

KONTINUIERLICHE FERTIGUNGSVERFAHREN FÜR CFK-SPANTE UND CFK-STRINGER IN FLUGZEUGSTRUKTUREN

H. Purol (Universität Bremen, Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen, Deutschland),
A. Gillessen, R. Sundermann (CTC Stade GmbH, Airbus-Straße 1, 21684 Stade, Deutschland),
J. Kelling (Faserinstitut Bremen e.V., Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen, Deutschland)

Zusammenfassung

Zukünftige Flugzeugprogramme, die einen großen Anteil von Primärstrukturen aus Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) haben werden, erfordern CFK-Spante und –Stringer in einer Größenordnung von mehreren hundert Kilometern pro Jahr. Während für metallische Profile bereits automatisierte Fertigungsverfahren etabliert sind, ist die Fertigung von CFK-Profilen, insbesondere wenn sie gekrümmt sind oder Querschnittsänderungen aufweisen, noch manuell orientiert. In den Projekten LOKOST und FACT, gefördert im Nationalen Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo IV) durch das Bundesministerium für Wirtschaft gefördert, werden daher kontinuierliche Fertigungsverfahren für CFK-Profile entwickelt. Im Vortrag werden aktuelle Forschungsergebnisse aus diesen Projekten präsentiert.

1. EINLEITUNG

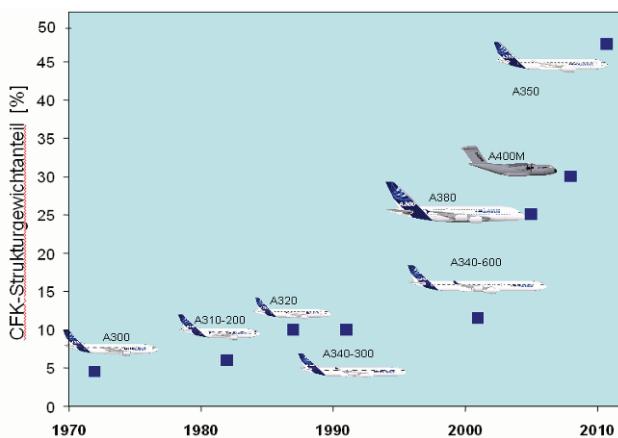


BILD 1: Wachsender Anteil von CFK-Strukturen in aktuellen Flugzeugen (Quelle: Airbus)

Zukünftige Flugzeugprogramme werden einen zunehmend großen Anteil von Primärstrukturen aus Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) aufweisen. Schon in aktuellen Programmen wie bei der Boeing 787 und der Airbus A 350 XWB haben CFK-Bauteile einen Gewichtsanteil von über 50% in den Strukturen (vgl. Bild 1). Derzeitige Bauweisen mit CFK-Strukturen orientieren sich an den metallischen differenziellen Konstruktionen von Flugzeugtypen, die sich seit Jahrzehnten erfolgreich

im Linieneinsatz bewährt haben. Eine klassische Bauweise besteht aus dünnen Schalen, die mit Stringern in Längsrichtung und Spanten in Querrichtung verstift sind. Die Anbindung der Spante an die Haut erfolgt über umgeformte Schubbleche, sog. Clips oder Cleats. Eine weitere Möglichkeit wären integrale Spante, die einen Fuß (Untergurt) aufweisen, die direkt mit der Haut montiert werden können und den Montageaufwand reduzieren.

Zukünftige Flugzeugprogramme mit einem CFK-Rumpf erfordern CFK-Strukturprofile, wie Spante und Stringer in einer Größenordnung von mehreren hundert Kilometern pro Jahr. Während für metallische Profile bereits automatisierte Fertigungsverfahren etabliert sind, ist die Fertigung insbesondere von CFK-Profilen, die veränderliche Krümmungen oder Querschnittsänderungen aufweisen, noch manuell orientiert. Derzeitige Ansätze in der CFK-Produktionstechnologie für Spante und Stringer in Stückzahlen, wie sie in Nachfolgegenerationen von Single-Aisle-Flugzeugen benötigt werden, erreichen noch nicht wettbewerbsfähige Kosten und Durchlaufzeiten zu vergleichbaren Aluminium-Profilen.

