Biotex-Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF)	03X10000E

Vorhabensbezeichnung:

Bionische Gestaltung und textile Fertigungsverfahren zur kostengünstigen Herstellung optimierter Faserverbundstrukturen

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2005 – 31.12.2008

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Zu Beginn des Projektes war innerhalb des **Arbeitspaketes 2.1 „Textiltechnik: 3D-Tailored-Fiber-Placement“** eine Zusammenarbeit mit der Firma KSL bezüglich der Entwicklung eines 3D-TFP-Verfahrens geplant. Da KSL während der Projektlaufzeit keine 3D-TFP-Anlage entwickelte, entfiel diese Aufgabe.

Innerhalb **des Arbeitspaketes 3.1 „Werkstoffkundliche Grundlagen“** bestand die Aufgabe des IPF darin, die Zugfestigkeit und die Restzugfestigkeit nach dynamischer Zug-Schwell-Beanspruchung von Lochproben aus kohlefaserverstärktem Kunststoff zu ermitteln. Die Preforms der Lochproben wurden mit den im Projekt entwickelten bzw. weiterentwickelten Preformtechnologien hergestellt . insgesamt wurden 120 statische Zugversuche und 60 dynamische Zug-Schwell-Versuche durchgeführt werden.

Im Rahmen des **Arbeitspaketes 3.2 „Gestaltungsrichtlinien“** sollten vom IPF die im Projekt zur Bewertung des CAIO-Verfahrens definierte Subkomponente Open-Hole (OH) hergestellt und deren Verhalten unter statischer Zugbeanspruchung untersucht werden. Des Weiteren war es Aufgabe des IPF, verschiedene Varianten der Subkomponente Halbkugel zu fertigen und deren Verformungsverhalten unter Innendruckbelastungen zu bewerten. Weiterhin war es Aufgabe des IPF die Preform eines CAIO-Omega-Spantes zu entwickeln, herzustellen, den Spant mit Epoxidharz zu injizieren, so wie alle Spante in Zusammenarbeit mit dem IFB zu prüfen.

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im IPF waren innerhalb der gesamten Projektlaufzeit ein wissenschaftlicher Mitarbeiter, so wie für einen Teil der Projektlaufzeit ein technischer Angestellter zur Bearbeitung der projektbezogenen Aufgaben tätig. Die Durchführung aller dem IPF gestellten Aufgaben, mit Ausnahme der Prüfung des Demonstratorbauteils Omega-Spant, erfolgte in den Räumlichkeiten des IPF. Die für die Fertigung und Prüfung der Subkomponenten notwendigen Werkzeuge und Vorrichtungen wurden durch die Projektmitarbeiter konstruiert und gefertigt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn des Projektes wurde zunächst eine Literaturrecherche im Bereich Fertigung und Prüfung von faserverstärkten Kunststoffen durchgeführt. Im Arbeitspaket 3.1. wurde mit der Ermittlung der Materialkennwerte der CFK- Lochproben im dynamischen Zug-Schwell-Versuch unmittelbar nach Fertigstellung der Prüfkörper im Projektmonat (PM) 18 begonnen. Aufgrund der Komplexität der Versuche und der begrenzten Probenanzahl wurden zur fehlerfreien Versuchsdurchführung, an im IPF hergestellten Modellprüfkörpern aus GFK, Voruntersuchungen ab dem PM 9 durchgeführt. Die Prüfung und Auswertung der untersuchten Lochproben nahm aufgrund der niedrigen Prüffrequenzen von 5 Hz und der hohen Lastspielzahlen (N = 200.000), inklusive Auswertung der Versuchsdaten und Berichterstellung, insgesamt 15 Monate in Anspruch. Die Ermittlung der Materialkennwerte war somit im PM 32 abgeschlossen. Dies entsprach nicht dem ursprünglichen Zeitplan. Laut diesem sollte die Lochprobenprüfung im PM 18 abgeschlossen sein. Zum Zeitpunkt der Zeitplandefinition war aber noch nicht der Umfang des Prüfprogramms festgelegt worden. Unter anderem sind während der Projektlaufzeit Fibre Patch Preforming (FPP) – Proben hinzugekommen. Diese waren zu Beginn des Proektes nicht geplant. Weiterhin wurde die aufwendige Prüfkörperfertigung unterschätzt. Die Lochproben standen somit erst ab dem PM 18 für die Prüfung zu Verfügung.

Mit den Arbeiten im Arbeitspaket 3.2 wurde im PM 3 begonnen. Dabei wurden zunächst die für die Herstellung und Prüfung der Subkomponenten notwendigen Werkzeuge und Vorrichtungen konstruiert und hergestellt. Weiterhin wurde ein Konvertierungsprogramm zum Einlesen der CAIO-Daten in Auto-CAD entwickelt. Dieses Software-Werkzeug ist notwendig, um CAIO-Liniendaten in ein Stickmuster zu übertragen.

Der größte Teil der Arbeiten für die Prüfung und Herstellung der Subkomponente Halbkugel (Arbeitspaket 3.2) wurde in den PM 33 bis 36 durchgeführt.

Die Herstellung, Prüfung und Auswertung der Subkomponente Open-Hole erfolgte in den PM 37 bis 41.

Die im Rahmen des Arbeitspaketes 3.2. durchgeführten Arbeiten zum Demonstratorbauteil-Omega-Spant wurden in den PM 42 bis 46 durchgeführt. In den letzten beiden Monaten wurden die erzielten Ergebnisse für die Gestaltungsrichtlinie aufbereitet und der Abschlussbericht begonnen. Trotz der Verzögerung bei der Lochprobenprüfung, konnten alle durchzuführenden Arbeiten innerhalb der Projektlaufzeit abgeschlossen werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand , an den angeknüpft wurde

Die Preformfertigung, für die vom IPF im Arbeitspaket 3.1 Werkstoff und Strukturtechnologie hergestellten Prüfkörper, erfolgte ausschließlich mit Hilfe der TFP-Technologie. Diese Technologie wurde im IPF entwickelt. Wissenschaftliche Detailinformationen hierzu sind erläutert in:

- „Beanspruchungsgerechte Textilkonstruktionen für Composite-Bauteile“, Technische Textilien/Technical Textiles, 1995, 38 von K. Gliesche und D. Feltin,

- „Tailored Fiber Placement - Mechanical Properties and Applications“, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1998, 17 - 9, 774-786 von P. Mattheij, K. Gliesche und D. Feltin

- „3D Reinforced Stitched carbon/epoxy Laminates made by Tailored Fibre Placement“, Composite Part A, 2000, 571 von P. Mattheij, K. Gliesche und D. Feltin

Die Untersuchungen an gelochten CFK-Proben unter dynamischer Zug-Schwell-Belastung orientierte sich an Vorgaben des MBB-Berichtes TN-TE 534-9-89 und der AITM 1-0007 Norm.

Des weiteren wurden zur Herstellung der Prüfkörper und Subkomponenten Standardwerke, wie „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“ von Helmut Schürmann und „Faserverbundbauweisen – Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix“ von Manfred Flemming, Gerhard Ziegmann und Siegfried Roth, herangezogen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im AP 3.1 fand eine Zusammenarbeit von Seiten des IPF, mit dem IFB und der EADS statt. Für die am IPF durchgeführten dynamischen Zug-Schwell-Versuche an Lochproben wurden am IFB die, für die Probenherstellung notwendigen, Prüfplatten mit Epoxidharz injiziert. Die EADS lieferte die FPP Proben für die Versuche.

Im Rahmen des AP 3.2 wurde bei den Untersuchungen der Subkomponente Halbkugel mit den Projektpartnern EADS und der Fa. Cetex zusammengearbeitet. Besonders mit der Fa. Cetex fanden hierzu mehrere bilaterale Treffen statt. Des weiteren wurde in AP 3.2. bei der Auslegung des Omega-Spantes intensiv mit den beiden Projektpartnern Moldenhauer und IFB zusammengearbeitet.

II. Eingehende Darstellung

1. Darstellung der erzielten Ergebnisse

1.1. AP 3.1. Werkstoffkundliche Grundlagen

Für die Anwendung der im Projekt entwickelten textilen Preformtechnologien in der Industrie sind Werkstoffkennwerte, der mit Hilfe dieser Preformtechnologien hergestellten Halbzeuge, notwendig.

Im Rahmen des AP 3.1. wurde hierfür am IPF das Verhalten von gelochten CFK-Proben, hergestellt aus verschiedenen Preformtypen, unter dynamischer Zug-Schwell-Belastung untersucht. Der Prüfaufbau zu den dynamischen Zug-Schwell-Versuchen (dyn. ZSV) ist in

Abb. 1 dargestellt.

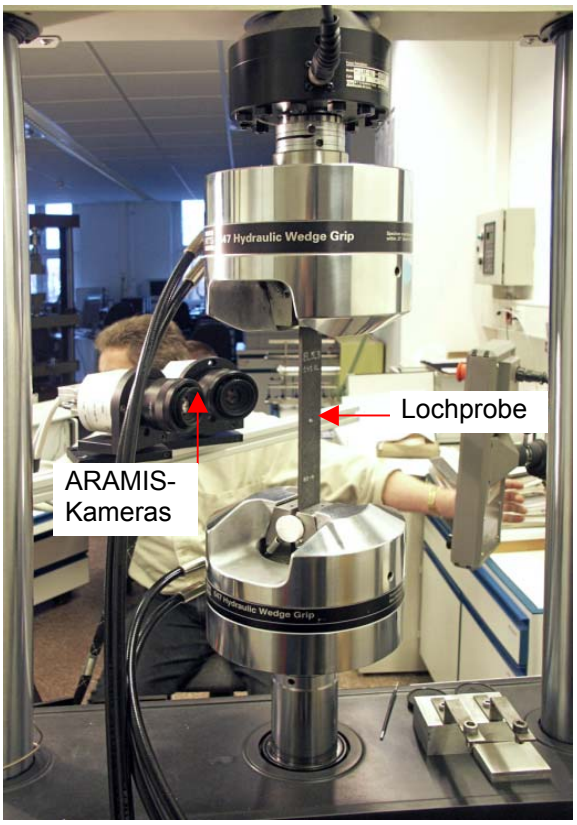


Abb. 1 Prüfaufbau der dynamischen Zug-Schwell-Prüfung an gelochten CFK-Proben

Abb. 2 Prüfkörper für die dynamische Prüfung

Im Rahmen des Prüfprogramms wurden Proben mit Standardlaminataufbauten, d.h. $[0°/90°]_{8s}$, $[\pm45°]_{8s}$, $[+45°/0°/-45°]_{6s}$, $[+45°/0°/-45°/90°]_{4s}$ aus Multiaxialgelegen (MAG), Tailored Fiber Placement (TFP) - Preforms, Geflechten (Flecht) und teilweise Fiber Patch Preforms (FPP), geprüft. Innerhalb des Prüfprogramms wurden je Prüfkörpertyp sechs Lochproben hergestellt und geprüft. Die Geometrie und Ausführung der Proben bzw. Prüfkörper, sowie die anschließende Durchführung der Materialprüfungen orientierten sich an den Vorgaben des MBB-Berichtes TN-TE 534-9-89 und der AITM 1-0007 Norm. Diese Normen sind

Stand der Technik zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten von faserverstärkten Kunststoffen. Die Prüfkörpergeometrie ist in Abb. 2 dargestellt.

Die Materialprüfungen gliederten sich in drei Teilversuche. Im ersten Versuch wurden zwei Prüfkörper einem statischen Zugversuch (ZV) nach ISO 527 unterzogen. Dieser diente der Ermittlung der statischen Zugfestigkeit (N = 1) und der oberen Prüfkraft für die dynamische Prüfung. Die obere Prüfkraft der dynamischen Prüfung beträgt die hälfte der Bruchlast aus dem statischen Zugversuch. Die obere dynamische Prüfkraft berechnet sich aus beiden Bruchlasten ($F_{B,1}$) und ($F_{B,2}$) nach Gleichung (1).

$$F_{Prüf,dyn} = \frac{F_{B,1} + F_{B,2}}{2} \cdot \frac{1}{2} \qquad [kN] \qquad (1)$$

Im zweiten Versuch wurden die restlichen vier Prüfkörper je Laminattyp durch eine kraftgesteuerte, sinusförmige Belastung mit einem Lastverhältnis von R = 0,1, einer Frequenz f = 5 Hz und einer max. Lastspielzahl von N_{max} = 200.000 dynamisch geprüft. Bei nichteingetretenem globalen Versagen der Prüfkörper während des dyn. ZSV, wurden diese danach einer statischen Restzugfestigkeitprüfung analog der statischen Prüfung in Versuch 1 unterzogen. Der Fokus der Untersuchungen lag im Vergleich der statischen Zugfestigkeit und der Restzugfestigkeit der eingesetzten textilen Verfahren nach der dynamischen Belastung. Parallel dazu wurde das Verformungs- und das Schadensverhalten der Decklagen mit Hilfe des optischen Verformungsmesssystems ARAMIS untersucht (Abb. 3) und die Bruchbilder der Proben makrofraktographisch bewertet (Abb. 4).

