

ANWENDUNSPOTENZIAL VON NATURBASIERTEN HYBRIDEN LEICHTBAUSTRUKTUREN IN DER LUFTFAHRT

R. Rinberg¹, R. Svidler¹, M. Klärner¹, L. Kroll¹, K. Strohrmann², M. Hajek², H.-J. Endres³

¹Technische Universität Chemnitz, Institut für Strukturleichtbau, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, 09107 Chemnitz

²Technische Universität München, Lehrstuhl für Hubschraubertechnologie, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

³Hochschule Hannover, Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, Heisterbergallee 12, 30453 Hannover

Zusammenfassung

Im Beitrag wird auf die Eigenschaften und Herstellungstechnologien von naturfaserverstärkten Leichtbauwerkstoffen und auf hybride Bauteilkonzepte eingegangen, um das Potenzial für luftfahrttechnische Anwendungen aufzuzeigen. Besonderes Augenmerk der Forschungsarbeiten liegt auf dem strukturmechanischen Verhalten der Mischverbunde und auf ihrem vibroakustischen Verhalten.

1. EINLEITUNG

Zu Beginn der Luftfahrtgeschichte bestanden Flugzeugstrukturen fast vollständig aus Holz. Heutzutage kommen im Flugzeugbau kaum noch nachhaltige biogene Werkstoffe zum Einsatz. Diese wurden durch moderne Luftfahrtwerkstoffe wie Aluminium- und Titanlegierungen sowie Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) mit Glas- oder Kohlenstofffasern verdrängt. Der Grund hierfür liegt vor allem darin, dass die spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten von naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen mit polymerer Matrix (NFK) für hochbeanspruchte Strukturbauteile aus der Luftfahrt oft nicht ausreichen.

Strukturelle Luftfahrtbauteile aus Hochleistungswerkstoffen, wie beispielsweise kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK), erfahren Beanspruchungen oft nur entlang weniger Lastpfade, während große Bauteilbereiche strukturmechanisch kaum ausgenutzt werden. Ein Lösungsansatz zur Steigerung des Anteils an nachwachsenden Werkstoffen in der Luftfahrt und der Ökoeffizienz beim Fliegen besteht somit in der Gestaltung und Herstellung von hybriden Verbundbauteilen, wobei mit Hochleistungsfasern Hauptlastpfade und mit Naturfasern sekundäre Lastpfade abgebildet werden. Mit der Umsetzung geeigneter Hybridverbunde zeichnen sich für den Luftfahrtbereich zudem auch ökonomische Vorteile ab.

2. STAND DES WISSENS UND DER TECHNIK

2.1. Hybride Leichtbauteile in der Technik

Seit geraumer Zeit gewinnt Leichtbau in der Technik immer mehr an Bedeutung. Bei Bauteilen mit hohen Struktur- und Sicherheitsanforderungen kommen heute neben den Metallstrukturen aus Stahl, Titan und Aluminium leichtere hybride Konstruktionen aus Kunststoff und Metall serienmäßig zum Einsatz. Anschauliche Anwendungsbeispiele für die Umsetzung in Großserie stellen moderne, spritzgießtechnisch gefertigte, hybride

Automobilbauteile vom Typ „Frontend“ und „Cockpitquerträger“ (ErlingKlinger AG) aus einem mit Kurzglasfasern verstärkten Polyamid (PA) und Metall dar (BILD 1). Aufgrund der Kurzfaserverstärkung ist das entsprechende Niveau der auf die Materialdichte bezogenen Struktureigenschaften für die luftfahrttechnische Anwendung allerdings nicht ausreichend. Zudem ist bei einer Kleinserienfertigung, wie im Flugzeug- und Hubschrauberbau üblich, und unter der Berücksichtigung der Größe relevanter Strukturbauteile der werkzeug- und fertigungstechnische Aufwand für spritzgussbasierte Technologien kaum zu rechtfertigen.



BILD 1. Frontend und Cockpitquerträger von ErlingKlinger AG als Beispiele hybrider Automobilbauteile

Ein hohes Potenzial für eine weitere signifikante Massereduktion wird oft in Verbindung mit endlosfaserverstärkten FKV gebracht, bei denen eine kraftflussgerechte Anordnung der Verstärkungsfasern in der Verbundstruktur eine nahezu vollständige Ausnutzung der werkstoffimmanenten Festigkeitsreserven in Kombination mit einer vergleichsweise geringen Materialdichte und einer intelligenten Funktionsintegration

zulässt. Thermoplastbasierte Werkstoffkonzepte kommen hier bereits jetzt z. B. zur Herstellung von Automobilbauteilen mit hohen Struktur- und Sicherheitsanforderungen zum Einsatz. So konnte bei der Sitzschale CAMISMA dank der Verwendung von unidirektional verstärkten CFK-Halbzeugen mit PA-Matrix und optimierten Metalleinlegern an den Lasteinleitungsstellen eine Masseinsparung von ca. 50% gegenüber der Referenzstruktur erreicht werden [1].

Für die automobilen Serienfertigung ist die Verwendung von thermoplastischen Matrices aus Sicht der Prozesseffizienz und einer guten Kompatibilität mit angespritzten Verstärkungsrippen und Funktionselementen sehr vorteilhaft. Bei den luftfahrttechnischen FKV-Bauteilen sind eher duroplastische Matrixwerkstoffe vorzufinden, die für Autoklaventechnik optimiert wurden. Thermoplastvarianten sind hier vor allem aufgrund einer schnellen Erweichung des Kunststoffs mit steigender Temperatur sowie ausgeprägter Relaxations- und Kriechvorgänge kaum vorzufinden.

