

ENTWICKLUNG VON FASERVERBUND-HOHLBAUTEILEN IN RTM-BAUWEISE AM BEISPIEL EINES TRAGLENKERS VON PASSAGIERFLUGZEUGTÜREN

S. Kunze¹, C. Wellhausen¹, W. Leistner¹, B. Demel², T. Roser², K. Drechsler³

¹ Eurocopter Deutschland GmbH, 85521 Ottobrunn, Deutschland

² Eurocopter Deutschland GmbH, 86609 Donauwörth, Deutschland

³ Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, Deutschland

Zusammenfassung

Einer der wichtigsten Gründe für die Anwendung von Faserverbundbauweisen in der Luftfahrtindustrie ist das Streben nach Massereduktion im Vergleich zu Bauteilen aus anderen, meist metallischen Werkstoffen bei gleich bleibenden oder verbesserten technischen Eigenschaften. Für sehr leichte und gleichzeitig steifigkeitsdominierte Auslegungen werden dabei häufig Sandwichkernverbunde verwendet, die einen Kern aus Honigwaben oder Schaumwerkstoffen besitzen. Einen Sonderfall dieser Sandwichbauteile stellen Strukturen dar, bei denen der Kern nicht zur Lastübertragung verwendet wird und daher als so genannter „verlorener Kern“ in erster Linie der Formgebung während der Bauteilfertigung dient. Es sind sowohl Bauteile bekannt, bei denen diese Kerne im Bauteil verbleiben als auch solche, bei denen die Kerne nach der Bauteilhärtung herausgelöst werden.

Bei Passagierflugzeugtüren bestimmter Bauart erfüllt der so genannte Traglenker die Funktion des Scharniers zwischen Flugzeugrumpf und Türe. Dabei trägt er die Türmasse im geöffneten Zustand, wobei in erster Linie hohe Steifigkeit gefordert ist. Diese Traglenker haben in den letzten Jahren eine Entwicklung von der Aluminiumgussbauweise hin zur Bauweise in Kohlenstofffaserverbundkunststoff mit einhergehender Massereduktion erfahren. Das dafür gewählte Herstellungsverfahren ist die Resin Transfer Moulding-Technik, bei der ein trockener Kohlenstofffaservorformling in einer geschlossenen Form zunächst mit einem niederviskosen Harz infiltriert und dieses nachfolgend unter erhöhter Temperatur ausgehärtet wird. Aufgrund der Forderung nach einer hochsteifen Dimensionierung wurde das Bauteil als Torsionskasten mit integrierten Anschlussbeschlägen ausgelegt.

Ursprünglich wurde ein Kern aus Hartschaum verwendet, welcher im Bauteil verbleibt. Am Beispiel eines solchen Traglenkers wird gezeigt, wie durch Substitution des innen liegenden Hartschaumkerns durch einen entfernbar, nur für die Bauteilfertigung verwendeten Kernverbund eine Reduktion der Bauteilmasse erreicht wird. Dazu wird ein wasserlöslicher Kernwerkstoff verwendet, mit dem ein Kern separat hergestellt und nach Bestückung, Infiltration und Härtung des Bauteils aus diesem ausgespült wird. Es wird auf die Motivation zum Einsatz dieser Bauweise, die bauteilspezifischen Entwicklungstätigkeiten sowie die zerstörenden und nicht zerstörenden Bauteiltests eingegangen.

1. EINLEITUNG

Für sehr leichte und gleichzeitig steifigkeitsdominierte Auslegungen werden im Flugzeugbau Sandwichbauteile verwendet, deren Decklagen aus Faserverbunden bestehen und die üblicherweise einen Kern aus Honigwaben oder Schaumwerkstoffen besitzen. Einen Sonderfall dieser Sandwichbauteile stellen Strukturen dar, bei denen der Kern selbst nicht zur Versteifung beiträgt und daher als so genannter „verlorener Kern“ in erster Linie der Formgebung während der Bauteilfertigung dient. Damit reduziert sich seine Rolle auf eine Werkzeugfunktion im Gegensatz zur Steifigkeit gebenden Funktion in echten Sandwichbauteilen. Es sind sowohl Bauteile bekannt, bei denen diese Kerne im Bauteil verbleiben (Sandwichbauweise) als auch solche, bei denen die Kerne nach der Bauteilhärtung entfernt werden (Hohlbauweise).

Am Beispiel eines Traglenkers von Passagierflugzeugtüren wird gezeigt, wie an einem Bauteil in Resin Transfer Moulding (RTM)-Bauweise durch Substitution des innen liegenden Hartschaumkerns durch einen auslösbaren Kernverbund eine Massereduktion erreicht wird.

2. FASERVERBUND-HOHLBAUTEILE IN RTM-BAUWEISE

Bei den meisten Bauteilen, die in Sandwichbauweise gefertigt werden, übernimmt der Sandwichkern üblicherweise eine versteifende Funktion, wobei die Biegesteifigkeit des Sandwichverbunds mit dem Abstand der Deckschichten überproportional zunimmt. Der Kernwerkstoff übernimmt die Funktion des Abstandshalters zwischen den Decklagen. Für den Fall dass der E-Modul des Kernwerkstoffs wesentlich kleiner als der des Deckschichtmaterials ist ($E_K \ll E_D$) und die Dicke der Deckschicht wesentlich kleiner als die des Kerns ist ($t_K \gg t_D$), gilt für das Widerstandsmoment W :

$$(1) \quad W = \frac{E_D \cdot t_D \cdot d^2}{2}$$

wobei d den Abstand der neutralen Fasern der Deckschichten zueinander repräsentiert. In der Luftfahrt werden als Kernwerkstoffe bei Sandwichbauteilen, bei denen der

Kern eine tragende Funktion übernimmt, üblicherweise Honigwabenkerne („Honeycombs“) oder Polymethacrylid (PMI)-Schaumwerkstoffe verwendet.

