



A. S. Herrmann
A. Pabsch
M. Kleineberg

Kostengünstige Faserverbundstrukturen -eine Frage neuer Produktionsansätze

Cost-Effective Composite-Structures
- A question of new production approaches

Charakterisierung des Referats

Das neue Herstellungskonzept basiert auf der Nasstechnologie und besteht aus den Komponenten "Textiltechnik", "Strukturelle Näh-technik" und Injektionstechnik.

Characterization of the paper

The new production procedure is based on the wet technology and consists of the components "textile technique", "structural stitching technique" and injection technique.

Kostengünstige Faserverbundstrukturen - eine Frage neuer Produktionsansätze

Neue Fertigungstechnologien auf Basis von Harzinjektionsverfahren, Preformtechniken und Nähetechniken werden vorgestellt und zu einer Produktionstechnik verbunden. Angestrebt wird eine Gewichtsreduzierung von 30 % und eine Kostenreduzierung um 40 % gegenüber metallischen Leichtbaustrukturen. Faserverbundwerkstoffe werden nur dann eine breite Anwendung im Bereich Schienenfahrzeugbau, Automobilbau und Maschinenbau erreichen können, wenn der realisierte Leichtbau durch neue Herstellungskonzepte erlösfähig ist.

Cost-Effective Composite-Structures -A question of new production approaches

Production procedures on the basis of injection molding procedure, textile techniques and stitching techniques are presented and are combined to a fabrication technology. The target set by aeronautical industry is a weight reduction of 30% and a cost reduction of 40% compared to metallic light - weight structures. Composites will only be able to achieve general acceptance in the field of rail, automobile manufacture and machine building if the implemented lightweight construction is profitable through new production concepts.

1. Einleitung

Aus ökonomischen und ökologischen Gründen ist insbesondere in der Verkehrstechnik der Leichtbau unumgänglich. Das Leichtbaupotential der Faserverbundwerkstoffe übertrifft das der metallischen Werkstoffe weit, sowohl hinsichtlich der Festigkeit und Steifigkeit als auch des Energieaufnahmevermögens, der Dämpfung und Schwingfestigkeit [1].

Das Potenzial der Faserverbunde kann jedoch nur voll ausgenutzt werden, wenn die Fasern belastungsgerecht, entsprechend der Hauptspannungstrajektoren, im Bauteil orientiert sind. Weiterhin ist für gewichtsoptimierte Hochleistungsverbunde ein hoher gleichmäßiger Faservolumengehalt von ca. 60 % in Kombination mit weitest gehender Porenfreiheit von wesentlicher Bedeutung.

Der derzeit noch sehr beschränkte Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in der Verkehrstechnik ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass keine kostengünstigen Produktionsverfahren für Hochleistungsfaserverbunde verfügbar sind.

Die in der Luftfahrt etablierten Prozesstechniken – vor allem die Prepreg/Autoklavtechnik [2] - sind handarbeitsintensiv, zeitaufwendig und nur bedingt automatisierbar und erfordern teure Halbzeugmaterialien. Die wenigen Fertigungsverfahren höherer Produktivität – wie z. B. das Wickel- [3] oder Pultrusionsverfahren [4] - sind nur für geometrisch einfache Bauteile geeignet, wodurch das Anwendungsspektrum sehr eingeschränkt wird.

Großserienverfahren – wie SMC, GMT oder LFT [5] - nutzen aufgrund der nicht oder nur bedingt realisierbaren Anforderungen an die Orientierung der Fasern und Faservolumenanteile nicht das Potenzial der Faserverbundwerkstoffe und bleiben auf semi-strukturelle Anwendungen beschränkt.

Die technologische Herausforderung besteht somit darin, rationelle, kostengünstige und automatisierbare Produktionsverfahren für Hochleistungsfaserverbunde, also Lamine hoher Qualität mit gezielter Orientierung von Lang- / Endlosfasern, zu entwickeln.

2. Produktionsansätze für verschiedene Fertigungstypen

Der Fertigungstyp richtet sich im allgemeinen nach dem herzustellenden Produktionsprogramm und der Art der Leistungswiederholung. Nach [6] werden folgende Fertigungstypen unterschieden:

- Einmalfertigung,
- Wiederholfertigung,
- Variantenfertigung,
- Serienfertigung,
- Massenfertigung.

Die Abgrenzung der Fertigungstypen sollte jedoch nicht nur unter Zugrundlegung der gefertigten Stückzahlen vorgenommen werden. Hierbei sind noch eine Vielzahl anderer Kennzeichen (wie z.B. Auftragsfertigung, losweise Fertigung) maßgebend (siehe Tab. 1).

Stückzahlcharakter	Fertigungstyp	Kennzeichen
Einzelfertigung	Einmalfertigung	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugnisse werden hier einmal hergestellt • Auftragsproduktion, d.h. Fertigung nach Kundenwunsch Hoher Kosten- und Zeitanteil entfällt bei Vorbereitungsaufgaben (Projektierung, Konstruktion)
	Wiederholfertigung	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugnisse werden in größeren, unregelmäßigen Abständen hergestellt Bei Auftragswiederholung verminderter Vorbereitungsaufwand
Mehrfachfertigung	Variantenfertigung	<ul style="list-style-type: none"> • Ähnliche Erzeugnisse desselben Grundtyps Im Allgemeinen gleicher Fertigungsablauf für alle Varianten
	Serienfertigung	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzte Stückzahl • Bildung von Fertigungslosen • Meist Auftragsproduktion standardisierter Erzeugnisse Klein-, Mittelserien
	Massenfertigung	<ul style="list-style-type: none"> • Große Stückzahlen • Häufige Prozesswiederholung • Anpassung an Kundenwünsche, nur im Rahmen geplanter Erzeugnistypen Sehr hoher, einmaliger aber geringer Aufwand, bezogen auf das Einzelprodukt

Tab.1.: Charakteristische Merkmale von Fertigungstypen

Die neuen Produktionsansätze, ob nun Einzelfertigung oder Massenfertigung basieren auf modernen „Technologien“ mit nachfolgenden Merkmalen:

