

INDUSTRIALISIERTE FERTIGUNG VON CFK-VERSTEIFUNGSPROFILEN

Die heutige Fertigung von Faserverbundstrukturen, vor allem in der Luftfahrt, ist geprägt durch eine Vielzahl manueller und teilautomatisierter Fertigungsprozesse. Um der Forderung einer erhöhten Fertigungsrate unter Berücksichtigung einer hohen Variantenvielfalt ressourcenschonend und kosteneffizient gerecht zu werden, wurden im Projekt KOLIPRI neuartige automatisierte Fertigungstechnologien zur Spantherstellung entwickelt.

Ziel des Verbundvorhabens KOLIPRI „Kosteneffiziente Lösungen für eine industrialisierte Fertigung von CFK-Versteifungsprofilen“ war die Entwicklung kosteneffizienter Lösungen für eine industrialisierte Fertigung von Versteifungsprofilen aus CFK. Es wurde eine Reduktion der aktuell anfallenden Fertigungskosten für CFK-Spante und gleichzeitig eine Verringerung der Prozesszeiten gegenüber einem heutigen Stand der Technik erzielt. Die entwickelte Prozesskette ermöglicht eine automatisierte Herstellung von CFK-Spanten mit hoher Variantenvielfalt, die in modernen Passagierflugzeugen zum Einsatz kommen können. Des Weiteren ist ein Einsatz im Fahrzeugbau als beispielsweise Versteifungselement der Fahrgastzelle unter Berücksichtigung einer hohen Kosteneffizienz möglich. Durch umweltschonende, energieeffiziente Verfahren können damit zukünftig innovative Bauteile dazu beitragen, über den gesamten Produktlebenszyklus Energie einzusparen und damit den CO₂-Ausstoß zu verringern.

LÖSUNGSANSATZ

Für den Technologienachweis wurde das in der Luftfahrtindustrie verbreitete gekrümmte z-Profil Typical Frame als Referenzgeometrie gewählt, das einen Vergleich zu anderen Technologieentwicklungen ermöglicht und verschiedene Herausforderungen einer Herstellung von CFK-Bauteilen widerspiegelt (wie zum Beispiel lokale Lagenaufdickungen, variierende Querschnitte und Krümmungen). In heutigen CFK-Passagierflugzeugen wie dem Airbus A350 kommen mehr als 300 unterschiedliche Spante zum Einsatz. Viele der im Flugzeug verbauten Spante ähneln sich, was es ermöglicht, einen Großteil der Spante in Bauteilfamilien zusammenzufassen. Innerhalb dieser Familien gibt es nur geringe geometrische Unterschiede der einzelnen Spante.



Bild 1 Composite Preforming Cell (© Broetje-Automation)

