

Schlussbericht Teil I und II

Zuwendungsempfänger: SLK - Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung	Förderkennzeichen: 20E1908B
Vorhabenbezeichnung: InteReSt II - Weiterentwicklung einer funktionsintegrativen, res- sourcenschonenden Leichtbaustruktur für die Luftfahrt Teilvorhaben: Strukturmechanische Simulation, Fertigung und Prüfung eines reprä- sentativen Bauteils	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2020 – 31.01.2024	

Berichtersteller: Dipl.-Ing. Rostislav Svidler
Chemnitz, den 30.07.2024

Rückfragen richten Sie bitte an:

Technische Universität Chemnitz
Institut für Strukturleichtbau (IST)
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK)

Reichenhainer Straße 31/33
09126 Chemnitz

Dr.-Ing. Roman Rinberg
E-Mail: roman.rinberg@mb.tu-chemnitz.de

Tel.: +49 371 531-32359
Fax: +49 371 531-832359

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	i
1 Aufgabenstellung	1
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	10
5 Zusammenarbeit mit andern Stellen	14
6 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses	15
6.1 HAP 3: Strukturmechanische Simulation und Auslegung	15
6.1.1 AP 3.1: Verifizierung von aktuellen Material- und Topologie- Optimierungsansätzen	15
6.1.2 AP 3.2 Analyse der Anwendbarkeit etablierter Versagenskriterien auf hybride Naturfaserverbunde	17
6.1.3 AP 3.3: Anpassung des Materialmodells und Validierung numerischer Modellansätze für hybride Verbunde	28
6.1.4 AP 3.4: Entwicklung einer Optimierungsmethodik zur Auslegung von hybriden Verbunden mit TFP-Verstärkungsstrukturen / AP 3.5: Auslegung, Simulation und Optimierung des repräsentativen Musterbauteils	34
6.2 HAP 4: Fertigung und strukturmechanische Prüfung	38
6.2.1 AP 4.1: Herstellung von Verbundprobekörpern auf Coupon-Ebene / AP 4.2: Fertigung und Validierung von Verbund-Probekörpern auf Sub-Komponenten-Ebene	38
6.2.2 AP 4.3/AP4.4: Fertigung des repräsentativen Musterbauteils	53
6.2.3 AP 4.5 Prüfaufbau und Funktionstests auf Bauteilebene	54
6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse	60
6.4 Organisatorisches	61
7 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	62
8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	62
9 Voraussichtlicher Nutzen	63
10 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	64
11 Veröffentlichung der Projektergebnisse	65
12 Abbildungsverzeichnis	66
13 Tabellenverzeichnis	68

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
FF	Flachsfaser
FVK	Faserverbundkunststoffe
G-/CFK	Glasfaser-/Kohlenstofffaserverbundkunststoff
HAP	Hauptarbeitspaket
EP	Epoxidharz
ULH	Ultraleichthubschrauber
UD	Unidirektional
VARI	Vacuum Assisted Resin Injection
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
EP	Epoxidharz
FEM	Finite Elemente Methode
FKV	Faserkunststoffverbund
G-/CFK	Glasfaser-/Kohlenstofffaserverbundkunststoff
HLW	Höhenleitwerk
HSH-IfBB	Hochschule Hannover, Institut für Biokunststoffe und Biowerkstoffverbunde
InteReSt	Projektakronym: Funktions <u>int</u> egrative und <u>ress</u> ourcenschonende Leichtba <u>u</u> struktur für die Luftfahrt
KT	Kabinentür
NFK	Naturfaserverbundkunststoff
PM	Personalmonate
RTM	Resin Transfer Moulding
TFP	Tailored Fiber Placement
TUC-SLK	Technische Universität Chemnitz, Professur für Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung
TUM-HT	Technische Universität München, Lehrstuhl für Hubschrauber-technologie
ULH	Ultraleichthubschrauber

UD	Unidirektional
VARI	Vacuum Assisted Resin Injection

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Dieser Abschlussbericht beschreibt die von der TUC-SLK, im Rahmen des Forschungsvorhabens „InteReSt“, im Zeitraum vom 01.10.2016 bis 31.01.2024, durchgeführten Arbeiten und wurde entsprechend den Vorgaben für Schlussberichte gemäß Nr. 6.1 & 6.2 ANBest-P und Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98 angefertigt.

„InteReSt II“ steht als Akronym für „Weiterentwicklung einer funktionsintegrativen, res-sourcenschonenden Leichtbaustruktur für die Luftfahrt“ und ist ein über das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördertes Vorhaben zwischen der Professur für Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK) der Technische Universität Chemnitz (TUC; Verbundführer), dem Lehrstuhl für Hubschraubertechnologie (HT) der Technische Universität München (TUM), und dem Institut für Biokunststoffe und Biowerkstoffverbunde (IfBB) der Hochschule Hannover (HsH). Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt nur die von der TUC-SLK durchgeführten Arbeiten.

Im Rahmen des Vorhabens „InteReSt II“, welches als konsequente Fortführung des Forschungsvorhabens „InteReSt“ (FKZ: 20E1501A) zu bewerten ist, sollte ein Referenzbauteil (Kabinentür eines Ultraleicht-Hubschraubers), hergestellt aus hybridem CF-Flachfaserverbund, bis zur Flugtauglichkeit weiterentwickelt werden. Im Rahmen des Vorhabens „InteReSt“ konnte bei den entwickelten hybriden Naturfaserverbunden eine starke Hydrophilie als eine zulassungstechnisch problematische Eigenschaft identifiziert werden. Ferner konnten nicht alle umweltbedingten Luftfahrtanforderungen geprüft und das strukturelle Versagensverhalten von hybriden Naturfaserverbunden mit variabelaxialem CF-Faserdesign ausreichend beleuchtet werden. Daher intensivierte das Konsortium aus TUM-HT, TUC-SLK und HsH-IfBB die Zusammenarbeit in diesem Bereich und leistete durch die erfolgten Forschungsarbeiten einen signifikanten Beitrag für die umweltfreundliche Luftfahrt.

Im Verbundvorhaben „InteReSt II“ befasste sich TUC-SLK mit der Untersuchung und Beschreibung von Versagensmechanismen und der Entwicklung eines gesamtheitlichen computergestützten Auslegungsprozesses für hybride Naturfaserverbunden mit variabelaxialem CF-Faserdesign. HsH-IfBB und die TUM-HT arbeiteten an geeigneten Beschichtungssystemen, welche den hybriden Naturfaserverbund hinreichend gegen luftfahrtrelevante Umwelteinflüsse schützt. Dabei sollten insbesondere biobasierte und Luftfahrt zugelassene Werkstoffe in Betracht gezogen werden. Diese wurden unter kombinierten Feuchte- und Temperatureinflüssen hinsichtlich mechanischer Belastbarkeit, Schimmelbefall und Beständigkeit gegen Luftfahrtflüssigkeiten, elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie Blitzüberschlag untersucht.

Die Auflistung der zu bearbeitenden Haupt- (HAP) und Arbeitspakete (AP) ist in der Tabelle 1 zusammengefasst. Im Weiteren wird kurz auf die einzelnen Arbeitspakete eingegangen und die genaue Aufgabenstellung dieser APs näher erläutert.

Tabelle 1: Die von TUC-SLK bearbeiteten Arbeitspakete (aufgrund der verspäteten Projektstarts wurde die Zeiträume um jeweils 12 Monate nach hinten verschoben)

Arbeitspakete	Zeitraum
HAP 1: Spezifikation von Anforderungen	01/2020–06/2020
HAP 3: Strukturmechanische Simulation und Auslegung	01/2020–12/2021
AP 3.1: Verifizierung von aktuellen Material- und Topologieoptimierungsansätzen	01/2020–08/2020
AP 3.2: Analyse von etablierten Bruch- und Schädigungskriterien auf hybride Naturfaser-verbunde	08/2020–11/2020
AP 3.3: Anpassung des Materialmodells und Validierung aktueller numerischer Modellansätze	12/2020–04/2021
AP 3.4: Entwicklung einer Optimierungsmethodik zur Auslegung von hybriden Verbunden mit TFP-Verstärkungsstrukturen	04/2021–08/2021
AP 3.5: Auslegung, Simulation und Optimierung des repräsentativen Musterbauteils	08/2021–12/2021
HAP 4: Fertigung und strukturmechanische Prüfung	05/2020–10/2022
AP 4.1: Herstellung von Verbundprobekörpern auf Coupon-Ebene	05/2020–11/2020
AP 4.2: Fertigung und Validierung von Verbund-Probekörpern auf Sub-Komponenten-Ebene	01/2022–05/2022
AP 4.3: Fertigung des repräsentativen Hub-schrauberbauteils	09/2021–07/2022

HAP 5: Validierung von Material und Bauweise für Luftfahrtanwendungen	05/2020–10/2022
--	-----------------

HAP 1: Spezifikation von Anforderungen

Im HAP 1 erfolgte unter der Leitung der TUM-HT die Auswahl der biobasierten textilen Verstärkungshalbzeuge, Bio-Prepregs und Epoxidharzsysteme auf Basis der im vorhergehenden Verbundvorhaben „InteReSt“ generierten Ergebnisse. Weiterhin wurden auf Basis der zuvor definierten Anforderungen Maßnahmen zum Schutz von Naturfaserverbunden hinsichtlich der Witterungseinflüsse analysiert und geeignete biobasierte/synthetische Beschichtungssystem ausgewählt. Dabei wurde neben der Luftfahrttauglichkeit besonders auf den ökologischen Fußabdruck des Beschichtungssystems geachtet. Für die Bestimmung der Luftfahrtanforderungen hinsichtlich verwendbarer Beschichtungssysteme wurden die Luftfahrtnormen AECTP 300 - Climatic Environmental Conditions und RTCA-DO 160 herangezogen. Ferner wurden die Operations- und Lastszenarien, luftfahrtspezifische Materialanforderungen auf Basis regionaler und europäischer Hubschrauberregularien (LTF-ULH, CS-VLR, -25, -27, -29 sowie das Werkstoffhandbuch der deutschen Luftfahrt) sowie konstruktive Spezifikationen für eine repräsentative Hubschrauberstruktur im vollständigen Lastenheft aktualisiert und im Vorfeld die notwendigen technologischen Grundsatzuntersuchungen durchzuführen.

Während des HAP 1 stand die TUC-SLK dem Projektpartner TUM beratend zur Seite und lieferte Zuarbeit hinsichtlich Kriterien der Verarbeitbarkeit und Fertigung von hybriden duroplastischen Naturfaserkunststoffverbunden.

HAP 3 Strukturmechanische Simulation und Auslegung

Das Ziel des HAP 3 stellte die Erarbeitung eines ganzheitlichen technologischen Lösungsansatzes für numerische Auslegung und Simulation von hybriden NFK-Verbunden unter Verwendung moderner Topologie- und Materialoptimierungsverfahren dar, wobei fertigungstechnische Aspekte variablenaxialer Fertigungsverfahren, wie z.B. Tailored Fiber Placement (TFP), eine ausreichende Berücksichtigung betrachten wurden. Dazu wurden vorrangig kommerzielle numerische Auslegungs- und Optimierungstools in Kombination mit neuartigen generischen oder evolutionären Optimierungsalgorithmen herangezogen.

Wie die Ergebnisse von „InteReSt“ verdeutlichen, erfordert der Einsatz von variabelaxialer Verstärkungen zwecks einer beanspruchungs-/fertigungsgerechten Gestaltung und Auslegung von Bauteilen ein detailliertes Verständnis über das Materialverhalten unter komplexen Beanspruchungen. Dafür fehlten zu Beginn des Vorhabens wichtige

werkstoffmechanische Grundlagen und physikalisch begründete Auslegungsstrategien. Insbesondere sind hier die offenen Fragestellungen hinsichtlich der Interaktionsmechanismen auf Faser-Matrix-Ebene, die Versagens- und Schädigungsmechanismen sowie der Dauereigenschaften bei statischer und dynamischer Belastung zu nennen. Daher wurden im HAP 3 ein neues Testverfahren zur Erzeugung eines überlagerten Spannungszustandes in Flachproben entwickelt und experimentelle Untersuchungen zum Bruch- und Schädigungsverhalten von NFK-Verbunden durchgeführt. Daraufhin wurde auf Basis der Koninuumsschädigungsmechanik (CDM) ein numerischer Modellierungsansatz, bestehend aus einem Python-Skript zur Auswertung und Verarbeitung von Testdaten sowie einer USDLFD-Subroutine für ABAQUS CAE, zur Abbildung des orthotropen nichtlinearen Materialverhaltens von NFK-Verbunden, insbesondere von Flachsfaser-Epoxidharz-Verbunden, entwickelt.

Abschließend wurde auf Basis der erarbeiteten Auslegungsstrategie das repräsentative Bauteil, die Kabinentür des UL-Hubschraubers CoAX2D neu ausgelegt, das Verformungs- und Bruchverhalten simuliert und der Laminatausbau ausgearbeitet.

HAP 4: Fertigung und strukturmechanische Prüfung

Parallel zum HAP 3 erfolgte umfassende Materialcharakterisierung sowie experimentelle Ermittlung des Bruch- und Schädigungsverhaltens auf Coupon- und Sub-Komponenten-Ebene. Ferner erfolgte eine Verifizierung der Anwendbarkeit bestehender Auslegungs- und Optimierungsansätze sowie der Bruch- und Versagensthypothesen auf Probekörperebene. Ferner wurde das im vorangegangenen Vorhaben „InteRest“ erarbeitete Fertigungskonzept im Sinne der Ökoeffizienz weiterentwickelt sowie die vorgeschalteten Prozessschritte, wie die Herstellung von TFP-Preformen, optimiert.

Ein repräsentatives Hubschrauberbauteil (Kabinentür des UL-Hubschraubers CoAX2D) diente zur Demonstration des Material-, Auslegungs- und Technologiekonzeptes. Durch statische Belastungsversuche sowie Untersuchungen zu Luftfahrt-Umwelt-Einflüssen wurden die FE-Simulationsergebnisse verifiziert und die Eignung des neuartigen ganzheitlichen Auslegungs- und Simulationsansatzes bewertet.

Die Fertigung der Referenzbauteile wurde aus Kostengründen als Unterauftrag an die Fa. Invent GmbH vergeben.

HAP 5: Validierung von Material und Bauweise für Luftfahrtanwendungen

In diesem HAP flankierte das IfBB das komplette Projekt unter ökobilanziellen Gesichtspunkten. Es wurde eine produktbezogene Analyse mit Fokus auf der Rohstoffauswahl und Produktion durchgeführt, sowie eine Abschätzung zu Nutzungsphase und Entsorgung vorgenommen. Die Instrumente der Ökobilanzierung sollten hierbei nicht nur als Analyse- sondern auch als Planungsinstrumente dienen, sodass sie flankierend

über den kompletten Prozess anzuwenden waren. Eine intensive Begleitung seitens der TUC-SLK war für den Projektstart, -abschluss, sowie zu kritischen Punkten, den Meilensteinen, von Bedeutung, um richtungsweisend in puncto ökobilanziellen Gesichtspunkten entscheiden zu können.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. Lothar Kroll baute das Institut für Strukturleichtbau der TU Chemnitz (TUC-IST) seit seiner Gründung im Jahr 2006 umfassende Kompetenzen im Bereich von Leichtbaulösungen für Automobil-, Schienen- und Luftfahrtanwendungen. So wurden in Zusammenarbeit mit Airbus und Liebherr-Aerospace z.B. in den Förderprojekten AKTUEL (FKZ: 20K0607A) und HyCo (FKZ: 20Y0906B) beanspruchungsgerechte Luftfahrt-Hydraulikkomponenten in neuartiger Mischbauweise erfolgreich entwickelt, umgesetzt und erprobt. Weitere Luftfahrt-Forschungsvorhaben, wie z.B. ALM2AIR (FKZ: 20W1501L), HydI (FKZ: 20Y41506E) oder CFK-Mod (FKZ: 20X1701D) beschäftigen sich mit neuen metallischen Werkstoffen für additive Fertigung sowie mit der Weiterentwicklung generativer Fertigungsverfahren. Ferner kann TUC-IST auf eine weitreichende Expertise im Bereich der Entwicklung von Technologien und Anwendungen unter Nutzung naturfaserverstärkter Kunststoffverbunde verweisen. Innerhalb des FENAFa Netzwerkverbundes (FKZ: 22024208) und den Förderprojekten HyfaLite (FKZ: 22016117) und OptiformTEX (BMBF) wurden neue Fertigungstechnologien und neuartige hybridisierte, belastungsdedizierte oder topographie-/topologieoptimierte Verstärkungen aus biogenen und synthetischen Fasern für kosteneffiziente Leichtbau-Verbundbauteile entwickelt. Das Bundesexzellenzcluster MERGE sowie die Förderprojekte VIA (LuFo) und EFFICOAT (BMBF) verdeutlichen wiederholt den hohen wissenschaftlichen Anspruch und die Leistungsfähigkeit von TUC-IST.

Das Forschungsvorhaben „InteReSt II“ knüpfte direkt an das vorausgehende LuFo-Forschungsvorhaben „InteReSt“ an. Die Weiterentwicklung von biogenen hybriden Leichtbaustrukturen für die ökoefiziente Luftfahrt stellte, insbesondere vor dem erläuterten wissenschaftlichen Hintergrund und der Expertise der Verbundpartner TUM-HAT und HSH-IfBB, eine überwindbare Herausforderung dar. So wurde konsequent auf einschlägige Erfahrungen von TUC-IST auf den Gebieten der Bauteilauslegung, -optimierung und -fertigung sowie der experimentellen Untersuchung und Qualitätssicherung von Luftfahrtstrukturen zurückgegriffen und das Knowhow auf diesem Gebiet signifikant erweitert.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In nachfolgenden Abbildungen sind der Struktur- (Abbildung 1), Netz- (Abbildung 2) und Arbeitsplan (Abbildung 3) mit entsprechenden Arbeitsinhalten, Zuständigkeiten und Bearbeitungszeiträumen dargestellt. Die im Rahmen der Projektbeantragungsphase erstellten Pläne konnten im Vorhabensverlauf weitestgehend eingehalten werden, wobei es durch unvorhersehbare Komplikationen mit der Herstellung der Laminierformen und nachfolgender Unterauftragvergabe zu einer geringfügigen zeitlichen Verzögerung kam. Daraufhin wurde von TUC-SLK beim Projektträger ein Antrag auf die kostenneutrale Verlängerung gestellt und genehmigt. Trotz Komplikationen konnten von TUC-SLK alle Projektziele erreicht, Meilensteine erfüllt und Referenzbauteile erfolgreich gebaut sowie getestet werden. Ferner wurden die geplanten finanzielle Umfänge nicht überschritten.

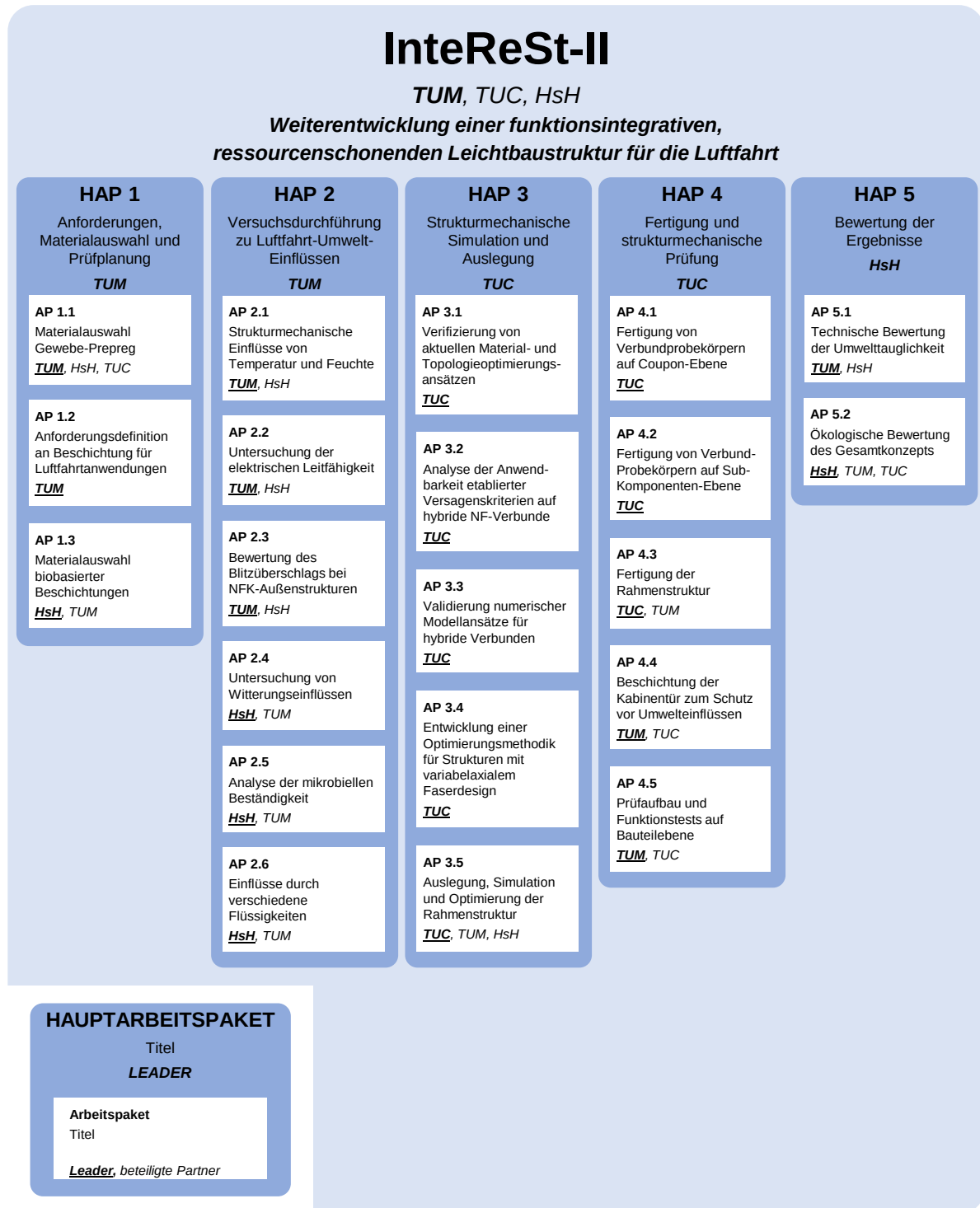


Abbildung 1: Strukturplan aus Vorhabensbeschreibung

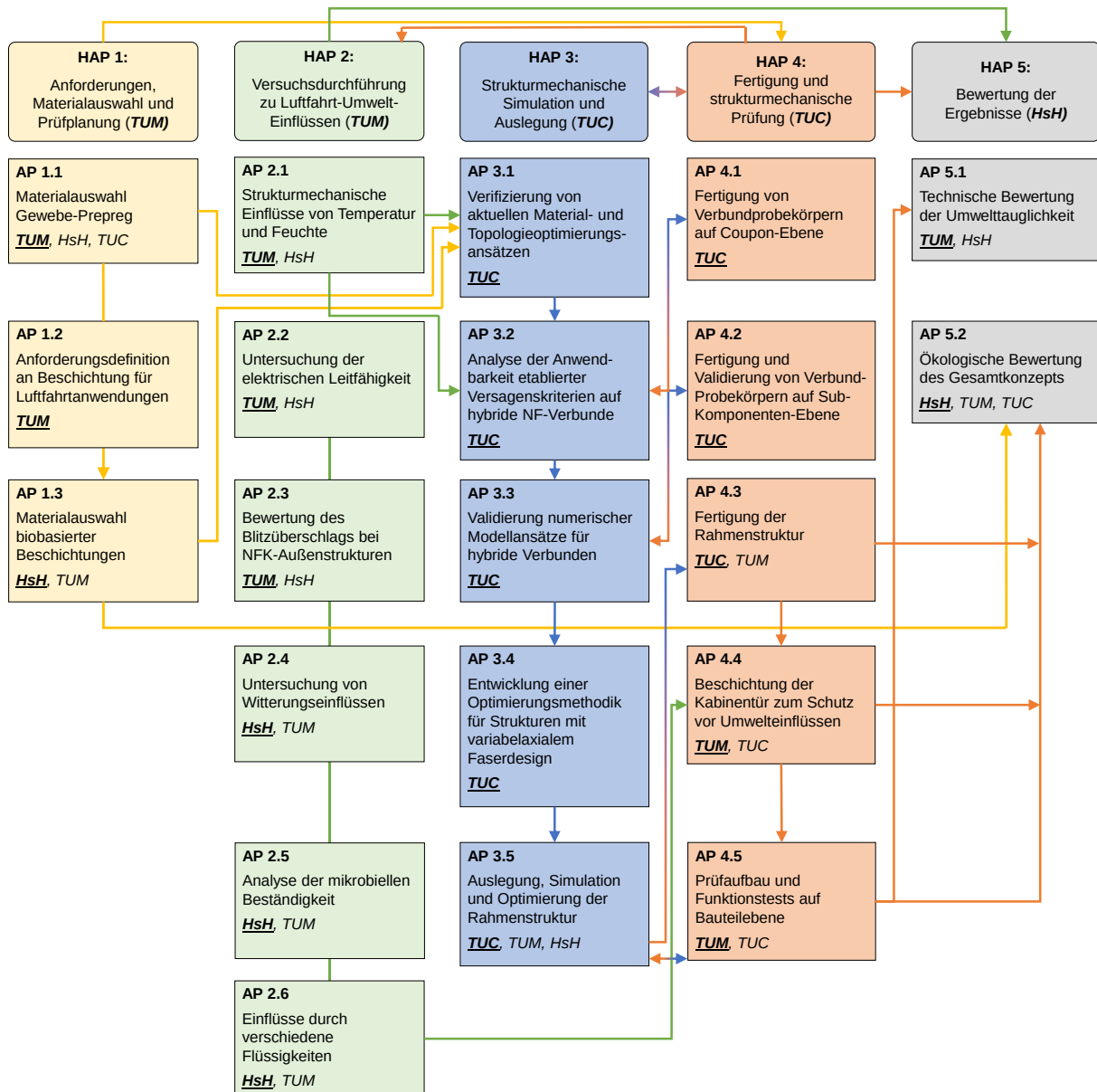


Abbildung 2: Netzplan aus Vorhabensbeschreibung

			2021												2022												2023												24
AP	Leader, beteiligte Partner	AP-Titel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
			F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	
	TUM	AP 0 Projektmanagement																																					
	TUM, TUC, HsH	Kickoff-Meeting																																					
1.	TUM	HAP 1: Anforderungen, Materialauswahl und Prüflplanung																																					
1.1	TUM, HsH	AP 1.1: Materialauswahl Gewebe-Prepreg und Prüflplanung																																					
1.2	TUM	AP 1.2: Anforderungsdefinition an die Beschichtung für Luftfahrtanwendungen																																					
1.3	HsH, TUM	AP 1.3: Materialauswahl biobasierter Beschichtungen																																					
MS 1		MS 1: Prüflplanung und Materialauswahl sind abgeschlossen																																					
2	TUM	HAP 2: Versuchsdurchführung zu Luftfahrt-Umwelt-Einflüssen																																					
2.1	TUM, HsH	AP 2.1: Strukturmehrische Einflüsse von Temperatur und Feuchte																																					
2.2	TUM, HsH	AP 2.2: Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit																																					
2.3	TUM, HsH	AP 2.3: Bewertung des Blitzüberschlags bei NFK-Außenstrukturen																																					
2.4	HsH, TUM	AP 2.4: Untersuchung von Witterungseinflüssen																																					
2.5	HsH, TUM	AP 2.5: Analyse der mikrobiellen Beständigkeit																																					
2.6	HsH, TUM	AP 2.6: Einflüsse durch verschiedene Flüssigkeiten																																					
MS 2		MS 2: Kritische Einflüsse aus Luftfahrt-Umwelt sind analysiert und Konzept zum Schutz vor Luft-Umwelt besteht																																					
3	TUC	HAP 3: Strukturmehrische Simulation und Auslegung																																					
3.1	TUC	AP 3.1: Verifizierung von aktuellen Material- und Topologieoptimierungsansätzen																																					
3.2	TUC	AP 3.2: Anwendbarkeit etablierter Versagenskriterien auf hybride NF-Verbunde																																					
3.3	TUC	AP 3.3: Validierung numerischer Modellansätze für hybride Verbunde																																					
3.4	TUC	AP 3.4: Optimierungsmethodik für Strukturen mit variabelaxialem Faserdesign																																					
3.5	TUC, TUM, HsH	AP 3.5: Auslegung, Simulation und Optimierung der Rahmenstruktur																																					
MS 3		MS 3: Rahmenstruktur ist ausgelegt und hinsichtlich Schutz vor Umwelteinflüssen optimiert																																					
4	TUM	HAP 4: Auswertung																																					
4.1	TUC	AP 4.1: Fertigung von Verbundprobekörpern auf Coupon-Ebene																																					
4.2	TUC	AP 4.2: Fertigung von Verbund-Probekörpern auf Sub-Komponenten-Ebene																																					
4.3	TUC, TUM	AP 4.3: Fertigung der Rahmenstruktur																																					
4.4	TUM, TUC	AP 4.4: Beschichtung der Kabinentür zum Schutz vor Umwelteinflüssen																																					
4.5	TUM, TUC	AP 4.5: Prüfaufbau und Funktionstests auf Bauteilebene																																					
MS 4		MS 4: Witterungsbeständigkeit der in Hybridbauweise gefertigten Kabinentür ist nachgewiesen und Kabinentür ist bereit zum Flugversuch																																					
5	HsH	HAP 5: Bewertung der Ergebnisse																																					
5.1	TUM, HsH	AP 5.1: Technische Bewertung der Umwelthaftigkeit																																					
5.2	HsH, TUM, TUC	AP 5.2: Ökologische Bewertung des Gesamtkonzepts																																					
MS 5		MS 5: Zusammenfassung und Ausblick hinsichtlich des Einsatzes von biobasierten Werkstoffen in der Luftfahrt																																					

Abbildung 3: Zeitplan aus Vorhabensbeschreibung

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Trend weg von metallischen Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium und Titan hin zu FKV in der zivilen Luftfahrt ist ungebrochen. Aktuelle Verkehrsflugzeuge wie die Boeing 787 Dreamliner oder der Airbus A350 XWB bestehen ca. zur 50 % aus Kohlefaser-Verbundwerkstoffen (CFK). Nach wie vor ist der Trend der Gewichtsreduzierung einhergehend mit einer höheren Funktionsintegration ungebrochen. Während schon zu Beginn der Luftfahrtgeschichte Flugzeugstrukturen fast vollständig aus Holzwerkstoffen bestanden, kommen heutzutage kaum noch biogene Materialien zur Anwendung. Naturfaserverbundwerkstoffe (NFK) sind aktuell nur in speziellen Nischenanwendungen vorzufinden und stellten 2009 maximal 12 % des europäischen Faserverbundmarktes dar [1].