Neben Sandwichbauteilen, bei denen der Kern eine tragende Funktion im Verbund übernimmt, gibt es auch Bauteile, bei denen der Kern eine reine Fertigungshilfe darstellt. Hierbei übernimmt der Sandwichkern im fertigen Bauteil keinerlei tragende Funktion und ist somit überflüssig. In einem solchen Anwendungsfall ist es sinnvoll, den Kern aus dem fertigen Bauteil zu entfernen, um ein Hohlbauteil zu erzeugen und dadurch die Bauteilmasse zu senken. Im Regelfall ist allerdings der Sandwichkern nach der Bauteilherstellung nicht mehr von außen zugänglich, das heißt er ist von einem Faserverbundlaminat umschlossen und kann demzufolge auch nicht mehr einfach entfernt werden. Durch die Auswahl alternativer Kernwerkstoffe ist es allerdings möglich, den Kern hinsichtlich seiner Entfernbarkeit aus dem Bauteil zu optimieren, da durch das Entfernen die mechanische Belastungsfähigkeit, die Dauerhaltbarkeit und andere, flugsicherheitsrelevante Eigenschaften wie beispielsweise die Feuchteaufnahme oder Brandbeständigkeit keine Rolle mehr spielen. Nach dem Entfernen des Kernwerkstoffs spricht man nicht mehr von einem Sandwich-, sondern von einem Hohlbauteil.

Hohlbauteile weisen im Regelfall eine komplexe Form auf. Das heißt, dass für die Bauteilfertigung Verfahren zu Anwendung kommen sollten, die eine hohe Formkomplexität zu günstigen Kosten realisieren lassen. Flüssigharzinfusionsverfahren bieten in der Regel bei komplexen, endkonturnahen Bauteilen, die in großen Stückzahlen gefertigt werden, kostenseitige Vorteile gegenüber der Prepreg-Autoklavbauweise [1].

2.1. Resin Transfer Moulding

Beim Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM), schematisch dargestellt in Bild 1 und hier nur noch „RTM“ genannt, handelt es sich um ein Infusionsverfahren, bei dem ein trockener Vorformling aus textilen Halbzeug in einer geschlossenen Form zunächst mit einem ein- oder mehrkomponentigen niederviskosen Harz infiltriert und dieses nachfolgend unter erhöhter Temperatur ausgehärtet wird.

Zur Erzeugung des Vorformlings werden typischerweise trockene Gewebe oder Multiaxialgelege verwendet, die zunächst zugeschnitten und anschließend konfektioniert werden. Die Konfektionierung wird in den meisten Fällen entweder durch die Binder- oder die Nähtechnik realisiert. Hierbei kommen entweder thermoplastische oder duroplastische, durch Erwärmung aktivierbare Binder in Pulver- oder Vliesform, zum Einsatz, oder die textile Konfektionierung des Vorformlings wird mittels eines geeigneten Nähfadens und -prozesses durchgeführt. Kerne können dabei entweder schon während der Herstellung der Vorformlinge integriert oder beim Bestücken des Injektionswerkzeugs zwischen Vorformlinge eingelegt werden.

Nach Bestücken der meist zweiteiligen Injektionsform wird diese geschlossen, der Vorformling nochmals zusätzlich über geeignete Setzbewegungen kompaktiert, das Werkzeug evakuiert, auf Injektionstemperatur gebracht und das mit Überdruck beaufschlagte Infusionsharz injiziert. Nach dem Aushärten des Harzes bei erhöhter Temperatur kann

das abgekühlte und meist endkonturnahen Bauteil aus dem Werkzeug entformt werden.

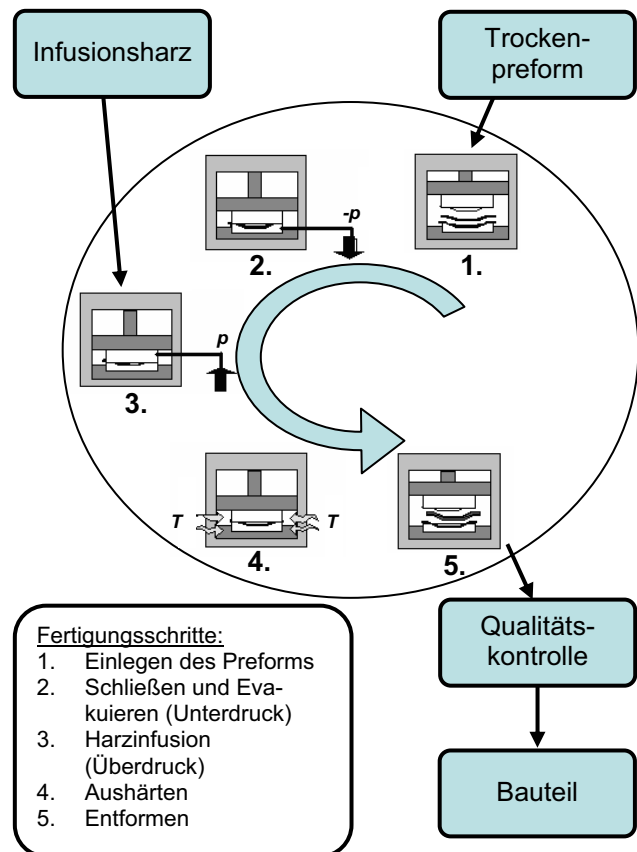


BILD 1. Prozessschaubild Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding

2.2. Auslösbare Formkerne

Bei auslösbaren Kernen kann grundsätzlich zwischen wieder verwendbaren und zerstörenden [2], sowie in ihrer Beschaffenheit bei der Herstellung zwischen labilen und festen Kernen unterschieden werden. Labile Kerne wie beispielsweise aufblasbare Schläuche eignen sich häufig für an einer oder mehreren Seiten offene Bauteile in Negativbauweise mit geschlossenen Werkzeugen. Ein positives Laminieren oder Konfektionieren auf dem labilen Kern ist aufgrund der schwierigen Toleranzbeherrschung häufig nicht möglich. Feste auslösbare Kerne hingegen erlauben einen endkonturnahen Laminataufbau in Positivbauweise um den Kern herum und sind sowohl für die Bauteilherstellung mit offenen wie auch geschlossenen Werkzeugen geeignet. Im vorliegenden Fall wurden frühzeitig feste Kerne ausgewählt, da im bisherigen Prozess der Vorformlingsaufbau ebenfalls um feste Schaumkerne herum erfolgte. Die Bestückungscharakteristik konnte somit fast unverändert beibehalten werden.

Zur Herstellung einteiliger Hohlbauteile aus Faserverbundwerkstoffen mit festem Kern gibt es neben bauteilspezifischen Forderungen folgende generelle Anforderungen an den Kern:

- Der Kern muss robust in der Handhabung sein, um während des Laminierens, Konfektionierens des Bauteils oder Bestückens des RTM-Werkzeugs beschädigungsfrei zu bleiben.

- Der Kernwerkstoff muss druckfest sein, um den globalen oder lokalen Druckbelastungen während des Aushärtprozesses des Bauteils standzuhalten.
- Der Kern muss den bei der Bauteilhärtung wirkenden Temperaturen widerstehen.
- Der Kern muss dem Eindringen des Matrixwerkstoffs des Bauteils entgegenwirken oder dagegen geschützt sein.
- Der Kern muss ganz oder teilweise auslösbar sein, ohne dass dabei die Faserverbundstruktur des Bauteils zerstört wird.

Da die Forderungen nach Stabilität und Robustheit während der Bauteilherstellung, der Beständigkeit gegen den Matrixwerkstoff und die Auslösbarkeit des festen Kerns nach der Bauteilhärtung häufig nicht von einem einzigen Werkstoff erfüllt werden können, werden vielfach Kernverbunde eingesetzt, die aus einem löslichen Formkern und einer meist nicht löslichen, aber flexiblen und robusten Versiegelung bestehen.

2.2.1. Auslösbare feste Kernwerkstoffe

Als feste Kernwerkstoffe kommen grundsätzlich alle Werkstoffe in Betracht, die durch Zugabe einer Lösungssubstanz oder durch mechanisches Auflösen auch bei nur begrenztem externem Zugang zum Kern auslösbar sind und während dieses Prozesses das Faserverbundbauteil nicht schädigen. Dazu zählen:

- Schäume, die mittels eines geeigneten Lösemittels oder eines mechanisch abrasiven Verfahrens aufgelöst werden
- Wasserlösliche, eutektische Salze
- Ausschmelzbare Wachse
- Niedrigschmelzende Metalllegierungen
- Verbundkernwerkstoffe, die aus einem Füllstoff und einem Binder bestehen. Dabei sind aufgrund ihrer Verbreitung hervorzuheben:
 - Gipsbasierte Kerne
 - Kerne auf Quarzsandbasis mit unterschiedlichen Bindern
 - Wasserlösliche Kerne mit einem Füllstoff aus keramischen Mikrohohlkugeln

Für die Erfüllung aller Forderungen aus Umwelt- und Arbeitsschutz scheinen wasserlösliche Kernwerkstoffe hinsichtlich ihrer allgemeinen Verträglichkeit sowie ihres mit üblichem Leitungswasser durchführbaren Lösungsprozesses im Vergleich zu anderen der oben genannten Werkstoffe eine interessante technologische Variante zu sein.

Kerne aus festen Kernwerkstoffen lassen sich je nach Material durch Gießen, Formen oder die mechanische Bearbeitung eines geeigneten Halbzeugs wie zum Beispiel einer Platte oder eines Blocks herstellen. Das je nach Werkstoff gewählte Formverfahren wiederum entscheidet darüber, ob zum Formen ein Werkzeug, beispielsweise ein Gießwerkzeug, benötigt wird und welchen Anforderungen dieses genügen muss.

Mit Ausnahme von niedrigschmelzenden Metalllegierungen, Wachsen und einigen Schäumen sind alle bislang bekannten Kernwerkstoffe offenporiger Natur. Dies gehört meist zum wesentlichen Bestandteil des Kernkonzeptes, damit das zum Auflösen verwendete Flüssigmedium den Kern zügig durchdringen und lösen kann. Problematisch

hierbei ist, dass das im RTM-Verfahren verwendete Infusionsharz schon bei der Infusion in den offenporigen Kernwerkstoff eindringen würde, daher ist eine Versiegelung des Kerns mit einem gegen das Infusionsharz beständigen Werkstoff notwendig.

2.2.2. Versiegelungen

Für die Versiegelung fester Kernverbunde kommen sowohl bei der Applikation flüssige Medien wie auch feste Schichten in Frage. Dabei kann die Versiegelung nach der Aushärtung entweder im Bauteil verbleiben oder später wieder entfernbar sein. Kernwerkstoff und Versiegelung können in einem gemeinsamen Prozessschritt oder separat voneinander ausgelöst werden.

