

1. Bachelorarbeit

**Herstellung von Faserverbund-
Laminaten mit Infusionstechnik
sowie Untersuchung des
Harzfließverhaltens an einfachen
Strukturen**

Vorgelegt von: Florian TROGER

Matrikelnummer: 10 105 87 035

Betreuer: DI (FH) Eva WINDBACHER-SCHWAGER

Datum der Abgabe: 26.02.2013

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema

"Herstellung von Faserverbund-Laminaten mit Infusionstechnik sowie Untersuchung des Harzfließverhaltens an einfachen Strukturen"

von mir selbständig verfasst wurde und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet wurden.

Graz, den 26.02.2013

Florian Troger

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde während des 6. Semesters an der Fachhochschule FH JOANNEUM des Studienganges Luftfahrt/Aviation parallel zu den laufenden Vorlesungen erarbeitet und verfasst. Für mich stellte jene eine willkommene Abwechslung zu meiner theoretischen Ausbildung dar, da man gewonnenes Wissen in die Praxis umsetzen konnte und man sich so eine wertvolle Vertiefung und Erweiterung in jener Thematik der Faserverbundwerkstoffe verschaffte.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlichst bei meiner Projektbetreuerin Dipl. –Ing. (FH) Eva Windbacher-Schwager bedanken, welche mich jederzeit tatkräftig mit fachlichem Wissen und ihrem Engagement unterstützte. Ebenso gilt mein Dank meinen Freunden und Mitstudenten, welche mir bei meinen Versuchen im Labor kameradschaftlich zur Seite standen und mit Verständnis und konstruktiven Kritiken es mir immer wieder ermöglichten Probleme aus dem Weg zu räumen.

Schlussendlich gebührt ein großer Dank meiner Freundin und meiner Familie, die mich in jeder Lebenslage unterstützen und mir überhaupt erst dieses Studium ermöglichten.

Graz, 26.02.2013

Florian Troger

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iv
Abstract	v
Abbildungsverzeichnis.....	vi
Einleitung	1
1. Methoden	2
1.1. Faserverbundstoffe	2
1.2. Verstärkungsfasern	4
1.2.1. Faserhalbzeuge.....	4
1.2.2. Glasfaser	8
1.2.3. Kohlenstofffaser	9
1.3. Matrixwerkstoffe	12
1.3.1. Duromere.....	13
1.3.2. Thermoplaste.....	14
1.4. Herstellungsverfahren von FVK-Laminaten	15
1.4.1. Handlaminierverfahren	15
1.4.2. Infusionsverfahren	18
1.4.3. Aufbau.....	19
1.4.4. Hilfsstoffe	20
1.4.5. Harzsysteme.....	22
1.4.6. Formwerkzeug	22
1.4.7. Vorgehensweise.....	23
2. Ergebnisse	27
2.1. GFK- Platten.....	27
2.2. GFK- Streifen.....	31
2.3. Sandwich Lamine	34
2.4. Erstellung von Depron-Sandwichkerne	37
2.4.1. Erstellung eines Flügelsegmentes	38
2.4.2. Erstellung eines Sandwichkerns für den JXP-V-micro	43
3. Diskussion	46
4. Zusammenfassung und Ausblick	47
Literatur	49

Kurzfassung

Durch den vermehrten Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, ins besonders Faserverbundkunststoffen (FVK), in der modernen Industrie spielt die Entwicklung von kostengünstigen und serientauglichen Verarbeitungsprozessen eine essentielle Rolle. Um die Entwicklungskosten zu senken und einen schnellen Bau von Prototypen zu erlauben bedarf es schnelle und kostengünstige Herstellungsverfahren.

Das Infusionsverfahren, oder auch RIFT-Verfahren (**R**esin **I**nfusion with **F**lexible **T**ooling) genannt, stellt ein solches Herstellungsverfahren dar, welches sich vorwiegend für die Produktion von Prototypen und Kleinserien eignet. Im Gegensatz zum Handlaminierverfahren wird ein direkter Kontakt mit den meist toxischen Harzsystemen reduziert und ein höherer Faser-Volumengehalt erreicht.

Grundlegende Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen werden diskutiert und Funktionsweise des Infusionsprozesses genauer betrachtet. Die Untersuchung des Harzfließverhaltens an einfachen Geometrien und möglichen Materialien zur Erstellung von Sandwichbauteilen ist Inhalt dieser Arbeit.

Gewonnenes Wissen soll Grundlage für einen vermehrten Einsatz des Infusionsverfahrens schaffen und zukünftigen Projekten eine Alternative zu bisher angewandten Verfahren ermöglichen.

Abstract

Due to the increased use of composite materials in the modern industry the development of cost efficient manufacturing methods are needed which are also suitable for series production. Especially for obtaining lower costs for development of prototypes as well as the future construction of them within short time circles fast and cost efficient manufacturing methods are needed for this application.

The Resin Infusion with Flexible Tooling (RIFT) method, or also known as the Seemann Composites Resin Infusion Molding Process (SCRIMP), is one of the available manufacturing methods which is suitable small batch series and prototypes. In contraction to the manual hand laminating process a direct contact with the manly used toxic matrix systems is within the RIFT-method avoided and with the correct application higher fiber volume content can be reached.

The elementary properties of composite materials used for this method are discussed and a closer look at the functionality and setup of the RIFT process will be handled in this theses. Therefore the focus is set on the resin flow behavior of used matrix system at simple geometries as well as the possible material use that can be applied for the construction of sandwich components.

The reached knowledge should be base for an increased use of the RIFT method in composite construction projects and should constitute a possible opportunity for methods used up to now in the JXP-V project.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wabenstruktur mit umschließenden Fasern eines Blattstängels einer <i>Strelitzia reginae</i> ..	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Leinwandgewebes [Bode, R., Seite 11,[3]]	6
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Köpergewebes [Bode, R., Seite 11,[3]]	6
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Atlasgewebes [Bode, R., Seite 11,[3]].....	6
Abbildung 5: Unterschiede der Drapierbarkeit von Leinwand- und Köpergewebe [Cichosz, 2012,[4]]	7
Abbildung 6: Glasfaserlagen als Leinwandgewebe ausgeführt.....	9
Abbildung 7: Bruchverhalten unterschiedlicher Faserwerkstoffe [R&G,2013, [7]]	10
Abbildung 8: Ständer bestückt mit Gewebearten jeglicher Art.....	11
Abbildung 9: Erstellung eines Aramid-Waben-Sandwiches im Handlaminierverfahren.....	16
Abbildung 10: Aufbau des Vakuumverfahrens.....	17
Abbildung 11: Handlamine in einer Membranpresse während des Aushärtprozesses	17
Abbildung 12: Infusion eines Verkleidungsteils eines Snowmobiles mittels RIFT-Verfahren	18
Abbildung 13: Schematische Aufbau des SCRIMP-Verfahrens [Cichosz, 2012,[4]].....	19
Abbildung 14: Hilfsstoffe Infusionsverfahren.....	20
Abbildung 15: Formwerkzeug eines Verkleidungsteiles eines Schneemobiels	23
Abbildung 16: Manuelles Einlegen und Ausrichten der Fasergewebe.....	24
Abbildung 17: RIFT-Aufbau zu Infusion einer GFK-Platte	25
Abbildung 18: Verschiedene Arten von Ein- bzw. Absaugleitungen.....	26
Abbildung 19: Bearbeitungswerkzeug von Fasergeweben	28
Abbildung 20: Harzfließverhalten an einer 50x40cm Laminatplatte	29
Abbildung 21: Laminatoberfläche mit und ohne die Verwendung von Abreisgewebe.....	30
Abbildung 22: Fließgeschwindigkeitsmessung bei unterschiedlicher Laminatsdicke	31
Abbildung 23: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf an untersuchten Laminatsstreifen	32
Abbildung 24: Unterschiedlicher Tränkungsgrad bei gleicher Druckdifferenz an verschieden dicken Laminaten.....	33
Abbildung 25: Nicht durchtränkte Laminatsstellen nach einer Länge von 90 cm	34
Abbildung 26: Werkzeug zur Perforierung der Wabenkerne.....	36
Abbildung 27: Verschieden perforierte Sandwichkerne für RIFT-Verfahren.....	36
Abbildung 28: Formwerkzeug zur Erstellung eines Flügelprofils	38
Abbildung 29: Verformungsverhalten von Depron bei thermischer Einwirkung	39
Abbildung 30: An die Kontur angepasster Depronkern	40
Abbildung 31: Lagenaufbau des trockenen Sandwichbauteils.....	41
Abbildung 32: Laufendes RIFT-Verfahren des oberen Flügelsegments.....	41
Abbildung 33: Fertige und bereites entformte Unterseite des Flügelsegmentes	42
Abbildung 34: Fertige und bereites entformte Oberseite des Flügelsegmentes	42

Abbildung 35: Fehlstelle im Laminat durch Faltenwurf	43
Abbildung 36: JXP-V Projekt. Original und Windkanalmodell.....	44
Abbildung 37: Fertiger Depronkern der untern Schale	45
Abbildung 38: Fertiger Depronkern der oberen Schale	46

Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung von Industrie und Technik ermöglicht den Einsatz von neuartigen Anwendungs- und Verarbeitungsmethoden von Werkstoffen und eröffnet somit bis dato unmöglich gehaltene Projekte in die Realität umzusetzen. Von relativ einfachen Gleitflugmaschinen bis zu modernen Verkehrsflugzeugen mit über 800 Passagieren an Bord bedarf es nicht einmal 120 Jahr. Dies war natürlich nur dadurch möglich, dass parallel eine ständige Erneuerung und Weiterentwicklung der Herstellungsprozesse stattfand und neue Einsatz- und Verarbeitungsmethoden von Werkstoffen entwickelt wurden. War es einst die Verwendung von Duraluminium, welches erstmals die Konstruktion von freitragenden Ganzmetallflugzeugen erlaubte sind es heutzutage die Faserverbundkunststoffe (FVK), die eine entscheidende Rolle zur Effizienzsteigerung und Sicherheit moderner Verkehrstechnologien beitragen.

Die aktuell angewandten Herstellungsmethoden von FVK-Bauteilen sind jedoch im Vergleich zur konventionellen Metallbauweise noch so zeit- und kostenintensiv, dass ein flächiger Einsatz bis jetzt nur in wenigen Branchen möglich ist, in denen geringe Stückzahlen, Leichtbau und Hochleistungsanforderungen an die Struktur dominieren. Die anzuwendenden Verfahren zur Herstellung von FVK-Bauteilen sind stark von der Geometrie, der geforderten mechanischen Eigenschaften und der Stückzahl abhängig und müssen bereits in der Konstruktion und Auslegung eines Bauteils berücksichtigt werden.

Das Infusionsverfahren, oder auch RIFT- Verfahren (Resin Infusion with Flexible Tooling), stellt eine besonders kostengünstige und einfache Herstellungsmethode da und findet deshalb vor allem in der Fertigung flächiger Prototypen und Kleinstserien Anwendung. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird nun gezielt auf die Funktionsweise und Eigenschaften dieses Verfahrens eingegangen. Aus Versuchen gewonnenes Wissen über Harzfließverhalten, verarbeitete Materialien und erhaltene Ergebnisse soll als Grundlage für zukünftige Projekte dienen.

1. Methoden

Das folgende Kapitel befasst sich mit den Grundlagen über faserverstärkte Kunststoffe und dient zum weiteren Verständnis der vorliegenden Arbeit. Fundamentale Eigenschaften von Faser- und Harzsystemen werden erläutert und Funktionsweisen von gängigen Herstellungsverfahren dargelegt.

1.1. Faserverbundstoffe

Ein Faserverbundwerkstoff wird durch das Zusammenfügen von mindestens 2 Werkstoffen hergestellt, welche zum einen eine hochfesten Verstärkungsfasern und zum anderen eine formgebende Matrix sind. Durch diese Faser-Matrix-Kombination lassen sich deutlich höhere Steifigkeiten und Festigkeiten von Werkstoffen erzielen als in kompakter Form. Die Faserverbundbauweise ist jedoch keine Erfindung der heutigen Technik, sondern eine Evolutionslösung der Natur. Diese in der Flora primär vorkommende Bauart findet sich exemplarisch in Tragstrukturen von Pflanzen, wie Blattstängel, oder Baumstämme wieder. Die hochfesten Cellulosefasern werden z.B. bei Holz in eine Matrix aus Lignin eingebettet, welches für die Festigkeit und Stabilität eine maßgebende Größe ist.

Für die Herstellung von FVK werden in der Industrie vorwiegend Glasfasern bzw. Kohlenstofffasern verwendet, welche durch eine Kunststoffmatrix gestützt und in Form gehalten werden. Die lastausgerichteten Fasern nehmen primär die herrschenden Zugkräfte auf, während die Matrix eine Kraftübertragung zwischen den einzelnen Fasern bewerkstelligt und neben dem Faserschutz eine Stützfunktion der Faser bei Druckbelastung erfüllt.

FVK besitzen im Vergleich zu Leichtmetallen eine deutlich höhere Steifigkeit bei gleichzeitig geringerer Dichte. Korrosionsbeständigkeit, Dauerfestigkeit und geringe thermische Ausdehnung sind Grund für die vermehrte Anwendung in verschiedensten Bereichen.

In Hochleistungsbereichen wie z.B. in der Luft- und Raumfahrt in denen Leichtbau einen großen Stellenwert einnimmt gelten besonders hohe Maßstäbe bezüglich Gewichtsreduktion und maximaler Bauteilsteifigkeit.

Dies wird durch den Einsatz von Sandwichbauteilen erreicht, welche aus mehreren Lagen unterschiedlicher Materialien aufgebaut sind. Dabei umschließen die kraftaufnehmenden Decklagen einen meist sehr leichten und relativ weichen Kernwerkstoff, welcher jene auf Abstand hält. Dadurch können sehr biege- und beulsteife Bauteile bei gleichzeitig geringem Gewicht hergestellt werden.

Ein Beispiel für die aus der Flora stammende Konstruktionsweise wird in Abbildung 1 gezeigt. Gut zu erkennen ist die regelmäßige Wabenstruktur des Inneren der Pflanze ummantelt von schützenden und kraftaufnehmenden Pflanzenfasern.



Abbildung 1: Wabenstruktur mit umschließenden Fasern eines Blattstängels einer *Strelitzia reginae*

1.2. Verstärkungsfasern

Verstärkungsfasern besitzen relativ zu ihrer Länge einen vergleichsweise geringen Querschnitt und bestimmen primär die mechanischen Eigenschaften des FVK. Während die Matrix vorwiegend eine stützende und schützende Funktion übernimmt, ist die Faser größtenteils für die Aufnahme der angreifenden Zuglasten in ihrer Längsrichtung verantwortlich. Sie lassen sich grob unterteilen in:

- Organische Naturfasern (Jute, Sisal)
- Mineralische Naturfasern (Aspest)
- Organische Synthetikfasern (Aramid)
- Anorganische Synthetikfasern (Glasfaser, Kohlefaser)

Die meisten Fasern besitzen anisotrope (richtungsabhängige) Materialeigenschaften, was bedeutet dass deren Kennwerte, wie Festigkeit und Elastizitäts-Modul E stark von ihrer Belastungsrichtung abhängen. Definierende Kenngrößen einer Faser bzw. eines Faserbündels (Roving) sind unter anderem:

- | | |
|---|--|
| • Durchmesser pro Einzelfaser/Filament | in [μm] |
| • Masse des Rovings in g pro km Länge
(auch Feinheit/ Titer genannt) | in [tex]
1 tex= 1 g Masse pro 1 km Roving |
| • Anzahl der Filamente pro Roving | in [k]
1000 Filamente pro [k] im Roving |

1.2.1. Faserhalbzeuge

Typischerweise werden Rovings zu Faserhalbzeugen (FHZ) weiterverarbeitet um die Handhabung zu und so die Verarbeitung zu erleichtern. Die meisten Verstärkungsfasern werden wie in der Textilindustrie verwoben, verstrickt oder geflochten um eine schnellere

und einfachere Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Da die Verstärkungsfasern ihre höchsten mechanischen Eigenschaften bei axialer Zugbelastung erreichen, muss bei der Konstruktion von Bauteilen darauf geachtet werden, dass die Fasern in Richtung der angreifenden Last gelegt werden.