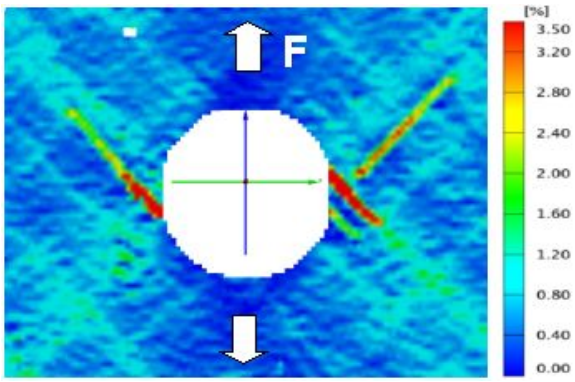


Abb. 3 ARAMIS-Aufnahme einer Flecht-Probe mit $[\pm 45°]_s$-Aufbau bei oberer Prüflast im dyn. ZSV bei ca. 190000 Lastwechseln mit Darstellung der Hauptformänderung, in rot dargestellten Bereichen ist eine Schädigung in Form von Zwischenfaserbrüchen vorhanden

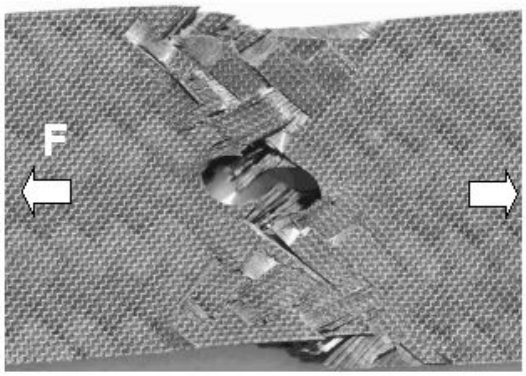


Abb. 4 Bruchbildaufnahme einer Flecht-Probe mit $[\pm 45°]_s$-Aufbau nach dem statischen Zugversuch.

Des weiteren wurde die Steifigkeitsdegradation während der dyn. ZSV aufgezeichnet (siehe Abb. 5).

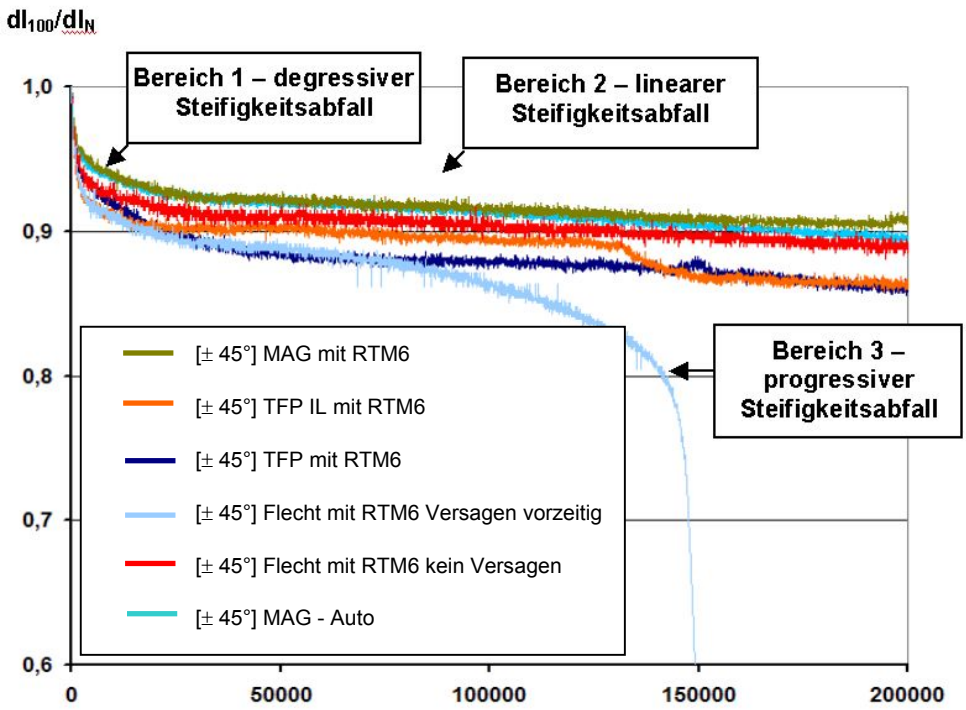


Abb. 5 Ermittelter mittlerer Steifigkeitsabfall am Bsp. der untersuchten ± 45°-Proben

Aus messtechnischen Gründen konnte dabei die Steifigkeitsdegradation erst ab dem hundertsten Lastwechsel gemessen werden. Weiterhin wurde die Kerbempfindlichkeit der Proben durch einen Vergleich der statisch geprüften Lochproben mit statisch geprüften ungelochten Zugproben identischer Geometrie und jeweils identischen Laminateigenschaften bewertet. Insgesamt wurden 176 Prüfungen durchgeführt. Die geprüften Probenkonfigurationen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Lagenaufbau	Matrix-werkstoff	Injektions-verfahren	Textiles Halbzeug				
			MAG	TFP	Geflecht	TFP IL	FPP
$[0°/90°]_{8s}$	EP RTM 6	VAP	x	x	x	-	-
$[\pm 45°]_{8s}$	EP RTM 6	VAP	x	x	x	x	-
$[+45°/0°/-45°]_{6s}$	EP RTM 6	VAP	x	x	x	-	-
$[+45°/0°/-45°/90°]_{4s}$	EP RTM6	VAP	x	-	-	-	x
$[0°/90°]_{6s}$	EP Autoharz	RTM	x	-	-	-	-
$[\pm 45°]_{6s}$	EP Autoharz	RTM	x	-	-	-	-
$[+45°/0°/-45°]_{4s}$	EP Autoharz	RTM	x	-	-	-	-

Tabelle 1 Untersuchte Proben-Konfigurationen

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind ausführlich in einem Bericht zusammengefasst worden, der für die Projektpartner auf dem Biotex-Server bereitsteht. Des weiteren sind die ermittelten Kennwerte auch Inhalt der Gestaltungsrichtlinien. Nachfolgend sind zusammenfassend in Tabelle 2 und Tabelle 3 die wichtigsten Ergebnisse der dyn. ZSV aufgeführt.

Pre-form-typ	Laminataufbau	Harz-system	Faser-volumen-gehalt [%]	Schub-festigkeit statisch [N/mm²]	Restschubfestigkeit statisch, nach dyn. ZSV [N/mm²]
MAG	$[\pm 45°]_{8s}$	RTM6	56 – 57	55 ± 1	61 ± 1
TFP	$[\pm 45°]_{8s}$	RTM6	60	61 ± 1	69 ± 2
TFP IL	$[\pm 45°]_{8s}$	RTM6	59 – 61	68 ± 1	61 ± 4
Flecht	$[\pm 45°]_{8s}$	RTM6	65	70 ± 14	(81) nur Einzelwert, alle anderen Flecht-RTM6 Proben versagten im dyn. ZSV
MAG	$[\pm 45°]_{8s}$	Autoharz	45	52 ± 1	52 ± 1

Tabelle 2 Eigenschaften der geprüften $[+45°/-45°]_{8s}$ Proben

Pre-form-typ	Laminataufbau	Harz-system	Faser-volumen-gehalt [%]	Zugfestig-keit statisch [N/mm²]	Restzugfestigkeit statisch, nach dyn. ZSV [N/mm²]
MAG	$[0°/90°]_{8s}$	RTM6	67	736 ± 43	733 ± 9
TFP	$[0°/90°]_{8s}$	RTM6	66	700 ± 22	758 ± 13
Flecht	$[0°/90°]_{8s}$	RTM6	63	586 ± 23	565 ± 10
MAG	$[0°/90°]_{6s}$	Autoharz	45	551 ± 44	612 ± 29
MAG	$[+45°/0°/-45°]_{6s}$	RTM6	65	699 ± 108	680 ± 13
TFP	$[+45°/0°/-45°]_{6s}$	RTM6	64,5	628 ± 49	635 ± 33
Flecht	$[+45°/0°/-45°]_{6s}$	RTM6	65,5	411 ± 34	411 ± 11
MAG	$[+45°/0°/-45°]_{4s}$	Autoharz	45	450 ± 18	503 ± 18
MAG	$[+45°/0°/-45°/90°]_{4s}$	RTM6	66,7	344 ± 8	345 ± 4
FPP	$[+45°/0°/-45°/90°]_{4s}$	RTM6	64,9	335 ± 4	326 ± 20

Tabelle 3 Eigenschaften der geprüften $[0°/90°]_{8s}$, $[+45°/0°/-45°]_{6s}$und $[+45°/0°/-45°/90°]_{4s}$ Proben

Je Laminataufbau-Variante bestanden bei den mit RTM6 im VAP Verfahren injizierten MAG-, TFP- und Flecht-Proben keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich Fasermenge, Einzelschichtanzahl und Faservolumenanteil. Die mit Autoharz im RTM – Verfahren injizierten MAG Proben unterschieden sich von den mit RTM6 im VAP-Verfahren hergestellten Proben zusätzlich zum verwendeten Harzsystem durch eine etwa 25 % geringe Fasermenge, einen geringen Faservolumenanteil und eine glatte Probenoberfläche. Das Autoharz ist ein vom Projektpartner Daimler verwendetes Epoxidharzsystem. Die Harzspezifikationen konnten aus Geheimhaltungsgründen nicht zur Verfügung gestellt werden.

Die Auswertung der Ergebnisse des dyn. ZSV wird nachfolgend für jeden Laminataufbau separat durchgeführt.

Die untersuchten Proben mit **[±45°]**-Laminataufbau verhalten sich im dyn. ZSV unterschiedlich. Im statischen Zugversuch bei N = 1 erreichen die Flecht-RTM6 Proben die höchsten Schubfestigkeitswerte, gefolgt von den TFP IL-RTM6 Proben. Die TFP IL Proben unterscheiden sich in ihrer Ablagestruktur aber nicht im Orientierungswinkel von den konventionell gefertigten TFP und MAG Proben. Durch den speziellen Ablegeprozess liegen die Rovings hier ähnlich wie bei einer Atlasbindung. Die Flecht-RTM6 Proben zeigen dabei allerdings eine sehr hohe Messwertstreuung. Aufgrund der unterschiedlichen Schubfestigkeitswerte unterscheiden sich die dynamischen Prüflasten je Preformtyp. Im statischen Zugversuch zeigen alle [±45°] Proben nur bis etwa 30 % der Bruchlast ein lineares Werkstoffverhalten, darüber verläuft die Kraft-Weg-Kurve degressiv.

Während der dynamischen Zug-Schwell-Beanspruchung verhalten sich die MAG-RTM6, die TFP-RTM6, die TFP IL-RTM6 und die MAG-Autoharz Proben sehr ähnlich. All diese genannten Proben absolvierten die dynamische Prüfung ohne Totalversagen. Bei den Flecht-RTM6 Proben versagten drei von vier Proben vorzeitig im Bereich zwischen N = 130000 und N = 170000 Lastwechseln (LW). Dabei können im Steifigkeitsabfalldiagramm (Diagramm 1) zwei, bzw. bei den Flecht-RTM6-Proben drei Steifigkeitsdegradationsbereiche beobachtet werden.

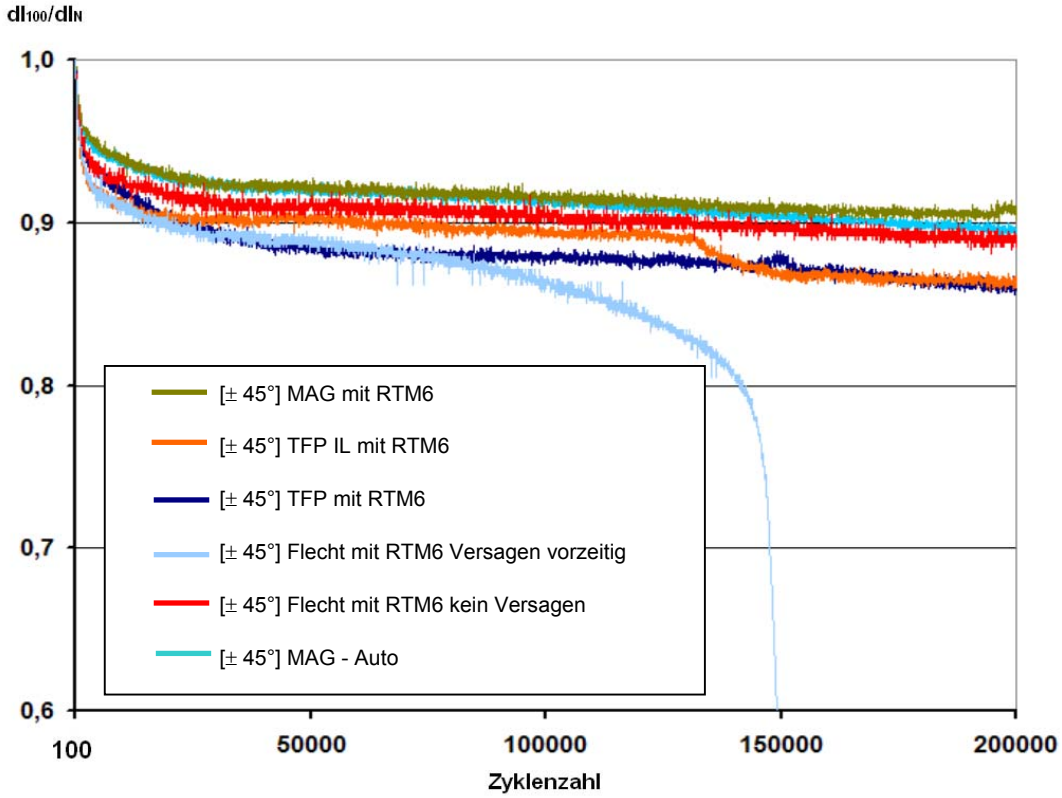


Diagramm 1 Mittlere relative Steifigkeitsabfälle der [± 45 °] Proben

In Bereich 1, d.h. zwischen 100 und bis etwa 35000 LW (abh. vom Preformtyp), fällt die Steifigkeit degressiv ab. In Bereich 2 sinkt die Steifigkeit linear. Der Steifigkeitsabfall zwischen N = 100 und N = 200000 LW beträgt bei den TFP IL-RTM6 und den TFP-RTM6 Proben im Mittel 14 %, und bei den MAG-RTM6 und den MAG-Autoharz Proben etwa 11 %.

