

# LOKOST - PROGRESSIVE UND LOKAL VERSTÄRKTE FVK-BAUWEISEN ALS KOSTENGÜNSTIGE PRIMÄRSTRUKTUR IN DER KOMMERZIELLEN LUFTFAHRT

O. Bullinger, Airbus Operations GmbH, Airbusstrasse 2, 21684 Stade, Deutschland  
C. Weimer, Eurocopter Deutschland GmbH, 85521 Ottobrunn, Deutschland  
B. Ausperger, Premium Aerotec GmbH, 86179 Augsburg, Deutschland  
A. Herrmann, Airbus Operations GmbH, Airbusstrasse 2, 21684 Stade, Deutschland

*Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Kennzeichen 20W0605 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

## Zusammenfassung

Im LUFO-IV-Verbundprojekt LoKoST werden innovative Faserverbundkunststoff (FVK)-Technologien in einem ganzheitlichen Entwicklungs- und Arbeitsansatz weiter entwickelt, um signifikante Fertigungskosten- und Gewichtsreduzierungen bei Hochleistungs-FVK-Strukturen zu erzielen. Fortschrittliche Konzeptansätze mit neuen Materialien, Textiltechnik und Infusion kombiniert mit neuen Bauweisen und Fertigungstechnologien besitzen große Einsparpotentiale gegenüber den heutigen Vergleichstechnologien.

Zum Erreichen dieser Ziele werden erstmalig industrialisierbare Herstellungsverfahren für Strukturkomponenten, auch basierend auf Sandwichelementen, in der kommerziellen Luftfahrt erforscht und entwickelt. Dabei kommen neue Bauweisen und die Einführung von Gleichteilen zum Tragen. Wesentliche Beiträge zu den Zielen leisten neue, automatisierbare Fertigungsverfahren, neue Toleranz- und Montagekonzepte, die in vollem Umfang erst durch die grundlegend neue Bauweise technologisch im Gesamtkonzept integriert werden können.

Komplementär zu diesen Grundlagenuntersuchungen werden innerhalb eines Teilprojekts die notwendigen lokalen und globalen Untersuchungen für verschiedene Bauteile durchgeführt, um die Gesamtzusammenhänge verstehen zu können. Versuche an einer Validierungsstruktur innerhalb der Teilprojekte dienen der wissenschaftlichen Bestätigung der Ansätze aus anderen Projektteilen.

Die Verbundpartner im Netzwerk erwarten für die verschiedenen Anwendungsbereiche Gewichtsreduzierungen von bis zu 30% und Fertigungskostenreduzierungen von bis zu 25%. Im Verbundvorhaben sollen die wesentlichen Fragestellungen des Themenkomplexes „Industrialisierte Hochleistungs-FVK-Strukturen“ in komplementären Teilprojekten und anhand verschiedener Validierungskomponenten untersucht und verstanden werden.

## 1 VORSTELLUNG DES GESAMTPROJEKTES

LOKOST ist ein Fördervorhaben aus dem zweiten Aufruf der Luftfahrtförderung. Es behandelt die Entwicklung fertigungsrelevanter Themengebiete, beginnend mit produktionsrelevantem Grundlagenwissen bis hin zur exemplarischen Fertigung von Demonstrationsstrukturen wie Rotorblatt oder Seitenleitwerksskanten. Im damaligen zweiten Aufruf des BMWI waren fünf förderpolitische Ziele angeführt, die hier kurz, bezogen auf LOKOST, erläutert werden sollen [1]:

- **Steigerung der Transportleistung**

Der Einsatz faserverstärkter Werkstoffe und Schäume führt zu einer Gewichtsreduktion des Luftfahrzeugs im Vergleich zur Metallbauweise. Diese Einsparung kann

direkt als zusätzliche Nutzlast oder in Form von gesteigerter Reichweite genutzt werden.

- **Umweltverträglicher Luftverkehr**

Da Schäume und faserverstärkte Komposite im Vergleich zu Metallen wesentlich leichter sind, kann dieses Gewichtsvorteil den Treibstoffbedarf senken. Daneben bieten die verwendeten Materialien die Möglichkeit, lärmabsorbierende Funktionen in das Bauteil zu integrieren, so dass durch die reduzierte Lärmemission ein zusätzlicher Beitrag zu einem umweltverträglicheren Luftverkehr geleistet werden kann. Die Verwendung von verstärktem Schaum erlaubt eine ökonomische Herstellung der Sandwichstrukturen und somit eine Ressourcenschonung. Gleiches gilt für die Weiterentwicklung der autoklavlosen Fertigungstechnologien und der anpassbaren Fertigungshilfsmittel. Das Entwickeln entsprechender

Faserablegetechniken reduziert zusätzlich Verschnittmengen und Faserondulationen, so dass weniger Material zur Herstellung benötigt wird.

- **Sicherheit und Passagierfreundlichkeit**

Eine Steigerung der Sicherheit kann durch die Verwendung schadenstoleranter Materialien, wie z. B. Schaum, erreicht werden. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung von Strukturschäumen in Profilen eine Absenkung der Lärmbelastung während des Fluges.

- **Effiziente Luftfahrzeuge**

Zusätzlich zur Gewichtsreduktion durch Verwendung leichterer Materialien, können im Bereich der Fertigung manuelle Arbeiten, wie z.B. der Prepreg-Zuschnitt, durch die Entwicklung geeigneter Ablege und Fertigungstechnologien ersetzt werden. Die Fertigung des Luftfahrzeuges lässt sich damit deutlich effizienter gestalten.

- **Wartung und Instandsetzung**

Die bekannten Vorteile von Faserverbundwerkstoffen, wie geringe Materialermüdung, keine Korrosion usw., begründen den weiteren Einsatz dieser Materialien im Vergleich zu konventionellen Metallen. Insbesondere thermoplastische Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich durch eine sehr gute Schadenstoleranz aus, die in der höheren Duktilität der Matrix begründet ist. Zusätzlich sind bezüglich der Wartung und Instandhaltung mit thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen noch weitere Vorteile denkbar, da die Matrix durch Wärmeeinbringung nahezu beliebig oft wieder aufschmelzbar ist, so dass prinzipiell neue Lagenpakete aufbringbar sind oder bestehende Lagenpakete nochmals nachverdichtet werden können. Mit Wabe verstärkte Sandwichstrukturen, wie sie zur Zeit eingesetzt werden, können durch Wasserkondensation und Auffrieren beschädigt werden. Dieser Effekt tritt bei Strukturschäumen nicht auf. Gleiches gilt für die verstärkten Schäume. Die Wartungspläne für Sandwich (Bauteile mit Wabenstruktur) könnten somit überprüft und reduziert werden.