Entscheidend bei der Auswahl von Versiegelungen für Flüssigharzinfusionsverfahren ist in erster Linie die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem verwendeten Harzsystem und die Kompatibilität zu den Prozessparametern Druck und Temperatur. Allerdings muss auch die Gefahr einer Kontamination des Faserverbundlaminats durch Bestandteile der Versiegelung beachtet werden

2.2.2.1. Flüssigversiegelungen

Flüssigversiegelungen fester, meist offenporiger Kerne sind aus der Gießereitechnik hinlänglich bekannt und werden dort Schichten genannt. Sie empfehlen sich speziell für komplexe Geometrien, da sie die Eigenschaft besitzen, sich jeder Oberfläche anpassen zu können. Zur Aufbringung von Flüssigversiegelungen eignen sich sowohl manuelle Verfahren wie Aufpinseln als auch automatisierbare wie Tauchen oder Aufspritzen.

Entscheidend für die Güte von Flüssigversiegelungen sind erreichbare Schichtdicken und deren Toleranzen, Schrumpf während der Trocknung oder Aushärtung sowie die Robustheit und Elastizität, speziell in Eckbereichen. Ebenso muss entweder eine Möglichkeit bestehen, die fertig versiegelten Kerne vor der Verwendung auf Dichtigkeit zu überprüfen oder es muss von vornherein eine hohe Prozesssicherheit gegeben sein.

2.2.2.2. Feste Versiegelungen

Als feste Versiegelungen kommen sowohl dünne Folien als auch dickere, steifere Schichten wie zum Beispiel Blasformkörper in Betracht. Hierbei sind allerdings der Kompatibilität zu komplexen Kerngeometrien Grenzen gesetzt, die je nach verwendetem Versiegelungswerkstoff unterschiedlich sein können.

Während die Schichtdicke fester Versiegelungen relativ einfach kontrolliert werden kann, müssen Verfahren zum Verschließen der Versiegelung, zur Herstellung einer konturgenauen Anlage an den innen liegenden Kern sowie Lösungen für eventuelle Faltenbildung bei komplexen Kerngeometrien gefunden werden.

3. TRAGLENKER

Bei Passagierflugzeugtüren bestimmter Bauart erfüllen Traglenker die Funktion des Scharniers zwischen Flugzeugrumpf und Türe (Bild 2). Dabei tragen sie in geöffnetem Zustand die Türe und übertragen die Lasten auf den Rumpf.

tem Zustand die Türmasse und dienen als Träger für Leitungen und Verkleidungen.



BILD 2. Traglenker im Einbauzustand an der Flugzeugtür

Die Bauteilauslegung wird dabei sowohl vom Normal- wie auch vom Notbetrieb beeinflusst, wobei in beiden Fällen eine hohe Steifigkeit gefordert ist.

Diese Traglenker haben in den letzten Jahren eine Entwicklung von der Aluminiumgussbauweise hin zur Bauweise in Kohlenstofffaserverbundkunststoff (CfK) mit einhergehender Massereduktion erfahren [3]. Das in diesem Anwendungsfall gewählte Herstellungsverfahren ist die RTM-Technik.

Aufgrund der Forderung nach einer hochsteifen Dimensionierung bei gleichzeitig sehr beengtem Bauraum wurde das Bauteil als Torsionskasten mit integrierten Anschlussbeschlägen ausgelegt (Bild 3) und ursprünglich ein Kern aus einem PMI-Hartschaum verwendet, der im Bauteil verblieb. Das Bauteil besteht aus bis zu zehn Kernkammern, die durch durchlaufende Gurte voneinander getrennt sind. Diese Bauweise ist die Grundlage für das vorliegende Vorhaben.

Die Fertigungsstückzahl dieser Bauteile beträgt heute etwa 1000 Stück pro Jahr.



BILD 3. Aluminium- und CfK-Traglenker mit integrierten

ten Anschlussbeschlägen

Zur Herstellung des Traglenkers werden Vorformlinge aus Kohlenstofffasergewebe verwendet, welches mit duroplastischem Binder bepudert ist. Diese Vorformlinge werden auf Drapierwerkzeugen vorbelegt, durch einen Vakuumaufbau kompaktiert und der Binder durch Aufheizen auf eine Temperatur von 110 °C aktiviert. Dieser Preformprozess ermöglicht die Herstellung eines sehr formstabilen, permeablen Vorformlings. Von besonderem Interesse in diesem Dokument ist die Herstellung der Vorformlinge für die so genannten Kernmäntel in Positivbauweise (Bild 4, rechts oben). Diese Vorformlinge werden direkt auf die innen liegenden Kerne kompaktiert, was bedingt, dass die Kerne diesen Temperprozess ohne Beeinträchtigung ihrer späteren Funktion im Fertigungsablauf überstehen.

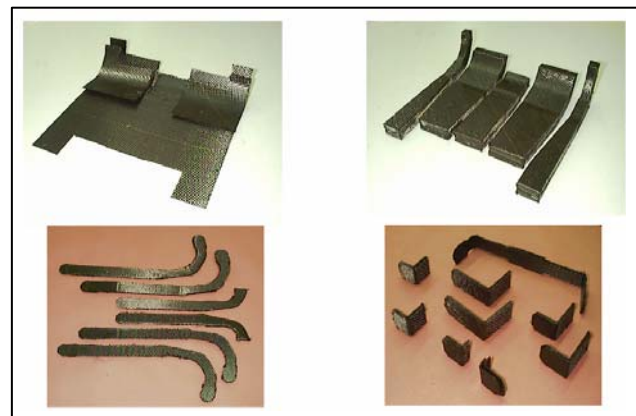


BILD 4. Vorformlinge vor dem Bestücken

Die Injektion des Traglenkers findet in einem zweiteiligen, geschlossenen Werkzeug statt. Bei der Bestückung werden die einzelnen Vorformlinge eingelegt und während des Schließens des Werkzeugs auf Endmaß kompaktiert. Während der Injektion des Infusionsharzes bei einem Absolutdruck von 5 bar ist das Werkzeug auf 120 °C temperiert. Nach vollständiger Harzinfusion wird das Werkzeug auf die Aushärtetemperatur von 180 °C erwärmt (Bild 5). Nach der Entformung wird der Traglenker geputzt, durch mechanische Bearbeitung mit Bohrungen und Ausbrüchen versehen und mit eingeklebten Gewindebuchsen für Anbauteile ausgestattet.

