

KOMBINIERTE PREPREG- UND INFUSIONSBAUWEISE: PROZESSÜBERSICHT UND ANWENDUNGEN

C. Wellhausen¹, W. Leistner¹, M. Schneeberger¹, K. Drechsler²

¹ Eurocopter Deutschland GmbH, 85521 Ottobrunn, Deutschland

² Institut für Flugzeugbau, 70569 Stuttgart, Deutschland

Zusammenfassung

Die kombinierte Prepreg- und Infusionsbauweise eröffnet neue Potenziale für eine innovative Fertigung von Faserverbundstrukturen. Durch eine gemeinsame Prozessierung verschiedener Matrixhalbzeuge können Faserverbund-Baugruppen, welche heute noch in Differenzialbauweise gefertigt werden müssen, integral hergestellt werden. Der vorliegende Artikel stellt verschiedene mögliche Verfahrensvarianten der kombinierten Prepreg- und Infusionsbauweise vor und zeigt bekannte Anwendungen an Luftfahrzeugstrukturen oder Demonstrator-Bauteilen auf.

1. EINLEITUNG

Die Erzielung eines hohen Integrationsgrades, die Minimierung von Fügestellen sowie die Reduktion der Anzahl der Einzelkomponenten sind die wichtigsten Ziele bei der Entwicklung neuer Faserverbundbauweisen. Vergleicht man die beiden gebräuchlichsten derzeit in der Luftfahrt zur Anwendung kommenden Bauweisen, die Prepreg- und die Infusionstechnologie, zeigt sich dass letztere aufgrund vielfältiger möglicher Technologien zur Herstellung von komplexen trockenen Faservorformlingen sehr gut für komplexe Bauteile geeignet ist. Die Prepregtechnologie ist eher geeignet für flächige Bauteile, da höhere Formkomplexität schnell stark steigende Kosten für manuellen Legeaufwand oder automatisierte Ablegetechnologien verursacht. Leider reichen allerdings selbst moderne Infusionsharze nicht immer an die Anforderungen der Luftfahrt heran. Dies bezieht sich auf ihr Brandverhalten und insbesondere auf ihre Schlagzähigkeit. Diese ist der Hauptgrund dafür dass Strukturen für Luftfahrzeuge heute überwiegend in Prepregtechnologie hergestellt werden.

Hier setzt die „kombinierte Prepreg- und Infusionsbauweise“ (Combined Prepreg and Infusion, CPI) an. Eine Kombination beider Technologien in einem Fertigungsschritt ermöglicht es, zum einen die kostenseitigen Vorteile der Infusionsbauweise zu nutzen, zum anderen aber die Leistungsfähigkeit des Endproduktes über die Prepregtechnologie sicherzustellen.

2. HYBRIDBAUWEISEN

Es gibt verschiedene Ansätze zur Kombination mehrerer Matrixmaterialien in einem Faserverbundbauteil. Vor einigen Jahren noch zwang die wenig ausgereifte Technologie zur Herstellung von komplexen, trockenen Faservorformlingen („Preforming“) die Anwender dazu, komplexe Strukturbereiche in Prepregbauweisen mit manueller Ablage zu realisieren. Hierbei wurden beispielsweise komplexe Prepreg-Innenstrukturen mit infiltrierten Außenhäuten kombiniert. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten Projekts „Neue Rumpf-Technologie“ wurde in den Achtziger Jahren eine Studie zur Anwendung der Faserverbundtechnik in

Rumpfstrukturen durchgeführt, wobei die Prepreg- und die Nasswickelbauweise ihre kombinierte Anwendung fanden. Innen liegende, komplexe Versteifungsstrukturen waren in Prepregtechnologie realisiert und dienten als Wickelkern für die Rumpfaußenhaut, welche anschließend in Wickeltechnologie (Positivbauweise) nass aufgebracht wurde [1].

Heutzutage erlauben moderne Preformingtechnologien eine einfache und automatisierte Herstellung von Trockenpreforms. Exemplarisch seien hier nur die Nähtechnologie mit oder ohne dreidimensionale Verstärkungselemente, die Bindertechnologie, Stricken und Flechten genannt. Flächige Prepregbauteile hingegen können heute mit verschiedenen Arten von automatisierten Tapelegetechnologien kostengünstig hergestellt werden. Je nach Breite des verwendeten, vorimprägnierten Halbzeugs können mehr oder weniger komplexe Strukturen abgelegt werden, wobei schmalere Halbzeuge eine höhere Komplexität ermöglichen als breitere, dabei allerdings auch höhere Fertigungskosten verursachen [2, 3, 4].