Die Verarbeitungsverfahren kommen hauptsächlich aus der Textilindustrie und führen zu den gängigen FHZ wie:

- Gelege
- Gewebe
- Geflecht
- Gestick

Gelege:

Eine maximale Faserfestigkeit kann nur durch eine unidirektionale, streng parallele Ausrichtung der Fasern zum herrschenden Kraftfluss erlangt werden. UD-Faserband ist das einfachste FHZ und erlaubt eine gezielte Ausrichtung der einzelnen Fasern in Kraftrichtung. Die Rovinge werden mit sehr dünnen Fäden quer zur Faserrichtung zu UD-Bändern mit konstanter Dicke (ca. 0.1- 0.2mm) zusammengefasst. Durch die kaum vorhandene Ondulation können die Fasern mit ihren maximalen mechanischen Eigenschaften eingesetzt werden. Multiaxialgelege wird durch die Schichtung mehrere unidirektionalen ausgerichteter Faserlagen erhalten, welche miteinander vernäht werden. Häufig werden Lamine mit der Faserausrichtung ($0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ$) hergestellt, um eine gleichmäßige Kraftaufnahme in mehreren Richtungen zu erreichen.

Gewebe:

Das Gewebe ist die meist verwendete Form von FHZ. Die aus der Textilindustrie übernommenen Verarbeitungsmethoden stellen ein bidirektionales Gewebe her, welches aus Kettfäden und Schussfäden besteht. Die Kettfäden verlaufen in Produktionsrichtung und werden von den normal dazu verlaufenden Schussfäden zu Stoffbanen verwoben. Je nach Gewebeart wird die Sequenz von Heben und Senken der Kettfäden und das Durchstoßen der Schussfäden variiert, um unterschiedliche Eigenschaften des Gewebes zu erhalten.

Hauptunterscheidungsmerkmal stellt die Drapierbarkeit dar, welche die Anschmiegsamkeit des Gewebes beschreibt. Die wichtigsten Gewebearten sind:

- Leinwand (über 1, unter 1)
- Köper (über 2, unter 2)
- Atlas (über 1, unter 4, oder mehr)

Die drei Gewebearten sind in Abbildung 2-4 schematisch dargestellt.

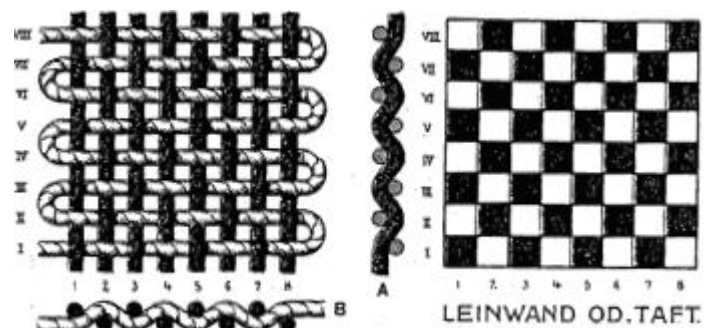


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Leinwandgewebes [Bode, R., Seite 11,[3]]

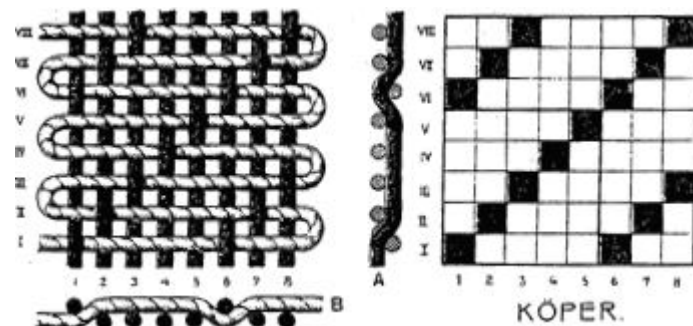


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Köpergewebes [Bode, R., Seite 11,[3]]

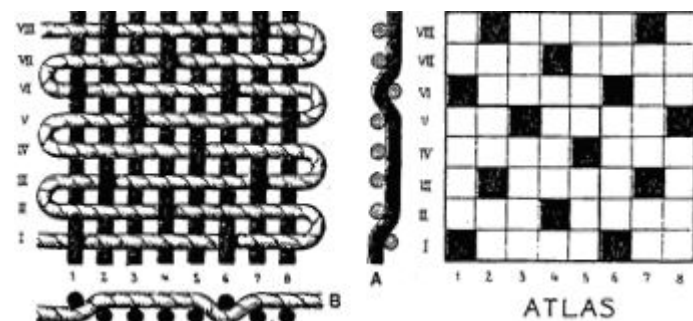


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Atlasgewebes [Bode, R., Seite 11,[3]]

Das Leinwandgewebe besitzt die höchste Faserwelligkeit und durch den ständigen Richtungswechsel ist es äußerst steif und kaum drapierbar. Die hohe Ondulation bewirkt eine geringere Festigkeit der Fasern als sie bei dem Einsatz von UD- Bändern erreicht würde.

Atlasgewebe kann am stärksten drapiert werden und besitzt durch die geringe Faserondulation bessere mechanische Eigenschaften. In der Verarbeitung ist es sehr verzugsgefährdet und franst viel schneller aus als das steifere Leinwandgewebe. Köper besitzt eine geringere Faserwelligkeit als Leinwand und ist wie jenes symmetrisch zur Mittelachse mit Kett- und Schussfäden durchzogen. Die unterschiedliche Drapierbarkeit von Leinwand und Köpergewebe ist in Abbildung 5 dargestellt.

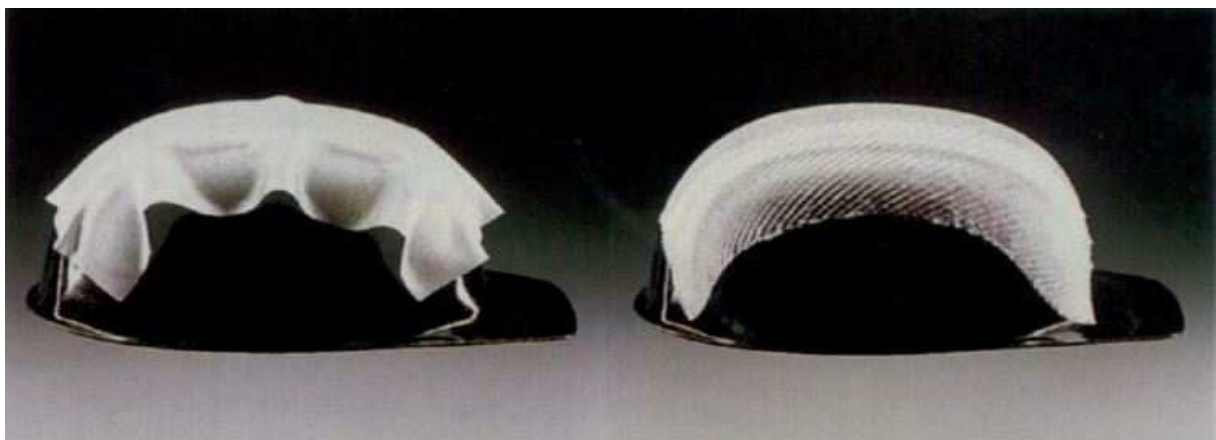


Abbildung 5: Unterschiede der Drapierbarkeit von Leinwand- und Köpergewebe [Cichosz, 2012,[4]]

Geflecht:

Geflechte sind FHZ die sich vor allem für kreisrunde Bauteile und mit variierender Querschnittsform eignen. Mit der aus der Textilindustrie kommenden Verarbeitungsmethode können sämtliche Arten von Rovings verflochten werden, deren Faserwinkel im Gegensatz zu Geweben positiv oder negativ sein kann und nicht nur 90° beträgt. Die starke Ondulation der Fasern wirkt sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften aus.

Gestick:

Gesticke besitzen eine starke Faserwelligkeit und kommen vorwiegend für die lokale Verstärkung zum Einsatz.

Da Glas-, bzw. Kohlefasern hauptsächlich zur Erstellung von FVK-Bauteilen zur Anwendung kommen, werden jene im folgendem genau beschrieben.

1.2.2. Glasfaser

Glasfasern sind die gebräuchlichsten Verstärkungsfasern für FVW. Sie sind preisgünstig und besitzen gute mechanische, thermische und chemische Eigenschaften. Sie werden aus geschmolzenem Glas gezogen und besitzen einen gleichmäßigen, runden Querschnitt mit üblichen Durchmessern von 3,5-24µm. Die einzelnen Filamente sind durchsichtig, erscheinen jedoch durch Lichtbrechung als weiße Faser. Je nach Zusammensetzung des Glases können unterschiedliche Eigenschaften der Faser erreicht werden, was ihre vielfältige Einsatzfähigkeit ermöglicht. E-Glas (E= Electric) wird aus einer alkalifreien Glasschmelze gewonnen und gehört mit 90% Marktanteil zur Standardglasfaser. Sie ist ein ausgezeichneter Isolator und transparent für elektromagnetische Wellen. Anwendung findet E-Glas z.B. in der Herstellung von Platinen, oder Antennenabdeckungen.

Weitere GF-Arten sind unter anderem:

- | | |
|---|---|
| • R-Glas (R= Resistance): | erhöhte Festigkeit |
| • M-Glas (M= Modulus): | erhöhter E-Modul |
| • C-Glas (C= Chemical): | höhere Säurebeständigkeit |
| • ECR-Glas (E- Glas Corrosion Resistant): | höhere Korrosionsbeständigkeit |
| • D-Glas (D= Dielectric): | niedriger dielektrischer
Verlustfaktor |

Das geschmolzene Glas wird durch feine Düsen zu ca. 2mm dicken Fäden geformt, welche noch im zähflüssigen Zustand auf ihren Enddurchmesser gestreckt werden. Durch das Besprühen mit einer Schlichte werden die spröden Glasfilamente geschützt und mit mehreren Filamenten zu Spinnfäden verklebt.

Zur Herstellung von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit Gießharzen werden jene entweder zu Faserbündeln (Rovings), Matten oder Geweben weiterverarbeitet. In Verbindung mit Thermoplasten als Matrixsystem kommen GF auch als einzelne Fasern oder Filament zu Einsatz (Kurz-, oder Langfaser).

Dank der geringen Materialkosten und vielseitigen Materialeigenschaften findet die GF ein weites Einsatzspektrum in der Industrie. Im Baugewerbe z.B. wird GF mit Beton vermischt,

um dessen Festigkeit zu erhöhen. Im Bootsbau und der Automobilindustrie wird GFK zur Herstellung von Schiffsrümpfen und Verkleidungsteilen hergenommen.

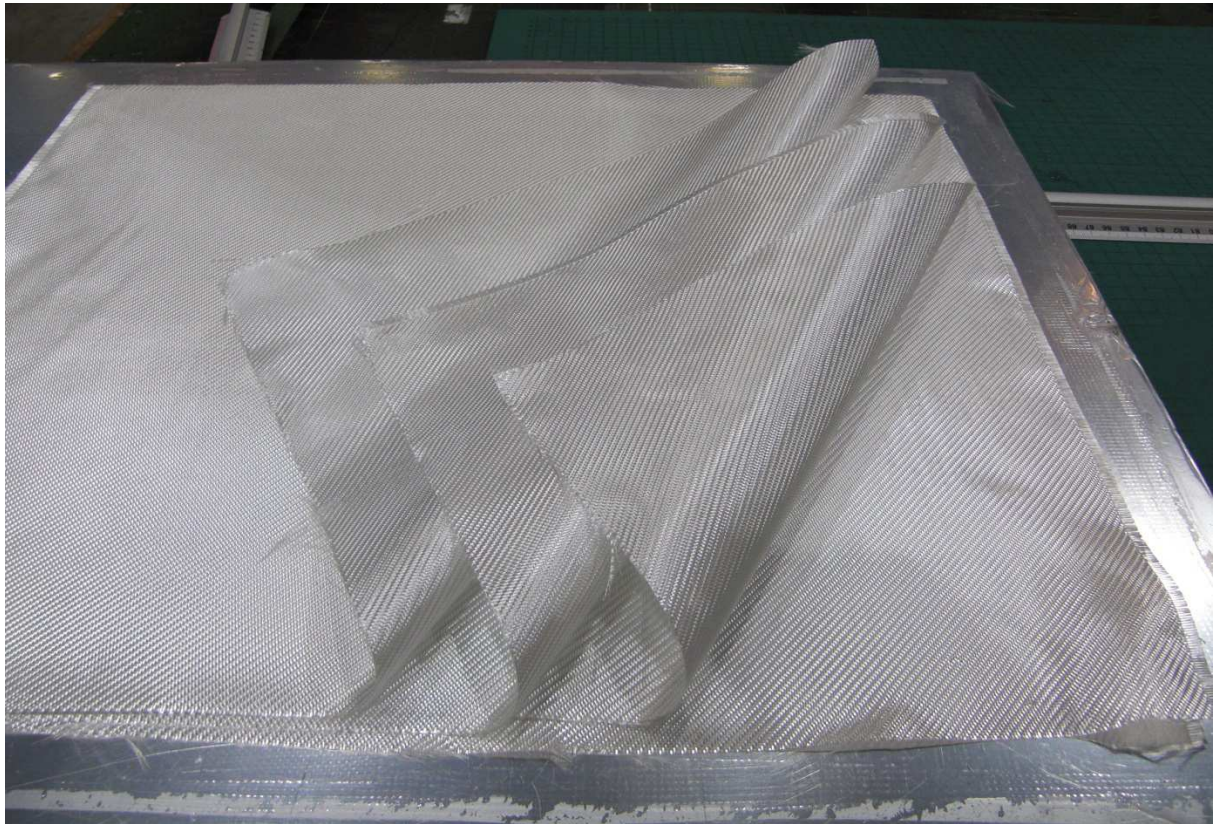


Abbildung 6: Glasfaserlagen als Leinwandgewebe ausgeführt

In der Luftfahrt wird GFK vor allem für sekundäre Strukturteile, oder als Antennenverkleidung genutzt. Leichte Sandwichbauteile im Kabinenbereich können durch sehr feinstrukturierte GF-Gewebe kostengünstig hergestellt werden. GF ist nicht entflammbar und im Gegensatz zu Aramid oder Kohlefaser isotrop. E-Glas wird auch zur galvanischen Isolation von CFK und Metallen verwendet. Hinzukommend lassen sich Schäden und Delaminationen an FVK-Bauteilen leichter erkennen, da sich CFK infolgedessen matt weiß verfärbt.

1.2.3. Kohlenstofffaser

Kohlenstofffaser (CF) besteht nahezu aus reinem Kohlenstoff und wird wegen ihrer hohen Steifigkeit und geringen Dichte für konsequenten Leichtbau verwendet. Sie besitzt einen eher nierenförmigen Querschnitt und werden mit Durchmessern zwischen 5- 10 μ m hergestellt.

C-Fasern weisen eine weit aus höhere Festigkeit und Steifigkeit als G-Fasern auf und kommen durch das geringe spezifische Gewicht vorwiegend in Hochleistungsbereichen zum Einsatz.