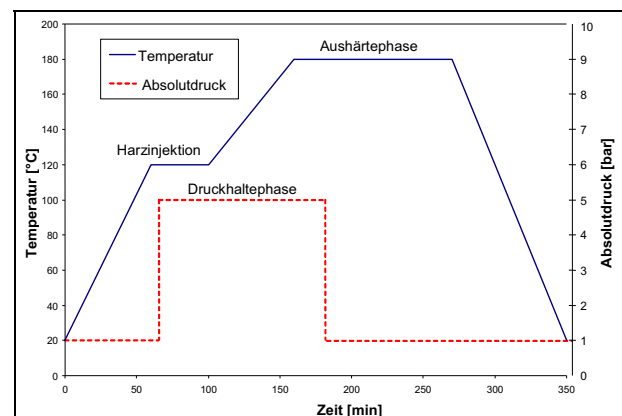


BILD 5. Härtezyklus eines Traglenkers

Nachdem sich dieses Fertigungsverfahren in Kombination mit dem nicht löslichen PMI-Hartschaum prozessstabil in der Serienproduktion etabliert hatte, wurde der im Bauteil

verbleibende Schaumkern als möglicher Ansatz für eine Gewichtsoptimierung identifiziert.

4. ENTWICKLUNG DES HOHLBAUTEILS

Mit der primären Zielsetzung einer weiteren Massereduktion wurde bei der Firma Eurocopter Deutschland GmbH nun auf der Basis des bestehenden Traglenkers durch Substitution des PMI-Hartschaums mit einem auslösbaren Kernverbund ein Hohlbauteil entwickelt. Zunächst wurden die speziellen Anforderungen an den Kernverbund definiert, eine Werkstoffauswahl durchgeführt und die ausgewählten Werkstoffe einer ausgedehnten Versuchsreihe unterzogen. Weiterhin wurden Qualifikationsbauteile erstellt und das Verfahren industrialisiert, um es serientauglich zu machen.

4.1. Werkstoffanforderungen

4.1.1. Kernwerkstoff

Die Anforderungen an den Kernwerkstoff lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Temperaturbeständigkeit $> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Auslösbarkeit mit Wasser nach Temperaturexposition $> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Homogene Dichte (im Rohzustand und ausgehärtet)
- Gute Dimensionsstabilität und Robustheit im ausgehärteten Zustand
- Ausreichende Druckfestigkeit global und lokal
- Geringe Partikelgröße ($< 200\text{ }\mu\text{m}$), für gute Abbildungsgenauigkeit
- Möglichst kurze Härtezeit, auch bei großen Kernvolumen
- Geringe und reversible Feuchtaufnahme im gehärteten Zustand
- Verträglichkeit mit Gesundheits- und Umweltschutzvorschriften (sowohl bei der Kernherstellung als auch beim Ausspülen)
- Mechanische Bearbeitbarkeit im ausgehärteten Zustand
- Einfache und eindeutige Möglichkeit zur Qualitätssicherung
- Möglichst lange Lagerzeit im unausgehärteten Rohzustand

4.1.2. Versiegelung

Aufgrund sehr enger geometrischer Toleranzvorgaben von unter $0,1\text{ mm}$ sowie der Anforderung, mittels optischer Dichtigkeitsprüfung ein einfaches Kriterium zur Qualitätssicherung der Kernverbunde zu etablieren wurde entschieden, eine Versiegelung in Folienform zu verwenden. Dabei war aufgrund der geringen Masse der Folie sowie der in der Regel unkritischen Kontaminierungsgefahr durch die Schutzfolie unerheblich, ob die Folie im Bauteil verbleibt oder später entfernt werden kann.

Die Anforderungen an den Versiegelungswerkstoff sind die folgenden:

- Temperaturbeständigkeit $> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Chemische Beständigkeit gegenüber dem verwendeten Harzsystem
- Schweissbarkeit bei einer Temperatur $> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Gleichmässige Schichtdicke $< 0,1\text{ mm}$

- Porenfreiheit
- Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Belastung

4.2. Werkstoff- und Verfahrensauswahl

Auf der Basis der vorangestellten Anforderungen wurden Kernwerkstoff und Versiegelung ausgewählt. Als Kernwerkstoff bietet sich aufgrund der vollständigen Erfüllung des Forderungskatalogs ein formbarer Werkstoff an, der als Füllstoff keramische Mikrohohlkugeln und einen wasserlöslichen und nicht gesundheitsgefährdenden Binder verwendet [4]. Zur Herstellung werden die Kerne in mehrteiligen Werkzeugen mit Tauchkante geformt (Bild 6) und anschließend durch Wärmeeintrag ausgehärtet.