- Geringe bauteilspezifische Entwicklungs- und Investitionskosten
 - ⇒ Fertigungssimulation
 - ⇒ kostengünstige und schnell verfügbare Werkzeuge
- Textile Preformtechnologie
 - ⇒ Optimierte Multiaxiallege
 - ⇒ strukturelles Nähen
- Handhabungstechniken für textile Halbzeuge
 - ⇒ Unterdruckgesteuerte Handhabung
- Schnelle Durchtränkung des Fasermaterials mit ausgewähltem Harzsystem
 - ⇒ Injektionstechniken mit Linienanguß
 - ⇒ Preßklaventechnologie
- Schnelle Aushärtung
 - ⇒ Einsatz hochreaktiver Harze
 - ⇒ Schnelle Heiztechniken

Je nach Ausprägung der Lösungen ergeben sich Produktionsverfahren für die Einzel-, Varianten- und Kleinserienfertigung oder die Massenfertigung. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit Schwerpunkt die Produktionstechnik für Einzel-, Varianten- und Kleinserienfertigung betrachtet während für die Massenproduktion ein Ausblick gegeben wird. Wesentlich ist jedoch der Übergang von der „Werkbankfertigung“ d. h. der handwerklichen Fertigung zur Reihen- oder Flussfertigung. Das Flussprinzip wird dadurch charakterisiert, dass die einzelnen Arbeitsplätze/Maschinen entsprechend der Reihenfolge des Arbeitsablaufs zur Herstellung eines Produktes angeordnet sind. Der Grundgedanke dieses Organisationsprinzips ist eng mit dem Begriff „Arbeitsteilung“ verbunden. Der Arbeitsumfang wird auf mehrere Arbeitssysteme aufgeteilt, mit dem Ziel, durch Spezialisierung der Einzelaufgaben eine Verbesserung des Wirkungsgrades einzelner Arbeitssysteme zu erreichen. Die Rei-

henfertigung – für die Faserverbundproduktion die wahrscheinlichere – unterscheidet sich von der Flussfertigung lediglich darin, dass keine unmittelbare zeitliche Abhängigkeit zwischen den einzelnen Operationen besteht. Die optimale Kapazitätsnutzung der unterschiedlichen Betriebsmittel wird durch die Installation von Pufferstrecken realisiert. Abb. 1 zeigt einen möglichen Produktionsablauf für Faserverbundstrukturen, der die genannten neuen Ansätze beinhaltet.

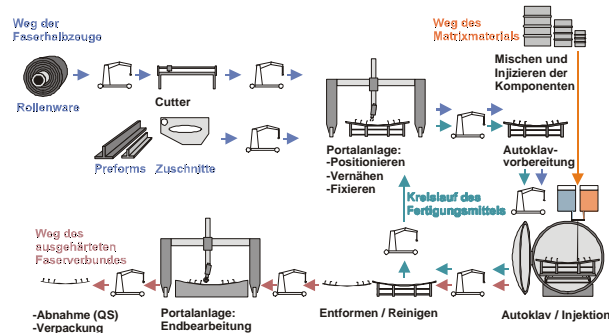


Abb. 1: Automatisierte Fertigung von Faserverbundstrukturen

Die Hauptmaterialflüsse bei der Fertigung von Faserverbundbauteilen gliedern sich in den Weg der Faserhalbzeuge, den Weg des Matrixmaterials und den Weg des ausgehärteten Faserverbundes.

Bei den Faserhalbzeugen bieten sich Rollenwaren an, wenn die anzufertigenden Zuschnitte aufgrund ihrer Abmaße, der geringen Stückzahl oder der Gefahr von Transportschäden nicht vorkonfektioniert bezogen werden können. Für größere Stückzahlen ist es im allgemeinen günstiger, vorkonfektionierte Halbzeuge vorzusehen, die bereits beim Lieferanten zu hochwertigen Preforms oder exakten Zuschnitten verarbeitet wurden. Diese Halbzeuge können anschließend direkt oder in Kombination mit anderen Halbzeugen zu einem Fertigungsaufbau zusammengestellt werden. Das Zusammenstellen der Einzelkomponenten kann dabei von einer automatisierten Vorrichtung übernommen werden, die eine hohe Reproduzierbarkeit und Produktivität gewährleistet

Nachdem der Fertigungsaufbau mit den für den Autoklavprozeß notwendigen Vorbereitungen wie Vakuumabdeckung und Injektionsanschlüssen versehen ist kann er im Autoklaven mit den exakt dosierten und gemischten Matrixkomponenten infiltriert wer-

den. In Abhängigkeit von den einzusetzenden Matrixsystemen kann die Dosierung und Mischung der Einzelkomponenten auch beim Lieferanten durchgeführt werden, wodurch sich Vereinfachungen in der Injektionsanlagentechnik ergeben.

Nach dem Aushärten des Faserverbundes erfolgt die Entformung des Bauteilrohlings und die Aufbereitung des Fertigungsmittels für den nächsten Produktionsumlauf.

Für die Endbearbeitung des Bauteilrohlings empfiehlt sich eine multifunktionelle Anlage für die Besäumung der Bauteilkanten sowie das Einbringen von Befestigungsbohrungen und Aussparungen.