TEXTILENTWICKLUNG

Aufgabe des Teilvorhabens Textilentwicklung unter Leitung von Saertex innerhalb des Vorhabens KOLIPRI war die Entwicklung und Realisierung textiler Halbzeuge, die einer automatisierten Prozesskette für komplexe CFK-Profile in Strukturanwendungen gerecht werden konnten. Dabei stand im Vordergrund, dass eine hohe Bauteilvariantenvielfalt nur durch komplex umformbare Kohlenstoffasergelege erreicht werden konnte, wenn sich diese in automatisierten Fertigungsprozessen verarbeiten lassen. Ziel war daher eine Entwicklung leichter, hoch-drapierfähiger Gelege bei Nutzung innovativer Faserorientierungen sowie ein prozessangepasster Binderauftrag auf die entsprechenden Gelegestrukturen, die den Anforderungen an automatisierte Preforming Produktionsprozesse gerecht werden. Die bisher in der Luftfahrt verwendeten Gelege liegen in ihrem Flächengewicht deutlich höher als für zukünftige CFK-Bauteile gefordert. Häufig eingesetzte Produkte sind zum Beispiel $\pm 45^\circ$ -Gelege mit einem Flächengewicht von etwa 540 g/mj. Diese bieten den Vorteil, dass sie ein geschlossenes Warenbild ergeben und mit vertretbarem Aufwand herzustellen sind. Bei Nutzung eines $\pm 30^\circ$ -Biaxialgeleges besteht die Möglichkeit im Stegbereich eines Spants auf zusätzliche 0° -Lagen zu verzichten, die bei einem gekrümmten Spant mit variierender Steghöhe nicht als durchgängige Lage abgelegt werden können. Für ein solches $\pm 30^\circ$ -Gelege und dem gewünschten geringen strukturellen Flächengewicht war eine Nutzung bestehender Artikel nicht möglich. Daher mussten innovative Ansätze zur Artikeloptimierung eingebracht werden. Es galt einen Artikel mit einem Faserwinkel von $\pm 30^\circ$ bei einem Flächengewicht von 380 g/mj bei geschlossener Oberfläche zu erzielen und dabei gleichzeitig eine hohe Drapierfähigkeit des Geleges zu erreichen. Für den automatisierten Preformprozess ist es zudem notwendig, dass die Gelege mit einem Preformbinder ausgerüstet werden. Innerhalb des Projekts hatte man sich als ambitioniertes Ziel gesetzt, die geringstmögliche Bindermenge herauszufinden, bei der der Preformingprozess noch ohne Probleme möglich erscheint. Nach umfangreichen experimentellen Drapieruntersuchungen [3] wurde ein Epoxidharzbinderanteil von 8 g/mj gewählt. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass bei ausreichender Preformstabilität die Drapierfähigkeit nur geringfügig beeinflusst wird.

PREFORMINGPROZESS

Aus wirtschaftlichen Gründen versuchen insbesondere die Luftfahrzeug- und

Automobilhersteller, Composite-Bauteile zukünftig in Nassverfahren herzustellen. Hierbei wird ein Bauteil zunächst im sogenannten Preformingprozess aus trockenen Faserverbundwerkstoffen aufgebaut, bevor es dann mit Harz infiltriert und schließlich zum gebrauchsfähigen Teil ausgehärtet wird. Ziel von Broetje-Automation war daher die Entwicklung einer automatisierten Preformingzelle, die sogenannte Composite Preforming Cell (CPC), Bild 1. Mit dieser weltweit einzigartigen Pilotanlage kann der gesamte Preformingprozess für ein komplexes Composite-Bauteil auf Serienfertigungsniveau gezeigt werden. Flugzeugkomponenten wie Spante und Stringer können damit in großer Stückzahl deutlich effizienter und über 30 % günstiger als mit bisherigen Verfahren hergestellt werden. Als eines der maßgebenden Ergebnisse dieser Entwicklungsaktivitäten stellte sich heraus, dass mit der CPC bei einer angenommenen Serienfertigung von knapp 100.000 Bauteilen pro Jahr, bis zu 80 % der Produktionskosten allein auf die Materialkosten zurückzuführen sind. Innerhalb der CPC sind zahlreiche von Broetje-Automation entwickelte und zum Patent angemeldete Anwendungsmöglichkeiten, Bild 2, in ein automatisiertes Gesamtsystem verwandelt worden.



Bild 2 Produktionsprozess innerhalb der Composite Preforming Cell (© Broetje-Automation)

Die textilen Fasermaterial-Halbzeuge, aus denen sich die Zielbauteile schichtweise zusammensetzen, durchlaufen üblicherweise einen mehrstufigen Preformingprozess. Die in der CPC integrierten Systeme sind flexibel und erlauben die Fertigung eines breiten Spektrums von unterschiedlichen Bauteilgeometrien. Die Herstellung des KOLIPRI-Referenzbauteils Typical Frame beginnt mit der Formung eines kontinuierlich hergestellten Vorprofils, das noch eine relativ geringe strukturelle Komplexität aufweist, und erstreckt sich über einen zweiten Umformprozess zur Erzeugung der komplexen Bauteilgeometrie sowie das exakte Besäumen des Preforms, um die endgeometrienaher Kontur des fertigen Profil-Preforms für den anschließenden Harzinfusions- und Aushärtvorgang zu erreichen. Im Rahmen von KOLIPRI wurde die Anlagentechnik

