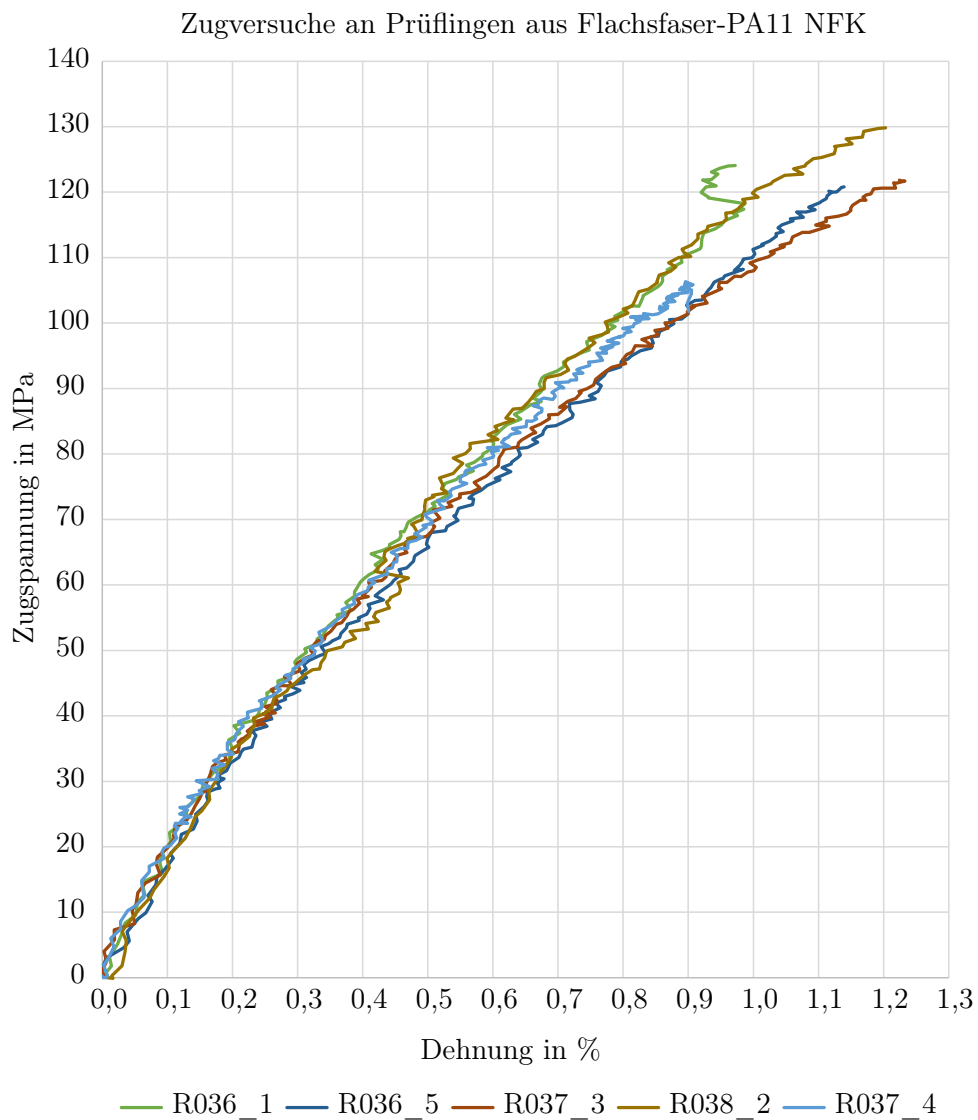


Abbildung 30: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Zugversuche an Flachsfaser-PA11 NFK

4.3.2 Proben PPFX u. PPHF

An den Prüflingen der Proben PPFX und PPHF werden ebenfalls Zugversuche durchgeführt. Beide Materialien zeigen nach einem kurzen steilen Anstieg der Spannung einen leicht abgeflachten, quasi-linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf. Aufgrund der geringen Dehngrenze der Polypropylene-Matrix von 23 MPa und den geringen Kohäsions- und Adhäsionsversagenskräften der bisherigen Versuche am Material, kann davon ausgegangen werden, dass im quasilinearen Bereich bereits Matrixfließen und -versagen vorliegt. Es wird vorrangig die Zugfestigkeit der Fasern geprüft, nicht die des Verbundwerkstoffs.

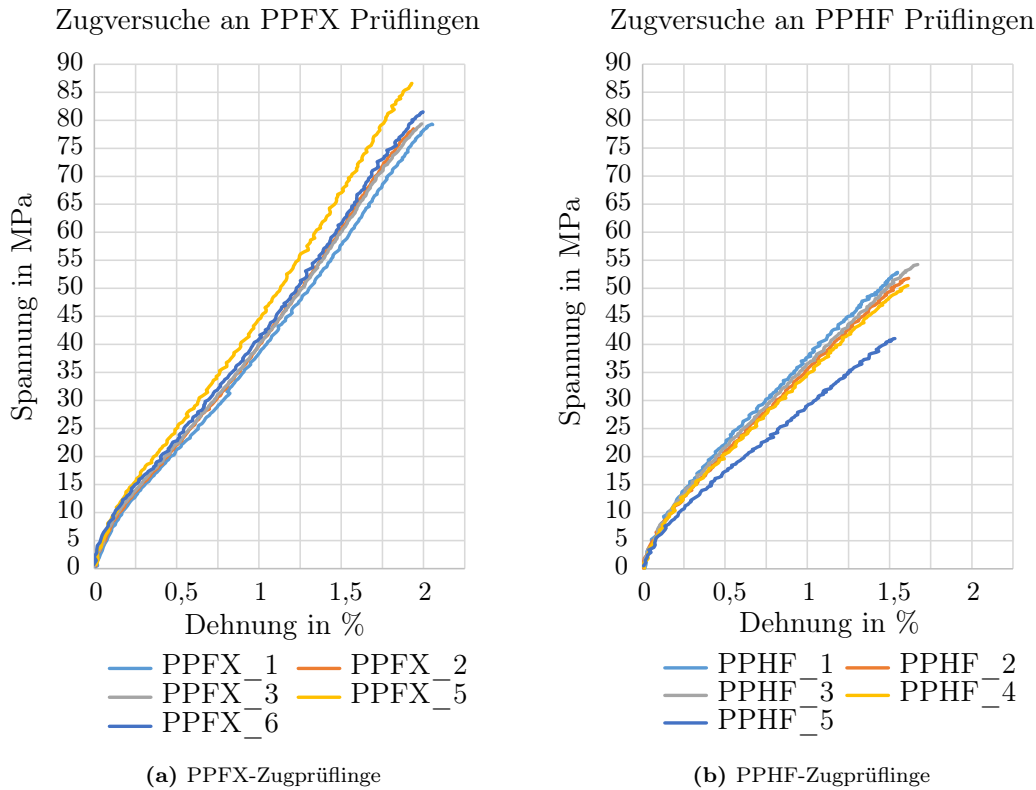


Abbildung 31: Spannungs-Dehnungs-Diagramme des Zugversuchs der Proben PPHF und PPFX, gekürzte Prüflingsbenennung; „PPFX_z_x_1“ → „PPFX_1“

Die ermittelte Zugfestigkeit R_m der Prüflinge liegt bei:

$$R_{m;PPFX} = (81 \pm 4) \text{ MPa} \quad , \quad R_{m;PPHF} = (50 \pm 6) \text{ MPa} \quad (4.16)$$

bei einer Bruchdehnung A von:

$$A_{PPFX} = (1,98 \pm 0,06) \% \quad , \quad A_{PPHF} = (1,60 \pm 0,06) \% \quad (4.17)$$

Der Elastizitätsmodul beträgt:

$$E_{PPFX} = (3,9 \pm 0,3) \text{ GPa} \quad , \quad (2,78 \pm 0,23) \text{ GPa} \quad (4.18)$$

Bei alleiniger Aufnahme der Zugfestigkeit durch die Längsfasern und angenommenem Faser-Matrix-Verhältnis von 50 %, ergeben die Zugfestigkeiten der Längs-Rovings von PPFX 324 MPa und von PPHF 200 MPa. Diese liegen um 60 % und 70 % unter den Literaturwerten der jeweiligen Einzelfasern, siehe Abschnitt 2.2.

4.4 Impact-Versuch

Die Impact-Versuche werden bei drei verschiedenen Energien; 2,5 J, 3,75 J und 5 J durchgeführt. Mit der Masse des Impact-Körpers $m_i = 596$ g, kann durch Umstellen der Formel 3.8 die benötigte Fallhöhe berechnet werden:

Tabelle 3: Benötigte Fallhöhe h für den Aufprall einer 596 g Masse mit entsprechender Impact-Energie E_{imp}

E_{imp}	2,5 J	3,75 J	5 J
h	0,428 m	0,641 m	0,855 m

Die tatsächliche Impact-Energie E_{imp} der Versuche wird, wie in Abschnitt 3.2.5 beschrieben, über die gemessene Kraft am Impact-Körper bestimmt, siehe Abbildung 32.

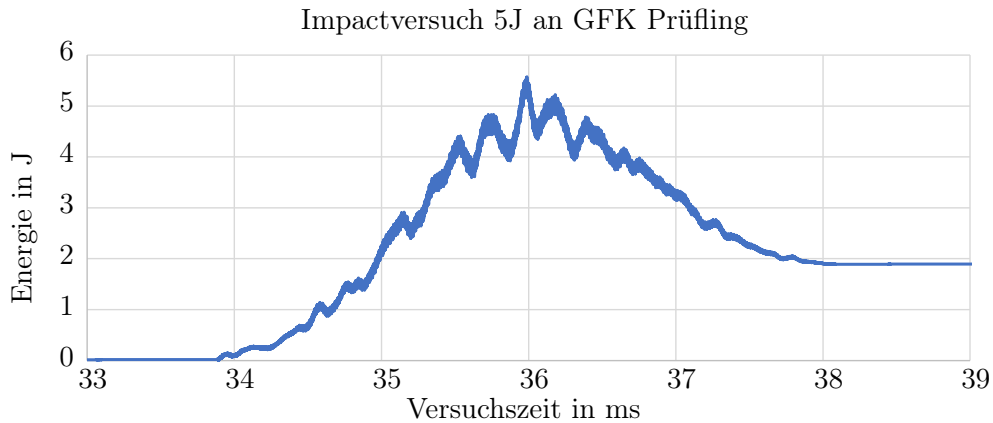


Abbildung 32: Verlauf der mechanischen Arbeit am Impact-Körper über die Versuchszeit des Impact-Versuchs mit 5 J an GFK

Im Energieverlauf treten Schwingungen mit Amplituden von bis zu 20 % der gemessenen Energie auf. Diese gehen auf Eigenschwingungen des Systems zurück, welche durch den Aufprall angeregt werden. Es handelt sich dabei vermutlich um die Eigenschwingung der Piezokraftmessdose, welche auf Basis minimaler Verformung funktioniert und somit zum Schwingen angeregt werden kann. Der Impact-Körper sowie die Impact-Vorrichtung besitzen ebenfalls Eigenschwingungen, welche Auswirkungen auf die Messdaten zeigen können. Die Eigenfrequenz der Impact-Prüflinge liegt deutlich unter der Frequenz der beobachteten Schwingung. Die Schwingungsperiode wird ermittelt, indem der Abstand zweier aufeinanderfolgender lokaler Maxima bestimmt wird. Dieser wird auf etwa 0,2 ms bestimmt, was einer Frequenz von 5000 Hz entspricht. Um den Energieverlauf um die Eigenschwingung zu bereinigen, werden die Mittelwerte der Energien über die Periodendauer von 0,2 ms gebildet und diese erneut über die Versuchszeit aufgetragen, siehe Abbildung 33; folgende Seite. Dieses Verfahren zur Glättung ist schnell und unaufwändig, bereinigt die Daten jedoch nicht vollständig um die Eigenschwingung. Hierfür wären eine detailliertere Schwingungsanalyse und digitale Bearbeitung der Versuchsdaten von Vorteil.