In einem letzten Schritt erfolgt die Überprüfung des fertigen Bauteiles und der Versand

3. Geringe bauteilspezifische Entwicklungs- und Investitionskosten

3.1. Fertigungssimulation

Bei der herkömmlichen sequentiellen Vorgehensweise in der Bauteilentwicklung werden nach nur 5% Entwicklungsfortschritt bereits 70% der Herstellungskosten festgelegt. Entscheidende Bedeutung kommt deshalb einem Wechsel zu einer simultanen Einbindung aller beteiligten Disziplinen im Sinne eines Concurrent Engineering [7] zu. Dieser Ansatz muss sich auf hocheffizient miteinander verknüpfte Iterationsschleifen abstützen, für die neue Simulationswerkzeuge erstellt und adäquate DV-Systeme eingesetzt werden müssen. Für die Fertigung bedeutet Concurrent Engineering ein gleichzeitiges Bearbeiten der Teilaspekte Materialauswahl, Auswahl des Fertigungsverfahrens, Prototypenerstellung, Serienwerkzeugherstellung und Serieneinführung (Bereitstellung der Kapazitäten). Da die einzelnen Fertigungsschwerpunkte in einer gegenseitigen Abhängigkeit stehen, muss für einen ständigen Informationsaustausch gesorgt werden, um ein zielgerichtetes Vorgehen zu ermöglichen. Hierbei sind spezielle Simulationswerkzeuge von großer Bedeutung, mit denen Fertigungsschritte variabel an die jeweiligen Modifikationen adaptiert werden

können, ohne dass unnötige Folgekosten verursacht werden. Auf diese Weise kann der Fertigungsprozess bis zum Beginn der eigentlichen Fertigung als virtueller Vorgang sukzessive mit Entwicklungsergebnissen aufgebaut werden, etwa nach Abb. 2



Abb.2: Fertigungssimulation für FVW-Strukturen

3.2. Kostengünstige und schnell verfügbare Fertigungsmittel

Die Fertigungsmittel sind entscheidend für einen problemlosen und reproduzierbaren Fertigungsablauf, wie er für eine qualitätsgesicherte Fertigung von hochwertigen Strukturen erforderlich ist. Einhergehend mit immer kürzer werdenden Gesamtentwicklungszeiten werden auch die Ansprüche an die Verfügbarkeit von Fertigungsmitteln immer höher. Im Vordergrund steht dabei eine möglichst direkte Umsetzung eines 3D Bauteildatensatzes in das entsprechende Fertigungswerkzeug. Die Kosten der Fertigungsmittel richten sich in erster Linie nach der Bauart, der Größe und der Komplexität der zu fertigenden Bauteile. Darüber hinaus sind Kriterien wie Maßgenauigkeit und Standzeit wesentliche Kostenfaktoren, die sehr früh in die Kalkulation mit einbezogen werden müssen.

Integral gefräste Werkzeuge haben den Vorteil, dass sie kurzfristig aus dem Vollen herausgearbeitet werden können. Fertigungsbasis ist ein mit CAD Systemen erstelltes 3D Modell, welches direkt zur Erstellung des Fräsprogrammes genutzt wird. Die aufwendige Ausarbeitung von Zeichnungsableitungen kann bei komplexen Freiformstrukturen entfallen. Ein Vorteil dieser Fertigungsmittel ist die hohe Standzeit (mehr als 1000 Abformungen) und die Möglichkeit Reparaturen (Schweißen, Löten) durchzuführen.

Faserverbundwerkzeuge mit Kohlenstofffaserverstärkung sind im Vergleich zu Metallwerkzeugen sehr leicht und verfügen über

einen sehr geringen Wärmeinhalt. Dieser Vorteil äußert sich aufgrund kurzer Aufheiz- und Abkühlzeiten in kurzen Autoklavzykluszeiten und vereinfacht das Werkzeughändling. Positiv ist darüber hinaus der mit den zu fertigenden Bauteilen übereinstimmende Wärmeausdehnungskoeffizient. Die Kosten für Faserverbundwerkzeuge fallen im Vergleich mit Metallwerkzeugen geringer aus. Nachteilig wirkt sich bei Faserverbundwerkzeugen die geringere Standzeit des Werkzeuges (ca. 300-600 Abformungen) aus, da mit zunehmender Alterung mit steigender Porosität zu rechnen ist und der Verschleiß beim Entformen zunimmt. Die Herstellung von Faserverbundwerkzeugen erfolgt überwiegend durch die Abformung einer Modellstruktur, die wiederum integral aus Blockmaterial herausgearbeitet wird.

Nickel-Galvanowerkzeuge zeichnen sich durch höchste Oberflächengüte und lange Standzeiten aus. Die elektrochemisch abgeschiedenen Metallschalenwerkzeuge weisen außerdem ein geringes Gewicht auf, da keine Materialanhäufungen wie bei integral gefrästen Werkzeugen entstehen. In Folge der geringen Massenansammlung können die Aufheiz- und Abkühlzeiten kurz gehalten werden, was sich wiederum positiv auf die Autoklavzykluszeiten auswirkt. Da die Nickel-Galvanowerkzeuge bei unkritischen Temperaturen abgeschieden werden, bietet es sich an die Badmodellen aus Epoxydharz direkt von den 3D-CAD-Daten über Rapidprototyping (Laserstereolithographie) herzustellen. Bewährt haben sich Nickel-Galvanowerkzeuge auch in Anwendungen, bei denen es auf höchste Genauigkeit ankommt, da die Möglichkeit besteht die Werkzeuge über spezielle Einstellschrauben nachzustimmen. Nickel-Galvanowerkzeuge lassen sich löten und schweißen und sind somit gut zu reparieren bzw. zu modifizieren.

Welches Fertigungsmittelkonzept sich für die Realisierung eines konkreten Vorhabens am besten eignet hängt letztendlich von den zur Verfügung stehenden Einrichtungen, der Komplexität der Gesamtkonstruktion und den geplanten Stückzahlen ab.

4. Textile Preformlinge

Um die von der Industrie gesteckten Ziele von 40% Kostenreduktion und 30% Gewichtsreduktion für zukünftige Flugzeugstrukturen zu erreichen, wird derzeit massiv betrieben, die Prepreg - Technologie durch Verfahren zu ersetzen, bei denen trockene textile Faserhalbzeuge (Faserpreforms) mit Harz durchtränkt werden.

Die Vorteile der Faserpreforms liegen in der Möglichkeit, moderne Textiltechnologien mit ihren hohen Automatisierungsgraden zu nutzen, um damit komplexe Teilkomponenten kostengünstig und fasergerecht herzustellen. Wesentlich ist dabei auch die Verringerung der Fertigungstiefe im Faserbundproduktionsunternehmen.