CF ist im Gegensatz zu GF stark anisotrop und besitzt ein leicht negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die hohe Steifigkeit spiegelt sich in dem spröden Bruchverhalten des Werkstoffes wieder. In einem Spannungs- Dehnungsdiagramm zeigt sich dies bei zunehmender Spannung durch einen linearen, schnell ansteigenden Verlauf der Materialkurve, gefolgt von einem abrupten Versagen der Faser.

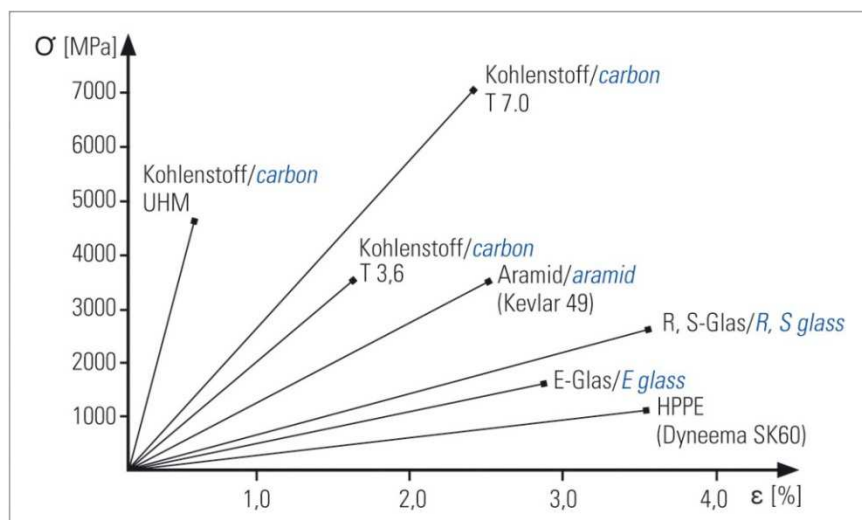


Abbildung 7: Bruchverhalten unterschiedlicher Faserwerkstoffe [R&G,2013, [7]]

Zur Erzeugung von C-Fasern werden hauptsächlich zwei Ausgangsprodukte verwendet:

- Pech (engl.: pitch)
- Poly-Acrylnitril (PAN)

Aus dem Pech werden mit hohem Aufwand an Reinigungs- und Aufbereitungskosten Fasern hergestellt, die sich durch hohe Steifigkeit sowie besonders gute thermische und elektrische Eigenschaften auszeichnen. Die Festigkeit ist jedoch deutlich geringer, als die der PAN-Faser, weshalb hauptsächlich PAN-Fasern im Flugzeugbau zum Einsatz kommen. Eine Bruchdehnung von bis zu 3% und somit eine Verbesserung der Schlagzähigkeit lässt sich durch die Verarbeitung von PAN erzielen. Durch Pyrolyse wird aus der dickeren und weißen Kunstfaser (precursor) sämtlicher Nicht-C-Anteile entfernt, wodurch eine Faser aus fast reiner Kohlenstoff erhalten wird.

Aus PAN gefertigte CF gelten als Standardfaser und finden vermehrten Einsatz in der modernen Luftfahrt. Die schwarze Farbe hat zur Folge, dass innenliegende Brüche und Delaminationen rein optisch kaum erkennbar sind. Da CF eine gute elektrische Leitfähigkeit besitzt muss besonders auf ausreichende Isolierung geachtet werden um ungewollte Kurzschlüsse zu vermeiden. Der mögliche Elektronentransport erfordert bei einer gemeinsamen Verarbeitung von CFK und Metallen einer galvanischen Isolierung beider Werkstoffe, da es ansonsten zu starken Korrosionsschäden kommen kann. Eine schützende Glasfaserschicht kann hierfür als Isolator eingesetzt werden.



Abbildung 8: Ständer bestückt mit Gewebearten jeglicher Art

Eine höhere Steifigkeit lässt sich mit einer höherer Herstellungstemperatur (temp) erzielen, weshalb CF unterteilt werden in:

- HT-Faser (High Tenacity): temp: 1400°C, hohe Zugfestigkeit, Standardfaser

- IM-Faser (Intermediate Modulus): größerer E-Modul als HT
- HM-Faser (Hight Modulus): temp: >2200°C, noch größerer E-Modul
- UHM-Faser (Ultra Hight Modulus): temp: 3000°C, höchster E-Modul

Die höhere Steifigkeit bewirkt jedoch eine Verschlechterung der Zugfestigkeit und begünstigt das spröde Bruchverhalten. Da die Matrix in den meisten Fällen ebenso einen sehr spröden Werkstoff darstellt wird die Gefahr des Matrixversagens mit zunehmendem E-Modul geringer.

1.3. Matrixwerkstoffe

Als Matrix wird der Kunststoff bezeichnet, in welchem die Faser eingebettet wird. Aufgabe der Matrix ist unter anderem:

- Krafteinleitung in die Faser
- Kraftübertragung zwischen den einzelnen Fasern
- Stützen der Faser bei Druckbelastung um Knicken zu vermeiden
- Fasern in geometrischer Lage zu halten
- Schutz der Faser vor Umwelteinflüssen

Hauptsächlich kommen polymere Kunststoffe wie Duromere (thermosets) und Thermoplaste (thermoplastics) als Matrixwerkstoff zur Anwendung, welche im folgendem genauer erläutert werden.

1.3.1. Duromere

Duromere werden aus der chemischen Reaktion eines Harzes (resin) und eines Härters (curing agent) hergestellt. Getrennt behalten sie ihren flüssigen Aggregatzustand bei und können so länger gelagert werden. Nach dem Aushärteprozess bildet sich ein spröder Kunststoff, welcher nicht erneut eingeschmolzen, oder zerstörungsfrei plastisch verformt werden kann. Die Geschwindigkeit der Aushärtereaktion ist temperaturabhängig. Je höher die Temperaturen, umso schneller verläuft der Aushärteprozess. Die maximale Einsatztemperatur des gefertigten Bauteils hängt von der Hitzebeständigkeit des verwendeten Harzsystems ab und wird durch nachträgliches Tempern des Bauteils erreicht.

Allgemein ist im Flugzeugbau die Verwendung von

- Epoxidharz (EP)
- Phenolharz

üblich.

Epoxidharz:

EP ist das am häufigsten verwendete Matrixsystem zur Herstellung von FVK. Die reaktionsbedingte Poly-Addition beim Vermischen von Harz und Härter ist stark exotherm, weshalb sich das Gemisch bei größeren Mengen bis zur Selbstentzündung erhitzen kann.

Das stöchiometrische Mischverhältnis von Harz und Härter muss, wie bei allen Reaktionsharzen genau eingehalten werden ($< 1\%$), um eine vollständige Aushärtung zu garantieren. Bei der Vermischung von Harz und Härter ist diesbezüglich auf ein exaktes abmessen und auf eine durchgehende Homogenisierung zu achten. Klebrige Oberflächen, oder erhöhte Sprödigkeit des Laminates sind Ursache für ein unausgeglichenes Mischungsverhältnis.

Die Viskosität der EP-Komponenten und des Gemisches sinkt mit steigender Temperatur, was sich positiv auf die Verringerung des Porenanteils und Fließfähigkeit des Harzgemisches auswirkt. Zeitgleich erhöht sich jedoch die Reaktionsgeschwindigkeit von Harz und Härter, weshalb sich die mögliche Verarbeitungszeit (Topfzeit) stark verkürzt. Abhängig vom EP-System sind Aushärtetemperaturen bis zu 185°C und Einsatztemperaturen von 120°C

möglich. Durch die hohen mechanischen Eigenschaften werden Epoxide vor allem bei Strukturbauteilen verwendet. Für den Einsatz im Kabinenbereich sind sie allerdings durch die Fire/Smoke/Toxicity-Vorschriften (FST) meist nicht geeignet. Um die Schlagzähigkeit bzw. Risszähigkeit der Harze zu erhöhen können verschiedene Zusatzstoffe beigemischt werden.

Vorwiegend basieren EP auf Bisphenol-A und Bisphenol-F. Um direkten Hautkontakt und Inhalation der toxischen Stoffe zu vermeiden muss dementsprechende Schutzkleidung und ausreichende Frischluftzufuhr am Arbeitsplatz vorhanden sein.

Phenolharze:

Phenolharze besitzen deutlich geringere mechanische Eigenschaften als Epoxidharze und kommen deshalb nicht für Strukturbauteile zum Einsatz. Durch höhere Einsatztemperaturen und ihre guten FST-Eigenschaften werden sie vor allem in Verbindung mit Wabenkernen im Interieur-Bereich eingesetzt. Während der Reaktion von Harz und Härter findet eine Poly-Kondensation statt. Durch die exotherm verlaufende Reaktion kondensiert Wasser, welches eine zusätzliche Belastung der Formwerkzeuge und der verwendeten Laminatskomponenten darstellt.

1.3.2. Thermoplaste

Thermoplaste kommen als teilkristalline, oder amorphe Kunststoffe vor und benötigen keine chemische Reaktion wie Duromere zur Aushärtung. Die unverzweigten, oder nur teilweise verzweigten Kohlenstoffketten erlauben ein wiederholtes Aufschmelzen und Erstarren des Werkstoffes. Bei Zimmertemperatur wird der feste Aggregatzustand eingenommen und ermöglicht somit eine kostengünstige und dauerhafte Lagerung. Zwischen Temperaturen von 315-400°C werden Thermoplaste aufgeschmolzen und sind so für die Weiterverarbeitung nutzbar. Als Verstärkungsfasern kommen meist Glasfaserschnipsel zum Einsatz. Die hohe Zähigkeit, Schweißbarkeit und kurzen Aushärtezeiten zeichnen Thermoplaste gegenüber Duromere aus.

1.4. Herstellungsverfahren von FVK-Laminaten

Für die Herstellung von FVK- Laminaten kommen verschiedene Verfahren zur Anwendung, welche sich je nach Stückzahl, erforderlicher Laminatsqualität und Prozessdauer als geeignet erweisen. Im Sinne des Automatisierungsgrades kann man jene unterteilen in:

- manuelle Verfahren (Handlaminierverfahren)
- teilautomatisierte Verfahren (z.B. Infusionsverfahren)
- vollautomatisierte Verfahren (z.B. Press-Verfahren)
- kontinuierliches Verfahren (z.B. Strangzieh-Verfahren)

Im folgendem wird das Handlaminierverfahren und das Infusionsverfahren näher erläutert.

1.4.1. Handlaminierverfahren

Das Handlaminierverfahren ist das technisch einfachste Herstellungsverfahren von FVK-Laminaten. Primär kommt ein negatives, oder auch positives Halbschalenwerkzeug zur Anwendung, auf welches das Fasermaterial gelegt und mit Harz-Härter-Gemisch getränkt wird. Die benötigten Werkzeuge und Verarbeitungshilfsmittel sind dabei relativ einfach und ermöglichen eine preisgünstige Herstellung von Prototypen, oder Mock-ups.

Da das Einbringen von Faserwerkstoff und Matrix manuell erfolgt ist das Handlaminierverfahren jedoch ein relativ zeitaufwendiges und lohnintensives Verfahren. Zudem hängt die Bauteilqualität stark vom Können und der Erfahrung des Laminierers ab.

Theoretisch lassen sich beliebige Größen und Komplexitäten von Laminaten verwirklichen, was sich jedoch in erhöhten Werkzeug- und Materialkosten widerspiegelt. Zwecks der Handhabbarkeit kommt das Fasermaterial hauptsächlich in gewebter, oder loser Form zur Anwendung. Als Matrixsystem werden sowohl EP als auch Phenolharz verarbeitet.

Das Formwerkzeug kann dank der geringen Belastungen (Handdruck) sehr leicht aufgebaut sein. Häufig wird es aus Holz, Gips, Modellmasse oder selbst aus FVK gefertigt. Zum Schutz

vor Verklebungen und um ein reibungsloses Entformen des ausgehärteten Bauteils zu garantieren wird das Werkzeug mit Trennwachs und Folientrennmittel präpariert.

Um die empfindliche Bauteiloberfläche zu schützen und um die Resistenz gegen Witterungs- und Chemikalien-Einflüssen zu erhöhen kann eine Schicht Gelcoat (Feinschicht) vor dem eigentlichen Laminierprozess in das Werkzeug aufgebracht werden. Dieser bildet zugleich das Oberflächenfinish und erübrigt eine nachträgliche Bearbeitung der Oberfläche.

Die zu verarbeitenden Verstärkungsfasern werden auf das mit Trennmittel bearbeitete Formwerkzeug gelegt und sukzessive mit dem flüssigen Harzes getränkt, wobei mit einer Harzschicht begonnen wird. Die Tränkung und Verteilung des Harzes erfolgt mit Pinseln, Riffelwalzen, oder Lammfellrollen. Die tupfende und offene Tränkung des Bauteils erhöht das Risiko von Lufteinschlüssen und Fremdpartikeleinschluss wie Staub, oder Haare. Zusätzlich erschwert die manuelle Matrixeinbringung das Abschätzen des benötigten Tränkungsgrad, weshalb oft nur geringe Faservolumengehälte ($< 30\%$) erreicht werden.



Abbildung 9: Erstellung eines Aramid-Waben-Sandwiches im Handlaminierverfahren

Der grundlegende Aufbau des Handlaminierverfahrens besteht in einem Formwerkzeug, welches mit Trennwachs und Folientrennmittel behandelt wurde, dem Lagenaufbau selbst und einer abschließenden Lage Abreisgewebe. Das Abreisgewebe definiert einerseits eine gleichmäßige Oberflächenrauigkeit für Verklebungen und schützt andererseits vor Oberflächenverunreinigungen bei nicht sofortiger Weiterverarbeitung.

Eine Verbesserung der Bauteilqualität kann durch das Vakuumverfahren erzielt werden indem das Handlaminat mit einer Lochfolie und Saugfließ belegt und mittels Vakuumfolie luftdicht versiegelt wird (Abbildung 10).

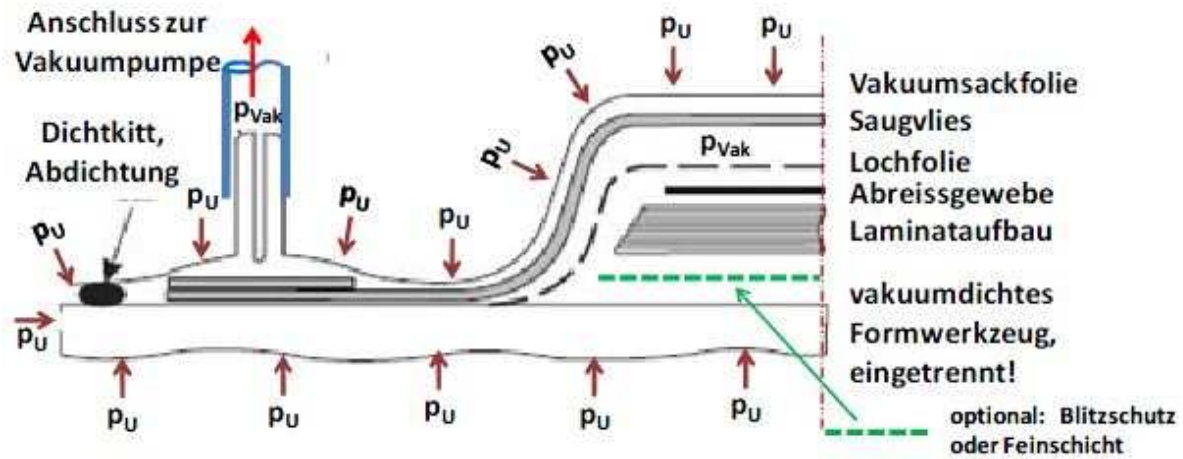


Abbildung 10: Aufbau des Vakuumverfahrens

Durch Anlegen eines Unterdruckes mittels Vakuumpumpe wird das so präparierte Laminat vakuumiert, was zu einer Verdichtung in Dickenrichtung (normal zur Bauteiloberfläche) und einer Absaugung des überschüssigen Harzes aus dem Laminat führt, welches im Saugfließ gebunden wird. Alternativ kann auch eine Membranpresse verwendet werden, wie in Abbildung 11 gezeigt.