In ARAMIS-Hauptdehnungsaufnahmen kann bei allen Konfigurationen im Verlauf der dynamischen Prüfung eine Schädigung in Form von Zwischenfaserbrüchen

(ZFB) in den Decklagen beobachtet werden. Mit Ausnahme der Flecht-RTM6 Proben sind diese ZFB im Vergleich zu den [0°/90°] und den [+45°/0°/-45°] Proben deutlich weniger ausgeprägt. Die Flechtproben versagen während der dynamischen Prüfung durch ZFB, d.h. durch kombinierte Schub- und Zugbeanspruchung sowie partiell auch durch Faserbruch in Folge Querbeanspruchung der verflochtenen Rovings. Im statischen Zugversuch nach dynamischer Belastung erreichen die MAG-RTM6 und die TFP-RTM6 Proben eine Restschubfestigkeit die ca. 10 bzw. 12 % höher ist als deren Schubfestigkeit im statischen Zugversuch bei N = 1. Die Restschubfestigkeit der MAG-Autoharz Proben ist so hoch wie die Schubfestigkeit und die Restschubfestigkeit der TFP IL-RTM6 Proben ist etwa 10 % geringer als die Schubfestigkeit. Die einzelne nach der dynamischen Prüfung verbliebene Flechtprobe erreichte mit 162,7 N/mm² einen herausragenden Restschubfestigkeitswert.

Die untersuchten **[0°/90°]** Proben unterscheiden sich in ihrem Verhalten deutlich von den [±45°] Proben. Im statischen Zugversuch erreichen die MAG-RTM6-Proben mit 736 N/mm² den höchsten Zugfestigkeitswert, gefolgt von den TFP-RTM6, den Flecht-RTM6 und den MAG-Autoharz Proben. Beachtet man die Messunsicherheit sind die Unterschiede zwischen MAG und TFP als nicht signifikant. Verglichen mit den MAG-RTM6 und den TFP-RTM6 Proben sind die Zugfestigkeitswerte der Flecht-RTM6 Proben deutlich geringer. Das Probenversagen erfolgt bei allen [0 °/90 °] Proben durch Faserbruch der 0 ° Lagen ausgehend vom Lochrand, quer zur Belastungsrichtung. Bereits bei 15-20 % der Bruchlast sind ZFB in den 90 ° Schichten vorhanden. Bei etwa 35 % der Bruchlast bilden sich ausgehend vom Lochrand tangentiale ZFB in den 0 ° Schichten. Im dynamischen Zug-Schwell-Versuch sind bei allen Proben im Messintervall zwischen N = 100 - 200000 LW zwei Steifigkeitsdegradationsbereiche zu beobachten (Diagramm 2).

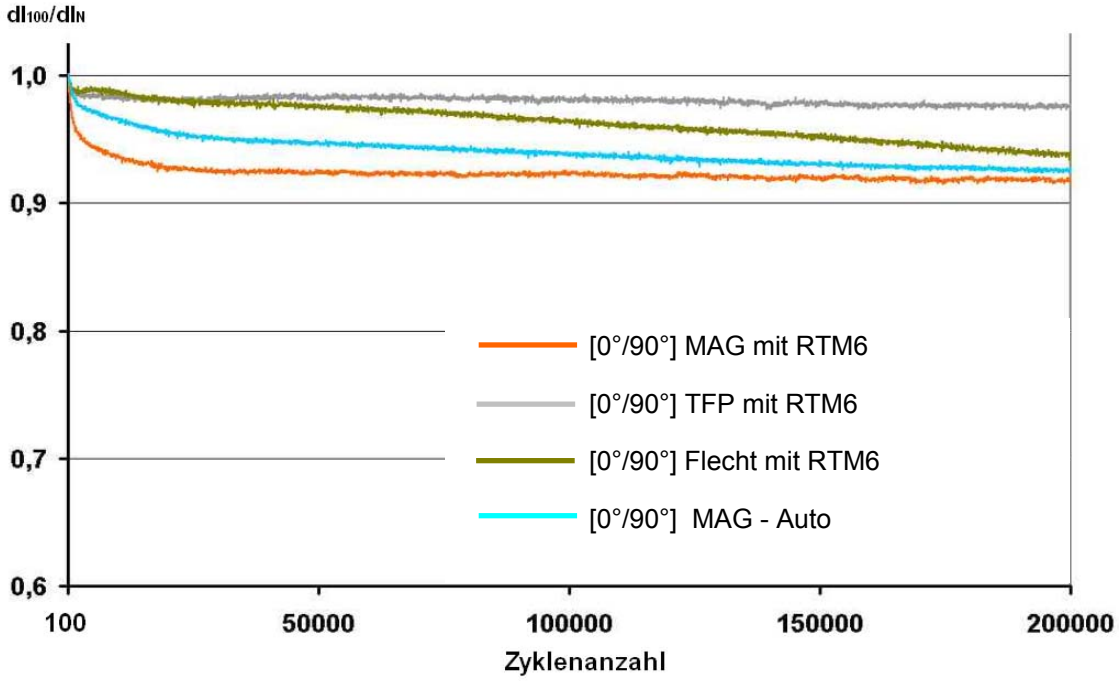


Diagramm 2 Mittlere relative Steifigkeitsabfälle der [0°/90°] Proben

Der degressive Bereich 1 ist bei den TFP-RTM6- und den Flecht-RTM6-Proben sehr gering ausgeprägt. Die Steifigkeit sinkt hier zwischen 100-1000 LW um max.

1 %. Bei den MAG-RTM6 und bei den MAG-Autoharz Proben sinkt die Steifigkeit in Bereich 1 zwischen N = 100 bis ca. N = 25000 LW um 7,5 % bzw. 5 %. Der Steifigkeitsdegradationsbereich 2 ist linear. Bei den TFP-RTM6 und den MAG-RTM6 Proben sinkt die Steifigkeit mit 1 % bzw. 0,5 % bis Versuchende kaum. Bei den MAG – Autoharz Proben ist der lineare Steifigkeitsabfall mit etwa 2,5 % etwas ausgeprägter und die Flecht – RTM6 Proben zeigen mit 5 % die größte lineare Steifigkeitsreduktion. Verglichen mit den [± 45 °] Proben sind die Absolutwerte der Steifigkeitsreduktion geringer. Während des dyn. ZSV zeigen ARAMIS - Hauptdehnungsaufnahmen bereits nach dem 1. LW tangentiale ZFB ausgehend vom Lochrand in den 0°-Deck-Schichten der TFP- RTM6, MAG-RTM6 und MAG-Autoharz Proben. Mit steigender Lastspielzahl ist in den Hauptdehnungsaufnahmen keine signifikante Veränderung dieser Schädigungsbereiche in den Decklagen des Laminates festzustellen. Die Flecht-RTM6 Proben hingegen zeigen eine sukzessive Zunahme an ZFB ausgehend vom Lochrand mit steigender Lastspielzahl. Unter Beachtung der Messunsicherheit liegt die Restzugfestigkeit der MAG-RTM6 und der Flecht-RTM6 Proben in etwa auf dem selben Niveau wie die Zugfestigkeit. Bei den TFP-RTM6 und bei den MAG-Autoharz Proben liegen die Restzugfestigkeitswerte etwas über den Zugfestigkeitswerten. Außer bei den Flecht-RTM6 Proben, die im statischen Zugversuch nach dynamischer Prüfung einen großflächigeren Schadensbereich zeigten, sind die Bruchbilder der anderen, bei N = 1 und nach N = 200000 LW geprüften, [0 °/90 °] Proben ähnlich.

Die untersuchten **[+45°/0°/-45°]** Proben unterscheiden sich in ihrem Verhalten ebenfalls deutlich von den [±45°] Proben. Aus fertigungstechnischen Gründen enthalten die Flecht-RTM6 Proben 18 % weniger Fasern als die TFP-RTM6 und MAG-RTM6 Proben. Des weiteren beträgt der 0 ° Anteil der MAG-RTM6 und der MAG-Autoharz Proben nicht 33,3 % sondern 37,5 %. Die MAG-RTM6 Proben enthalten somit absolut 8 % mehr 0 ° Fasern als die TFP-RTM6 Proben. Im statischen Zugversuch erreichen die MAG-RTM6 Proben aufgrund des höheren 0° Anteils mit 699 N/mm² die höchsten Zugfestigkeitswerte, gefolgt von den TFP-RTM6, den Flecht-RTM6 und den MAG-Autoharz Proben. Besonders die MAG-RTM6 Proben zeigen dabei eine sehr große Messunsicherheit. Die Zugfestigkeit der Flecht-RTM6 Proben ist deutlich geringer als die der MAG-RTM6 bzw. TFP-RTM6 Proben. Das Probenversagen im statischen Zugversuch erfolgt bei all diesen Proben nach eingetretenen ZFB in den 45 ° Schichten durch Faserbruch in den 0 ° Schichten. Im statischen Zugversuch sind bei etwa 50 % der Bruchlast erste ZFB am Lochrand an Orten höchster Quer/Längsschubspannungen in den 45 ° Deckschichten zu beobachten. Diese ZFB verlängeren sich mit zunehmender Last und es bilden sich neue ZFB. Im dynamischen Zug-Schwell-Versuch sind bei allen [+45°/0°/-45°]-Proben, mit Ausnahme der Flecht-RTM6 Proben, zwei Steifigkeitsdegradationsbereiche zu beobachten (Diagramm 3).

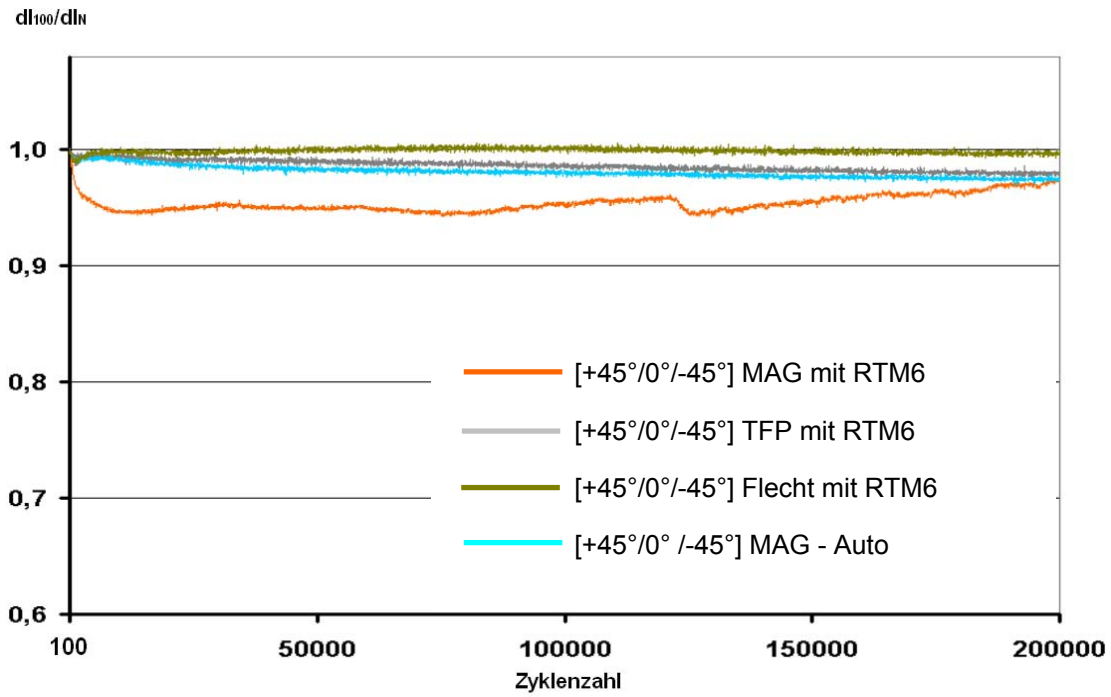


Diagramm 3 Mittlere relative Steifigkeitsabfälle der [+45°/0°/-45°] Proben

Der degressive Bereich 1 ist bei den TFP-RTM6 und den MAG-Autoharz Proben nur gering ausgeprägt. Im Messintervall, d.h. zwischen N = 100 und 200000 LW sinkt die Steifigkeit der Flecht-RTM6 Proben nicht. Die absolute Steifigkeitsreduktion der [+45°/0°/-45°] Proben ist geringer als bei den [0 °/90 °] und den [± 45 °]-Proben. In ARAMIS-Hauptdehnungsaufnahmen können bei allen [+ 45 °/0 °/- 45 °]-Proben nach 1000 LW ZFB in den + 45 ° bzw. – 45 °-Deckschichten am Lochrand beobachtet werden. Im Versuchsverlauf wachsen diese ZFB und es bilden sich neue ZFB. Dieses Verhalten zeigen auch die Flecht-RTM6 Proben, auch wenn deren Versagensverhalten strukturbedingt anders ist. Faserbruch tritt während der dynamischen Prüfung bei keiner Probe auf. Unter Beachtung der Messunsicherheit liegt die Restzugfestigkeit der MAG-RTM6, der TFP-RTM6 und der Flecht-RTM6 Proben in etwa auf dem selben Niveau wie die Zugfestigkeit. Die MAG-Autoharz Proben zeigen eine etwas höhere Restzugfestigkeit.