Für die Verwirklichung von multidirektionalen Faserverbunden bietet sich die Verwendung von Multiaxialgelegen an, mit denen der Ablegeaufwand und der Verschnitt im Vergleich zu herkömmlichen UD- bzw. Gewebematerialien drastisch reduziert werden kann.

Um eine gezielte dreidimensionale lokale Verstärkung zur Optimierung der technologischen Eigenschaften einer Faserverbundstruktur zu erzielen, lassen sich bewährte Nähverfahren aus der Textilindustrie nutzen, mit denen die Schadenstoleranz von Faserverbundstrukturen wesentlich verbessert werden kann. Diese Nähtechnologien müssen an die Anforderung der Faserverbundtechnologie angepasst werden. Hierzu wurde am Institut für Strukturmechanik eine sogenannte Einseitennähetechnik entwickelt, die aus den Erfahrungen bei der Auslegung und Fertigung von Faserverbundstrukturen entstanden ist.

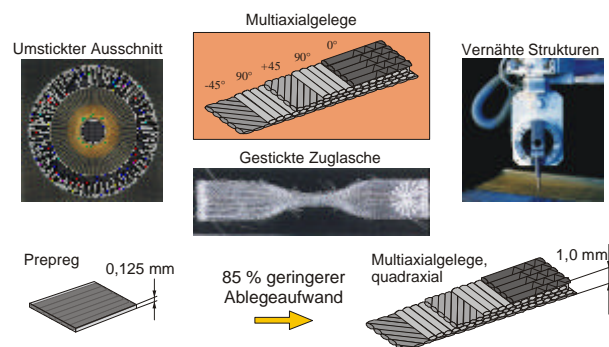


Abb. 3: Einsatz optimierter Faserhalbzeuge

4.1. Optimierte Multiaxialgelege

Einen Ansatz zur Reduzierung der Material- und Fertigungskosten bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen bietet die Multiaxialtechnik. Sie ermöglicht die vollautomatisierte Herstellung textiler Faserhalbzeuge aus mehreren Faserlagen mit unterschiedlichen Faserorientierungen. Darüber hinaus ermöglichen die Multiaxial-Gelege auch beim Verarbeiten eine erhebliche Einsparung an Kosten, da durch die Zusammenfassung mehrerer Einzellagen der Ablegevorgang besonders beim Aufbau komplexer Mehrschichtverbunde mit quasiisotropem oder gezielt anisotropem Aufbau drastisch reduziert wird. Ein weiteres Einsparungspotential entsteht durch den geringeren Verschnitt, der sich durch die Verwirklichung multiaxialer Faserkomplexe ergibt. Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projektes "OPTIMAX [8]" wird an der Herstellung konfektionierter, d. h. an die Randkontur der Bauteile angepasster Multiaxialgelege gearbeitet.

In zahlreichen Projekten mit der Luftfahrtindustrie wurde das Potential der Multiaxialgelege am Institut für Strukturmechanik untersucht und durch gezielte Optimierungen weiter ausgebaut. Dabei wurde deutlich, dass das Leistungspotential der Multiaxialgelegelaminatate zur Zeit um ca. 5 % unter den Prepreglaminaten liegt. Das erklärte Ziel ist es jedoch, in naher Zukunft die Leistungsfähigkeit von Prepreglaminaten zu erreichen.

Strukturelles Nähen

Die Nähverfahren werden eine bedeutende Stellung in der Prozesskette einnehmen und bei der Realisierung zukünftiger Großstrukturen eine wichtige Rolle übernehmen [9]. Sie bieten das Potenzial, unterschiedlichste textile Prozesse miteinander strukturell zu verknüpfen und stellen damit neben einem qualifizierten Injektionsverfahren und dem Preformtechnologien einen wesentlichen Bestandteil der Prozesskette dar. Nähverfahren können als Fixierungsmaßnahme oder fasergerechtes Fügeverfahren eingesetzt werden. Darüber hinaus bieten sie die Möglichkeit, gezielt lokal dreidimensionale Steifigkeiten und Festigkeiten in laminatförmigen Faserverbundstrukturen zu erzeugen.

Die am DLR, Institut für Strukturmechanik für diese Zwecke entwickelte "Einseitennähtech-

nik [10] unterscheidet sich von konventionellen Nähtechnologien in entscheidender Weise. In Hinblick auf die Vernähung „großer“ Faserverbundpreforms wird nicht mehr das Nähgut, sondern der Nähapparat verfahren. Ein in Zusammenarbeit mit der KSL GmbH (Lorsch) entwickelter „Einseitennähkopf“ wird am DLR an einer konventionellen CNC-Anlage betrieben. Denkbar sind aber auch Anwendungen an konventionellen Brückensystemen oder Handhabungsautomaten (Abb. 4)

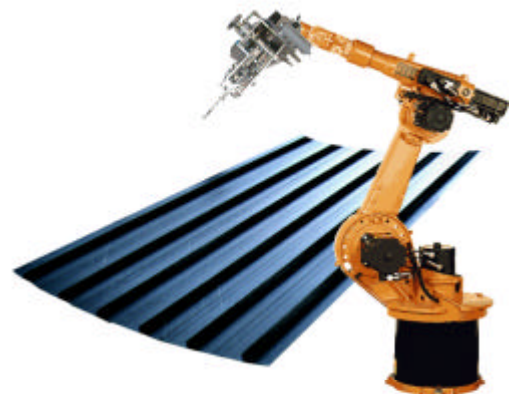


Abb. 4: Industrielle Vernähung textiler Preforms

Ein weiterer Vorteil gegenüber konventionellen Verfahren ist, dass das Nähgut nur noch von einer Seite zugänglich sein muss und somit aufwändige und kostenintensive Unterkonstruktionen vermieden werden können. Für die Effizienz der Produktionstechnik ist das Nähen direkt in das Formwerkzeug bzw. in ein Handhabungswerkzeug von entscheidender Bedeutung.