Bei komplexen Bauteilstrukturen erfordern die oft schwer abzuschätzenden Kerbspannungen in den kritischen Bereichen wie Lasteinleitungen oder hohe dynamische Lasten den Einsatz von geeigneten Fasern oder metallischen Strukturelementen. Maßgeschneiderte Mischbauweisen erlauben hier oft eine effiziente Lösungsfindung. So werden z. B. bei den Rotorblättern von Windkraftanlagen CFK und GFK vorteilhaft miteinander kombiniert. Ein weiteres, technisch interessantes Anwendungsbeispiel stellt eine Leichtbau-CFK-Kupplung für Schienenfahrzeuge dar (BILD 2). Dank der hier verwendeten variabelaxialen Preformtechnologie und hybrider Ausführung ist es gelungen, eine Massereduktion von über 50% im Vergleich zur Referenzkupplung aus Stahl zu erzielen und die Bauteilanforderungen vollständig zu erfüllen (Zuglastfall: 40 t, Drucklastfall: 25 t, Bauteilmasse: 19 kg) [2].



BILD 2. Erste hybride Leichtbau-Kupplung aus CFK und Titan für Schienenfahrzeuge [2]

Standardmäßig werden in der Luftfahrt kohlenstofffaserverstärkte Duroplastbauteile eingesetzt, die jedoch neben den außerordentlich hohen spezifischen Festigkeitseigenschaften einige Nachteile in Hinblick auf vibroakustisches Verhalten, Schadenstoleranz, Umwelt- und Kostenaspekte aufweisen. Gerade hier können naturbasierte Verstärkungs- und Matrixmaterialien ihr einzigartiges Eigenschaftspotenzial entfalten und in einem Mischverbund die oben angesprochenen Nachteile von CFK kompensieren.

2.2. Naturfaserverbundwerkstoffe für technische Anwendungen

Grundsätzlich sind bei naturfaserverstärkten Bioverbundwerkstoffen relativ hohe spezifische Festigkeiten und hohe spezifische Steifigkeiten zu erzielen, die den NFK-Werkstoffen neue Anwendungsfelder im

technischen Bereich zugänglich machen. So kann der spezifische Elastizitätsmodul von duroplastbasierten Flachsfaserverbunden einen im Vergleich zum GFK um ca. 40% höheren Wert erreichen. Die spezifische Zugfestigkeit liegt dagegen bei ca. 34% des entsprechenden Wertes von GFK, was auf wachstums- und verarbeitungsbedingte Fehlstellen bei Flachs- und allgemein Naturfasern zurückzuführen ist. 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 verschiedene Hochleistungshalbzeuge aus Naturfasern – vornehmlich Gelege – in den Markt gebracht. TAB 1 zeigt eine repräsentative Übersicht zu Gelegehalbzeugen aus Flachsfasern.

NF-Gelege	Beschreibung
	unidirektionales Flachsfasergelege aus drehungsfreien Flachsfasern Fl.-masse [g/m ²]: 50, 70, 110, 200 Hersteller: Lineo
	unidirektionales Flachsfasergelege aus drehungsfreien Flachsfasern Flächenmasse [g/m ²]: 150 Hersteller: Composites Evolution
	unidirektionales Flachsfasergelege aus stark gedrehten Flachsgarnen Flächenmasse [g/m ²]: 280, 300 Hersteller: Bcomp
	unidirektionales Flachsfasergelege aus Flachsgarnen geringer Drehung Flächenmasse [g/m ²]: 120 Hersteller: Bcomp
	biaxiales Flachsfasergelege aus stark gedrehten Flachsgarnen Flächenmasse [g/m ²]: 350 Hersteller: Bcomp
	biaxiales Flachsfasergelege aus Flachsgarnen geringer Drehung Flächenmasse [g/m ²]: 600 Hersteller: Composites Evolution

TAB 1. Kommerziell verfügbare Gelegehalbzeuge aus Flachsfasern

Diese Naturfaserhalbzeuge weisen aufgrund noch nicht ausgereifter Herstellungstechnologien zahlreiche Defizite im Hinblick auf Qualität und Weiterverarbeitbarkeit zum Verbundwerkstoff auf. Zudem kommen bei den meisten NF-Gelegen gedrehte Flachsgarne zum Einsatz, was zu einer problematischen Imprägnierung mit polymerer Matrix

und zur Minderung der Festigkeitseigenschaften des Verbundes führt. Eine Ausnahme stellen hier die unidirektionalen Halbzeuge von der Fa. Lineo oder Fa. Composites Evolution dar, die aus parallel nebeneinander angeordneten, drehungsfreien, 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 Epoxydharz bekannt. Die Gewebe- und Gelegehalbzeuge aus Naturfasern lassen sich grundsätzlich im Vakuuminfusions-, RTM- und RIM-Verfahren und die Prepregs mittels etablierter Autoklaven- oder Presstechnik zu tragfähigen Formteilen verarbeiten. Zu berücksichtigen sind dabei eine aufgrund der Oberflächenrauheit von Naturfasern eingeschränkte Drapierbarkeit der Halbzeuge, eine stark ausgeprägte Hydrophilie und per se vorhandene Eigenschaftsschwankungen der Naturfasern. 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.