Daraus abgeleitet sind die Ziele des Verbundes (die Angaben beziehen sich auf den Stand der Beantragung im Jahr 2006). Hier sollen durch ganzheitliche Konzeptarbeit FVK-gerechte, industrialisierungsfähige Bauweisen und Technologien im Hinblick auf die jeweilige Validierungskomponente der Anwender erarbeitet werden. Dabei wird eine signifikante Fertigungskostenreduzierung (bis zu 30% gegenüber den heutigen Vergleichstechnologien) bei gleichzeitiger Reduzierung des Gewichtes (bis zu 10% gegenüber den heutigen Vergleichstechnologien) angestrebt.

Die acht Teilprojekte sind so angelegt, dass durch die Durchführung des Vorhabens sich ergänzende Technologie und Industrialisierungskonzepte für Hochleistungsfaserverbundstrukturen erarbeitet werden. Es sollen belastbare Grundlagen erarbeitet werden, die kombiniert auch auf andere Komponenten und Industriezweige der FVK-Branche übertragbar sind. Dabei ist ein wesentliches globales Teilziel, projektübergreifende, technologische Kernfragen im Bereich der Basistechnologien zu bearbeiten und

Lösungskonzepte zu erschließen. Ein weiteres globales Teilziel ist das Umsetzen der Zwischenergebnisse in Validierungsstrukturen, um anschließend die dabei entstehenden Erfahrungen und Erkenntnisse wieder auf die Basistechnologien zu übertragen und diese dann zu optimieren.

In den folgenden Kapiteln werden die insgesamt acht Teilprojekte vorgestellt und kurz der Stand der Entwicklung geschildert. Detailliertere Informationen sind den sich anschließenden Veröffentlichungen zu entnehmen.

## 2 TEILPROJEKT A: „SLW-KASTEN“

Um den Marktforderungen nach ständiger Kosten- und Gewichtssenkung bei Hochleistungs-FVK-Strukturen gerecht zu werden, ist eine stetige Weiterentwicklung und Industrialisierung der heutigen FVK-Technologien und -Bauweisen zwingend notwendig.

Großstrukturen, wie z.B. Seitenleitwerke von kommerziellen Flugzeugen, stellen dabei besondere Anforderungen an die Entwickler. Im Verbundvorhaben LOKOST wird ein entscheidender Technologiesprung für solche Strukturen angestrebt. Es wird ein Gesamtkonzept für das Seitenleitwerk von morgen entwickelt, das die Forderungen nach kostengünstiger Fertigung und effizientem Betrieb erfüllt und gleichzeitig eine Gewichtsreduzierung der Gesamtstruktur ermöglicht. Um globale Einsparungen bei solchen Strukturen zu erzielen, müssen die strukturspezifischen Besonderheiten in den Bereichen der Entwicklung und Fertigung den Anforderungen im Service-Leben eines Flugzeuges gegenübergestellt werden. Dabei kommt es häufig zu Zielkonflikten. So kann z. B. ein neuartiges Strukturkonzept in Kombination mit neuen Technologien eine kostengünstigere und schnellere Montage ermöglichen, aber im gleichen Zuge das Gewicht der Gesamtstruktur und den Wartungsaufwand im Service-Leben erhöhen.

Ziel dieses Teilprojektes ist das Erarbeiten eines ganzheitlichen Fertigungskonzeptes (inklusive Qualitätssicherung und zerstörungsfreier Prüfkonzepte) für einen Seitenleitwerkskasten. Zur Prüfung des erlangten Wissens, wird eine Validierungsstruktur ausgelegt, konstruiert und getestet.

Um dieses Ziel zu erlangen, wird eine Bauweise mit neuem schaubasierten Verstärkungskonzept, abweichend von der bekannten monolithischen Bauweise, verfolgt. Das für einen konstruktiv sinnvollen Einsatz des verstärkten Schaumsandwich benötigte Grundlagenwissen liefert das thematisch eng verbundene, später erläuterte Teilprojekt „Sandwich generisch“.

Das globale Design des SLW-Kastens in neuer Bauweise ist erfolgreich durchgeführt. Die benötigte Prozesskette zur industriellen Herstellung wurde anhand mehrerer Fertigungsversuche überprüft. BILD 1 zeigt die Infusion einer Sandwichschale mit A320-Dimensionen.



BILD 1. LRI-Versuch an einer sandwichverstärkten CFK-Schale im A320-Masstab - Der dunkle Bereich links und rechts des Zentralangusses zeigt den Verlauf der Fließfront

Zur Herstellung des Preforms dieser Schale wurde ein spezieller, vakuumbasierter Greifmechanismus entwickelt. Er ist in der Lage, sowohl die geometrisch komplex zugeschnittenen CFK-Lagen als auch den Schaumkern in einem Werkzeug positionsgenau abzulegen. BILD 2 zeigt das spezielle Greifsystem.



BILD 2. Oben: Greifsystem zum Ablegen der komplex konturierten Zuschnitte - Unten: Ablage des Schaumkerns auf bereits positionsgenau drapierten Faserlagen

Um die Stabilität und das Schadensverhalten der gesamten Konstruktion für einen späteren Einsatz als Seitenleitwerk beurteilen zu können, werden zerstörende Versuche durchgeführt (Schnittmenge mit TP "Sandwich generisch"). Die Ergebnisse in Form von Kennwerten werden in teilweise neu entwickelte Modelle zur

Stabilitäts- und Schadensberechnung eingehen. Der Vergleich von Berechnung und Experiment hat Auswirkungen auf das Strukturkonzept und somit auf den geplanten Ablauf der Fertigung. Diese Rückkopplung ist essentiell für ein tragfähiges, wirtschaftliches Fertigungskonzept.

Die Planung der Gesamt-Prozesskette in einem datenbankbasierten Entwicklungswerkzeug zur digitalen Fabrikplanung ermöglicht, neben der Prozessoptimierung, ebenfalls eine Schätzung darüber, inwieweit die Produktionskosten sich an das geplante Ziel von ca. 30% Kosteneinsparung annähern.

### 3 TEILPROJEKT B: „HECKSEKTION“

Innerhalb der Luftfahrt nimmt der Konkurrenzdruck ständig zu, speziell im Bereich der Transport- bzw. Verkehrsflugzeuge. Fertigungsunternehmen für die Luftfahrt, sind daher ständig zu weiteren Verbesserungen ihrer Produkte gezwungen.