In den Projekten LOKOST und FACT, gefördert im Nationalen Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo IV) durch das Bundesministerium für Wirtschaft, werden daher kontinuierliche Fertigungsverfahren für CFK-Profile, wie sie in Flugzeug-Primärstrukturen zum Einsatz kommen, entwickelt.

2. KONTINUIERLICHE FERTIGUNGSVERFAHREN FÜR FASERVERBUND-PROFILE

Die Pultrusion ist ein bewährtes Verfahren zur kontinuierlichen Fertigung von geraden Profilen mit konstantem Querschnitt aus faserverstärkten Kunststoffen. Der auch als Strangziehverfahren bezeichnete Prozess wurde 1956 in den USA zur Herstellung von Profilen aus Faserverbundwerkstoffen entwickelt [MEY 1985].

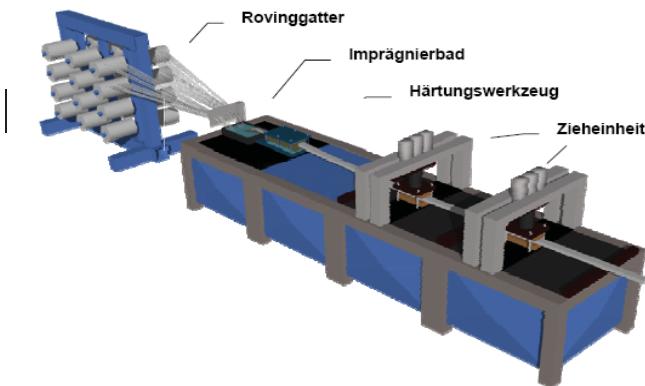


BILD 2: Schema des Pultrusionsverfahrens

Das Pultrusionsverfahren wird anhand der Abbildung 2 erläutert. Aus einem Magazin, dem Spulengatter werden die erforderlichen Rovings und textilen Halbzeuge durch die Pultrusionsanlage über intermittierend eingreifende Zugeinheiten (sog. „Puller“) gezogen, wobei die Materialien verschiedene Prozessschritte durchlaufen. Vor oder ggf. auch nach der Tränkung mit dem Harz können die Halbzeuge bereits eine Vorverformung (sog. Preforming) erhalten. Die Preforms durchlaufen dann ein Harzbad oder/und ein kombiniertes Injektions-/Aushärtewerkzeug, in dem unter Berücksichtigung der Prozessparameter Geschwindigkeit, Aushärtetemperatur, Harzsystem (und dessen Viskosität), beabsichtigter Faservolumengehalt der vorgetränkten Preform temperatur- und druckgesteuert ausgehärtet wird. Um die Aushärtung abzuschließen, ist ggf. hiernach ein weiteres Tempern in einem Durchlaufofen erforderlich. Am Ende des Prozesses kann dann eine synchron mit der Vorschubgeschwindigkeit der Anlage mitbewegte Trennvorrichtung das Profil in die gewünschten Längen teilen. Die Pultrusion stellt auf einzigartige Weise nahezu die komplette Prozesskette vom Rohstoff (dem Faserroving) bis zum Fertigprodukt aus faserverstärkten Kunststoffen (dem auf Länge geschnittenen Profil) dar, so dass praktisch die gesamte Wertschöpfungskette in einem kontinuierlichen resp. hoch automatisierten Verfahren abgebildet wird. Das Verfahren eignet sich für verschiedene offene und FVK-Hohlprofile mit konstantem Querschnitt aus verschiedenen textilen Halbzeugen und duromeren und thermoplastischen Matrixsystemen.