deutlich weiterentwickelt. Konnten bislang nur Profile mit konstantem Querschnitt hergestellt werden, so ist diese nun in der Lage, Profile mit sehr hoher Komplexität hervorzubringen. Mit dem aktuellen CCPS, Bild 3, können nun Profile mit variablem Querschnitt, lokalen Verstärkungslagen und variablem Krümmungsradius in einem Schuss produziert werden. Umfangreiche anlagentechnische Erweiterungen wurden integriert, um alle diese Bauteil-Features reproduzierbar [4] und prozesssicher realisieren zu können. Die weiteren Anlagentechnologien wie das Composite Handling System 3D, das Composite Draping System sowie zum Beispiel auch das Composite Trimming System ergänzen dabei das CCPS [5]. Mit der CPC können komplexe Composite-Preformstrukturen auf Serienfertigungsniveau hergestellt werden. Dabei eröffnet sie ein sehr hohes Potenzial, die bisherigen Herstellkosten in Zukunft signifikant zu reduzieren.



Bild 3 Preform – kontinuierlich gefertigt mit dem Continuous Composite Preforming System (© Broetje-Automation)

AUSHÄRTEWERKZEUGENTWICKLUNG

Zur Verarbeitung komplexer textiler Preforms basierend auf hochdrapierfähigen Multiaxialgelegen wurden automatisierte und schnelle Aushärte- und Konsolidierungsprozesse entwickelt. Die MBB

Fertigungstechnik war im KOLIPRI-Verbundprojekt für die Entwicklung eines kostensparenden Werkzeugkonzepts verantwortlich. Dabei sollten die Zykluszeiten und Produktionskosten komplexer CFK-Strukturbauteile mit einer hohen Variantenvielfalt erheblich gesenkt werden. Das Werkzeugkonzept ist in Anlehnung an die zuvor beschriebenen Bauteilfamilien ausgelegt. Ein zweiteiliges Presswerkzeug, Bild 4, nutzt dabei pro Bauteilfamilie ein Basiswerkzeug. Die eigentliche Bauteilform der Spante wird durch aufgesetzte Formeinsätze realisiert.

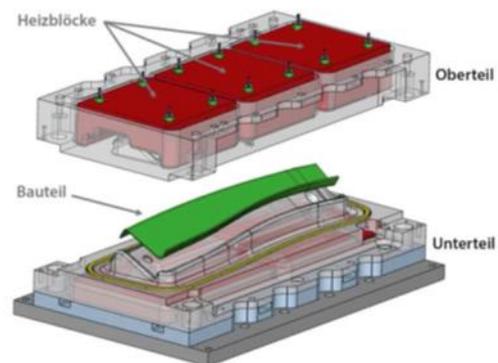


Bild 4 Zweiteiliges Presswerkzeug bestehend aus Basiswerkzeug mit aufgesetzten Formeinsätzen (transparent) (© MBB Fertigungstechnik)

Der Aushärteprozess kann durch verschiedene Verfahren wie Infusion, RTM, Spaltimpregnierung und Harzfilmpressen realisiert werden. Zum Serieneinsatz hat das Fraunhofer IFAM im Unterauftrag der MBB Fertigungstechnik eine mechanisch widerstandsfähige, plasmapolymere Trennschicht entwickelt, die eine übertragsfreie Entformung der CFK-Profile aus dem Aushärtewerkzeug ermöglicht. Diese hochwertige Dünnschicht im μm -Bereich eignet sich für vielfache Entformungen auch bei komplexen Oberflächen und reduziert den Reinigungsaufwand für das Werkzeug. Um die Gesamtwerkzeugkosten im Vergleich zu einer integralen Werkzeugbauweise zu reduzieren, sind Werkzeugkomponenten mit einem hohen Anteil an mechanischer Bearbeitung im Basiswerkzeug integriert. Dazu gehört im Wesentlichen das elektrische Temperierungssystem. Die Temperaturen an den einzelnen Heizblöcken sind durch mehrere Regelkreise einstellbar, wodurch eine homogene Temperaturverteilung innerhalb des Werkzeugs erreicht worden ist. Um lange Aufheizzeiten zu vermeiden wird am Basiswerkzeug ein isothermer Betrieb bevorzugt. Die Formeinsätze werden auf dem Basiswerkzeug zentriert und gespannt. Die Wärmeübertragung ist dabei durch permanenten Kontakt zwischen den Heizblöcken und den Formeinsätzen zu jeder Zeit gegeben. Um den Kontakt in allen Temperaturbereichen und der daraus