Duroplastische G-/CFK-Verbunde weisen neben den außerordentlich hohen spezifischen Festigkeitseigenschaften einige Nachteile in Hinblick auf vibroakustisches Verhalten, Schadenstoleranz, Umwelt und Kostenaspekte aufweisen. Gerade hier können naturbasierte Verstärkungsmaterialien ihr einzigartiges Eigenschaftspotenzial entfalten und vor allem in einem hybriden NFK/CFK-Verbund die oben genannten Nachteile von G-/CFK kompensieren. Besonders die positive CO₂-Bilanz in der Wachstumsphase, bessere Recyclingfähigkeit und geringer Energieeintrag bei der Halbzeugherstellung (300 GJ – CFK, 5 GJ – Hanf) sprechen für Naturfaser [1], [9], [10]. Grundsätzlich können bei NFKs, besonders mit Flachsfaserverstärkung, relativ hohe spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten erzielt werden, die den NFK-Werkstoffen neue Anwendungsfelder in der Luftfahrt zugänglich machen können. So erreicht der spezifische E-Modul von duroplastbasierten Flachsfaserverbunden einen im Vergleich zum GFK um ca. 40 % höheren Wert, wohingegen die spezifische Zugfestigkeit bei ca. 34 % des entsprechenden Wertes von GFK liegt [8]. Ferner weisen Naturfasern relativ hohe Feuchtigkeitsaufnahme bis 14 Gew.-%, niedrige thermische Belastbarkeit, gute Brennbarkeit sowie wachstumsbedingte Eigenschaftsschwankungen auf [1].

Vor diesem Hintergrund sind Naturfasern kein vollwertiger Ersatz für Glas- und noch weniger für Kohlenstofffasern, können jedoch vor allem bei steifigkeitsdominierten Problemen in Kombination mit CFK als kostengünstige und leichte Verstärkungsfaser mit einem besonderen Leistungsspektrum eingesetzt werden. In der jüngsten Zeit wurden aufgrund immer größer werdenden Nachfrage verschiedene neuartige Hochleistungshalbzeuge (vornehmlich Gelege) in den Markt gebracht. Diese weisen aufgrund noch nicht ausgereifter Herstellungstechnologie zahlreiche Defizite im Hinblick auf Qualität und Weiterverarbeitbarkeit zum Verbundwerkstoff auf. Zudem kommen bei den meisten NF-Gelegen verdrehte Flachsgarne zum Einsatz, was zu einer problematischen Imprägnierung mit polymerer Matrix und zur Minderung der Festigkeitseigen-

schaften des Verbundes führt. Eine Ausnahme stellen hier die unidirektionalen Halbzeuge der Fa. Lineo oder Fa. Composites Evolution dar, die aus parallel nebeneinander angeordneten, drehungsfreien, mit Ligninklebstoff leicht fixierten Flachslangfasern bestehen. Darüber hinaus sind auf dem Markt zahlreiche Gewebevarianten aus Naturfasergarnen mit Leinwand-, Köper- oder Atlasbindung vorhanden und einige wenige NF-Prepregs mit EP-Harzsystem bekannt. Die Naturfaserhalbzeuge lassen sich grundsätzlich im VARI, RTM- oder RIM-Verfahren und die Prepregs mittels etablierter Autoklav- oder Presstechnik zu tragfähigen Formteilen verarbeiten. Zu berücksichtigen ist dabei eine aufgrund der Oberflächenrauheit und hoher Biegesteifigkeit von Naturfasern eingeschränkte Drapierbarkeit der Halbzeuge. Vorteilhaft sind die gute Verarbeitbarkeit von NF-Halbzeugen im Pressverfahren dank ihrem gutmütigen Verdichtungsverhalten unter Druck und hoher Biegsamkeit sowie ihre günstigen vibroakustischen Eigenschaften im Verbund mit Thermo- oder Duroplasten. Zur Leistungssteigerung von NFK-Werkstoffen sind jedoch weitere Entwicklungsschritte zwecks Umsetzung von belastungsgerecht ausgelegten Leichtbauteilen erforderlich. Verbesserung des Langzeitverhaltens unter Last, Minimierung der Feuchtempfindlichkeit und Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Verarbeitung sind hierbei von hohem Stellenwert.

Durch den Einsatz von biobasierten duroplastischen Matrixwerkstoffen in NFKs können weitere ökologische Vorteile geschaffen werden. Die Verwendung teil-biobasierter Matrixsysteme in Luftfahrtanwendungen ist bislang jedoch nicht bekannt. Aktuell sind auf dem Markt zahlreiche konkurrenzfähige biobasierte Lösungen (31 - 56 % biogener Anteil im EP-Harz) vorzufinden, die den biobasierten Anteil des Verbundes um bis zu 12 % (VARI-Verfahren mit 55% Vol.-%) steigern können.

Aktuell sind zahlreiche Publikationen bekannt, die sich mit dem Thema Untersuchung duroplastischer hybrider CF-/GF-Flachsfaserverbunde auf Grundlagenebene beschäftigen. Gegenstand dieser Untersuchungen waren zumeist Struktureigenschaften [2], [18], [19], [20], Dämpfungs- [3], [5], [16], [23] und Brandverhalten [13], Fatigue-Eigenschaften [4], [6], [7], Wasseraufnahmeverhalten [14], [15], [21] oder nichtlineares Materialverhalten [22]. Referenzen zur computergestützten Auslegung oder Optimierung von hybriden FKV auf Basis von Flachsfasern oder zur numerischen Modellierung des Bruch- und Schädigungsverhaltens sind kaum bekannt [17]. Auch verfügbare Publikationen zum Thema Einsatz von Naturfaserverbunden für Luftfahrtanwendungen sind begrenzt [9], [24]. Trotz vieler Veröffentlichungen, welche aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Naturfasern, Matrices oder Prüfverfahren oftmals konträre Resultate zeigen, fehlt eine solide Datenbasis für die zuverlässige CAD-gestützte Modellierung von strukturellen Luftfahrtbauteilen. Mit dem Verbundvorhaben „InteReSt“ wurde daher ein wichtiger Schritt in diese Richtung gemacht und ein enormes Knowhow geschaffen.

Literaturverzeichnis

- [1] H.-J. Endres and A. Siebert-Raths, Technische Biopolymere -Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften, 1st ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009. ISBN: 978-3-446-41683-3
- [2] D. U. Shah, P. J. Schubel, M. J. Clifford, and P. Licence, "The tensile behavior of off-axis loaded plant fiber composites: An insight on the nonlinear stress-strain response," *Polym. Compos.*, vol. 33, no. 9, pp. 1494–1504, Sep. 2012.
- [3] F. Duc, P. E. Bourban, and J. A. E. Månson, "The role of twist and crimp on the vibration behaviour of flax fibre composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 102, pp. 94–99, 2014.
- [4] M. Kersani, S. V Lomov, A. Willem, V. Vuure, A. Ne Bouabdallah, and I. Verpoest, "Damage in flax/epoxy quasi-unidirectional woven laminates under quasi-static tension," *J. Compos. Mater.*, vol. 49, no. 4, pp. 403–413, 2015.
- [5] M. Rueppel, J. Rion, C. Dransfeld, and K. Masania, "damping of carbon fibre and flax fibre reinforced angle ply polymers," in *ECCM 17 - 17th European Conference on Composite Materials*, 2016.
- [6] M. Wedekind, C. Salmon, and E. Ahci-Ezgi, "fatigue substantiation and damage tolerance evaluation of h145 fiber composite components," in *ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials*.
- [7] T. Jeannin, X. Gabrion, E. Ramasso, and V. Placet, "About the fatigue endurance of unidirectional flax-epoxy composite laminates," *Compos. Part B*, vol. 165, pp. 690–701, 2019.
- [8] S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora, "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?," *Compos. Part A*, vol. 35, no. 3, pp. 371–376, 2004.
- [9] A. Morasch, J. Prievitzer, and H. Baier, "Zur ganzheitlichen Bewertung von Werkstoffen am Beispiel von naturfaserverstärkten und glasfaserverstärkten Kunststoffen," in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2011*, 2011.
- [10] V. Placet, F. Trivaudey, O. Cissé, and M. L. Boubakar, "What are the possible origins of the nonlinear tensile behaviour of hemp fibres?," *Int. Conf. Compos. Mater.*, 2014.
- [11] K. Charlet, J.-P. Jernot, J. Breard, and M. Gomina, "Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibres," *Ind. Crop. Prod.*, vol. 32, pp. 220–224, 2010.

- [12] K. Haag, J. Rg, and M. Ssig, "Scatter in tensile properties of flax fibre bundles: influence of determination and calculation of the cross- sectional area," *J. Mater. Sci.*, vol. 51, pp. 7907–7917, 2016.
- [13] S. Rao, A. Bhardwaj, A. Beehag, and D. Bhattacharyya, "Fire performance of flax laminates and their hybrids," *Adv. Mater. Res.*, vol. 410, pp. 114–117, 2012.
- [14] A. le Duigou, J. Merotte, A. Bourmaud, P. Davies, K. Belhouli, and C. Baley, "Hygroscopic expansion: A key point to describe natural fibre/polymer matrix interface bond strength," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 151, pp. 228–233, Oct. 2017.
- [15] S. Requile, A. Le Duigou, A. Bourmaud, and C. Baley, "Moisture induced hygroscopic and mechanical properties of hemp reinforced biocomposite .," in *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials*, 2018.
- [16] M. Assarar, W. Zouari, H. Sabhi, R. Ayad, and J. M. Berthelot, "Evaluation of the damping of hybrid carbon-flax reinforced composites," *Compos. Struct.*, vol. 132, pp. 148–154, 2015.
- [17] B. Madsen and H. Lilholt, "Guidelines for mechanical design with biocomposites: properties, weight and cost," *JEC Mag.*, vol. 37, 2007.
- [18] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, and T. M. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Compos. Part A*, vol. 83, pp. 98–112, 2016.
- [19] V. Fiore, A. Valenza, and G. Di Bella, "Mechanical behavior of carbon/flax hybrid composites for structural applications," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 17, pp. 2089–2096, 2012.
- [20] Z. Mahboob, I. El Sawi, R. Zdero, Z. Fawaz, and H. Bougherara, "Tensile and compressive damaged response in Flax fibre reinforced epoxy composites," *Compos. Part A*, vol. 92, pp. 118–13, 2017.
- [21] A. Chilali, W. Zouari, M. Assarar, H. Kebir, and R. Ayad, "Effect of water ageing on the load-unload cyclic behaviour of flax fibre-reinforced thermoplastic and thermo-setting composites," *Compos. Struct.*, vol. 183, no. 1, pp. 309–319, 2017.
- [22] V. Placet, F. Trivaudey, O. Cissé, and M. L. Boubakar, "What are the possible origins of the nonlinear tensile behaviour of hemp fibres ?," *Int. Conf. Compos. Mater.*, 2014.
- [23] S. Prabhakaran, V. Krishnaraj, M. Senthil Kumar, and R. Zitoune, "Sound and vibration damping properties of flax fiber reinforced composites," *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 573–581, 2014.

[24] U. Kling, D. Empl, O. Boegler, and A. T. Isikveren, “Future Aircraft Wing Structures Using Renewable Materials,” in Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2015, 2015.

5 Zusammenarbeit mit andern Stellen

Während der gesamten Projektlaufzeit fand eine enge und sehr kooperative Zusammenarbeit zwischen allen Verbundpartnern statt. Zwecks optimaler Koordination der Arbeiten und des reibungslosen Projektfortschrittes fanden im zweiwöchigen Rhythmus gemeinsame Telefonkonferenzen statt. Ferner wurden planmäßig Meilenstein- und Projekttreffen sowie Treffen zur Fertigung von Verbundhalbzeugen und Musterbauteilen durchgeführt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Durchgeführte Projekttreffen

Datum	Art des Treffens	Ort
11.02.2021	Projektaufakt	TUM, München
21.07.2021	1. Meilenstein	TUM, München
21.-23.11.22	Fertigung des Referenzbauteils	Invent GmbH, Braunschweig
23.03.2023	2. Meilensteintreffen	IfBB, Hannover
03.07.2023	Fertigung des Referenzbauteils	Invent GmbH, Braunschweig
25.-26.10.2023	3. Meilenstein, Fertigung	TUM, München
25.01.2024	Abschlusstreffen	TUC, Chemnitz
12.06.2024	Werksbesuch	EDM Aerotech GmbH, Geisleden

Da im Verbundprojekt keine direkte Beteiligung der Industrie vorgesehen war, fand der Austausch mit industriellen Partnern nur begrenzt statt. Vielmehr fand der Austausch auf Luftfahrtmessen und Fachsymposien, wie z.B. DLRK 2021/22, statt. So konnte der aktuelle Wissens- und Technologiestand rund um moderne Luftfahrtwerkstoffe, Fertigungstechnologien sowie Innovationen in der Hubschrauberentwicklung und dem -bau verbessert und sichergestellt werden. Ferner ermöglichten die Messebesuche die Kontaktaufnahme zu weltmarktführenden Unternehmen und ihren Zulieferern sowie das Auskundschaften von Erfahrungswerten und Intentionen im Hinblick auf den Einsatz von funktionsintegrativen und ressourcenschonenden biogenen hybriden Faser-Kunststoff-Verbunden im zivilen Flugzeug- und Hubschrauberbau.

II Eingehende Darstellung

6 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

6.1 HAP 3: Strukturmechanische Simulation und Auslegung

Das Ziel des HAP 3 war die Erarbeitung eines ganzheitlichen technologischen Lösungsansatzes für numerische Auslegung und Simulation von hybriden NFK-Verbunden unter Verwendung moderner Topologie- und Materialoptimierungsverfahren, wobei fertigungstechnische Aspekte variablxialer Fertigungsverfahren in Betracht gezogen werden sollten.

6.1.1 AP 3.1: Verifizierung von aktuellen Material- und Topologie-Optimierungsansätzen

Wie die Ergebnisse vom Vorgängerprojekt InteReSt I (FKZ: 20E1501A) verdeutlichen, erfordert der Einsatz von partieller, variabelaxialer Verstärkung aus hochsteifen C-Fasern zwecks einer beanspruchungs-/fertigungsgerechten Gestaltung und Auslegung ein detailliertes Verständnis über den vorliegenden Spannungszustand im Bauteil bei verschiedenen Lastszenarien. Um diesem Ziel einen Schritt näher zu kommen, wurde im AP 3.1 ein aktuelles CAD-Modell der linken Kabinentür des UHL CoAx2D (von der Fa. EDM Aerotec GmbH) aufgebaut und mittels kommerziell verfügbaren FE-Tools mit wesentlichen im Lastenheft beschriebenen Lastszenarien berechnet. Als Laminataufbau wurde ein zweilagiges [0; 45]-Laminat aus CF-Prepreg mit 200 g/m² Flächengewicht definiert. Dieser Laminataufbau wird in der aktuellen Bauteilproduktion eingesetzt. Die jeweiligen Verformungen und resultierenden Anstrengungen werden im weiteren Verlauf als Referenzgrößen für die nachfolgende Bauteilauslegung verwendet.

Verfahren zur Gestaltung von Leichtbauteilen mittels Topologieoptimierung haben sich bereits für die Auslegung von Bauteilen aus isotropen Konstruktionswerkstoffen etabliert. Hierbei dominiert vor allem das zu den Homogenisierungsmethoden zählende Solid-Isotropic-Material-with-Penalization(SIMP)-Verfahren, welches bereits in den meisten Optimierungstools integriert ist. Hierdurch ist es möglich, ausgehend von einem definierten Designraum entscheidende lasttragende Strukturbereiche zu ermitteln. Mithilfe der implementierten Optimierungsalgorithmen werden dreidimensionale Designvorschläge generiert, welche insbesondere bei der Überlagerung mehrerer Lastfälle zu sinnvollen Strukturentwürfen führen. Die generierten Lösungen können bei der Auslegung von Faserverbundkonstruktion für die Definition von variabelaxial verstärkten Bereichen verwendet werden.

In jüngerer Zeit wurden mithilfe einer direkten makroskopischen Beschreibung, Elastizitätstheorie oder mit Einsatz mikroskopischer Ersatzmodelle, Verfahren zur Topologieoptimierung unter Beachtung anisotroper Materialeigenschaften entwickelt. Die hierdurch optimierten Strukturentwürfe weisen jedoch keine diskreten Strukturbereiche auf und bedürfen hinsichtlich einer variabelaxialen FKV-Fertigung entweder einer manuellen Beurteilung bzgl. einer diskreten Strukturaufteilung oder einer nachträglichen Ableitung von Trajektorien auf Basis des berechneten Hauptrichtungsvektorfelds, ähnlich dem Vorgehen bei isotropen Werkstoffen. Leider konnten im Zuge einer umfassenden Recherche keine kommerziell verfügbaren Softwaretools gefunden werden, in welchen derartige Optimierungsansätze implementiert sind. Ferner werden bei den bereits erwähnten Materialoptimierungsansätzen, die bei einer TFP-Verstärkung entstehenden lokalen Dickenvariationen und somit auch variierenden Steifigkeitsverteilungen quer zur Faserrichtung bisher aus Gründen einer vereinfachten FE-Modellbildung nicht berücksichtigt. Daher sollten die Ergebnisse der iso-/anisotropen topologischen Strukturoptimierung nur als Designvorschläge betrachtet werden.

In Abbildung 4 sind die analysierten kommerziellen/freiverfügbaren Lösungen für die Durchführung einer Topologieoptimierung an Bauteilen mit isotropen, idealelastischen Materialverhalten dargestellt. Umfassende Recherche und die ersten Tests zeigten, dass die Möglichkeiten und die Rechenzeiten bei Hyperworks, Ansys Workbench und Abaqus vergleichbar sind. Diese unterscheiden sich vielmehr im Pre-/Postprozessor sowie der Geometrierückführung des optimierten Modells. Bei allen drei Programmen kann das Topologieoptimierungsergebnis als STL-Datei exportiert und anschließend in einem CAD-Programm geometrisch aufbereitet werden. Das nichtkommerzielle Programm Z88 Arion ist den kommerziellen Lösungen deutlich unterlegen.

Um numerische Untersuchung der Anwendbarkeit von verschiedenen Material- und Topologieoptimierungsansätzen, wie z.B. Hauptspannungsoptimierung, Lastpfad-Methode, Fully Stress Design (FSD) oder Homogenisierungsmethode durchführen zu können, wurde die Kabinentür zunächst aus einem idealelastischen isotropen Material als Schalenmodell ausgelegt und die Lastszenarien definiert. Anschließend wurden, wie in der Abbildung 5 dargestellt, folgende Berechnungsschritte eingeleitet:

1. Definition des Designraumes
2. Formulierung des Optimierungsproblems: Minimiere die mittlere Nachgiebigkeit unter Einhaltung einer Gewichtsrestriktion oder Minimiere Gewicht bei gleichbleibender Nachgiebigkeit (Ziel-/Nebenfunktionen)
3. Optimierungsrechnung im Solver (unter Nutzung analytischer Gradienten der Ziel- und Restriktionsfunktionen nach den Entwurfsvariablen)
4. Auswertung des Designvorschlags und Export der Daten als STL-Datei
5. Aufbereitung der Geometrie im CAD-Programm

6. Geometrierückführung und erneute Berechnung der Hauptspannungen

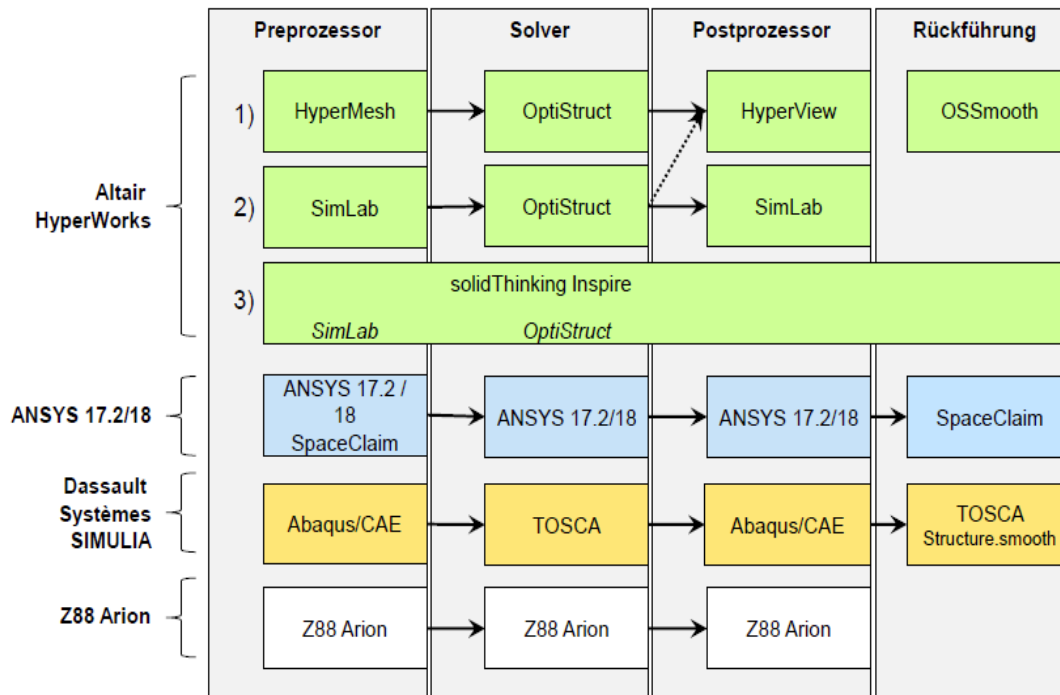


Abbildung 4: Verfügbare Programmsysteme für die Durchführung der Topologieoptimierung

Anschließend wurden die Hauptspannungsverläufe analysiert, die eine Grundlage für die Ableitung von Trajektorien für die TFP-Geometrie darstellen. Diese Ergebnisse fließen in AP 3.4 ein, wo die TFP-Verstärkungsstrukturen definiert und numerisch berechnet werden. Aus der Sicht der ganzheitlichen numerischen Auslegung von biogenen Verbundbauteilen mit TFP-Verstärkung wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei FE-Tools (Hyperworks und Ansys Workbench) für die Durchführung der Material-/Topologieoptimierung ausgewählt und werden im Laufe des Arbeitspaketes miteinander verglichen. Ferner wird für die Ableitung der TFP-Geometrie eine Free Size Analysis (FSA) mittels OptiStruct im FE-Tool Hyperworks durchgeführt. An dieser Stelle ist zu sagen, dass FSA sich als eine praktikable und relativ schnelle Lösung erwiesen hat.

6.1.2 AP 3.2 Analyse der Anwendbarkeit etablierter Versagenskriterien auf hybride Naturfaserverbunde

Entwicklung eines Prüfstandes zur Untersuchung des Bruchverhaltens infolge eines überlagerten Spannungszustandes

Ein wichtiger Punkt bei der Auslegung von sicherheitsrelevanten Verbundbauteilen ist die Kenntnis des Versagensverhaltens bzw. Bruchverhaltens infolge eines überlagerten Spannungszustandes. Die in einachsigen Versuchen an Flachprobekörpern ermit-

telten Basisfestigkeiten können nur bedingt zur Verifizierung von wirkebenenbezogenen Zwischenfaserbruchkriterien (z.B. nach Puck, Cuntze, LaRC usw.) herangezogen werden. Als ein geeignetes Prüfverfahren zur Ermittlung des überlagerten ebenen $\sigma_1 - \tau_{12}$ - bzw. $\sigma_2 - \tau_{21}$ -Spannungszustandes bei dünnwandigen Laminaten hat sich in der Vergangenheit neben den zur Qualitätssicherung eingesetzten Prüfmethoden, wie der Stirnabzugsversuch nach DIN 53 397, Ring- und Segmentscherversuch nach DIN 53769 oder Kurzbiegeversuch sowie Schälversuch DIN EN ISO 14130, die Zug-/Druck-Torsionsprüfung (Z/D-T-Versuch) an parallel und tangential gewickelten Rohrprobekörpern etabliert. Ferner kann mithilfe des Z/D-T-Versuchs auch der kritische Bruchwinkel ermittelt werden. Trotz hoher Genauigkeit bei der Ermittlung der Schub Eigenschaften, ist der Z/D-T-Versuch bisher nicht genormt.

Die Voraussetzung für die Fertigung von reproduzierbaren Rohrprobekörpern für den Z/D-T-Versuch stellt das Vorhandensein eines endlosen Multifilamentgarns aus parallel angeordneten Filamenten, des sog. Rovings, dar. Zum aktuellen Zeitpunkt existieren noch keine kommerziell verfügbaren und qualitativ hochwertigen Flachsfaser-Rovings. Zwar sind schwach verdrehte Flachsfasergarne (Low-Twist-Garne) verfügbar, die für das Faserwickeln eingesetzt werden können, jedoch sind die mechanischen Eigenschaften denen der Flachsfaser-Prepregs deutlich unterlegen. Zahlreiche Versuche des tangentialen Prepregwickelns oder Wickelns mithilfe der UD-Gelegebändern zeigten aufgrund der Faltenbildung keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein neues Prüfverfahren zur Erzeugung eines überlagerten $\sigma_1 - \tau_{12}$ - bzw. $\sigma_2 - \tau_{21}$ -Spannungszustandes entwickelt, welches es zum Ziel hat durch Einsatz von Flachprobekörpern den Z/D-T-Versuch signifikant zu vereinfachen und perspektivisch abzulösen.