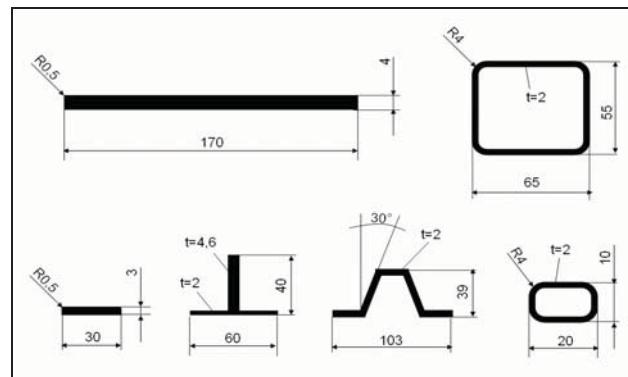


BILD 3: Beispiele von Profil-Querschnitten, die im Pultrusionsverfahren hergestellt werden können

Die Vielfalt der möglichen Querschnitte der Profile (Bild 3) hat der Pultrusion mittlerweile einen großen Marktanteil im Bau- und Ausrüstungsbereich (z.B. Fensterrahmen, Rohre, Leisten) und in der Freizeit- und Sportartikelindustrie (Skistöcke, Zeltstangen etc.) ermöglicht. Durch den hohen Automatisierungsgrad und die vergleichsweise günstigen Halbzeuge bei Verwendung von unidirektionalen Glasfaseroovings und ungesättigtem Polyester als Harzsystem können niedrige Produktionskosten realisiert werden.

Über die Länge veränderliche Profile (z.B. gekrümmmt, mit Abstufungen, biegeeinlinienangepasst), wie sie aus Leichtbaugründen vor allem im Flugzeugbau Anwendung finden, konnten bislang noch nicht kontinuierlich hergestellt werden, sondern bedürfen einer zusätzlichen diskontinuierlichen Prozessstufe.

3. FERTIGUNGSVERFAHREN FÜR CFK-STRINGER

Stringer werden in Flugzeugstrukturen zur Längsversteifung von dünnwandigen Schalen im Rumpf, in den Flügeln und Leitwerken eingesetzt. Je nach Einsatzort weisen die Stringer Krümmungen mit Radien bis zu 8000 mm, Durchsetzungen (Abstufungen) sowie Veränderungen in Steghöhe und -dicke auf. Mit dem PRTM-Verfahren¹ wurde ein Verfahren entwickelt, in dem Stringer in vergleichbaren Eigenschaften gefertigt werden, wie sie die CFK-Prepregstringer bieten, die in den Seitenleitwerken eingesetzt werden [HIL 2003].

Das PRTM-Verfahren verbindet die Vorteile des klassischen Pultrusionsverfahrens mit denen des RTM-Verfahrens. Hierbei werden textile Halbzeuge online mit einem niedrigviskosen Epoxidharzsystem imprägniert und zwischen Imprägnierung und Aushärtung durch eine im Verfahren mitlaufende allseitig schließende Presse in den Zielquerschnitt verpresst (vergl. Bild 4). Bei einer entsprechenden Wahl der verwendeten Materialien (Kohlenstofffasern und Harz) und der Prozessparameter (Druck und Temperatur) insbesondere im Pressschritt

¹ PRTM-Verfahren = Pultrusions-RTM-Verfahren

werden Eigenschaften des Profils eingestellt, wie sie der Flugzeugbau erfordert. Hierdurch lassen sich hohe Faservolumenanteile um 60 %, niedrige Porositäten < 3 % und eine hohe Glasübergangstemperatur ($T_G \approx 180^\circ\text{C}$) erreichen.



BILD 4: PRTM-Anlage

Kernprozesse des Verfahrens sind das Preforming (Bild 5 links), in dem flache textile Halbzeuge kontinuierlich sukzessive zu einem Doppel-T-Querschnitt umgeformt werden und das Pressen (Bild 5, rechts) der mit einer Epoxidmatrix imprägnierten Faserhalbzeuge. Die Presse ist beheizt und bewegt sich momentenfrei während des Verpressens auf die Materialien mit der gleichen Vorschubgeschwindigkeit synchron, wie die Puller am Ende der Anlage die Halbzeuge durch den gesamten Prozess ziehen. Auf diese Weise können leistungsfähige CFK-Profile mit Doppel-T-Querschnitt produziert werden, die längsseits aufgetrennt werden können, so dass sie ein Paar von T-Stringern bilden.