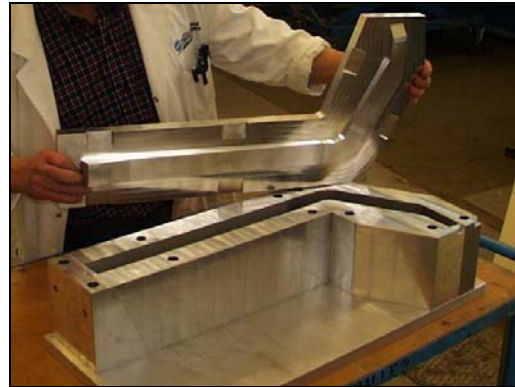


BILD 6. Formwerkzeug für Kerne

Der fertig ausgehärtete Kern (Bild 7) kann entformt und verputzt werden. Allerdings bietet der ausgewählte Füllstoff keine Beständigkeit gegen das flüssige Infusionsharz, daher muss der Kern in einem zweiten Prozessschritt noch mit einer robusten Versiegelung versehen werden.



BILD 7. Ausgehärteter Kern, unversiegelt

Diese Versiegelung wird mit einer Polyamidfolie ausgeführt, da diese sowohl hervorragende Eigenschaften als Harzbarriere aufweist als auch eine Grenzflächenverbindung mit dem verwendeten Harzsystem eingeht. Bild 8 zeigt schematisch den Aufbau des gewählten Kernverbunds [5]. Dabei ist erkennbar, dass die Folie mit einer Schweißnaht verschlossen wird, was einen nicht vermeidbaren Überstand zur Folge hat. Damit dieser Folienfals bei der Konfektionierung und Bestückung des Injektionswerkzeugs nicht zwischen die Vorformlinge gelangen kann, wird er mittels eines Klebebands eng an der Versiegelung fixiert.

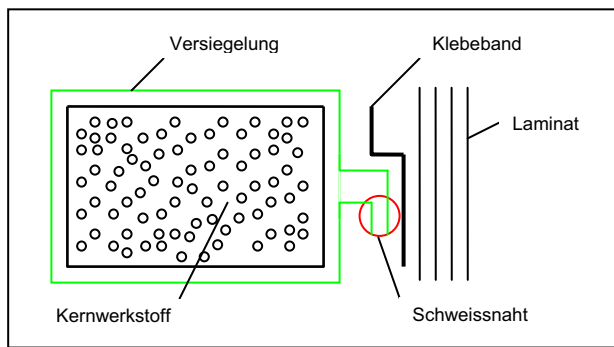


BILD 8. Schematischer Aufbau des Kernverbunds

4.3. Herstellung des Hohlbauteils

Zur Herstellung des kernlosen Traglenkers werden die einzelnen, nach dem zuvor beschriebenen Verfahren hergestellten Kernverbunde auf Fehlstellen überprüft und in die Kernmäntel eingelegt. Aufgrund der Robustheit der Kernverbunde kann dies analog dem Prozess mit PMI-Hartschaum erfolgen. Aus Bild 9 ist schematisch der gesamte Herstellungsprozess mit den wichtigsten Halbzeugen ersichtlich.

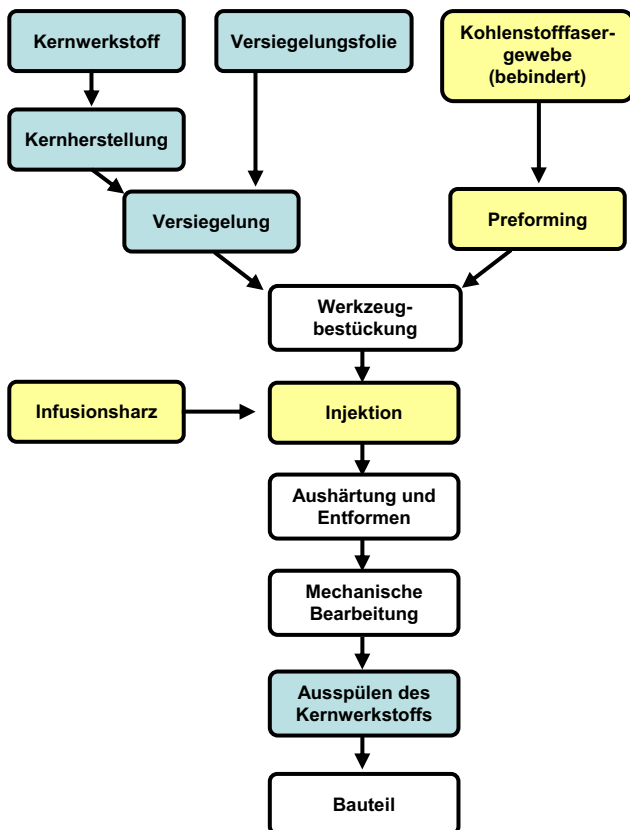


BILD 9. Prozessschaubild Bauteilherstellung

Nach der Bauteilhärtung wird der Traglenker mechanisch bearbeitet und dabei unter anderem mit Bohrungen zur Ausspülung des Kernwerkstoffs versehen. Nach dem Ausspülen wird das Bauteil in einem Ofen getrocknet. Die Versiegelungsfolie verbleibt im Bauteil, eine die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussende Kontaminierung des Laminats über die Schutzfolie wurde durch physikalisch-chemische Untersuchungen von Kernwerkstoff und Folie ausgeschlossen. Im Gegensatz zum schaumge-

füllten Traglenker werden zur weiteren Ausrüstung einseitig einziehbare Gewindebuchsen verwendet (Bild 10).



BILD 10. Ausgespülter kernloser Traglenker

Um im Serienbetrieb das Ausspülen möglichst effizient durchführen zu können, wurde eine Ausspülanlage beschafft, die ausgerüstet mit einer Filtereinheit Füllstoff und die ausgewaschene Wasser-Binder-Lösung automatisch voneinander trennt [6]. Mit dieser Anlage ist es möglich, den löslichen Kernwerkstoff aus einem Traglenker in sehr kurzer Zeit komplett auszuspülen. Die Entsorgung des Kernmaterials nach der Nutzung ist aufgrund der hervorragenden Umweltverträglichkeit unproblematisch. Das aufgefangene Füllmaterial wird im Hausmüll entsorgt und das Abwasser in die Kanalisation eingeleitet, ohne dass hierbei besondere Aspekte des Umweltschutzes zu beachten wären. Dies gilt ebenso für den Arbeitsschutz. Die die Spülung vornehmenden Mitarbeiter benötigen keine besondere persönliche Schutzausrüstung.