3. VERWENDETE MATERIALIEN

Für die hier durchgeführten Arbeiten zur Untersuchung von Mischverbunden aus CFK und NFK wurden kommerziell verfügbare Materialien ausgewählt. Die eingesetzten Basistechnologien entsprechen den branchenüblichen Methoden zur Fertigung von FKV-Strukturen in Kleinserie oder im Labormaßstab. Als Matrix kamen neben Duroplasten auch Thermoplaste zur Anwendung.

3.1. Kohlenstofffaserhalbzeuge

Als Hochleistungshalbzeuge sind ein für die Luftfahrt zugelassenes UD-Gelege mit einem Flächengewicht von 125 g/m² aus Kohlenstofffasern vom Typ TENAX HTS 40 (Fa. Hauffer Composites) sowie ein Prepreg aus diesem Gelege und einer warmhärtenden EP-Matrix eingesetzt worden. Dieses CF-Prepreg ist sowohl für das Hochdruck- als auch das Niederdruck-Prepreg-Verfahren geeignet und weist in ausgehärtetem Zustand, abhängig von den Verarbeitungsbedingungen, einen Fasermasseanteil von 58 Ma% bis 62 Ma% auf, der einem gemittelten Faservolumenanteil von ca. 50 Vol.-% entspricht.

3.2. Flachsfaserhalbzeuge

Als biogene Verstärkungskomponente wurde hier das unidirektionale Flachsfasergelege (FF-UD) der Fa. Lineo mit der Flächenmasse von 110 g/m² verwendet. Die durchgeführten Voruntersuchungen bestätigen bei diesem FF-UD-Halbzeug eine hinreichende Imprägnierung sowohl mit der eingesetzten Duroplast- als auch Thermoplastmatrix. An der Stelle sei jedoch angemerkt, dass gegenüber Kohlenstofffasergelegen alle verfügbaren Naturfasergelege einige Qualitätsdefizite in Hinblick auf die Faserausrichtung und Homogenität der Faserverteilung

über die Halbzeugbreite aufweisen. Dies führt unvermeidlich zu einer höheren statistischen Kennwertstreuung bei den Testlaminaten.

3.3. Polymere Matrices

Um den biogenen Anteil des Mischverbundes zu steigern, wurden in der Arbeit biobasierte thermo- und duroplastische Matrices verwendet.

Bei dem eingesetzten Thermoplasten handelt es sich um ein vollständig biobasiertes PA 11 vom Typ Rilsan® BESNO P20 TL (Fa. Resinex) mit halbflexibler Einstellung. Zur Weiterverarbeitung zu Faserverbunden mittels Film-Stacking-Verfahrens wurde das PA 11 zunächst im Technikum der TUC zu 100 µm dicken Flachfolien verarbeitet.

Das für die Herstellung von duroplastischen Mischverbunden verwendete kalthärtende EP-System vom Typ Greenpoxy 56/SD 8820 (Fa. SICOMIN Composites) besteht bei einer Mischung von 100g Harz mit 21g Härter zu ca. 46 Ma% aus nachwachsenden Rohstoffen. Dieses EP-System kann im VARI-Verfahren verarbeitet werden.

4. HERSTELLUNG VON NATURBASIERTEN HYBRIDEN LEICHTBAUSTRUKTUREN

Zwecks Untersuchung des Anwendungspotenzials von biobasierten Leichtbauwerkstoffen in der Luftfahrt wurden auf Basis der bereits angegebenen Komponenten FF, CF, EP und PA symmetrische Laminataufbauten gemäß TAB 2 angefertigt. Die zwei letzten Verbunde stellen hybrides Materialkonzept nicht nur seitens eingesetzter Verstärkungsfasern, sondern auch seitens verwendeter Matrices dar. Damit sollte versucht werden, die Vorteile von Duroplasten und Thermoplasten in einer Verbundstruktur zu kombinieren.

Kennzeichnung in Anlehnung an [3]	Laminataufbau (C=Kohlenstoff-, F=Flachsfaser)
CF-EP II	(0 ₄) _s
FF-EP II	(0 ₄) _s
FF-PA II	(0 ₄) _s
CF-EP+FF-EP II	(0 ^C /0 ^C /0 ^F /0 ^F /0 ^F) _s
CF-EP+FF-EP _I_	(0 ^C /0 ^C /90 ^F /90 ^F /90 ^F) _s
CF-EP+FF-PA II	((0 ^C /0 ^C)EP+(0 ^F /0 ^F /0 ^F)PA) _s
CF-EP+FF-PA _I_	((0 ^C /0 ^C)EP+(90 ^F /90 ^F /90 ^F)PA) _s

TAB 2. Hergestellte Testverbunde und ihre Laminataufbauten

4.1. Vakuuminfusionsverfahren (VARI)

Das Vakuuminfusionsverfahren (VARI) gehört neben dem Prepreg-Verfahren zu den meist eingesetzten Herstellungstechnologien für großflächige FKV-Strukturen. Hierbei werden trockene, fertig zugeschnittene Verstärkungshalbzeuge gemäß dem Laminataufbauplan i.d.R. in einer Negativform platziert, mit einer Vakuumfolie

luftdicht verschlossen und bei Raumtemperatur vakuumgestützt mit dem Matrixharz imprägniert. So können halbzeugabhängig sehr homogene Strukturen mit Faseranteilen von bis zu 50 Vol.-% hergestellt und anschließend nachgetempert werden. Der dafür notwendige manuelle Fertigungsaufwand ist jedoch hoch.