BILD 6: Preformingstation (links) und Presse (rechts)

Da das PRTM-Verfahren an das Pultrusionsverfahren angelehnt ist, eignet es sich ebenso für gerade Profile mit einem konstanten Querschnitt. Der Vorteil der Anlagentechnik bietet jedoch die Wahl zwischen Produkten, die einen unterschiedlichen Fertigungsgrad aufweisen. Mit dem Verfahren lassen sich kontinuierlich trockene Preforms, vorimprägnierte Profile (Prepreg-Stringer), teilausgehärtete Stringer sowie komplett ausgehärtete Stringer fertigen. Die Halbprodukte lassen sich dann offline in weiteren Verfahren zu den gewünschten Endprodukten verarbeiten, z.B. zu einem gekrümmten Stringer.

Aktuelle Forschungsarbeiten im LuFo IV-Forschungsprojekt FACT, Teilprojekt P³ zielen darauf ab, im kontinuierlichen Prozess Querschnittsänderungen zu ermöglichen. Anhand eines Beispiels eines T-Stringers, wie er in einem CFK-Rumpf zum Einsatz kommen kann, wird untersucht, wie Durchsetzungen oder zusätzliche Laschen am Untergurt (sog. „Duck feet“) während des Prozesses gefertigt werden, ohne dass diese durch aufwändige mechanische Nacharbeiten erzeugt werden (Bild 6).

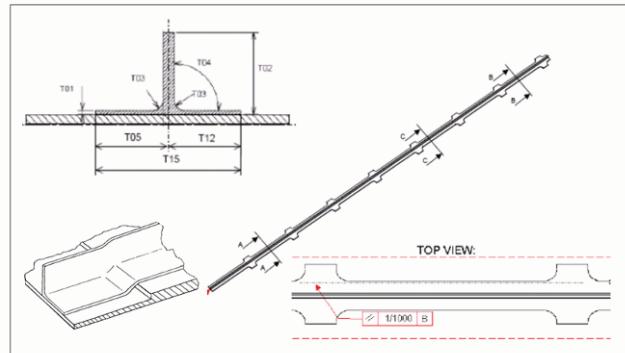


BILD 6: Durchsetzungen und „Duck feet“ an einem Stringer mit T-Querschnitt

In der ersten Projektphase wurde gemeinsam mit der Strukturmechanik und den Verbundpartnern und Unterauftragnehmern ein Anforderungskatalog erarbeitet, der als roter Faden für die Prozessideen, für die Fertigungsversuche sowie die Nachweistests an Prüfkomponenten dient. Neben der eigentlichen Prozessentwicklung bedarf es ebenso einer Anpassung und Erweiterung der Kohlenstofffasermaterialien und leistungsfähigen Harzsysteme. Erstes Etappenziel im Teilprojekt ist das Erreichen des Status „TRL 2“², zu dem der grundsätzliche Nachweis der Technologien, die Verfügbarkeit der entwickelten Materialien bei Serienlauf sowie die industrielle Umsetzbarkeit erfolgreich bewertet werden muss (Bild 7).

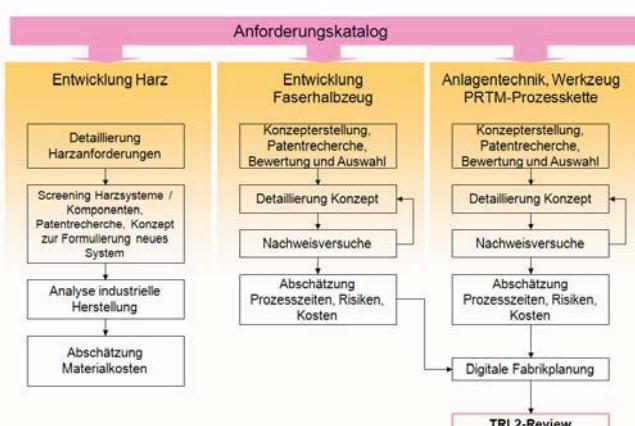


BILD 7: Vorgehen im FACT-Teilprojekt P³, um den TRL2-Status zu erreichen

² TRL = Technology Readiness Level (Reifegrad einer Technologie)