Aus den geglätteten Kurven werden die Differenzen der Energien vor und nach dem Aufprall ΔE_{imp} und hieraus die Energieaufnahme des Materials im Impact-Versuch bestimmt, siehe Tabelle 4; folgende Seite.

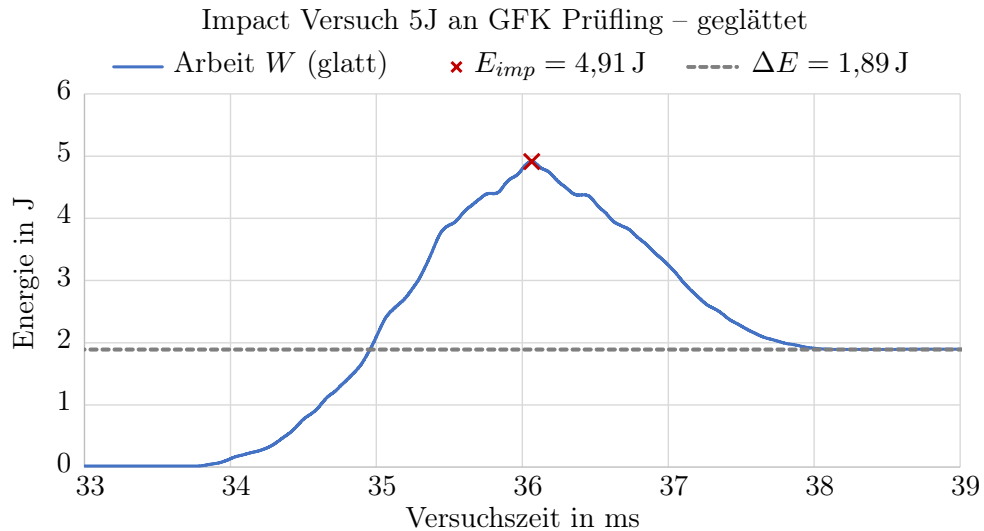


Abbildung 33: Verlauf der Mechanischen Arbeit am Impact-Körper über die Versuchszeit des Impact-Versuchs mit 5 J an GFK, geglättet über die Mittlere Energie von 0,2 ms

Tabelle 4: Impact-Energien E_{imp} und Energiedifferenzen ΔE_{imp} aus aufgenommenen Geschwindigkeiten vor und nach dem Aufprall mit unterschiedlichen Energien im Impact-Versuch verschiedener NFK-Prüflinge

Versuch	2,5 J			3,75 J			5 J		
Energie	E_{imp}	ΔE_{imp}	$\frac{\Delta E_{imp}}{E_{imp}}$	E_{imp}	ΔE_{imp}	$\frac{\Delta E_{imp}}{E_{imp}}$	E_{imp}	ΔE_{imp}	$\frac{\Delta E_{imp}}{E_{imp}}$
Glas	2,64 J	0,74 J	27,9 %	3,42 J	1,34 J	39,4 %	4,91 J	1,89 J	38,5 %
R034*	2,34 J	1,41 J	60,5 %	3,35 J	2,25 J	67,2 %	4,40 J	3,23 J	73,4 %
PPFX	1,31 J	0,84 J	63,8 %	3,47 J	2,68 J	77,3 %	4,49 J	3,77 J	84,0 %
PPHF**	1,12 J	0,77 J	68,4 %	3,43 J	3,07 J	89,5 %	4,32 J	4,24 J	98,2 %

* 3,75 J-Versuch mit Prüfling aus R035

** 5 J-Versuch; Materialdurchschlag

Bei den 2,5 J-Versuchen an PPFX und PPHF wird eine Impact-Energie gemessen, welche etwa der Hälfte der eingestellten Energie entspricht. Möglicherweise wurde der Impact-Körper in den Versuchen am freien Fall gehindert. Die Energiedifferenz zu den erwarteten 2,5 J entspricht einer Geschwindigkeitsdifferenz von etwa $0,5 \text{ m s}^{-1}$, Formel 3.9. Diese könnte durch ein Mitschleppen der Auslösevorrichtung (händisch gekapptes Kabel) oder durch starke Reibung am Fallturm hervorgerufen worden sein.

Die gemessene Energie ist etwas geringer als die tatsächliche Energie des Impact-Körpers, da die Kraftmessdose hinter der Impact-Spitze sitzt. Die Masse der Impact-Spitze aus Stahl von 40 g, wirkt somit nicht mit auf die Kraftmessdose, jedoch ebenfalls auf den Impact-Prüfling. Die vom Prüfling aufgenommene Energie ist somit etwas höher als berechnet. Bei der Masse der Impact-Spitze handelt es sich um 6,7 % der Gesamtmasse des Impact-Körpers, dieser Effekt wird vernachlässigt.

Die relativen Energiedifferenzen der Versuche werden über die bestimmten Impact-Energien aufgetragen, siehe Abbildung 34. Hier lässt sich eine linear steigende Energieaufnahme der Materialien bei steigender Impact-Energie verzeichnen. Die GFK-Prüflinge

folgen als einzige Probe nicht diesem Trend, hier bleibt die relative Energieaufnahme bei einer Erhöhung der Impact-Energie von 3,75 J auf 5 J etwa gleich.

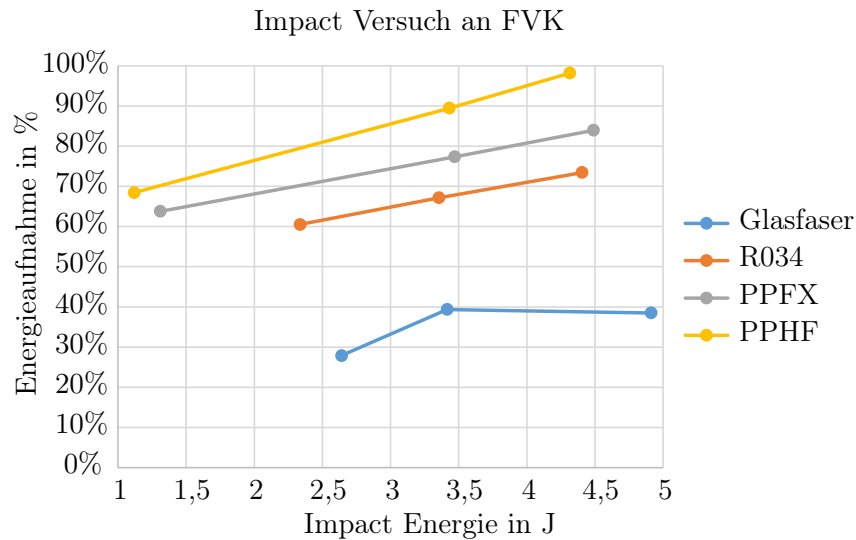


Abbildung 34: Energieaufnahme verschiedener FVK im Impact-Versuch mit unterschiedlichen Energien

Im Computertomografie-Scan in Richtung der Probenbreite wird der Impact-Schaden an den Prüflingen des DLR-Materials deutlich, siehe Abbildung 35. Fasern und Matrix sind als helle Flächen zu erkennen, Luft, also Poren, Risse oder Spalte zwischen delaminierten Gelegesichten erscheint dunkel. Bei den DLR-intern gefertigten Prüflingen ist bei einer Impact-Energie von 2,34 J ein Riss in den untersten Laminatschichten erkennbar. Er zieht sich durch etwa die halbe Materialdicke. Im Impact-Versuch mit 3,35 J tritt ein Riss durch den kompletten Querschnitt auf. Der Impact-Versuch mit 4,4 J führt zu einer Materialverformung über die gesamte Prüflingsbreite um ca. 1 mm oder 33 % der Probendicke und einem deutlichen Riss durch alle Gelegesichten. In der Betrachtung entlang der Prüflingslänge erstreckt sich der Riss etwa 20 mm um das Impact-Zentrum (Abb. 36a), in Richtung Prüflingsbreite hat der Riss eine Länge von etwa 15 mm. Die Risse treten entlang der zwei Faserrichtungen 0 °C und 90 °C auf (Verdeutlichung Anhang Seite ix; Abb. 46).

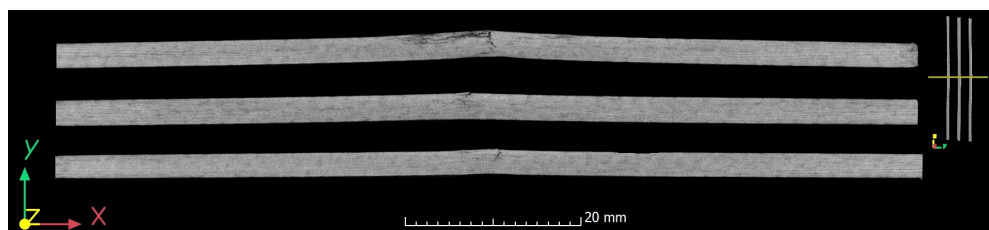


Abbildung 35: CT-Querschnitt der Impact-Prüflinge aus R034/5 in XY-Orientierung

Die Impact-Zentren der Prüflinge der drei NFK-Proben werden im CT in Richtung der Probenlänge betrachtet, siehe Abbildung 36. Der PPFX-Prüfling zeigt bei 1,31 J ebenfalls Risse in den untersten Laminatschichten, eine leichte Materialeindellung an der Stelle des Impacts und eine Materialverformung über die gesamte Prüflingslänge. Diese ist bei 3,47 J deutlich ausgeprägt und entspricht ca. 3,3 mm oder 165 % der Materialdicke.

Bei 4,49 J liegt die Verformung bei etwa 4,5 mm oder 225 % der Materialdicke. Die Verformung zieht sich über die gesamte Prüflingslänge. Delamination, begrenzt auf etwa 27 mm um das Impact-Zentrum ist zu erkennen.

PPHF zeigt bei 1,12 J eine ähnliche Eindellung wie PPFX. Bei 3,43 J ist Delamination 37,5 mm um das Impact-Zentrum zu erkennen. Die Gelegeschichten delaminieren und reißen in Querrichtung. Im Impact-Versuch bei 4,32 J wird der Prüfling aus PPHF durchgeschlagen. Der Durchschlag ist im CT-Scan zu erkennen. Hier kommt es zu keiner weitreichenden Delamination der Gelegeschichten außerhalb des Durchbruchdurchmessers von 31 mm.