Im Bereich der Strukturen haben Herstellkosten und Gewicht den größten Einfluss auf den Markterfolg. Höchstleistende Faserverbundstrukturen bieten dabei zukünftig das Potential, beide Faktoren positiv zu beeinflussen. Derzeit bedingt allerdings eine Verbesserung des Strukturgewichts meist noch einen Zuwachs der Herstellungskosten.

Mit dem Einzug der Faserverbundstrukturen in die Rumpfsektionen ergeben sich zukünftig neue Dimensionen und Volumina in der Bauteilfertigung. Diese sind in der manuellen Fertigung weder zu stemmen noch wirtschaftlich tragbar.

Dabei ist die Hecksektion eine der komplexesten und hochbelastetsten Strukturkomponenten der heutigen Verkehrsflugzeuge. Lokale Krafteinleitungen (z.B. durch die Leitwerke) sowie un stetige Konturen erschweren eine effektive und kostengünstige Bauweise. Speziell hier könnten dadurch Faserverbundwerkstoffe einen entscheidenden Beitrag leisten.

Im Projekt LOKOST werden die Grundlagen geschaffen, um solche Strukturen zukünftig gewinnbringend fertigen zu können. Dies bedingt die Entwicklung eines fertigungsgerechten Strukturkonzeptes. Darauf aufbauend bzw. schon parallel dazu, müssen Fertigungsverfahren entwickelt und optimiert werden, um die komplexen Anforderungen dieser Komponenten auch effizient abbilden zu können.

Hierzu werden die Vorteile des MVI-Verfahrens (Modifizierte-Vakuum-Infusion) primär in Betracht gezogen, um die angestrebten Einsparungen der Produktionskosten und Gewichtspotentiale zu erreichen. Mit dem in Augsburg patentierten VAP-Verfahren (Vacuum-Assisted-Process) bietet sich dafür die optimale Gelegenheit. Beispielsweise wird die gute Drapierbarkeit der trockenen CFK-Gelege und CFK-Gewebe genutzt, um die automatisierte Fertigung mit Gelegetüchern (optimal bis zu 50" Breite, direkt von der angelieferten Rolle) in



doppelt gekrümmte Schalen bzw. Rumpfsegmente abzulegen. Die exzellente Prozesssicherheit durch das patentierte VAP-Verfahren ermöglicht es zudem, Stringerversteifungen integral zu fertigen, und damit den Montageaufwand und das Bauteilgewicht deutlich zu reduzieren. Neuartige Infiltrationskonzepte und hybride Druckstückkonzepte sollen zudem die Produktionskosten senken und die Prozesssicherheit steigern.

Als Ergebnis des Projektes "Hecksektion" steht eine generische Validierungsstruktur für Konzept und Fertigbarkeit von komplexen, mehrfach gekrümmten Schalen bzw. Rumpfsektionen.



BILD 3. CATIA-Modell der LOKOST-Hecksektion

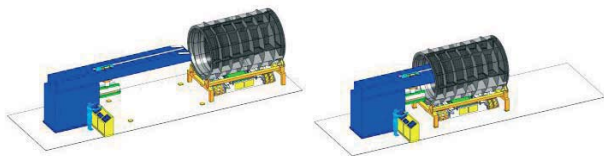


BILD 4. CATIA-Modell der Legestation für die LOKOST-Hecksektion

In BILD 3 wird das CATIA Modell des LOKOST Teilprojektes B "Hecksektion" gezeigt. Es handelt sich dabei um eine generische Hecksektion mit doppelt gekrümmter Außenhaut, integrierten Stringern und montierten Spanten.

BILD 4 zeigt die Legestation mit Diveboard, Lege-Endeffektor und Fertigungsmittel für die Herstellung der Hecksektion. Anhand von einzelnen Versuchen und strukturellen Tests soll daran die technische und technologische Realisierbarkeit nachgewiesen werden.

#### 4 TEILPROJEKT C: „NEROBA“

Innerhalb des Teilprojektes „NEROBA“ wird eine vollständig neue Bauweise für FVK-Rotorblätter – basierend auf neuartigen, kostengünstigen Fertigungstechnologien – erarbeitet und grundlegend validiert. Ziel ist die Erreichung einer Einschussbauweise auf Basis der Injektionstechnologie bei einer gleichzeitigen, durch Teilautomatisierung und optimale Prozess- und Materialauswahl erreichten Absenkung der Herstellungskosten um ca. 25 %.

Hubschrauberrotoren sind dynamisch hoch beanspruchte Faserverbundbauteile. Die Qualität und die Fertigungskosten von Rotorblättern lassen sich jedoch mit der heute gängigen Prepreg-Technologie kaum mehr optimieren. Durch den Einsatz und die Nutzung neuer, moderner Fertigungsverfahren (z. B. Harzinjektionstechnologie, Preform-Technologie) können in diesem Bereich weitere Fortschritte erzielt werden. Im Teilprojekt „NEROBA“ wird die Bauweise von FVK-Rotorblättern grundlegend verändert und gezielt für die speziellen Anforderungen der Harzinjektionstechnologie ausgelegt.

Gemäß dem Ziel ist es erforderlich, Fertigungskosten und Qualität dieser komplexen Bauteile durch einen vereinfachten und automatisierten Fertigungsprozess zu verbessern. Darüber hinaus werden innovative Werkzeugkonzepte untersucht und entwickelt, die flexibel an die Form und Größe von Rotorblättern angepasst werden können. Die mechanischen Eigenschaften der im Harzinjektionsverfahren gefertigten Baustudien werden anhand von Komponententests untersucht und mit herkömmlichen Prepreg-Rotorblättern verglichen.

Im Teilprojekt „NEROBA“ muss für die Umsetzung der neuartigen Bauweisen erheblich auf Teilprojektergebnisse aus den verbundenen Teilprojekten „HPL-Tech“ und „Sandwich generisch“ zurückgegriffen werden. Ebenso werden Erkenntnisse aus den Teilprojekten „PROBEC“ und „Smart Tooling“ eingesetzt.