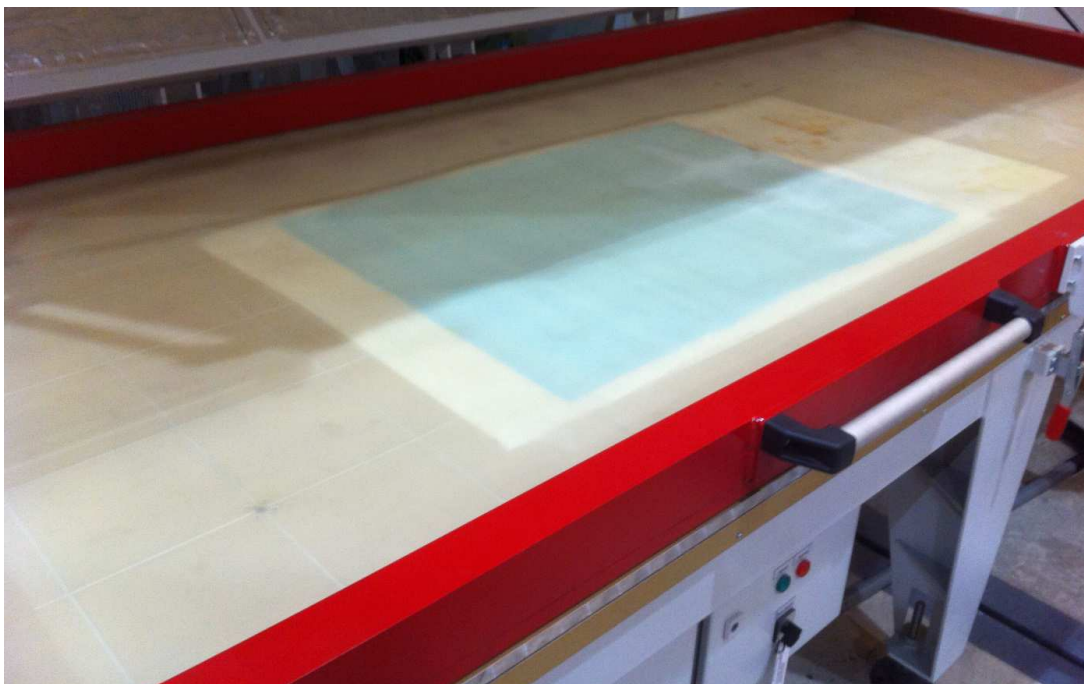


Abbildung 11: Handlaminat in einer Membranpresse während des Aushärtungsprozesses

1.4.2. Infusionsverfahren

Das Infusionsverfahren stellt eine Weiterentwicklung des Vakuumsackverfahrens dar und ist besonders für kleinere Stückzahlen gut geeignet. Großer Unterschied besteht in der Tränkungsweise des Laminates, was mit Hilfe von Unterdruck erfolgt. Die englische Bezeichnung Resin Infusion with Flexible Tooling (RIFT) beschreibt den fundamentalen Aufbau des Infusionsverfahrens. Wie beim Handlaminat bestimmt ein negatives, oder positives Formwerkzeug die geometriegebende Größe. Mit Flexible Tooling wird die verwendete Vakuumfolie beschrieben, welche die zweite formgebende Größe auf der gegenüberliegenden Laminatoberfläche darstellt. Ein Anwendungsbeispiel eines mit RIFT infusierten Bauteils ist in Abbildung 12 zu sehen.

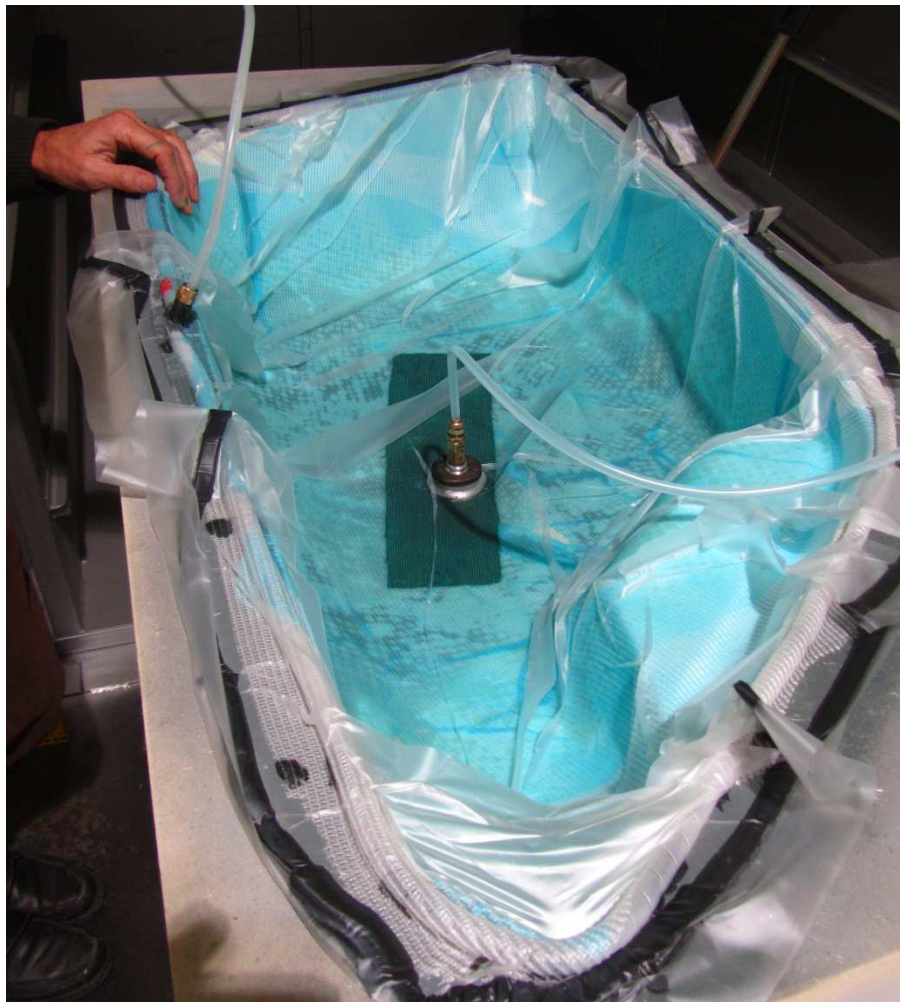


Abbildung 12: Infusion eines Verkleidungsteils eines Snowmobiles mittels RIFT-Verfahren

1.4.3. Aufbau

Der Aufbau des Infusionsverfahrens ist nach seinem Erfinder Seeman B. benannt und wird unter anderem als SCRIMP (Seeman Composites Resin Infusion Molding Process) bezeichnet. Das Harz wird durch Unterdruck aus einem Reservoir über eine Fließhilfe in das Laminat gesaugt. Der Tränkungsprozess erfolgt vorwiegend normal zur Fließrichtung, weshalb selbst große Bauteile wie Schiffsrümpfe ohne weiteres in einem Durchgang gefertigt werden können. Der schematische Aufbau des SCRIMP ist in Abbildung 13 dargestellt.

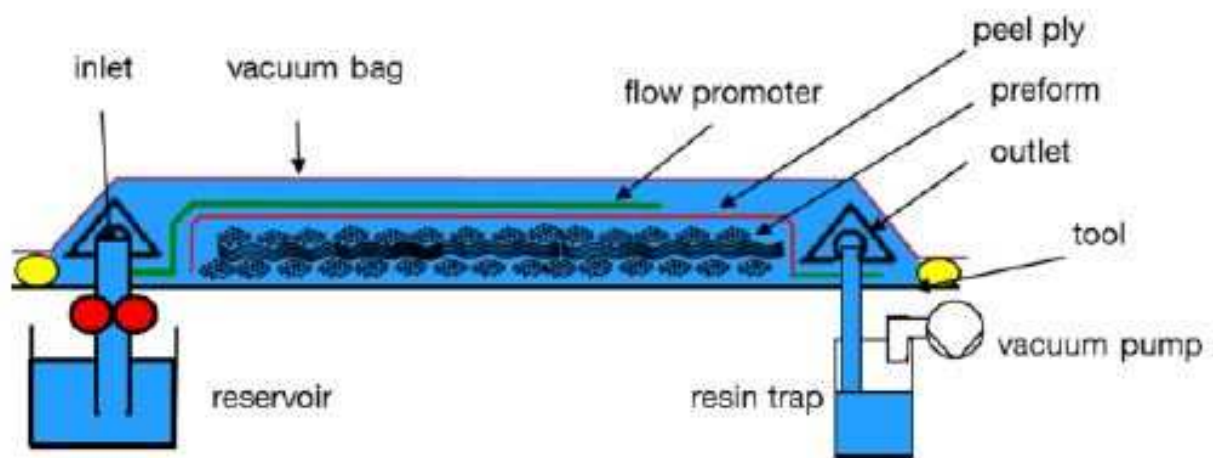


Abbildung 13: Schematische Aufbau des SCRIMP-Verfahrens [Cichosz, 2012,[4]]

Eine Schwachstelle des SCRIMP ist, dass sich bei großen Bauteilen variierende Laminatsdicken einstellen können. Dies tritt vor allem in der Nähe des Einlassstutzens und am entferntesten Punkt zum Absaugsstutzen auf. Durch die maximale Druckdifferenz von 1 bar kann es vorkommen, dass die Kraft nicht mehr ausreicht um Harzansammlungen in der Nähe des abgeklemmten Stutzens zu vermeiden. Abhilfe dafür schaffen Weiterentwicklungen wie das VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion, patentiertes Herstellungsverfahren des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)), oder der VAP (Vacuum Assisted Process, patentiertes Herstellungsverfahren der EADS / PAG).

1.4.4. Hilfsstoffe

Wie in Abbildung 13 gezeigt werden für die Durchführung eines RIFT-Verfahrens folgende Hilfsstoffe benötigt:

- Abreisgewebe
- Lochfolie
- Fließhilfe
- Vakuumsackfolie

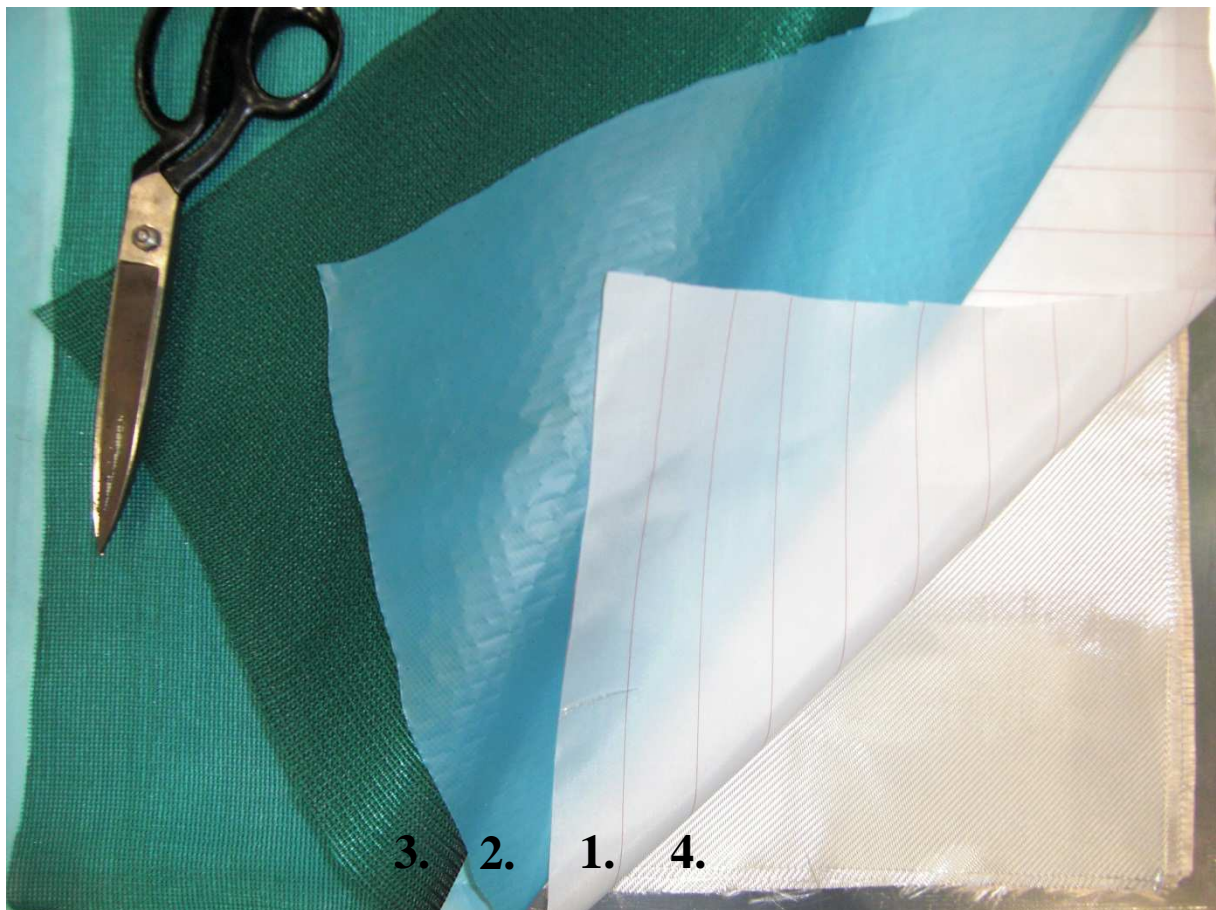


Abbildung 14: Hilfsstoffe Infusionsverfahren

1. Abreißgewebe
2. Lochfolie
3. Fließhilfe
4. GF-Gewebelagen

Abreißgewebe

Das Abreißgewebe wird nach abgeschlossenem Aufbau der trockenen Lagen auf die letzte Gewebeschicht gelegt und ist essentiell für eine Weiterverarbeitung des Bauteils, insbesondere für nachträgliche Verklebungen mit andern Bauteilen. Es sorgt für eine gleichmäßig raue Oberfläche des Laminates und schützt vor Staubablagerungen bei nicht unmittelbarer Weiterverarbeitung nach der Fertigung. Durch das Entfernen des Abreißgewebes erhält man eine staub- und fettfreie Klebefläche was Basis für eine erfolgreiche Verklebung der Bauteile ist. Die Oberfläche erscheint wegen der gleichmäßigen Rauheit matt. Ebenso werden kleine Einbuchtungen (Pinholes) und Einschlüsse von Lochfolienmaterial im Laminat vermieden, welche von der darüberliegenden Lochfolie herrühren. Abreißgewebe ist als Leinwand oder Körperbindung erhältlich.

Lochfolie

Die Lochfolie ermöglicht einerseits den Durchfluss des flüssigen Harzes in beide Richtungen und erleichtert andererseits das Entfernen der harzgetränkten, darüber liegenden Hilfsstoffe. Sie kann direkt nach dem Aushärten der Matrix entfernt werden.