Bei den **[+45°/0°/-45°/90°]** Proben wurden nur MAG-RTM6 Proben und zusätzlich FPP-RTM6-Proben geprüft. Die Einzellagendicke der FPP-RTM6 Proben beträgt im Vergleich zu den MAG-RTM6 Proben etwa die Hälfte. Durch die im Prüfprogramm angewendete dynamische Zug-Schwell-Beanspruchung wird bei den [+ 45°/0°/-45°/90°] MAG-RTM6 Proben die Zugfestigkeit nicht reduziert . Die Zugfestigkeits- und die Restzugfestigkeitswerte der MAG-RTM6 Proben sind nahezu identisch. Die FPP-RTM6 Proben zeigen eine minimal geringere Zugfestigkeit nach dynamischer Belastung. Während der dynamischen Zug-Schwellbeanspruchung sinkt die Steifigkeit im Messintervall, d.h. zwischen 100 und 200000 LW, bei den MAG-RTM6 Proben um 0,5 % und bei den FPP-RTM6 um etwa 1,5 % (Diagramm 4).

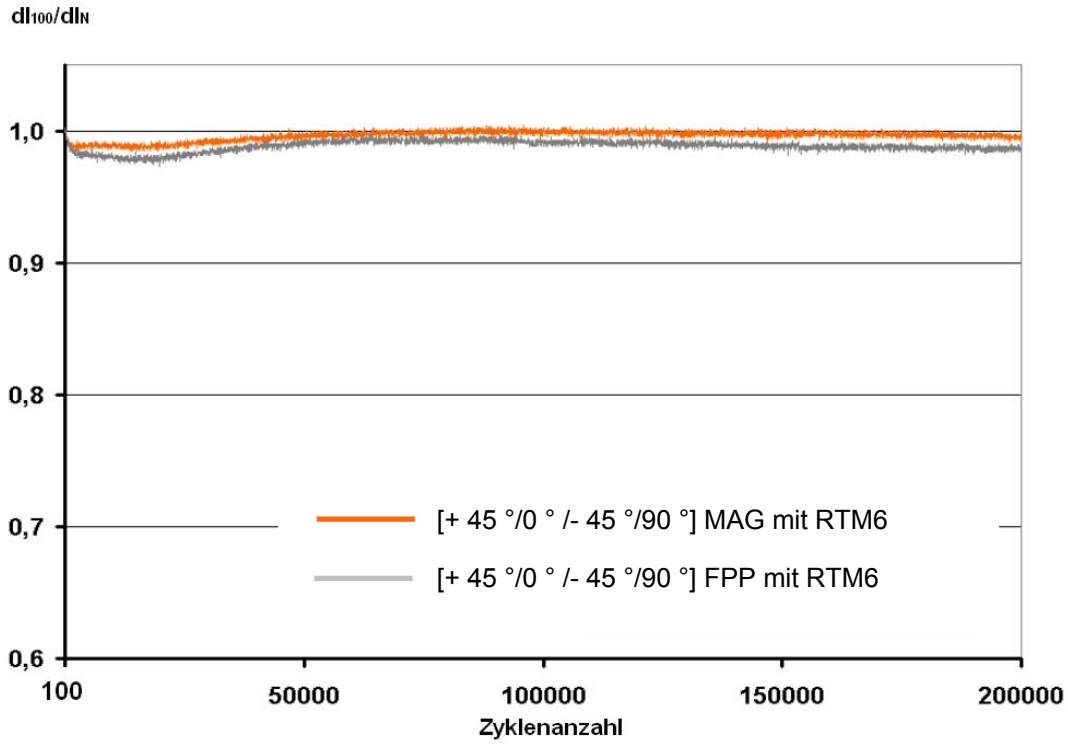


Diagramm 4 Mittlere relative Steifigkeitsabfälle der [+45 °/ 0 °/-45 °/90 °] Proben

Ausgeprägte Steifigkeitsdegradationsbereiche sind nicht vorhanden. Diese Proben zeigen somit neben den [+45°/0°/-45°] Flecht-RTM6 Proben den geringsten Steifigkeitsabfall innerhalb des gesamten Prüfprogramms. Die Deckschichten beider Probentypen zeigen in ARAMIS-Hauptdehnungsaufnahmen nach dynamischer Beanspruchung nur eine geringe Schädigung in Form von ZFB ausgehend vom Lochrand. Die Ausdehnung der ZFB ist nur auf den Lochnahbereich begrenzt ist. Die maximale ZFB Länge beträgt 3 mm. Im Zugversuch bei N = 1 und nach N = 200000 zeigen beide Konfigurationen jeweils ein ähnliches Bruchverhalten. Globales Probenversagen erfolgt letztendlich durch Faserbruch in den 0 ° Schichten.

Zur Bewertung der Kerbempfindlichkeit wurden die auf den Restquerschnitt normierten Zugfestigkeitswerte und die Restzugfestigkeitswerte der Lochproben mit den Zugfestigkeitswerten ungelochter Proben mit jeweils identischem Laminataufbau verglichen. Die Zugfestigkeitswerte ungelochter [+45°/0°/-45°] und [0°/90 °] Proben sind höher als die Restzugfestigkeits- und die statischen Zugfestigkeitswerte der jeweils zugehörigen [+45°/0°/-45°] und [0°/90 °] Lochproben. Diese Probentypen sind somit kerbempfindlich. Die untersuchten [±45°] Proben zeigen mit Ausnahme der Flecht-RTM6 Proben höhere bzw. identische Zugfestigkeitswerte wie ungelochte Proben mit identischen Laminateigenschaften und sind somit nicht kerbempfindlich. Da keine ungekerbten [+45°/0°/-45°/90°]-Vergleichsproben geprüft worden sind, können keine Aussagen über die Kerbempfindlichkeit dieser Konfigurationen gegeben werden.

1.2. AP 3.2. Gestaltungsrichtlinien

Die im Projekt erarbeiteten Gestaltungsrichtlinien beinhalten die Auslegung, Fertigung und Prüfung von Subkomponenten und Demonstratorbauteilen. Am IPF wurden hierfür Arbeiten zu den im Projekt definierten Subkomponenten Openhole Zugscheibe und Halbkugel sowie am Demonstratorbauteil Omegaspant durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind nachfolgend aufgeführt.

1.2.1. Subkomponente Halbkugel

Die Subkomponente Halbkugel (HK) war zur Verifikation des ursprünglich im Projekt geplanten 3-D-TFP-Ablageverfahrens definiert worden. Die Halbkugelgeometrie (mit Krempe) stellt besonders hohe Anforderungen an ein 3-D-Ablageverfahren. Das IPF hatte die Aufgabe, die damit hergestellten Halbkugeln auf Innendruck zu prüfen. Hierfür wurde am IPF eine Prüfvorrichtung konstruiert und hergestellt. Zur Untersuchung des Verformungsverhaltens der HK unter Innendruckbelastung wurde das 3-D-Verformungsmesssytem ARAMIS eingesetzt. Hierdurch können Inhomogenitäten im Deformationsverhalten der HK resultierend aus Ablageungenauigkeiten oder inhomogenen Preformdicken global erfasst werden.

Innerhalb der Projektlaufzeit wurde das 3-D-TFP-Ablage-Konzept vom Projektpartner KSL verworfen. Die Fa. KSL konzentrierte sich daraufhin auf die Entwicklung eines 3D-Tape-Legekopfes. Der Tapelegekopf wurde erst zum Ende des Projektes fertiggestellt, so dass im Projektzeitraum keine Halbkugeln, die mittels dieser Technologie hergestellt wurden, geprüft werden konnten. Parallel zu den Entwicklungen der Fa. KSL wurde bei der EADS das Fibre Patch Preforming Verfahren (FPP) entwickelt. Des weiteren führte der Projektpartner Cetex Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung der Drapierbarkeit von Multiaxialgelegen (MAG) durch. Mit beiden textilen Preformverfahren wurden innerhalb der Projektlaufzeit Halbkugeln hergestellt und geprüft. Die Spezifikationen der geprüften Halbkugeln Tabelle 4 sind in dargestellt.

Bezeichnung	**Preform**	**Lagenaufbau**	**Flächenmasse Preform** [g/m²]	**Dicke** (mit Harz) [mm]
MAG	MAG gelasert	[0°/90°/+45°/-45°]	600	ca. 0,8
FPP - 01	FPP	Ablage der Fibrepatches in Meridianlinien und Breitenkreise	640	ca. 0,8
FPP - 02	FPP	$[0°/-45°/90°/+45°]_s$	640	ca. 0,8
Gewebe	CF-Gewebe mit Köperbindung	[0°/90°/+45°/-45°]	490	ca. 0,5

Tabelle 4 Eigenschaften der geprüften Halbkugeln

Die HK aus Kohlefaser-Gewebe (CF-Gewebe) diente dabei als Referenz. Die Konsolidierung aller Halbkugeln wurden im VAP-Verfahren durchgeführt. Für die Herstellung der HK-Preform eignet sich das FPP-Verfahren sehr gut. Die Fibre-

patches können in nahezu jeder beliebigen Orientierung positioniert werden. Die Halbkugelnegativform konnte mit der FPP-Technologie bei Nutzung eines Handstempels problemlos mit Patches belegt werden. Die Konsoliderung der geprüften FPP-Halbkugeln erfolgte durch die EADS. Die beiden FPP-Halbkugeln unterschieden sich durch ihre Alblagemuster dahingehend, dass eine HK ein Ablagemuster analog der Meridianlinien und Breitenkreise am Globusund die andere einen quasiisotropen Laminataufbau besaß (siehe Abb. 6 und Abb. 7).

Die MAG-HK wurde am IPF hergestellt. Bei dieser HK waren partiell an den Seitenflächen im Übergang zur Krempe Fehlstellen in der Faserorientierung (Faserwelligkeit) zu beobachten. Prinzipiell konnte die Drapierfähigkeit der präparierten MAG-Preform aber nachgewiesen werden (siehe Abb. 8 und Abb. 9). Die Drapierfähigkeit eines zum Vergleich verwendeten CF-Gewebes mit Köperbindung wird dabei jedoch nicht erreicht.

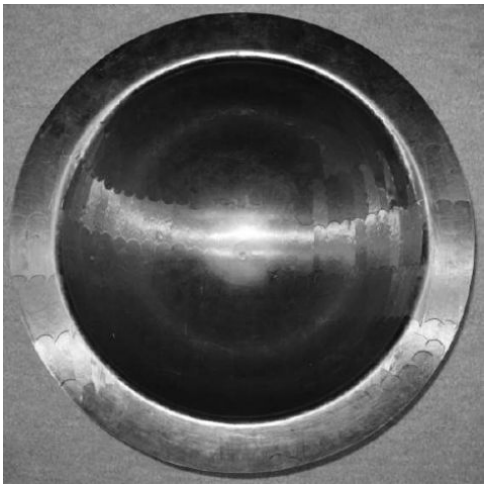


Abb. 6 Innenseite der FPP 02 Halbkugel mit $[0°/-45°/90°/+45°]_s$ Lagenaufbau

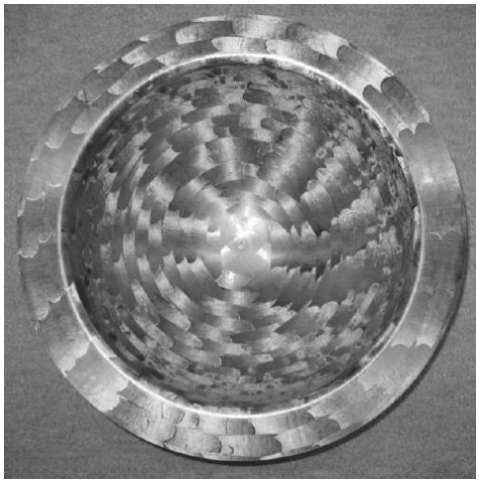


Abb. 7 Innenseite der FPP 01 Halbkugel mit Ablage der Fibrepatches in Meridianlinien und Breitenkreisen

Abb. 8 Drapiertes, gelasertes MAG

Abb. 9 Konsolidierte Halbkugel mit MAG Preform

Bei der MAG- und der Gewebe-HK stellt sich durch den Drapiervorgang partiell, im Übergangsbereich zur Krempe, eine veränderte Faserorientierung ein. Dies ist bei den im FPP-Verfahren hergestellten HK-Preforms nicht der Fall. Nach der Fertigung wurden die Halbkugeln auf der im IPF entwickelten Prüfvorrichtung auf Innendruck geprüft (Abb. 14).