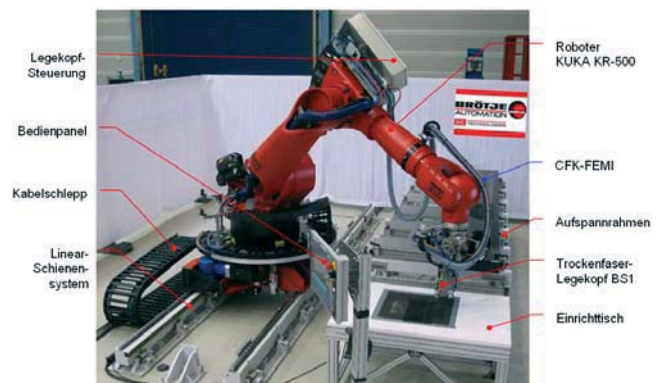


BILD 5. Anlagentechnologie zur automatischen Fertigung von Rotorblatt-Preforms



BILD 6. Realisierte Preform-Baustudie

BILD 5 und BILD 6 zeigen exemplarisch die umgesetzte Preform-Prozesstechnologie, bei der auch Robotertechnologie zum Einsatz gebracht wird. Kombinierte Textil- und Ablegetechnologien werden entwickelt und validiert. BILD 5 zeigt dabei die NEROBA-EXA (NEROBA-Experimentalanlage), die im Projekt seitens Brötje Automation umgesetzt wurde. Das Anlagenkonzept basiert auf Eurocopter-Spezifikationen und diversen Unteraufträgen bei der IVW GmbH.

## 5 TEILPROJEKT D: „3D-PROFILE“

Obwohl mit der Pultrusion ein kontinuierliches Verfahren für gerade Profile mit konstanten Querschnitten zur Verfügung steht, fehlt ein ähnlich wirtschaftliches Verfahren für stark gekrümmte oder im Querschnitt veränderliche Profile. Bei großen zukünftig mit CFK zu fertigenden Strukturen sind sowohl im Flugzeug- als auch im Helikopterbau Profile wie gekrümmte Spante oder Längs- und Querträger in einer hohen Stückzahl nötig. Große faserverstärkte Strukturen wie Seitenleitwerksschalen und Rumpfschalen werden in Längsrichtung durch Stringer versteift. Diese Stringer weisen zum großen Teil veränderliche Krümmungen auf und müssen über Abstufungen hinweglaufen ohne Ablösungen hervorzurufen. Derzeit werden diese Stringer in manuellen und teilautomatisierten Arbeitsschritten außerhalb des eigentlichen Fertigungsprozesses den Hautaufdickungen angepasst. Stringer in Rumpfbauanteilen sind in einer erheblichen Stückzahl zu produzieren, bisher aber noch aus Aluminium gefertigt.

In Querrichtung werden Helikopterzellen oder Flugzeugrümpfe durch Spante versteift, die in künftigen CFK-Bauweisen in einer Menge von mehreren 100 Kilometern pro Jahr erforderlich werden. Während für Aluminiumspante automatisierte Fertigungsverfahren, wie Strangpressen, Gesenkbiegen oder auch Fräsen zur Verfügung stehen, gibt es für derartige Bauteile aus Faserverbundmaterialien diese Verfahren noch nicht.

Da sich mit der Realisierung faserverstärkter, dreidimensional gekrümmter Profile in einem kontinuierlichen Prozess durch den Wegfall der Quasi-Einzelteilfertigung (verursacht durch die große geometrische Verschiedenheit und die daraus resultierenden hohen Werkzeugkosten) enorme wirtschaftliche Einsparmöglichkeiten bieten, wurde dies zum Ziel dieses Teilprojektes. Anvisiert wurden CFK-Profile mit Krümmungsradien zwischen 2 m (Spante) und 10 m (Stringer). Als wirtschaftliche Ziele sollen die Fertigungskosten um ca. 30% und die Durchlaufzeiten um ca. 50% gegenüber der RTM-Technologie (Stand 08/2006) gesenkt werden. Dies soll das Industrialisierungskonzept, widerspiegeln.

Zur Zielerreichung werden drei unterschiedliche Wege verfolgt:

- Kontinuierliche Quer- und Längsumformung von textilen Halbzeugen und Transfer in Aushärtewerkzeuge
- Kontinuierliches Flecht-Wickel-Preformen von Rovings und Transfer in Aushärtewerkzeuge
- Semi-kontinuierliche und automatisierte Herstellung unter Einsatz von Nähtechnologien

Nach einem Benchmark der Technologien werden Synergien entwickelt und eventuell Kombinationen der Verfahren abgeleitet.

BILD 7 zeigt schematisch den Weg des entwickelten Halbzeuges über die verschiedenen Umformstationen für den Fall der kontinuierlichen Quer- und Längsumformung.

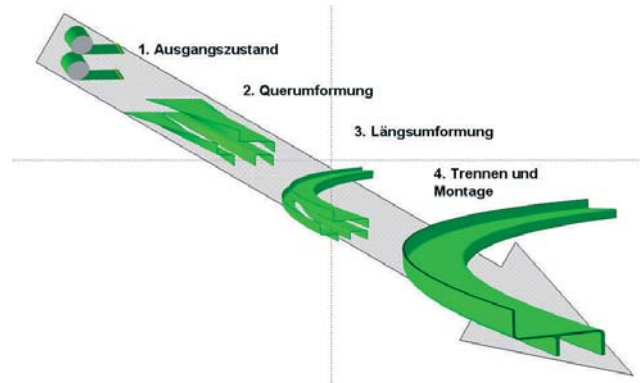


BILD 7. Kontinuierliche Quer- und Längsumformung von textilen Halbzeugen

Zu diesem Zweck wurde ein speziell bebindertes, mit Faser in mehreren Orientierungen versehenes, Halbzeug entwickelt, welches vor den Umformschritten zusammengeführt und fixiert wird. Der realisierte modular aufgebaute Versuchsstand ist in der Lage, mit einer Geschwindigkeit von annähernd 2m/min mit einem einstellbaren Radius von 1,75 – 2m gekrümmte Profil-Preformstücke zu liefern.

Beim kontinuierlichen Flechten und Wickeln der Vorformlinge werden einzelne Rovings in der gewünschten Orientierung verarbeitet. BILD 8 zeigt das Vorgehen zur Herstellung eines F- oder LCF-Spantes.

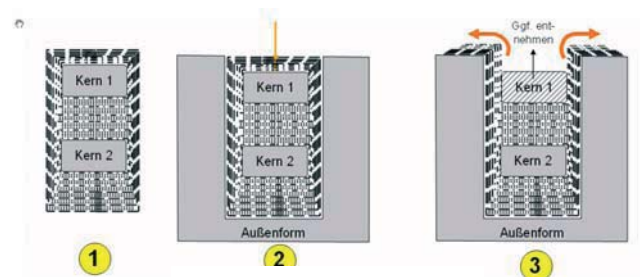


BILD 8. Herstellung zweier Spante im Flecht-Wickel-Verfahren - Vorteilhaft ist die gleichzeitige Herstellung zweier geometrisch identischer Spante

Zuerst werden zwei Kerne getrennt voneinander umwickelt/flochten, dann zusammengeführt und gemeinsam bewickelt (BILD 8, links). Im Anschluss wird das Paket in eine Außenform gelegt (BILD 8, mitte) und der spätere Untergurt des LCF-Spantes aufgetrennt (BILD 8, rechts). Nach dem Verschließen des Werkzeugs von

oben startet der LRI-Prozess. Die verbliebenen Kerne werden nach der Entformung durchtrennt und zwei geometrisch identische Spante liegen vor.