Das VARI-Verfahren wurde in dieser Arbeit für die Herstellung von Testverbunden mit der Kennzeichnung FF-EP und CF-EP+FF-EP eingesetzt.

4.2. Niederdruck-Prepreg-Verfahren

Das Niederdruck-Prepreg-Verfahren wird hier als Konsolidieren von Prepreg-Halbzeugen zum Faserkunststoffverbund bei produktspezifischer Härtungstemperatur unter einem statischen Außendruck von etwa 1 bar (Vakuum) definiert. Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung von luftporenarmen Verbundbauteilen mit einem Faservolumengehalt von bis zu 60 Vol.-% ohne Einsatz eines Autoklaven und wurde für die Fertigung des CF-EP-Laminates sowie als letzter Verfahrensschritt bei der Fertigung der Mischlaminare CF-EP+FF-PA II und CF-EP+FF-PA_I im kombinierten Film-Stacking-Prepreg-Verfahren eingesetzt.

4.3. Kombiniertes Film-Stacking-Prepreg-Verfahren

Unter dieser neuartigen Herstellungstechnologie ist eine Kombination aus Film-Stacking- und Prepreg-Verfahren zu verstehen, wobei in einem ersten Verfahrensschritt ein Stapel aus Faserhalbzeugen und Thermoplastfolien mittels einer Heizpresse bis zum Aufschmelzen der Thermoplastmatrix erwärmt wird. In einem zweiten Verfahrensschritt erfolgt das Umsetzen dieses Stapels in eine Kaltpresse und das Imprägnieren der Faserhalbzeuge mit der aufgeschmolzenen Thermoplastmatrix unter Wirkung der Presskraft. Anschließend findet in einem dritten Verfahrensschritt das Aufbringen der duroplastischen Prepreg-Außenlagen auf den thermoplastischen FKV-Kern sowie in einer Temperierkammer unter angelegtem Vakuum das Aushärten zum Mischverbund und das Abkühlen der FKV-Struktur nach dem oben beschriebenen Niederdruck-Prepreg-Prinzip statt. Der Verfahrensablauf ist in TAB 3 zusammengefasst.

Verfahrensschritt	Temp. [°C]	Zeit [s]	Druck [MPa]
1. Heizpressen	220	180	0,1
2. Kaltpressen	25	120	0,042
3. Niederdruck-Prepreg-Verfahren	120	3600	0,085

TAB 3. Verfahrensschritte bei der Herstellung von faserverstärkten Thermoplast-Duroplast-Mischverbunden

Die Anbindung zwischen der thermo- und duroplastischen Strukturbereichen erfolgt jeweils über eine Lage FF-UD, die hier als eine Art Haftvermittlerschicht zwischen der PA- und EP-Matrix fungiert. Somit hängen die interlaminare Scherfestigkeit sowie die Biegefestigkeit des hergestellten Mischverbundes von der Anbindung beider polymerer Matrices an das Flachsfaseralbezeug maßgeblich ab. Den

schematischen Aufbau dieses Mischverbundes verdeutlicht BILD 3.

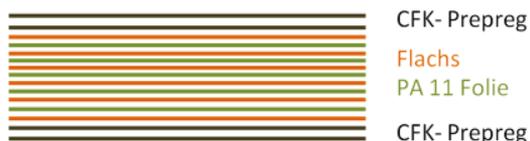


BILD 3. Laminataufbau des hergestellten Thermoplast-Duroplast-Mischverbundes CF-EP+FF-PA

5. EXPERIMENTELLE KENNWERTERMITTLUNG

5.1. Mechanische Eigenschaften

Zur Charakterisierung mechanischer Eigenschaften von UD-Laminaten wurden zunächst Probekörper aus den Verbundplatten CF-EP II, FF-EP II und FF-PA II gewonnen und im Zugversuch nach DIN EN ISO 527-5 in Faserrichtung und quer zur Faserrichtung getestet. Die jeweiligen Faservolumenanteile sind basierend auf den Masseanteilen und bekannten Dichten der Einzelkomponenten berechnet worden, da die Bestimmung des Volumenanteils von Naturfasern im Veraschungsversuch ausgeschlossen ist. Der Schubmodul und die Schubfestigkeit wurden anhand von symmetrischen Kreuzverbunden nach DIN EN ISO 14129 ermittelt. Die entsprechenden Kenngrößen der Testverbunde und die zugehörigen Standardabweichungen (Stabw) sind in TAB 4 angegeben.