4. FERTIGUNGSVERFAHREN FÜR CFK-SPANTE

Spante werden in Flugzeugstrukturen zur Querversteifung in Rumpfschalen eingesetzt. Sie müssen bei einer möglichen Notlandung hohen Kräften widerstehen und sind deshalb als hoch belastbare Strukturen ausgelegt. Die Spante sind entweder als einfache C- oder Z-Profil ausgeführt, die über Schubleche (Clips) mit der Haut verbunden werden, wodurch in der Montage ein Toleranzausgleich möglich ist, oder sie sind als komplexe integrale Spante mit LCF-Querschnitt gefertigt, die einen reduzierten Montageaufwand bedeuten aber sehr hohe Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit stellen. Spante sind mit der Rumpfhaut gekrümmmt. Bei einem konventionellen Single-Aisle-Rumpf weist die Krümmung einen Radius von ca. 2000 mm auf.

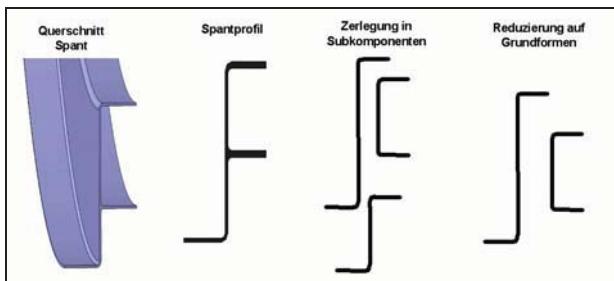


BILD 8: LCF-Spant und Zerlegung in Subpreforms

Wird ein integraler CFK-Spant mit einer Krümmung von 2 m Radius und mit LCF-Querschnitt aus trockenen Kohlenstofffasertextilien (Multi-Axial-Gelegen) gefertigt, so kann der komplexe Preform aus einfacheren Subkomponenten (z. B. verschiedene Z- und C-Preforms) gefügt werden (Bild 8). Ein LCF-Spant stellt somit noch höhere Anforderungen an einen kontinuierlichen Prozess als Stringer mit vergleichsweise geringen Krümmungen. Da ein großer Teil der Wertschöpfung bei der Produktion von CFK-Komponenten in dem Preforming textiler Halbzeuge liegt, ist ein Schwerpunkt auf den Nachweis einer kontinuierlichen Produktion der Preforms gelegt worden.

In einem Forschungsprojekt [SUN 2008] wurde bereits gezeigt, dass in einem hoch automatischen Prozess aus trockenen textilen Materialien LCF-Preforms schnell und kostengünstig im RTM-Verfahren zu ausgehärteten CFK-Spanen gefertigt werden können. Das Teilprojekt 3D-Profile im LuFo IV-Forschungsvorhaben LOKOST geht noch einen Schritt weiter. In diesem Projekt werden Technologien erarbeitet, die nachweisen, dass Preforms für einen LCF-Spant in einem kontinuierlichen Verfahren schnell und prozesssicher gefertigt werden können. Die in Bild 8 dargestellten Subpreforms wurden auf die einfachen Grundformen Z- und C-Preform reduziert. In einem einfachen Preforming-Drapier-Prüfstand (Bild 9 und 10) wurden verschiedene trockene Fasermaterialien ($\pm 45^\circ$ - und 0° -Lagen) aus Kohlenstofffasern nach dem Prinzip Querverformung (Querschnitt) vor Längsverformung (Krümmung) kontinuierlich in diese Grundformen

umgeformt. Bei der Verwendung von wärmeaktivierbaren Bindern auf den Halbzeugen kann die Umformung durch einen Inline-Aktivierungsprozess in ihrer Gestalt für nachfolgende Prozesse fixiert werden.