Im Falle der semi-kontinuierlichen Herstellung unter Einsatz von Nähetechnologien werden die benötigten komplexen Halbzeuge zur Fertigung von Helikopterspanten durch aufeinander Drapieren und Vernähen konventionell erhältlicher Ware hergestellt. Danach erfolgt der Zuschnitt auf Endgeometrie des einzelnen Sub-Preforms. Diese Pakete werden dann mit Hilfe eines Pick-and-Drape-Prozesses teilautomatisiert zum finalen Preform zusammengefügt. Der Projektschwerpunkt liegt hier mehr im Bereich der Handhabungsmechanismen zum Platzieren voluminöser und schwerer Lagenpakete. BILD 9 zeigt den geplanten Prozessablauf von der Halbzeugeinbringung über das Positionieren der einzelnen Lagen zum letztendlich genutzten Ausgangsmaterial, dem Zuschneiden, Drapieren und Montieren. Der Fokus der Aktivitäten liegt auf der Entwicklung eines Pick & Drape-Funktionskopfes mit integrierter Binderaktivierung. Details hierzu werden in späteren Veröffentlichungen gezeigt.



BILD 9. Prozesskette zur Fertigung von Helikopterspanten

## 6 TEILPROJEKT E: „HPL-TECH“

Die etablierten Technologien zur automatisierten Ablage von CFK-Tapes sind entweder sehr unflexibel (Tapeleger) oder erreichen nur eine geringe Legeleistung. Dabei ist deren Anwendung in der Luftfahrtindustrie heute noch auf den Einsatz von Prepregs beschränkt. Im Projekt werden Ablegetechnologien entwickelt, die sich bei hoher Legeleistung für die Verarbeitung neuer Halbzeuge wie Trockenfasern und thermoplastischer Tapes eignen und somit auch neuen Bauweisen und den Anforderungen an zukünftige Luftfahrt-Bauteile gerecht werden. Durch Automatisierung des Legeprozesses soll eine Reduktion der Fertigungszeiten um mindestens 25% erreicht werden. Die Funktion der entwickelten Legetechnologien wird anhand von Validierungsstrukturen nachgewiesen.

Zur Verarbeitung thermoplastischen Materials wurde ein Legekopf entwickelt, der mehrere dünne Bänder mit HT- und HM-Faser auf doppelt gekrümmten Oberflächen abzulegen vermag. Der Fokus möglicher Anwendungen

liegt dabei auf doppelt gekrümmten Bauteilen, wie beispielsweise Rumpfstrukturen, Nasenschilde oder Fahrwerksschilde. Das von den Projektpartnern parallel entwickelte Material wird über ein System aus Rollen und Führungswerkzeugen der Bauteiloberfläche zugeführt. Dabei wird die thermoplastische Matrix mit Hilfe eines Lasers aufgeschmolzen. BILD 10 zeigt den entwickelten Testkopf. Die verbleibende Projektzeit wird zur weiteren Evaluierung des entwickelten Gerätes genutzt.



BILD 10. Thermoplastlegekopf der Firma Brötje Automation

Der zweite Schwerpunkt dieses Teilprojektes lag in der Entwicklung eines automatisierten Ablegewerkzeuges für trockene Faserhalbzeuge aus Glas- oder Kohlenstofffaser. Mit seiner Hilfe sollen komplexe Preforms für eine spätere Infusion aufgebaut werden. Auch hier erfolgte parallel eine Materialentwicklung, um das Material an die Prozessparameter des Legekopfes anzupassen. BILD 11 zeigt den entsprechenden Technologieträger.

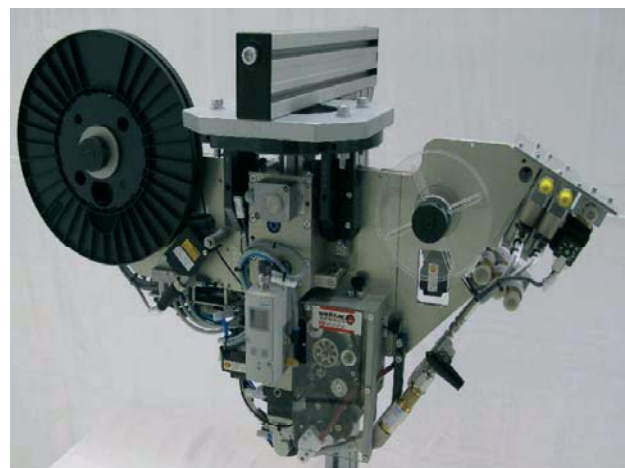


BILD 11. Trockenfaserlegekopf der Firma Brötje Automation



## 7 TEILPROJEKT F: „SANDWICH GENERISCH“

Flächige, gekrümmte FVK-Primärstrukturen werden in der kommerziellen Luftfahrt üblicherweise als profilverstiefte Häute in monolithischer Prepreg- Bauweise ausgeführt. Diese Bauweise weist einen eher differentiellen Charakter auf. Sandwichbauweisen hingegen sind wesentlich integraler und können bei entsprechender Auslegung auf differentielle Versteifungselemente (z.B. Stringer) verzichten. Somit werden Arbeitsschritte wie die Montage der Versteifungen gespart. Kombiniert man diese Sandwichbauweisen mit der Infusionstechnologie und führt optimierte, integrierte Kernsysteme ein, ergibt sich ein großes Potential, Herstellungskosten zu sparen, die Fertigungslogistik zu optimieren und Komplexität zu reduzieren.

Aufgrund der aktuellen Zulassungsphilosophien und Zulassungsanforderungen ist der Einsatz von Sandwichbauweisen bei Primärstrukturen der kommerziellen Luftfahrt derzeit schwierig. Eine Kombination und Weiterentwicklung verschiedener Technologieansätze, wie neue Textiltechnik, lokal verstärkte, hochintegrierte Kernsysteme und Infusionstechnologie ermöglicht die Einführung neuer Bauweisen und bedeutet einen Technologiesprung für die kommerzielle Luftfahrt. Die technologischen Grundlagen dieses Themenkomplexes werden in diesem Teilprojekt erarbeitet.