Fließhilfe

Die Fließhilfe spielt eine entscheidende Rolle während des Infusionsverfahrens. Da die Tränkung des Bauteils vertikal zur Harzflussrichtung erfolgt ist eine Harzverteilung über die gesamte Fläche notwendig. Durch die feinmaschige Struktur bleiben selbst nach angelegtem Unterdruck kleine Hohlräume bestehen, über welche das dünnflüssige Harz- Härter- Gemisch sich gleichmäßig über das gesamte Bauteil verteilen kann.

Vakuumfolie

Die Vakuumfolie wird abschließend über das gesamte Formwerkzeug gelegt. Sie ist entweder als Schlauch erhältlich in dem das gesamte Bauteil inklusive Formwerkzeug gelegt werden kann, oder als einlagige Folie, welche mittels Dichtkitt oder Klebeband direkt am Formwerkzeug befestigt wird, um eine luftdichte Versiegelung des Bauteils zu erreichen. Der zur Tränkung erforderliche Unterdruck erfordert eine 100% Abdichtung des Bauteils, da ansonsten Luft durch die beschädigte Folie, oder undichte Stellen während des Infusionsprozesses gesaugt wird, was zu Lufteinschlüssen und porösen Stellen im ausgehärteten Bauteil führt. Je nach Folienart kann das zu infusierende Bauteil während des Prozesses in einen Ofen bei unterschiedlichen Temperaturen gelegt werden, was sich auf die

Fluidität und Aushärtezeit des Harzsystems, sowie spätere Einsatztemperatur des fertigen Bauteils auswirkt.

1.4.5. Harzsysteme

Für das Infusionsverfahren kommen Harze mit einer niedrigen Viskosität zur Anwendung, welche auf zweikomponentiger Epoxydharz-Systeme (EP) basieren. Im Gegensatz zum Handlaminierverfahren, bei welchem das Bauteil sukzessive mit der Matrix gekränkt wird und deshalb beliebig viskose Harze verarbeitet werden können, wird das Harz-Härter-Gemisch bei dem Infusionsverfahren durch Druckdifferenz in das Bauteil gesaugt. Durch den maximal möglichen Druckunterschied von 1bar kommen spezielle Harzsysteme zum Einsatz, deren Viskosität möglichst gering ist. Das Einbringen von nichtreagierenden Zusatzstoffen um die Schlagzähigkeit, oder Risszähigkeit zu erhöhen ist wegen der nötigen Fluidität nicht möglich.

1.4.6. Formwerkzeug

Das Formwerkzeug ist wie beim Handlaminierverfahren ein halbschaliges Positiv oder Negativ. Wichtig für Infusionsformwerkzeuge ist, dass sie 100% dicht sind. Durch kleinste Risse findet ansonsten ein Druckausgleich zwischen Umgebung und vakuumiertem Bauteil statt. Die eindringende Luft verringert einerseits den möglichen Unterdruck und andererseits werden kleinste Luftblasen ins Harz eingebracht und gebunden. Diese verringern den Faservolumengehalt und senken somit die mechanischen Eigenschaften des Bauteils.

Durch den angelegten Unterdruck von max. 1bar müssen Formwerkzeuge steifer und robuster als wie beim Handlaminieren ausfallen. Ebenso ist bei der Konstruktion der Werkzeuge ein genügend breiter Rand zu berücksichtigen an dem die Abdichtung der Vakuumfolie und die Befestigung verschiedenster Arten von Ein- und Auslässen möglich ist (Abbildung 15).



Abbildung 15: Formwerkzeug eines Verkleidungsteiles eines Schneemobiels

1.4.7. Vorgehensweise

Wie beim Handlaminieren wird das Formwerkzeug mehrfach mit Trennwachs eingestrichen und poliert. Dies schützt das Werkzeug vor Beschädigungen und verhindert ein Verkleben mit dem Bauteil. Zusätzlich wird das Werkzeug wiederholt (ca. 3 Anstriche) mit Folientrennmittel bestrichen um ein reibungsloses Entformen zu garantieren. Das auf Wasser basierende Folientrennmittel kann nach dem Entformen abgezogen, oder mit einem feuchten Tuch entfernt werden. Für das Oberflächenfinish kann wiederum eine Gelcoatschicht aufgetragen werden, um die Widerstandsfähigkeit der Oberfläche vor Wetter- und Chemikalieneinflüssen zu erhöhen.

Die Verstärkungsfasern werden nach dem Lagenaufbauplan trocken in das Formwerkzeug gelegt. Die einzelnen Lagen werden mit einem speziell für das Infusionsverfahren entwickeltem Sprühkleber stellenweise gegen Verrutschen fixiert. Es ist darauf zu achten, dass die Gewebelagen spannungsfrei und sauber anliegend in das Werkzeug gelegt werden, da sich ansonsten Hohlräume bilden (Abbildung 16). Diese werden nicht, oder nur teilweise vom

Harz-Härter-Gemisch aufgefüllt und vermindern drastisch die Qualität, bzw. die Verwendbarkeit des Bauteils. Das Infusionsverfahren eignet sich aus diesem Grund besser für flächige Bauteile mit großen Rundungsradien der Kanten.



Abbildung 16: Manuelles Einlegen und Ausrichten der Fasergewebe

Nach dem abgeschlossenen Lagenaufbau kommen Abreißgewebe, Lochfolie und Fließhilfe deckend auf das Laminat. Sie können ebenso mittels Sprühkleber oder Klebeband gegen Verrutschen gesichert werden. Kleine Überstände erleichtern das Entfernen der Hilfsstoffe nach dem Aushärtungsprozess. Befindet sich der Auslass nicht auf dem Bauteil so muss die Fließhilfe über das Bauteil hinweg bis zum Auslass verlegt werden, um eine Verbindung mit dem Einlass sicherzustellen. Dies kann durch mehrere Lagen Saugvlies unterstützt werden. Die Vakuumsackfolie wird schlussendlich über das Werkzeug gelegt und mit Dichtkitt oder Klebeband versiegelt. Da sich die Folie bei angelegtem Unterdruck an das Formwerkzeug anschmiegt muss auf einen ausreichenden Faltenwurf beim Anbringen geachtet werden. Eine übermäßige Beanspruchung der Folie kann ansonsten zu Rissen oder undichten Stellen führen. Eine Methode dafür ist das Einarbeiten von Folienschlaufen, die mit Dichtkitt abgedichtet sind. Diese sind in Abbildung 12 gut erkennbar.



Abbildung 17: RIFT-Aufbau zu Infusion einer GFK-Platte

Bevor die Vakuumfolie endgültig versiegelt wird müssen die Einlass- und Absaugstutzen angebracht werden. Die Folie wird an vorgesehener Stelle durchstoßen oder eingeschnitten. Für kreisrunde Querschnitte eignen sich besonders sternförmige Einschnitte mit der Schere, oder die Verwendung eines Locheisens, wie es in der Lederindustrie gebräuchlich ist. Dies verhindert Faltenwürfe beim Einsetzen der Stutzen. Die Verwendung von Schläuchen, wie sie auch für die Verbindung von Vakuumpumpe und Vakuumsack Anwendung finden, ist eine Alternative zu den speziellen Stutzen und erspart das nachträgliche Reinigen (Abbildung 18). Dafür wird das Loch in der Folie vor der gewünschten Position des Einlasses wiederum sternförmig eingeschnitten, sodass eine gewisse Länge des Schlauches unter die Folie geschoben werden kann. Ein unbeabsichtigtes Herausrutschen wird so vermieden. Der Schlauch selbst wird mit Dichtkitt umwickelt, welcher beim Durchschieben des Schlauches unter die Folie glatt verstrichen wird (Abbildung 19). Um sicherzugehen, dass die scharfen Kanten des Schlauches die Folie nicht beschädigen wird ein kleines Stück Saugvlies zwischen Schlauch und Folie mit Dichtkitt befestigt.

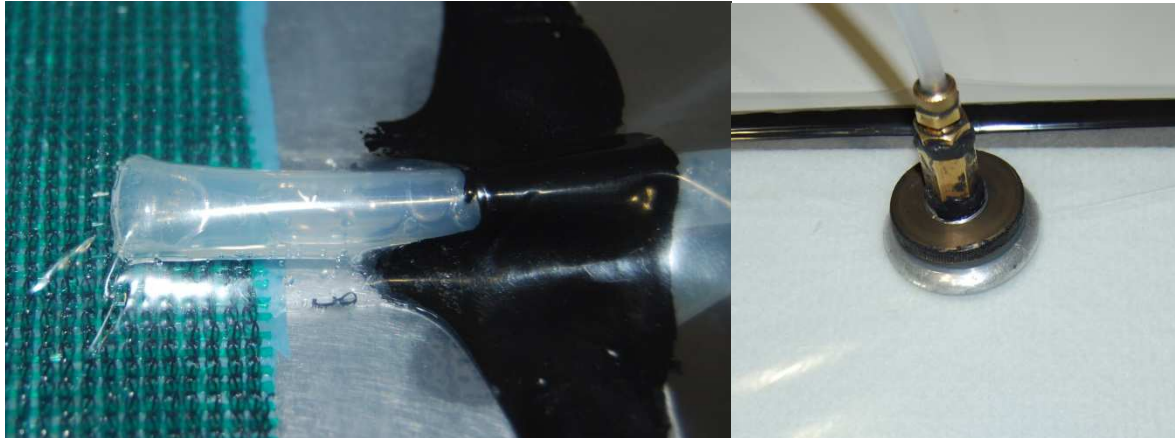


Abbildung 18: Verschiedene Arten von Ein- bzw. Absaugleitungen

Vor dem eigentlichen Harzinfusionsprozess wird der Schlauch am Einlassstutzen abgeklemmt und die Luft aus der Vakuumfolie abgesaugt. Undichte Stellen können mit einem Ultraschallgerät oder durch Wahrnehmung lokalisiert und behoben werden. Um einen höchstmöglich erzielbaren Faservolumengehalt von ca. 45- 50% zu erreichen wird das Harzsystem unter Vakuum vermischt und verrührt. Dadurch wird das Untermischen von Luftblasen verhindert, die während des Infusionsprozesses in der Matrix gebunden werden und zu einem höheren Porenaufkommen im Bauteil führen. Alternativ kann das Harzsystem unter Normalatmosphäre vermischt und anschließend in einem Vakuumkessel entgast werden. Die eingeschlossene Luft wird so aus dem Gemisch gesaugt und bildet einen Harzschaum an der Oberfläche, welcher vorsichtig abgeschöpft werden kann. Die Dauer des Entgasens hängt von der Viskosität des Fluides ab und kann zwischen 10- 15 Minuten dauern. Dabei ist auf die verbleibende Topfzeit zu achten.

Der abgeklemmte Einlassschlauch wird in den Behälter mit dem entgasten Harzsystem bis zum Boden eingeführt. Anschließend kann die Klemme am Schlauch entfernt und die Infusion gestartet werden. Während des Tränkungsprozesses darf keine Luft mehr vom Einlassschlauch angesaugt und in das Bauteil kommen, da ansonsten wieder der Faservolumengehalt geringer und die mechanischen Eigenschaften des Bauteils verschlechtert werden. Der eigentliche Tränkungsprozess findet vertikal zur Harzfließrichtung statt. Das Harz wird über die geringere Permeabilität der Fließhilfe flächig verteilt und durch die herrschende Druckkraft normal zur Oberfläche in das Laminat gedrückt. Im Unterschied dazu muss beim Injektionsverfahren das Harz über die gesamte Bauteillänge durch das Verstärkungsfasermaterial gepresst werden, weshalb Drücke von bis zu 120 bar nötig sind.

Nach der Infusion wird der Einlassschlauch wieder luftdicht abgeklemmt und das Bauteil bei bestehendem Unterdruck ausgehärtet.

2. Ergebnisse

In folgenden Kapiteln wird die durchgeführte Versuchsreihe zur Erstellung von FVK-Laminaten mittels Infusionsverfahren aufgelistet und erläutert. Grundlegende Kenntnisse über das RIFT-Verfahren werden bei der Herstellung von ebenen Platten gewonnen, welche anschließend für die Verwendung an komplexeren Bauteilen herangezogen werden können. Die Erstellung von Sandwichbauteilen und dafür geeignete Materialien werden ebenso untersucht.

2.1. GFK- Platten

Um sich anfänglich mit dem Aufbau und den erforderlichen Arbeitsschritten vertraut zu machen, wurden ebene Platten laminiert. Als Formwerkzeug diente eine 50x65cm große Edelstahlplatte. Um eine nötige Vorbehandlung mit Trennwachs und Folientrennmittel zu vermeiden und so ein schnelleres Arbeiten zu ermöglichen, wurde die Platte mit Vakuumsackfolie (VF) bespannt und an den Rändern mittels Klebeband befestigt. Lamine von 40x50cm konnten so hergestellt werden. Als Verstärkungsfasern wurden GF-Gewebe mit 163g/m² in Leinwandbindung von R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH verwendet. Das Zuschneiden der einzelnen Lagen erfolgte mit Rollschneider (Abbildung 19).



Abbildung 19: Bearbeitungswerkzeug von Fasergeweben

Das Befestigen der einzelnen Lagen mit Sprühkleber war durch die ebene Geometrie nicht erforderlich. Insgesamt setzte sich das erste GFK- Laminat aus 6 Gewebelagen zusammen, welche trocken mit einem Faserwinkel von (0/90) aufgelegt wurden. Abreisgewebe, Lochfolie und Fließhilfe kamen abschließend auf das Gewebe. Die Saugstutzen wurden wie im Kapitel 2.4.2 unter Vorgehensweise in die VF integriert, wobei als Einlassstutzen ein flexibler Kunststoffschlauch mit 6mm Innendurchmesser zum Einsatz kam. Der Absaugstutzen wurde mit einem Abstand von 10cm zum Bauteil angebracht. Ein mehrere Lagen Saugvlies stellten die Verbindung zur Fließhilfe sicher und fungierten gleichzeitig als Harzfalle. Nach einer Überprüfung der Dichtheit kann der Infusionsprozess gestartet werden. Als Matrix wurde das für Infusionsverfahren geeignete Harzsystem EP Infusionsharz RIM 935 mit dem Härter EP Härter RIM 936 der Firma Suter Kunststoffe Ag. verwendet. Das Mischungsverhältnis betrug 100:35 und wurde unter Normalatmosphäre verrührt. Die nötige Harzmenge kann nach Flächengewicht des Gewebes berechnet werden und wird vom Hersteller gewebeartspezifisch angegeben.

Für die 6 Lagen 163g/m^2 GF-Leinwandgewebe, welches laut Hersteller 128g/m^2 Harz benötigt, ergab dies:

Gewebefläche: $6 * (0,4m^2 * 0,5m^2) = 1,2m^2$

Harzmenge: $128 \frac{g}{m^2} * 1,2m^2 = 153,6g$

Härtermenge: $\frac{153,6g * 35}{100} = 18,76g$

Aus mehreren Versuchen wurde eine Harzzugabe von ca. 35% der ursprünglichen Harzmenge festgestellt, um Verluste im Reservoir und in den Einsaugleitungen zu kompensieren und eine vollständige Tränkung des Gewebes zu ermöglichen.