Es deutet sich somit an, dass eine Hybridbauweise, welche die Vorteile von Fertigungsverfahren mit vorimprägnierten Halbzeugen mit den Vorteilen von Infusionsverfahren kombinieren soll, vorzugsweise auf die das gemeinsame Verarbeiten von infiltrierten Innenstrukturen mit flächigen Hautfeldstrukturen aus Prepregwerkstoffen setzt. Im Folgenden werden einige der heute bekannten Verfahrensvarianten beschrieben und mit Beispielen erläutert.

2.1. CPI mit Single-Line-Injection

Grundlegende Untersuchungen zur CPI-Technologie wurden von dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR Braunschweig geleistet. Im Rahmen verschiedener Forschungsaktivitäten wurde ein Versuchsholm in Sandwichbauweise gebaut (Bild 1). Der Hybridholm wurde mechanisch auf Biegung getestet und mit einem in reiner Infusionsbauweise hergestellten Holm verglichen [5]. Ebenfalls wurde ein Türrahmendemonstrator gebaut. Hierbei wurde eine Prepreg-Außenhaut mit einer Rahmenversteifung aus Infusionswerkstoffen hergestellt (Bild 2). Die Machbarkeit der typischen Konfiguration einer Haut-Stringer Struktur wurde anhand eines Hautfeldes mit Omega-Stringern nachgewiesen (Bild 3). Charak-

teristisch für die Bauteile des DLR Braunschweig ist insbesondere die Verwendung des Single-Line-Injection Verfahrens. Hierbei wird ein Bauteil auf einem einseitigen Werkzeug in einem Autoklaven hergestellt. Bei dem SLI-Verfahren wird über eine einzige Leitung das Bauteil sowohl evakuiert als auch anschließend mit Harz imprägniert.



BILD 1. Hybridholm des DLR Braunschweig



BILD 2. Türrahmendemonstrator des DLR Braunschweig



BILD 3. Hybrides Haut-Stringer Panel, DLR Braunschweig

2.2. Nutzung des VARI-Verfahrens

Als Abwandlung der zuvor beschriebenen hybriden SLI-Technologie kann das CPI-VARI gesehen werden. Hierbei wird ebenfalls eine einseitige Form verwendet, allerdings erfolgt die Harzinfiltration in einem klassischen vakuumunterstützten Infusionsverfahren. Ausgehärtet wird das Hybridlaminat entweder in einem überdrucklosen Heizofen analog zu den bekannten Vakuuminfusionsverfahren oder in einem bedruckten Autoklaven. Entscheidend für die Anlagenwahl ist hierbei das im Hybridprozess verwendete Prepregharz. Klassische Prepregharze benötigen meist einen Überdruck von 2 bis 8 bar um eine porenaarme Aushärtung zu ermöglichen, allerdings kommen vermehrt überdrucklos härbare Prepregharze auf den Markt, welche sich für sogenannte „Out of Autoclave“ (OOA) Verfahren eignen. Meist weisen diese Harze einen relativ geringen Anteil an zähmodifizierenden Bestandteilen auf, um die Viskosität niedrig zu halten und so eine gute Konsolidierung und Benetzung der Fasern zu ermöglichen.

2.3. Schnellhärtung

Alternativ zu der Nutzung von OOA-Preggregsystemen kann es sinnvoll sein, alternative Härteverfahren in Erwägung zu ziehen. Hauptgedanke hierbei ist, die notwendige Konsolidierung des Prepregs nicht über einen hohen Druck, sondern über eine hohe Aufheizrate zu erreichen. Aufgrund der verzögert einsetzenden Härtereaktion von Epoxidharzen wird hierbei ein niedrigeres Viskositätsminimum erreicht, welches zu einem besseren Harzfluss und dementsprechend zu einer besseren Faserbenetzung und Konsolidierung führen kann. Bekannte Technologien für Schnellhärtung sind beispielsweise die Mikrowellen- oder die Elektronenstrahlhärtung. Insbesondere von Interesse ist für Luftfahrtanwendungen das Quickstep-Verfahren, welches über den Austausch eines flüssigen Heizmediums in einem Werkzeug hohe Aufheizraten von bis zu ca. 20 K/min (abhängig von Bauteilgröße und Komplexität) ermöglicht [6].