Abb. 10 Prüfvorrichtung mit montierter Testhalbkugel aus GFK

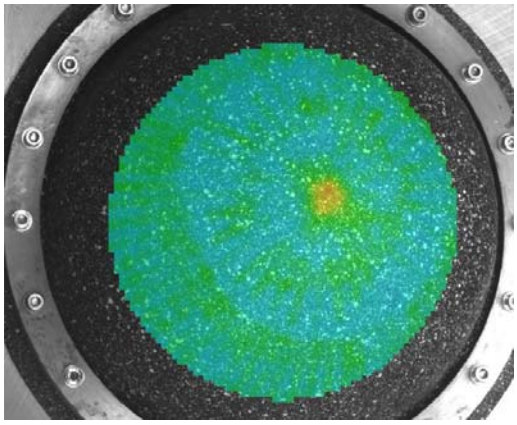


Abb. 11 Messfeld während der ARAMIS Verformungsmessung (farbig dargestellter Bereich)

Dabei wurden die Halbkugeln mit einem Innendruck von maximal 8 bar belastet. Höhere Drücke führten aufgrund auftretender Spannungsspitzen im Krempenbereich zum Versagen. Mit Hilfe des optischen Verformungsmessystems ARAMIS wurde das Deformationsverhalten der Halbkugeln unter Innendruckbelastung untersucht. Dabei wurden die Kameras senkrecht über dem Zenit der Halbkugel positioniert. Aus physikalischen Gründen umfasst das auswertbare Messfeld nicht die komplette HK sondern nur einen Bereich mit einem Kalottendurchmesser von etwa 280 mm (siehe Abb. 6). Das Messfeld ist jedoch ausreichend um Inhomogenitäten im Deformationsverhalten zu erfassen. In den nachfolgend aufgeführten Bildserien sind die Ergebnisse der Verformungsmessung dargestellt. In Tabelle 5 sind Aufnahmen der Oberflächentopographie der unbelasteten Halbkugeln abgebildet. Als Messwert wurde der Abstand der Oberflächepunkte zum Zentrum der HK verwendet.

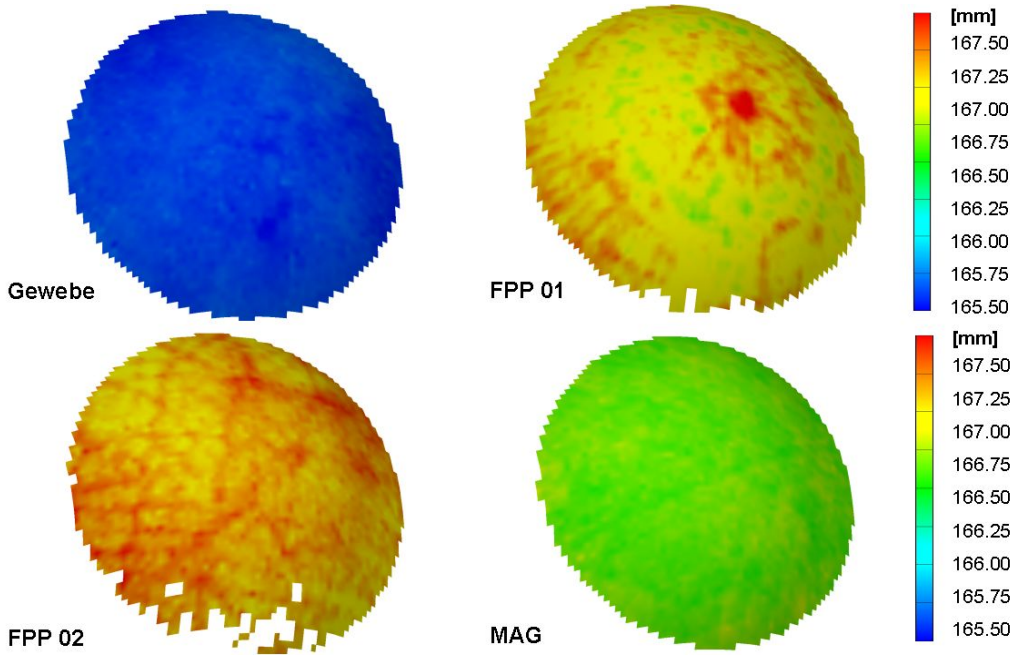


Tabelle 5 Halbkugeloberfläche im Messfeld mit farbiger Darstellung der Oberflächentopographie (Abstand der Oberfläche zum Halbkugelmittellpunkt)

Die MAG-, die Gewebe- und die FPP 02- HK zeigen dabei eine sehr homogene Oberflächentopographie. Eine homogene Oberflächentopographie ist gleichbedeutend mit einer gleichmäßigen Schichtdicke. Aufgrund des speziellen Ablagemusters der Patches, analog der Meridianlinien und Breitengrade, zeigt die FPP 01 HK eine Materialanhäufung im Zenit der HK. Um das Verformungsverhalten der verschiedenen Halbkugeln unter Innendruckbelastung zu vergleichen sind nachfolgend Hauptdehnungsaufnahmen der untersuchten HK bei einem Innendruck von 8 bar dargestellt.

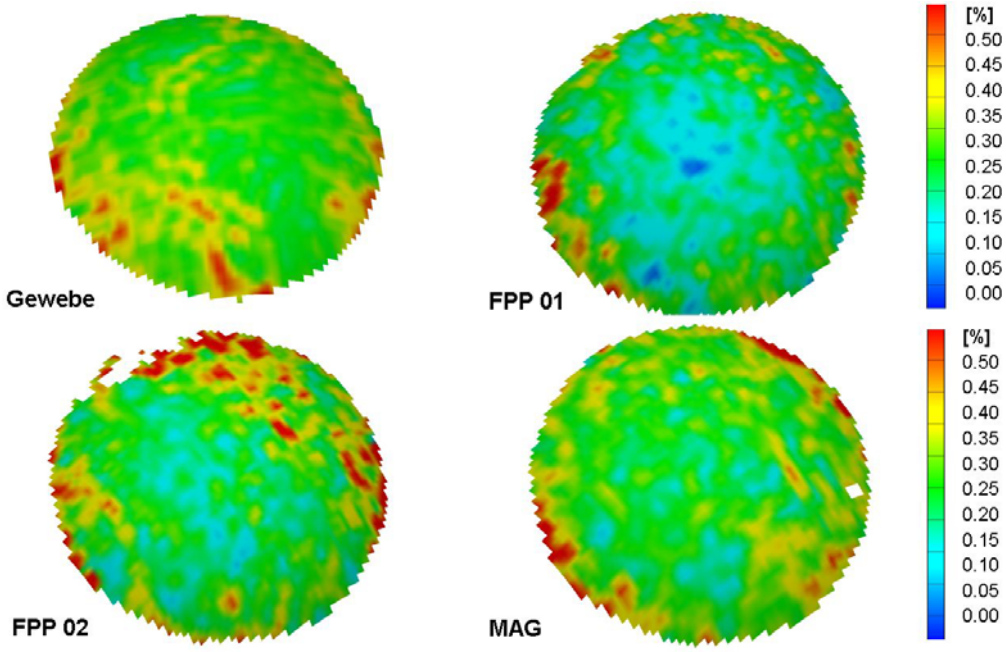
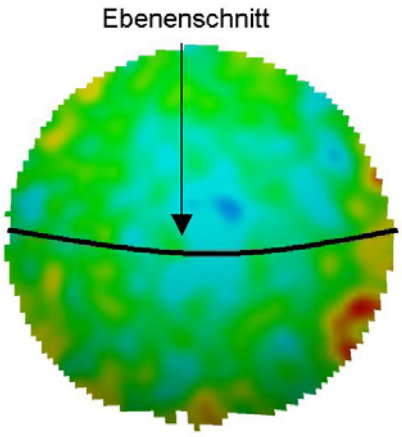


Tabelle 6 ARAMIS- Hauptdehnungsaufnahmen der HK bei einem Innendruck von 8 bar

Im Messfeldbereich zeigen alle Halbkugeln ein ähnliches Dehnungsverhalten. Aufgrund des begrenzten Farbraumes der Skalierung ist die Unterscheidung des

Dehnungsverhaltens der untersuchten Halbkugeln schwierig. Mit Hilfe der ARAMIS-Software wurde bei allen Halbkugeln ein Ebenenschnitt auf der Halbkugeloberfläche erzeugt (Abb. 12). In Diagramm 5 sind die Hauptdehnungsverläufe der geprüften HK entlang dieses Ebenenschnittes dargestellt.



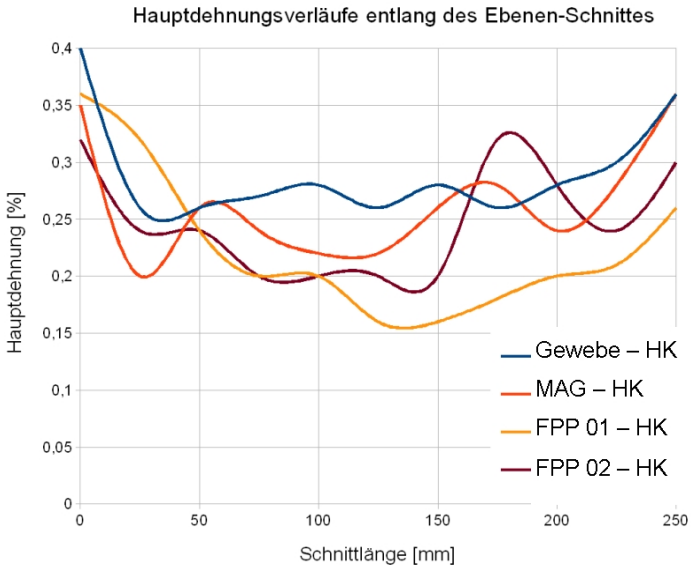


Abb. 12 Ebenenschnitt in ARAMIS

Diagramm 5 Hauptdehnungsverläufe entlang des Ebenenschnittes aller untersuchten Halbkugeln bei einem Innendruck von 8 bar

Bei allen HK sind zu Beginn und am Ende des Schnittes erhöhte Hauptdehnungswerte zu erkennen. Die Ursache hierfür ist nicht eine lokal höhere Nachgiebigkeit der Laminate. An den Rändern unterscheiden sich die aufgenommenen Bilddaten der beiden Kameras aufgrund der Halbkugelwölbung und der verschiedenen Kamerapositionen deutlich voneinander. Dies hat zur Folge, dass die aus beiden Bilddaten berechneten Facetten interpoliert werden und der Messsystemfehler ansteigt. Vernachlässigt man aus diesem Grund die Dehnungswerte zwischen 0 - 50 mm und zwischen 200 – 250 mm Schnittlänge, so zeigt die Gewebe-Halbkugel mit etwa $\varepsilon = 0{,}28\ \%$ die im Mittel höchsten Dehnungswerte. Des weiteren ist der Hauptdehnungsverlauf bei der Gewebe-HK am gleichmäßigsten. Der Hauptdehnungsverlauf der MAG-HK ist im Vgl. zur Gewebe-HK ungleichmäßiger. Im Mittel beträgt die Hauptdehnung hier $\varepsilon = 0{,}25\ \%$. Die beiden FPP HK zeigen ebenfalls einen sehr ungleichmäßigen Hauptdehnungsverlauf, wobei das Dehnungsniveau der FPP 01 HK am niedrigsten ist. Berücksichtigt man die Ungenauigkeit des Messsystems bei der Dehnungsmessung von etwa $\pm$ 0,1 %, können keine signifikanten Unterschiede des Deformationsverhaltens der verschiedenen Halbkugeln festgestellt werden. Um dennoch eine qualitative Aussage über die Homogenität der Verformung der HK-Oberfläche an den untersuchten Halbkugeln treffen zu können, wurden die Radialverschiebungswerte ausgehend vom Mittelpunkt der HK betrachtet. Die Verschiebungswerte sind im Gegensatz zu den Dehnungswerten keine abgeleiteten Größen, sondern direkte Messwerte des ARAMIS-Messsystems. Die Ungenauigkeit des Messsystems bei der Verschiebungsmessung beträgt im Messfeld etwa $\pm$ 0,01 mm.

Da die untersuchten HK nicht nur im Messfeldbereich sondern auch im Einspannungsbereich unterschiedliche Steifigkeiten besitzen, sind die Absolutwerte der Radialverschiebung unter Innendruckbelastung nicht direkt vergleichbar. Durch

die unterschiedlichen Steifigkeiten im Einspannbereich wird die Radialverschiebung aufgrund einer resultierenden Biegebelastung an der Krempe maßgeblich beeinflusst. Als Vergleichswert wurde die Standardabweichung der Radialverschiebungswerte der HK-Oberfläche bei einem Innendruck von p = 8 bar gewählt (siehe Tabelle 7). Diese Größe ist ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Radialverschiebung aller Messpunkte auf der HK-Oberfläche.