Kenngrößen		Basislaminare					
		CF-EP		FF-EP		FF-PA	
Dichte	g/cm ³	1,53		1,25		1,17	
Faserant.	Vol.-%	50	Stabw	43	Stabw	41	Stabw
E ₁	GPa	119,97	1,25	17,12	0,89	20,01	1,27
σ ₁	MPa	1500	145	230	26,3	219	46,6
ε ₁	%	1,20	0,10	1,60	0,20	1,30	0,30
ν ₁₂	-	0,32	0,02	0,38	0,01	0,46	0,02
E ₂	MPa	7167	41	2922	107	2137	110
σ ₂	MPa	20,8	0,3	10,7	1,94	16,5	1,3
ε ₂	%	0,30	0,10	0,40	0,10	1,20	0,20
G ₁₂	MPa	3910	68,4	1010	165	988	82,3
τ ₁₂	MPa	47,3	20,8	17,8	1,1	20,8	1,98

TAB 4. Mechanische Eigenschaften der untersuchten Basislaminare CF-EP, FF-EP und FF-PA

Hieraus ist ersichtlich, dass die Steifigkeiten und Festigkeiten von flachsverstärkten Verbunden FF-EP und FF-PA deutlich unter den Werten des CF-EP liegen, obgleich ein höherer Faservolumengehalt bei den CF-EP-Proben zu berücksichtigen ist. Demnach ist eine direkte Substitution von CFK durch NFK kaum tragfähig. Das Ziel ist vielmehr, vorteilhafte Materialkombinationen bei den Mischverbunden zu identifizieren.

Die hergestellten Mischverbunde wurden daher hinsichtlich Zug-, Biege- und Schlagzähigkeitseigenschaften entsprechend nach DIN EN ISO 527-5, DIN EN ISO 14125 bzw. DIN EN ISO 179-2 charakterisiert. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in TAB 5 zusammengefasst.

Mischverbunde		Kenngroßen			
		CF-EP+FF-EP II	CF-EP+FF-EP _I_	CF-EP+FF-PA II	CF-EP+FF-PA _I_
Werkstoffdichte	g/cm ³	1,31	1,31	1,25	1,25
biogener Anteil	Ma%	55	55	45	45
Zug-E-Modul	GPa	45,3	34,8	50,6	37,9
Zugfestigkeit	MPa	315	89	388	252
Biege-E-Modul	GPa	54,6	57,5	69,3	66,8
Biegefestigkeit	MPa	508	552	529	465
Charpy-Schlagzähigkeit	kJ/m ²	98,2	50,5	50,6	40,7

TAB 5. Wesentliche Kenngroßen der hier entwickelten Mischverbunde

Zwecks eines korrekten Vergleichs sind die spezifischen Kennwerte berechnet worden. In BILD 4 sind für alle getesteten Verbunde jeweils spezifischer Zug- und Biege-E-Modul sowie absoluter biogener Masseanteil dargestellt. Die Fehlerindikatoren entsprechen den spezifischen Werten der Standardabweichung. Besonders interessant sind aus strukturmechanischer und umwelttechnischer Sicht die Mischverbunde der Gruppe CF-EP+FF-PA, die bei einem ca. 45 %igen biogenen Anteil einen gegenüber dem CF-EP-Laminat lediglich um 10 % bis 14 % niedrigeren spezifischen Biege-E-Modul aufweisen. Speziell bei der Variante CF-EP+FF-PA _I_ sind zudem die Eigenschaften in der Ebene quer zur Faserrichtung der CF-Deckschichten vom FF-PA dominiert und somit dem CF-EP-Verbund deutlich überlegen. Der biogene Anteil dieser Verbunde kann nochmals gesteigert werden, wenn beim CF-EP-Prepreg anstatt des petrochemisch basierten ein biobasiertes Epoxidharz eingesetzt wird. So beträgt der biogene Anteil bei den CF-EP+FF-EP-Laminaten ca. 55 Ma%.

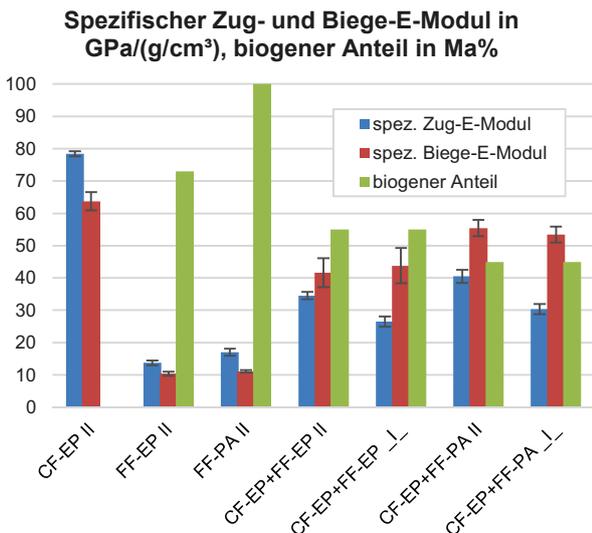


BILD 4. Spezifische Steifigkeitskenngroßen und biogener Anteil der untersuchten Testverbunde

Die Mischverbunde CF-EP+FF-EP _I_ und CF-EP+FF-PA _I_ besitzen dank der Flachverstärkung in der Ebene

quer zur Faserrichtung der CF-Deckschichten entsprechend eine 5fache bis 14fache spezifische Zugfestigkeit des CF-EP-Laminats. Im Unterschied hierzu liegen die spezifischen Zugfestigkeiten der Mischverbunde CF-EP+FF-EP II und CF-EP+FF-PA II (parallel zur Faserrichtung der CF-Decklagen) bei ca. 25–32 % des entsprechenden Wertes des CF-EP-Laminats. Anzumerken ist jedoch ein vorzeitiges Versagen der Verbundproben, welcher auf Strukturfehler wie Lunker oder Oberflächendefekte zurückgeführt werden kann. Derartige Strukturfehler sind am Beispiel des CF-EP+FF-EP II in BILD 5 in Form von dunklen Bereichen vor allem an der Grenze zwischen den CF-Deckschichten und dem FF-verstärkten Kern zu erkennen.