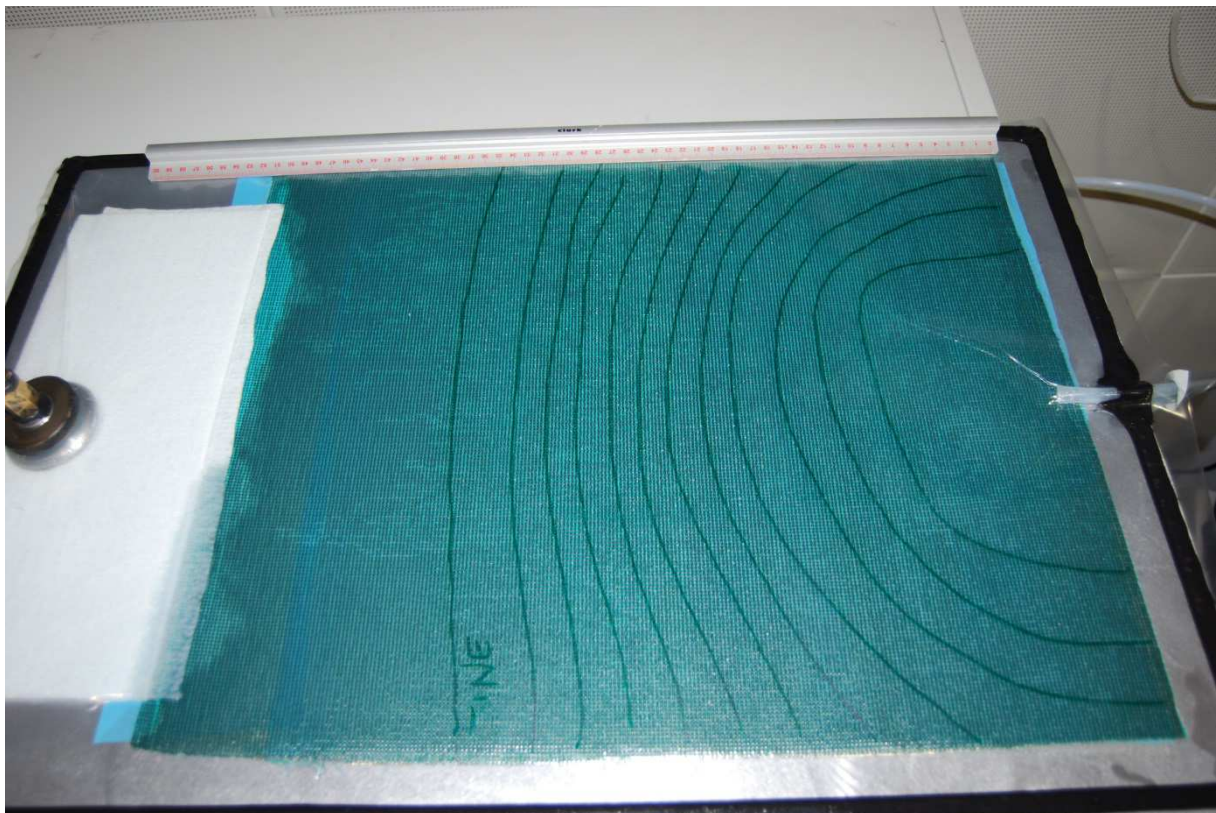


Abbildung 20: Harzfließverhalten an einer 50x40cm Laminatplatte

Während der Harzinfusion wurde in gleichmäßigen Zeitabständen die Harzverteilung auf der VF markiert, um Vergleiche mit anderen Versuchen aufstellen zu können (Abbildung 20). Es wurde mit verschiedenen Unterdrücken von 0,4-0,9 bar laminiert und jeweils das Fließverhalten beobachtet. Große Unterschiede in Ausbreitungsrichtung konnten allerdings nicht festgestellt werden. Lediglich die Fließgeschwindigkeit und Reichweite des Harzes erhöhte sich mit zunehmendem Unterdruck. Der Lamierprozess der 0,2m² großen Platte mit 4

Lagen GF dauerte bei einem Unterdruck von 0,8 bar ca. 8 Minuten. Eine radiale Harzverteilung stellte sich anfänglich ein, wobei die mittlere Fließgeschwindigkeit normal zur direkten Verbindung von Einlass- und Absaugstutzen ca. 0,32cm/sek. betrug. Längs der direkten Verbindung breitete sich das Harz mit ca. 0,4cm/sek. aus. Ausgehärtet wurden die Lamine vorwiegend bei Raumtemperatur, da die Fließhilfe und die VF nur bedingt höhere Temperaturen aushalten. Temperaturen bis 60°C können durchaus angelegt werden.

Die ausgehärteten Laminatplatten wurden entformt und auf ihre Oberflächengüte geprüft. Kleinste Unebenheiten und Verschmutzungen werden sofort sichtbar, weshalb beim Laminatsaufbau sorgfältig gearbeitet werden muss. Durch das nicht entgaste Harzgemisch ist ein vermehrtes Auftreten an Poren ersichtlich, was die mechanischen Eigenschaften des Laminats beeinflusst. Kleine Abdrücke (Pinholes) und Einschlüssen von Lochfolienmaterial kommen bei direkter Auflage der Lochfolie auf das Gewebe zustande. Abreisgewebe sorgt dem entgegen, erzeugt jedoch eine gleichmäßig raue Oberfläche und lässt das Laminat matt erscheinen (Abbildung 21).



Abbildung 21: Laminatoberfläche mit und ohne die Verwendung von Abreisgewebe

2.2. GFK- Streifen

Um Kennwerte für die maximale Fließreichweite des Harzes zu erhalten wurden GFK-Streifen von 4x110cm gefertigt. Die geringe Breite von 4cm wurde gewählt um die Fließrichtung möglichst in eine Richtung zu beschränken und so mögliche Einflüsse anderer Fließrichtungen zu minimieren. Es wurden insgesamt 3 Streifen mit jeweils 2, 4 und 8 Lagen 163g/m² GF-Leinwandgewebe hergestellt, um Unterschiede von Fließgeschwindigkeiten und Tränkung zu erhalten. Die Infusion der Streifen erfolgte parallel, wobei jeder einen separaten Ein- und Auslassschlauch besaß. Diese konnten getrennt abgeklemmt werden um den Harzfluss individuell zu unterbinden. Der Versuchsaufbau dazu ist in Abbildung 22 gezeigt.



Abbildung 22: Fließgeschwindigkeitsmessung bei unterschiedlicher Laminatsdicke

Ein maximaler Unterdruck von 0,92 bar wurde angelegt. Nach Infusionsbeginn wurden die einzelnen Fließgeschwindigkeiten zyklisch gemessen. Die erhaltenen Messergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Fließgeschwindigkeitsmessung des Harzsystems bei unterschiedlicher Laminatdicke

163g/m ² GF	2 Lagen [cm/sek]	4 Lagen [cm/sek]	8 Lagen [cm/sek]
Nach 11sek	0,91	0,90	0,90
Nach 100sek	0,19	0,18	0,18
Nach 230sek	0,12	0,09	0,08

Der Geschwindigkeitsverlauf zweier Lamine (mit zwei und vier Lagen) ist in Abbildung 23 grafisch dargestellt.

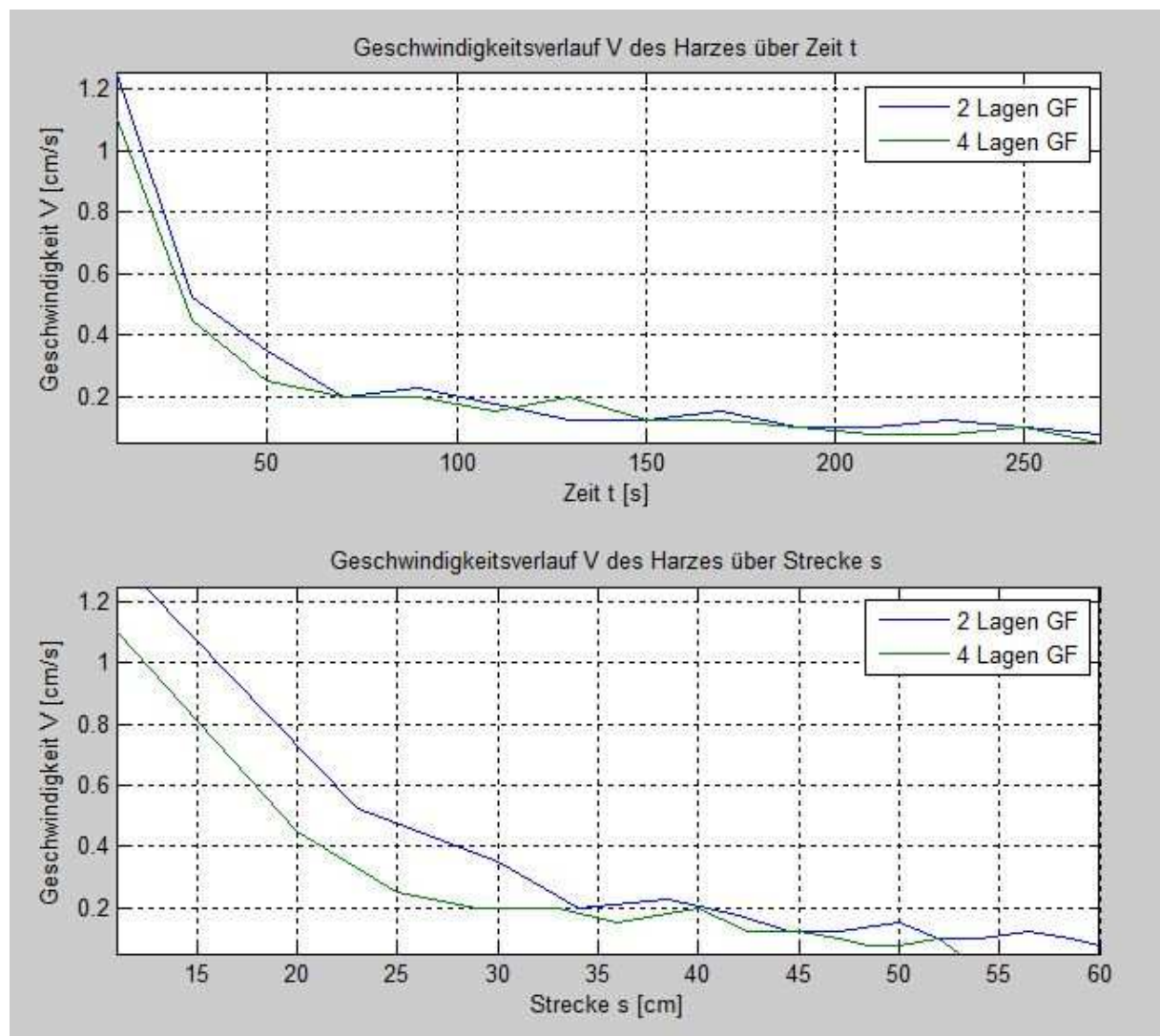


Abbildung 23: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf an untersuchten Laminatsstreifen

Daraus ergibt sich, dass die Fließgeschwindigkeit des Harzes primär von der herrschenden Druckdifferenz und Permeabilität der Fließhilfe, welche bei allen drei Proben denselben Wert aufweist, abhängt. Die Streckendifferenz am zwei- und vierlagigen Laminat ist auf die frühere Position des Einsaugstutzens des zweilagigen Laminates zurückzuführen.

Die Laminatdicke besitzt jedoch einen sehr großen Einfluss auf die fortschreitende Durchtränkung des Laminates. So zeigt sich, dass der Streifen mit acht Lagen GF weit mehrere nicht durchtränkte Stellen aufweist, als bei der zweilagigen Probe. Dickere Lamine müssen aus diesem Grund mit geringerer Druckdifferenz infusiert werden, um ein langsames kontinuierliches Durchtränken des gesamten Lagenaufbaus zu ermöglichen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass unterste Schichten nicht getränkt werden, oder höhere Mengen an Harz in die Harzfalle gesaugt werden. Der unterschiedliche Tränkungsgrad der verschiedenen Lamine ist in Abbildung 24 gezeigt.



Abbildung 24: Unterschiedlicher Tränkungsgrad bei gleicher Druckdifferenz an verschieden dicken Laminaten

Der Harzzufluss wurde unterbunden, sobald das Harzsystem das Ende der Streifen erreicht hatte. Auffällig erscheint bei dem Entformen, dass die Laminatstreifen nach einer Länge von ca. 90cm trockene Stellen an der Unterseite aufweisen. Je dicker die Lamine, umso größer waren die nichtbenetzten Stellen (Abbildung 25).

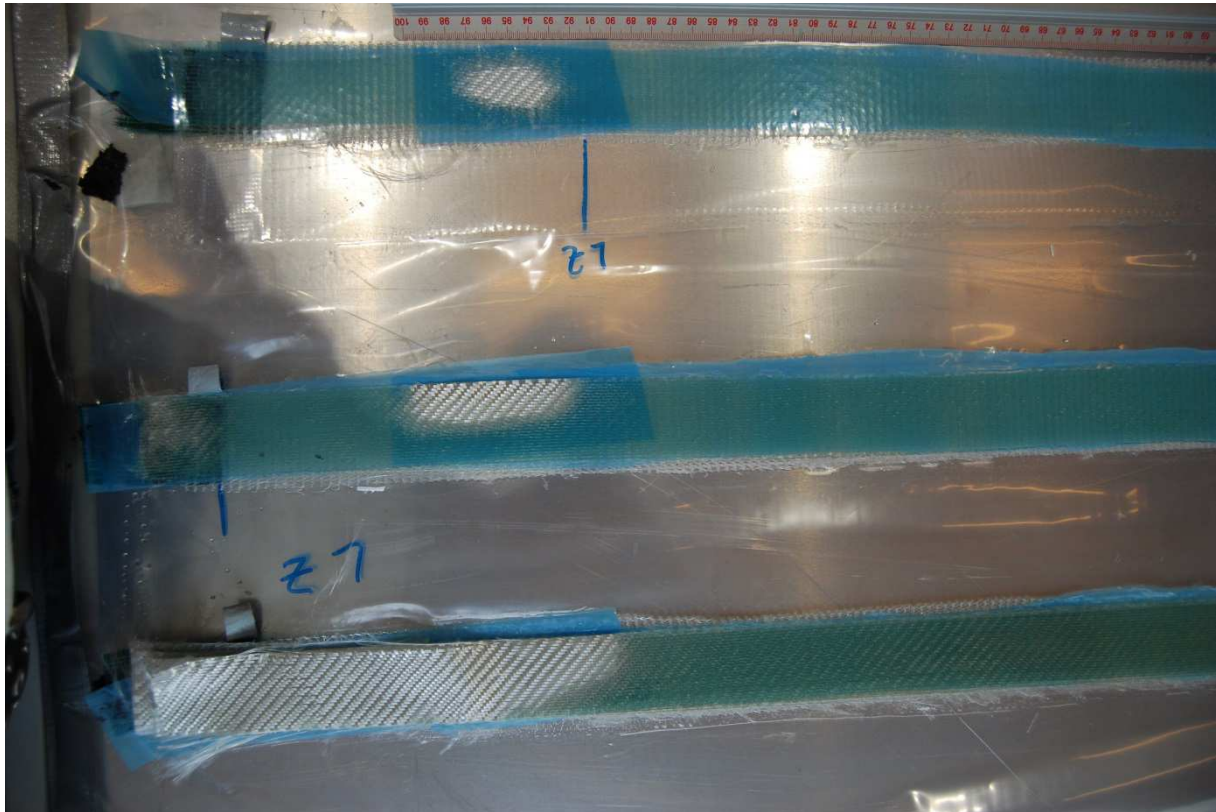


Abbildung 25: Nicht durchtränkte Laminatsstellen nach einer Länge von 90 cm

2.3. Sandwich Laminate

Um höhere Steifigkeiten bei gleichzeitig geringerem Gewicht von FVK-Bauteilen zu erreichen werden häufig Kerne aus unterschiedlichen Materialien einlaminieren. Diese halten die Deckschichten auf Abstand und übertragen bei Biegebelastung den Schub zwischen den Deckschichten. Um mit dem Infusionsverfahren leichte Sandwichbauteile herstellen zu können, bedarf es Kerne die aus einem soliden, nicht aufsaugenden Werkstoff bestehen. Die Verwendung von den in der Luftfahrt gebräuchlichen Aramid-Waben (NOMEX-Phenol-Waben), oder andere Kerne mit offenen Waben, erweist sich daher als ungeeignet. Das Harzsystem würde sämtliche Hohlräume auffüllen. Nach einem gröberen Auswahlverfahren wurden 4 Materialien ausgewählt, welche für einen Kern zur Herstellung von Sandwichbauteilen geeignet empfunden wurden.