Die Arbeit konzentriert sich dabei auf generische Konstruktionselemente und Strukturdetails. Die Ergebnisse fließen in die Teilprojekte „Hecksektion“, „NEROBA“ und „SLW-Kasten“ ein und werden dort in den globalen Zusammenhang einer Gesamtstruktur aufgenommen. Das Ziel von „Sandwich generisch“ ist das Erarbeiten und Validieren von generischem Basiswissen und neuen Lösungsansätzen für innovative Sandwichstrukturen unter Berücksichtigung der angestrebten Kosten- und Gewichtsreduzierungen auf Gesamtstrukturebene. Dabei werden folgende Aspekte detaillierter betrachtet:

- Auslegungs- und Berechnungsprinzipien
- Fertigungskonzept und Prozessbeherrschung
- Lasteinleitungs- und Verstärkungskonzepte
- Bestimmung von Kennwerten neuer Materialsysteme
- Schädigungsverhalten und Schadenstoleranz
- Zerstörungsfreie Prüfung
- Reparaturmethoden (während der Fertigung und im Betrieb)

Ausgehend von einer Klassifizierung möglicher Schadensarten bei Sandwichstrukturen, wurden drei relevante Bauteilbereiche identifiziert, die exemplarisch für eine Sandwichschalenstruktur stehen:

- der Bereich der Querversteifung, da hier während des Impacts die Biegedeformation stark behindert wird
- freie Felder, d.h. Längsversteifung und Haut

- der Übergangsbereich bzw. Lasteinleitungsbereiche für den Anschluss (Sandwich zu CFK-Monolith) an den Rumpf/Rotorkonus

Zur besseren Strukturierung der Versuche und der geplanten Testartikel wurde eine Testpyramide (s. BILD 12) erarbeitet, welche die Trennung zwischen „Sandwich generisch“ und den Teilprojekten mit Validierungsstruktur (SLW-Kasten, Hecksektion, NEROBA) festlegt.

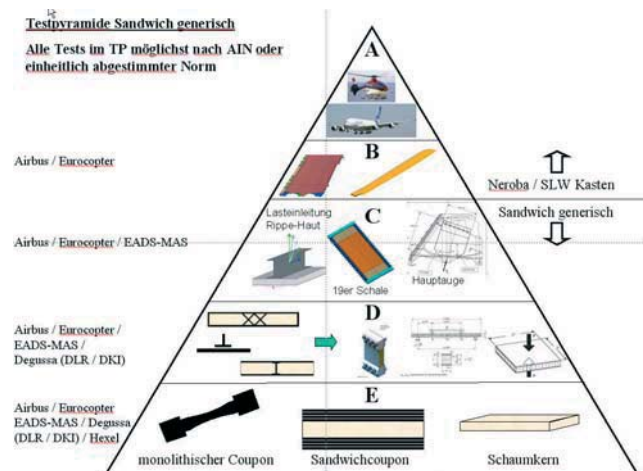


BILD 12. Testpyramide für die geplanten Versuche im TP „Sandwich generisch“ - Die Trennung zwischen den grundlagenorientierten Untersuchungen und den Validierungskomponenten wird ab Subkomponentenebene durchgeführt

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit zwischen den Tests, wird eine Standardprobe definiert. Sie ist mit variierenden Verstärkungs- und Armierungsarten versehen. Ziel dieser Versuche ist zum einen das Verständnis der Wirkweise der Verstärkungsarten, sowie deren Vergleichbarkeit untereinander. Zum anderen ist der Gewichtsaspekt durch die Verstärkung des Schaumkerns von Interesse.

Das Probenfeld wird zweistufig aufgebaut. Alle Proben haben die gleiche Sandwichgeometrie. Weitere Parameter, wie beispielsweise Schaumdichte zur Gewichtsoptimierung, wurden variiert.

Die mittels LRI-Verfahren hergestellten Testplatten werden zerstörungsfrei geprüft und auf die endgültige Probengröße zugeschnitten. Um die zuvor genannten Themenfelder abzudecken, wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Compression after Impact
- Double Cantilever Beam (DCB)
- End Notched Flexure (ENF)
- 4-Punkt Biegeversuch (dynamisch)

Exemplarisch sei hier das Resultat zweier ENF-Versuche gezeigt (BILD 13). Durch das T-förmige Verstärkungsprofil nimmt die Biegekraft im Vergleich zum unverstärkten Material zu.

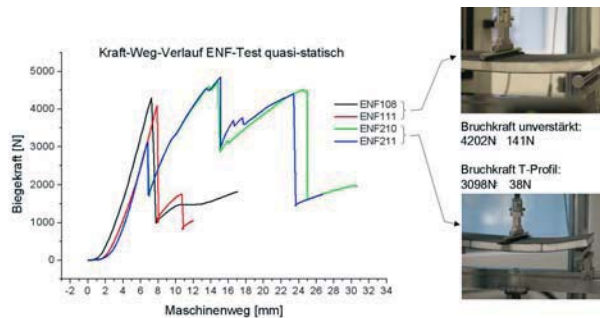


BILD 13. ENF-Tests unter Wechsellast auf Grundlage der zuvor bestimmten quasi-statischen Bruchlast

## 8 TEILPROJEKT G: „PROBEC“

Ziel des Teilprojekts PROBEC ist es, drei heute bereits etablierte Fertigungsprozesse für die Herstellung von CFK-Bauteilen weiterzuentwickeln. Dabei sollen die Aushärtung im Autoklavprozess, die Fließfrontsteuerung des von der EADS patentierten Injektionsverfahrens VAP (Vacuum Assisted Process) sowie die Qualitätssicherung bei der Handhabung von Preforms näher untersucht werden. Dazu sollen die Prozessgrößen, die für die Stabilität und Steuerbarkeit der Prozesse sowie für die Qualität der Bauteile entscheidend sind, untersucht und ihre Wirkung analysiert und beschrieben werden. Die Kenntnis dieser Wirkungszusammenhänge liefert die Möglichkeit, mit Hilfe von Regelkreisen die Bauteilqualität weiter zu verbessern.