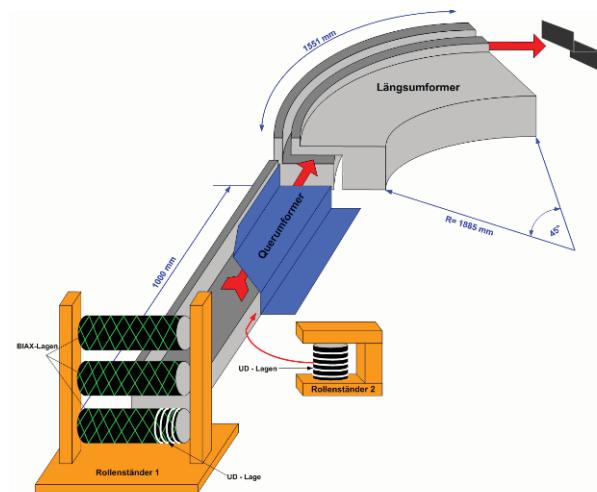


BILD 9: Drapier-Prüfstand für das kontinuierliche Verformen von Textilien in Spantpreforms

Am Prüfstand konnte gezeigt werden, dass sich bis zu vier MAG-Lagen kontinuierlich in Zielquerschnitt und –krümmung bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten bis zu 10 m /min umformen lassen, ohne dass dabei Falten; Ausfransungen oder Wellen in dem trockenen Material entstehen. Für eine reproduzierbare Preformqualität ist auf ein genaues Ausrichten der einzelnen Lagen sowie ein möglichst gleichzeitiges Umformen der einzelnen Lagen zu achten. Aktuelle Forschungsarbeiten am Drapierprüfstand nutzen neue Kohlenstofffaserhalbzeuge auf der Basis von bebinderten Garnen, die eine noch höhere Flexibilität und damit Formbarkeit in komplexe Geometrien erlauben und reduzierte Nähfadenmengen gegenüber vergleichbaren MAG-Material aufweisen.



BILD 10: Drapierprüfstand (links) und Beurteilung der Drapierqualität (rechts)

Derzeit laufen in Zusammenarbeit mit einem Projektpartner Arbeiten, die auf Technikumsniveau

nachgewiesenen Drapiereigenschaften auf eine großtechnische Anlage hoch zu skalieren, auf der Versuchspreforms hergestellt werden können, die anschließend offline im RTM-Verfahren zu ausgehärteten LCF-Spannen weiterverarbeitet werden können. RTM-Verfahren sind sowohl im Automobilbau als auch im Flugzeugbau etabliert und in hohen Stückzahlen automatisierbar und wirtschaftlich [HER 2007]. Die vorgestellte Preformtechnologie wird nach Projektende weiter entwickelt, um mit ihr in künftigen CFK-Flugzeugprogrammen Spantpreforms in Serie fertigen zu können.

5. DANKSAGUNG

Die beteiligten Projektpartner und Unterauftragnehmer in den genannten Projekten bedanken sich für die Förderung durch das Nationale Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo IV), finanziert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Innovation und organisiert durch den Projekträger Luftfahrtforschung, DLR-PT Bonn.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [HER 2007] Herrmann, A.S., Klein-Lassek, M.: *Hochautomatisierte RTM-Fertigung mit CFK*, Vortrag auf der AVK-Tagung 2008, veröffentlicht in Konferenzunterlagen, Stuttgart 2007
- [HIL 2003] Hillermeier, R.: *Kontinuierliche Fertigungstechnologien für CFK-Bauteile*, Congress Intelligente Leichtbausysteme, Hannover 9 -10. September 2003
- [MEY 1985] Meyer, R.: *Handbook of Pultrusion Technology*, ISBN 0-412-00761-4, Chapman and Hall New York, London 1985
- [PUR 2008] Purol, H. und Dommes, H. : *Continuous production of curved composite profiles for aircraft applications*, Presentation on 9th World Pultrusion Conference (EPTA), published in conference proceedings, Rome (ITA) 26 – 28 March 2008
- [SUN 2008] Sundermann, R., Herrmann, A.S.: *Automated Production of complex CFRP Components*, Vortrag auf der 13. ECCM 2008, veröffentlicht in Conference Proceedings, Stockholm (SWE), Mai 2008