Diese sind:

- Wabenvlies Coremat
- Balsaholz
- Depron
- AIREX C70.75 (PVC Hartschaumplatten)

Wabenvlies Coremat ist ein gängiger Werkstoff für Sandwichkerne und wird zur Versteifung von FVK-Laminaten in der Automobilindustrie, Bootsbau und Formenbau vorwiegend angewandt. Das Vlies ist in definierten Dicken erhältlich und einfach für die Weiterverarbeitung handzuhaben. Die sechseckige Wabenstruktur und die gleichmäßige Perforierung in Abständen von 8mm machen das Wabenvlies für das Infusionsverfahren geeignet. Es lässt sich leicht verformen und ist auch für komplizierte Geometrien mit engen Kurvenradien anwendbar. Da sich das Vlies mit Harz vollsaugt resultieren relativ schwere Bauteile, weshalb Wabenvlies selten in der Luftfahrtindustrie verwendet wird.

AIREX ist ebenfalls ein speziell für Sandwichkerne entwickelter Werkstoff, welcher sich durch seine geringe Harzaufnahme, Verrottungsbeständigkeit, thermische Isolation und günstiges Brandverhalten auszeichnet. Er findet vor allem im Schiff- und Bootsbau, sowie in Schienen- und Straßenfahrzeugen vermehrte Anwendung.

Damit die kaum durchlässigen Sandwichkernen mittels Infusionsverfahren verarbeitet werden können müssen Materialien wie Balsaholz, Depron und AIREX perforiert werden, um einen Harzfluss durch den Sandwichkern und somit eine Tränkung der unteren Gewebeschichten zu ermöglichen. Die Perforierung erfolgte mit einem selbst erstellten Werkzeug, bestehend aus einer Kieferleiste in welcher im Abstand von 1cm lange, dünne Nägel geschlagen wurden (Abbildung 26). Das Wabenvlies besitzt bereits eine angemessene Perforierung und muss demnach nicht nachbearbeitet werden.

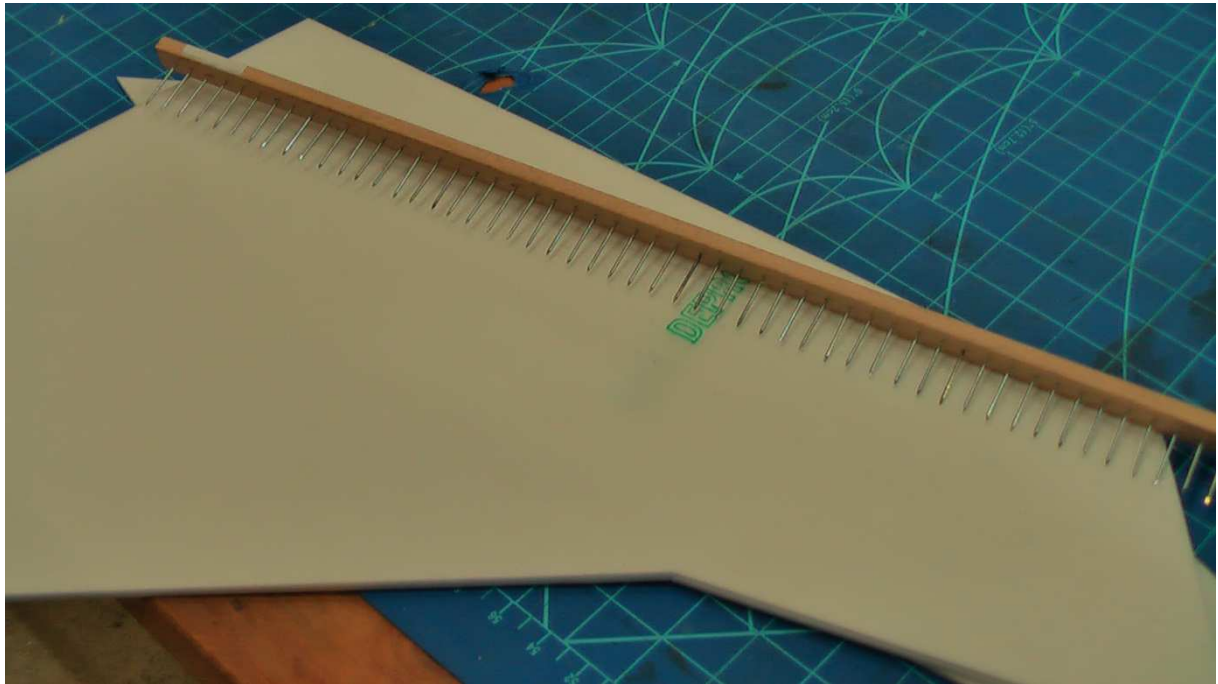


Abbildung 26: Werkzeug zur Perforierung der Wabenkerne

Die jeweils zugeschnittenen Platten hatten eine Abmessung von 20x40cm und wurden aus 4mm starken Wabenvlies Coremat, 6mm starken Depron, 2.5mm dicken Balsaholz und 2mm starken AIREX C70.75 gefertigt. Die so erhaltenen Wabenkerne wurden nacheinander auf das Formwerkzeug (in diesem Fall eine polierte Aluminiumplatte) gelegt und mit jeweils einer Deckschicht von 163g/m² GF-Leinwandgewebe versehen (Abbildung 27).



Abbildung 27: Verschieden perforierte Sandwichkerne für RIFT-Verfahren

Verwendete Materialien von links beginnend nach recht gezählt sind: Depron, AIREX C70.75, Balsaholz und Wabenvlies Coremat.

Alle Lamine wurden gleichzeitig von rechts nach links innerhalb eines Durchgangs infusiert. Es wurden dabei 370g Harz-Härter-Gemisch mit einem Mischungsverhältnis von 100:32 verwendet. Nach erfolgter Aushärtung wurden die einzelnen Sandwichbauteile auf Gewicht und Tränkungsgrad untersucht.

	Depron 6mm	AIREX C70.75 2mm	Balsaholz 2.5mm	Wabenvlies 4mm
[g/m ²]	200	150	180	240
g/m ² *0.08m ² [g]	16	12	14.4	19.2
2*163* g/m ² *0.08 m ² [g]	26	26	26	26
Gewicht trocken [g]	42	38	40.4	45.2
Gewicht des Laminates [g]	64.9	100.6	88.3	81.1
Gewichtszunahme [%]	54	165	119	79

Insgesamt wurden alle Lamine vollständig mit dem Harzsystem durchtränkt und wiesen bis auf das Wabenvlies eine schöne glatte Oberfläche auf. Das Depron-Sandwichlaminat zeichnete sich besonders durch sein leichtes Gewicht und hohe Steifigkeit aus, weshalb es für weitere Versuche herangezogen wurde.

2.4. Erstellung von Depron-Sandwichkerne

Nachdem sich das Depron als geeignetes Kernmaterial für die Erstellung von Sandwichbauteilen mittels RIFT-Verfahren herauskristallisiert hat wird infolgedessen die Anwendbarkeit auf in eine Richtung gekrümmte und darauf in zwei Richtungen gekrümmte Bauteile gezeigt.

2.4.1. Erstellung eines Flügelsegmentes

Zur Erstellung von in eine Richtung gekrümmten Sandwichbauteilen wird ein Flügelsegment für Windkanalmessungen laminiert. Das Formwerkzeug besteht aus einer oberen und einer unteren Segmenthälfte und besitzt eine Abmessung von 50x40cm. Siehe dazu Abbildung 28.



Abbildung 28: Formwerkzeug zur Erstellung eines Flügelprofils

Als Sandwichkernmaterial wird eine Depronplatte mit 6mm Stärke verwendet. Das formstabile Material muss vor dem Infusionsprozess an die Oberflächenkontur des Formwerkzeuges angepasst werden, da es ansonsten die engen Kurvenradien, wie sie z.B. an der Flügelvorderkante herrschen, nicht folgen kann.

Unter thermischer Einwirkung lässt sich Depron verformen. Dabei muss jedoch besonders Augenmerk auf die anisotropen Materialeigenschaften gelegt werden, welche durch den fließenden Herstellungsprozess erzeugt werden. Bei genauerer Betrachtung besitzt Depron unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten. Dabei ist der Schriftzug stets auf der rauen Seite aufgebracht, während die glatte Seite unbeschriftet bleibt. In Verformungsversuchen unter reiner Einbringung von Hitze mittels Heißluftföhns wird ersichtlich, dass das Depron sich stets längs des Schriftzuges, jedoch in Richtung der glatten Seite wölbt (Abbildung 29). Diese Eigenschaft spielt eine entscheidende Rolle für die Verformbarkeit und somit Konturanpassung an das Formwerkzeug. Desweiteren muss man auf eine gleichmäßige und

genau dosierte Erwärmung achten um ein Überhitzen, gefolgt von starken Schrumpfen und anschließendem Verbrennen zu vermeiden.



Abbildung 29: Verformungsverhalten von Depron bei thermischer Einwirkung

Unter leichter Spannung erfolgt die zerstörungsfreie Verformung bei Temperaturen zwischen 80°C und 100°C. Zur Verformung können mehrere Verfahren angewandt werden, wobei sich die Verformung mittels heißen Wassers, oder mittels Heißluft am verbreitetsten sind. Der Vorteil von Wasser ist, dass eine gleichmäßige Erwärmung über das gesamte Bauteil erfolgen kann. Der Einsatz eines Heißluftföhns dagegen spricht für die mobile Anwendbarkeit in Werkstätten. Infolgedessen wurde die Variante mit einem Heißluftföhns gewählt. Dazu wird das Depron auf das Formwerkzeug gelegt und vorsichtig erhitzt. Durch leichtes Hineindrücken in die Form und unter ständiger Spannung wird so der Sandwichkern geformt. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 30 für die untere Schale des Flügelprofils gezeigt.



Abbildung 30: An die Kontur angepasster Depronkern

Die Perforierung der Platte erfolgte vor der thermischen Verformung, wobei eine starke Verformung und Vergrößerung der sich im Profilvorderkante befindlichen Löcher zustande kam. Bei stark zu verformenden Bauteilen wird aus diesem Grund eine nachträgliche Perforierung empfohlen. Nach Fertigung des Sandwichkerns kann mit dem weiteren Laminatsaufbau begonnen werden.

Das Formwerkzeug wurde wie in Kapitel 2.4.6. beschrieben mit mehreren Schichten Folientrennmittel und einer Schicht Gelcoat behandelt. Insgesamt kamen zwei Lagen 163g/m^2 GF-Leinwandgewebe für die äußere und eine Lage 163g/m^2 GF-Leinwandgewebe für die innere Deckschicht zur Anwendung. Um ein Verrutschen des Lagenaufbaus während der weiteren Verarbeitung zu vermeiden kann entweder eine provisorische Befestigung mittels Klebeband an Überständen, oder die Verwendung von speziellen Sprühkleber erfolgen (Abbildung 31).

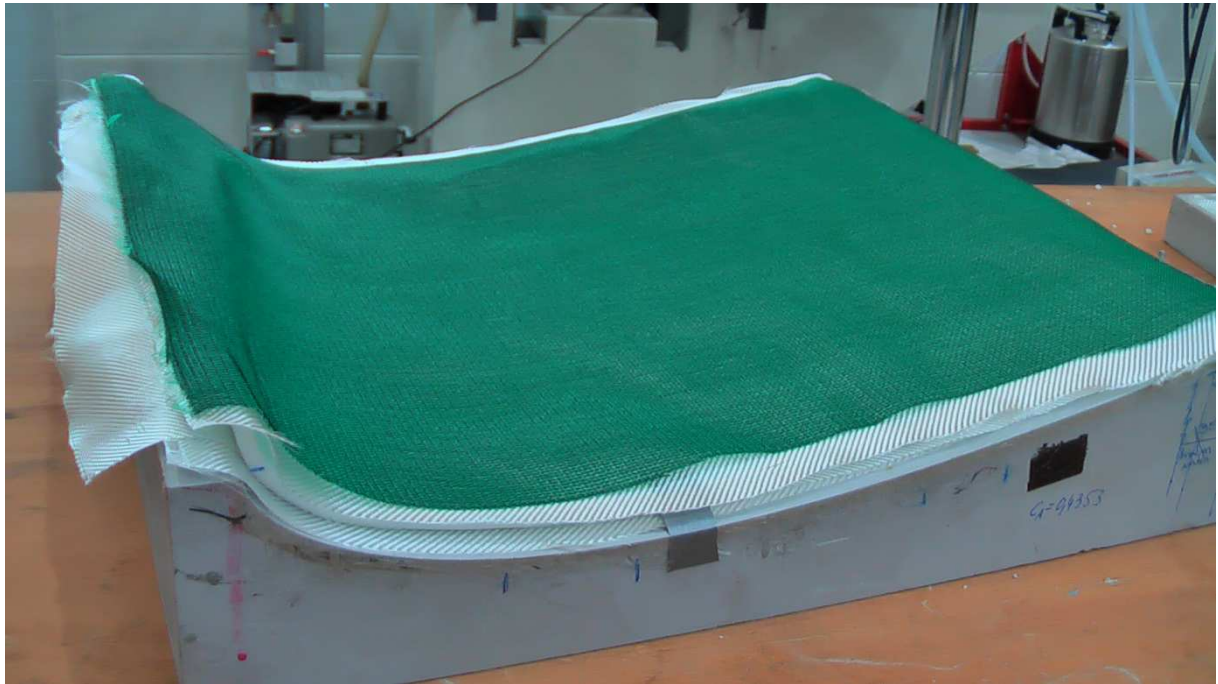


Abbildung 31: Lagenaufbau des trockenen Sandwichbauteils

Bei den geringen Formabmessungen kann das gesamte Bauteil samt Formwerkzeug von einem Folienschlauch umschlossen und versiegelt werden. Für diese Bauteilgröße von ca 0.2m^2 und den gewählten Lagenaufbau wurde eine Harzmenge von 160g benötigt.



Abbildung 32: Laufendes RIFT-Verfahren des oberen Flügelsegments

Die ausgehärteten und bereits entformten Bauteile des Flügelsegmentes werden in Abbildung 33 und 34 gezeigt.