2.4. Hybridverfahren in geschlossener Form

Bis zu einer gewissen Bauteilgröße stellt sich die Nutzung einer geschlossenen Form als günstig für den CPI Prozess dar. Vorteil ist die hohe Konturgenauigkeit sowie insbesondere die Möglichkeit zur Druckbeaufschlagung über das Infusionsharz. Der bei der Infusion verwendete Druck (üblicherweise zwischen 2 und 8 bar) dient, nachdem der Füllprozess der Kavität abgeschlossen ist, zur Kompaktierung und Druckbeaufschlagung des Prepregs und ermöglicht dadurch eine porenfreie Aushärtung des zähmodifizierten Prepregharzes. Nachteilig bei dieser Verfahrensvariante ist, dass geschlossene und gegebenenfalls eigenbeheizte Werkzeuge meist kostenintensiv und ab einer gewissen Bauteilgröße aufgrund ihrer Masse nicht mehr sinnvoll handhabbar sind.

Die Herstellung mehrerer Demonstratorbauteile in einer eigenbeheizten, geschlossenen Form gelang dem Natio-naal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR). Ein Cargotür-Demonstrator für ein Passagierflugzeug wurde entwickelt, hierbei bestanden allerdings die Außenhaut aus Infusionsmaterialien und die Innenstruktur aus vorimprägnierten Halbzeugen (Bild 4). Grund für die Anwendung der Hybridbauweise waren insbesondere fertigungstechnische Aspekte und weniger die Eigenschaften der ausgehärteten Materialien [7].



BILD 4. Cargotür-Demonstrator, NLR [7]

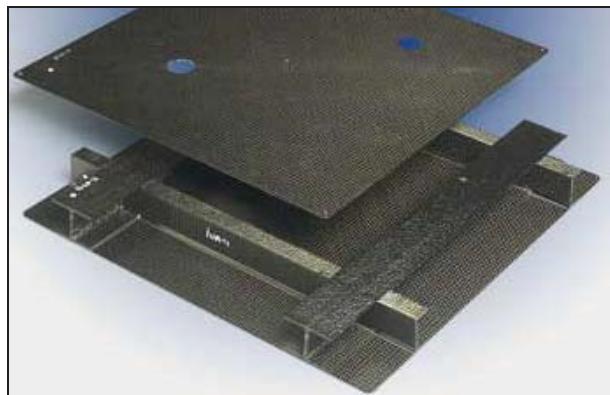


BILD 5. Generischer Bauweisendemonstrator, NLR [8]

Das NLR hat weitere hybride Demonstratorbauteile gefertigt, hierbei handelt es sich um generische geschlossene Faserverbundstrukturen. Ziel war ebenfalls die fertigungs-technische Umsetzung einer Hybridstruktur mit geringen Toleranzen sowie die Entwicklung einer zuverlässigen Stringer-Haut Anbindung ohne die Verwendung von Nieten. Drei Demonstratoren wurden gebaut, die Deckhäute wurden sowohl aus vorimprägnierten UD-Tapes wie auch aus vorimprägnierten Gewebehalbzeugen hergestellt. Die Innenstrukturen wurden in allen drei Fällen infiltriert [8].

Die Firma Eurocopter Deutschland GmbH hat mit einer Hubschrauber-Tankabdeckung (Bild 6) das erste CPI-Serienbauteil entwickelt. Es wurde eine Prepreg-Gewebeaußenhaut mit einem trockenen Nähpreform für die Versteifungsstruktur kombiniert und das Bauteil in Sandwichbauweise in einer geschlossenen Form infiltriert. Der aufgebrachte Injektionsdruck ermöglicht eine gute Konsolidierung des Prepregharzes und einen sehr stabilen Fertigungsprozess. Des Weiteren zeigte sich eine problemlose Umsetzung der zerstörungsfreien Bauteilprüfung an dem Hybridbauteil [9]. Eine Analyse der Übergangszone von gemeinsam ausgehärteten Prepreg- und Infusionswerkstoffen wurde ebenfalls von der Eurocopter Deutschland GmbH durchgeführt [10].