Bezeichnung	Mittelwert der Radialverschiebung [mm]	Standardabweichung der Radialverschiebung [%]
MAG	0,51	1,3
FPP - 01	0,24	2,6
FPP - 02	0,37	3,8
Gewebe	0,84	2,1

Tabelle 7 Mittelwert der Radialverschiebung aller Messpunkte auf der HK-Oberfläche und Standardabweichung der Radialverschiebungswerte von der mittleren Radialverschiebung

Zur Ermittlung dieser Daten wurden die Verschiebungsdaten aller Messwerte exportiert und die Standardabweichung der Radialverschiebungswerte berechnet. In Tabelle 8 sind die zugehörigen ARAMIS Radialverschiebungsaufnahmen dargestellt. Hierbei ist die uneinheitliche Skalierung zu beachten. Bei einer identischen Skalierung konnten, aufgrund des größeren Skalenbereiches und des begrenzten Farbraumes, kaum Inhomogenitäten erkannt werden.

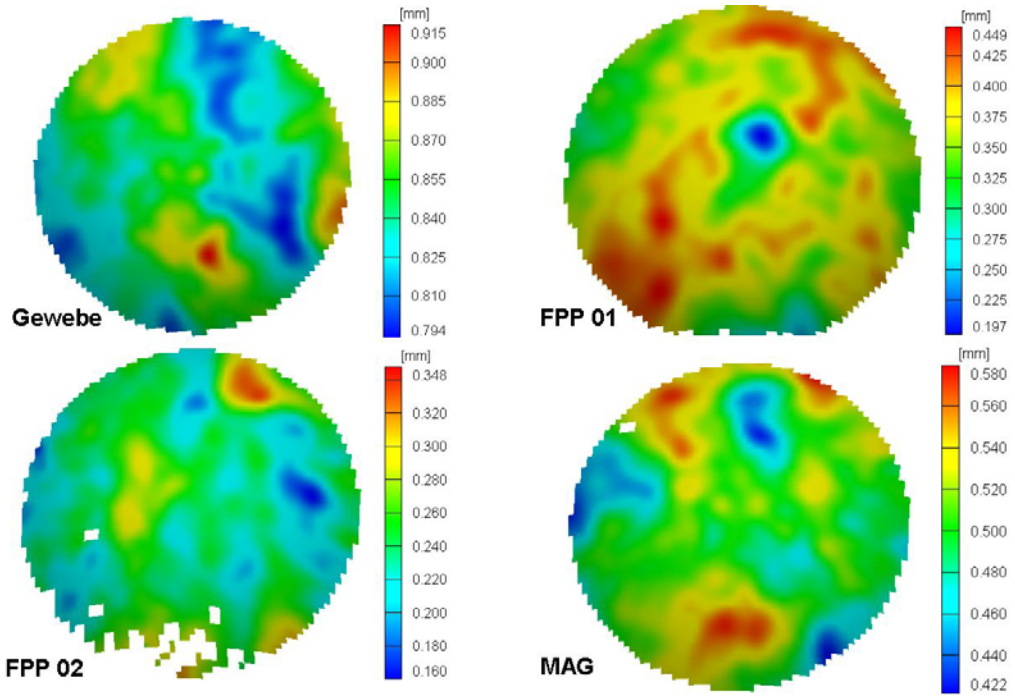


Tabelle 8 Radialverschiebung der Halbkugeloberfläche bei einem Innendruck von 8 Bar – zu beachten ist hierbei die unterschiedliche Skalierung der Verschiebungsbilder

Die MAG-HK besitzt die geringste Standardabweichung und somit die gleichmäßigste Verschiebung der Oberfläche, gefolgt von der Gewebe-HK. Die beiden FPP-HK zeigen eine etwas ungleichmäßigere Verschiebung der Oberfläche. Des weiteren ist bei der FPP 01 HK eine deutlich geringere Radialverschiebung im Zenitbereich zu erkennen. Ursache hierfür ist die dort vorhandene Materialanhäufung.

Insgesamt eignen sich beide im Projekt entwickelten Verfahren zur Herstellung von komplex geformten Bauteilen.

1.2.2. Subkomponente Open-Hole

Zur Bewertung des im BIOTEX-Projekt zur Optimierung der Faserverläufe genutzten CAIO-Verfahrens wurden zwei Subkomponenten definiert.

Zum einen wurden am IFB Lochleibungsuntersuchungen an Prüfkörpern mit CAIO optimierten Faserverläufen sowie Prüfkörpern aus konventionell erhältlichen Verstärkungsstrukturen durchgeführt.

Zum anderen wurde am IPF der Einfluss der Faserstruktur auf die Bruchlast an Open-Hole (OH) Prüfkörpern untersucht. Hierfür wurde am IPF ein Prüfprogramm definiert. Innerhalb des Prüfprogramms wurden Prüfkörper aus Standard Kohlefaser-Multiaxialgelege-Halbzeugen, Prüfkörper, deren Faserverlauf nach der CAIO-Methode numerisch generiert wurde, sowie Prüfkörper-Varianten, die eine Kombination von Standard-Multiaxialgelegehalbzeugen und CAIO Faserverläufen enthalten, untersucht.

Nachfolgend werden die Methodik und die Ergebnisse der Untersuchungen erläutert.

Die Preforms der Prüfkörper mit CAIO Faserverläufen wurden mit Hilfe der TFP-Technologie hergestellt. Als Stickgrund wurde Filterpapier verwendet. Als Referenz wurde zusätzlich eine ungelochte und eine gelochte, mittels der TFP-Technologie hergestellte Probe mit unidirektional in Belastungsrichtung angeordneten Rovings in identischer Geometrie hergestellt und geprüft. Die Prüfkörpergeometrie ist in Abb. 13 dargestellt.

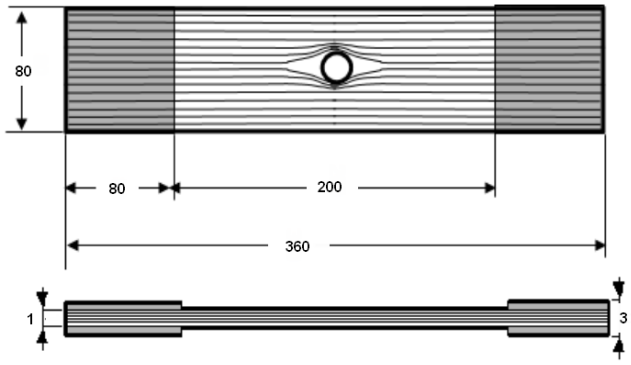


Abb. 13 Geometrie der Prüfkörper [mm]

Die Prüfkörperabmessungen wurden gewählt, um die Faserverläufe aus der CAIO-Optimierung mit der vorhandenen Faserablagetechnologie ideal darstellen zu können. Der Durchmesser des Loches betrug 20 mm. Der grau hinterlegte Bereich in Abb. 13 umfasst die Aufdoppler, welche als Krafteinleitungselemente im Einspannbereich dienen. Alle Prüfkörper wurden im VAP-Verfahren mit Epoxidharz infiltriert. Hierfür wurde das Epoxidharz L 20 mit dem Epoxidharzhärter EPH 161 verwendet. Je Prüfkörpertyp wurden 6 Prüfkörper hergestellt und im statischen Zugversuch (ZV) geprüft. Die Eigenschaften der untersuchten Prüfkörpervarianten sind in Tabelle 9 dargestellt.

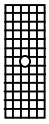
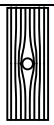
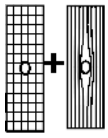
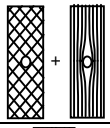
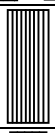
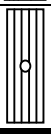
Prüfkörper	Laminataufbau	Anteil der Lagen	Symbol	Flächenmasse
		[%]		[g/m²]
MAG-1	$[+45°/-45°]_{2s}$	50/50		1028
MAG-2	$[+45°/0°/-45°]_s$	32,7/34,6/32,7		962
MAG-3	$[0°/90°]_{2s}$	50/50		1028
CAIO	$[CAIO/FP^1]_s$	76/24		660
CAIO- MAG-1	$[CAIO/0°/90°]_s$	49,4/25,3/25,3		1014
CAIO-MAG-2	$[CAIO/+45°/-45°]_s$	49,4/25,3/25,3		1014
TFP-UD ungelocht	$[0°/FP^1]$	76/24		660
TFP-UD	$[0°/FP^1]$	76/24		660

Tabelle 9 Eigenschaften der Prüfkörper, ^{1}FP = Filterpapier

Für die Versuche wurden insgesamt acht unterschiedliche Prüfkörperarten hergestellt. Aufgrund der geringen Prüfkörperdicke, ist der Massenanteil des Stickgrundes bei den CAIO-Proben vergleichsweise hoch. Des weiteren kommt es bei diesen Proben durch die spezielle Faserstruktur zur Zwickelbildung oberhalb und unterhalb vom Loch. Dieser Bereich ist nur mit Harz und Stickgrundmaterial gefüllt.

Die Erzeugung der Faserverläufe der „CAIO“-Prüfkörper wurde mit Hilfe der CAIO Methode durchgeführt. Die CAIO Methode beschreibt die iterative Ausrichtung der E_{11} – Richtung transversal isotroper finiter Elemente, entsprechend der im Element berechneten Hauptspannungsrichtung. Dadurch können bei einem FE-Modell mit gegebenen Last- und Randbedingungen die lokalen Schubspannungen minimiert werden. Die Faserrichtungen liegen entlang der Hauptbeanspruchungsrichtungen, was zu einer Maximierung von Festigkeit und Steifigkeit führt. Ausgehend von dem vorliegenden Hauptspannungsvektorfeld kann der Richtungsanteil der Vektoren mit Hilfe eines Linienintegrationsverfahrens ausge-

wertet und zur Generierung von hauptspannungsorientierten Faserverläufen verwendet werden. Im Fall der CAIO optimierten Lochproben wurden dazu äquidistante Startpunkte mit einem Abstand von 1,6 mm, beginnend mit einem Randabstand von 0,8 mm, auf der Lasteinleitungsseite des FE-Modells gesetzt. Ausgehend von den Startpunkten erfolgte die Linienintegration entlang der Elementgrenzen. Das Ergebnis der CAIO – Optimierung und des daraus abgeleiteten Faserverlaufs ist in Abb. 14 dargestellt.

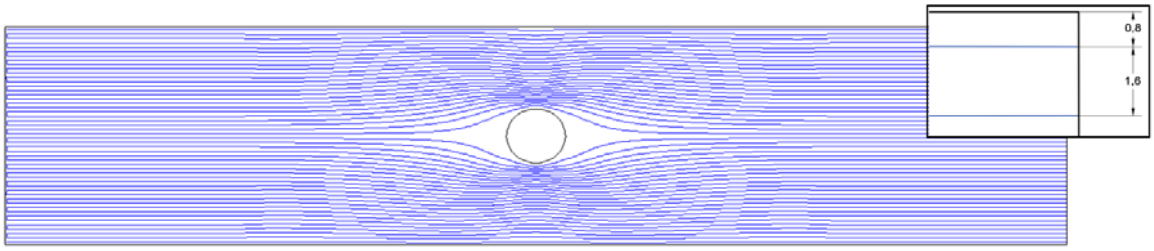


Abb. 14 CAIO – Muster der Open-Hole Zugprüfkörper mit vergrößertem Randbereich

Nach Generierung des Linienmusters müssen die Ortskoordinaten des Linienmusters exportiert werden und dienen als Grundlage zur Generierung des Stickmusters mit Hilfe des Punchprogramms. Nach der Fertigung der Prüfkörper wurden diese im statischen Zugversuch geprüft. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der im statischen Zugversuch geprüften OH-Prüfkörper dargestellt.

Prüfkörper	Laminataufbau	Bruchlast [kN]	Bruchlast normiert auf Preformmasse [kN/g]
MAG-1	$[+45°/-45°]_{2s}$	**12,1**	**0,41**
MAG-2	$[+45°/0°/-45°]_s$	**30,5**	**1,11**
MAG-3	$[0°/90°]_{2s}$	**34,0**	**1,17**
CAIO	$[CAIO/FP^1]_s$	**51,8**	**2,51**
CAIO- MAG-1	$[CAIO/0°/90°]_s$	**69,9**	**2,23**
CAIO-MAG-2	$[CAIO/+45°/-45°]_s$	**77,7**	**2,39**
TFP-UD ungelocht	$[0°/FP^1]$	**60,9**	**3,06**
TFP-UD	$[0°/FP^1]$	**51,2**	**2,46**

Tabelle 10 Ergebnisse der OH-Prüfkörper im statischen Zugversuch, [1]Filterpapier

Da die Prüfkörper unterschiedliche Faservolumengehalte und unterschiedliche Preformmassen aufwiesen, wurde die auf die Preformmasse normierte Bruchlast als Vergleichsgröße verwendet. Diese Größe ist in Diagramm 6 dargestellt.