Für eine bessere Beherrschung des Autoklavprozesses ist die Vorherbestimmung der thermodynamischen Vorgänge im Bauteil essentiell. Dies soll durch die Entwicklung eines schnellen, zuverlässigen Simulationswerkzeuges, mit dem eventuell Optimierungen der Bauteilposition im Autoklav durchgeführt werden können, vorangetrieben werden. Da die Bauteilqualität entscheidend vom lokalen Temperaturverlauf und Reaktionsfortschritt im Bauteil bestimmt wird, ist die Einhaltung des vorgegebenen Temperaturverlaufes und der Gradienten von Temperatur und Reaktionsfortschritt qualitätsentscheidend. Abweichungen können zur lokalen Abnahme der mechanischen Kennwerte, z.B. durch Überhitzung, oder zu Eigenspannungen führen. Der Zusammenhang zwischen der Temperaturführung des Autoklavs und der Positionierung der Bauteile im Behälter auf den lokalen Temperaturverlauf im Bauteil stützt sich heute i.d.R. auf Erfahrungen und wird jeweils durch aufwendige Versuche nachgewiesen. Im Teilprojekt wurde daher stattdessen zunächst ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem die wärmetechnischen Vorgänge im Autoklav und innerhalb der aushärtenden Bauteile vorherbestimmt werden sollen. Darauf aufbauend werden Untersuchungen zu einer besseren Bauteilpositionierung durchgeführt, um die Aushärtung effizienter zu gestalten. Beispielhaft zeigt

BILD 14 die Vernetzungsgradverteilung an der Unterseite der CFK-Haut für zwei berechnete Varianten einer Autoklavbeladung.

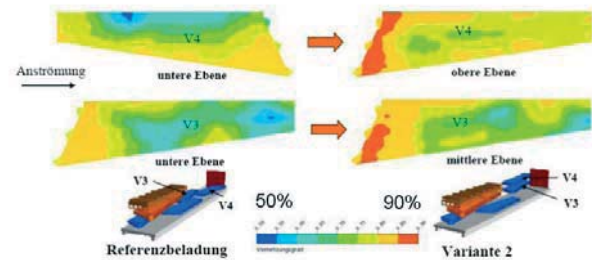


BILD 14. Vernetzungsgradverteilung an der Unterseite der CFK-Haut (hier: Vergleich der Referenzbeladung mit einer der gerechneten Beladungsvarianten)

Ziel der Verbesserungen des VAP-Injektionsprozesses ist es, die Fließfront des Harzes während der Injektion gezielt zu beeinflussen und daraus eine generische Prozesssteuerung zu entwickeln. Mit der heute eingesetzten Technik können wichtige Prozessparameter wie die lokalen Temperaturverläufe, Drücke und das Vakuum während der Injektion gemessen und konstant gehalten werden. Es ist aus Voruntersuchungen bekannt, dass die Harzausbreitung während der Injektion durch lokal aufgebrauchte Drücke und Temperaturen, bzw. daraus resultierenden Harzviskositäten, im Bauteil beeinflussbar ist und gleichzeitig wesentlich die Bauteilqualität beeinflusst. Die gezielte Nutzung dieser Zusammenhänge steht daher im Vordergrund der Arbeiten. Die in einer Prozessanalyse ermittelten Größen werden für eine Prozesssimulation verwendet, um die Wirkungszusammenhänge auf den Fließfrontverlauf zu untersuchen. Mit Kenntnis dieser Abhängigkeiten wird eine Prozessregelung entworfen, die für die Herstellung eines Versuchsbauteils zum Einsatz kommt.

Die Herangehensweise ist die folgende:

1. Prozessanalyse und Identifikation der Regelgrößen für die Fließfront
2. Quantifizierung der Einflüsse an einem Versuchsaufbau
3. Übertragung der Ergebnisse in ein dynamisches Simulationsmodell
4. Ergänzung des Modells der Regelstrecke um Regelungen
5. Auswahl von Regelstrategien, Implementierung und Optimierung
6. Übertragung geeigneter Regelungen in einen Infusions-Versuchsaufbau

Als Haupteinfluss-/Regelgrößen sind die Durchflussmenge des Harzes, die Temperatur, da sie eine Änderung der Viskosität bewirkt, und das Vakuum als Stellgröße für die Permeabilität des Preforms identifiziert worden. Zur Erfassung dieser Stellgrößen wurden mehrere Sensoren untersucht und ausgewählt. Sie werden während der Infusionsversuche gemeinsam ausgelesen und ihre Ergebnisse einander gegenübergestellt, um Zusammenhänge abzuleiten. Zur Erfassung der Position



der Fliessfront wurden beispielsweise kapazitive Sensoren untersucht, die in einem harzgetränkten Umfeld andere Leitfähigkeit haben als in einer trockenen Umgebung. BILD 15 zeigt einen solchen Versuch. Aktuell wird an der Simulation der hochkomplexen Vorgänge während der Infusion im VAP-Verfahren gearbeitet.

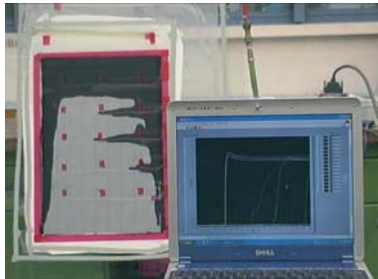


BILD 15. Fliessfrontverfolgung mit Hilfe von Leitfähigkeitssensoren (rot im linken Infusionsaufbau)

Die Entwicklung eines Qualitätssicherungssystems für den Preform-Prozess zielt darauf ab, die Güte von Qualitätsmerkmalen an dreidimensionalen Preforms bei der Handhabung automatisiert zu erfassen und zu bewerten. Das System stellt damit ein wesentliches Überwachungsmodul des automatisierten Handhabungsprozesses dar und bildet die Sensorik für eine später zu entwickelnde Regelung. Wichtige Qualitätsmerkmale, die mit Hilfe eines Bildanalysesystems erfasst werden sollen, sind potentielle Schädigungen durch die Handhabung, wie Verschiebungen im Faserverlauf, Spalte sowie Schäden im Nahtbild. Die Identifikation soll auf gekrümmten Flächen oder an Profilen mit Winkeln möglich sein. Für die Erfassung und Analyse der Maßhaltigkeit von Oberflächen und Geometrien sowie für Aussagen über den Dickenverlauf bzw. die Kompaktierung von Bauteilen, soll eine berührungslose Entfernungsmessmethode angewendet werden. Die Entwicklungsaufgaben beinhalten weiterhin die Automatisierung des QS-Messvorgangs, eine in der Praxis handhabbare Sollwertvorgabe und ein QS-Dokumentationssystem für die Messergebnisse. Die Entwicklungen werden in einem Versuchsaufbau integriert. Die Funktionsfähigkeit der Entwicklung wird hier durch die Analyse der Qualitätsmerkmale von Referenzbauteilen unter Laborbedingungen nachgewiesen.