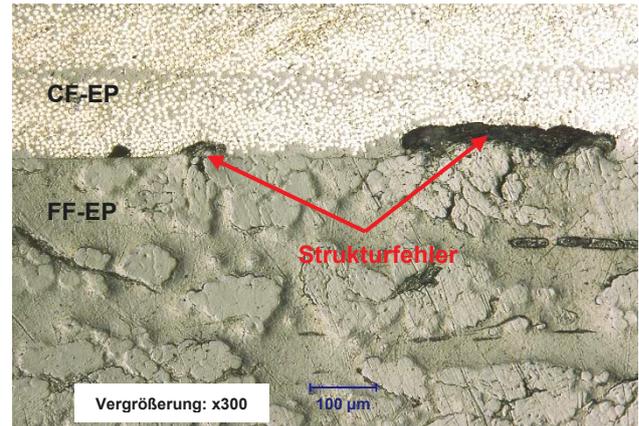


BILD 5. Mikrostruktur des Mischverbundes CF-EP+FF-EP II bei 300facher Vergrößerung

Technisch interessant sind auch die hochdynamischen Eigenschaften der untersuchten Testverbunde, die mit der Schadenstoleranz korrespondieren. Bei der instrumentierten Schlagzähigkeitsprüfung wurden die flachen Verbundprobekörper in der Aufnahme so platziert, dass der Aufschlag des Schlagpendels breitseitig erfolgte.

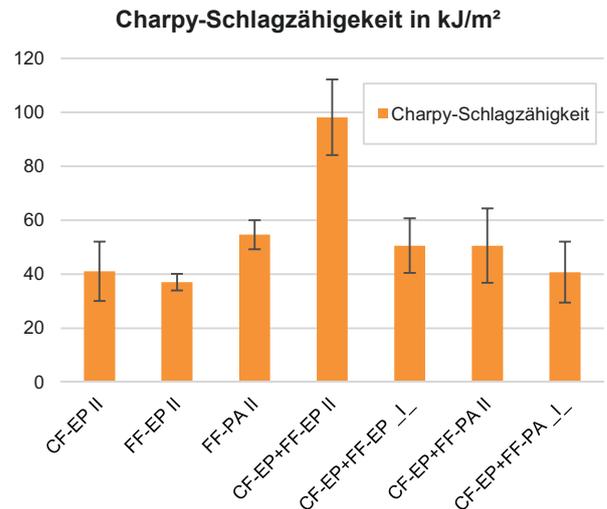


BILD 6. Charpy-Schlagzähigkeit der untersuchten Testverbunde

In BILD 6 sind die Schlagzähigkeitswerte der getesteten Verbunde dargestellt. Die untersuchten Mischverbunde besitzen demnach eine mindestens gleich gute Schlagzähigkeit wie CF-EP-Laminat. Die Materialvariante CF-EP+FF-EP II weist im Vergleich zum CF-EP-Verbund

sogar eine um 150% bessere Schlagzähigkeit auf, was in der Flexibilität der verwendeten EP-Matrix begründet sein kann.

5.2. Viskose Dämpfung

Faser-Kunststoff-Verbunde zeigen ein stark ausgeprägtes anisotropes Werkstoffverhalten seitens der Steifigkeiten, Festigkeiten aber auch der Dämpfung. Die Dämpfung von Verbunden kann mit Ansätzen ähnlich der klassischen Laminattheorie auf Schichtebene beschrieben und für den Gesamtverbund richtungsabhängig ermittelt werden. Die Formulierungen wurden von ADAMS und BACON zunächst für Balken unter reiner Biegebelastung entwickelt und basieren auf der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung in Faserrichtung, quer zur Faserrichtung sowie unter Schubbeanspruchung [3]. Die Ansätze wurden für zweidimensionale Berechnungen erweitert [4], [5] und können in FEM-Programme auf Basis der modalen Dämpfung implementiert werden [6], [7].

Die vorliegenden Verbunde wurden anhand von freien Schwingungen von Kragbalken untersucht. Der Versuchsaufbau orientiert sich an der DIN EN ISO 6721 sowie der VDI Richtlinie 3830. Demnach wurden alle Proben berührungslos durch Induktion in ihrer ersten Biegemode angeregt und mithilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers die Geschwindigkeit im Zeitbereich gemessen. Die Ermittlung des Lehrsches Dämpfungsmaßes erfolgte nach Abschalten der harmonischen Anregung mittels der exponentiellen Einhüllenden der Ausschwingkurven sowie der Biegeeigenfrequenz.

Für alle Materialien wurden ausschließlich Proben mit Faserorientierung der Decklagen in Längsrichtung des Balkens hergestellt, um einen einfachen qualitativen Vergleich der Werkstoffe zu ermöglichen.