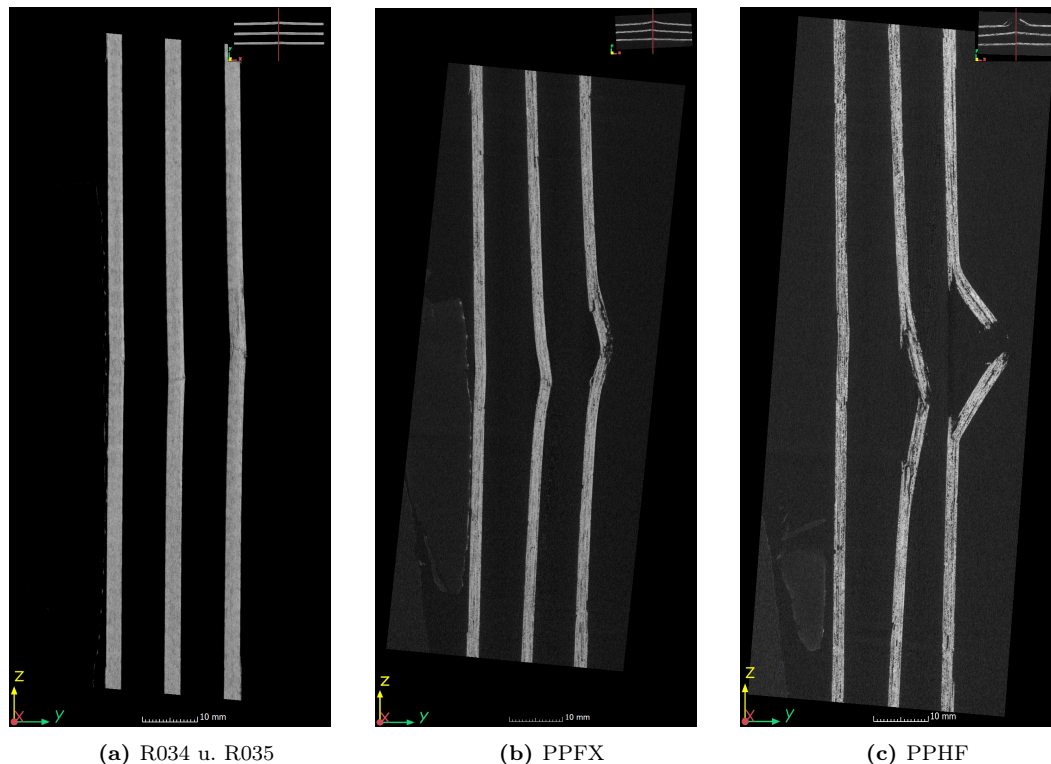


Abbildung 36: CT-Querschnitt der Prüflinge aus *R034/5*, PPFX und PPHF durch das Impact-Zentrum nach Impact-Versuch mit 2,5 J (je links, real ca. 1,3 J bei PPFX und PPHF), 3,75 J (je mittig) und 5 J (je rechts), in Längsrichtung (lange Seite), Skala 10 mm

Deutlich wird im CT-Scan, dass die Materialprobe PPHF eine Vielzahl an Poren aufweist. Zur Untersuchung werden die CT-Scans im Programm ImageJ zunächst auf eine schwarz-weiß-Darstellung reduziert. Der Schwellenwert für weiße Flächen wird bei 33 % Sättigung gesetzt (Verdeutlichung Anhang Seite ix; Abb. 47). Die Analyse der schwarzen und weißen Pixel innerhalb der Prüflinge, aber außerhalb der Impact-Zonen ergibt eine Porosität von etwa 8,5 %. Für Probe PPFX liegt die so ermittelte Porosität bei 2,6 %. Bei den untersuchten GFK- und DLR-internen Proben ist auf diese Weise keine Porosität festzustellen.

Neben runden Poren, welche auf Luft einschüsse während des Pressprozesses zurückgehen, werden im CT ebenfalls Rechteckige „Kanäle“ sichtbar, siehe Abbildung 37b; folgende Seite. Diese werden durch Lücken zwischen den Rovings des Gewebes erzeugt, siehe Abbildung 37a. Die Kanäle ziehen sich teilweise über die gesamte Prüflingsbreite. Sie stellen Fehlstellen dar, welche ungleichmäßiges Versagen der Prüflinge bedingen und damit die untersuchten Materialkennwerte streuen lassen.

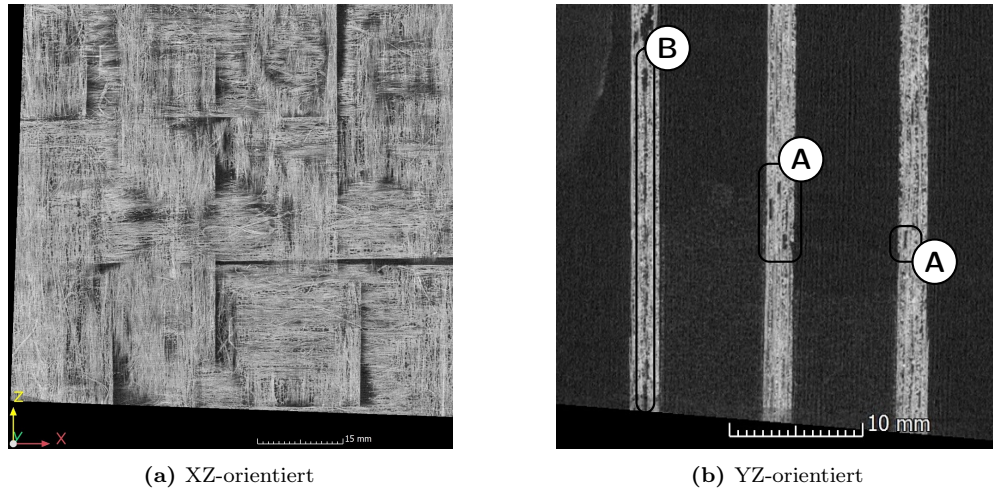


Abbildung 37: Lücken zwischen den Rovings des Gewebes der PPHF Probe im CT, (A) Roving-Lücken quergeschnitten, (B) Roving-Lücke längsgeschnitten, Skala links 15 mm

Die GFK-Prüflinge zeigen keine Veränderung der Oberfläche. Auch im CT-Scan ist keine Delamination erkennbar (verdeutlicht im Anhang Seite vi; Abb. 42). Die optische Durchlässigkeit der Epoxid-Matrix, macht kleinste Matrixrisse und Matrix-Faser-Ablösungen sichtbar. In sogenannten „Weißrissen“ wird das Licht im kleinsten Matrixspalt gefangen und reflektiert, wodurch die Risse weiß erscheinen. Bei Gegenlicht tritt kein Licht durch die Risse, sie erscheinen dunkel siehe Abbildung 38. Die Risse lassen sich bei der gewählten Auflösung des CT-Scans nicht erkennen.

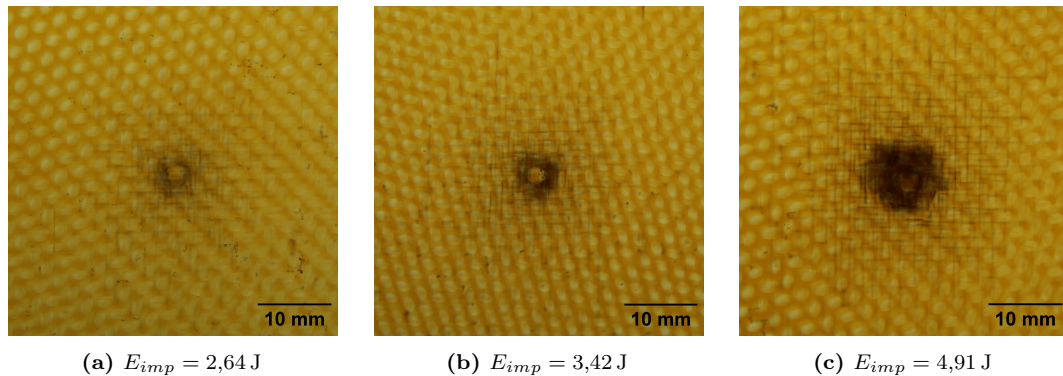


Abbildung 38: Impact-Schaden an GFK-Prüflingen

Bei erhöhter Impact-Energie tritt eine Vergrößerung des Bereichs der Weißrisse auf. Das Matrixmaterial versagt in einem größeren Bereich und nimmt dabei mehr Energie auf. Die vom Impact-Versuch beschädigten Bereiche werden, unterteilt in das Schadenszentrum und das äußerste Auftreten von Weißbruch (Einflussbereich), vermessen, siehe Tabelle 5. Eine Faserschädigung ist nicht erkenntlich. Dies bedingt die Energieaufnahme des Materials von maximal 39,4 % in den durchgeführten Versuchen.

Tabelle 5: Durchmesser (Dm.) des Schadens an GFK im Impact-Versuch

Versuchsenergie	2,64 J	3,42 J	4,91 J
Dm. Zentrum	$(4,9 \pm 0,5) \text{ mm}$	$(5,9 \pm 0,2) \text{ mm}$	$(9,3 \pm 0,6) \text{ mm}$
Dm. Einflussbereich	$(18 \pm 2) \text{ mm}$	$(23 \pm 2) \text{ mm}$	$(31 \pm 2) \text{ mm}$

5 Diskussion

5.1 Allgemein

Die erhobenen Materialkennwerte ermöglichen einen Vergleich der verschiedenen faserverstärkten Kunststoffe untereinander und somit eine Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten der bio-basierten, faserverstärkten Kunststoffe. Ein breites Einsatzgebiet der NFK-Werkstoffe, insbesondere in von klassischen FVK dominierten Bereichen ist eine Möglichkeit der ökologischen Transformation von Produkten und Produktionen. Das untersuchte Flachsfaser-Polyamid-11-Material kann als DLR-interner Stand der Technik verstanden werden und wird mit ebenfalls DLR-internem GFK auf dem Stand der Technik verglichen. Die Zuliefermaterialien auf Basis von Polypropylene und Flachsfaser stellen eine mögliche Quelle von Gelegematten oder konsolidiertem NFK für das DLR dar.

5.2 Betrachtung des DLR-Laminats und GFK

Das untersuchte Flachsfaser-PA11-Material (im Folgenden „(DLR-) Material“ genannt) hat bei selbem Volumen eine um 35 % geringere Masse als das GFK-Vergleichsmaterial. Die Zugfestigkeit des Materials liegt mit 25,2 % deutlich unter der des GFK. Die Dehngrenze erreicht ledig 18,9 % der Zugfestigkeit des GFK. Die aus dem Laminataufbau rekonstruierte Zugfestigkeit der einzelnen Rovings liegt bei zwei Dritteln der Zugfestigkeit der Einzelfaser, was bei der beobachteten Welligkeit plausibel erscheint. Für primär auf Zug belastete GFK-Bauteile stellt das Material nur bedingt eine Alternative dar. Hier wäre eine 4-fache Wandstärke notwendig um dieselben Lasten aufzunehmen, was eine 2,5-fache Bauteilmasse bedeuten würde. Dies ist in Bereichen der Luft- und Raumfahrt undenkbar und auch im Verkehrswesen nicht zu etablieren. Andererseits stellt Zugbelastung nur einen Teil der Lasten auf die meisten FVK-Bauteile dar. Der Einsatz in rein zugbelasteten Bauteilen ist unwahrscheinlich. Das Material ist mit einem E-Modul von 12,7 GPa etwas weniger als halb so zugsteif wie der GFK, bei selber Last ist mit etwa doppelter Dehnung des NFK-Bauteils zu rechnen, welche sich jedoch lediglich bis zur Bruchdehnung von $(1,07 \pm 0,18) \%$ erstreckt. GFK erreicht hier das etwa Dreifache.

Die Biegefestigkeit des Materials liegt bei einem Viertel der Biegefestigkeit des betrachteten GFK. Da die Materialdicke quadratisch in die Berechnung der Biegespannung eingeht, wäre hier eine Verdickung um das Doppelte nötig um dieselben Biegebelastungen aufzunehmen. Dies entspräche einer um das 1,3-fachen Masse desselben Bauteils aus GFK. Für primär biegebelastete GFK-Anwendungen, die eine Verdopplung der Wandstärke und die Erhöhung der Masse um ein Drittel erlauben, ließe sich das Material unverändert einsetzen.

Die Aufnahme von Schubkräften erfolgt zunächst gleichmäßig über den Querschnitt. Die Anisotropie des Materials; Matrix-Materialansammlungen und Bereiche unterschiedlicher Schubmodule führen bei höherer Last zu ungleicher Dehnungsverteilung im Querschnitt. Die Ausbreitung der Bereiche maximaler Dehnung und die resultierenden Risse treten meist in querliegenden Rovings auf. Trotz der Anisotropie des Laminats, zeigt das Material mit 3,3 % eine geringe Standardabweichung in der ermittelten Scherfestigkeit. Sie liegt bei 41 % der Scherfestigkeit des GFK.

Die Impact-Versuche zeigen eine deutlich höhere Energieaufnahme des Materials gegenüber GFK, jedoch auch eine höhere Beschädigung. Bei einer Impact-Energie von

etwa 2,5 J nimmt das Material mit 1,41 J etwa die doppelte Energie auf, wie der GFK, während eine minimale Schädigung der untersten Laminatschichten zu beobachten ist. Dies deutet auf sehr gute Dämpfungseigenschaften des Materials im Gegensatz zu GFK hin. Durch die Energieaufnahme kommt es gleichzeitig zu Beschädigungen, welche im Inneren des Bauteils liegen können und von Seiten des Impacts schwer bis nicht zu erkennen sind. Diese erstreckt sich auf Fasern und Matrix, nicht wie bei GFK auf die Matrix allein. Bei erhöhter Impact-Energie steigt auch das Schadensausmaß, während die prozentuale Energieabsorption proportional zur Impact-Energie steigt. Der beobachtete Schadensradius liegt dabei mit 15 mm bis 20 mm unter dem Ausbreitungsradius der Weißrisse im GFK von (31 ± 2) mm. Bei der betrachteten Wandstärke kann der GFK deutlich höhere Energien aufnehmen bevor es zu einem Faserversagen kommt. Ein Vergleich der Schadensmuster bei einer Impact-Energie von 20 J bis 30 J mit den Versuchen am DLR-Material bei 5 J könnte Aufschluss über Unterschiede und Parallelen im makroskopischen Materialversagen der beiden Lamine bieten.