Ableitung und Analyse der Probekörpergeometrie

Beim Z/D-T-Versuch wird der an den Enden aufgedickte Rohrprobekörper in der Z/D-T-Prüfmaschine eingespannt und zeitparallel mit axialer Zug/Druck- und Torsionsbelastung beaufschlagt. Mittels DMS werden die induzierten Dehnungen und mittels Kraft- und Drehmomentaufnehmern die Lasten aufgezeichnet. Mithilfe des Querkzug-/Querkdruck-Schub-Verhältnisses kann die Bruchkurve der $\sigma_2 - \tau_{21}$ -Spannungsebene ermittelt und der Bruchwinkel untersucht werden (Abbildung 6).

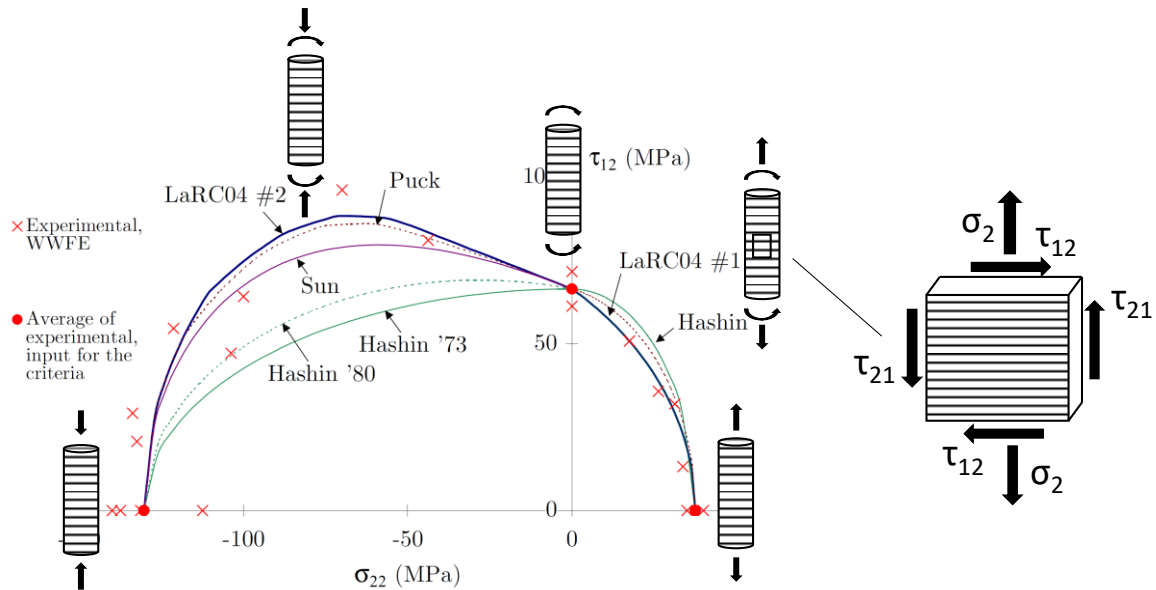


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Belastungskombination beim Z/D-T-Versuch und entsprechende Zuordnung auf der $\sigma_2 - \tau_{21}$ -Spannungsebene sowie resultierender Spannungszustand im Probenausschnitt (Zfb-Kurve aus WWFE)

Wird beim Z/D-T-Versuch der Spannungszustand im infinitesimalen Ausschnitt des Rohrprobekörpers bei überlagerter fasersenkrechten Querkzug-Schub-Belastung betrachtet, so stellt sich ein Spannungszustand, wie in Abbildung 7 dargestellt, ein. Die Schubspannungskomponente τ_{12} wirkt parallel und die Spannungskomponente σ_2 senkrecht zur Faser. Nach der CLT führt die Laststeigerung zur Ausbildung eines Spannungsvektors, welcher sich wie folgt berechnet

$$\sigma_{res.} = \sqrt{\sigma_2^2 + \tau_{12}^2} .$$

er überlagerte Querkzug-/Querkdruck-Schubspannungszustand lässt sich theoretisch auch in einem gekerbten Schub-Probekörper, wie z.B. dem Iosipescu-Probekörper nach ASTM D5379, realisieren, indem die σ_2 -Spannungskomponente zeitparallel durch Querkzug-/Querkdruckbelastung erzeugt wird. Dafür müssen unbelastete Probenbereiche fest eingespannt werden (Abbildung 7 (a und b)), mit der Folge, dass der Messbereich verkleinert wird und sich neben den resultierenden Randeffekten abweichende Normal- und Schubspannungsverteilungen einstellen. Dieser Versuchsaufbau ähnelt dem Rail-Shear-Versuch nach ASTM D7078, wobei hier ein kleinerer Probekörper zum Einsatz kommt. Durch eine Kerbung der Probe kann der Ort des Versagens festgelegt werden und eine Spannungsüberhöhung und damit ein Versagen in den Lastenleitungsbereichen ausgeschlossen werden. In der Literatur wurden Ergebnisse der Quervergleiche von Rohrprobenexperimenten und Iosipescu-Versuchen für unidirektional verstärkte CFK-Lamine vorgestellt. Im Ergebnis konnte für Schubsteifigkeiten als auch für die -festigkeiten gute Übereinstimmungen gezeigt werden. Dies lässt

die Annahme zu, dass der Iosipescu-Probekörper für die nachfolgende Prüfstandentwicklung geeignet sein könnte.

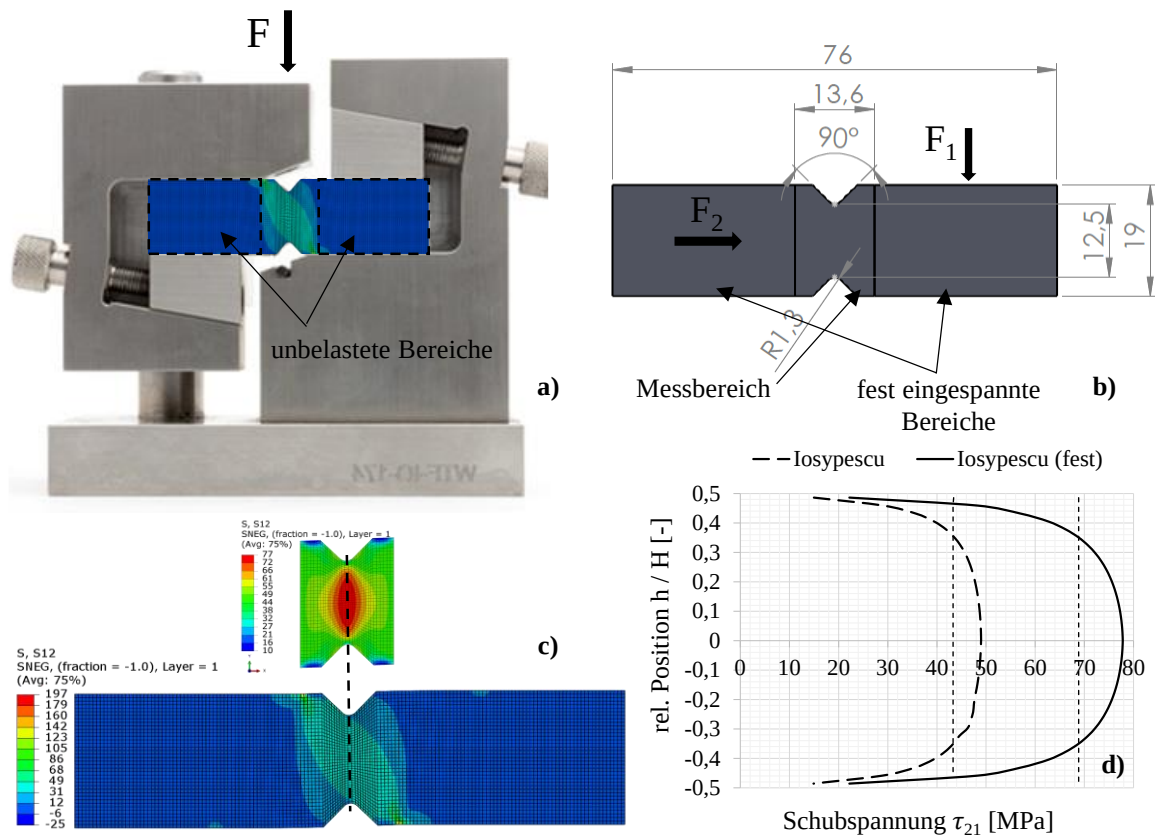


Abbildung 7: Schubspannungsverteilung in einer frei gelagerten und fest eingespannten Iosipescu-Probe mit einer 90°-Faserorientierung bei einer relativen Verschiebung der Probehalterung von 0,5 mm (simuliert mit Anfangs-Sekantenmoduln, Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio)

Um den resultierenden Spannungszustand besser abzuschätzen, wurde exemplarisch eine FE-Analyse mit einer frei gelagerten und einer fest eingespannten Iosipescu-Probe mit 90°-Faserorientierung bei einer relativen Verschiebung der Probehalterung von 0,5 mm durchgeführt. Der resultierende Schubspannungszustand ist in Abbildung 7 (c) dargestellt. Um einen besseren quantitativen Vergleich der Schubspannungsverteilung über die Probenhöhe im gekerbten Bereich zu erhalten, wurden die Knotenspannungen entlang der Symmetrieachse ausgelesen (Abbildung 7 (d)).

Bei der fest eingespannten Iosipescu-Probe stellt sich eine andere τ_{12} -Verteilung ein. Die linsenförmige τ_{12} -Konzentration findet unmittelbar im gekerbten Bereich statt, was das Versagen entlang der Kerbe begründet. Ferner weisen beide Proben eine parabolische Schubspannungsverteilung über die Probenhöhe auf, wobei die τ_{12} -Werte in der fest eingespannten Iosipescu-Schubprobe bei gleicher Verformung um mehr als 50 % höher sind. Proben mit einer Faserorientierung in 0°-Richtung zeigen ein umgekehrtes Verhalten mit einem lokalen Schubspannungsminimum in der Probenmitte und einem lokalen -maximum im Bereich der Kerbung (Abbildung 8).

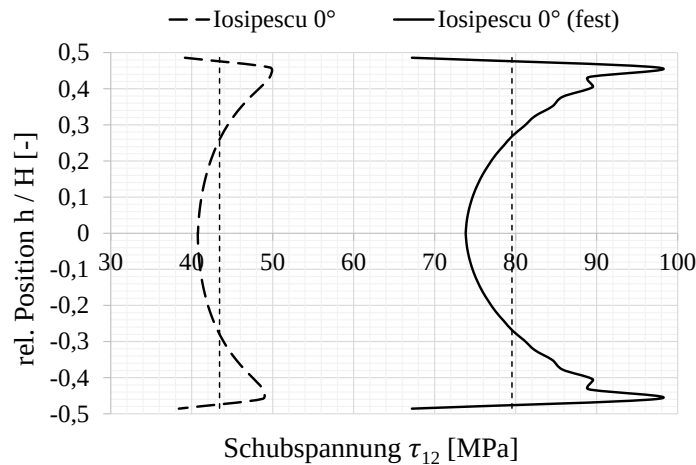


Abbildung 8: Schubspannungsverteilung in einer frei gelagerten und fest eingespannten Iosipescu-Probe mit einer 0°-Faserorientierung bei einer relativen Verschiebung der Probehalterung von 0,5 mm (Simuliert mit Anfangs-Sekantenmoduln, Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio)

Durch die Verlagerung der Krafteinleitung weiter nach Außen kann theoretisch ein homogenerer Schubspannungsverlauf eingestellt werden, wobei hier mit höheren Normalspannungen zu rechnen ist. Als Folge des Versuchsaufbaus stellen die im Versuch ermittelten τ_{12} -Werte nur durchschnittliche Schubspannungswerte dar. Dieser Sachverhalt wird in der Literatur ausführlich diskutiert und Korrekturmethode für die Abschätzung der Höhe der Schubspannungsspitzen vorgeschlagen. Sowohl die mittels halbempirischer als auch mittels FE-basierter Ansätze errechneten Korrekturfaktoren zeigen eine gute Übereinstimmung und bewegen sich im Bereich $f_{korr.} \in [1,087; 1,132]$. Vereinfachte Form der Schubspannungskorrektur für Spannungsspitzen kann wie folgt beschrieben werden

$$f_{korr.} = \frac{\tau_{12}^{eff}}{\frac{F}{A_0}} \equiv \frac{1}{A_0} \int \tau_{12}^{eff} dA_0 \quad .$$

Fraglich ist jedoch, ob die lokalen Schubspannungsspitzen oder die akkumulierte Gesamtenergie für das Totalversagen des Probekörpers unsächlich ist. Ferner ist anzumerken, dass in keiner Norm zur Bestimmung der Schubkennwerte von FKV

Schubspannungskorrekturen vorgesehen sind. Dies kann neben der Art der Prüfung ein weiter Grund für Messwertdiskrepanzen bei Anwendung unterschiedlicher Normen sein.

Die mittels FE-Analyse ermittelten Korrekturfaktoren für die Berechnung effektiver Schubspannungswerte bei frei gelagerte und fest eingespannten losipescu-Proben mit einer 0°- und 90°-Faserorientierung sind in der Tabelle 3 zusammengefasst. Diese weisen eine gute Übereinstimmung mit der Literatur auf.

Tabelle 3: Mittels FE-Analyse berechneten Korrekturfaktoren für eine frei gelagerte und fest eingespannte losipescu-Probe mit 0°- und 90°-Faserorientierung

Proben-art	Faserorientie-rung	$f_{korr.}$
losipescu	0°	1,143
	90°	1,1305
losipescu (fest)	0°	1,125
	90°	1,31

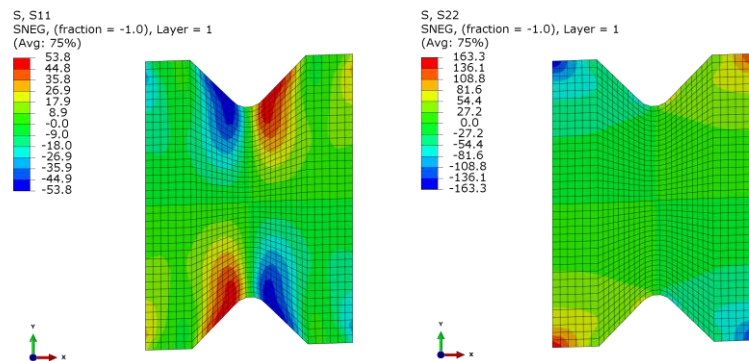


Abbildung 9: Normalspannungen in der fest eingespannten losipescu-Probe mit einer 90°-Faserorientierung bei einer relativen Verschiebung der Probehalterung von 0,5 mm (Simuliert mit Anfangs-Sekantenmoduln, Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio)

Ein weiterer Punkt bei der Beurteilung der Eignung der Probekörpergeometrie ist der Einfluss der eingespannten Ränder. Infolge einer Einspannung bedingten vorzeitigen Probekörperversagens werden die Maximalwerte nicht erreicht und so die Festigkeiten zu niedrig angesetzt. So beispielsweise führt beim Off-Axis-Zugversuch der unausgeglichene Laminataufbau zum Einspannversagen des Probekörpers. In Abbildung 9

dargestellte σ_1 - und σ_2 -Plots veranschaulichen die Spannungskonzentration im Bereich der festen Einspannung. So ist zu sehen, dass bei der σ_2 -Verteilung mit hohen lokalen σ_2 -Maxima im Einspannbereich zu rechnen ist. Wie in der Literatur detailliert dargestellt, kann bei Proben mit einer Faserorientierung in 90°-Richtung bei hohen γ_{12} -Werten zum Zfb-Versagen im Einspannbereich kommen. Für Gleitungen bis 5 % ist erfahrungsgemäß mit keinem Einspannversagen zu rechnen. Die Grenze von 5 % ergibt sich aus den strukturmechanischen Überlegungen, da bei großen Verformungen das jeweilige zugrunde liegende mechanische Prinzip nicht mehr gewährleistet und mit einem undefinierten Spannungszustand zu rechnen ist.

Vorrichtung zur überlagerten Krafteinleitung

Als Basis für die Entwicklung eines Prüfstandes zur Erzeugung eines überlagerten Spannungszustandes dient die Zug-/Druck-Torsionsprüfmaschine der Fa. Zwick/Roell GmbH vom Typ Z250. Hiermit kann das zu prüfende Material bis 250 kN belastet und zeitparallel mit einem Torsionsmoment bis 2000 Nm tordiert werden. Die konstruktiv-technische Herausforderung bei der Entwicklung der Krafteinleitungsvorrichtung stellt die Transformation des von der Prüfmaschine erzeugten Drehmomentes in eine lineare Kraft in der y-Achse ohne Kraftbehinderung in der x-Achse dar. Im Wesentlichen soll die Vorrichtung folgende Anforderungen erfüllen:

- Drehmomenttransformation in lineare Zug-/Druckkraft bis mind. 10 kN
- Separat steuerbare und voneinander entkoppelte x- und y-Achse
- Separate Kraft- und Dehnungsmessung für Schub- sowie Zug-/Druckbelastung
- Feste Einspannung des Prüfkörpers und leichte Zugänglichkeit für Probenwechsel
- Zugang für optische Messsysteme
- Verwindungssteife und reibungsreduzierte Konstruktion

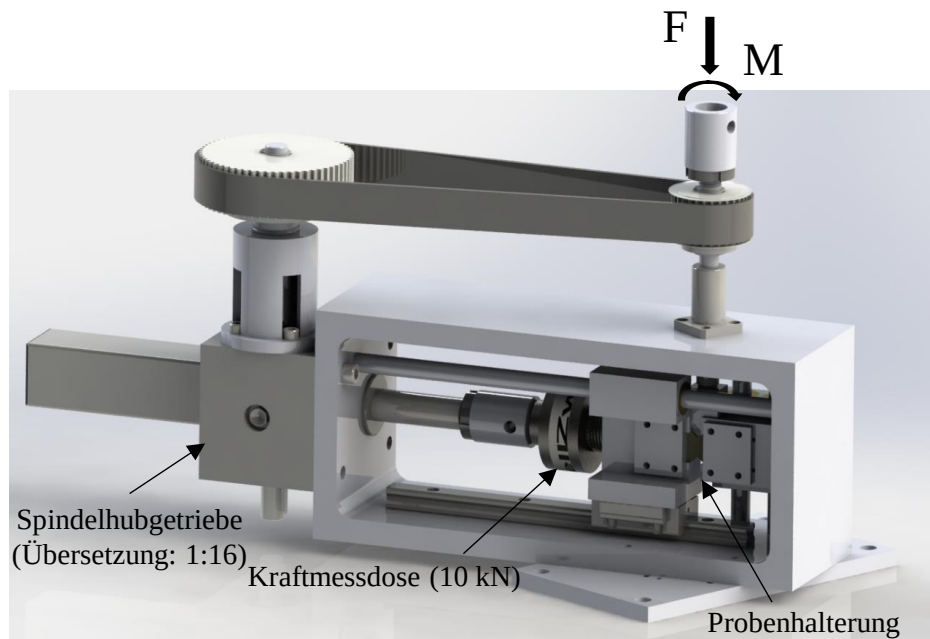


Abbildung 10: Rendering der CAD-Konstruktion der Krafteinleitungsvorrichtung

Abbildung 10 veranschaulicht die entstandene CAD-Konstruktion. Hierbei kommt zur Drehmomenttransformation ein 10 kN Spindelhubgetriebe mit einer Übersetzung von 1:16 und einem Hub von 0,25 mm/U zum Einsatz, welches mittels Zahnriementriebs mit einer Übersetzung von 1:2 in Bewegung gesetzt wird. So ergibt sich ein finaler Hub von 0,125 mm/U und die Möglichkeit die Kraft präzise einzustellen. Das rechte Teil der Probehalterung ist analog zur Iosipescu-Prüfvorrichtung konzipiert. Für bessere Seitenkraftstabilität und präzise Bewegung kommen zwei kugelgelagerte Linearwellen zum Einsatz, wobei die Antriebswelle derart 2-fach gelagert ist, dass eine zeitparallele axiale (x-Achse) und radiale Bewegung (Drehmomentübertragung) möglich sind. Die linke Probehalterung ist 2-fach mittels Linearwelle und Profilschienenführung gelagert, so dass nur eine Bewegung in der y-Achse zulässig ist. Die Kopplung der linken Probehalterung und des Spindelhubgetriebes erfolgt mittels 10 kN Kraftessdose, welche zur direkten Kraftaufzeichnung genutzt wird. Der Iosipescu-Probekörper wird in der Prohalterung mit zwei Spannplatten mittels Schrauben gegen das Verrutschen gesichert. Dabei weisen die Spannplatten sowie die Probenkavität ein pyramidenartiges Oberflächenmuster auf. Zur Dehnungsmessung kommen beidseitig insgesamt 3 DMS zum Einsatz, eine $\pm 45^\circ$ -Messrosette mit 2 DMS für die Schubverzerrungen und 1 DMS für die Längs- oder Querdehnung. Für die vollständige Signalerfassung wurde bei der Prüfmaschine weitere DMS-Messboxen und Signalerfassungskarten nachgerüstet.

Inbetriebnahme des Prüfstandes

Abbildung 11 veranschaulicht die im Technikum der TUC hergestellte Krafteinleitungs-vorrichtung. Als Prüfmaschine wird die Zug-/Druck-Torsionsprüfmaschine der Fa. Zwick/Roell GmbH vom Typ Z250 verwendet. Die Vorrichtung ist Spindelhubgetriebe-art bedingt nur bis einer Querkraft von 10 kN einsetzbar. Vorversuche zeigten, dass für eine exakte Probekörperherstellung das Fräsen besser als das Laser- oder Was-serschneiden geeignet ist. Die Inbetriebnahme und die Vorversuche wurden mit einem GF-PP-Organoblech durchgeführt. Dabei wurde unterschiedlich Lastkombination aus-geprobt und Besonderheiten der Versuchsdurchführung untersucht. Anschließend er-folgten Tests mit UD-Proben aus Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio.

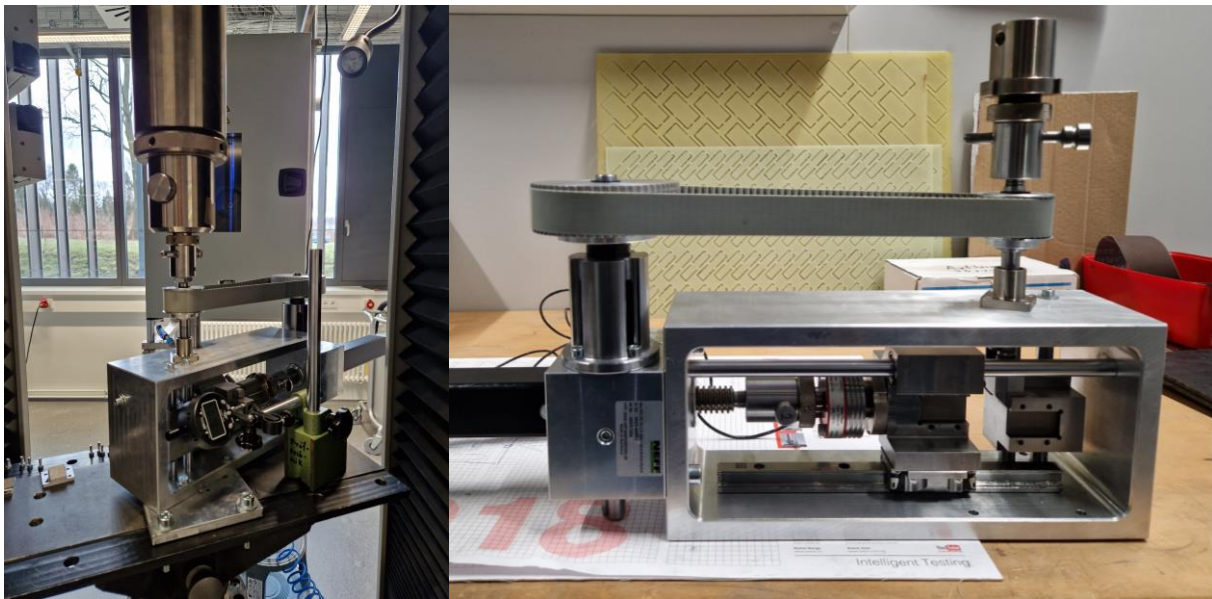


Abbildung 11: Im Technikum der TUC hergestellte Prüfvorrichtung zur Erzeugung ei-nes überlagerten $\sigma_2 - \tau_{21}$ - Spannungszustandes im Iosipescu-Schubprobekörper

Abbildung 13 zeigt exemplarisch Ergebnisse eines Querdruck-Schub-Versuchs mit ei-ner Spindelgeschwindigkeit von 720°/min (entspricht einem Hub von 0,25 mm/min) und einer Traversengeschwindigkeit von 0,25 mm/min, was einem Verhältnis von 1:1 entspricht. In Abbildung 13 (links) ist die Kraftantwort der beiden Kraftaufnehmern dar-gestellt. Der Grund für die Welligkeit des Kurvenverlaufs liegt in der Reibung im Ge-triebe der Spindelhubpresse (Trapezgewindespindel). Im Falle eines Kugelgewinde-spindels müssten die Reibungsverluste und somit die Welligkeit des Kurvenverlaufs kleiner sein. Gut zu sehen ist, dass der Kraftverlauf bei beiden Kraftaufnehmern nicht linear ist. Nach Erreichen einer maximalen Kraft im Zuge der Querdruckbelastung

fängt das Nachversagen an. Interessant, dass die maximalen Kraftwerte bei Querdruck- und Schubbelastung zu unterschiedlichem Zeitpunkt festzustellen sind.