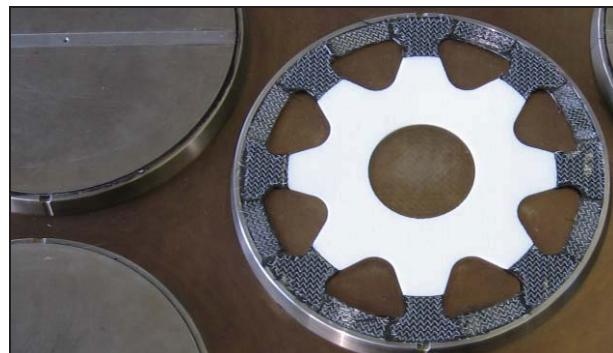


BILD 6. Werkzeugbelegung zur Herstellung einer Hubschrauber-Tankabdeckung in Hybridbauweise, geschlossene Form [9]

3. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die kombinierte Prepreg- und Infusionsbauweise ermöglicht die Anwendung der Infusionsbauweise insbesondere in Luftfahrtstrukturen, die im Betrieb hohen Belastungen ausgesetzt sind. Mit der CPI-Technologie können die Schwächen der derzeit auf dem Markt befindlichen Infusionsharze ausgeglichen werden. Hier sei insbesondere deren oft mangelnde Schlagzähigkeit hervorgehoben. Es können also Teile, die heute in mehreren Einzelteilen aus verschiedenen Materialien differential gefügt werden müssen, zukünftig integral hergestellt werden.

Neben dieser auf das Endprodukt bezogenen Aussage ist insbesondere ein Augenmerk auf die Optimierung der verwendeten Fertigungstechnologien zu richten. Höherer Integrationsgrad geht immer einher mit zunehmenden Vorbereitungsarbeiten vor der Aushärtung, aufwändigeren Nachbereitungsarbeiten wie beispielsweise der Reinigung der Werkzeuge und der zerstörungsfreien Prüfung der Bauteile. Eine große Rolle spielt bei zunehmendem Integ-

rationsgrad auch das höhere wirtschaftliche Risiko bei Ausschuss in der Serienfertigung.

Die vorgestellten Demonstrator- und Serienbauteile zeigen die Potenziale der CPI-Technologie auf. Hauptfokus bei den vorgestellten Prozessen ist derzeit die Nutzung von geschlossenen Formen, um die Konsolidierung der Prepreghalbzeuge durch Bedruckung über das Infusionsharz zu erreichen. Um die gewonnenen Freiheiten bei der Bauteilgestaltung nutzen zu können, gewinnen weiterentwickelte Werkzeugkonzepte wie beispielsweise die Nutzung von auswaschbaren Kernwerkstoffen abermals mehr Bedeutung [11]. Weiterhin ist eine engere Verzahnung mit automatisierten Fertigungsprozessen wie beispielsweise dem Tapelegen anzustreben.

4. DANKSAGUNG

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Robert Kaps, DLR Braunschweig, für die vielen fachlichen Diskussionen und die Bereitstellung der Baustudienfotos des DLR.

5. QUELLENVERZEICHNIS

- [1] P. Ermanni, Die kombinierte Nasswickel- und Prepregbauweise, Diss. ETH Zürich, 1990
- [2] K. Drechsler, Beitrag zur Gestaltung und Berechnung von Faserverbundwerkstoffen mit dreidimensionaler Textilverstärkung, Diss. Univ. Stuttgart, 1992
- [3] C. Weimer, M. Neitzel (Hrsg.), Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde, Diss. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, 2002
- [4] M. Neitzel, P. Mitschang, Handbuch Verbundwerkstoffe, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004
- [5] R. Kaps et al., Kombination von Prepreg- und Injektionstechnologie zur Herstellung von CFK-Verbundwerkstoffen, Proc. SAMPE Deutschland, 2006
- [6] V. Coenen et al., A feasibility study of Quickstep processing of an aerospace composite material, Proc. SAMPE Europe, 2005
- [7] H.G.S.J. Thuis, Development of a composite cargo door for an aircraft, Proc. ICCS-10, Monash, 1999
- [8] H.P.J. de Vries, Development of generic composite box structures with prepreg performs and RTM, Proc. SAMPE Europe, 2002
- [9] C. Wellhausen, S. Kunze et al., Herstellung von Faserverbundbauteilen durch die Kombination von Prepreg und Infusion am Beispiel einer Hubschrauber-Tankabdeckung, Proc. Dt. Luft- und Raumfahrtkongress, 2008
- [10] C. Wellhausen, R. Schulze et al., Morphology analysis of epoxy matrices to determine resin interface zones within Combined Prepreg and Infusion processing, Proc. EUCOMAS, 2009
- [11] S. Kunze, C. Wellhausen et al., Hollow Composite Structure Design by using novel Soluble Core Technologies, Proc. EUCOMAS, 2009