5.3 Vergleich mit PPFX

Das PPFX-Laminat weist eine Dichte von 71 % des DLR-internen Materials auf. Eine um ein Drittel höhere Wandstärke des PPFX-Laminats würde also zu einer geringfügig höheren Bauteilmasse führen wie die eines Bauteils aus dem betrachteten DLR-Material.

Die Biegefestigkeit liegt bei 38 %, die Fließgrenze unter Biegung bei nur 23 % der Kennwerte des DLR-Materials. Auch hier wäre also eine Erhöhung der Wandstärke um mindestens das Doppelte nötig um dieselben Biegebelastungen bei rein elastischer Verformung aufzunehmen. Dies würde zu einer 1,4-fachen Bauteilmasse führen. Im Gegensatz zum DLR-Material mit einem spröden Materialversagen, versagt PPFX bei der Biegung fließend.

Die 5-Punkt Schubversuche am PPFX-Laminat zeigen Standardabweichungen von je über 14 % der ermittelten Scherfestigkeit und dem berechneten Schubmodul. Hier wird eine ausgeprägte Anisotropie des Materials deutlich, welche sich im DIC visualisieren lässt. Bereiche maximaler Dehnung treten punktuell an vermuteten Fehlstellen oder Poren auf und breiten sich entlang der Laminatschichten aus. Die Scherfestigkeit des PPFX-Laminats liegt bei 28 % der Scherfestigkeit des DLR-Materials.

Im Bereich der Zugfestigkeit kann das PPFX-Laminat mit dem DLR-Material mithalten. Hier liegt die Zugfestigkeit um ein Drittel unter der des DLR-Materials, was in etwa dem Dichtenunterschied entspricht. Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass die Dehngrenze des PPFX-Laminats deutlich tiefer liegt. Diese kann nicht bestimmt werden, da keine lineare Steigung der Spannung zu Beginn des Zugversuchs identifiziert wird. Grund hierfür liefern die geringe Fließgrenze und der niedrige E-Modul des Matrixwerkstoffs, sowie die hohe Porosität welche Dehnungen zulassen, bevor die Last in die Verstärkungsfasern eingeleitet wird.

Der Impact-Versuch zeigt Materialversagen von einem Riss in den untersten Laminatschichten, bis zum vollständigen Riss 27 mm um das Impact-Zentrum. Die Laminatdicke der PPFX Proben liegt um ein Drittel unter der des DLR-Materials, gleichzeitig wurde im 2,5 J-Impact-Versuch an PPFX mit um ein Drittel geringerer Impact-Energie getestet. Die querschnittsspezifische Energieeinwirkung auf den Prüfling ist somit vergleichbar. Dies spiegelt sich auch in den Schadensmustern wieder. Beide Prüflinge zeigen Risse in den untersten Laminatschichten, jedoch keine durchgehenden Risse. Mit 63,8 % der Impact-Energie von 1,31 J nimmt der PPFX-Prüfling einen um 3,3 % höheren Anteil

der Energie auf. Es tritt gleichzeitig eine höhere Verformung des gesamten Prüflings auf. Mit $1,47 \text{ J mm}^{-1}$ liegt die querschnittsspezifische Impact-Energie des 5-J-Versuchs am DLR-Material zwischen den querschnittsspezifischen Impact-Energien der Versuche 2,5 J und 3,75 J am PPFX. Das Versagensmuster, vollständiger Riss des Querschnitts bei leichter Eindellung im Impact-Bereich, lässt sich ebenfalls zwischen den Schadensmustern der Versuche am PPFX-Laminat einordnen. Selbes gilt für die Energieaufnahme von 73 %. Das Verhalten der Lamine im Impact-Versuch ist vornehmlich abhängig von der Querschnittsdicke. Für einen direkteren Vergleich der Lamine sollten weitere Versuche bei selber Materialdicke durchgeführt werden. Die höhere Gesamtverformung und Energieaufnahme der PPFX-Prüflinge deutet auf leicht erhöhte Dämpfungseigenschaften gegenüber dem DLR-Material hin. Diese lassen sich durch höhere Porosität und plastische Verformung durch Matrixfließen bei geringeren Impact-Energien erklären.

5.4 Vergleich mit PPHF

Mit $0,81 \text{ g/cm}^3$ liegt die Dichte des PPHF-Laminats bei 62 % des DLR-Materials. Eine Wandstärkenverdickung um ein Drittel würde also zu einer geringfügig geringeren Masse führen, verglichen mit der Masse desselben Bauteils aus DLR-Material. Die Kennwerte des PPHF-Laminats liegen in allen Bereichen unter denen des PPFX-Laminats.

Die Biegefestigkeit liegt bei 41 %, die Fließgrenze unter Biegung bei 20 % des Kennwerts des DLR-internen Materials. Um dieselbe Biegelast ohne Überschreiten der Fließgrenze aufzunehmen, wäre eine 2,24-fache Wandstärke vonnöten, was ebenfalls zu einer etwa 1,4-fache Masse führt. PPHF versagt im Biegeversuch fließen, wobei einzelne Faserrisse im Spannungs-Dehnungs-Verlauf zu erkennen sind. Die Biegefestigkeit und Fließgrenze unter Biegung unterliegen einer hohen Standardabweichung von 17 % und 23 %.

Im 5-Punkt Schubversuch zeigen die Prüflinge aus PPHF eine sehr hohe Streuung der ermittelten Kennwerte. Die Standardabweichung der Scherfestigkeit liegt bei 30 %, die des Schubmoduls bei 23 %. Per DIC ist eine frühe Delamination der Laminatschichten zu beobachten. Bereiche maximaler Dehnung treten an Fehlstellen auf und breiten sich entlang der Laminatschichten ungestörter aus, als es bei PPFX beobachtet wird. Die Scherfestigkeit liegt bei 22 % der Scherfestigkeit des DLR-Materials.

Das Verhalten von PPHF im Zugversuch ähnelt dem von PPFX bei 62 % der Zugfestigkeit und einer Standardabweichung von 12 %. Auch hier kann keine Dehngrenze ermittelt werden. Die Zugfestigkeit beträgt 41 % der Zugfestigkeit des DLR-Materials. Die aus dem Materialaufbau überschlagene Zugfestigkeit der Rovings liegt unter Einbeziehung der ermittelten Porosität bei 40 % des Literaturwerts der Einzelfaser.

Im Impact-Versuch nimmt das PPHF-Laminat von den betrachteten Proben am meisten Energie auf. Die Schäden am Laminat sind bei gleicher Impact-Energie ausgeprägter als bei den PPFX-Prüflingen. Bei einer Impact-Energie von 3,4 J tritt Delamination im Bereich 37,5 mm um das Impact-Zentrum auf. Es sind Faserbrüche zu erkennen, welche vergleichbar mit dem Impact-Versuch bei 4,49 J am PPFX sind. Die prozentuale Energieaufnahme der NFK wird als proportional zur absoluten Impact-Energie beobachtet. Aufgenommen wird die Energie vom Matrixwerkstoff durch plastische Verformung und Materialversagen, sowie dem Faserwerkstoff, welcher bei steigender Energie eine erhöhte Anzahl Faserrisse aufweist.

5.5 Verbesserungs- und Ausweitungsmöglichkeiten der Untersuchung

Aufgrund der Anisotropie der NFK-Lamine, sollten die Kennwerte auch bei anderen Materialstärken untersucht werden. Eine ausschließlich lineare, oder im Fall der Biegefestigkeit quadratische, Abhängigkeit, wie sie in der bisherigen Betrachtung angenommen wird kann nicht garantiert werden. Die Standardabweichungen der Materialkennwerte fallen hoch aus. Bei Kennwertwerten wie der Dehngrenze und der Fließgrenze unter Biegung, welche auf der Bestimmung der Steigung linearer Bereiche im Spannungs-Dehnungs-Diagramm basieren, sind die Abweichungen mit 9,9 % und 7,7 % des DLR-Materials besonders hoch. Für eine genauere Bestimmung der Kennwerte wären Prüfkampagnen mit höheren Prüflingszahlen von Interesse.

Deutlich höher sind die Standardabweichungen der Kennwerte bei den Zuliefermaterialien PPFX und PPHF. Bei PPFX bewegen sie sich für die Biegefestigkeit, Fließgrenze unter Biegung, Scherfestigkeit und das Schubmodul um 14 %, bei PPHF liegen die Standardabweichungen bei 17,0 % bis 29,6 % der jeweiligen Kennwerte. Diese hohen Standardabweichungen können vordergründig nicht durch die geringe Anzahl an Prüflingen erklärt werden. Hier liegt eine sehr hohe Streuung der Kennwerte einerseits durch die Gewebestruktur vor. Die erhöhte Roving-Breite verhindert, dass in den Versuchen zuverlässig eine gleichmäßig verteilte Anzahl an Quer- und Längsfasern im untersuchten Querschnitt vorliegt. Die Kennwerte sind abhängig von der Orientierung des Schnittmusters der Prüflinge auf der Gesamtprobe. Andererseits kann die Porosität aufgrund mangelhafter Verarbeitungsqualität der Lamine als Einflussfaktor auf die hohen Standardabweichungen gewertet werden.

Durch die Untersuchungen dieser Arbeit wurden einige Bereiche des Materialverhaltens aufgegriffen, jedoch nicht vollständig beleuchtet. Diese bedürfen weiterführender Untersuchungen. Während der 3-Punkt Biegeversuche in Abschnitt 4.1.1, wurde eine mögliche Scherverzähung des Materials beobachtet. Die Biegefestigkeit eines Prüflings, welcher bei doppelter Prüfgeschwindigkeit getestet wurde, lag um 11,5 % über dem Durchschnitt von $(145,7 \pm 2,3)$ MPa. Eine Untersuchung weiterer Prüflinge bei unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten, könnte relevant für die weitere Charakterisierung der Scherverzähung des Materials sein. Dieser Effekt hätte starke Auswirkungen auf das Impact-Verhalten des Materials bei unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten. Eine ausgedehnte Impact-Versuchskampagne mit Versuchen bei gleichbleibenden Energien und variierten Impact-Geschwindigkeiten könnte Aufschluss über das Materialverhalten bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten geben. Die Betrachtung des Materialverhaltens bei reiner Druckbelastung wurde nicht beleuchtet. Im Biegeversuch wird das für Faserverbundwerkstoffe typische Faser-Kinking im Druckbereich beobachtet. Eine genauere Untersuchung in Druckversuchen könnte Aufschluss über die Belastungsgrenzen vor dem Auftreten geben.

Einen weiteren Forschungsbereich stellt die Vorbehandlung der Naturfasern vor der Konsolidierung der Lamine dar. Hier bestehen Ansätze zur Steigerung der Faser-Matrix-Anbindung, welche beim betrachteten Material als mögliche Schwachstelle identifiziert wurde. Des Weiteren besitzen Naturfasern in der Regel eine hohe Feuchtigkeitsaufnahmefähigkeit, welche durch entsprechende Vorbehandlung reduziert werden könnte. Die Feuchtigkeitsaufnahme des Materials dürfte ebenfalls Einfluss auf die Materialkennwerte haben. Untersuchungen in diesem Bereich werden parallel von der BGF durchgeführt. Erste Versuche zeigen leicht verringerte Zugfestigkeiten durch die Klimatisierung bei einer Luftfeuchtigkeit von 85 %, insbesondere bei gleichzeitiger Temperaturerhöhung auf 80 °C. Neben der Feuchtigkeitsaufnahme besteht die Problematik der Brennbarkeit.