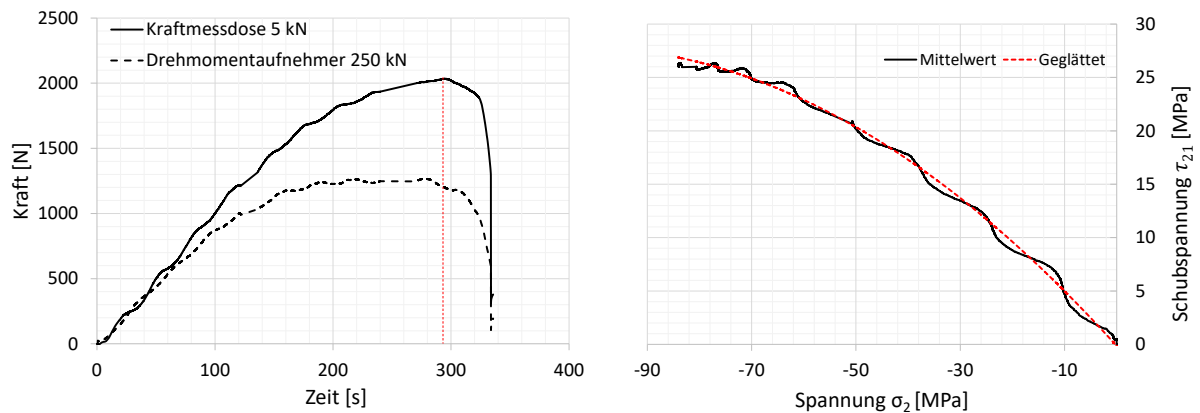


Abbildung 13: Ergebnisse der Prüfung bei einem Verhältnis (Querdruck/Schub) von 1:1

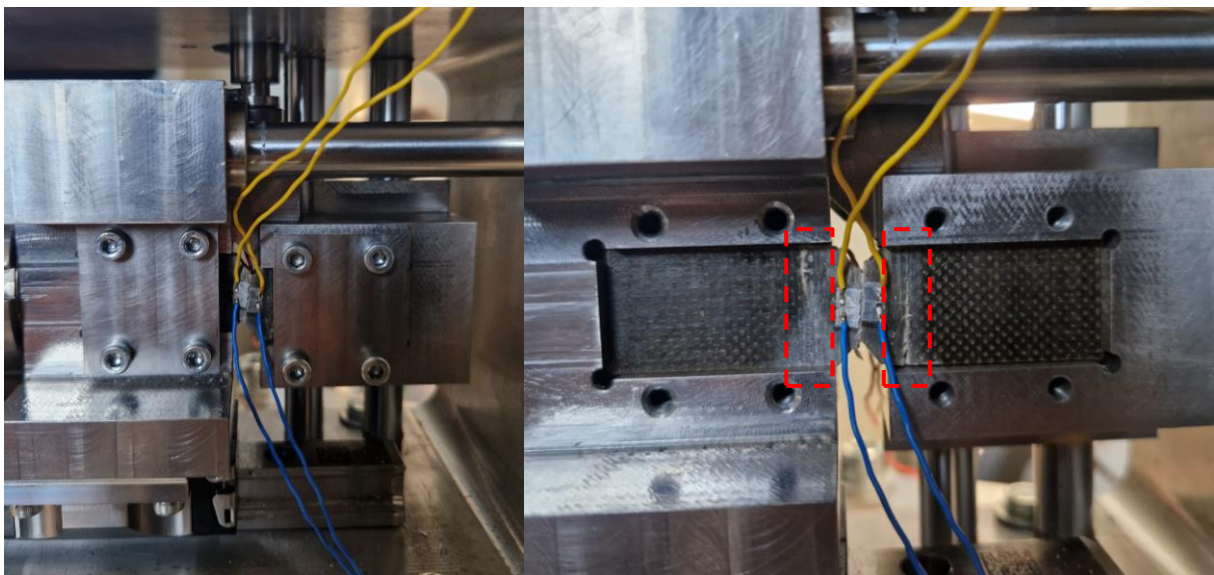


Abbildung 12: Geschlossene Probenhalterung mit applizierter DMS-Rosette (links). Offene Probenhalterung mit einem gut erkennbaren Schubbruch im gekerbten Bereich und einem Einspannversagen (rechts)

In Abbildung 13 (rechts) ist der $\sigma_2 - \tau_{21}$ -Verlauf dargestellt. Wie hier gut zu sehen ist, ist der $\sigma_2 - \tau_{21}$ -Verlauf nicht linear. Dieses Phänomen ist aus der Literatur gut bekannt und wird bei Auslegung von Faserverbundbauteilen mithilfe der Klassischen Laminattheorie (CLT) nicht berücksichtigt. Das Problem, welches hieraus resultiert, dass für einige Lastkombinationen, besonders bei $\sigma_2 < \tau_{21}$, mit CLT falsche Zwischenfaserbruchanstrengungen und infolgedessen falscher Zwischenfaserbruchmodus ausgerechnet wird. Anstatt eines vorhergesagten und tolerierbaren Zfb Modus B bildet sich ein kritischer, keilartiger Zfb Modus C aus. Um die Zfb-Kurve detailliert abzubilden, werden

zahlreiche $\sigma_2 - \tau_{21}$ - Kombinationen untersucht. Die vollständige Darstellung der $\sigma_2 - \tau_{21}$ - Zwischenfaserbruchkurve findet sich im Schlussbericht.

Als Ergänzung ist in der Abbildung 12 das Einspannversagen dargestellt. Dieses bildet sich erst nach Überschreitung des Kraftmaximums aus und ist als Folge des Nachversagensverhaltens zu werten. Primäre Versagensart ist das Schubversagen im gekerbten Bereich.

Ergebnisse der Prüfung

Abbildung 14 veranschaulicht die Ergebnisse der mechanischen Prüfung mit überlagertem $\sigma_2 - \tau_{21}$ - Spannungszustand. Im Diagramm sind die Durchschnittskurven (mind. 5 Proben) mit unterschiedlichem Spannungsverhältnis $\Omega = \sigma_2/\tau_{12}$ (gestrichelt) und deren geglättete Verläufe dargestellt. Zusätzlich ist die mit gewonnenen Kennwerten berechnete Zwischenfaserbruchkurve nach Puck96 eingezeichnet.

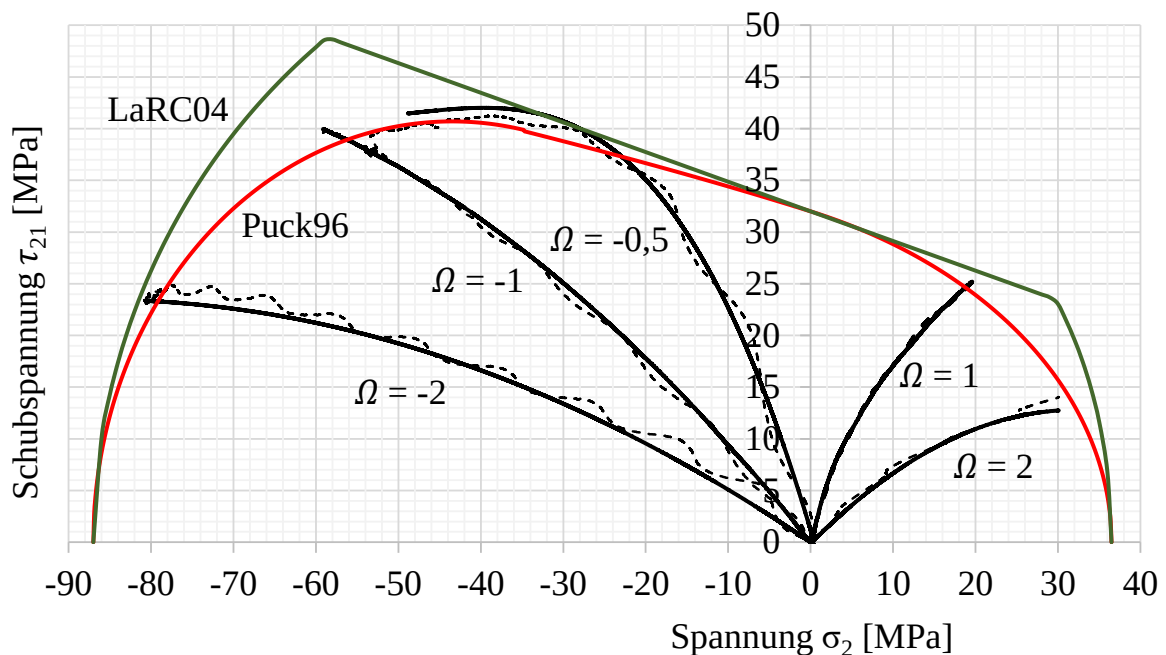


Abbildung 14: Ergebnisse der mechanischen Untersuchung mit überlagertem $\sigma_2 - \tau_{21}$ - Spannungszustand und eingezeichneten Zfb-Kurven nach Puck96 (rot) und LaRC04 (olivengrün). Dargestellt sind Durchschnittskurven (mind. 5 Proben) mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen $\Omega = \sigma_2/\tau_{12}$ (gestrichelt) und deren geglättete Verläufe (durchgezogen).

Die $\sigma_2 - \tau_{21}$ - Durchschnittskurven (gestrichelt) weisen einen welligen Verlauf auf. Dieser lässt sich durch die Reibung in einem Element der Krafteinleitungsvorrichtung begründen. Dieses soll in zukünftigen Arbeiten optimiert werden. Um die Verläufe besser darzustellen, wurden die Durchschnittskurven geglättet. Wie aus der Literatur für andere FKV bekannt und für Flachsfaserverbundstoffe vermutet, weisen die Kurvenverläufe keine Linearität auf. Besonders bei Schubspannung dominiertem Spannungsverhältnis von $\Omega = -2$ kommt es nach Überschreitung der Zfb-Kurve im Modus B aufgrund

der progressiven Materialschädigung zum stark degressiven Kurvenverlauf. Bemerkenswert ist die Genauigkeit der Vorhersage nach Puck96-Hypothese. Die gemessenen Festigkeitswerte liegen entweder auf oder knapp über der berechneten Kurve (rot). Hiermit konnte erstmalig mit einem neuartigen Prüfverfahren die Nichtlinearität der Kurvenverläufe empirisch nachgewiesen als auch die Zfb-Kurve experimentell verifiziert werden.

6.1.3 AP 3.3: Anpassung des Materialmodells und Validierung numerischer Modellansätze für hybride Verbunde

Numerische Implementierung des nichtlinearelastischen Materialverhaltens von Flachsfaserverbunden

Die numerische Implementierung erfolgt im FEA Programm ABAQUS/Standard. Theoretisch besteht die Möglichkeit das orthotrope nichtlineare Materialverhalten als UMAT- oder USDFLD-Subroutine zu implementieren. Bei UMAT wird das konstitutive Materialverhalten für jeden Materialpunkt direkt in der Subroutine definiert, während bei USDFLD lösungsabhängige Materialeigenschaften verwendet werden, welche als Funktionen von Feldvariablen an einem Materialpunkt definiert sind. Es wird praktisch bei jedem Integrationsschritt auf die im vorgeschalteten Schritt berechneten Datenfelder zugegriffen, um mit entsprechenden Daten eine Elastizitätsmatrix zu bilden. Die Datenfelder können beispielsweise deskritisierte nichtlineare Spannung-Verzerrungs-Beziehungen, Wandstärke abhängigen Materialeigenschaften (FGM) oder progressive Schädigungsmodelle beschreiben. Im Vergleich zu UMAT benötigt USDFLD weniger Rechenkapazitäten, was zur einer schnelleren Berechnung führt. Ferner ist USDFLD in seiner Struktur weniger komplex. Mit USDFLD können jedoch keine energiebasierten oder komplexen mikromechanischen Konstitutivmodelle umgesetzt werden. Wie die Literaturübersicht zeigt, wurden bis Dato auch keine komplexen nichtlinearen orthotropen elasto-plastischen Materialmodelle mit USDFLD realisiert.

Nachfolgend wird eine Umsetzungsmöglichkeit vorgestellt, wie das Materialverhalten von NFKV mittels USDFLD und einem vorgeschalteten Python-Skript zur Berechnung von Material-Datenfeldern implementiert werden kann. Ferner wird in USDFLD das Versagen nach Puck für ebenen Spannungszustand mit anschließender Versagensart abhängigen Materialdegradationsformulierung gekoppelt. Abbildung 15 veranschaulicht das Flussdiagramm des entwickelten Rechenablaufs. Als Grundlage für die Approximation der richtungsabhängigen Spannungs-Verzerrungs-Verläufen dienen die gemittelten Messwerte (Längs-/Querzug, Längs-/Querdruck und Schub). Diese werden nachfolgend als Masterkurven bezeichnet. Das vorgeschaltete Python-Skript approximiert die Masterkurven in Abhängigkeit der Krümmung entweder quadratisch oder kubisch und berechnet die Approximationskoeffizienten. Anschließend werden

die Schädigungsfunktionen $d_j(\alpha_i)$ gebildet, mit Faktor F deskritisiert und die richtungsabhängigen geschädigten Elastizitätskennwerte $E_k(d_j(\alpha_i, F))$ berechnet. Um die Kopplung der Normal- mit Schubspannung zu realisieren, werden die richtungsabhängigen geschädigten Elastizitätskennwerte derart mit einander kombiniert, dass alle möglichen Kombinationen berücksichtigt werden. Zur eindeutigen Identifizierung der im Zuge einer mechanischen Belastung resultierenden Materialsteifigkeiten wird eine aktuelle Summe der dem Spannungszustand zugeordneten Schädigungsvariablen gebildet (z.B. $d_{1,2,3} = d_1 + d_2 + d_5$ für $\sigma_1^{(+)}$, $\sigma_2^{(+)}$, τ_{12}).

Anschließend wird eine Datentabelle im Excel-Format erstellt, welche bei der Materialformulierung in ABAQUS verwendet wird. Ferner werden für die FE-Berechnung die vom Python-Skript erstellten Arrays mit $d_j(\alpha_i)$ -Werten und errechneten Sekantenmoduli und Bruchfestigkeiten verwendet.

Die Beschreibung des orthotropen nichtlinearen Materialverhaltens basiert auf den Überlegungen der Kontinuumsschädigungsmechanik (CDM). Die USDFLD-Subroutine wird vorerst für den ebenen Spannungszustand entwickelt. Dabei kommt die geschädigte Nachgiebigkeitsmatrix $[S]_D$ zum Einsatz. NFKV weist ein ausgeprägtes nichtlineares und Lastfall abhängiges Materialverhalten auf. Um die Zug-/Druck- sowie Schub-Nichtlinearitäten in nachfolgender numerische Implementierung zu berücksichtigen, wird das geschädigte orthotrope Materialgesetz wie folgt angepasst:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}_D \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

mit

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{(1 - d_1^{(+)})E_1^{(+)}} \left[1 - \eta_1 \left(1 - \frac{E_1^{(+)}}{(1 - d_1^{(-)})E_1^{(-)}} \right) \right] \\ S_{12} &= - \frac{\nu_{21}}{(1 - d_2^{(+)})E_2^{(+)}} \left[1 - \eta_2 \left(1 - \frac{(1 - d_2^{(-)})E_2^{(-)}}{(1 - d_2^{(+)})E_2^{(+)}} \right) \right] \\ S_{22} &= \frac{1}{(1 - d_2^{(+)})E_2^{(+)}} \left[1 - \eta_2 \left(1 - \frac{(1 - d_2^{(-)})E_2^{(-)}}{(1 - d_2^{(+)})E_2^{(+)}} \right) \right] \\ S_{21} &= - \frac{\nu_{12}}{(1 - d_1^{(+)})E_1^{(+)}} \left[1 - \eta_1 \left(1 - \frac{(1 - d_1^{(-)})E_1^{(-)}}{(1 - d_1^{(+)})E_1^{(+)}} \right) \right] \end{aligned}$$

$$S_{66} = \frac{1}{(1 - d_{12})G_{12}} .$$

Dabei stellen $d_1^{(+)}$ und $d_2^{(+)}$ bzw. $d_1^{(-)}$ und $d_2^{(-)}$ die Schädigungsvariablen für die Abminderung der Anfangssekantenmodule in Längs-/Querzug- bzw. Längs-/Querdrukrich-
tung und d_{12} für Abminderung des Schubmoduls. η_1 und η_2 dienen zur eindeutigen Unterscheidung zwischen anliegender Zug- und Druckbelastung und nehmen Werte 0 (Zugbelastung) oder 1 (Druckbelastung) ein.

Die Herleitung der Schädigungsvariablen d_{ij} liefert folgende Gleichung

$$\sigma_{ij}^{(i+1)} = (1 - d_{ij})E_{ij}\varepsilon_{ij}^{(i+1)}$$

$$d_{ij} = \left(\frac{m\alpha_{ij}E_{ij}\sigma_{ij}^{m-1(i)} - (m-1)\alpha_{ij}\frac{\sigma_{ij}^{m(i)}}{\varepsilon_{ij}^{(i+1)}}}{1 + m\alpha_{ij}E_{ij}\sigma_{ij}^{m-1(i)}} \right) .$$

Diese Formulierung stellt eine nichtlineare rekursive Gleichung dar, deren Stabilität einerseits von der richtigen Wahl der Parameter m und α_{ij} und andererseits von der Inkrementgröße und den Konvergenzeigenschaften des zugrundeliegenden numerischen Lösungsverfahrens abhängt. Im Falle einer quadratischen bzw. kubischen Approximation resultieren für $m = 2$ bzw. $m = 3$ folgende Gleichungen

$$d_{ij}^{m=2} = \left(\frac{2\alpha_{ij}E_{ij}\sigma_{ij}^{(i)} - \alpha_{ij}\frac{\sigma_{ij}^{2(i)}}{\varepsilon_{ij}^{(i+1)}}}{1 + 2\alpha_{ij}E_{ij}\sigma_{ij}^{2(i)}} \right) \text{ bzw. } d_{ij}^{m=3} = \left(\frac{3\alpha_{ij}E_{ij}\sigma_{ij}^{(i)} - 2\alpha_{ij}\frac{\sigma_{ij}^{3(i)}}{\varepsilon_{ij}^{(i+1)}}}{1 + 3\alpha_{ij}E_{ij}\sigma_{ij}^{3(i)}} \right) .$$

Eine numerische Funktionsanalyse zeigt, dass bei einer großen Inkrementgröße die errechneten Spannungs-Dehnungs-Verläufe von den approximierten Kurven stark abweichen. Um die Schädigungsvariablen nachträglich anzupassen, kann ein Korrekturfaktor β_{ij} eingeführt werden, wobei β_{ij} anfangs einen Wert von $2\alpha_{ij}$ annimmt. Für $m = 2$ bzw. $m = 3$ ergeben sich folgende Gleichungen

$$d_{ij}^{m=2} = \left(\frac{\beta_{ij}E_{ij}\sigma_{ij}^{(i)} - \alpha_{ij}\frac{\sigma_{ij}^{2(i)}}{\varepsilon_{ij}^{(i+1)}}}{1 + \beta_{ij}E_{ij}\sigma_{ij}^{2(i)}} \right) \text{ bzw. } d_{ij}^{m=3} = \left(\frac{(\beta_{ij} + \alpha_{ij})E_{ij}\sigma_{ij}^{(i)} - \beta_{ij}\frac{\sigma_{ij}^{3(i)}}{\varepsilon_{ij}^{(i+1)}}}{1 + (\beta_{ij} + \alpha_{ij})E_{ij}\sigma_{ij}^{3(i)}} \right) .$$

In der USDFLD-Subroutine wird zuerst das geschädigte Materialgesetz und anschließend die Schädigungsfunktionen formuliert. Nach jedem Berechnungsschritt werden

Spannungen und Dehnungen in jedem Integrationspunkt ausgelesen, $d_j(\alpha_i)$ -Werte ($j \in [1; 5]$) berechnet und als Zustandsvariablen (SDV 1 bis 5) gespeichert. Anschließend werden $d_j(\alpha_i)$ -Werte mit den Werten aus `d_arrays` verglichen, mit vorhergehenden Wert aktualisiert und entsprechend dem Spannungszustand eine $d_j(\alpha_i)$ -Summe gebildet. Die $d_j(\alpha_i)$ -Summe wird als SDV gespeichert und entsprechend dem Spannungszustand als Feldvariable $FV(i) = \text{SDV}(6)$, $i \in [1; 4]$ definiert. An diesem Punkt erfolgt die Zuweisung der Materialeigenschaften für das nachfolgende Inkrement und anschließende Berechnung des Materialversagens.

Für die Verifizierung des entwickelten Berechnungsablaufes wird ein $3 \times 3 \text{ mm}$ großes repräsentatives Schalenelement (RSE) mit einer Netzgröße von $1 \times 1 \text{ mm}$ definiert. Für die Vernetzung werden S8R-Schalenelemente verwendet. Dabei handelt es sich um quadratische Schalenelemente mit reduzierter Integration und sechs Freiheitsgraden pro Knoten. Das Einheitsschalenelement wird einseitig festgelagert und auf der gegenüberliegenden Seite mit einer externen Verschiebung beaufschlagt. Die Spannungen und Verzerrungen werden im mittleren Element ausgelesen. Abbildung 16 veranschaulicht die Ergebnisse der FE-Analyse unter Verwendung des entwickelten Berechnungsablaufs. Bei diesem Beispiel kam eine Diskretisierung mit Faktor $F = 6$. Wie zuvor schon verdeutlicht, hängt die Stabilität der Berechnung von der Inkrementgröße ab. Für diese Berechnung wird eine automatische und feste Inkrementgröße von $0,1 \text{ s}$ verwendet. Wie der Abbildung 16 entnommen werden kann, zeigen positive $(\sigma_1, \varepsilon_1)$ - bzw. $(\sigma_2, \varepsilon_2)$ -Verläufe eine sehr gute Übereinstimmung mit den Masterkurven. Bei negativen $(\sigma_1, \varepsilon_1)$ - bzw. $(\sigma_2, \varepsilon_2)$ -Verläufen ist bei fester Inkrementgröße eine Welligkeit des berechneten Kurvenverlaufs zu sehen. Bei einer vom Programm automatisch festgelegten Inkrementgröße ist die Welligkeit nicht mehr vorhanden und die berechneten Verläufe zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit Masterkurven. Anschließend erfolgt die Berechnung des Referenzbauteils mit der neu entwickelten USDFLD-Subroutine und Abgleich mit den Ergebnissen der linearen Berechnung.

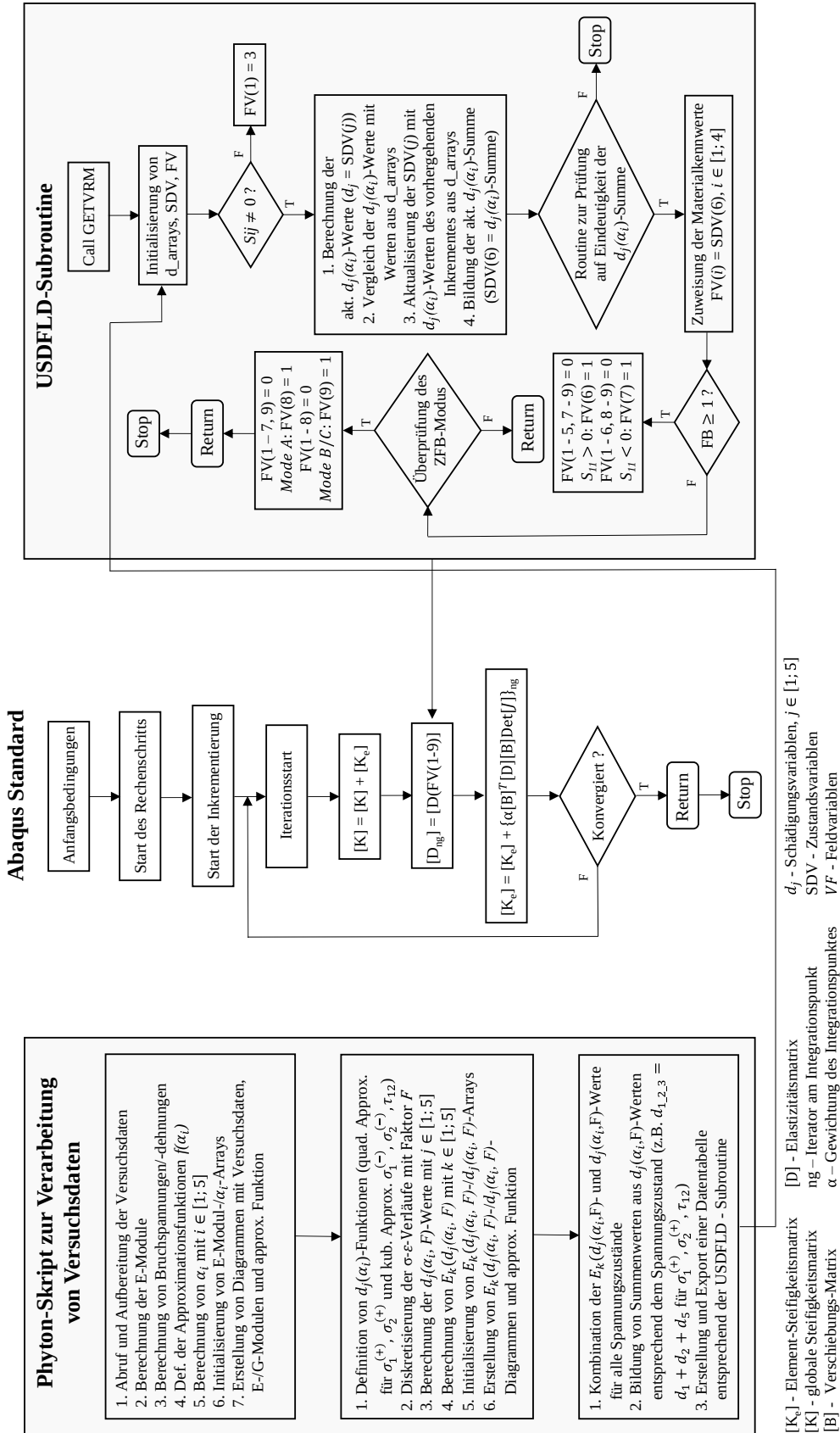


Abbildung 15: Flussdiagramm des Berechnungsablaufs

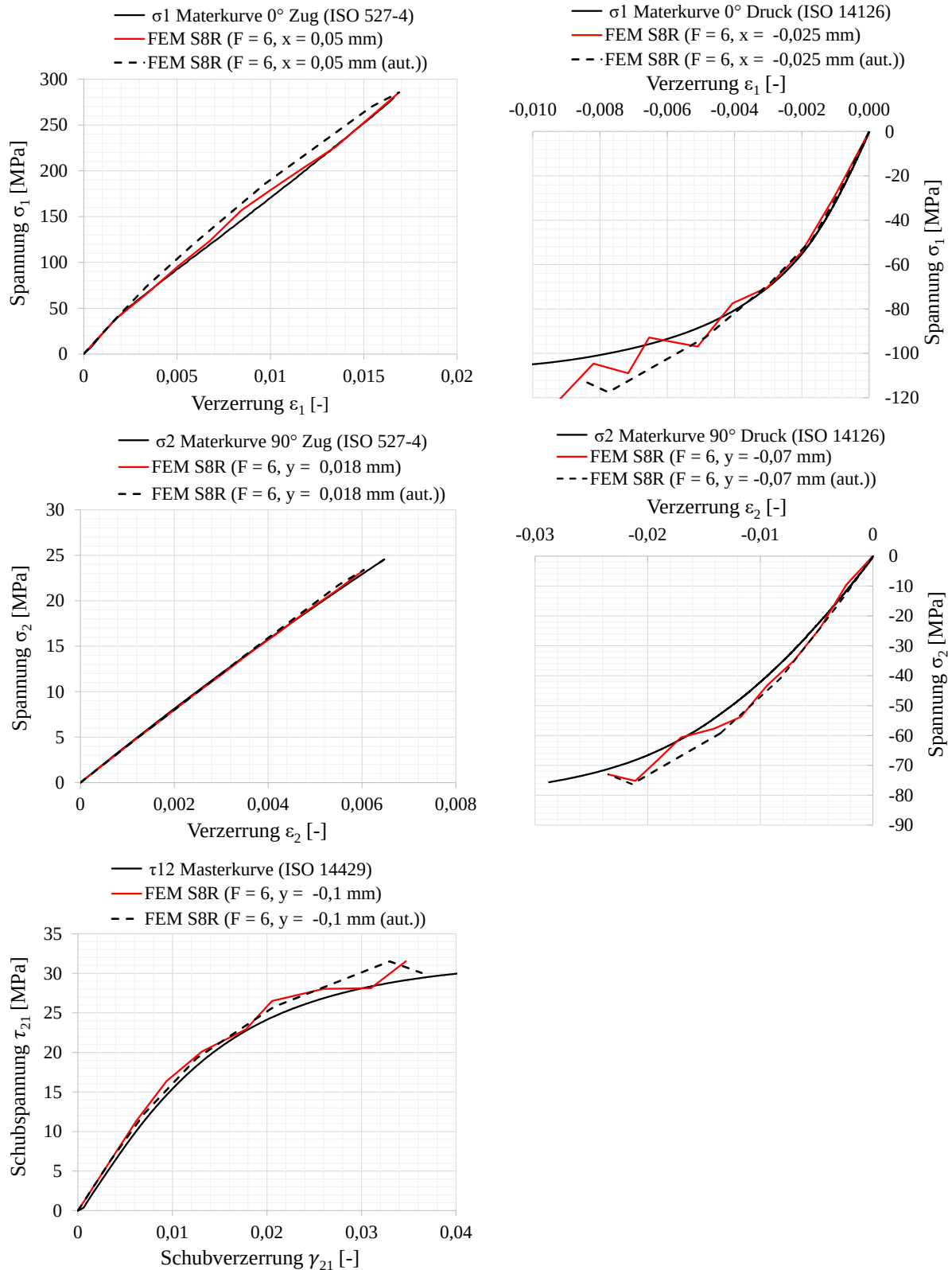


Abbildung 16: Ergebnisse der FE-Analyse unter Verwendung des Berechnungsablaufes

6.1.4 AP 3.4: Entwicklung einer Optimierungsmethodik zur Auslegung von hybriden Verbunden mit TFP-Verstärkungsstrukturen / AP 3.5: Auslegung, Simulation und Optimierung des repräsentativen Musterbauteils

Zur Festlegung der Designgrößen für die Bauteilauslegung und Optimierung wurde eine FE-Simulation mit dem Materialaufbau der Referenzkabinentür durchgeführt. Die detaillierte Betrachtung aller Lastszenarien ergab, dass die Unterdrucklast aus der Kabinenumströmung im Horizontalflug zur Abhebung der unteren Hubschraubertürecke um 12,7 mm führen kann. Deshalb wird eine Deformation in z-Richtung als Grundlage für die Auslegung genommen wird. Wenn die optimierte Materialkonfiguration dieser Belastung standhält, ist davon auszugehen, dass auch die Notlandelasten kein Versagen hervorrufen werden. Die „Abuse-Last“ wird in der Optimierung nicht berücksichtigt, da diese im Lastenheft als sekundäre Last definiert ist.