resultierenden Kontaktflächenverschiebung aufgrund der Wärmeausdehnung auszugleichen, sind die Heizblöcke federnd und schwimmend gelagert. Die einzelnen Formeinsätze hingegen beinhalten möglichst wenige Anbauteile, was die Rüstzeit und damit auch die Bauteilkosten weiter sinken lässt.

Um die Formstabilität, gerade bei längeren Bauteilen, sicherstellen zu können sind diese mit Versteifungsrippen verstärkt. Die Formeinsätze spiegeln die Bauteilgeometrie wieder, die endkonturnah ausgelegt ist. Eng tolerierte, nach unten gerichtete Tauchkanten in Verbindung mit einer Spaltimpregnierung führen zu einer homogenen Druckverteilung beim Schließen der beiden Werkzeughälften. Aufgrund der nach unten gerichteten Tauchkante ist die Entnahme des Bauteils sowie die Reinigung der Form erheblich vereinfacht worden. Ein integrierter Aushärtensensor gibt Informationen zum aktuellen Aushärteprozess.

Kostensenkungen sind möglich durch:

- ▶ ein Basiswerkzeug pro Bauteilfamilie
- ▶ Integration von Heiztechnik, Führung und weiteren Anbauteilen im Basiswerkzeug
- ▶ Senkung der Rüstzeit durch einfachen und schnellen Formeinsatzwechsel
- ▶ Reinigung und Bestückung außer halb der Presse möglich
- ▶ Vorwärmen, Abkühlen und Tempern ohne Basiswerkzeug möglich
- ▶ Einsatz einer plasmapolymerten Dauertrennschicht

GESAMTPROZESSKETTE

Die Gesamtprozesskette zur Herstellung von Typical Frames wurde am Faserinstitut Bremen (FIBRE) experimentell analysiert. Das Aushärtewerkzeug wurde mithilfe einer FE-Analyse numerisch untersucht und vorausgelegt. Die Charakterisierung des Aushärteverhaltens zertifizierter Luftfahrtharzsysteme offenbarte zudem ein deutliches Einsparungspotenzial. Hier konnte gezeigt werden, dass durch eine wissensbasierte Prozessauslegung, Fertigungszeiten um bis zu 50 % reduziert werden können. Als Luftfahrtreferenz wurden am FIBRE mit dem entwickelten Aushärtewerkzeugkonzept luftfahrttaugliche Spante mithilfe des Infusionsverfahren hergestellt, Bild 5. Das gewählte Fertigungskonzept bestehend aus prozessangepassten Materialien in Kombination mit einer automatisierten kontinuierlichen Preformherstellung sowie neuartigem Werkzeugkonzept weist bereits bei geringen

Stückzahlen eine hohe Kosteneffizienz auf. Am Beispiel des Airbus A350 ist ausgehend von einer zukünftigen Fertigungsrate von zehn und mehr Flugzeugen pro Monat, eine Kostensenkung von bis zu 42 % durch die entwickelte Prozesskette möglich, Bild 6.



Bild 5 Mithilfe des Infusionsverfahrens hergestellter Typical-Frame-Abschnitt (© Faserinstitut Bremen)

By identifying further process limitations in the processing of current semi-finished products for the aviation industry, additional savings potentials can be shown [6, 7]. However, these must first obtain the necessary material and technology approvals over the medium term.