Ohne spezielle Vorbehandlung der Fasern besteht eine Brandgefahr der NFK, welche insbesondere vor einer möglichen Anwendung in der Luftfahrt negiert werden muss.

5.6 Fazit

Zusammengefasst bestehen bei der Verwendung von NFK als Alternative zu GFK Hürden, welche es maßgeblich im Bereich der Faserbehandlung zu überwinden gilt. Diese zielen auf die Feuchtigkeitsaufnahme, Brandgefahr aber auch die Faser-Matrix-Anbindung ab. Die Materialkennwerte des am DLR gefertigten NFK sind in Anbetracht der geringeren Dichte vergleichbar mit den Kennwerten des GFK im Bereich der Biege- und Schubbelastung. In reiner Zugbelastung schneidet das Material aufgrund der geringeren Zugfestigkeit der Einzelfaser schlecht ab. Der Impact-Versuch zeigt eine höhere Energieaufnahme und damit erhöhte Dämpfung des Materials, jedoch mit begleitender Faserschädigung. Die Kennwerte der untersuchten Zuliefermaterialien liegen unter denen des DLR-Materials. Durch erhöhte Porosität weist das Laminat Fehlstellen auf, welche in den unterschiedlichen Prüfverfahren zu Materialversagen bei vergleichsweise geringen Lasten führen. Eine interne Fertigung des PPFX NFK unter den Fertigungsbedingungen des untersuchten DLR-Materials könnte zu deutlich besseren Ergebnissen führen. Das PPHF weist höhere Standardabweichungen und geringere Kennwerte auf, was neben der Fertigungsqualität auf die Faserfestigkeit und -orientierung im Material zurückzuführen ist. Sollten keine Vorteile bei der Verfügbarkeit oder den Kosten des Hanffasermaterials vorliegen, kann von einer Verwendung gegenüber dem Flachsfasermaterial abgesehen werden.

5.7 Ausblick

Die Verwendung von NFK als direkte und verlustfreie Alternative zu mechanisch belastetem GFK bedarf einer Verbesserung der Materialeigenschaften oder ist durch eine Erhöhung der Wandstärke bei moderater Erhöhung der Masse möglich. In Bereichen wie dem Schienenverkehr oder statischen Anwendungen könnte dies eine Möglichkeit darstellen. Weitere Ansätze zur Verstärkung des NFK wie die „powerRibs“ von Bcomp stellen ebenfalls Möglichkeiten dar, den Einsatzbereich des Materials zu vergrößern. Ein bisher nicht betrachteter Ansatz zur Verwendung von NFK liegt in der Sandwich-Bauweise. Hierbei werden zwei Laminatplatten auf einen leichten aber steifen Kern, beispielsweise aus biobasiertem polyurethan-Hartschaum, fixiert. Durch die Verschiebung der NFK-Lamine nach außen, können hohe Biegesteifigkeiten erreicht werden, das Laminat wird jedoch stärker auf Zug und Druck belastet und weniger auf Biegung. Gleichzeitig unterstützt der Hartschaum durch die Flächenpressung gegen das Ausbrechen des Laminats nach innen, sollte es zu Impact-Belastungen kommen. Durch diese Sandwich-Bauweise lassen sich leichte, steife Bauteile fertigen, welche zum Einsatz kommen können, wo eine hohe Wandstärke kein Problem darstellt. Bei diesen Anwendungen können durch erhöhte Wandstärke ebenfalls niedrigere Materialkennwerte des NFK ausgeglichen werden. Die untersuchten Zuliefermaterialien könnten auf diese Weise ebenfalls Anwendung finden.

6 Zusammenfassung

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) finden in vielen unterschiedlichen Industrien Anwendung. Sie existieren in Form von Spritzguss- oder Formpressbauteilen mit Kurzfaserverstärkung oder bei höheren mechanischen Anforderungen als Lamine. Konventionelle FVK beinhalten kohlestoffaserverstärkte Kunststoffe und Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK). Beide Faserarten der Leichtbau-Werkstoffe benötigen bei der Produktion große Mengen Energie, welche pro Kilogramm Faserwerkstoff über der benötigten Energie von Stahl liegen. Auch die Verwertung der Verbundwerkstoffe nach erreichter Lebensdauer stellt eine Problematik dar. Als Matrixwerkstoff werden meist duroplastische Epoxid-Harze verwendet. Recycling-Verfahren befinden sich in der Entwicklung, sind aber aktuell nicht verfügbar. Alternative FVK auf natürlicher Basis finden im Bereich der Kurzfaserverstärkung bereits breite Anwendung. Die Verwendung von Laminen aus bio-basierten, faserverstärkten Kunststoffen in Form von Geweben aus Langfasern wird ebenfalls in einzelnen Industrieprodukten erprobt. Diese FVK bieten erhebliche ökologische Vorteile in der Produktion und der Verwertung. Als Matrixwerkstoff werden thermoplastische Kunststoffe wie Polyamid-11 (PA11) eingesetzt, welcher ebenfalls auf natürlicher Basis hergestellt wird.

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Stuttgart wurde ein FVK aus Flachsfasergewebe und PA11 im Warmpressverfahren bei hohem Druck gefertigt. Dieser wurde mit einem GFK auf dem aktuellen Stand der Technik und zwei FVK-Laminen auf Flachs- und Hanffaserbasis eines potentiellen Zulieferers verglichen. Als relevante Materialeigenschaften wurden die Dichte des Materials und der makroskopische Aufbau mit qualitativer Betrachtung von Fehlstellen und Poren untersucht. Die Materialkennwerte wurden aus den Prüfverfahren 3-Punkt Biegeversuch, 5-Punkt Schubversuch, Zugversuch und Impact-Versuch ermittelt. Eine Betrachtung des Materialversagens fand während der 5-Punkt- und Zugversuche per digitaler Bildkorrelation statt. Nach den Prüfverfahren wurden die Versagensstellen unter dem optischen Mikroskop untersucht und im Fall der Impact-Proben in der Computertomografie (CT) gescannt.

Die CT-Scans zeigen eine hohe Porosität der Zuliefermaterialien, insbesondere des Hanffaserverbunds mit 8,5 %. Diese spiegelt sich in der geringen Dichte der Laminatproben wieder. Ohne beobachtete Poren liegt die Dichte des am DLR gefertigten FVK mit $1,3 \text{ g/cm}^3$ bei 65 % der Dichte des Glasfaserverbunds. Die Materialkennwerte des DLR-internen Materials liegen unter denen des (GFK). Durch die geringere Dichte führt eine Erhöhung der Wandstärke zur Aufnahme höherer Lasten verglichen mit dem GFK-Werkstoff nicht zu deutlich höheren Massen. Die Zugfestigkeit liegt mit $R_m = (121 \pm 9) \text{ MPa}$ bei etwa einem Viertel der Zugfestigkeit vom GFK. Eine 4-fache Wandstärke zur Aufnahme derselben Zuglast bis zum Bruch würde zu einer 2,5-fachen Masse führen. Die Dehngrenze liegt mit $R_{p0,2} = (91 \pm 9) \text{ MPa}$ bei einem Fünftel der Zugfestigkeit des GFK. Das Material ist dabei mit $E = (12,7 \pm 1,0) \text{ GPa}$ halb so zugsteif und mit $A = (1,07 \pm 0,18) \%$ ein Drittel so dehnbar wie GFK. Die Biegefestigkeit von $\sigma_b = (145,7 \pm 2,3) \text{ MPa}$ ermöglicht durch eine Verdopplung der Wandstärke eine Aufnahme derselben Biegebelastung eines vergleichbaren GFK-Bauteils. Ein Fließen des Werkstoffs tritt ab einer Biegespannung von $\sigma_{bF} = (65 \pm 5) \text{ MPa}$ auf. Im Schubversuch zeigt das Material eine weitgehend gleichmäßige Spannungsverteilung. Das beobachtete Versagen tritt in Form von Zwischenfaserrissen der querliegenden Rovings auf. Die Versuche zeigen bei einer Scherfestigkeit von $\tau_s = (12,2 \pm 0,4) \text{ MPa}$ eine geringe Standardabweichung und 40 % der Scherfestigkeit des GFK. Der Schubmodul liegt bei $G = (171 \pm 6) \text{ MPa}$. Der Impact-Versuch mit 2,34 J Impact-Energie führt zu Faserrissen in den unteren Laminatschichten

und einer Energieaufnahme von 60,5 %. Die Energieaufnahme erhöht sich bei größerem Schaden linear auf 73,4 % der Impact-Energie von 4,4 J. Das GFK-Laminat weist bei denselben Impact-Energien lediglich Matrixschädigung auf. Mit einer Dichte von 71 % des DLR-Materials und einer um 77 % geringeren Fließgrenze unter Biegung kann das Flachsfaserlaminat des Zulieferers durch eine doppelte Wandstärke und 1,4-fache Masse dieselben Biegelasten aufnehmen. Dieselbe Massenerhöhung würde das Hanffaserlaminat benötigen. Das Verhalten beider Lamine im 5-Punkt Schubversuch unterliegt hohen Schwankungen. Versagen tritt zufällig an Fehlstellen auf und breitet sich entlang der Prüflingslänge aus. Es werden hohe Standardabweichungen der Scherfestigkeiten von 14 % (Flachs) und 30 % (Hanf) ermittelt. Die Lamine erreichen Zugfestigkeiten von 70 % (Flachs) und 62 % (Hanf). Diese entsprechen den Masseverhältnissen. Im Impact-Versuch nehmen beide Lamine einen höheren Anteil der Energie auf, was zu einer höheren Materialschädigung führt. Auf die geringere Probendicke bezogen sind die Energieaufnahme und das Schadensausmaß des Flachslaminats mit dem des DLR-Materials vergleichbar. Das Hanffasermaterial nimmt bei höherem Schadensausmaß einen höheren Energieanteil auf, was der geringeren Dichte zugeordnet wird.

Die Überlegungen basieren auf der Annahme eines linearen Verhaltens der Kennwerte zur Laminatdicke, welches nicht garantiert werden kann. Weitere Untersuchungen am Material sind notwendig um Materialverhalten bei Wandstärkenerhöhung, sowie Druckeigenschaften und eine mögliche Scherverzähung des Matrixwerkstoffs und die Effekte zu betrachten. Eine Ausweitung der Prüfkampagnen könnte insbesondere bei den Kennwerten des Zuliefermaterials eine Verringerung der Standardabweichungen ermöglichen. Felder der Materialforschung wie die Feuchtigkeitsaufnahme, Brandeigenschaften und Verbesserung der Faser-Matrix-Anbindung sind ebenfalls relevant um einen kommerziellen Einsatz des Materials zu ermöglichen. Konzepte zur Erhöhung der Bauteilfestigkeit wie Hinterlegung von grobmaschigen Verstärkungsnetzen oder eine Sandwich-Bauweise sind vielversprechende Ansätze um GFK durch die natürliche Alternative zu ersetzen. Bei Anwendungen welche eine erhöhte Wandstärke und moderat erhöhte Masse dulden, ließe sich das Material unter erwähnten Einschränkungen bereits einsetzen.