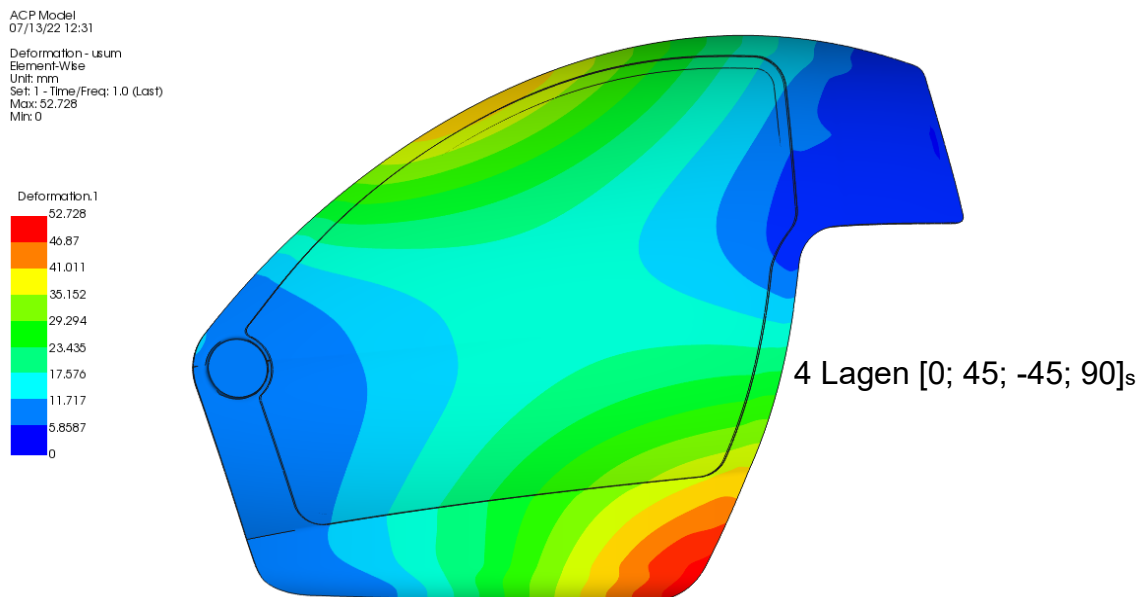
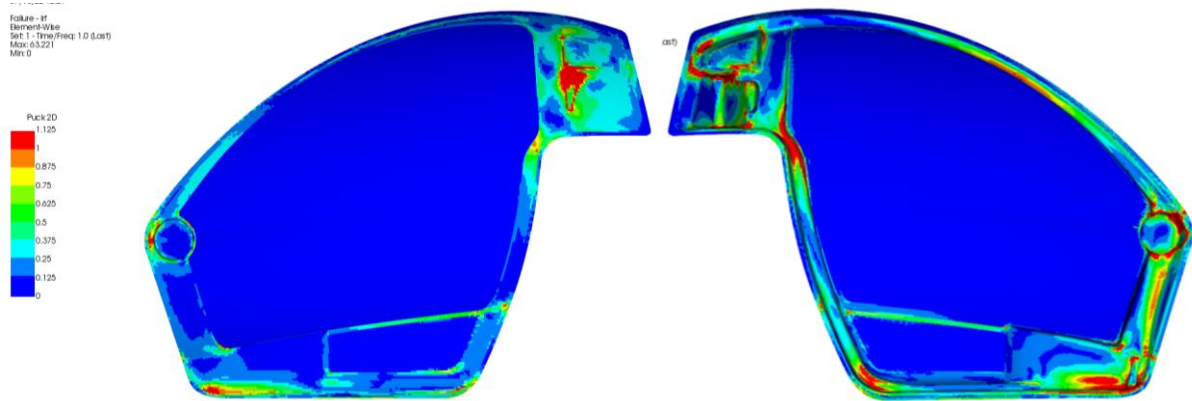


Abbildung 17: Verformungsplot einer Hubschraubertür aus Fiberpreg UD150 EP1,5. Die Deformation der Referenztür aus CFK [45; -45]_s bzw. Flach [0; 45; -45; 90]_s beträgt laut FE-Simulation 12,7 mm bzw. 52,79 mm (Abbildung 17). Für die Auslegung und Optimierung wird daher die kleinste zulässige Verformung von 12,7 mm als Zielgröße definiert. Die Versagensplots der Flachstür (Abbildung 19) veranschaulichen, dass es an mehreren Stellen mit einem Versagen durch Delamination oder Zwischenfaserbruch zu rechnen ist. Kritisch zu betrachten sind die Stelle mit dem kleinsten Querschnitt auf der Innenseite und die Lagerungsstellen, weil es dort zur Spannungskonzentration kommt.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass es bei der Kabinentür mehrere Stellen gibt, die einer besonders starken Verstärkung bedürfen. Zum einen ist es der



Versagensplots nach PUCK 2D

Abbildung 19: Versagensplots nach Puck 2D (Flach [0; 45; -45; 90]_s)

umliegende Bereich des Scharniers und die Innenseite des umlaufenden Türprofils mit kleinstem Querschnitt. Mithilfe einer Free Size Analyse in Optistruct (Hyperworks), auch Topografieanalyse genannt, und nachgeschalteter Analyse der Hauptlastpfade (Abbildung 18) können optimale Geometrien mit entsprechenden Faserrichtung abgeleitet und definiert werden. Aufgrund, dass es laut Analyse an diversen Stellen bis zu 20 Einzellagen aus Flachs-UD-Gelege platziert werden müssen, ist es aus verarbeitungstechnischer Sicht zielführender das 20-lagige Flachs-Laminat, besonders an doppelgekrümmten Stellen (z.B. Scharnier), durch CF-Gewebe sowie TFP-Patches zu substituieren.

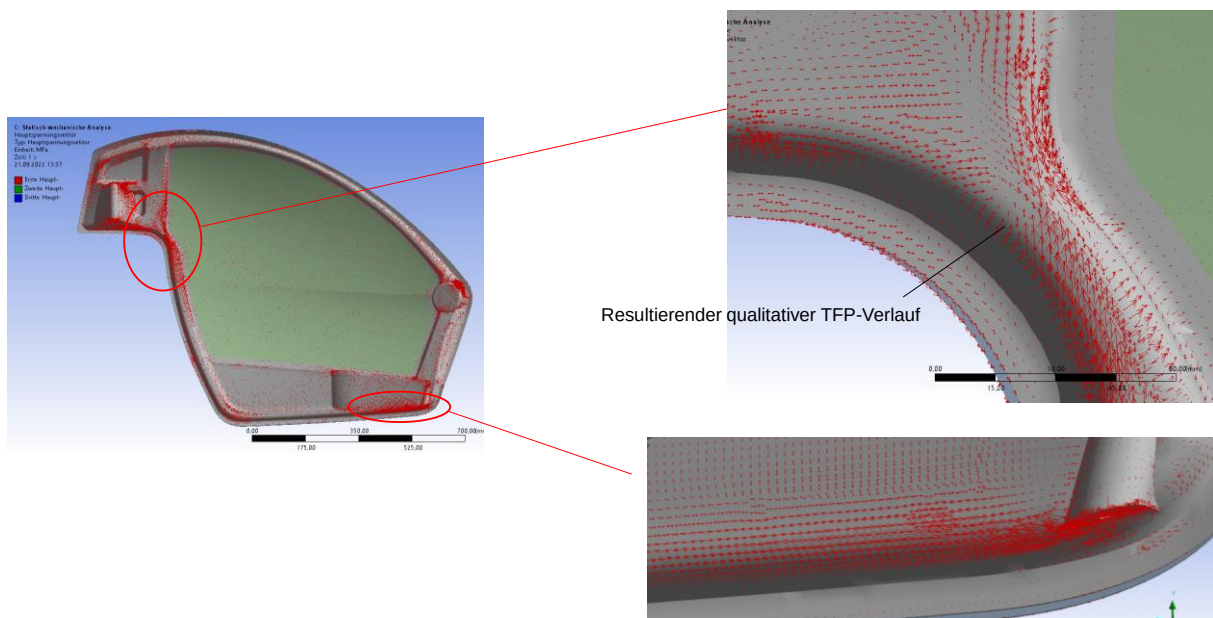


Abbildung 18: Auslegung von TFP-Verstärkungen mittels Beurteilung der Hauptspannungsverläufe

Mittels weiterer Optimierungsschleifen wurde basierend auf den Simulationsergebnissen eine einfachere Vorzugslösung herausgearbeitet. Mit einem Grundlaminataufbau aus einem [0; 45; -45; 90]-Flachsfasergelegeprepreg (120 g/m² Flächengewicht) auf

der Außenseite bzw. [45°; -45°]- Flachsfasergewebeprepreg (200 g/m² Flächengewicht) auf der Innenseite sowie partiellen Verstärkungen aus CF-TFP-Patches (hergestellt aus 10K Towpreg, Fa. Lange+Ritter GmbH) und CF-Gelege-/Gewebe (200 g/m² Flächengewicht) ergibt sich für die Vorzugslösung nachfolgender Laminataufbau (Abbildung 20). Das rechnerische Gewicht beträgt demnach 971 g (davon 144,7g CFK) bei einem errechneten Biomassenanteil von 42 M.-%, was ca. 30 % schwerer als die CFK-Referenzkabinentür ist. Tatsächlich wiegt die Referenztür 948 g. In diesem Gesamtgewicht sind der Hartschaumkern aus PVC sowie der für die Verklebung beider Schalen verwendete Strukturklebstoff enthalten. Aufgrund der Prozessparameter bei der Fa. Invent GmbH, wird die gewünschte Kompaktierung des Laminates nicht möglich sein, was zu einer weiteren Zunahme des Bauteilgewichtes und Herabsenkung der Bauteileigenschaften führen wird. Aufgrund des niedrigeren Faservolumenanteiles von max. 40% bei 2 bar Autoklavendruck und 80 °C Aushärtetemperatur wird sich ein Gesamtgewicht von ca. 1150g einstellen.

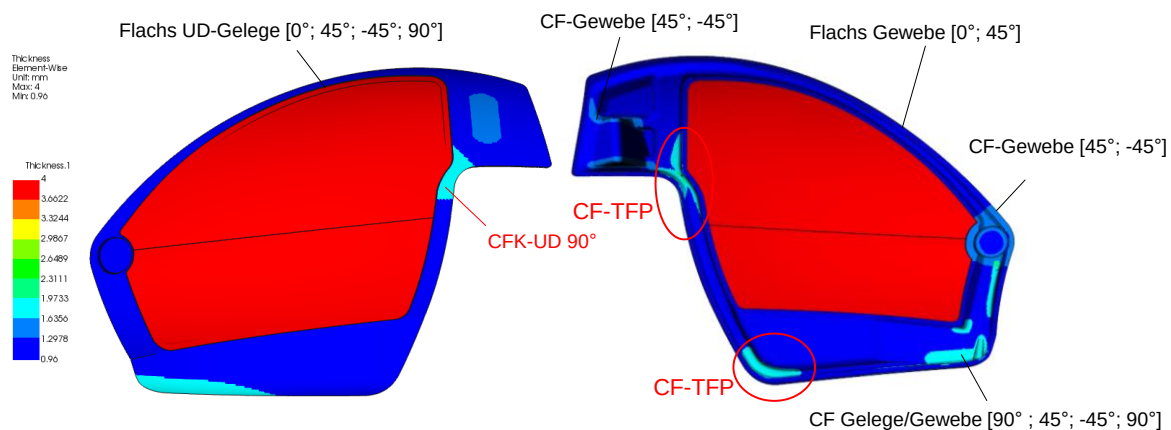


Abbildung 20: Laminataufbau: 4 Lagen UD-Flachs (Außenseite) und 2 Lagen BD-Flachs (Innenseite) mit CFK-Verstärkung

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse diskutiert und den. In Abbildung 21 ist das Verformungsbild der biobasierten Kabinentürausführung unter Einwirkung der CFD-Strömungslast dargestellt. Der Abbildung kann entnommen werden, dass sich eine maximale Verformung von 14,674 mm resultiert. Im Vergleich zu 12,7 mm der Referenztür aus CFK ist die biobasierte Tür um 9% nachgiebiger, dieser Wert liegt weit unterhalb von 20 mm.

Das Strukturversagen wird anhand des Kriteriums nach Puck 2D und LaRC03 bewertet. Diese sind im AP 3.2 sehr ausgiebig diskutiert worden. Abbildung 22 veranschaulicht die Versagensplots der Außenseite der Kabinentür. Beide Plots sehen vergleichbar aus und es ist mit keinem Versagen zu rechnen. Der inverser Sicherheitsfaktor SF

steigt nur im Bereich der Türaufhängung lokal auf den Wert $SF = 1,25$ an. Da die Spannungs- bzw. Dehnungswerte in die Versagenskriterien quadratisch einhergehen, sind ausreichend Sicherheitsreserven für höhere Beanspruchungen vorhanden.

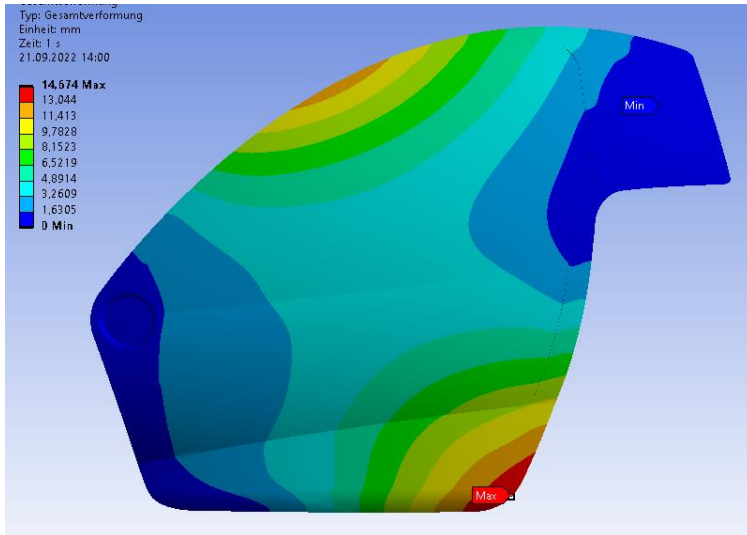


Abbildung 21: Verformungsbild der optimierten biobasierten Kabinentür in Folge der CFD-Last

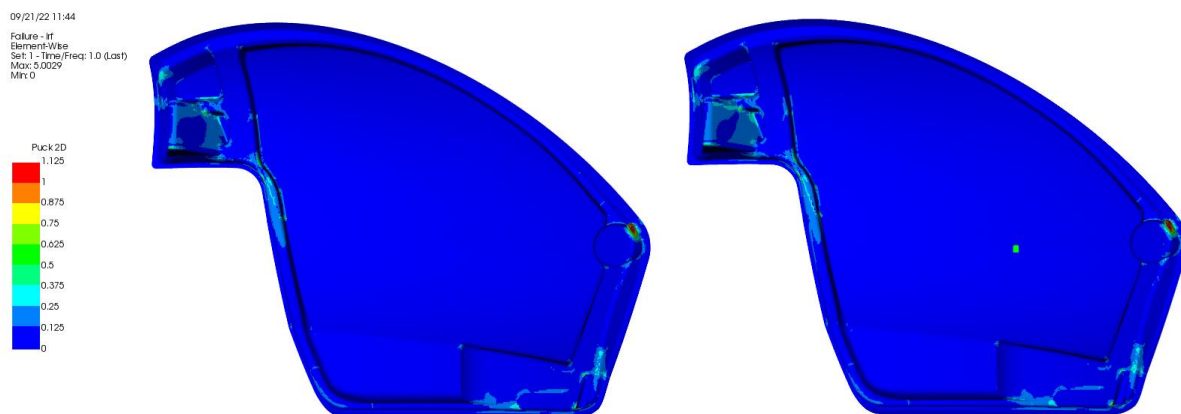


Abbildung 22: Versagensplots der Innenseite (links: Puck 2D, rechts: LaRC03)

6.2 HAP 4: Fertigung und strukturmechanische Prüfung

6.2.1 AP 4.1: Herstellung von Verbundprobekörpern auf Coupon-Ebene / AP 4.2: Fertigung und Validierung von Verbund-Probekörpern auf Sub-Komponenten-Ebene

Z/D-T-Probekörpern

Herstellung und Prüfung von Z/D-T-Probekörpern (Abbildung 23) dient der Ermittlung der ZFB-Grenzkurve bzw. σ_2 - τ_{21} -Bruchkurve der Schichtebene sowie des Bruchwinkels (AP 3.2). Da es sich hier um die in der Praxis häufig vorhandenen Spannungszustände in der Schichtebene handelt, sind derartige Z/D-T-Versuche von großem technischen sowie wissenschaftlichem Interesse und finden daher auch in der Literatur die meiste Beachtung. Die Bruchkurve der σ_2 - τ_{21} -Spannungsebene beinhaltet zudem unterschiedliche Bruchtypen, wie den durch σ_q^z verursachten Quer-Normalbruch.

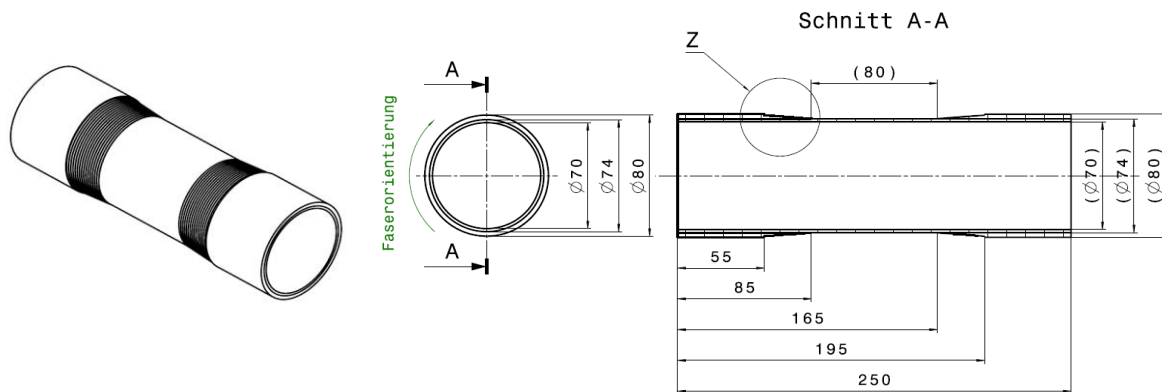


Abbildung 23: Zug/Druck/Torsion-Probekörper in Anlehnung an die Versuche von Puck/Cunze

Zur Verifizierung der σ_2 - τ_{21} -Bruchkurve werden neun Lastpfade ausgewählt, womit sowohl das weitgehend bekannte Bruchverhalten bei Zug-Normalspannungen als auch die Bruchphänomene bei Druck-Normalspannungen noch weiter erforscht werden sollen. Die Anordnung der Lastpfade, welche der Abbildung 24 entnommen werden können, richtet sich nach markanten Stellen der theoretischen Bruchkurve.

So zum Beispiel können aus Bruchversuchen mit Lastpfad 4 Aussagen über den Übergang zwischen gekrümmtem und geradem Teil der Bruchkurve gewinnen. Die Lastpfade 6 und 7 dienen dagegen zur Eingrenzung des Übergangsbereiches zwischen τ_{n1} - oder τ_{nt} -bedingten Versagensformen. Die Lastpfade 4 und 6 erlauben zudem gemeinsam mit Lastpfad 5 die Steigungen m_q^z und m_q^d zu bestimmen. Die Probekörperanzahl je Lastpfad soll nicht weniger als 5 sein, wobei davon auszugehen ist, dass für den Druckbereich eine höhere Anzahl an Rohrprobekörpern als für den Zugbereich notwendig sein wird. Die Kraft und das Torsionsmoment werden gemäß dem vorge-

gebenen δ_2 - τ_{21} -Verhältnis bis zum Bruch kontinuierlich gesteigert. Während der Versuche erfolgt die Messung der elastischen Eigenschaften, um hieraus zusätzliche Informationen über das Erstversagen zu gewinnen. Die experimentellen Ergebnisse werden anschließend den theoretischen Bruchkurven der Versagenshypothesen von Puck 2d/3d, Cunze und LaRC03/04 gegenübergestellt.

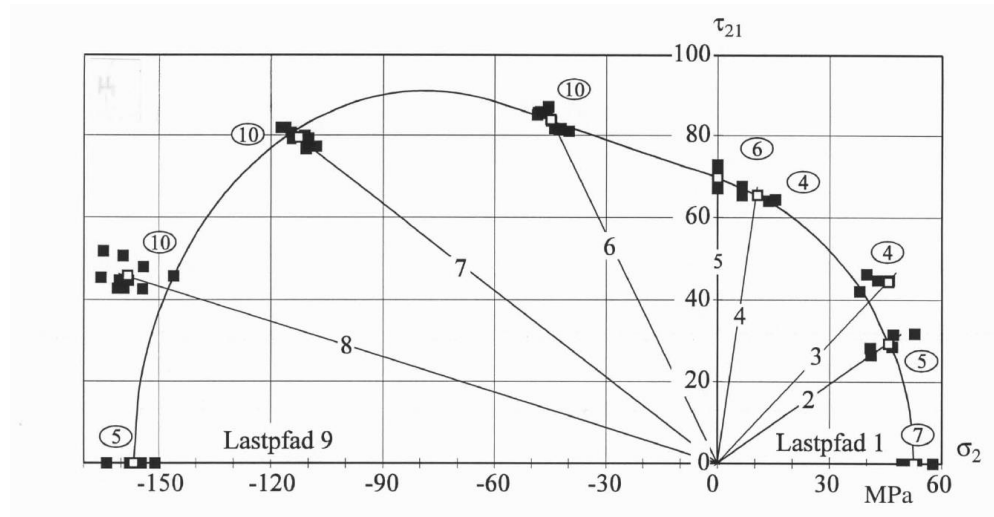


Abbildung 24: Beispiel einer experimentellen Untersuchung an GFK-Rohrprobekörpern [Quelle: Cunze, Neue Bruchkriterien und Festigkeitsnachweise, VDI, 1997]]

Die in der Literatur beschriebene Verfahren zur Herstellung solcher Probekörper beschränken sich auf das Wickelverfahren. Da es bei Flachfasern aktuell nur bedingt hochwertige, nicht verdrehte Garne bzw. Rovings auf dem Markt verfügbar sind und die Projektpartner für das Erreichen der Projektziele das biobasierte Flachspreg favorisierten, wurde ein Verfahren zur Herstellung von Z/D-T-Probekörpern aus Prepreg entwickelt (Abbildung 25). Es handelt sich dabei um einen gelochten Druckzylinder, welcher auf einer Seite verschlossen ist und auf der anderen Seite mit einem Druckluftanschluss versehen ist. Über dem gelochten Bereich ist ein Naturkautschukschlauch aufgezo-gen und mittels Schlauchschellen auf dem Druckzylinder befestigt. Dieser bildet einen Druckluftbalgen mit dessen Hilfe Innendruck auf das gewickelte Prepreg aufgebaut werden kann. Über das gewickelte Prepreg wird ein PVC-Schrumpfschlauch aufgezo-gen, welcher im Zuge der Wärmeeinwirkung sich zusammenzieht und einen quasi hydrostatischen Druck von außen aufbaut. Ferner wurden auch andere, einfachere Verfahren ausprobiert. In der Tabelle 4 sind die untersuchten Verfahren zusammengefasst. Insgesamt wurden vier Verfahren getestet, die unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Faltenbildung sowie Komprimierung des Laminates zeigten. Um später dem Klemmbruch entgegenzuwirken wurden die Einspannbereiche mit weiteren Lagen aufgedickt.

Als Material wurde zunächst ein UD-Flachsfaser-Prepreg (FLAXPREG-T-UD-110) der Firma Eco-Technilin mit einem Flächengewicht von 110 g/m², einer Einzelschichtdicke von 0,125 mm und einem Fasermassenanteil von ca. 50 % ausgewählt. Die Laminatkonsolidierung erfolgte im Wärmeschrank bei 120 °C und 1 bar Überdruck.

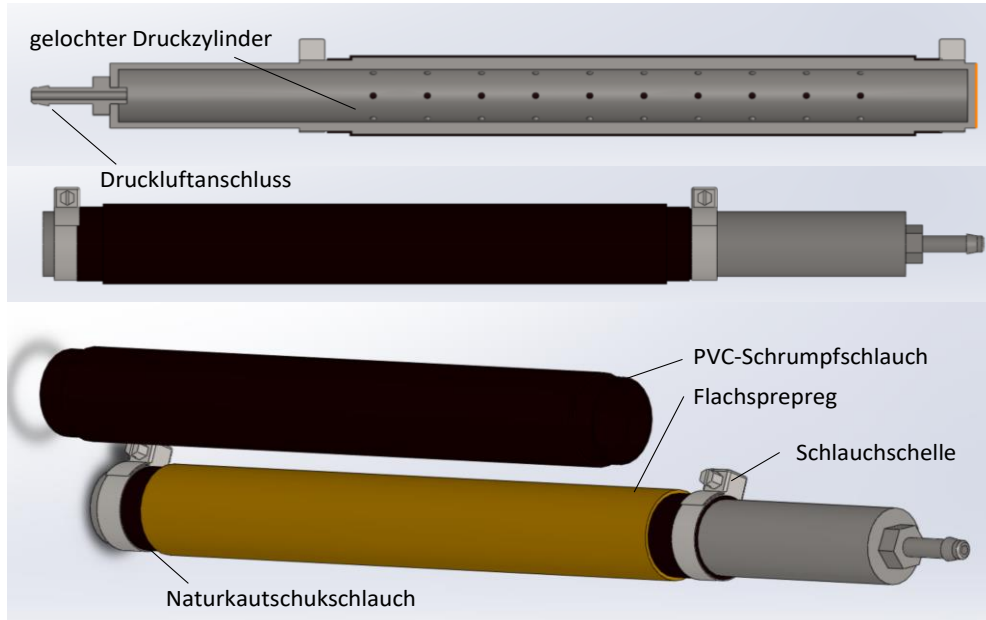


Abbildung 25: Verfahren zur Herstellung von Z/D-T-Probekörpern aus Flachspreg

Tabelle 4: Untersuchte Verfahren zur Herstellung von Z/D-T-Probekörpern

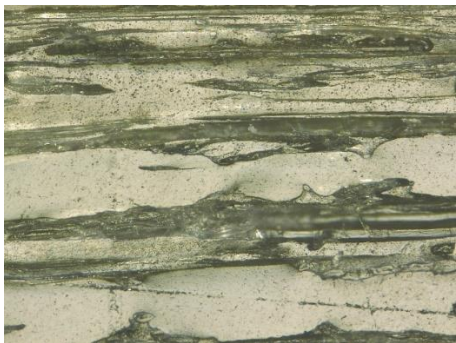
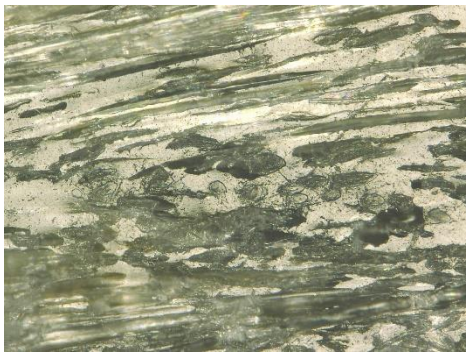
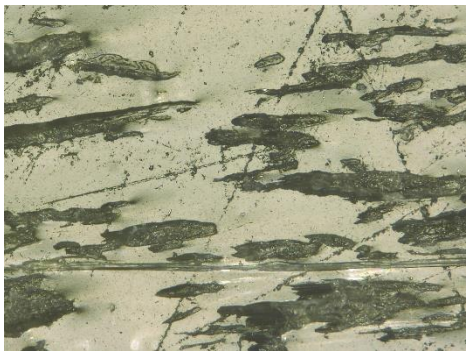
Verfahren	Beschreibung des Verfahrens
1a/1b	Auf einem 40 mm PTFE-Kern händisch gewickeltes Prepreg. Druckaufbau von außen Mithilfe eines Vakuumsackes (1a) oder eines mit Trennmittel versehenes PVC-Schrumpfbandes (1b)
2	Auf einem 22 mm Stahlkern maschinell gewickeltes Flachsfasergarn (verdrillt). Handimprägniert mit GreenPoxy 56.
3	Auf einem 40 mm Stahlkern maschinell gewickeltes 5 cm breites Flachsfasertape (Lineo). Handimprägniert mit GreenPoxy 56
4	Auf einem 40 mm Druckluftzylinder händisch gewickeltes Flachspreg (Lineo). Druckaufbau von außen Mithilfe eines PVC-Schrumpfschlauchs.