Zur Erreichung des Zieles ist von den Projektpartnern folgendes Vorgehen festgelegt worden:

1. Entwicklung einer Bildaufnahmestrategie für dreidimensionale Bauteile unter besonderer Berücksichtigung gekrümmter Flächen und verwinkelter Profile
2. Entwicklung einer Strategie zur Erfassung eines Höhenprofils des Bauteils mittels Entfernungsmessung
3. Entwicklung von Bildanalyseverfahren zur Qualitätssicherung bei der Preformherstellung
4. Entwicklung eines Qualitätssicherungssystems – Labormaßstab – für Funktionstests an Preforms
5. Validierung des Qualitätssicherungssystems im industriellen Umfeld (AP5, ab 2009)

Nachdem vom Endanwender die festzustellenden Merkmale definiert wurden (beispielsweise Maßhaltigkeit, Faserlage/-verzug, Anzahl/Größe von Gaps), wurden geeignete optische Sensoren zu deren Detektion ausgewählt. Zur Bewältigung der unterschiedlichen Hell-Dunkel-Verhältnisse bei gekrümmten Bauteilen, ist ein besonderes Augenmerk auf die Beleuchtung gelegt worden. Das im Labormaßstab entstandene QS-System (siehe BILD 16, links) ist in der Lage, ein Höhenprofil sowie Angaben zu Faserorientierungen des Preforms zu liefern.

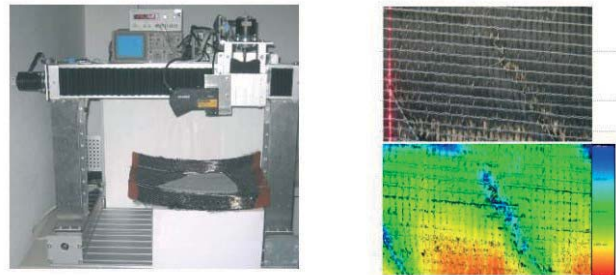


BILD 16. Links: QS-System mit Kamera zur Vermessung des Preforms - Rechts: Messung mit Linien-Lasersensor und daraus abgeleitetes Höhenprofil in Falschfarbendarstellung

## 9 TEILPROJEKT H: „SMART TOOLING“

Faserverbundbauteile und speziell großflächige, schalenförmige CFK-Strukturen, wie sie im Luftfahrzeugbau z. B. für Seitenleitwerk, Rumpf und Flügel eingesetzt werden, erfordern aufgrund ihrer Abmessungen sehr massive, kostenintensive Werkzeuge. Zudem steigt der Vorrichtungsaufwand mit zunehmender Komplexität der Bauteile. Konfigurationsänderungen und selbst kleinere Variationen, z. B. zur Einhaltung eines bestimmten Toleranzfeldes, erfordern heute aufgrund mangelnder Flexibilität der Vorrichtungen in der Regel die Anfertigung eines komplett neuen Werkzeugsatzes und damit entsprechende Investitionen.

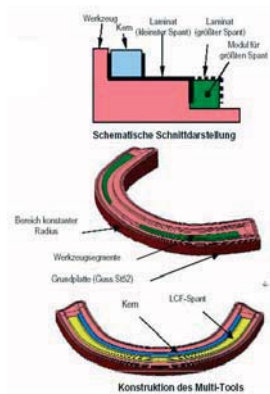
Eines der Entwicklungsziele, die Erhöhung der Flexibilität von Werkzeugen, wird durch die Verfolgung zweier verschiedener Strategien erreicht. Zum einen wird ein Werkzeugkonzept erarbeitet, bei dem die Werkzeuggeometrie durch Verwendung von austauschbaren formgebenden Modulen variiert werden kann (Multi-Tool), zum anderen soll eine Anpassung des Werkzeugs durch elastische Verformung (Flex-Tool), z. B. unter Verwendung geeigneter Aktuatorik realisiert werden. Weitere Entwicklungsaufgaben zur Optimierung von Lege- und Aushärtewerkzeugen beinhalten die Integration zusätzlicher Funktionalitäten wie Messtechnik oder Prozesssteuerung. Auch eine Untersuchung verschiedener Werkzeugmaterialien im Hinblick auf Kostenreduktion sowie einen möglichen zusätzlichen Nutzen durch gezielte Materialpaarungen werden durchgeführt.

Als Zielbauteil für das im Projekt entwickelte Multi-Tool wurde der LCF-Spant für die zu realisierende Hecksektion (TP B) gewählt. Die geometrische Ähnlichkeit der drei benötigten Spante im mittleren Bereich erlaubt deren Fertigung mittels austauschbarer Segmente an den Rändern des Werkzeugs (s. BILD 17, rechts: grün eingefärbte Kerne). Da das Bauteil im VAP-Verfahren hergestellt wird, entfällt der Deckel. Dichtflächen für den Vakuumaufbau sind auf der Grundplatte vorhanden. Das Bauteil wird von oben durch einen Linienanguss mit Harz versorgt. Das Werkzeug kann über eingearbeitete Kanäle temperiert werden.

Mit dem flexiblen Werkzeug Flex-Tool sollen Omega-Stringer mit sog. COFU-I<sup>2</sup>-Geometrie im LRI-Verfahren hergestellt werden. Mittels einer flexiblen Grundplatte (s. BILD 17, links) können verschiedene Radien (bis 15 m) und Torsionswinkel der Steifen (bis zu 5°) eingestellt werden. In dieser Entwicklungsstufe erfolgt die Einstellung der Zielgeometrie händisch mittels Spindelantriebe. Eine Motorisierung ist aber ohne weiteres möglich. Die Aushärtung erfolgt zur Zeit in einem gesondert abgedichteten Heizzelt. Erste erfolgreiche Fertigungsversuche bestätigen die Tragfähigkeit des Konzeptes.



Flex-Tool



Multi-Tool

BILD 17. Die beiden entwickelten Infusions- und Aushärtewerkzeuge Flex-Tool (links) und Multi-Tool (rechts)

## 10 DANKSAGUNG

Die beteiligten Firmen bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung des Projektes LOKOST. Der Dank der Autoren gilt allen beteiligten Partnern im Verbund für die gute Zusammenarbeit.

Beteiligte Firmen:

Airbus Operations GmbH (Verbundführer)

BRÖTJE Automation GmbH

Claas Fertigungstechnik GmbH

CTC GmbH

Evonik Röhm GmbH

Premium Aerotec GmbH

Eurocopter Deutschland GmbH

SAERTEX GmbH & Co. KG

SGL Kumpers GmbH & Co. KG

Toho Tenax Europe GmbH

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] Antrag zum LUFO IV (zweiter Aufruf) Fördervorhaben LOKOST, vom BMWI in 2006 genehmigt beim BMWI