Literatur

- [1] Heinrich Dubbel, Karl-Heinrich Grote und J. Feldhusen. *Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Aufl. Berlin und New York: Springer, 2007.
- [2] Witten, Elmar and Mathes, Volker. *Der europäische Markt für faserverstärkte Kunststoffe/Composites 2023: Marktentwicklungen, Herausforderungen und Ausblicke*. 2024.
- [3] Helmut Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. SpringerLink Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. ISBN: 9783540264859.
- [4] Bernd Wohlmann. *AVK Kohlenstoff-Fasern 2009*.
- [5] LM Wind Power. *Production Technology of Wind Turbine Blades*. URL: www.lmwindpower.com (besucht am 10.06.2024).
- [6] BMW Group. *BMW Group stellt Mobilität der Zukunft vor*. 2025. URL: www.press.bmwgroup.com (besucht am 09.05.2025).
- [7] chemie.de. *Glasfaser*. 2025. URL: www.chemie.de/lexikon/Glasfaser.html (besucht am 09.06.2025).
- [8] Umweltbundesamt. *Glas- und Mineralfaserindustrie*. 2024. URL: www.umweltbundesamt.de (besucht am 10.06.2024).
- [9] Philipp Lott. „Carbonisierung von Polyacrylnitrilfasern mittels Diodenlaserstrahlung“. Diss. RWTH Aachen, 2020.
- [10] Siyuan Zhang u. a. „Environmental impacts of carbon fiber production and decarbonization performance in wind turbine blades“. In: *Journal of environmental management* 351 (2024), S. 119893. (Besucht am 14.07.2025).
- [11] Umweltbundesamt. *Windenergieanlagen: Rückbau, Recycling, Repowering*. 2024. URL: www.umweltbundesamt.de (besucht am 07.06.2024).
- [12] carboncleanup. *Frequently Asked Questions about Composite Recycling*. 2025. URL: www.carbon-cleanup.com/faq (besucht am 14.07.2025).
- [13] Siemens Gamesa. *RecyclableBlade*. 2024. URL: www.siemensgamesa.com (besucht am 17.06.2024).
- [14] Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM. *Pyrolyseverfahren versprechen nachhaltiges Recycling von Faserverbundwerkstoffen aus Rotorblättern*. URL: www.ifam.fraunhofer.de/de/Presse/ (besucht am 29.06.2025).
- [15] Swiss-Composite Info. „Faserverbund-Werkstoffdaten: Eine Sammlung der wichtigsten Werkstoffdaten für den Anwender von Faserverbund-Materialien sowie allgemeine Daten und Tabellen.“ In: *Datenblatt* ().
- [16] Paul Wambua, Jan Ivens und Ignaas Verpoest. „Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?“ In: *Composites Science and Technology* 63.9 (2003), S. 1259–1264.
- [17] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. *Faserverbundwerkstoffe - Körper*. 2025. URL: www.r-g.de/ (besucht am 11.07.2025).
- [18] Yonghui Zhou, Mizi Fan und Lihui Chen. „Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview“. In: *Composites Part B: Engineering* 101 (2016), S. 31–45.
- [19] Sika AG. „Biresin® CR170 Compositeharz-System: Produktdatenblatt“. In: *Datenblatt* (2025).
- [20] Daniel Holder und Peter Middendorf. *Digitaler Fingerabdruck: Die intelligente Sammlung, Aufbereitung und Übergabe von Daten*. 1. Aufl. Vieweg Berlin und Heidelberg: Springer, 2025.

- [21] JHD-Material. *FR4-Epoxid-Glasfaser-Laminat in der Luft- und Raumfahrt*. 2025.
URL: <https://de.jhd-material.com/> (besucht am 31.07.2025).
- [22] Badenwürttembergischer Luftfahrtverband e.V. *Segelflug*. 2025.
URL: www.bwlv.de/ (besucht am 31.07.2025).
- [23] Performance RIBs. *GFK im Bootsbereich*. 2025.
URL: www.performance-ribs.de (besucht am 31.07.2025).
- [24] Konrad Omar Suppes. *Herstellung von Pressteilen aus biobasiertem Faserverbundwerkstoff: Vergleichende Untersuchungen unterschiedlicher Pressteile für eine optimierte Festigkeit, mit und ohne Schaumkern, zur Fertigung von Rotorblättern für Kleinwindkraftanlagen*. 2024.
- [25] Tabrej Khan, Mohamed Thariq Bin Hameed Sultan und Ahmad Hamdan Ariffin. „The challenges of natural fiber in manufacturing, material selection, and technology application: A review“. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 37.11 (2018), S. 770–779.
- [26] József Karger-Kocsis, Haroon Mahmood und Alessandro Pegoretti. „Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites“. In: *Progress in Materials Science* 73 (2015), S. 1–43.
- [27] Michael A. Fuqua, Shanshan Huo und Chad A. Ulven. „Natural Fiber Reinforced Composites“. In: *Polymer Reviews* 52.3 (2012), S. 259–320.
- [28] H. L. Bos. *The potential of flax fibres as reinforcement for composites*. 2004.
- [29] Kate Birch. „How Ford is Driving the Circular Economy With Recycled Waste“. In: *Bizclik Media Ltd* (2024).
URL: <https://sustainabilitymag.com/> (besucht am 30.06.2025).
- [30] Lars Steiner Tom Sängner. *trabitechnik.com*. 2008.
URL: <https://trabitechnik.com> (besucht am 12.07.2025).
- [31] BMW Group. *Nachhaltigkeit stellt alles in Frage*. 2025.
URL: www.bmwgroup.com/de/news (besucht am 03.07.2025).
- [32] Bcomp. *Bcomp: Sustainable Lightweighting to Decarbonise the World*. 2025.
URL: www.bcomp.com/ (besucht am 12.07.2025).
- [33] BMW Group. „Bcomp wird offizieller M Motorsport Partner“. In: *BMW* (2025).
URL: www.bmw-m.com (besucht am 29.07.2025).
- [34] Greenboats GmbH. *Discover the future sailing with Greenboats*. 2025.
URL: www.green-boats.de/ (besucht am 28.07.2025).
- [35] Arkema. „Produktdatenblatt Rilsan FMNO Polyamid 11“. In: *Datenblatt* (2025).
- [36] Bcomp. „Produktdatenblatt ampliTex™ Art. No. 5043“. In: *Datenblatt* (2025).
- [37] chemie.de. *Polypropylen*. 2025.
URL: www.chemie.de/lexikon/Polypropylen.html (besucht am 24.07.2025).
- [38] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN EN ISO 178: Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften*. Berlin.
- [39] ISO International Standardization Organization. *ISO 19927 - Fiber-reinforced plastic composites: Determination of interlaminar strength and modulus by double beam shear test*. 2018.
- [40] Sky-Civ. *Online-Trägerrechner*. 2025.
URL: <https://skyciv.com/de/free-beam-calculator/> (besucht am 10.07.2025).
- [41] Karthik u. a. *Static shear response of recycled carbon fibre composites*. 2020.
- [42] Airbus. *AITM1-0007; Zugversuche an multidirektionalen Laminaten*. 2025.
- [43] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN ISO 18352: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe - Ermittlung der Compression-After-Impact-Eigenschaften bei spezifischer Aufprallenergie*. Berlin.

Anhang

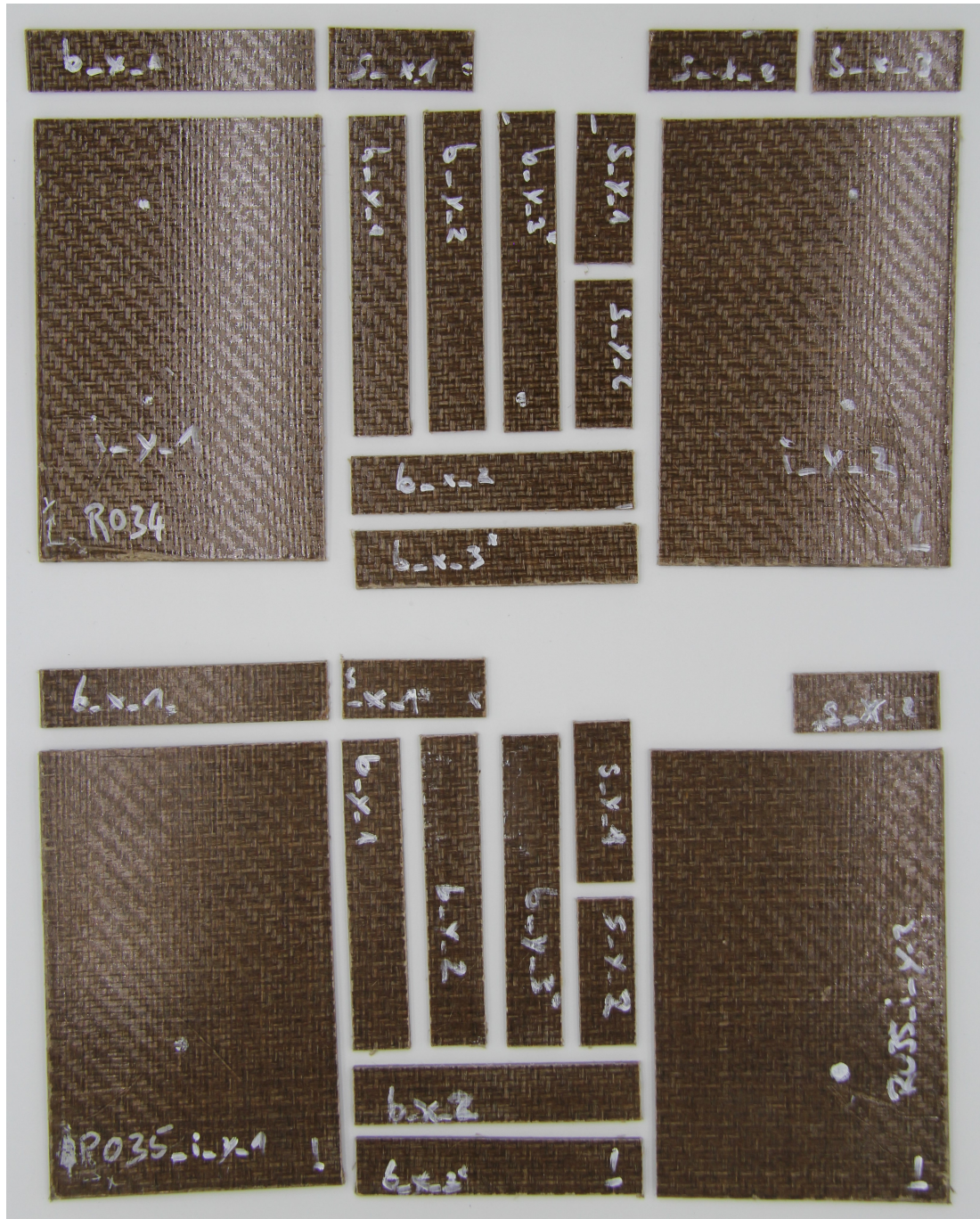


Abbildung 39: Prüflinge aus den Proben *R034* und *R035* (PA11 - Flaxfasermatten) angeordnet nach Schnittmuster zur Darstellung der Orientierung in x und y

Tabelle 6: Versagenskräfte verschiedener NFK im 3-Punkt-Biegeversuch und daraus berechnete Biegefestigkeiten σ_b und Fließgrenzen σ_{bF}

Benennung	Dicke d in mm	Breite b in mm	Versagenskraft F_{max} in N	Biegefestigkeit σ_b in MPa	Fließgrenze σ_{bF} in MPa
R034_b_x_1	2,88	20,25	303,22	162,47	-
R034_b_x_2	2,72	20	237,51	144,46	118,00
R034_b_x_3*	2,71	19,9	222,60	137,08	-
R034_b_y_1	2,81	19,55	257,92	150,37	115,38
R034_b_y_2	2,81	19,95	252,67	144,36	122,60
R034_b_y_3*	2,82	19,45	248,24	144,44	101,64
R035_b_x_1	2,79	20,05	246,69	142,26	104,18
R035_b_x_2	2,85	19,4	254,34	145,27	106,16
R035_b_x_3*	2,89	19,04	245,25	138,80	-
R035_b_y_1	2,83	20,06	259,82	145,55	114,29
R035_b_y_2	2,84	19,55	259,71	148,23	109,07
R035_b_y_3*	2,88	19,46	262,12	146,15	121,11
PPFX_b_x_1	1,98	19,95	47,60	54,77	13,16
PPFX_b_x_2	2	20,06	45,59	51,13	14,20
PPFX_b_x_3	2,01	19,94	57,31	64,02	17,67
PPFX_b_x_4	2,02	20,01	46,86	51,65	16,62
PPFX_b_y_1	1,99	20,03	48,88	55,46	14,06
PPFX_b_y_2	2,01	19,98	36,77	41,00	12,21
PPFX_b_y_3	2	20	47,19	53,08	13,90
PPFX_b_y_4	1,98	20,01	56,64	64,98	16,46
PPHF_b_x_1	2,01	20,02	38,85	43,23	12,01
PPHF_b_x_2	2,03	20,05	45,66	49,74	15,83
PPHF_b_x_3	2	19,99	32,21	36,25	9,59
PPHF_b_y_1	1,99	20,03	38,55	43,74	17,00
PPHF_b_y_2	1,99	19,98	29,08	33,08	13,38
PPHF_b_y_3	2,03	20	42,65	46,58	11,64
PPHF_b_y_4	2,01	19,99	32,37	36,07	13,98