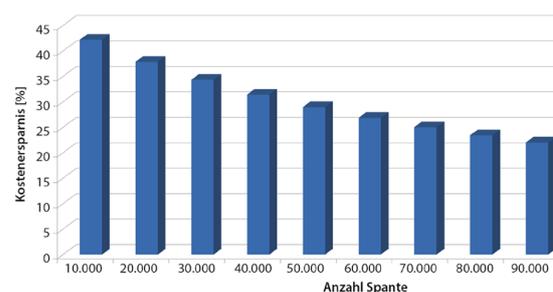


Bild 6 Geschätzte Kostenersparnis durch die entwickelte Prozesskette in Abhängigkeit von der Anzahl der gefertigten Spante (© Faserinstitut Bremen)

ZUSAMMENFASSUNG

Durch eine wissensbasierte Prozesskettenentwicklung konnte ein deutliches Einsparungspotenzial im Vergleich zu heutigen Prozessen erreicht werden. Die Entwicklung prozess- und strukturangepasster Halbzeuge hat sich als

entscheidender Grundstein der Prozessentwicklung gezeigt. Ein Einsatz hochdrapierfähiger $\pm 30^\circ$ -Gelege ermöglicht ein Verzicht auf 0° -Lagen und damit eine Einsparung von Lagenüberlappungen im Steg des gekrümmten Spants. Gleichzeitig können durch die Weiterentwicklung der 3-D-Preformingtechnologie kontinuierlich Preforms mit variierender Krümmung und lokalen Zusatzlagen sowie erstmals mit variierender Steghöhe gefertigt werden. Das entwickelte mehrteilige Werkzeugsystem zur Aushärtung und Konsolidierung ermöglicht die Nutzung der Basiswerkzeuge für unterschiedliche,

aber geometrisch ähnliche Spante einer Bauteilfamilie. Das Basiswerkzeug muss lediglich um einen Formeinsatz mit individueller Spantgeometrie ergänzt werden. Dadurch werden Investitionskosten für Werkzeuge insbesondere bei einer hohen Variantenvielfalt der CFK-Strukturen wie in der Luftfahrt üblich reduziert. Für das gewählte Fertigungsszenario eines Airbus A350 wird von einer Bauteilkostenreduktion von bis zu 42 % gegenüber heutigen Prozessen zur Spantherstellung ausgegangen.

Das Forschungsvorhaben KOLIPRI (Förderkennzeichen 20W1112) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms IV gefördert, wofür ausdrücklich gedankt wird.

LITERATURHINWEISE

- [1] Purol, H.: Entwicklung kontinuierlicher Preformverfahren zur Herstellung gekrümmter CFK-Versteifungsprofile. Dissertation. Universität Bremen, 2011
- [2] Meiners, D.: Beitrag zur Stabilität und Automatisierung von CFK-Produktionsprozessen. Dissertation. Technischen Universität Clausthal. Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften, 2007
- [3] Christ, M.; Herrmann, A.S.: Influence of Textile Design Parameters on Drapeability of Warp-Knit NCF, Kopenhagen, 2015
- [4] Focke, O.; Miene, A.; Koerdt, M.; Evers, J.F.; Herrmann, A.S.: Automated quality inspection in a continuous preforming process for Non Crimped Fabrics (NCF). 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII), Aachen, 2013
- [5] Reinhold, R.: Innovative Automatisierungslösung zur Composite-Serienfertigung, *lightweight design* 3/13, Springer Fachmedien, Wiesbaden
- [6] Larsen, G.: Cure Kinetics and cure modelling of epoxy/ amine resin systems. Universität Bremen/ University of Santa Catarina, Bremen, 2010
- [7] Sluzhivtsev, I.: Charakterisierung verschiedener Epoxidharzsysteme und Ableitung von Verarbeitungszyklen. Faserinstitut Bremen, 2013

Autoren:

DIPL.-ING. JAN FREDERIK EVERS is a researcher for the development of fiber composites, structures and processes at Faserinstitut Bremen e.V., Germany.

MARKUS BREUER, B.SC., is employed in the Construction of Molds & Composites division at MBB Fertigungstechnik GmbH in Beelen, Germany.

DIPL.-ING. RAPHAEL REINHOLD is the R&D and Product Manager for Composites at Broetje-Automation GmbH in Rastede, Germany.

DIPL.-ING. LARS ISCHTSCHUK, R&D SAERTEX GmbH & Co. KG, Germany.