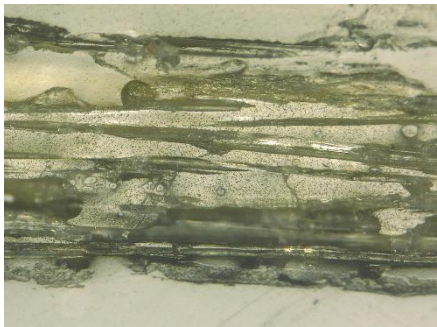
Daher wurde entschieden ein neues Testverfahren für Flachprobekörper zur Erzeugung eines überlagerten Spannungszustandes zu entwickeln (siehe Kapitel 6.1.2).

Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Z/D-T-Probekörperherstellung zusammengefasst. Für die Beurteilung der Laminatqualität (Komprimierungsgrad des Laminates) wurden aus den Proben Bereiche entnommen und einer Mikroskopieprüfung unterzogen. Bei dem Versuch ½ (Verfahren 1a/1b) konnten keine zufriedenstellenden Probekörper hergestellt werden. Aufgrund der radialen Wicklung und des fehlenden Innendrucks, bildeten sich sowohl im Prüf- als auch im Einspannbereich zahlreiche Falten aus. Beim Versuch 4 konnten nahezu faltfreie Proben hergestellt werden, wobei anhand der großen Abständen zwischen den Lamineinzelschichten sowie zahlreichen Lufteinschlüssen gut erkennbar ist, dass das Laminat unzureichend komprimiert wurde. Hinsichtlich der Laminatqualität konnten in Versuchen 4 und 5 deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden, wobei die Oberflächenqualität für derartige Probekörper unzureichend ist. Durch starke Unebenheiten auf der Oberfläche werden Sollbruchstellen definiert und die Messergebnisse vermutlich unplausibel. Ferner entstanden Schwierigkeiten mit dem maschinellen Wickeln, da das Roving gelegentlich abbriss. Die besten Ergebnisse hinsichtlich Oberflächenqualität sowie der Laminatgüte konnten im Versuch 6 (Verfahren 4) erzielt werden. Dennoch konnten zum aktuellen Zeitpunkt aufgrund der Prozessspezifik keine reproduzierbaren Ergebnisse erreicht werden. Daher wurde entschieden ein neues Testverfahren für Flachprobekörper zur Erzeugung eines überlagerten Spannungszustandes zu entwickeln (siehe Kapitel 6.1.2).

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Z/D-T-Probekörperherstellung

Versuch	Material	Abbildung	Nahaufnahmen/ Mikroskopieaufnahme (x350)
1	Flachs-Prepreg 40 mm PTFE-Kern Abreißgewebe Vakuumsack (1a)		

2	Flachs-Prepreg 40 mm PTFE-Kern Schrumpfband mit Trennfilm (1b)		
3	Flachs-Prepreg 40 mm PTFE-Kern Abreißgewebe Schrumpfband mit Trennfilm (1b)		
4	Flachsgarn (verdrillt) 22 mm Stahlkern Handimprägniert mit GreenPoxy 56 (2)		
5	5 cm Flachtape 40 mm Stahlkern Handimprägniert mit GreenPoxy 56 (3)		

6	Prepreg 40 mm Druckzylinder Innen – Druckschlauch (3 bar) Außen – 76 PVC-Schrumpfschlauch (4)		
---	---	---	--

Bestimmung der Energiefreisetzungsrate G_I / G_{II}

Die Energiefreisetzungsraten $G_{IC}^{(L;T)}$ und $G_{IIC}^{(L;T)}$ haben einen signifikanten Einfluss auf den ZFB-Bruchkörper beim LaRC 03/04-Versagenskriterium und müssen experimentell für jeden Werkstoff bestimmt werden. Ferner sind diese Kennwerte für die Simulation und Vorhersage des Delaminationsversagens notwendig. Die Analyse der Literatur¹ zeigte, dass die Variation von Flaxfaser/Matrix-Kombinationen und des Fertigungsverfahrens zu diametralen Ergebnissen führt und die Werte sich um Faktor 10 unterscheiden können. Um die Datenkarte zu vervollständigen wurde eine Mittelumwidmung i.H.v. ca. 2500 EUR aus der Position 0846 in die Position 0835 beim Projektträger beantragt. Diese Tests sind essentiell für die Bestimmung der Energiefreisetzungsraten im Mode I, Mode II sowie MixedMode I/II um später die Zwischenfaserbruchkurven realitätsgetreu abbilden zu können. Dabei handelt es sich um ein spezielles mechanisch-optisches Testverfahren, welches an der TU Chemnitz aktuell nicht durchführbar ist. Es wurden drei Angebote eingeholt und der Auftrag an die Fa. Zwick-Roell GmbH vergeben. Die Proben wurden vom Projektpartner TUM bereitgestellt und am SLK für die Versuche präpariert.

¹ <https://doi.org/10.3390/jcs4020066>

Mode I:

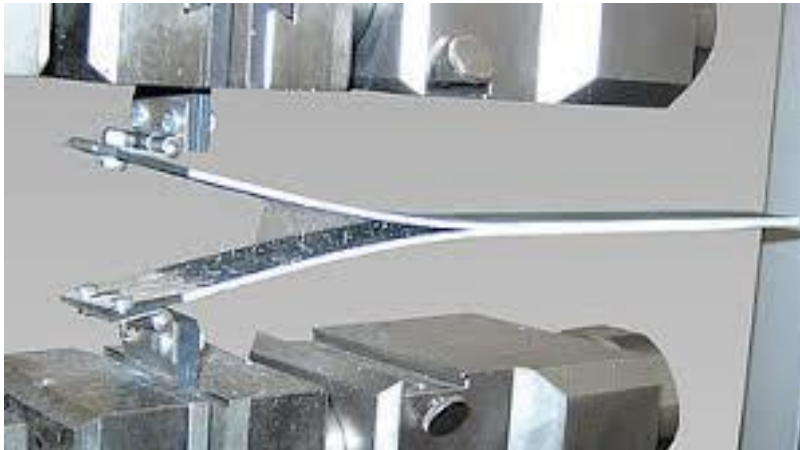


Abbildung 26: Mode I Prüfung [Quelle: Fa. Zwick-Roell GmbH]

Die Berechnung der Risswiderstandskurve erfolgt anhand der gemessenen Kraft-Weg Kurven und der optisch bestimmten Rissfortschrittslängen. Ein Beispiel einer Probe ist hierzu in Abbildung 26 gezeigt. Die Norm ASTM D 5528 erfordert eine Bestimmung der Energiefreisetzungsrate zum Zeitpunkt erster Nichtlinearität (NL) im Kraft-Weg Verlauf, zum Zeitpunkt des ersten sichtbaren Risswachstums (VIS) und bei 5% erhöhter Nachgiebigkeit, bzw. dem Kraftmaximum (5%/MAX). Die Ergebnisse der zugehörigen G_{Ic} Werte sind in Tabelle 6 und Abbildung 27 zusammengefasst. Die mittlere Energiefreisetzungsrate $G_{Ic}^{(L;T)}$ beträgt 778,94 J/m². Dieser Wert ist tendenziell um Faktor 2 höher als bei zahlreichen CFK- oder GFK-Proben und wird so in diversen Literaturquellen bestätigt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Mode I Versuche: Bruchzähigkeitskennwerte

	G_{IC}	G_{IC}mittel	G_I (MBT)	G_I (CC)	G_I (MCC)
	J/m ²	J/m ²	J/m ²	J/m ²	J/m ²
Probe 1	813,7	987,32	797,96	821,23	816,08
Probe 2	696,53	958	642,83	749,44	748,71
Probe 3	826,58	1082,33	798,58	855,15	869,5
Mittel	778,94	1009,22	746,46	808,61	811,43

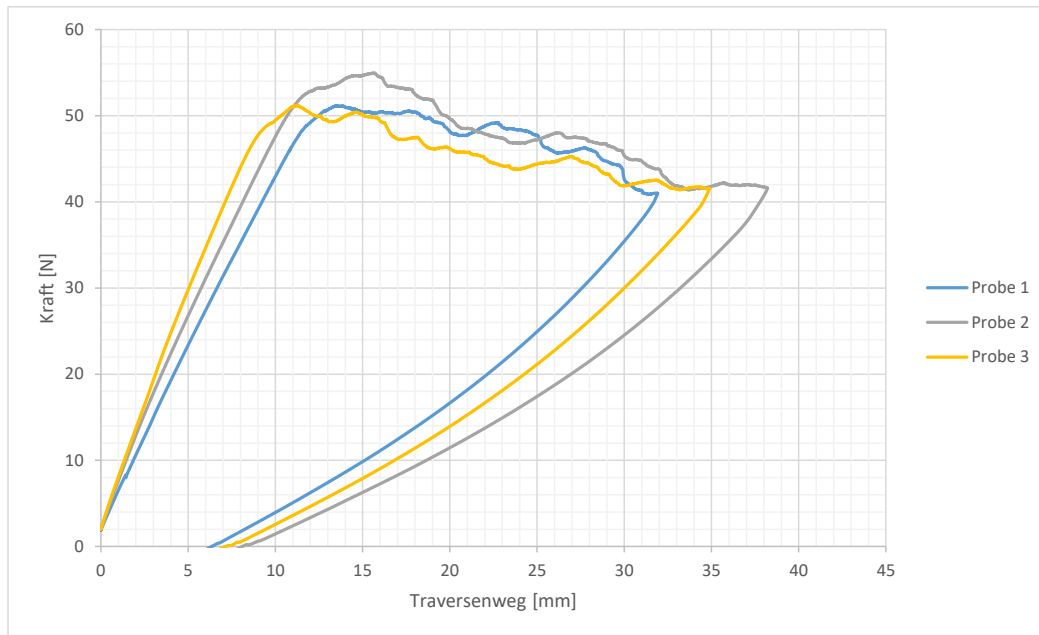


Abbildung 27: Ergebnisse der Mode I Versuche

Mode II:



Abbildung 28: Mode II Prüfung [Quelle: Fa. Zwick-Roell GmbH]

Die Berechnung der kritischen Energiefreisetzungsrate unter Mode II Belastung erfolgt gemäß ASTM WK22949. Hierzu wird zunächst die Nachgiebigkeit des Prüfkörpers und des Prüfaufbaus bei verschiedenen Risslängen bestimmt. Im Anschluss wird die Probe bis zum ersten Lastabfall belastet (Abbildung 28). Die Berechnung des G_{IIc} -Kennwertes erfolgt auf Basis der Probenbreite, der initialen Risslänge und des Kraftwertes zum Zeitpunkt des Rissfortschritts. Die mittlere Energiefreisetzungsrate $G_{IIc}^{(L;T)}$ beträgt 410,39 J/m² (NPC bzw. 437,42 J/m² (PC). Diese Werte sind um Faktor 2 kleiner als bei zahlreichen CFK- oder GFK-Proben, was zu einem Bruchzähigkeitsverhältnis von $\frac{G_{IC}}{G_{IIc}} > 1$ führt. Dadurch verlieren zahlreiche Delaminationsbruchkriterien ihre Gültigkeit, was die FEA-Simulationsergebnisse bestätigen.

Tabelle 7: Ergebnisse der Mode II Versuche: Bruchzähigkeitskennwerte

	G_{IIQ}	P_{max}
Mittelwert (NPC)	410,39	346,77
Mittelwert (PC)	437,42	451,08

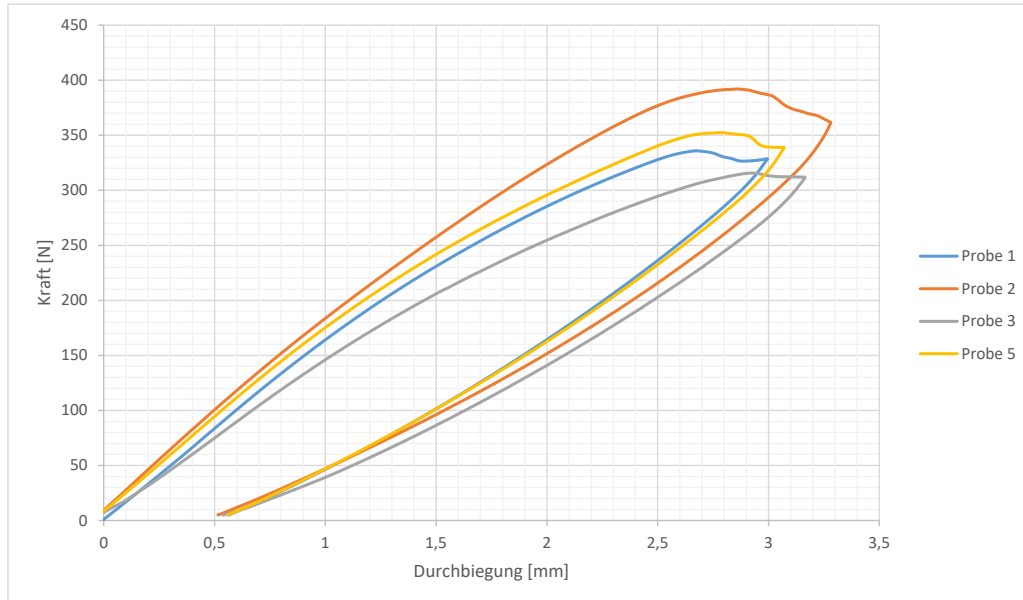


Abbildung 29: Ergebnisse der Mode II Versuche

Mixed-Mode:



Abbildung 30: Mixed-Mode Prüfung [Quelle: Fa. Zwick-Roell GmbH]

Der Mixed-Mode Beam-Test (MMB-Test) stellt ein standardisiertes Prüfverfahren für überlagerte Mode I / Mode II-Belastungszustände dar und ist in ASTM D6671 beschrieben. Maßgebliche Ein Prüfkörper mit Initialriss, welcher durch eine einlamierte Trennfolie in der Mittelebene des Prüfkörpers gegeben ist, wird dabei gleichzeitig riss-öffnend und auf Schub belastet. Diese simultane Überlagerung der Belastungsmoden verursacht bei Erreichen einer kritischen Last den Rissfortschritt. Die Ergebnisse der

MMB-Test sind in der Tabelle 8 und Abbildung 31 zusammengefasst, wobei es zwischen zwei Lastverhältnissen G_{II}/G von 0,5 und 0,2 unterschieden wird. Trotz unterschiedlicher G_I und G_{II} Anteile je nach Lastverhältnis, sind die Mittelwert des Wertes G_{VIS} bei beiden Lastverhältnissen G_{II}/G gleich. Später werden die Simulationsergebnisse mithilfe dieser Ergebnisse verifiziert.

Tabelle 8: Ergebnisse der Mixed-Mode-Versuche: Bruchzähigkeitskennwerte

		$G_{I\ VIS}$	$G_{II\ VIS}$	G_{VIS}
		J/m ²	J/m ²	J/m ²
Ratio G_{II}/G 0,5	Probe 1	189,1	194,4	383,5
	Probe 2	209,8	209,8	419,7
	Probe 3	197,8	203,7	401,5
Mittelwert		198,9	202,7	401,6
Ratio G_{II}/G 0,2	Probe 4	301,2	75,3	376,5
	Probe 5	340,6	85,2	425,8
Mittelwert		320,9	80,2	401,1

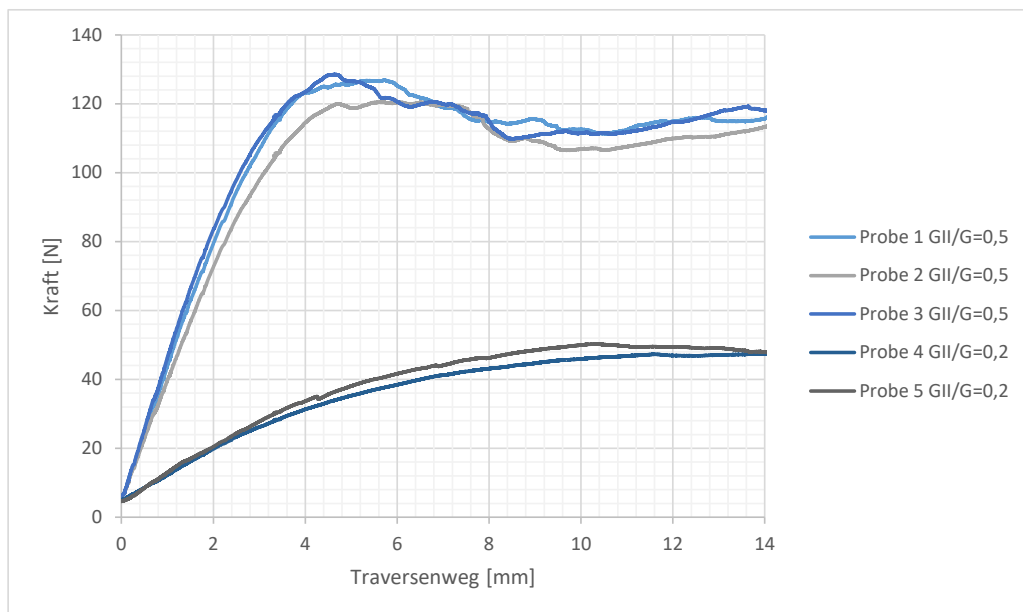


Abbildung 31: Ergebnisse der Mixed-Mode Versuche

Bestimmung der Druckkennwerte

Die Druckeigenschaften wurde nach DIN EN ISO 14126 mit Typ A-Proben bei UD- und Typ B-Proben bei BD-Laminaten bestimmt. Die Stauchung der Probe wird mit 2 beidseitig angeordneten DMS erfasst. Bei den UD-Druckproben werden faserverparallele sowie fasersenkrechte Kennwerte bestimmt, bei BD- Druckproben nur die faserverparallele. Abbildung 32 veranschaulicht das stark nichtlineare Druckspannungs-Stauchungs-Verhalten der UD-Druckproben. Wie schon zuvor erwähnt, dienen die Masterkurven als Diskussionsgrundlage und als Vorlage für die nachfolgende numerische Materialmodellierung. Der lineare Bereich bei faserverparallelen UD-Druckproben endet bei einer Längsstauchung von $\varepsilon_1^{(-)} = -0,14 \%$. Der Anfangssekantenmodul beträgt $E_{1s}^{(-)} = 34,48 \text{ GPa}$ und ist wesentlich höher als der Zug-Anfangssekantenmodul E_{1s} . Nach Überschreiten des linearen Bereichs wird der Kurvenverlauf stark degressiv bis der Tangentenmodul null wird und die Probe versagt. Die Längsdruckfestigkeit liegt bei $\sigma_1^{(-)} = -106,87 \pm 4,91 \text{ MPa}$ bei einer Längsstauchung von $\varepsilon_1^{(-)} = -1,39 \pm 0,37 \%$. Bei fasersenkrechten UD-Proben ist der gleiche Trend zu beobachten, wobei der nichtlineare Kurvenverlauf nach Überschreiten der Querschauchung von $\varepsilon_2 = -0,36 \%$ weniger degressiv ist. Der Anfangssekantenmodul liegt bei $E_{2s}^{(-)} = 4,49 \text{ GPa}$. Die Querdrukfestigkeit beträgt $\sigma_2^{(-)} = -71,9 \pm 4,37 \text{ MPa}$ und die Querschauchung $\varepsilon_2^{(-)} = -2,85 \pm$

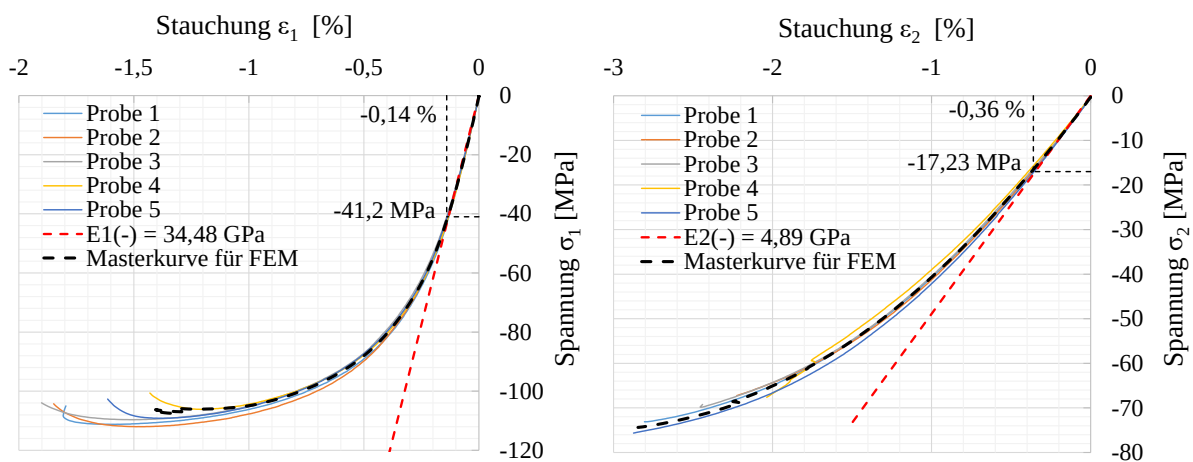


Abbildung 32: Ergebnisse der Druckversuche nach DIN EN ISO 14126 in Faserrichtung (links) und quer zur Faserrichtung (rechts) (Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio)

0,18 %.

BD-Druckproben (Abbildung 33) zeigen ein analoges Materialverhalten, wobei der lineare Bereich kürzer ist und bei $\varepsilon_{1/2}^{(-)} = -0,11 \%$ endet. Der Anfangssekantenmodul beträgt $E_{1/2s}^{(-)} = 16,32 \text{ GPa}$ und ist höher als der $E_{1/2s}$. Die Druckfestigkeit ist für beide

Richtung annähernd gleich und liegt bei $\sigma_{1/2}^{(-)} = -81,74 \pm 3,75 \text{ MPa}$ bei einer Stauchung von $\varepsilon_{1/2}^{(-)} = -1,26 \pm 0,31 \text{ %}$.

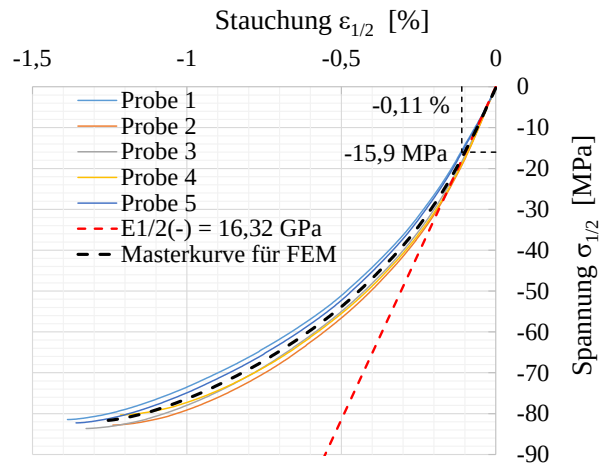


Abbildung 33: Ergebnisse der Druckversuche nach DIN EN ISO 14126 (äqv. für beide Faserorientierungen) (Material: Fiberpreg N 200 T EP4.5S Bio)

Um die Schädigungsmorphologie besser zu beschreiben, wurden faserparallele und -senkrechte Schliffbilder von geschädigten Druckproben angefertigt und unter einem digitalen Mikroskop analysiert. Die Mikroskopieaufnahmen der UD-Druckproben sind exemplarisch in Tabelle 9 dargestellt. So lässt sich erkennen, dass die faserparallele UD-Druckproben in Folge der Längsdruckspannung $\sigma_1^{(-)}$ durch Faserknicken versagen. Der Knickwinkel $\alpha_1^{(-)}$ liegt je nach Druckprobe im Bereich von $\alpha_1^{(-)} \in [39,72^\circ; 47,38^\circ]$. Auf der 500-fachen Vergrößerung der ausgeknickten Fasern lassen sich auch vereinzelte Faserbrüche aber keine Zwischenfaserbrüche erkennen. Die fasersenkrechte UD-Druckproben versagen mit einem Schrägbruch. Im Vergleich zur CFK oder GFK ist der Bruchwinkel $\alpha_2^{(-)}$ deutlich kleiner und liegt im Bereich $\alpha_2^{(-)} \in [24,23^\circ; 33,21^\circ]$. Bei CFK beträgt der Bruchwinkel $\alpha_2^{(-)} = 53^\circ$. Bemerkenswert ist die große Streuung der Werte, welche mit der natürlichen Herkunft der Flachsfaser und daraus resultierender Inhomogenität erklärt werden kann. Ferner findet bei der Autoklavfertigung aufgrund des enormen Überdrucks eine nicht zu vernachlässigbare Verschiebung der Flachsfaser statt. Es kommt zur lokalen Faserrotation sowie Entstehung „dünner“ Stellen, welche die Werkstoffeigenschaften negativ beeinflussen.