Tabelle 7: Versagenskräfte verschiedener NFK im 5-Punkt Schubversuch und daraus berechnete Scherfestigkeiten τ_s

Benennung	Dicke d in mm	Breite b in mm	Versagenskraft F_{max} in N	Scherfestigkeit τ_s in MPa
R034_s_x_3	2,73	19,7	1367,39	19,07
R035_s_x_1	2,84	20	1388,20	18,33
R035_s_x_2	2,89	19,91	1333,36	17,38
R035_s_y_1	2,89	19,85	1327,13	17,35
R035_s_y_2	2,9	19,45	1336,87	17,78
R034_s_x_1	2,87	19,95	1394,82	18,27
R034_s_x_2	2,82	19,8	1370,79	18,41
R034_s_y_1	2,8	20	1319,51	17,67
R034_s_y_2	2,75	19,9	1313,66	18,00
PPFX_s_x_1	2,02	20,2	307,08	3,88
PPFX_s_x_2	2,01	20	240,17	3,08
PPFX_s_x_3	2,01	19,5	251,20	3,30
PPFX_s_y_1	1,99	20	292,60	3,79
PPFX_s_y_2	2,02	20,2	226,13	2,86
PPHF_s_x_1	2,03	19,6	160,51	2,08
PPHF_s_x_2	2,01	19,5	310,04	4,08
PPHF_s_x_3	2,01	19,5	152,64	2,01
PPHF_s_y_1	1,99	19,5	193,73	2,57
PPHF_s_y_2	2,02	19,1	194,53	2,60

Tabelle 8: Versagenskräfte verschiedener NFK im Zugversuch, dazugehörige Bruchdehnung (Bruchd.) und berechnete Zugspannung R_m und ggf. Dehngrenze $R_{p0,2}$

Benennung	Dicke d in mm	Breite b in mm	Versagenskraft F_{max} in N	Zugfestigkeit τ_s in MPa	Bruchd. A in %	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in MPa
R036_1	2,92	22,77	8270	124,33	0,97	92,29
R036_5	2,91	22,75	7990	120,69	1,14	106,88
R037_3	2,89	21,28	7500	121,91	1,22	86,75
R037_4	2,87	23,69	7800	114,72	0,80	86,00
R038_2	2,90	22,41	8450	130,07	1,20	85,04
PPFX_1	2,12	24,78	4167,5	79,33	2,06	-
PPFX_2	2,17	24,64	4212,4	78,78	1,94	-
PPFX_3	2,13	24,24	4100,2	79,41	2,00	-
PPFX_5	2,02	24,64	4310,4	86,60	1,93	-
PPFX_6	2,12	24,54	4242,1	81,54	2,00	-
PPHF_1	2,06	24,76	2696,1	52,86	1,55	-
PPHF_2	2,02	24,46	2558,3	51,78	1,62	-
PPHF_3	2,06	24,68	2761,6	54,32	1,67	-
PPHF_4	2,03	24,84	2546,8	50,51	1,61	-
PPHF_5	2,06	24,78	2646,3	51,84	1,53	-

Tabelle 9: Ergebnisse der Prüfverfahren 3-Punkt Biegeversuch, 5-Punkt Schubversuch an verschiedenen FVK, Biegefestigkeit σ_b , Fließgrenze der Biegung σ_{bF} , Scherfestigkeit τ_s und Schubmodul G

Probe	σ_b	σ_{bF}	τ_s	G
Glas	(592 ± 23) MPa	-	(30 ± 2) MPa	-
R03x	(145,7 ± 2,3) MPa	(65 ± 5) MPa	(12,2 ± 0,4) MPa	(171 ± 6) MPa
PPFX	(55 ± 8) MPa	(15 ± 2) MPa	(3,4 ± 0,5) MPa	(47 ± 7) MPa
PPHF	(41 ± 7) MPa	(13 ± 3) MPa	(2,7 ± 0,8) MPa	(30 ± 7) MPa

Tabelle 10: Ergebnisse der Zugprüfung an verschiedenen FVK, Zugfestigkeit R_m , Dehngrenze $R_{p0,2}$, Elastizitätsmodul E und Bruchdehnung A

Probe	R_m	$R_{p0,2}$	E	A
Glas	(481 ± 11) MPa	-	(27,60 ± 0,28) GPa	≈ 3,5 %
R03x	(121 ± 9) MPa	(91 ± 9) MPa	(12,7 ± 1,0) GPa	(1,07 ± 0,18) %
PPFX	(81 ± 4) MPa	-	(3,9 ± 0,3) GPa	(1,98 ± 0,06) %
PPHF	(50 ± 6) MPa	-	(2,78 ± 0,23) GPa	(1,60 ± 0,06) %



(a) Impact-Fallturm des DLR



(b) Impact-Körper

Abbildung 40: Versuchsaufbau und -masse der Impact-Versuche

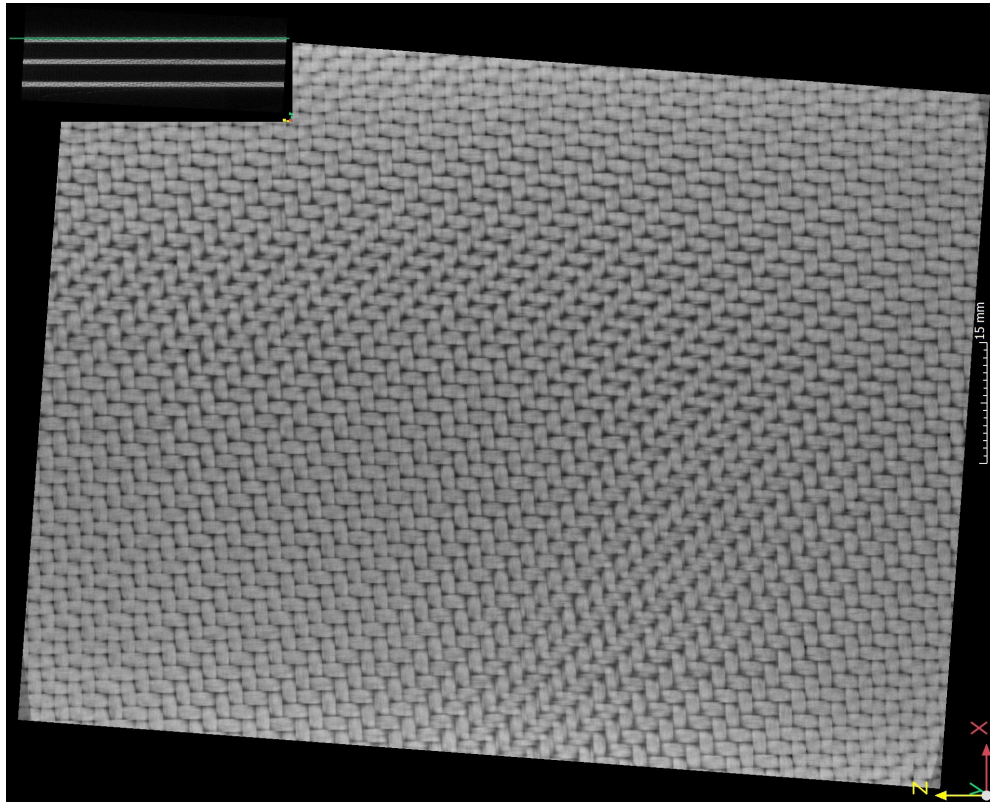


Abbildung 41: Webmuster Körper-2/2 im XZ-orientierten CT am Impact-Prüfling *Glas_i_3*

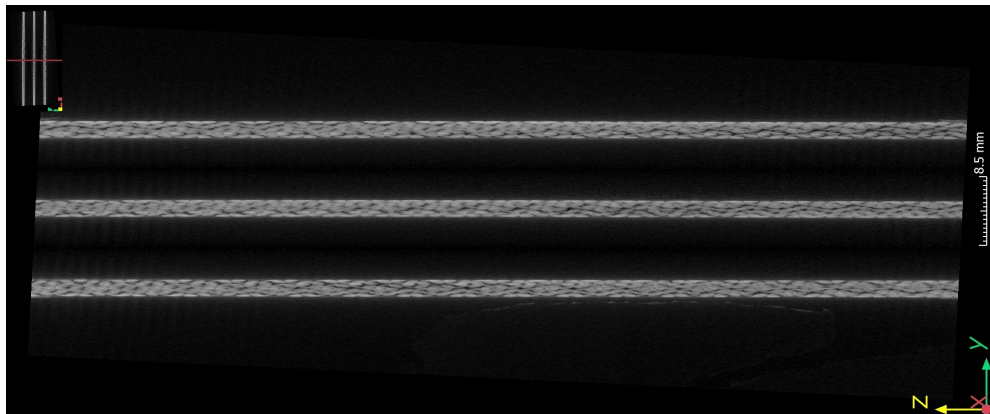


Abbildung 42: Längsschnitt der Impact-Prüflinge aus GFK

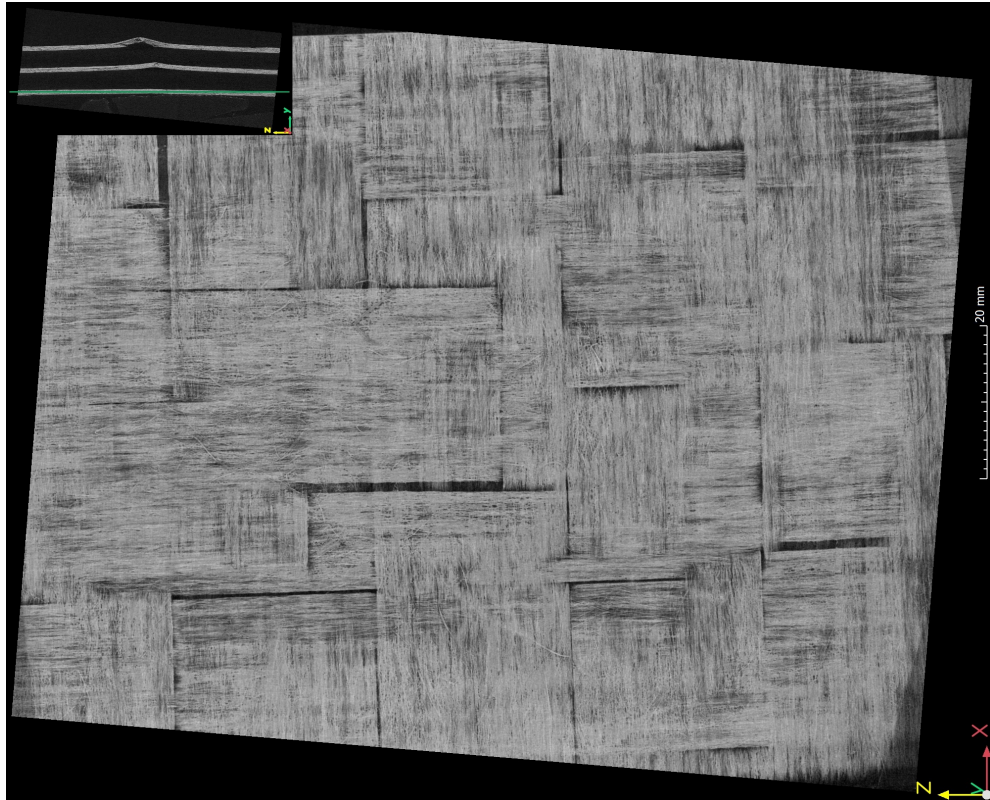


Abbildung 43: Webmuster Körper-2/2 mit Roving-Breite von 25 mm im XZ-orientierten CT am Impact-Prüfling *PPFX_i_2*