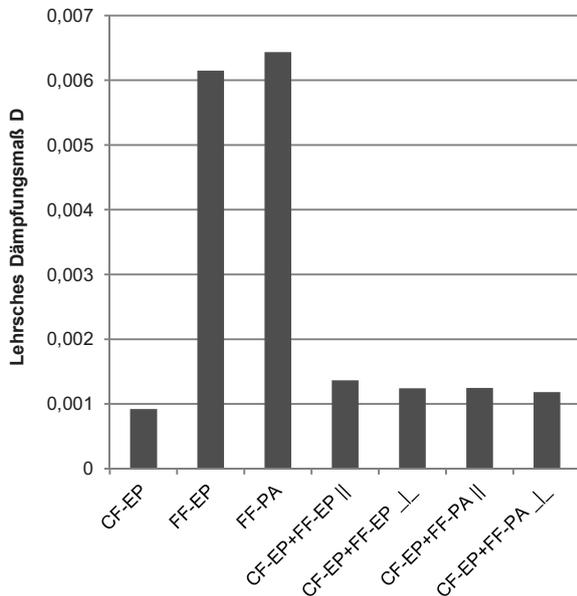


BILD 7. Lehrsches Dämpfungsmaß verschiedener Werkstoffkonfigurationen nach Messung im Ausschwingversuch an Kragbalkenproben

Gemäß BILD 7 zeigen insbesondere die Flachsfaser-Verbunde FF-EP und FF-PA ein ausgeprägtes Dämpfungsverhalten. Durch den Laminataufbau der Mischverbunde mit stets außen liegenden Kohlenstofffaserlagen ist weiterhin eine Steigerung der

Dämpfung gegenüber reinen CF-EP-Proben nachweisbar. Art und Orientierung der Kernmaterialien beeinflussen dabei die Dissipationseigenschaften jedoch kaum. Die Dämpfung der Verbunde ist damit erwartungsgemäß von den Decklagen dominiert, was zudem auf vernachlässigbare interlaminare Schubbeanspruchungen hindeutet.

5.3. Luftschalldämmung

Zur Ermittlung der Luftschalldämmung wurden ebene, kreisförmige Proben mit einem Durchmesser von 40 mm im Transmissionsrohr unter Einwirkung eines Direktschallfeldes in Form von weißem Rauschen im Frequenzbereich von 100 Hz bis 4000 Hz untersucht. Die Ermittlung der Luftschalldämmung erfolgte unter Anwendung des Verfahrens mit Übertragungsmatrizen nach Song und Bolton.

Für die Messungen dieser geringen Probengröße wurde der Einfluss der Orientierung der Kernschicht nicht berücksichtigt.

Alle Proben zeigen einen Anstieg der Schalldämmung über dem Frequenzverlauf (BILD 8). Zudem zeigt sich der positive Einfluss der Flachfasern bereits bei den Verbunden mit nur einem Fasermaterial deutlich, sodass die FF-PA-Proben mit Abstand die besten Schalldämmwerte erzielen. Im Gegensatz dazu sind rein duroplastische Verbunde CF-EP+FF-EP besser dämmend als die Verbunde mit polyamidbasiertem FF-Kern.

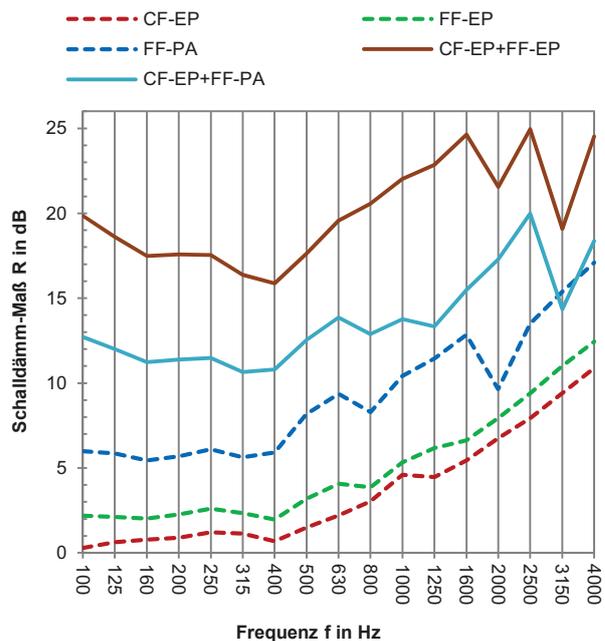


BILD 8. Ergebnisse der Luftschalldämmung verschiedener Werkstoffkonfigurationen nach Messung im Transmissionsrohr

Die Bewertung der Terzbandwerte gemäß DIN EN ISO 717-1 in BILD 9 zeigt die Gegenüberstellung der Einzahlwerte und unterstreicht das gesteigerte Dämpfungsvermögen der hybriden Verbunde gegenüber den Kunststoffen mit nur einem Fasermaterial, aber auch den positiven Effekt durch Flachfasern.

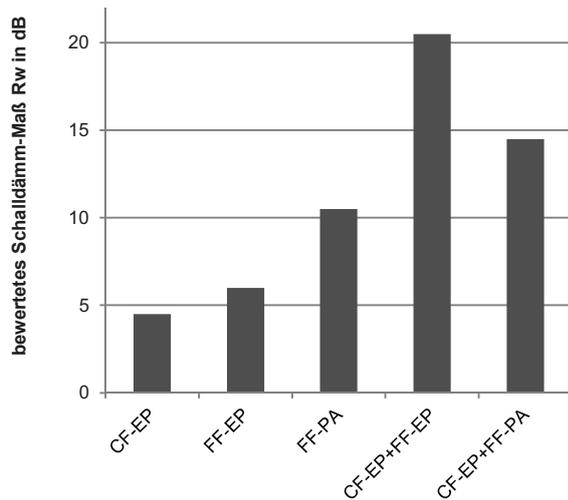


BILD 9. Bewertung der Luftschalldämmung verschiedener Werkstoffkonfigurationen gemäß EN ISO 7171

Die Ergebnisse der bewerteten Schalldämmung lassen sich, bezogen auf die Flächenmasse der Proben, gemäß BILD 10 darstellen. Schlussfolgernd kann mit reinen FF-PA-Verbunden bei gleicher Masse ähnlich gute Schalldämmung erzielt werden, wie mit den Mischverbunden.