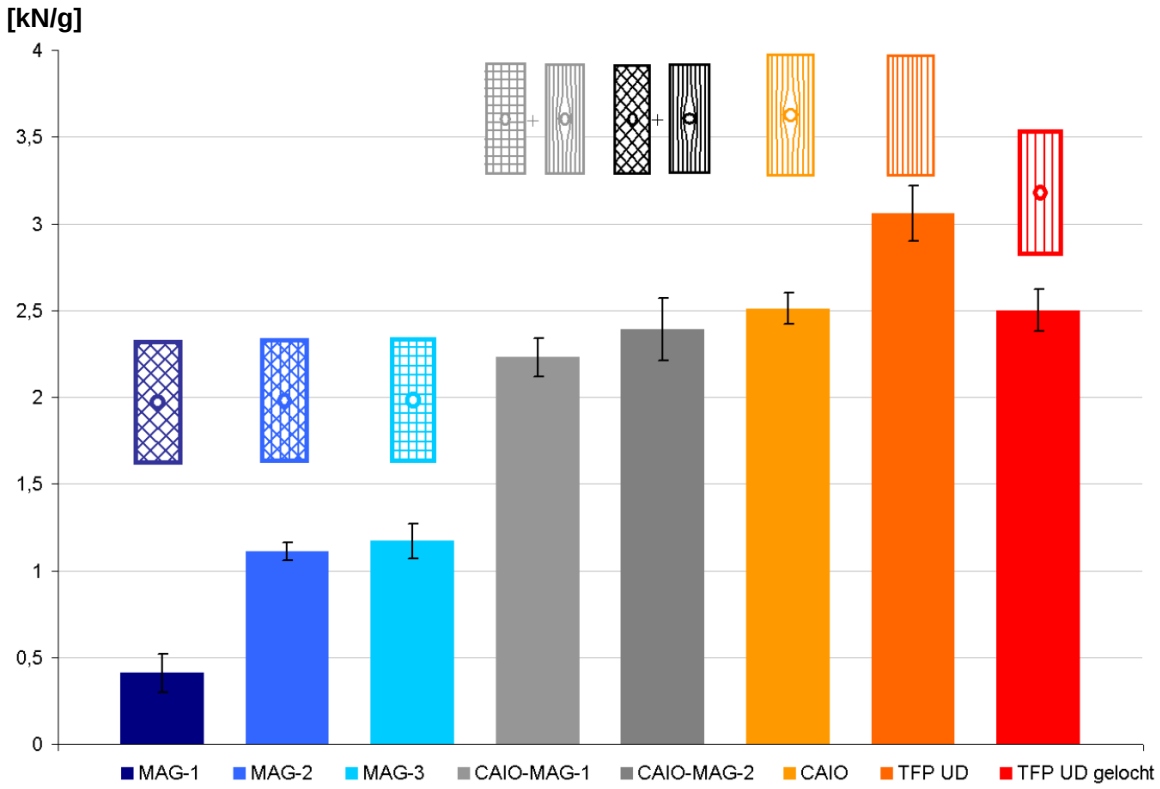


Diagramm 6 Mittelwerte der preformmassenbezogenen Bruchlast

Die aus einem MAG-Grundlaminat und einem aufgestickten CAIO-Layer bestehenden Prüfkörper CAIO-MAG-1 und CAIO-MAG-2 besitzen im Vergleich zu den MAG-2 [+45°/0°/-45°] und den MAG-3 [0°/90°] Prüfkörpern eine deutlich erhöhere Bruchlast. Unter Beachtung des erhöhten Anteils an Rovings in quasi Belastungsrichtung (0°) ist die Bruchlast der CAIO-MAG-1 Prüfkörper etwa 33 % höher als die der MAG-2 Prüfkörper mit $[0°/90°]_{2s}$ Laminataufbau. Im Vergleich zu den MAG-3 Prüfkörpern mit $[+45°/0°/-45°]_s$ Laminataufbau erreichen die CAIO-MAG-2 Prüfkörper unter Beachtung des erhöhten 0° Anteils sogar eine etwa 78 % höhere Bruchlast. Mit Ausnahme der ungelochten TFP UD Prüfkörper erreichen die CAIO Prüfkörper und die TFP Proben die höchsten preformmassenbezogenen Bruchlasten. Das CAIO-Faserlayout führt im Vergleich zu den gelochten TFP UD Prüfkörpern zu keiner Erhöhung der Bruchlast. Die Ursache hierfür wird nachfolgend unter Beachtung des Versagensverhaltens erläutert. Bei einer Normierung der Bruchlast auf den Restquerschnitt (ohne Loch) ist bei den gelochten TFP UD Prüfkörpern im Vergleich zu den ungelochten TFP UD Prüfkörpern keine Bruchlastreduzierung durch die Kerbe festzustellen. Neben den Unterschieden in den Bruchlasten unterscheiden sich die Prüfkörper auch in ihrem Versagensverhalten unter einachsiger Zugbelastung. In Tabelle 11 sind Bruchbilder der untersuchten Prüfkörpertypen dargestellt. Das beobachtete Versagensverhalten wird nachfolgend mit Zuhilfenahme der Bruchbilder beschrieben.

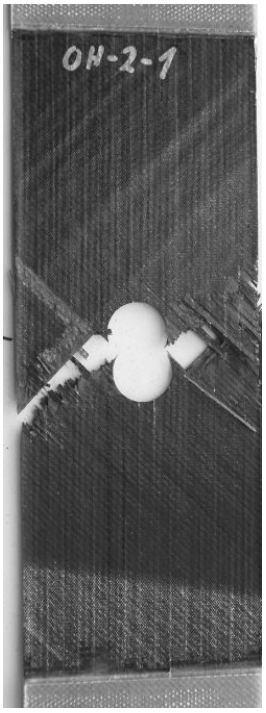
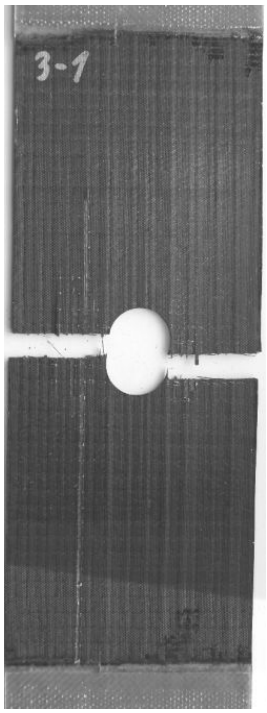
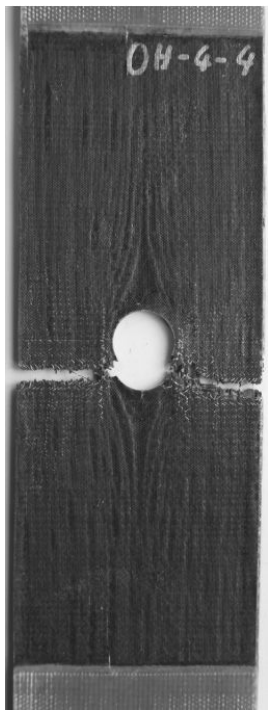
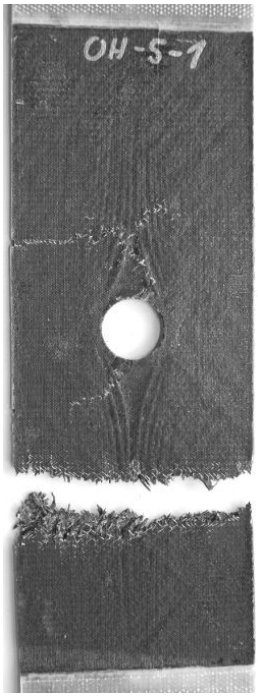
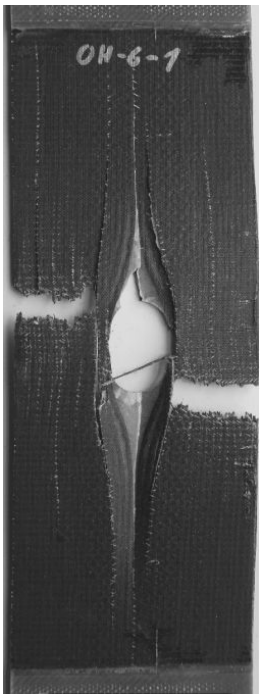
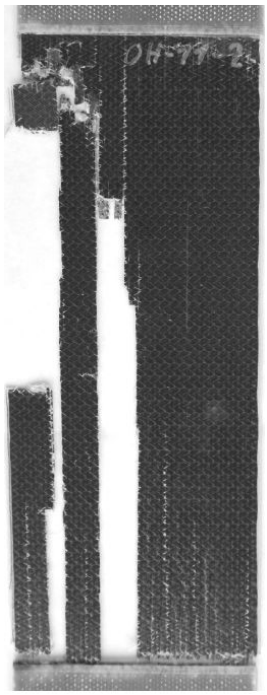
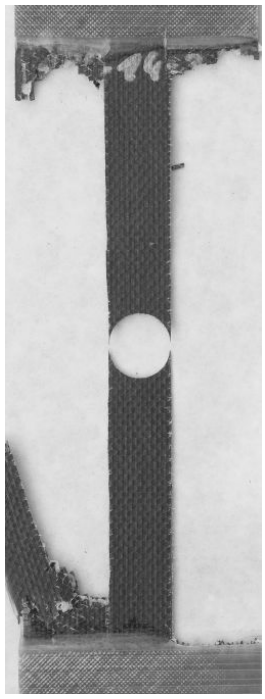
			
MAG-1 [+45°/-45°]$_{2s}$)	MAG-2 [+45°/0°/-45°]$_s$	MAG-3 ([0°/90°]$_{2s}$)	CAIO-MAG-1
			
CAIO- MAG-2	CAIO	TFP-UD ungelocht	TFP-UD

Tabelle 11 Bruchbildaufnahmen der untersuchten Open-Hole Prüfkörper nach dem statischen Zugversuch

Bei den MAG-1 Prüfkörpern entstehen bei etwa 70 % der Bruchlast Zwischenfaserbrüche (ZFB) in den Decklagen, ausgehend vom Lochrand des Laminates, d.h. in +45° - Richtung. Die Schubfestigkeit des Laminates ist an diesen Orten überschritten. Die ZFB haben Delaminationen zwischen den Einzelschichten in der unmittelbaren Umgebung der ZFB zur Folge. Nach Eintreten der ZFB gleiten

die Bruchhälften mit steigender Last in Decklagenorientierung, d.h. in +45 ° Richtung, ab. Durch die Delaminationen können die Fasern, der innenliegenden –45° Schichten, bis zu einem gewissen Grad in Gleitrichtung ausweichen. Durch diese Fähigkeit steigt die Last trotz der ZFB zunächst weiter an. Mit weiter steigender Last entsteht zunehmend eine Querbeanspruchung auf die in Gleitrichtung ausgelenkten Fasern. Diese führt zum letztendlichen Versagen der Fasern, infolge einer Überschreitung der Faserquerzugfestigkeit.

Das Laminatversagen der MAG-2 Prüfkörper erfolgt zunächst durch ZFB, ausgehend vom Lochrand bei etwa 30 % der Bruchlast in den +45° und –45° Schichten. Die ZFB haben Delaminationen zwischen den Einzelschichten in der ZFB Umgebung zur Folge. Auf Grund der vorhandenen 0° - Lagen wird das Abgleiten der ±45° - Schichten behindert. Das Komplettversagen geschieht letztendlich durch Faserbruch in den 0° - Schichten ausgehend vom Lochrand durch Überschreitung der Zugfestigkeit der Fasern.

Bei den MAG-3 Prüfkörper entstehen bei etwa 50 % der Bruchlast am Lochrand ZFB in den 90° - Schichten, auf Grund des Dehnungsvergrößerungseffektes. Diese ZFB sind immer mit Delaminationen im Rissumfeld verbunden. Das letztendliche Prüfkörperversagen erfolgt durch Faserbruch in den 0° - Lagen ausgehend vom Lochrand infolge Überschreitung der Zugfestigkeit.

Bei den gelochten TFP-UD Prüfkörpern treten bei etwa 50 % der Bruchlast ZFB links und rechts vom Loch auf. Durch die Überschreitung der Schubfestigkeit der Matrix, kann die Last nicht bzw. kaum (ausschließlich durch Kraftschluss infolge der Querkontraktion) über Schub in die Fasern geleitet werden, die sich über und unter der dem Loch befinden. Mit steigender Last verlängern sich diese ZFB. Kurz vor dem letztendlichen Versagen der gelochten TFP UD Probe haben sich die ZFB bis zur Einspannung ausgedehnt. Der Verlust der Tragfähigkeit der Probe entsteht durch Faserbruch. Dieses Versagen beginnt nicht am Lochrand, sondern am Rand der Einspannung (siehe Abb. in Tabelle 11). Diese Prüfkörper besitzen durch die eingetretenen ZFB keine Kerbempfindlichkeit.

Bei den CAIO-Prüfkörper richten sich die im Lochbereich gekrümmt abgelegten Rovings unter einachsiger Zugbelastung in Belastungsrichtung aus. Diese Ausweichbewegung führt zu einem Stabilitätsversagen des nur mit Harz und Papier gefüllten Zwickelbereiches bei etwa 65 % der Bruchlast. Des Weiteren werden die gekrümmt abgelegten Rovings, durch deren im Vergleich zu den gerade abgelegten Rovings größeren Länge, weniger in Belastungsrichtung gedehnt. Aus diesen Gründen ist die Bruchlast im Vergleich zu den gelochten TFP UD-Prüfkörper trotz der optimierten Faserstruktur nicht höher. Das letztendliche globale Prüfkörperversagen entsteht durch Faserbruch ausgehend vom Rand der Probe etwa in Höhe des Loches.