5. Handhabungstechniken für textile Halbzeuge

Für oben beschriebene Reihenfertigung unter Nutzung textiler Halbzeuge, ist dem Transport der Halbzeuge zwischen den Arbeitstationen und dem Einlegen in die Formwerkzeuge eine entscheidende Bedeutung zu zuordnen. Zur formtreuen Schichtung und der dreidimensionalen Positionierung von Faserhalbzeugen, wie Geweben oder Multiaxialgelegen, werden zur Zeit vorwiegend manuelle Techniken angewendet die eine Ablage direkt in die meist konkaven Injektionswerkzeuge vorsehen. Dazu werden mit erheblichen Nachteilen für die

Struktureigenschaften Klebepulver und Klemmsysteme eingesetzt. Auch ein struktur-optimierendes strukturelles Nähen ist nur mit erheblichen Schwierigkeiten und Einschränkungen möglich.

Ein bei dem DLR bereits mit Erfolg verwendetes Verfahren [11] basiert auf unterdruckgesteuerten Trägervorrichtungen. Es wird von Positivformen ausgegangen, die aus Lochblechen mit geeigneter Rasterung hergestellt werden. Durch das Lochblech wird mit einem Sauggebläse eine Unterdruckströmung derart erzeugt, das auf die Form applizierte Faser-verbundhalbzeuge angesogen werden. Versuche haben gezeigt, dass mit Industriestaubsaugern eine ausreichende Unterdruckströmung erzeugt werden kann, um Faserhalbzeuge auch für dicke Lamine zu halten. Aufgrund des verwendeten Lochbleches kann das Faserhalbzeug auf dem Träger mit geeignetem Stichabstand strukturell vernäht werden.



Abb. 5 : Unterdruckgesteuerte Trägervorrichtung

Die Abmessungen des Formkastens sind so zu wählen, dass er leicht mit den aufgelegten Faserschichten in das Formwerkzeug eingelegt werden kann.



Abb.: 6: Einlegen der Multiaxialgeleges mit der Trägervorrichtung in das Fertigungsmittel

Durch Umstellen von Unterdruckströmung auf Überdruckströmung wird das Faserhalbzeug vom Träger getrennt und kann entfernt werden.

6. Schnelle Durchtränkung des Fasermaterials mit ausgewähltem Harzsystem

6.1. Injektionstechniken mit Linienanguß

Am Institut für Strukturmechanik wurde ein neues Harzinjektionsverfahren zur wirtschaftlichen Herstellung großflächiger Hochleistungsverbundstrukturen entwickelt, das als Single – Line - Injektion- (SLI-) Verfahren bezeichnet wird und Kern der hier vorgestellten Produktionstechnik ist. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine Kombination des RTM - Verfahrens [12] mit einigen Elementen der Prepreg - Technologie [13]. Das SLI - Verfahren erlaubt es, Harz und Faserhalbzeug getrennt zu handhaben, was gegenüber der Prepreg - Technologie zu einer erheblichen Senkung der Materialeinstands- und Lagerkosten führt. Zudem können durch die Anwendung flexibler Formen die Werkzeugkosten stark reduziert werden, was sich insbesondere bei kleinen bis mittleren Stückzahlen, wie sie in der Flugzeug- aber auch in der Schienenfahrzeugindustrie typisch sind, äußerst positiv auf die Stückkosten auswirkt. Darüber hinaus ermöglicht ein neuentwickeltes Injektionsmanagement sowohl eine

schnelle und gezielte Harzdurchtränkung selbst bei großflächigen Strukturen als auch hohe Faservolumenanteile mit erstklassigen Laminatqualitäten.

Das Prinzip dieses sogenannten Single – Line - Injection - (SLI-) Verfahrens [14] zeigt Abb.7.

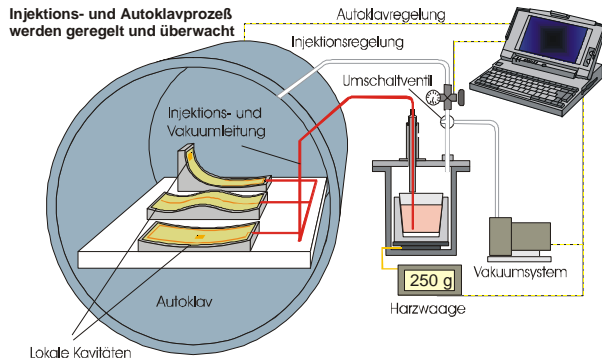


Abb 7: Das SLI-Verfahren

Das SLI - Verfahren ist ein Injektionsverfahren, bei welchem im Gegensatz zum klassischen RTM - Verfahren die Kräfte zum Verdichten des Fasermaterials nicht mehr mechanisch durch ein massives Werkzeug, sondern durch den Autoklavdruck aufgebracht werden. Diese Tatsache ermöglicht sehr einfache und daher kostengünstige Formwerkzeuge. Die einzelnen Fertigungsschritte lassen sich wie folgt untergliedern:

In einem ersten Produktionsschritt wird das trockene Fasermaterial auf einem einseitigen, formgebenden Werkzeug abgelegt, welches sowohl massiv als auch als dünnwandige Schale ausgeführt werden kann, da es nur durch das Eigengewicht und nicht durch Druckkräfte (RTM - Verfahren) belastet wird. Im Anschluss daran wird direkt auf dem Fasermaterial eine Injektionslinie platziert, über die sowohl die Evakuierung der Faserpreform als auch die Injektion des Harzsystems erfolgt. Diese Injektionslinie kann dabei beliebig auf der Faserpreform angeordnet werden, um die Fließstrecken und damit die Injektionszeiten zu verkürzen. Da eine solche beliebige Injektionsführung zu lokalen Porositäten im Faserverbundbauteil führt, werden in kritischen Bereichen lokal begrenzte Kavitäten positioniert, die ein gezieltes lokales Spülen in diesen Bereichen ermöglichen.

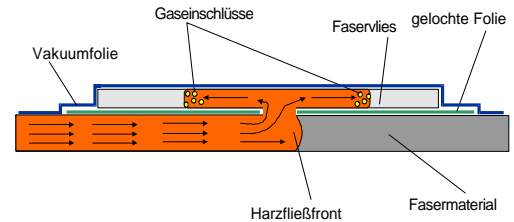


Bild 8: Lokale Kavität beim SLI - Verfahren

Hierdurch werden Gaseinschlüsse in die Kavitäten gesaugt und können somit nicht mehr zu Lunkern im eigentlichen Bauteil führen.