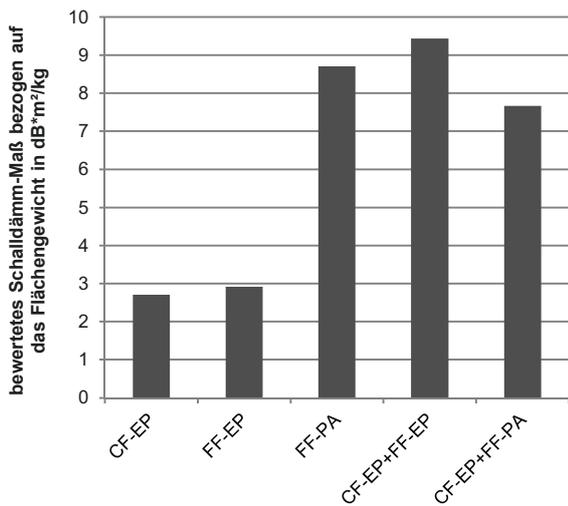


BILD 10. Luftschalldämmung verschiedener Werkstoffkonfigurationen bezogen auf die Flächenmasse der Laminare

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Anwendung von naturbasierten Werkstoffen bei den luftfahrttechnischen Bauteilen und Strukturen kann eine Reihe besonderer Vorteile bieten, birgt jedoch aufgrund noch nicht ausgereifter Halbzeug- und Materialkonzepte viele Risiken. Eine direkte Substitution von CFK durch NFK ist in absehbarer Zeit auch bei einer erfolgreichen Weiterentwicklung von NFK kaum vorstellbar. Das werkstoffimmanente Potenzial biogener Materialsysteme für die Luftfahrt lässt sich dennoch durch maßgeschneiderte Hybridwerkstoffe erschließen, indem in tragfähigen Leichtbaustrukturen NFK und CFK miteinander kombiniert werden. So weisen die hier entwickelten und untersuchten Mischverbunde spezifische Biegeeigenschaften auf, die denen von CFK nahe kommen,

und besitzen ein technisch interessantes vibroakustisches Verhalten. Erstmals wurden in dieser Arbeit hybride faserverstärkte Thermoplast-Duroplast-Verbunde betrachtet und umfassend charakterisiert.

Das Erreichen des hohen Anforderungsprofils der Luftfahrtstrukturen erfordert jedoch bei derartigen naturbasierten Hybridwerkstoffen intensive Untersuchungen auf allen technologischen Ebenen von der Materialentwicklung über die Bauteilsimulation bis hin zur Handlungsentwicklung und Endverarbeitung zum Bauteil. Essentielle Aspekte sind darüber hinaus das Brandverhalten und die toxische Wirkung, die den Schwerpunkt weiterer geplanter Untersuchungen darstellen.

Ganzheitliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Einsatz von NFKs im Flugzeugbau unter Berücksichtigung von Material-, Technologie- und Bauweisenaspekten sind Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten eines Konsortiums aus Wissenschaftlern der TU Chemnitz, TU München und HH Hannover im Forschungsvorhaben „Funktionsintegrierte und ressourcenschonende Leichtbaustruktur für die Luftfahrt (InteReSt)“, das im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms vom DLR/BMWi gefördert und von der TU Chemnitz koordiniert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Schuck, „Automobiler Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen,“ *GAK*, pp. 144-147, Jahrgang 69 3 2016.
- [2] K.-U. Kolshorn, L. Kroll, H. Seidlitz, L. Ulke-Winter, S. Müller, A. Czech, K.-H. Hoyer und R. Grothaus, „Erste CFK-Kupplung für Schienenfahrzeuge,“ *Lightweight Design*, pp. 38-43, Nr. 5 2012.
- [3] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [4] R. D. Adams und D. G. C. Bacon, „Effect of fibre orientation and laminate geometry on the dynamic properties of CFRP,“ *Journal of Composite Materials*, Bd. 7, pp. 402-428, 1973.
- [5] J.-M. Berthelot, M. Assarar, Y. Sefrani und A. E. Mahi, „Damping analysis of composite materials and structures,“ *Composite Structures*, Bd. 85, Nr. 3, pp. 189-204, 2008.
- [6] E. Billups und M. Cavalli, „2D damping predictions of fiber composite plates: Layup effects,“ *Composites Science and Technology*, Bd. 68, Nr. 3-4, pp. 727-733, 2008.
- [7] M. Klaerner, M. Wuehrl, L. Kroll und S. Marburg, „Modelling and FEA-Simulation of the Anisotropic Damping of Thermoplastic Composites,“ *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, Bd. 3, Nr. 3, pp. 331-349, 2016.
- [8] M. R. Maheri, „The effect of layup and boundary conditions on the modal damping of FRP composite panels,“ *Journal of Composite Materials*, Bd. 45, Nr. 13, pp. 1411-1422, 2011.