Die ungelochten TFP UD Prüfkörper versagen durch Faserbruch in der Nähe der Einspannung infolge Überschreitung der Zugfestigkeit.

Bei den CAIO-MAG-1 Prüfkörpern sind zunächst bei etwa 50 % der Bruchlast ZFB in den 90° Lagen in Folge der Querdehnungsüberhöhung zu beobachten. Die CAIO-MAG 1 Prüfkörper verlieren ihre Tragfähigkeit letztendlich durch Faserbruch in den 0° Lagen senkrecht zur Belastungsrichtung, wobei dieser beidseitig im Bereich des kleinsten Querschnittes beginnt und anschließend kurz nach oben bzw. unten abgleitet und sich dann wieder senkrecht zur Belastungsrichtung bis zum Prüfkörperrand ausbreitet.

Alle hergestellten CAIO-MAG-2 Prüfkörper versagen als einzige nicht im Kerbbereich. Die Kerbe hat somit keinen negativen Einfluss auf das Versagensverhalten. Die Ursache dafür liegt im ±45° Stickgrund. Durch die ±45° Anordnung stehen die Rovings des CAIO-Layers oberhalb und unterhalb des Loches nahezu senkrecht zu den +45° bzw. -45° Rovings des MAG Stickgrundes. Diese behindern die Bewegung der Rovings des CAIO-Layers in Lochrichtung. Parallel dazu werden durch das ±45° Basismaterial die in plane Schubspannungen der übrigen Bereiche des CAIO-Layers minimiert. Der letztendliche Tragfähigkeitsverlust der CAIO-MAG-2 Prüfkörper entsteht durch Faserbruch in den außenliegenden 0° Rovings des CAIO Layers.

Das Potential der CAIO-Optimierung zeigt sich bei Strukturen mit biaxialem oder triaxialem Laminataufbau deutlich. Die Bruchlasten der kombinierten CAIO-MAG Strukturen liegen signifikant über den vergleichbaren, konventionellen MAG Strukturen. Speziell bei dem CAIO-MAG 2 Prüfkörper mit ±45° MAG-Basisschichten findet kein Versagen im Kerbbereich statt. Bei beiden kombinierten CAIO-MAG-Strukturen tritt durch die im Zwickelbereich vorhandenen Rovings der MAG-Basisschichten kein Stabilitätsversagen in diesem Bereich auf.

1.3. Arbeitspaket Demonstratorbauteile

1.3.1. Omega-Spant

Im Rahmen des Projektes wurde u.a. ein gelochter Omega-Spant als Demonstratorbauteil definiert. Die Preforms für diesen Demonstrator wurden mit, den im Projekt entwickelten bzw. weiterentwickelten, textilen Preformtechnologien Fibre Patch Preforming, Tailored Fibre Placement und Flechten gefertigt. Des weiteren wurde ein Omega-Spant aus einem Standard-Kohlefaser-Multiaxialgelege der Firma Saertex hergestellt. Am IPF erfolgte die Preformentwicklung und die Fertigung von zwei TFP-Spanten. Die strukturmechanische Auslegung aller hergestellten Spante wurde von Projektpartner Moldenhauer durchgeführt. Eine Preformvariante wurde auf Basis einer CAIO Auslegung von Herrn Moldenhauer entwickelt.

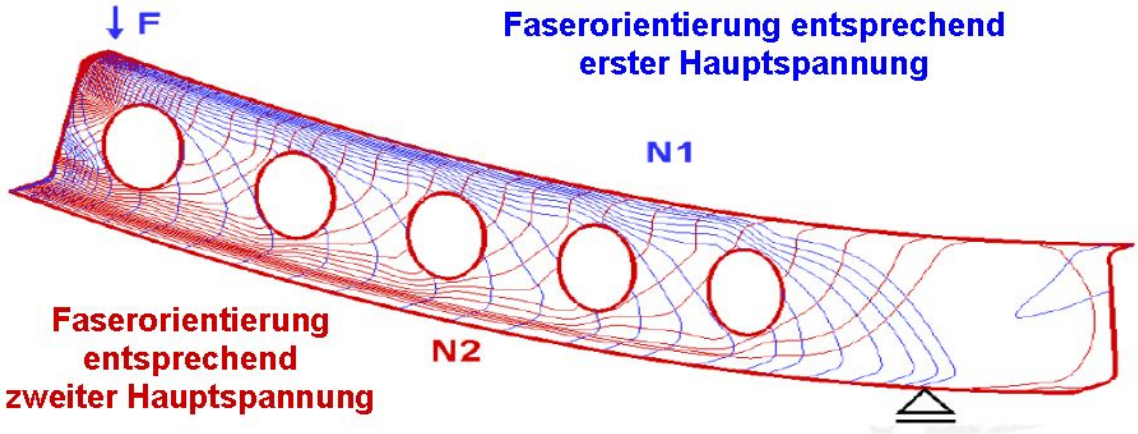


Abb. 15 Plot des Faserlayouts nach CAIO-Auslegung

Die Fertigung einer Spant-Preform mit dem CAIO-Faserlayout kann aktuell nur mit der TFP-Technologie erfolgen. Das Stickmuster der TFP-CAIO Preform wurde aus den von Projektpartner Moldenhauer gelieferten Linendaten mit Hilfe der im IPF entwickelten Softwarewerkzeuge generiert. Die TFP-CAIO Preform besteht aus mehreren in Abb. 16 dargestellten Einzelsegmenten.

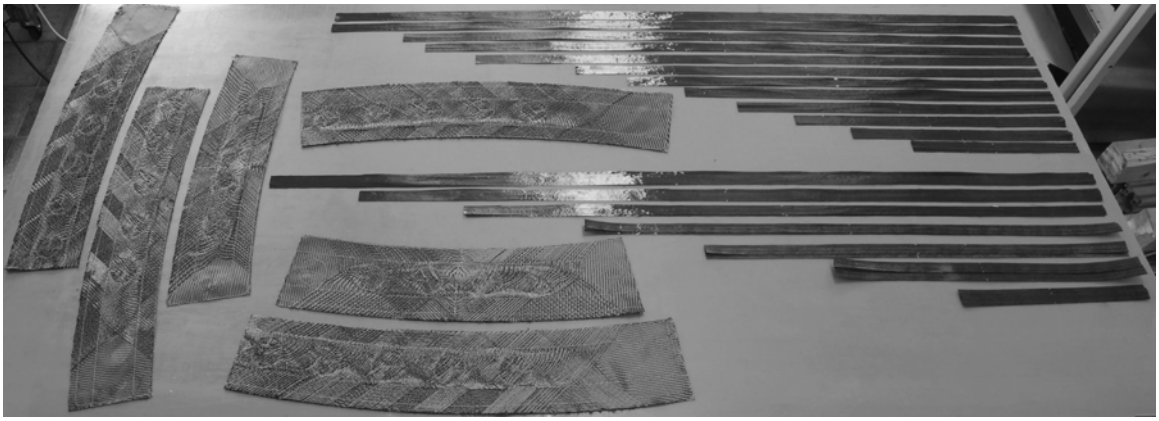


Abb. 16 Einzelsegmente der TFP-CAIO-Preform

Die Preform der zweiten TFP-Variante basiert auf einer konventionellen Auslegung nach Moldenhauer, entsprechend des Referenzspantes aus MAG. Die In-

jektion der Spante erfolgte auf einem im IPF entwickelten CFK-Spantwerkzeug mit integrierter Heizung im VAP-Verfahren. Der hergestellte TFP-CAIO-Spant ist in Abb. 17 dargestellt.

Abb. 17 Im IPF hergestellter TFP-CAIO-Omega-Spant

In Tabelle 12 sind die Massen aller hergestellten Omega-Spantvarianten aufgeführt.

Typ	TFP-CAIO	TFP	MAG	FPP	FLECHT
Masse [g]	671	1120	877	1090	1024/962

Tabelle 12 Massen der hergestellten Omega-Spanten

Die Masse des TFP-CAIO Spantes (Abb. 17) ist 40 % geringer als die Masse der konventionell ausgelegten TFP Variante und 23 % geringer als die Masse des MAG-Spantes.

Die Dreipunkt-Biegeprüfung (Abb. 18) aller gefertigten Spanten wurde in Zusammenarbeit von IPF und IFB am IFB in Stuttgart durchgeführt. Die Verformung der Spanten wurde mit Hilfe des optischen Verformungsmesssystems ARAMIS gemessen.

Abb. 18 Dreipunkt-Biegeprüfung des Omega Spantes

In Abb. 19 ist die Verschiebung des MAG-Spantes in Belastungsrichtung dargestellt.

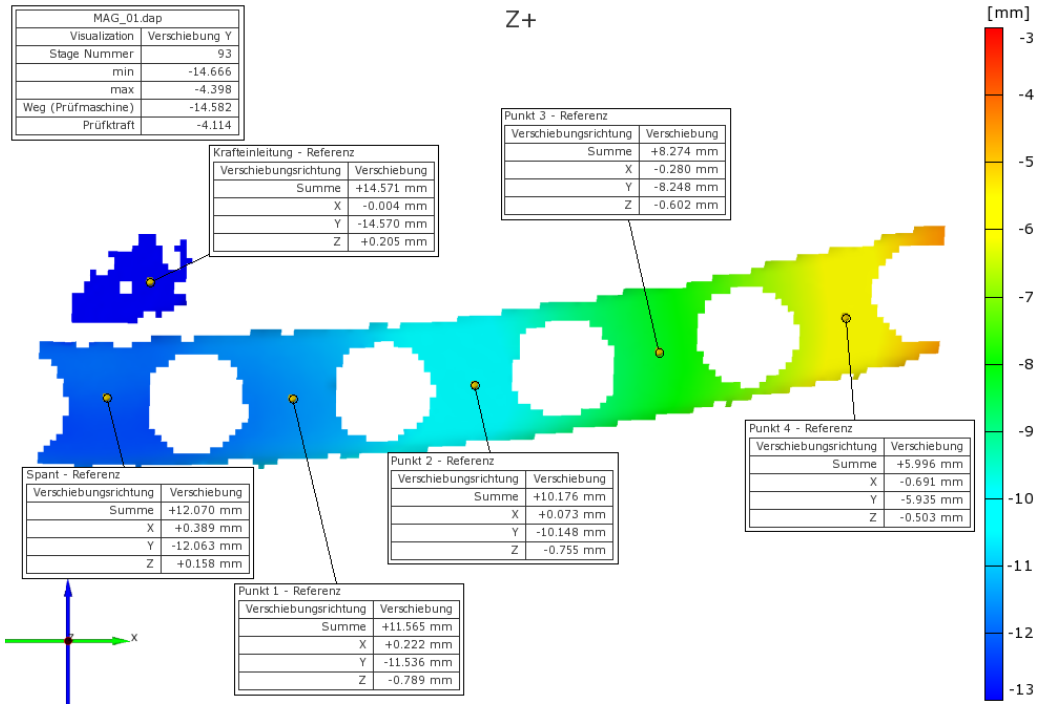


Abb. 19 Verschiebung in Belastungsrichtung des MAG-Omega-Spantes (Darstellung des halben Spantes)

Mit Ausnahme des TFP-CAIO-Omega Spantes zeigten alle Spanten ein Versagen im Krafteinleitungsbereich. Der TFP-CAIO-Omega-Spant zeigte bei relativ geringen Lasten aufgrund der sehr dünnen Wandstärken ein Ausbeulen der Schubwand im Bereich der Einspannung. Im Bereich bis 1 kN zeigte der TFP-CAIO-Spant die höchste Steifigkeit. Die detaillierte Auswertung der mechanischen Prüfung ist im Abschlussbericht des IFB enthalten.

2. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die ermittelten Materialkennwerte bilden die Basis für die industrielle Anwendung der im Projekt entwickelten bzw. weiterentwickelten Preformverfahren.

Bei der Entwicklung, der technologischen Umsetzung und den mechanischen Untersuchungen der Subkomponenten und des Demonstratorbauteiles Omega-Spant, konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Diese erleichtern die Auswahl des jeweiligen Verfahrens für einen entsprechenden Anwendungsfall. Des weiteren konnten Vorteile und Nachteile (sowohl fertigungstechnisch und strukturmechanisch) der CAIO-Optimierung an der hergestellten Subkomponente Open-hole und am Demonstratorbauteil Omega-Spant ermittelt werden. Das generierte Wissen können alle Projektpartner nutzen. Die Untersuchungsergebnisse sind hierfür ausführlich dokumentiert worden.

3. Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

- keine bekannt

4. Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses *nach Nr. 11 (siehe Nebenbestimmungen)*

Die Projekt im erarbeiteten Ergebnisse wurden während der Projekttreffen nur den Projektpartnern präsentiert. Es sind eventuell zwei Veröffentlichungen zur Thematik der Lochprobenprüfung und der Open-Hole Strukturen geplant.

Geplante/eingereichte Veröffentlichungen:

- “Strength Behaviour of CFRP open-hole laminates made from NCF, TFP and braided preforms under cyclic tensile loading”, eingereicht bei Plastics, Rubber and Composites: Macromolecular Engineering , Maney Publishing, Leeds, 17.10.2008
- Veröffentlichung zur Thematik der CAIO-Optimierung an Open-Hole Prüfkörpern ist geplant