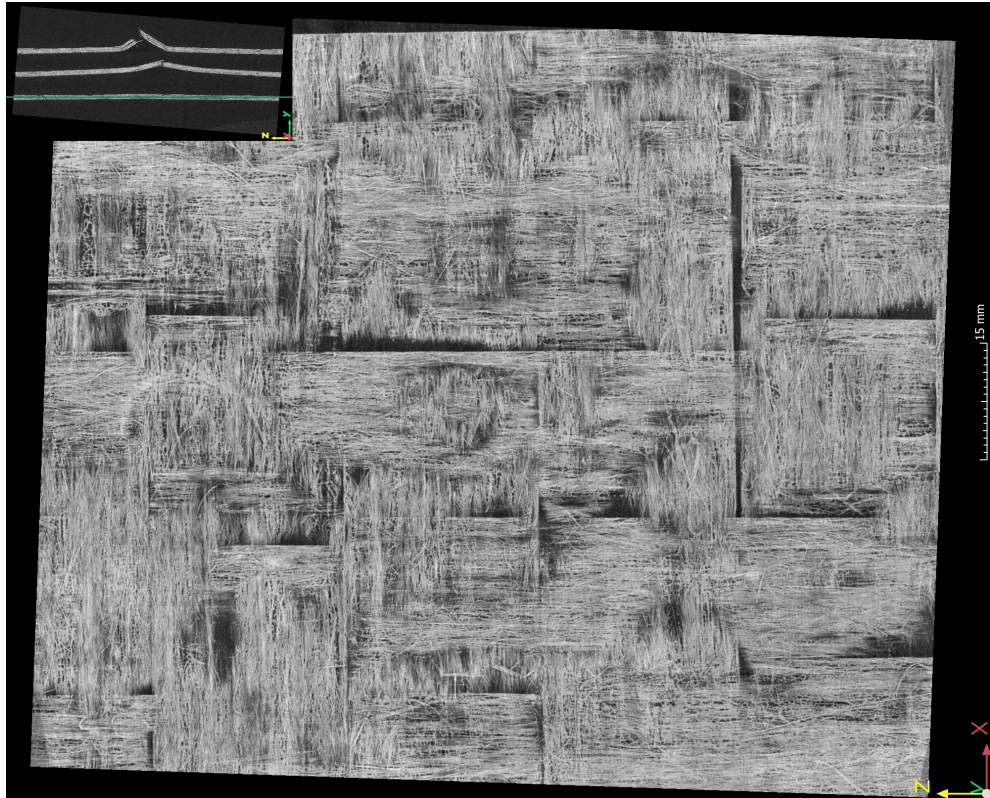
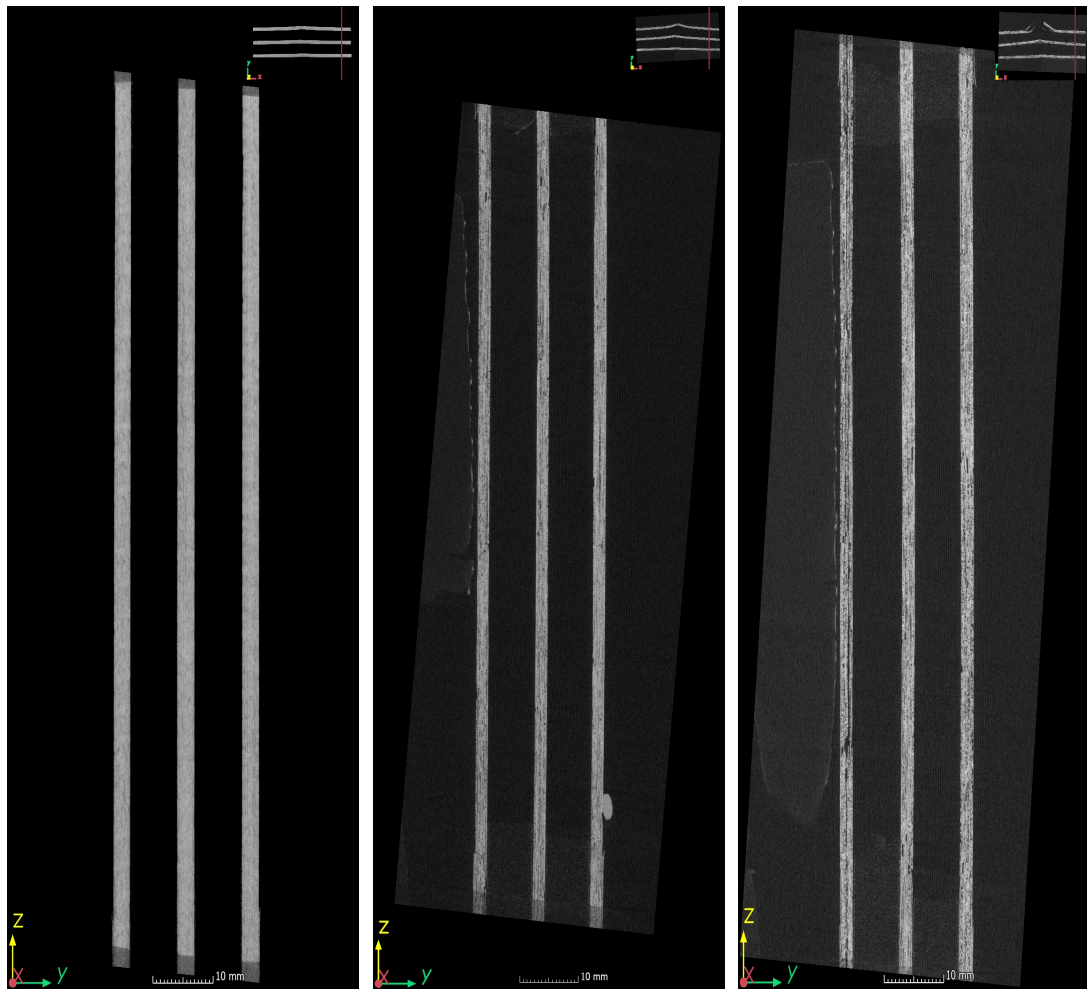


Abbildung 44: Webmuster Körper-2/2 mit Roving-Breite von 25 mm und chaotisch orientierten Fasern im XZ-orientierten CT am Impact-Prüfling *PPHF_i_2*



(a) R034 u. R035

(b) PPFX

(c) PPHF

Abbildung 45: Querschnitt der Impact-Prüflinge aus *R034/5*, *PPFX* und *PPHF* am unbelasteten Rand des Prüflings zur Betrachtung von material- und fertigungsbedingten Fehlstellen

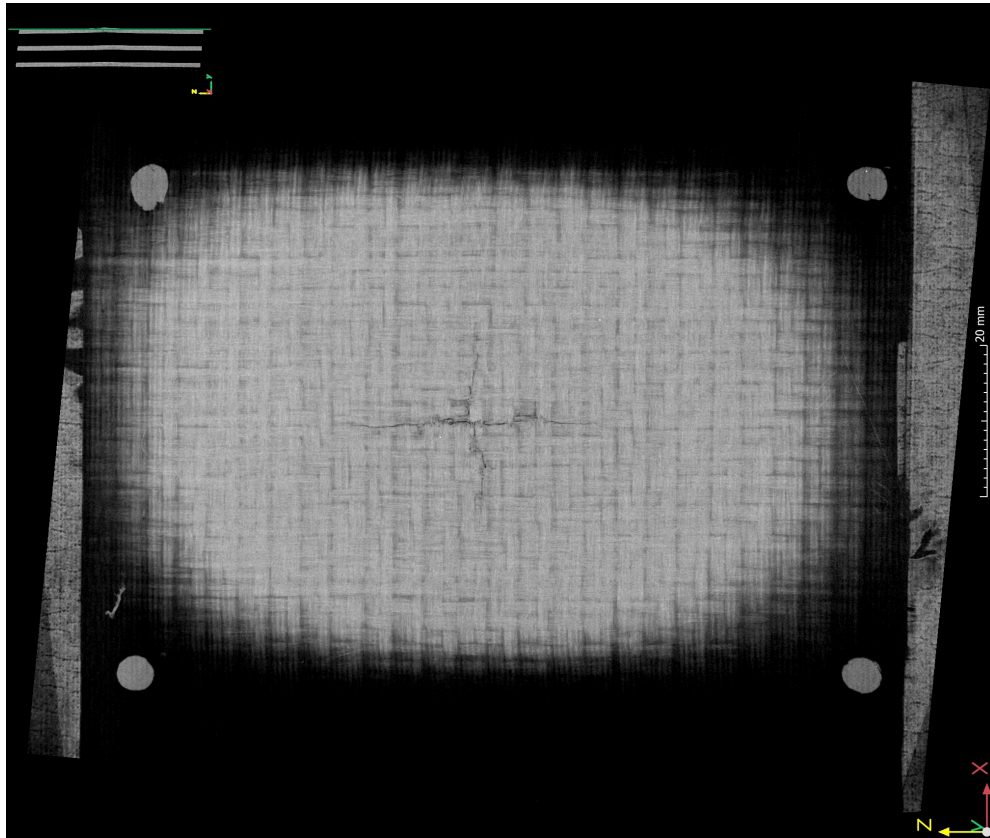


Abbildung 46: CT-Scan an Impact-Prüfling *R034_i_1* in XZ-Orientierung

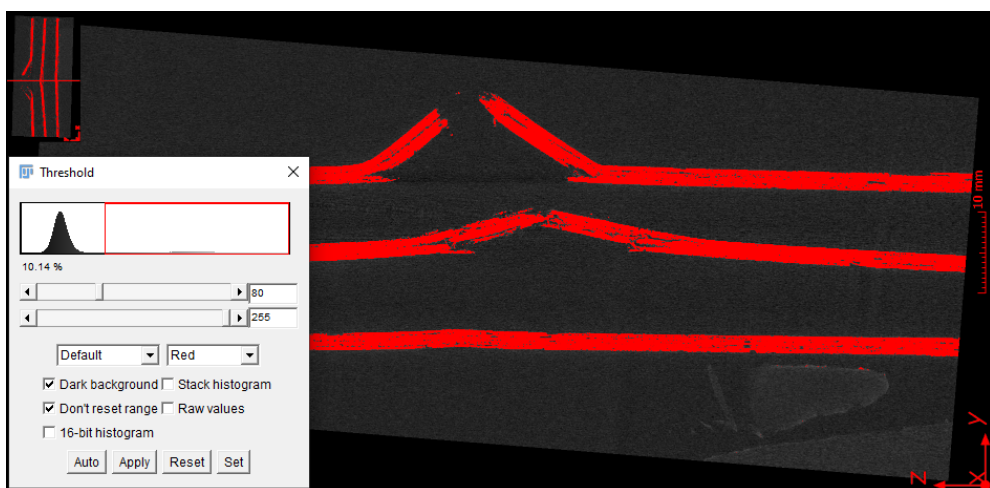


Abbildung 47: Schwarz-weiß Transformation von CT-Scans der Impactprüflinge aus *PPHF* im Programm ImageJ

Nutzung künstlicher Intelligenz

Für die Erstellung dieser Bachelorarbeit: Experimentelle Untersuchung des makroskopischen Verhaltens von nachhaltigen Faserverbundwerkstoffen im Versagensfall wurde an den folgenden Stellen künstliche Intelligenz (KI) verwendet:

Seite II

Die Nutzung beschränkt sich auf einfache Textein- und -ausgabe per ChatGPT von OpenAI Inc., folgende Abfragen und Antworten wurden getätigt:

Nutzer: „What’s that quote by Terry Pratchett about AI again?“

KI: „The quote you’re thinking of is from Hogfather (one of Terry Pratchett’s Discworld novels):

‘Real stupidity beats artificial intelligence every time.’

It’s a brilliantly succinct, funny, and ironically true line about the limits of AI and human error — perfect for poking fun at technology in a thesis or presentation!“