Das fertige Bauteil mit ausgelöstem Kern erzielt im Vergleich zu dem Referenzbauteil mit PMI-Schaum als Kernwerkstoff eine Massereduktion von insgesamt 10%.

5. BAUTEILTESTS

Bei den Bauteiltests werden zu Qualifikationszwecken die Steifigkeit, die Bruchfestigkeit sowie das Versagensverhalten überprüft und die Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Prüfmaßnahmen sichergestellt. Dabei war von maßgeblichem Interesse, welche Unterschiede sich zum schaumgefüllten Traglenker ergeben und ob mögliche Harzintrusionen, die beispielsweise durch eine schadhafte Versiegelung des Kerns auftreten können, richtig erkannt werden.

5.1. Zerstörungsfreie Bauteilprüfung

Eine wichtige qualitätssichernde Maßnahme für die Traganker mit Kernen aus PMI-Schaum war die nichtzerstörende Prüfung mittels Computertomographie. Im weiterentwickelten Bauteil mit löslichem Kern wurde daher erprobt, ob es mit dem gleichen Verfahren möglich ist im Bauteil verbleibende Rückstände des Kernverbunds zu detektieren.

Es konnte gezeigt werden, dass es im Falle der Verwendung auslösbarer Kerne im Traglenker über die Computertomographie möglich ist, Harzintrusionen in den Kernen eindeutig, weil kontrastreich sichtbar zu machen (Bild 11). Die Beurteilungsfähigkeit des Laminats wird durch den auslösbaren Kernverbund nicht beeinträchtigt.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, das Bauteil nach der Herstellung einer Wägung zu unterziehen, um mögliche Residuen über die Bauteilmasse zu detektieren. Auf diese Weise kann im Serienbetrieb schnell und einfach sichergestellt werden, dass nach dem Ausspülen des Kernwerkstoffs keine Rückstände im Bauteil verblieben sind.

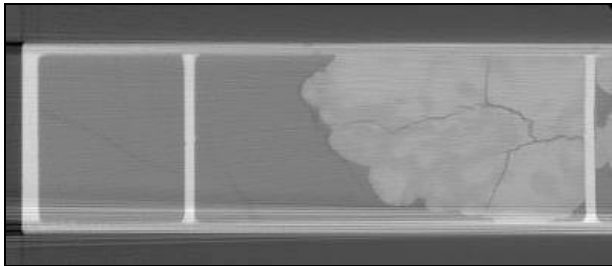


BILD 11. Computertomographie-Bild eines teilgefluteten Kerns mit beschädigter Versiegelungsfolie

5.2. Zerstörende Bauteilprüfung

Als zerstörende Bauteilversuche wurden sowohl Schliffbilder aus Qualifikationsmustern präpariert, als auch ein Bruchlastversuch am kompletten Bauteil durchgeführt.

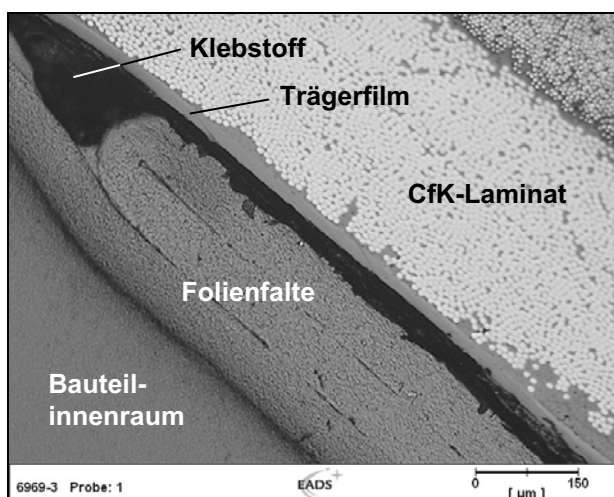


BILD 12. Schliffbild des Faltenbereichs der Versiegelung

Bei den Schliffbildern war von besonderem Interesse, ob sich auf der Bauteilinnenseite Rückstände des Kernwerkstoffs nachweisen lassen, ob harzreiche Zonen entstehen und wie stark mit Klebeband überklebte, verschweisste Falten auftragen. Aus Bild 12 ist im vormals mit Kernwerkstoff gefüllten Bauteilinnenraum exemplarisch erkennbar, dass zum einen nach dem Ausspülen keine Residuen des Kernwerkstoffs im Bauteil verbleiben und sich insgesamt die unterschiedlichen Werkstoffe sehr kontrastreich unterscheiden lassen. Der Trägerfilm sowie der Klebstoff des verwendeten Klebebands sind eindeutig detektierbar. Weiterhin ist erkennbar, dass das CfK-Laminat sehr eng am Kernverbund anliegt und sich die Folienfalte blasenfrei an den Kern angelegt hat. Insgesamt konnte ermittelt werden, dass sich in der angewendeten Bauweise über das gesamte Bauteil sowohl das Laminat wie auch die Versiegelung hervorragend ausbilden, sofern kein Harz in den Kern aufgrund einer beschädigten Versiegelung eindringt.