Nachdem alle für den Fertigungsprozess erforderlichen Elemente (Injektionslinien etc.) positioniert worden sind, wird das Formwerkzeug mit einer Folie vakuumdicht versiegelt. Darauf folgt die Injektionsanschlüsse mit einer druckstabilen Leitung (z.B. Kupferrohr) verbunden, die aus dem Autoklaven herausgeführt wird. Außerhalb des Autoklaven kann diese Leitung zur Evakuierung mit einer Drucksänke oder zur Injektion mit einer Injektionsanlage verbunden werden. Anschließend werden die Fertigungsparameter Autoklavdruck und Temperatur eingestellt und der Injektionsvorgang gestartet. Nach erfolgreicher Harzinjektion erfolgt die Aushärtung des Harzsystems.

Durch dieses Verfahren kann mit reduziertem Aufwand an Leitungen und Anschlüssen eine sichere Prozessführung mit kontrollierbarer Harzausbreitung gewährleistet werden. Darüber hinaus werden nicht wiederverwendbare Komponenten (Leitungen mit ausgehärtetem Harz) minimiert und die Wirtschaftlichkeit durch verminderten Abfall verbessert. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des SLI - Verfahrens besteht in der Möglichkeit, den gesamten Autoklavprozess zu automatisieren, womit ein entscheidender Schritt in Richtung einer qualitätsgesicherten und wirtschaftlichen Fertigung von Hochleistungsverbundstrukturen gemacht wurde.

6.2. Pressklaventechnologie

Das oben vorgestellte SLI - Verfahren setzt auf die in der Prepregtechnologie üblichen Autoklavtechnologie auf, mit dem Vorteil, dass die vorhandenen Toolingsysteme weitestgehend verwendet werden können. Die Autoklavtechnologie erfordert jedoch Zykluszeiten im Stundenbereich. Dies ist nur bei komplexen Großstrukturen der Einzelteil-, Varianten und Kleinserienfertigung bei Parallelbe-

schickung mit einer Vielzahl von Einzelwerkzeugen rationell. Für die Massenfertigung ist eine hochautomatisierte Variante des DP-RTM - Verfahrens in der Entwicklung. Die hierbei entstandene Pressklaventechnologie [15] beruht auf der Kombination von drei Technologien. Es handelt sich um eine modifizierte Autoklavtechnologie, die Vakuumsack - Technologie sowie die Kaltangußtechnik der Duromerspritzguß - Technologie.

Die wesentlichen Komponenten der Pressklaventechnologie sind eine Druckglocke, die die Funktion des Autoklaven übernimmt, eine Mehrschichtmembran aus einem elastomer Material und ein neuartiges Injektionsventil mit Membransteuerung (Abb. 9).

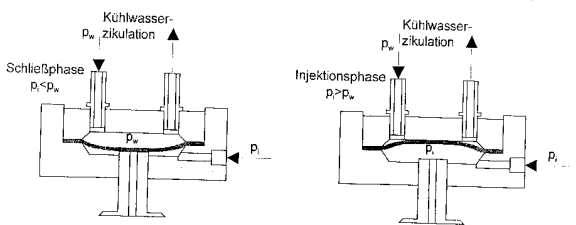


Abb. 9: Pressklavventil in der Schließ- und Injektionsphase (p_i = Injektionsdruck, p_w = Wasserschließdruck)

Die Verfahrensschritte lassen sich in 5 Phasen unterteilen:

1. In die vorab aufgeheizte Negativform wird das zugeschnittene Fasermaterial eingelegt und die Druckglocke mit der Membran auf den Formling abgesenkt.
2. Über die Presskraft wird die zum Vakuumaufbau notwendige Schließkraft aufgebaut. Ist die Vorrichtung geschlossen, kann der Vakuumaufbau über das Vakuumventil erfolgen. Dann ist der Behälterinnendruck aufzubauen. Dieser Behälterdruck (p_{Beh}) dient, wie beim SLI - Verfahren zur Verdichtung des Fasermaterials.
3. Nach dem Erreichen des notwendigen Vakuums ($< 1\text{mbar}$) beginnt der Injektionsprozess mit der nachfolgenden Gelierphase. Hierzu wird die Vakuumleitung abgesperrt und der Steuerluftdruck angelegt (p_m) bevor die Injektion ($p_w < p_i > p_{Beh}$) durch öffnen der Harzleitung gestartet wird.
4. Ist die für die Füllung des Bauteils erforderliche Harzmenge injiziert, muss

die Harzleitung abgesperrt werden, um der Matrix eine gleichmäßige Verteilung im Bauteil zu ermöglichen. Zudem würde sich durch den gegenüber dem Behälterdruck höheren Injektionsdruck der Matrixfluss nicht verringern und eine Überfüllung des Bauteils verursachen. Bei größeren Strukturen kann der Injektionsprozess zum Erzielen der 100% Füllung in kleinen Intervallen durchgeführt werden.

5. Ist die Härtephase abgeschlossen, wird der Behälterinnendruck abgelassen und die Druckglocke aufgefahren. Das Bauteil kann entformt und anschließend zur vollständigen Härtung getempert werden.

Der derzeitige Entwicklungsstand des Verfahrens lässt Taktzeiten von weniger als 10 min zu. Eine weitere Verringerung der Taktzeiten kann durch höherreaktive Harzsysteme und verbesserte Membranwerkstoffe (Verbesserte Trenneigenschaft) erreicht werden.

Abb. 10 zeigt den Fertigungsaufbau, wie er in Kürze zur Serienfertigung von Arbeitsschutzhelmen eingeführt wird.