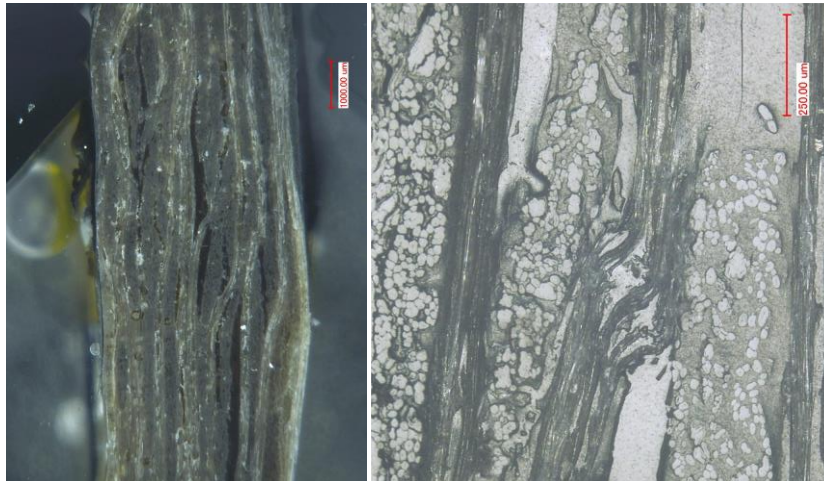


Abbildung 34: Mikroskopieaufnahmen einer beschädigten BD-Druckprobe. Links: Bruchstelle mit sichtbarer Delamination und Faserknicken, rechts: lokale Vergrößerung der geknickten Flachsfasern (Material: Fiberpreg N 200 T EP4.5S Bio)

Tabelle 9: Mikroskopieaufnahmen von Schliffproben der UD-Druckproben (Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio)

Beschädigten UD-Druckprobe mit faserparalleler Druckbelastung. Knickbruch mit einem Faserknickwinkel von $42,93^\circ$ (links) und eine lokale 500-fache Vergrößerung der schubgeknickten Flachsfasern (rechts)	Beschädigten UD-Druckprobe nach einer fasersenkrechten Druckbelastung. Schubbruch mit einem Bruchwinkel von $24,23^\circ$ (links) und $33,21^\circ$ (rechts)
Die linke Aufnahme zeigt einen Knickbruch mit einem Faserknickwinkel von $42,93^\circ$. Die rechte Aufnahme ist eine lokale 500-fache Vergrößerung der schubgeknickten Flachsfasern. Ein Maßstab von 250,00 µm ist in der rechten Aufnahme eingezeichnet.	Die linke Aufnahme zeigt einen Schubbruch mit einem Bruchwinkel von $24,23^\circ$. Die rechte Aufnahme zeigt einen Schubbruch mit einem Bruchwinkel von $33,21^\circ$. Ein Maßstab von 2,00 mm ist in der rechten Aufnahme eingezeichnet.

Abbildung 34 zeigt exemplarisch das Versagensbild von BD-Druckproben. Dabei lässt sich erkennen, dass es zu Delamination, diagonal verlaufendem Faserknicken faserparalleler Faserbündeln und Zwischenfaserbrüchen in fasersenkrechten Faserbündeln kommt. Das Versagensbild entspricht den duroplastischen FKV, wie CFK oder GFK.

Um zu klären, ob die Nichtlinearitäten auf Mikroschädigung zurückzuführen sind, wurden UD-Druckproben fasernparallel und fasersenkrecht mit 3 Lastniveau stufenweise bis zum Bruch belastet (Abbildung 35). Anschließend wurden Mikroskopieaufnahmen von Schliffproben angefertigt und auf sichtbare Zwischenfaserbrüche untersucht.

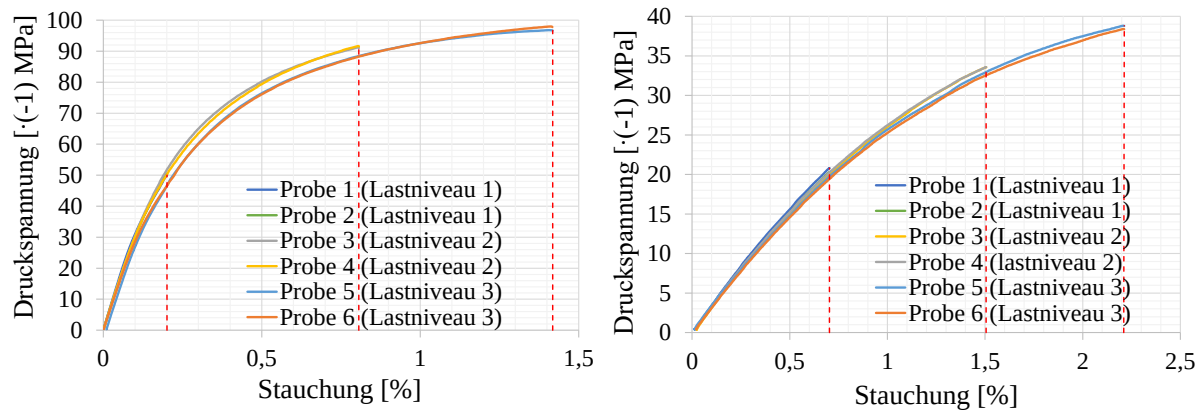


Abbildung 35: Ergebnisse der Druckversuche mit drei Lastniveaus nach DIN EN ISO 14126 in Faserrichtung (links) und quer zur Faserrichtung (rechts) (Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio)

Anhand der Mikroskopieaufnahmen fasernparalleler UD-Druckproben lassen sich bei keinem der Lastniveaus eine Schädigung qualifizieren. Vereinzelte Defekte, wie kleine Delaminationsstellen aufgrund der in das UD-Gelege zur Fixierung eingebrachte Polyester-Schussfäden, lassen sich nur beim Lastniveau 3 erkennen. Diese sind exemplarisch in Tabelle 10 dargestellt. An dieser Stelle können keine Rückschlüsse zur Ausbildung der fasernparallelen Druck-Nichtlinearität gemacht werden. Die möglichen Ursachen liegen vermutlich in der Beschaffenheit der elementaren Flachsfaser.

Tabelle 10: Mikroskopieaufnahmen von fasernparallel belasteten UD-Druckproben nach einer Belastung mit dem Lastniveau 3 (Abbildung 35, links)

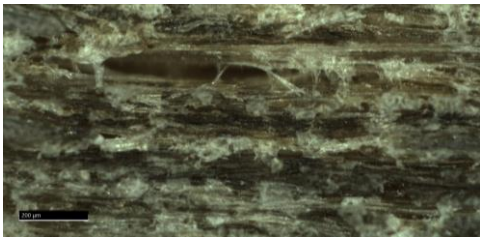
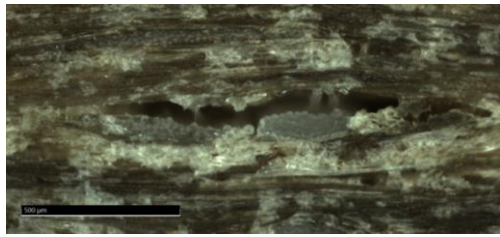
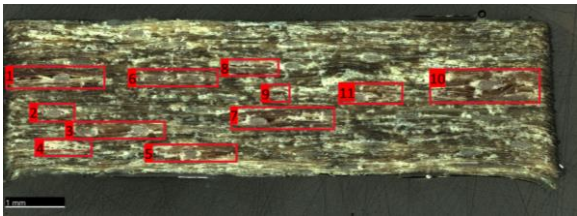
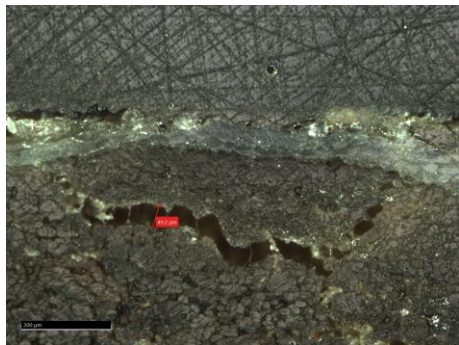
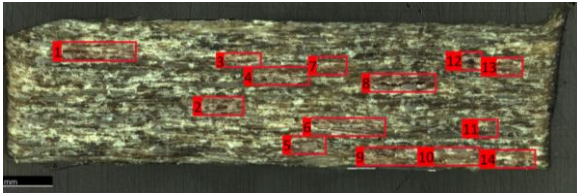
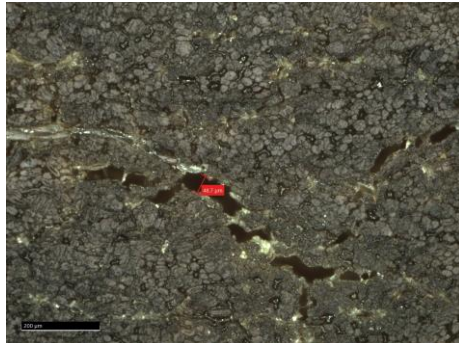
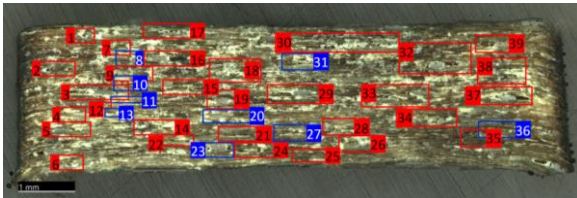
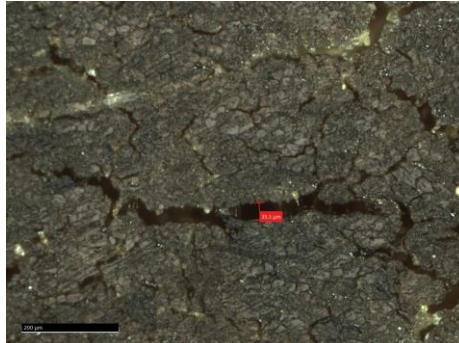
LN	Schliffbilder von fasernparallelen UD-Druckproben	
LN 3		

Tabelle 11 veranschaulicht den Zuwachs von Zwischenfaserbrüchen in einer fasersenkrechten UD-Druckprobe. Es ist erkennbar, dass die Anzahl quantifizierbarer ZFBs mit Lasterhöhung stetig ansteigt und unmittelbar vor dem Totalversagen (bei LN 3) ZFBs im gesamten Probenquerschnitt vorzufinden sind. Vermutlich durch die Höhe

der Energiefreisetzungsrate im Mode I als im Modes II bedingt, ist die Länge der ZFBs bei allen Lastniveaus ähnlich groß. Die größten Risse öffnen sich um ca. 50 μm . Beim LN 2 und 3 lassen sich nicht nur längs, sondern auch zahlreiche quer verlaufende Risse erkennen. An dieser Stelle kann die Nichtlinearität eindeutig auf die Akkumulation der Mikroschädigung zurückgeführt werden.

Tabelle 11: Mikroskopieaufnahmen von UD-Druckproben mit einer fasersenkrechten Faserorientierung nach drei unterschiedlichen Lastniveaus (Abbildung 35, rechts)

LN	Schliffbilder von UD-Druckproben quer zur Faserrichtung mit quantifizierbaren ZFB	200-fache Vergrößerung eines ZFBs
LN 1		
LN 2		
LN 3		

6.2.2 AP 4.3/AP4.4: Fertigung des repräsentativen Musterbauteils

Die Fertigung des Referenzbauteils (Kabinentür) erfolgte bei der Fa. Invent GmbH in zwei Etappen unter Verwendung firmeninterner Laminierwerkzeuge (Abbildung 36). Beim ersten Fertigungstermin wurden zwei Türen (links und rechts) mit anfangs berechnendem Laminataufbau hergestellt. Bei der Definition der Zuschnittsgeometrie wurde besonders ein großer Wert darauf gelegt möglichst wenig Verschnitt oder Überlappungen zu erzeugen. Nach den ersten mechanischen Strukturuntersuchungen erfolgte eine Optimierung des Laminataufbaus und der Zuschnittsgeometrie mit anschließender Fertigung beim zweiten Fertigungstermin. Als Material wurde UD- und BD-Flachsfaserprepreg (Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio und 200BD EP4.5S) und an der Professur SLK angefertigten CFK-TFP-Patches und anderen CFK-Verstärkungen verwendet. Die freien Flächen wurden bei einer Tür zusätzlich mit powerRibs ausgesteift.

Nach der Fertigung wurden die Bauteilränder besäumt und beide Bauteilhälften verklebt. Dabei wurden einige verfahrenstechnische Probleme festgestellt, welche durch betriebsinterne Maßnahmen erfolgreich behoben werden konnten. Abbildung 37 zeigt die fertige Kabinentür (linke Seite) aus dem zweiten Fertigungsversuch. Es ist noch anzumerken, dass die Bauteiloberfläche eine sehr hohe Qualität aufweist und sich kaum fertigungsbedingte Fehler ausgebildet haben.



Abbildung 36: Fertigung der Kabinentür (CoAX2D) bei der Fa. Invent GmbH in Braunschweig

Das Endgewicht nach Besäumen und Verkleben beträgt 1240 g bei einem Bioanteil von 41 M.-% (1. Fertigungsversuch) bzw. 1020 g bei einem Bioanteil von 46 M.-% (2. Fertigungsversuch). Der anvisierte Bioanteil von 50 M.-% kann nur durch Erhöhung des Faservolumenanteils und Reduzierung des CFK-Anteils realisiert werden. In Anbetracht der Türsteifigkeit ist die Steigerung des Bioanteils um weitere 4 M.-% durchaus realistisch.



Abbildung 37: Fertige Kabinentür aus Flachsfaser-Prepreg mit CFK-Verstärkungen

6.2.3 AP 4.5 Prüfaufbau und Funktionstests auf Bauteilebene

Die FEM-Ergebnisse zeigten, dass sich beim kritischen Lastfall (CFD-Last + seitliche Böhe) die untere Ecke der Kabinentür um 20,54 mm (Referenz aus CFK) abhebt. Die Auslenkung der unteren Ecke um max. 20 mm stellte die Grundlage für die Auslegung der Neukonstruktion und den Prüfaufbau (Abbildung 40) dar. Im Realbetrieb wird die Kabinentür in der Hubschrauberkabine an drei Stellen gelagert, wobei bei dem Scharnier (Abbildung 40, Position 2) alle Translations- sowie Rotationsfreiheitsgrade in x- und y-Richtung gesperrt sind. Beim Öffnen geht die Kabinentür nach hinten. Im geschlossenen Zustand wird die Kabinentür an den Positionen 3 und 4 durch ein manuell zu betätigenden Verschlussmechanismus (zwei Verriegelungsbolzen) verschlossen. Dabei bleibt an den Verriegelungsstellen nur der Translations- entlang und der Rotationsfreiheitsgrad um die Bolzenachse erhalten. Auf Basis dieser Überlegungen wurde ein realitätsnaher Prüfaufbau konstruiert und die Auslenkung der unteren Ecke der Kabinentür mittels FEM-Analyse nachgebildet.

Wie der Abbildung 40 zu entnehmen ist, erfolgt die Lagerung der Tür mittels Scharnierlagern sowie einem Lagerbock möglichst realitätsnah. Beim Prüfaufbau wird die untere Ecke der Kabinentür mittels universeller Zug-/Druckmaschine über ein stoffschlüssig verbundenes Krafteinleitungselement und ein Scharnierlager um 20 mm (Ergebnis der FE-Simulation) in z-Richtung ausgelenkt und dabei über eine Kraftmessdose die resultierende Kraft erfasst. Der Versuch wird für jede Auslenkung 10 Mal wiederholt und aus den Messergebnissen der Mittelwert gebildet. Dieser wird anschließend mit der berechneten resultierenden Kraft verglichen.

Die Stelle mit dem kleinsten Profilquerschnitt (Abbildung 39, Messbereich 1) den kritischen Bereich der Konstruktion dar. Aufgrund des hohen resultierenden Biegemomentes und kleinen Flächenträgheitsmomentes entstehen in diesem Bereich hohe Spannungen, welche zum Versagen der Kabinentür führen können. Zur Verifizierung der FE-Ergebnisse wird während der Prüfung dieser Bereich und 2 weitere Bereiche mit einem optischen Messsystem ARAMIS dreidimensional erfasst und die Verschiebungen der Oberfläche ermittelt.

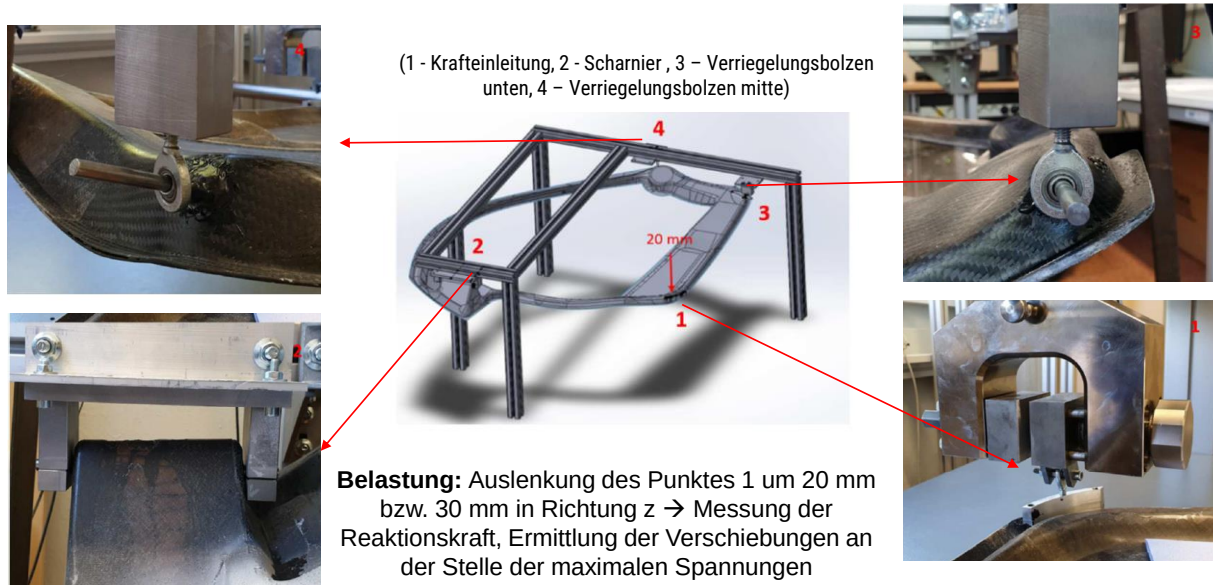


Abbildung 38: Versuchsaufbau für die mechanische Prüfung der Kabinentür (1 - Krafteinleitung, 2 - Scharnier, 3 - Verriegelungsbolzen unten, 4 - Verriegelungsbolzen Mitte)

Die Ergebnisse der Bauteilprüfung (Kabinentür aus dem 1. Fertigungsversuch) sind in der Abbildung 40 zusammengefasst. In der Tabelle 12 sind die Mittelwerte mit den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Bei der Referenztür aus CFK handelt es sich um eine originale Tür, die vom Hersteller Fa. Invent GmbH bezogen wurde. Für besseren Vergleich wurden Ergebnisse aus dem vorangegangenen Projekt InteReSt I eingefügt. Während der Prüfung zeigt die Kraft-Verschiebungs-Kurve ein reversibles lineares Verhalten, wobei die Verschiebung der Kurve mit unzureichender Steifigkeit des Prüfstandes zu erklären ist. Bei 20 mm Auslenkung resultiert eine mittlere Kraft von 102,85 N. Der berechneten Wert liegt bei 105,19 N und ist somit um 2 % kleiner als der gemessene Wert. In Anbetracht dessen, dass durch die Änderung des Fertigungszyklus (Herabsetzung des Drucks (2 bar) und der Temperatur (90°C)) deutlich niedrigere Faservolumenanteile realisiert werden konnten und dadurch eine signifikante Verringerung der Mechanik einherging, kann von einer sehr guten Übereinstimmung der Mess- und FEM-Ergebnisse gesprochen werden. Ferner ist zu sehen, dass

die neu entwickelte Kabinentür (1. Fertigungsversuch) trotz eines um ca. 34 % höheren Gewichts ca. 40 % steifer als die CFK-Variante ist.



Aufgebauter Strukturprüfstand mit ARAMIS-Messsystem

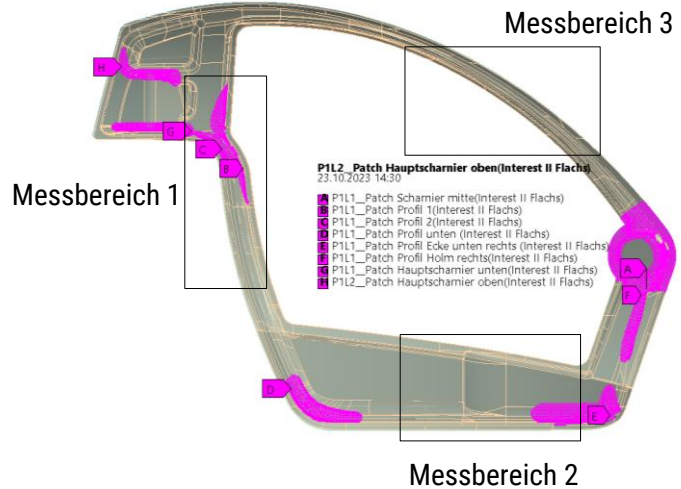


Abbildung 39: Eingebauter Prüfaufbau in der Zug-/Druckmaschine Zwick/Roell Z100 mit Erfassung der Bauteilverchiebungen mit dem optischen Messsystem ARAMIS

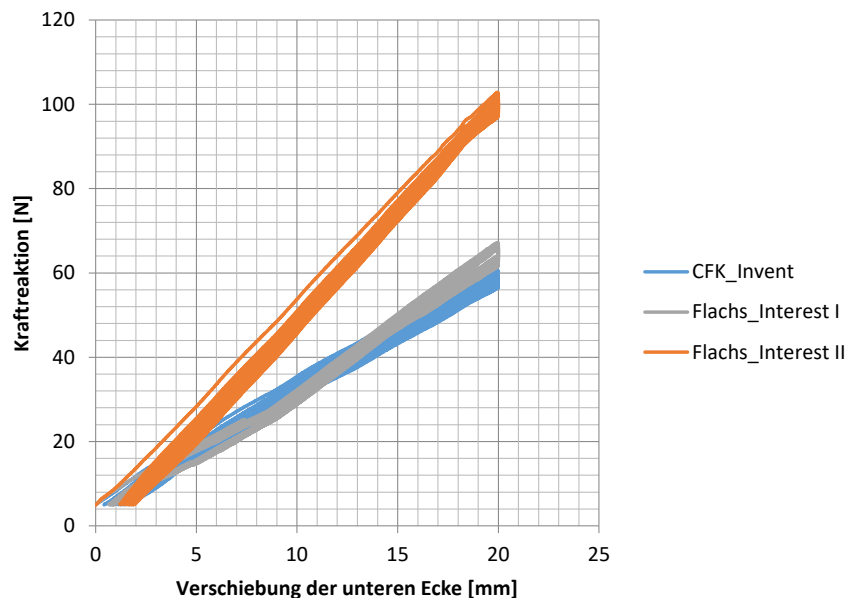


Abbildung 40: Kraftantwort der Referenzkabinentür aus CFK und der biobasierten Varianten

Aufgrund der Entscheidung des Konsortiums die linke Kabinentür aus dem 2. Fertigungsversuch für den Flugversuch zu verwenden, konnte keine weitere mechanische

Prüfung mehr erfolgen. Die Ergebnisse des Projektpartners TUM zeigen, dass die optimierte Kabinentür aus dem 2. Fertigungsversuch mit einem Gewicht von 1020 g deutlich leichter und bei diesem Lastfall mit der CFK-Kabinentür vergleichbar steif ist.

Tabelle 12: Prüfungsergebnisse im Vergleich zu FEM-Ergebnissen (Kabinentür)

	FEM	Mes- sung	Verhältnis (FEM/Mes- sung)	Gewicht (FEM)	Gewicht (Messung)	Bio- Anteil
CFK	78,97 N	61,77	1,28	921 g	920 g	0
Interest I	71,3 N	67,21 N	1,06	1245 g	1258 g	28 %
Interest II 1 Fertigung	105,19 N	102,85 N	1,02	1106,5 g	1240 g	41 %

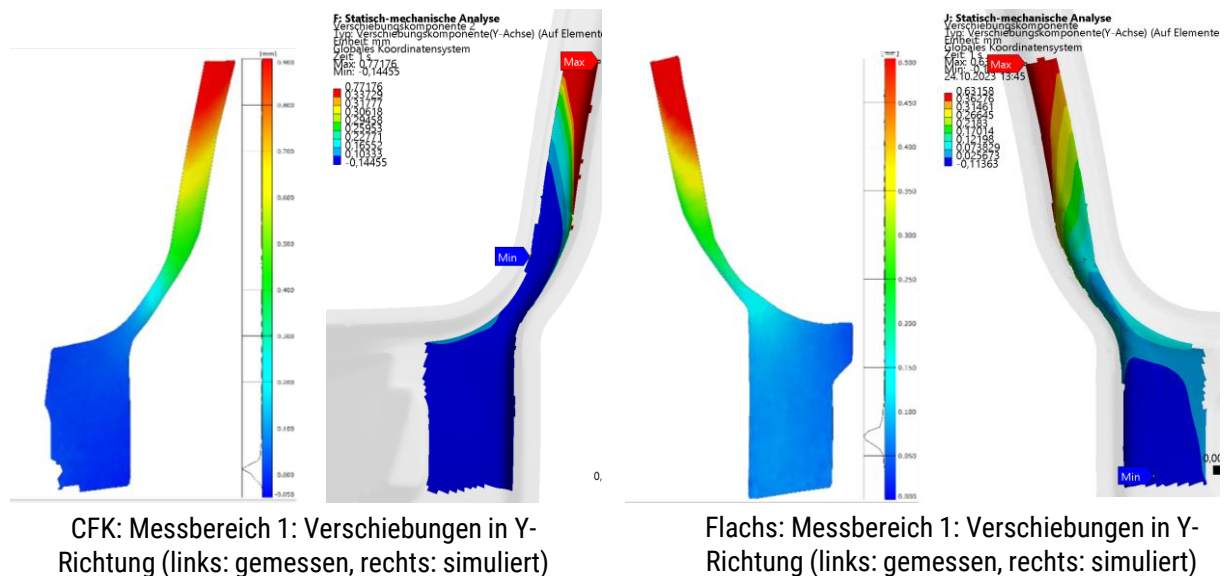


Abbildung 41: Vergleich der gemessenen (rechts) und simulierten (links) Verschiebungen in z-Richtung im Bereich des kleinsten Profilquerschnitts bei 20 mm Auslenkung

Abbildung 41 zeigt den Vergleich der mit ARAMIS aufgenommenen (rechts) und mittels FE-Simulation berechneten (links) Verschiebungen in z-Richtung der hybriden FFKV- im Vergleich zu CFK-Kabinentür. Der sichtbare Bereich in x- bzw. y-Richtung beträgt ca. 200 mm. Wie den Bildern entnommen werden kann, wird das Kabinentürkantenprofil sowohl gebogen als auch tordiert. Trotz weniger steifen Verhaltens der FFKV-Kabinentür ist ein sehr guter qualitativer und vor allem quantitativer Verlauf der Verschiebungen erkennbar. Die Abweichungen der gemessenen zu simulierten Werten liegen je nach Bereich zwischen 3 bis 12 %. Somit lässt sich schlussfolgern, dass

die Verformung der Kabinentür trotz nichtlinearem Materialverhalten mittels klassischer Laminattheorie numerisch gut abgebildet kann.

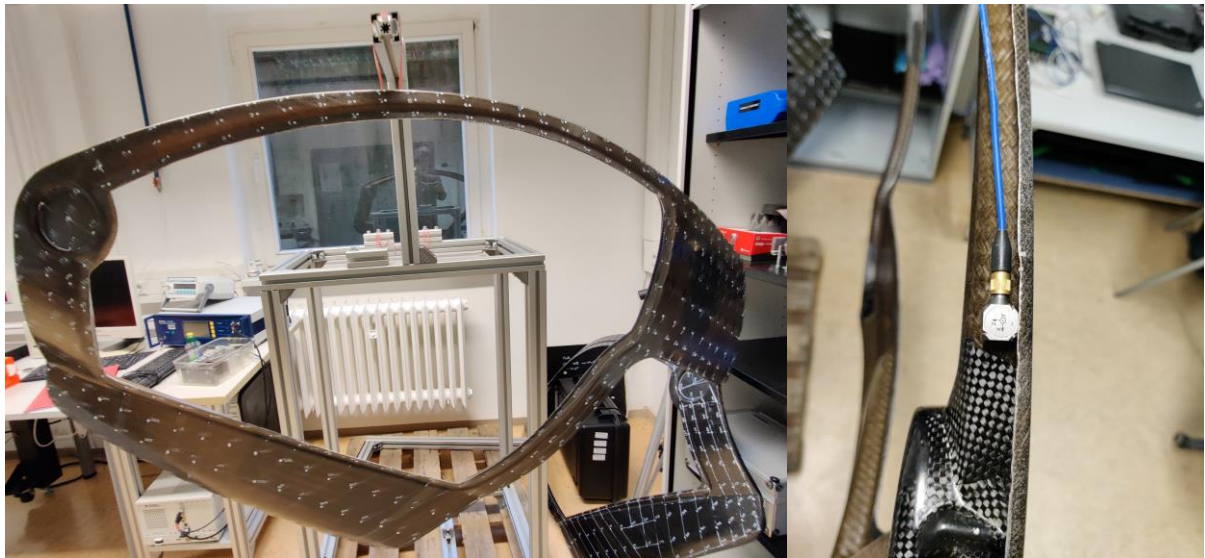


Abbildung 42: Durchführung einer experimentellen Modalanalyse am freidrehbar gelagerter Kabinentür

Um das vibroakustisches Verhalten zu verifizieren wurde eine experimentale Modalanalyse durchgeführt. Dabei wurde die jeweilige Tür freidrehbar gelagert und mit einem Modalhammer angeregt (Abbildung 42).