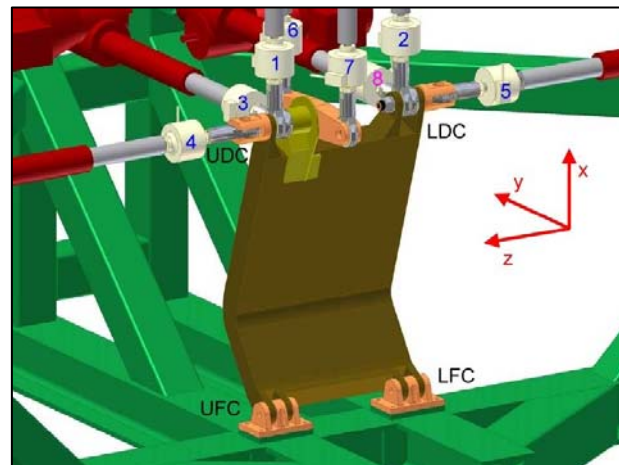


BILD 13. Versuchsaufbau des Bruchversuchs

Für den Bruchlastversuch ist ein komplexer Lastfall definiert, der exemplarisch die maximalen Anforderungen wie beispielsweise auf die Tür wirkende Windlasten an den Traglenker widerspiegelt. Dazu wird der Traglenker analog seines Einbauszustands im Flugzeug rumpfseitig an zwei Beschlägen befestigt und auf der Türseite in ein hydraulisch betriebenes Lastgeschirr eingespannt (Bild 13). Nachdem derselbe Versuchsaufbau bereits für den Traglenker mit PMI-Schaumkernen durchgeführt wurde, konnte bei dem vorliegenden Versuch ein Vergleich der Bruchkräfte sowie des jeweiligen Steifigkeitsverlaufs vorgenommen werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Steifigkeit in z-Richtung, da diese mit der Verformung unter Betriebslast korreliert werden kann und großen Einfluss auf die Kinematik der Passagiertüre hat. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Steifigkeit des kernlosen Traglenkers etwa 5% unter derjenigen des mit PMI-Schaum gefüllten Traglenkers liegt (Bild 14). Dieser Steifigkeitsabfall ist für die vorliegende Passagiertüre akzeptabel.

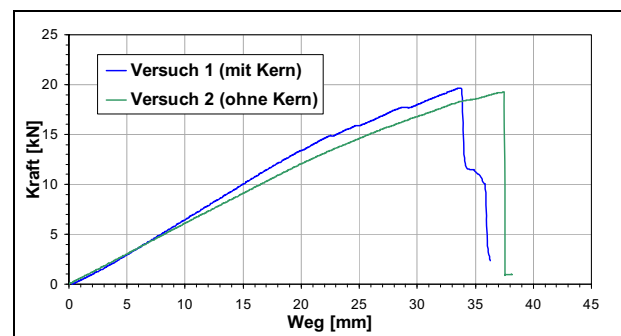


BILD 14. Vergleich der z-Steifigkeiten mit und ohne Kern

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts bei der Firma Eurocopter Deutschland GmbH wurde ein Traglenker für Passagierflugzeuggtüren anstelle mit PMI-Schaumkernen erfolgreich in kernloser Hohlbauweise mit einem wasserlöslichen Kernwerkstoff realisiert. Dadurch konnte das Primärziel einer angestrebten Massenreduktion von 10% erreicht werden. Darüber hinaus wurde eine prozesssichere, vollständige Entfernung des Kernwerkstoffs erzielt und ein sehr gutes Fertigungsumfeld hinsichtlich Umwelt- und Arbeitsschutz geschaffen.

Weiterhin lässt sich aufgrund der erfolgreichen Bauteil- und Prozessentwicklung ableiten, dass großes Potenzial besteht, auslösbare Kernverbunde bei weiteren Hohlbauteilen oder auch Bauteilen mit einfachen oder mehrfachen Hinterschnitten zu verwenden. Dazu könnten auch andere Fertigungsverfahren als die RTM-Technik zur Anwendung kommen. Ebenso ist denkbar, auch bei anderen Sandwichbauteilen die bisherigen Kerne durch auslösbare Kernverbunde zu substituieren. Dazu eignen sich solche, deren Kerne entweder nicht zur Lastübertragung verwendet werden oder deren Funktion im Betrieb durch andere geeignete Maßnahmen ersetzt werden kann, beispielsweise durch zusätzliche Rippen oder dickere Deckhäute. Weitere Schritte zur Optimierung des Herstellungsprozesses könnten der Ersatz manueller Fertigungsschritte durch einen höheren Grad der Automatisierung, beispielsweise bei der Kernversiegelung, sowie die Verwendung alternativer Kern- und Versiegelungswerkstoffe zur weiteren Steigerung der Kosteneffizienz sein.

- [1] T.M. Kruckenberg, R. Paton (Hrsg.), Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998
- [2] M. Flemming, G. Ziegmann, S. Roth, Faserverbundbauweisen, Halbzeuge und Bauweisen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1996
- [3] W. Buchs, S. Kunze, T. Springer, C. Weimer, Development of CFRP Hinge arms for Aircraft Passenger Doors, SAMPE Europe 28th International Conference, 2.-4. April 2007
- [4] R. Vaidyanathan et al, Water Soluble Tooling Materials for Complex Polymer Composite Components and Honeycombs, SAMPE Journal, Vol. 39, No. 1, pp. 22-33, January/February 2003
- [5] J. Buchner, S. Kunze, Verfahren zur Herstellung eines wasserlöslichen Formkerns, Deutsches Patent DE 10 2005 011 930 B3, 2005
- [6] U.C. Seidel, CFK – Werkstoff mit Zukunft, Komplexe Spültechnik für die Luftfahrtindustrie, mo - Metalloberfläche 10/2005, 59. Jahrgang, S. 23