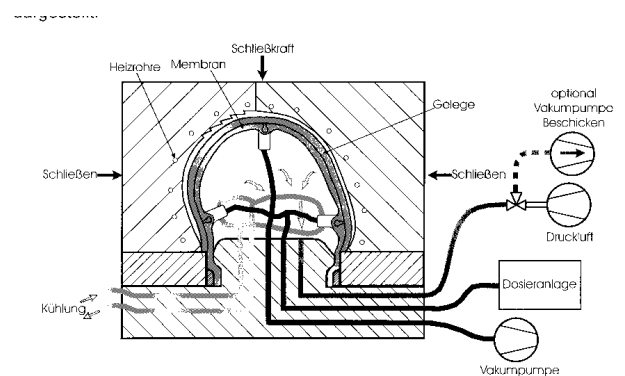


Abb. 10: Pressklaventechnologie

7. Schnelle Aushärtung

7.1. Einsatz hochreaktiver Harze

Als kurz bis mittelfristige Lösung stellen sich für die Flugzeugindustrie aber auch die Verkehrstechnik die unter dem Handelsnamen Blendur vertriebenen Produkte der Fa. Bayer dar. Dies sind Epoxy-Isocyanurate (EPIC) Harze, die auf einem Diphenylmethan Diisocyanat und einem Epoxidharz (Bisphenol A) basieren. Nach Zugabe eines Katalysators werden durch eine Kombination einer Trimeri-

sation mit einer Polyaddition die typischen Isocyanurat- und Oxazolidinonringe gebildet. Im Unterschied zu den bekannten PIR Schäumen wird durch die Substitution des Polyol Anteils durch ein Epoxidharz und durch die Auswahl eines geeigneten Katalysators die Bildung einer festeren Struktur mit höherer thermischer Beständigkeit erzielt.

Blendur Harze umfassen eine Gruppe von Produkten, die im wesentlichen auf identischen Ausgangskomponenten basieren, wobei es hinsichtlich des eingesetzten Katalysators eine Reihe von Variationsmöglichkeiten gibt. Die Blendur Harze liegen in unterschiedlich weit vortrimerisiertem, lagerstabilen Zuständen vor. Somit kann die für die jeweilige Verarbeitungstechnologie ideale Viskosität ausgesucht bzw. abgemischt werden.

Hinsichtlich des Einsatzes von Nasstechnologien ist vor dem Hintergrund einer hohen Prozesssicherheit der Einsatz von latent katalysierten Blendur Harzen interessant. Diese Harze zeigen bei Injektionstemperatur extrem lange Topf- und damit Verarbeitungszeiten, so dass ein vorzeitiges Angelieren während des Durchtränkungs Vorganges, was unweigerlich zur Ausschussproduktion führt, ausgeschlossen werden kann. Die für latent katalysierte Systeme typische rel. zügige Aushärtung in einem kurzen Zeitraum, einhergehend mit hohen Energiefreisetzungsraten, behindert offensichtlich nicht die Fertigung dicker Lamine, da in DP-RTM Technologie mit Blendur schon CFK Lamine mit Wanddicken von über 25 mm ohne Verbrennungerscheinungen hergestellt werden konnten.

Die mechanischen Eigenschaften von Blendur wurden beim DLR, Institut für Strukturmechanik, im Rahmen von zwei Projekten näher untersucht, wobei sich ein hervorragendes mechanisches Eigenschaftsprofil gezeigt hat. Lediglich die ermittelten Zähigkeitswerte liegen leicht unter denen von etwa RTM 6, wobei die Kosten für das (noch nicht Luftfahrtzugelassene) Blendur bei ca. $\frac{1}{4}$ der Kosten von RTM 6 liegen. Neben den sehr guten Verarbeitungseigenschaften, dem niedrigen Preis und dem hohen mechanischen Leistungsprofil kann Blendur aufgrund inhärenter Brandfestigkeit die FST Anforderungen erfüllen.

Prinzipiell können für Blendur solche Fertigungshilfsmittel eingesetzt werden, die auch für die Epoxydverarbeitung Verwendung fin-

den. Der derzeitige Härtingszyklus liegt bei ca. 4 Stunden, von denen aber ein Großteil der Zeit über Nachhärten außerhalb des Autoklaven abgedeckt werden kann. Untersuchungen zur Vereinfachung des Härtingszyklusses werden derzeit im LuFo II, Kat-Harze (Cluster Arbeitspunkt C. 1.3.4.2.) durchgeführt. Ebenfalls werden unter diesem Arbeitspunkt die Möglichkeiten zur Zähmodifizierung betrachtet.

7.2. Schnelle Heiztechniken

Eine Vielzahl verschiedener Verfahren und Methoden sind bis heute erarbeitet worden, die alle bei warmhärtenden Verfahren den Einsatz von Warmluft zur Temperierung der auszuhärtenden Formteile erfordern. Diese Verfahren sind langwierig, schwer regel- und automatisierbar, sowie sehr energieaufwendig, da zum Erwärmen der auszuhärtenden Faserverbundstruktur die gesamte Form und Ofenstruktur miterwärmt werden muss. Vom FZK und dem DLR wurde eine gemeinschaftliche Konzeption [16] für eine neuartige und innovative Fertigungstechnologie für Verbundwerkstoffe im industriellen Maßstab erstellt. Durch die Verwendung von 24 GHz Millimeterwellen ergeben sich für den Herstellungsprozess der CFK Strukturbauteile eine Vielzahl entscheidender Vorteile, um den Sprung zu marktkonformen Preiskategorien vollziehen zu können.:

- Kalter Ofen, selektives Erwärmen des CFK/GFK
- Sehr hohe Heizraten
- Sehr gleichmäßige Durchwärmung im Volumen
- Instantane Prozesssteuerung
- Niedriger Energieverbrauch
- Schnelle Zykluszeiten - Hoher Durchsatz

Bei dieser Technologie wird das in der Formschale ausgelegte Faserverbundhalbzeug selektiv durch die 24 GHz mm-Welle eines Gyrotrons temperiert. Die gesamte Prozesseinheit erwärmt sich bei diesem Vorgang nur unwesentlich durch thermische Konduktion über die Basisformschale. Die 24 GHz Wellen werden vom Gyrotron (Quelle) kommend auf die auszuhärtende Struktur mittels eines

Spiegels umgelenkt. Dieser Spiegel ist weiterhin wellenoptisch so ausgelegt, dass eine gleichmäßige Feldamplitude im Bereich des zu prozessierenden Formteils erreicht wird. Die Prozesssteuerung erfolgt über oberflächige Thermolemente, die instantan mit der Regeleinheit den Prozess steuern können. Im Falle der exothermen Aushärtungsreaktion kann beispielsweise sofort die elektromagnetische Heizleistung den Anforderungen entsprechend zurückgefahren werden. Erste Untersuchungen haben gezeigt das mit üblichen Epoxydharzsystemen Prozesszeiten (von der Inbetriebnahme des Ofens bis zur Entnahme des ausgehärteten Faserverbundbauteils aus dem kalten Ofen) unterhalb von 30 Minuten erreicht werden.