Aus den Messergebnissen wurden Übertragungsfunktionen berechnet, welche in Abbildung 43 für CFK- und NFK-Tür gegenübergestellt sind. Es ist erkennbar, dass bei der NFK-Tür die Resonanzfrequenzen zu niedrigen Frequenzen verschoben und in ihrem Betrag kleiner sind.

Die Dämpfungsfaktoren, die in Tabelle 13 zu sehen sind, verdeutlichen das deutlich bessere Dämpfungsverhalten der NFK-Tür. Bei niedrigen Frequenzen ist die Dämpfung der NFK-Tür um Faktor 3 und bei höheren Frequenzen um Faktor 2 größer.

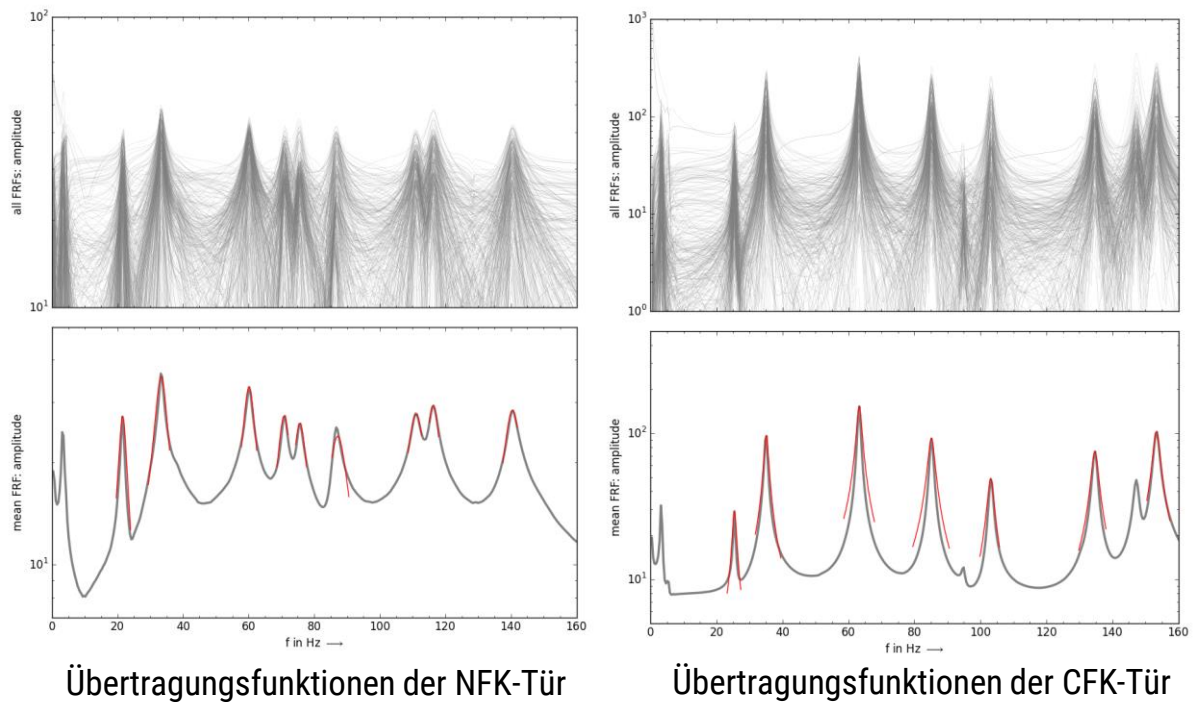


Abbildung 43: Übertragungsfunktionen der CFK- und FFKV-Tür

Tabelle 13: Dämpfungsfaktoren entsprechend den ermittelten Resonanzfrequenzen

NFK-Kabinentür		CFK-Kabinentür	
f in Hz	D in %	f in Hz	D in %
21,7	6,14	25,4	2,38
33,4	6,02	35,1	1,96
60,2	3,34	63,3	1,24
70,9	3,06	85,1	1,19
75,8	3,02	94,3	1,34
87,3	3,49	103,1	0,96
111,2	2,62	134,7	0,77
116,3	1,98	147,5	0,92
140,5	2,03	153,4	0,68

6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die offenen Fragestellungen hinsichtlich der Auswirkung des nichtlinearen, irreversiblen Materialverhalten von UD- bzw. BD-Flachsfaserlaminaten unter Zug-/Druck-/Schubbelastung auf das Bruchverhalten konnten im Rahmen des Verbundvorhabens weitestgehend geklärt werden. Dazu wurde ein neuartiges Testverfahren zur Erzeugung eines überlagerten Normal-/Schubspannungszustandes in Flachprobekörpern entwickelt, mit dessen Hilfe Bruchkurven ermittelt und Versagenshypothesen nach PUCK und LaRC verifiziert und kalibriert werden konnten. Ferner wurde zur numerischen Abbildung des orthotropen nichtlinearen Materialverhaltens von Flachs-EP-Proben eine auf Basis der CDM-Theorie basierende Berechnungsabfolge, bestehend aus einem vorgeschalteten Python-Skript und USDFLD-Subroutine für ABAQUS, entwickelt.

Die Auslegung der biobasierten Kabinentür wurde in den Programmen Optistruct (Hyperworks) und Ansys Workbench unter Anwendung einer Kombination aus Free Sizing, Bundle Sizing und Shuffle Optimierung durchgeführt. Als primäre Optimierungszielgröße wurde die Verformung der nicht befestigten unteren Kabinentürecke von 20 mm festgelegt, welche sich im Zuge der im Lastenheft spezifizierten aerodynamischen Last und einer seitlich nach außen wirkenden Windböe von 10 m/s definiert. Die FE-Ergebnisse wurden durch die mechanische Prüfung der gefertigten biobasierten Kabinentür validiert. Dazu wurden in Anlehnung an die Befestigung und Verriegelung der Kabinentür in der Hubschrauberkabine ein realitätsnaher Versuchsaufbau erarbeitet und simulativ nachgebildet. Während der Bauteilprüfung wurden die Verschiebungen der Bauteiloberfläche an ausgewählten Stellen mittels eines optischen 3D-Messsystems (Aramis) erfasst und den FE-Ergebnissen gegenübergestellt.

Im Ergebnis konnte nach umfassender materialseitigen und technologischen Betrachtung eine Kompromisslösung mit einem Grundlaminataufbau aus einem Flachsfaser-Gelege bzw. -Gewebe und partiellen Verstärkungen aus CF-TFP-Patches und CF-Gelege/-Gewebe in stark belasteten Bereichen ausgearbeitet werden. Mit einem tatsächlichen Gewicht von 985 g (ohne eingeklebte PMMA-Fensterscheibe) und einem Biomassenanteil von rund 30 Ma% ist die hybride biobasierte Kabinentür um 255 g schwerer als die Referenzvariante aus CFK. Dies liegt noch im Rahmen des im Lastenheft definierten zulässigen Gesamtgewichts. In Hinblick auf die ökologische Bewertung kann durch den Einsatz von biobasierten Rohstoffen, besonders in der Rohstoff- und Bauteilherstellungsphase, ein signifikanter Mehrwert generiert werden, allerdings kann die einhergehende Gewichtszunahme während der langen Bauteilnutzungsphase zu einem höheren CO₂-Emmissionwert führen. Ein denkbarer Ansatz zur Gewichtsreduktion, ist die Verwendung eines leichteren vorimprägnierten Flachsfasergeleges (UD-Prepregs) anstatt des „trockenen“ Halbzeugs. Das hohe Substitutionspotenzial von

Flachsfasern und potentiell erreichbare CO₂-Einsparung gegenüber CFK lassen die Entwicklung von leistungsfähigeren, vollständig biobasierten Halbzeugen als sinnvoll und aussichtsreich einstufen.

Trotz des eingetretenen Mehrgewichts zeigt die entwickelte biobasierte Kabinentür ein besseres Verformungsverhalten sowie laut FE-Berechnung ein um ca. 30 % günstigeres Dämpfungsverhalten bei kritischen Resonanzfrequenzen im Bereich 400–850 Hz auf. Ferner bestätigen die Messergebnisse, dass sich die Topografieoptimierung gut für die Auslegung von CF-Verstärkungen mit einfachem variablem Faserdesign eignet. Durch die nachgeschalteten Optimierungen der Faserrichtung, der diskreten Schichtdicken sowie der Stapelreihenfolge des Grundlaminataufbaus konnte dagegen keine weitere Verbesserung des Verformungsverhaltens oder der Minimierung des Bauteilgewichtes erzielt werden. In Anbetracht des überschaubaren Berechnungsaufwandes wird diese Auslegungsmethodik weiterverfolgt und optimiert.

6.4 Organisatorisches

Das 3. Meilensteintreffen fand am 26.10.2023 in Präsenz an der TU München statt, bei dem die Simulations- und Versuchsergebnisse diskutiert wurden und Einzelheiten zur Ökobilanzierung abgestimmt wurden. Zudem konnte nach Absprache mit den Projektpartnern ein beschleunigter Arbeitsplan erarbeitet werden, um die noch ausstehenden Arbeiten noch rechtzeitig bis Projektabschluss abschließen zu können.

Integration in die Lehre

Nachdem der thematische Schwerpunkt des Projektes „InteReSt I“ bereits erfolgreich in die Vorlesungsreihe „Biobasierte Polymerwerkstoffe und Verbundstrukturen“ des internationalen Master-Studienganges „MERGE“ integriert wurde, wird ein zunehmendes Interesse seitens der Studierenden unterschiedlicher Studiengänge verzeichnet. In diesem Zuge wurden von der Professur SLK mehrere Studienarbeiten ausgeschrieben und befinden sich derzeit in Bearbeitung oder bereits abgeschlossen (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Studienarbeiten im Berichtszeitraum

Studienarbeit	BA/SA/MA	Student	Status
Vergleich von Bruchkriterien für naturfaserbasierte duroplastische Faserkunststoffverbunde	BA	Jonas Reinhardt	abgeschlossen
Experimentelle Verifizierung des Bruckkriteriums nach	BA	Rene Willsch	abgeschlossen

Puck für naturfaserbasierte duroplastische Faserkunststoffverbunde			
Entwicklung eines Phyton-Skriptes (ABAQUS) zum Verarbeiten von Versuchsdaten für nachgeschaltete Material-Implementierung	BA	Brahim Mouguafi	abgeschlossen

7 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die bewilligten finanziellen Mittel wurden gemäß dem Antrag eingesetzt und für die eingeplanten Positionen verwendet. Die tatsächlichen, während der Projektlaufzeit entstandenen, Ausgaben sind in den Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Tatsächliche Ausgaben während der Projektlaufzeit

Position Gesamtfinanzierungsplan	Entstandene Ausgaben bis einschl. 2021 in €	Entstandene Ausgaben bis einschl. 2022 in €	Entstandene Ausgaben bis einschl. 2023 in €	Gesamtfinanzierungsplan
0812	61.218,64	141.961,44	203.744,38	204.400,00
0822	2.700,24	7.587,31	7.587,31	7.100,00
0843	3.486,64	1.038,75	9.646,05	10.000,00
0846	46,50	229,58	229,58	1.500,00
0850	7.587,31	7.099,02	14.686,33	26.500,00
Summe	67.452,23	162.382,71	235.502,66	249.500,00

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Trotz immer stärker werdendem Interesse an „grünen“ Werkstoffen und Technologien seitens der Luftfahrtbranche, vor allem im Zuge drohender regulatorischer Umweltvorgaben, konnte das Verbundvorhaben „InteReSt II“ aufgrund eines enormen wirtschaftlichen Risikos für Industrieunternehmen ohne öffentliche Förderung nicht durchgeführt werden.

Das übergeordnete Ziel des Projektes war die Klärung noch offener Fragestellungen hinsichtlich des besonderen Materialverhaltens von Naturfaserverbunden sowie die

Weiterentwicklung einer funktionsintegrativen und ressourcenschonenden Leichtbaustruktur für die Luftfahrt, besonders im ULH-Bereich. Aufgrund der fehlenden Erfahrungswerte und einer nicht ausreichenden Datenbasis für die numerische Auslegung von biobasierten Luftfahrtstrukturen wurde im Vorhaben Grundlagenforschung betrieben. Ferner stellten die durchgeführten Arbeiten, hinsichtlich der Optimierung des Auslegungsprozesses, der Technologieentwicklung zur Herstellung von hybriden Naturfaserhalbzeugen sowie der Verfahrensentwicklung bzw. -optimierung zur Herstellung von Luftfahrtstrukturen, einen notwendigen und wichtigen Schritt in Richtung eines zuverlässigen und durchgängigen Auslegungs-, Simulations- und Technologiekonzepts, zur Umsetzung von biogenen semistrukturellen Luftfahrtbauteilen, dar. Dies ist für die Umsetzung des Förderziels „Umweltfreundlicher Luftverkehr“ unabdingbar, weil die Luftfahrtbranche wegen der hohen Sicherheitsanforderungen, bei welchen jegliche neuen Werkstoffe und Prozesse einer strengen Qualitätsüberwachung unterliegen, eher träge auf ökologische Trends reagiert.

9 Voraussichtlicher Nutzen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „InteReSt II“ war keine klassische Produktvermarktung mit kommerziellem Aspekt vorgesehen. Die Verbundpartner verfolgen vielmehr das Ziel, Referenzen zu schaffen und Know-how aufzubauen, um in einem zukunftsorientierten Forschungsgebiet für zukünftige Aufgaben bestens ausgewiesen zu sein. So wurden die Projektergebnisse im Sinne eines Wissenschaftsmarketings publiziert, um Interessenten im industriellen Umfeld für nachfolgende Drittmittelprojekte zu gewinnen. Im Berichtszeitraum wurden ausgewählte Projektergebnisse bei DLRK 2021/22 und im CEAS Aeronautical Journal (Springer Verlag) veröffentlicht.

Bis zum aktuellen Zeitpunkt bekundeten mehrere Unternehmen, wie z.B. EFW GmbH, INVENT GmbH und Airbus Helicopters, ihr Interesse an einer potentiellen Zusammenarbeit und der Entwicklung von Luftfahrtkomponenten aus biogenen hybriden Hochleistungskompositen. Daher ist vorgesehen die Projektergebnisse mit den interessierten Unternehmen zu diskutieren und ggf. Upscaling auf Großserienanwendungen durchzuführen. Weiterhin wurde im Rahmen der LUFO-VII 1 Runde einige Skizzen zu noch offenen Fragestellungen in gleicher Konstellation eingereicht.

Die im Projektantrag beschriebenen und im Berichtszeitraum verfolgten Verwertungsstrategien werden auch nach dem Vorhabensende fortgeführt. Hierzu zählen insbesondere:

- Analyse möglicher Kundenpotenziale und den daraus ableitbaren Absatzmärkten sowie deren projektbegleitender Fortschreitung,

- Öffentlichkeitsarbeit zur Erhöhung des Bekanntheitsgrades der Entwicklungsziele und
- Proaktive Bewerbung des Entwicklungsansatzes und der erzielten Ergebnisse, um potenzielle Anwender frühzeitig auf die Anwendungsvorteile und -möglichkeiten aufmerksam zu machen.

Eine industriegetragene Finanzierung von Anschlussprojekten nach Beendigung der öffentlichen Förderung bleibt ein weiteres wichtiges Ziel der TU Chemnitz. Über den bewilligten Projektzeitraum hinaus wird sich TUC-SLK weiter als kompetente Ansprechstelle für Wissenschaft und Industrie zu Fragen rund um biobasierte Verbundwerkstoffe etablieren. Das umfangreiche angesammelte Knowhow und die maschinentechnische Ausstattung von TUC-IST ermöglicht eine schnelle Bearbeitung von Industrieanfragen und trägt somit zur erfolgreichen Verwertung der Projektergebnisse bei.

Der thematische Schwerpunkt des Vorhabens „InteReSt II“ wurde zudem in einige Vorlesungsreihen des Masterstudienganges Lichtbau und Advanced Functional Materials integriert. So konnten die Studenten der TUC ab dem Sommersemester 2022 erste theoretischen Inhalte lernen und praktische Erfahrungen in Bezug auf die Fertigung hybrider Biokunststoffverbunde sammeln. Außerdem wurden an der Professur drei Bachelor- und Masterarbeiten ausgeschrieben, betreut und durchgeführt.

10 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Analyse von aktuellen Veröffentlichungen (siehe Kapitel 4) sowie Besuche von Tagungen und Fachsymposien zeigen, dass viel zum Thema hybride Naturfaserverbundwerkstoffe, insbesondere zu Flachsfaserverbunden, geforscht wird. Die potentiellen Einsatzbereiche beschränken sich nicht nur auf Luftfahrtanwendungen, sondern vielmehr im Bereich Automotive und Schienenverkehr. Anders als beim Verbundvorhaben „InteReSt“, in dem repräsentative Hubschrauberbauteile in hybridisierter Bauweise umgesetzt wurde, gehen die Publikationen auf das mikromechanische Materialverhalten ein und diskutieren z.B. die Ursachen für das orthotrope nichtlineare Materialverhalten von unidirektionalen Flachsfaserlaminaten. Da vor allem in der Luftfahrt das genaue Verständnis des Materialverhaltens für zukünftige Entwicklungen eine sicherheitsrelevante Rolle spielt, wurde diesem Thema im Laufe des Verbundvorhabens ein besonderes Augenmerk gewidmet und zahlreiche Arbeiten durchgeführt.

11 Veröffentlichung der Projektergebnisse

Während der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse auf verschiedenen Konferenzen, Symposien, in Wissenschaftszeitschriften und bei Preisverleihungen in Form von Publikationen, Vorträgen und Beiträgen veröffentlicht (Tabelle 16). Dabei konnte festgehalten werden, dass das Thema nachhaltige hybride Werkstoffe für die Luftfahrt beim fachkundigen Publikum und Vertretern der Industrie mit großem Interesse aufgenommen wurde.

Tabelle 16: Übersicht der im Berichtszeitraum veröffentlichten Publikationen

Titel	Autoren	Ort der Publikation
Biobasierte hybride Kabinentür eines Ultraleichthubschraubers mit variabel-axialem Faserdesign	Svidler, Rinberg	DLRK 2021
Bio-based hybrid cabin door of ultralight helicopter with variable-axis fiber design	Svidler, Rinberg	CEAS Aeronautical Journal (Springer Verlag) 2023
Potentials of natural fibre-reinforced composites for dynamic applications	Klährner, Kroll, Svidler	18th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering 2024
Untersuchung des Bruch- und Versagensverhaltens beim überlagerten Normal-/Schubspannungszustand	Svidler, Rinberg	Geplant für 2024
Beitrag zur numerischen Abbildung des orthotropen nichtlinearen Materialverhaltens von Flachsfaserverbunden	Svidler, Rinberg	Geplant für 2024

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strukturplan aus Vorhabensbeschreibung	7
Abbildung 2: Netzplan aus Vorhabensbeschreibung	8
Abbildung 3: Zeitplan aus Vorhabensbeschreibung	9
Abbildung 4: Verfügbare Programmsysteme für die Durchführung der Topologie-optimierung.....	17
Abbildung 5: Ablauf einer Topologieoptimierung	17
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Belastungskombination beim Z/D-T- Versuch und entsprechende Zuordnung auf der σ_2 - τ_{21} - Spannungsebene sowie resultierender Spannungszustand im Probenausschnitt (Zfb-Kurve aus WWFE)	19
Abbildung 7: Schubspannungsverteilung in einer frei gelagerten und fest eingespannten Iosipescu-Probe mit einer 90°-Faserorientierung bei einer relativen Verschiebung der Probehalterung von 0,5 mm (simuliert mit Anfangs-Sekantenmoduln, Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio).....	20
Abbildung 8: Schubspannungsverteilung in einer frei gelagerten und fest eingespannten Iosipescu-Probe mit einer 0°-Faserorientierung bei einer relativen Verschiebung der Probehalterung von 0,5 mm (Simuliert mit Anfangs-Sekantenmoduln, Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio).....	21
Abbildung 9: Normalspannungen in der fest eingespannten Iosipescu-Probe mit einer 90°-Faserorientierung bei einer relativen Verschiebung der Probehalterung von 0,5 mm (Simuliert mit Anfangs- Sekantenmoduln, Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio)	22
Abbildung 10: Rendering der CAD-Konstruktion der Krafteinleitungsvorrichtung	24
Abbildung 11: Im Technikum der TUC hergestellte Prüfvorrichtung zur Erzeugung eines überlagerten σ_2 - τ_{21} - Spannungszustandes im Iosipescu-Schubprobekörper.....	25
Abbildung 12: Geschlossene Probehalterung mit applizierter DMS-Rosette (links). Offene Probehalterung mit einem gut erkennbaren Schubbruch im gekerbten Bereich und einem Einspannversagen (rechts)	26
Abbildung 13: Ergebnisse der Prüfung bei einem Verhältnis (Querdruck/Schub) von 1:1	26
Abbildung 14: Ergebnisse der mechanischen Untersuchung mit überlagertem σ_2 - τ_{12} -Spannungszustand und eingezeichneten Zfb-Kurven nach Puck96 (rot) und LaRC04 (olivengrün). Dargestellt sind Durchschnittskurven (mind. 5 Proben) mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen $\Omega = \sigma_2/\tau_{12}$ (gestrichelt) und deren geglättete Verläufe (durchgezogen).	27
Abbildung 15: Flussdiagramm des Berechnungsablaufs.....	32

Abbildung 16: Ergebnisse der FE-Analyse unter Verwendung des Berechnungsablaufes.....	33
Abbildung 17: Verformungsplot einer Hubschraubertür aus Fiberpreg UD150 EP1,5	34
Abbildung 18: Auslegung von TFP-Verstärkungen mittels Beurteilung der Hauptspannungsverläufe	35
Abbildung 19: Versagensplots nach Puck 2D (Flach [0; 45; -45; 90] _s)	35
Abbildung 20: Laminataufbau: 4 Lagen UD-Flachs (Außenseite) und 2 Lagen BD-Flachs (Innenseite) mit CFK-Verstärkung	36
Abbildung 21: Verformungsbild der optimierten biobasierten Kabinentür in Folge der CFD-Last.....	37
Abbildung 22: Versagensplots der Innenseite (links: Puck 2D, rechts: LaRC03).....	37
Abbildung 23: Zug/Druck/Torsion-Probekörper in Anlehnung an die Versuche von Puck/Cunze	38
Abbildung 24: Beispiel einer experimentellen Untersuchung an GFK-Rohrprobekörpern [Quelle: Cunze, Neue Bruchkriterien und Festigkeitsnachweise, VDI, 1997)]	39
Abbildung 25: Verfahren zur Herstellung von Z/D-T-Probekörpern aus Flachspreg	40
Abbildung 26: Mode I Prüfung [Quelle: Fa. Zwick-Roell GmbH]	44
Abbildung 27: Ergebnisse der Mode I Versuche.....	45
Abbildung 28: Mode II Prüfung [Quelle: Fa. Zwick-Roell GmbH]	45
Abbildung 29: Ergebnisse der Mode II Versuche.....	46
Abbildung 30: Mixed-Mode Prüfung [Quelle: Fa. Zwick-Roell GmbH]	46
Abbildung 31: Ergebnisse der Mixed-Mode Versuche	47
Abbildung 32: Ergebnisse der Druckversuche nach DIN EN ISO 14126 in Faserrichtung (links) und quer zur Faserrichtung (rechts) (Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio).....	48
Abbildung 33: Ergebnisse der Druckversuche nach DIN EN ISO 14126 (äqv. für beide Faserorientierungen) (Material: Fiberpreg N 200 T EP4.5S Bio).....	49
Abbildung 34: Mikroskopieaufnahmen einer beschädigten BD-Druckprobe. Links: Bruchstelle mit sichtbarer Delamination und Faserknicken, recht: lokale Vergrößerung der geknickten Flachsfasern (Material: Fiberpreg N 200 T EP4.5S Bio)	50
Abbildung 35: Ergebnisse der Druckversuche mit drei Lastniveaus nach DIN EN ISO 14126 in Faserrichtung (links) und quer zur Faserrichtung (rechts) (Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio).....	51
Abbildung 36: Fertigung der Kabinentür (CoAX2D) bei der Fa. Invent GmbH in Braunschweig.....	53

Abbildung 37: Fertige Kabinentür aus Flachsfaser-Prepreg mit CFK-Verstärkungen	54
Abbildung 38: Versuchsaufbau für die mechanische Prüfung der Kabinentür (1 - Krafteinleitung, 2 - Scharnier , 3 – Verriegelungsbolzen unten, 4 – Verriegelungsbolzen Mitte).....	55
Abbildung 39: Eingebauter Prüfaufbau in der Zug-/Druckmaschine Zwick/Roell Z100 mit Erfassung der Bauteilverchiebungen mit dem optischen Messsystem ARAMIS	56
Abbildung 40: Kraftantwort der Refenzkabinentür aus CFK und der biobasierten Varianten.....	56
Abbildung 41: Vergleich der gemessenen (rechts) und simulierten (links) Verschiebungen in z-Richtung im Bereich des kleinsten Profilquerschnitts bei 20 mm Auslenkung	57
Abbildung 42: Durchführung einer experimentalen Modalanalyse am freidrehbar gelagerter Kabinentür.....	58
Abbildung 43: Übertragungsfunktionen der CFK- und FFKV-Tür	59

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die von TUC-SLK bearbeiten Arbeitspakete (aufgrund der verspäteten Projektstarts wurde die Zeiträume um jeweils 12 Monate nach hinten verschoben)	2
Tabelle 2: Durchgeführte Projekttreffen	14
Tabelle 3: Mittels FE-Analyse berechneten Korrekturfaktoren für eine frei gelagerte und fest eingespannte Iosipescu-Probe mit 0°- und 90°-Faserorientierung.....	22
Tabelle 4: Untersuchte Verfahren zur Herstellung von Z/D-T-Probekörpern	40
Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Z/D-T-Probekörperherstellung	41
Tabelle 6: Ergebnisse der Mode I Versuche: Bruchzähigkeitskennwerte	44
Tabelle 7: Ergebnisse der Mode II Versuche: Bruchzähigkeitskennwerte	46
Tabelle 8: Ergebnisse der Mixed-Mode-Versuche: Bruchzähigkeitskennwerte	47
Tabelle 9: Mikroskopieaufnahmen von Schliffproben der UD-Druckproben (Material: Fiberpreg N 120 UD EP4.5S Bio).....	50
Tabelle 10: Mikroskopieaufnahmen von faserparallel belasteten UD-Druckproben nach einer Belastung mit dem Lastniveau 3 (Abbildung 35, links).....	51
Tabelle 11: Mikroskopieaufnahmen von UD-Druckproben mit einer fasersenkrechten Faserorientierung nach drei unterschiedlichen Lastniveaus (Abbildung 35, rechts)	52
Tabelle 12: Prüfungsergebnisse im Vergleich zu FEM-Ergebnissen (Kabinentür) ...	57

Tabelle 13: Dämpfungsfaktoren entsprechend den ermittelten Resonanzfrequenzen	59
Tabelle 14: Studienarbeiten im Berichtszeitraum	61
Tabelle 15: Tatsächliche Ausgaben während der Projektlaufzeit	62
Tabelle 16: Übersicht der im Berichtszeitraum veröffentlichten Publikationen	65