8. Rechnergesteuerte Qualitätssicherung

Ziel dieser Entwicklung ist es, den Status der jeweiligen Bauteilfertigung am Rechner zu begleiten und einen automatischen Vergleich der Soll- und Ist-Parameter vornehmen zu können. Dies bezieht sich sowohl auf die Kontrolle der eingesetzten Materialien und Halbzeuge als auch auf die Kontrolle des gesamten Fertigungsprozesses bis hin zur abschließenden Prozessprotokollierung.

Angedacht ist ein System, bei dem der verantwortliche Projektleiter eine sogenanntes Life-Data-Sheet (LDS) am Rechner entwerfen kann, welches eine detaillierte Beschreibung des gesamten Fertigungszyklus mit den zu verwendenden Materialien enthält. Dieses LDS soll anschließend in ein DV-Netz eingespeist werden, um während der gesamten Fertigung allen Beteiligten zur Verfügung zu stehen. In dem LDS sind alle Arbeitsschritte detailliert mit allen Soll-Werten und Arbeitsanweisungen aufgeführt. Es liegt nun in der Verantwortung der bearbeitenden Mitarbeiter die sachgerechte Ausführung von Arbeitsschritten sowie die verwendeten Materialien, Prozeßparameter und Hilfsstoffe in der LDS zu vermerken. Das EDV-gestützte QS-System führt bereits während der Eingabe der Parameter einen Soll-Ist-Vergleich durch. Bei eventuellen Abweichungen vom Soll-Wert wird sofort eine Warnmeldung ausgegeben. Um die Eingabe der Parameter zu vereinfachen,

werden Bauteile, Materialien und Hilfsstoffe mit Bar-Codes versehen, welche mit tragbaren Geräten erfaßt werden können. Über entsprechende Schnittstellen werden diese Informationen an das im DV-Netz verfügbare QS-System übertragen. Während der gesamten Fertigung muß dabei sichergestellt werden, daß während der Bearbeitung durch einen Mitarbeiter der Zugriff für andere Mitarbeiter solange gesperrt ist, bis der bearbeitende Mitarbeiter nach endgültiger Bearbeitung eine Freigabe erteilt. Anderenfalls wäre es nicht auszuschließen, daß bei einer parallelen Bearbeitung ein Mitarbeiter die Änderungen eines anderen Mitarbeiters unbeabsichtigt überschreibt. In einem Log-File werden hierbei alle Änderungen protokolliert, so dass jederzeit nachvollziehbar ist, welcher Mitarbeiter welche Eintragungen vorgenommen hat.

Auf Basis dieses Systems ist dann eine lückenlose Qualitätsabsicherung möglich.

9. Literaturverzeichnis

- (1) G. Niederstadt, A. S. Herrmann, *Ökonomischer und ökologischer Leichtbau*, Expert Verlag, Band 167, Renningen-Malmsheim, 1997
- (2) A. G. Bratuhus, V. S. Begolybov, *Composite Manufacturing Technology*, Verlag Chapman & Hall, London 1994
- (3) D. V. Rosato, C. S. Grove *Filament Winding, its Development, Manufacture Applications and Design*, Sydney, 1964
- (4) W. Michaeli, M. Wegener, *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1989
- (5) W. Michaeli, *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, Carl Hanser Verlag, München, Wien 1992
- (6) H.-J. Warnecke, *Der Produktionsbetrieb 2*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1984
- (7) A. S. Herrmann u.a.: *HGF-Projekt "Schwarzer Rumpf", Realisierung von CFK-Rumpfkompnenten unter Einbeziehung des Concurrent Engineering*
Laufzeit 1.1.1999-31.12.2001

- (8) A. Pabsch, Wagner, BMBF-Matech-Projekt „OPTIMAX“, Laufzeit 1.11.99-31.10.2002
- (9) A.S. Herrmann, C. Sickinger, H. Wilmes, *Strukturelles Nähen, eine Maßnahme zur Realisierung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen*, Proceedings DGLR Tagung 2000, Leipzig, 18.-21. 09.2000
- (10) C.S. Smith, *Design of Marine Structures in Composite Materials*, Elsevier Applied Science, London New York, 1990
- (11) A. S. Herrmann, A. Pabsch, M. Kleinberg, *Patentschrift „Unterdruckgesteuerte Trägervorrichtung zur Herstellung und Handhabung von Faserstrukturen und deren modularer Kombination“*
- (12) M. Flemming, G. Ziegmann, S. Roth, *Faserverbundbauweisen, Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*, Springer verlag, Berlin, Heidelberg usw. 1999
- (13) H.W. Bergmann, *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg usw., 1992
- (14) A. S. Herrmann, C. Sigle, *Das Single-Line-Injection-Verfahren zur Herstellung von Hochleistungsverbunden*, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V., Bonn, DGLR-Jahrestagung 1999,
- (15) A. S. Herrmann, A. Pabsch, J. Kleffmann, B. Schubert, *Patentschrift „Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von Formkörpern aus Faserverbundwerkstoffen“*
- (16) L. Feher, A. S. Herrmann, A. Pabsch, C. Sigle *Patentschrift „Verfahren und Mikrowellensystem zur thermischen Prozessierung von aus Ausgangsmaterialien zusammengesetzten Formkörpern zu formbeständigen Compositen“*