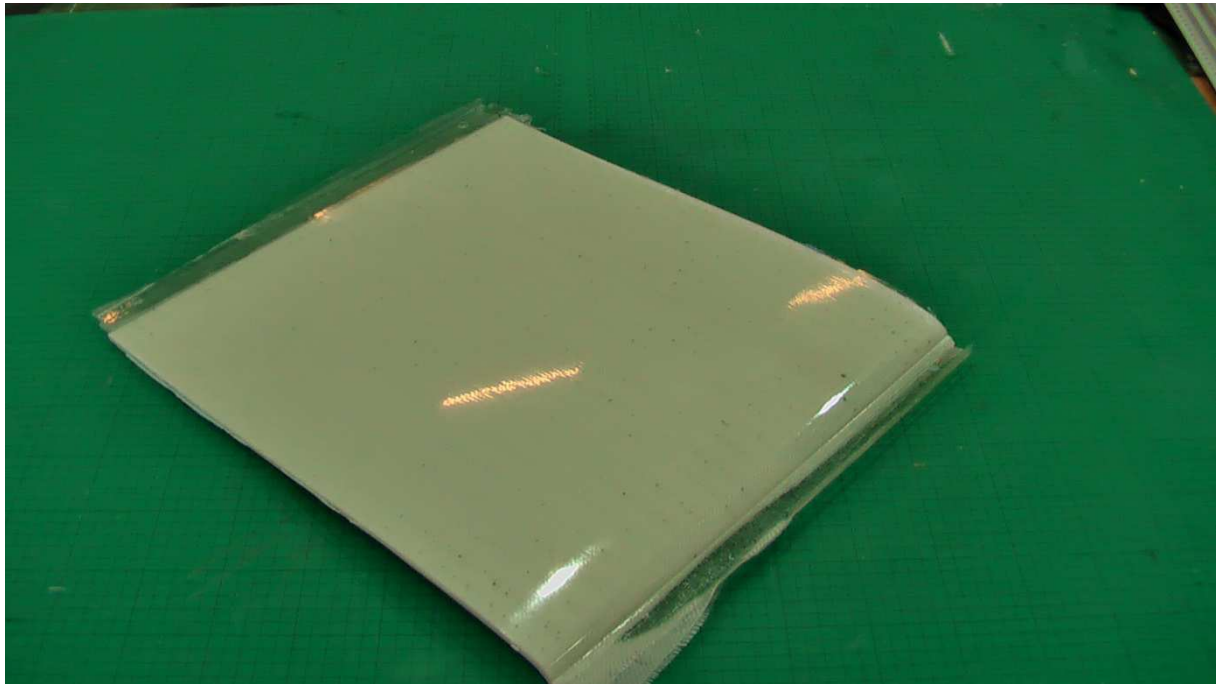


Abbildung 33: Fertige und bereits entformte Unterseite des Flügelsegmentes



Abbildung 34: Fertige und bereits entformte Oberseite des Flügelsegmentes

Eine glänzende und glatte Oberfläche wurde durch den Einsatz von Gelcoat erzielt. Eine noch trockene Laminatstelle an der Flügeloberseite wurde durch das nicht exakte Anliegen des

Depronkerns und einem Faltenwurf der obersten GF-Lage erhalten (Abbildung 35). Die durch das Umformen vergrößerten Poren an der Flügelvorderkante sind ebenfalls gut ersichtlich, es kam jedoch zu keinem Telegraphing-Effekt.

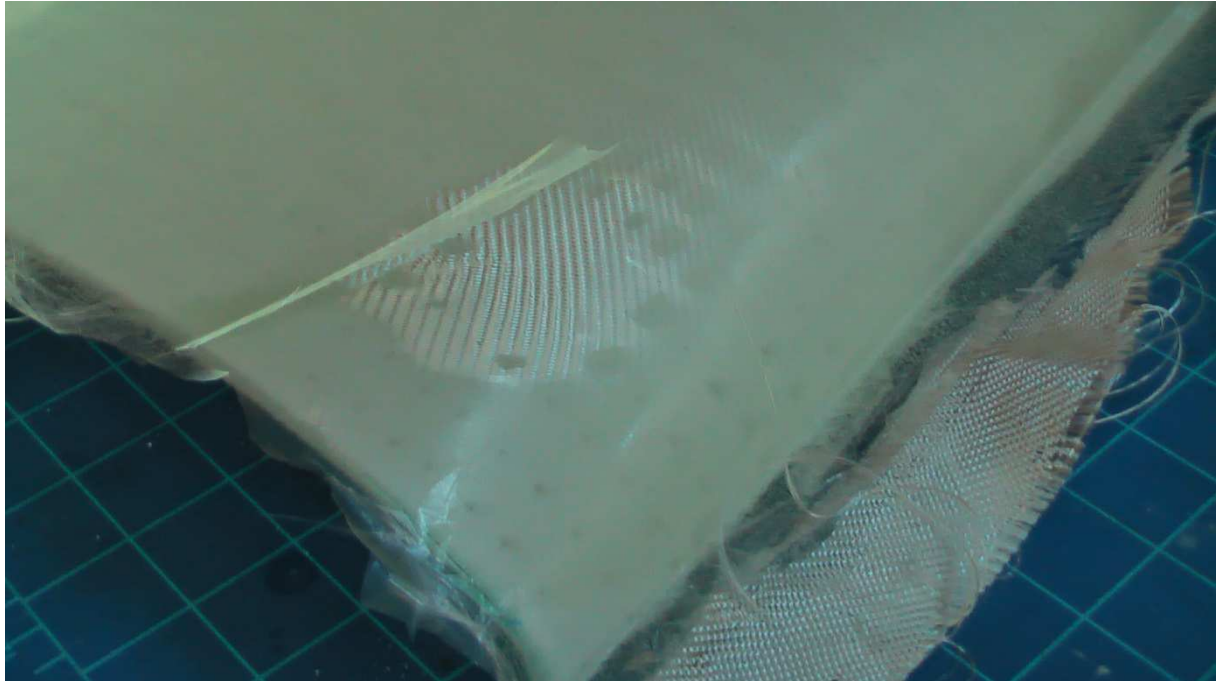


Abbildung 35: Fehlstelle im Laminat durch Faltenwurf

Ebenso lässt sich die Fließrichtung des Harzsystems bei genauer Oberflächenbetrachtung erkennen. Das Gesamtgewicht des Flügelsegments beläuft sich auf ca. 400g.

2.4.2. Erstellung eines Sandwichkerns für den JXP-V-micro

Im Folgendem wird die Erstellung eines in zwei Richtungen gekrümmten Sandwichkerns aus Depron am Beispiel eines Modells des von dem Studiengang Luftfahrt an der Fachhochschule FH JOANNEUM in Graz betriebenen Projektes JXP-V gezeigt. Die experimentelle Plattform ist in der V-Variante ein schwanzloser Nurflügler der eine relativ komplexe, sich in zwei Achsenrichtungen wölbende Form aufweist. Das Original wird bis dato mittels Handlaminierverfahren in Integralbauweise gefertigt. Um eine erhöhte Steifigkeit bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion der Schalen zu erhalten werden NOMEX Aramid-Wabenkerne (Honeycomb) in die Struktur einlaminieren. Diese weisen zwar ein optimales Struktur-Gewichtsverhältnis auf, deren Verformbarkeit erweist sich jedoch als relativ

begrenzt. In Bild 37 ist die Strukturform des mit Aramid-Waben (braun-goldiges Material) verstärkten Bereiches gut zu erkennen. Hinzu kommt, dass eine stumpfe Verklebung der beiden Schalen an der Vorderkante erfolgen muss. Eine feste Verklebung kann nur durch eigens angefertigte Profilvorderkante bewerkstelligt werden, welche von innen beide Schalen überlappen.

Im folgendem soll also gezeigt werden, ob der Einsatz eines Depron-Sandwichkerns in Verbindung mit dem RIFT-Verfahren eine geeignete Alternative zur herkömmlichen Bauart darstellt. Dabei stellt die Verformung des Kernes an die Oberflächenkontur eine entscheidende Schlüsselrolle dar. Ein direkter Gewichtsvergleich der beiden Materialien zeigt auf, dass bei der Verwendung einer 5mm NOMEX-Wabe (145g/m^2), oder eines Depronkernes mit der Stärke von 6mm (198g/m^2) das Depron um ca. 30% schwerer ausfällt als die Aramid-Wabe, jedoch 1mm dicker ist. Dieser Nachteil könnte sich jedoch durch die höhere Steifigkeit (da der Kern über den gesamten Bereich eingesetzt werden kann) und durch den höher realisierbaren Faser-Volumengehalt mittels RIFT-Verfahren ausgleichen. Weiteres könnte die Fertigung der zusätzlichen Nasenleisten entfallen, da eine vergrößerte Stirnfläche für die Verklebung zur Verfügung stünde, welche von innen mit einer Lage GF zusätzlich verbunden werden könnte.



Abbildung 36: JXP-V Projekt. Original und Windkanalmodell.

Für die Kernerstellung des JXP-V-micro wurde ein entsprechendes Depronstück mit einer Materialstärke von 3mm mit genügend Überstand ausgeschnitten. Da die größte Verformung im vorderen Nasenbereich erfolgt, sollte die Schriftzugausrichtung quer zur Flugzeuglängsachse erfolgen. Die Perforierung darf erst nach der Verformung erfolgen, da ansonsten zu große Löcher entstehen, wie in Abbildung 37 ersichtlich.

Im allgemeinen hat sich herausgestellt, dass eine exakte Anpassung der kleinen Form mit ihren engen Kantenradien sich als relativ schwierig herausstellt.

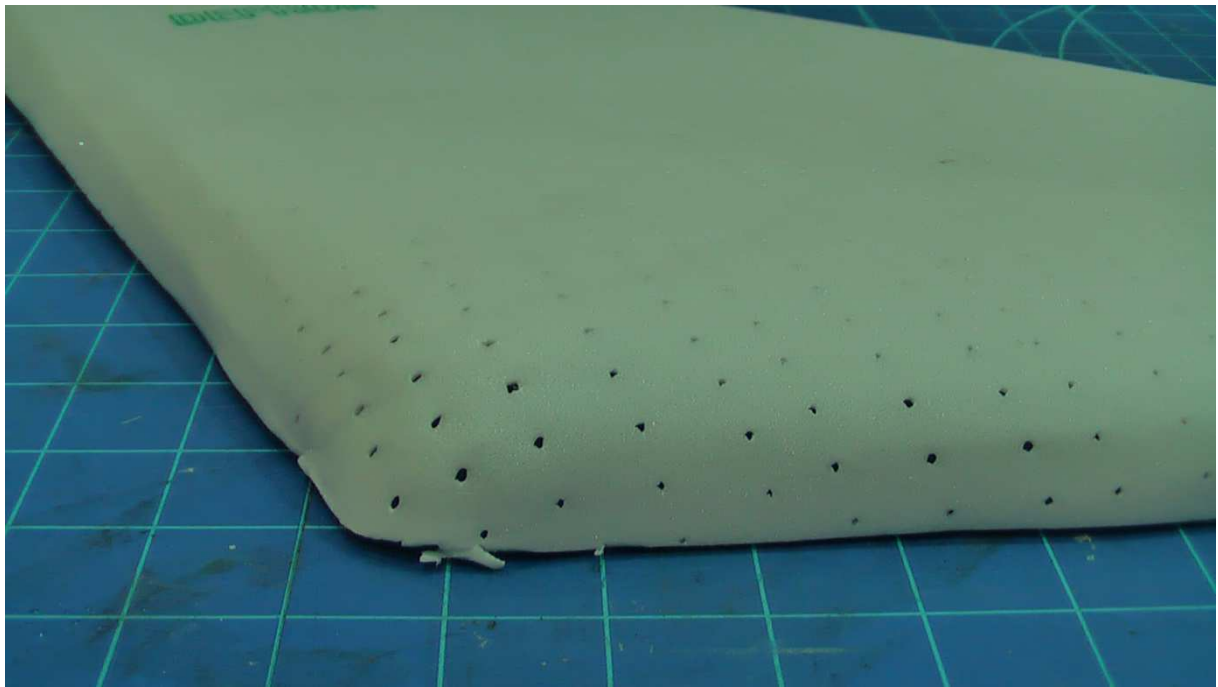


Abbildung 37: Fertiger Depronkern der untern Schale

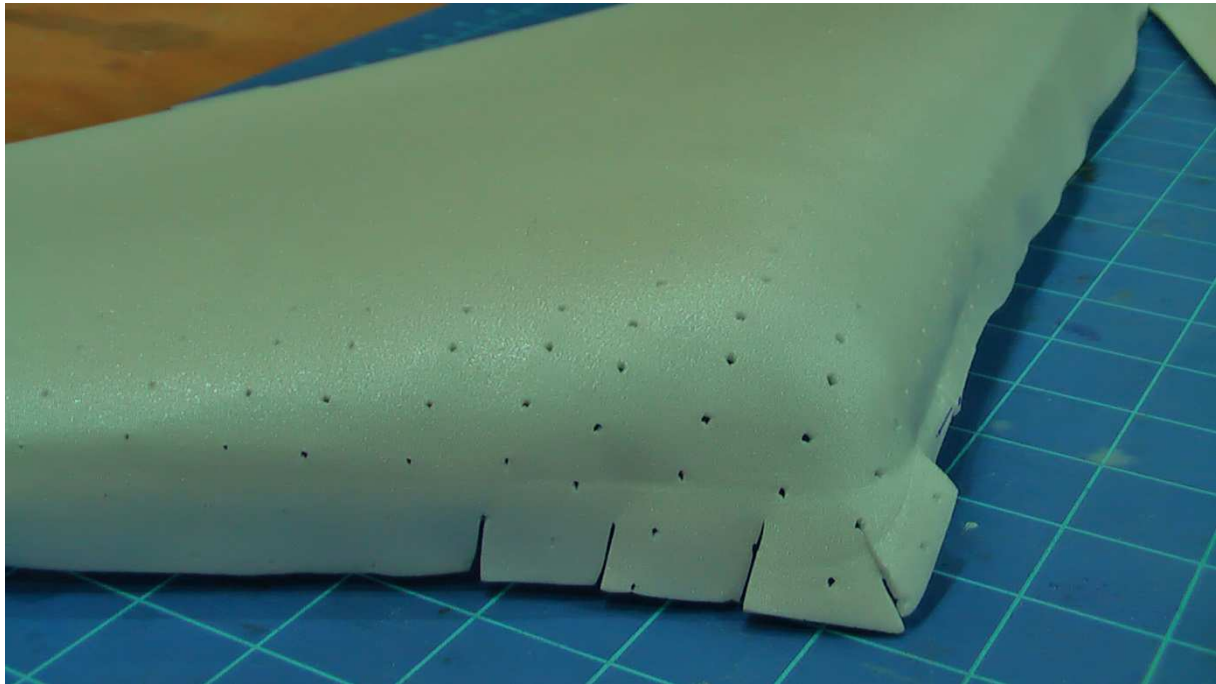


Abbildung 38: Fertiger Depronkern der oberen Schale

3. Diskussion

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass das RIFT-Verfahren erst ab einer gewissen Bauteilgröße markante Vorteile gegenüber dem Handlaminierverfahren aufweist. Bei der Fertigung von einfachen Platten, oder mittleren Bauteilgrößen, wie die Seitenverkleidung eines Schneemobils, gleicht sich der zeitliche Aufwand für den RIFT-Aufbau mit dem langwierigen Tränkungsprozess des Handlaminierverfahrens wieder aus.

Das Erreichen höherer Faser-Volumengehälter durch das RIFT-Verfahren wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Es wurde versucht Bauteile mit höchster Oberflächengüte zu erstellen, welche grundlegend von der Formwerkzeugsoberfläche definiert wird. Die verwendete Edelstahlplatte zeichnete selbst nach mehrmaligen Polieren feinste Strukturen an der Laminatoberfläche ab. Um Lufteinschlüsse und poröse Materialeigenschaften zu vermeiden ist die Verarbeitung von entgasten Harzsystemen für zukünftige Projekte zu empfehlen, da die kleinen Luftblasen trotz des herrschendem Unterdrucks im Laminat bleiben. Die Harzausbreitung hat sich an einem lokalen Einlass stets als radial erwiesen ungeachtet der Position des Absaugstutzens. Es gibt jedoch verschiedenste Arten um die

Fließrichtung gezielt auszurichten. So z.B. kann ein Spiralschlauch für eine Vergrößerung des gleichzeitigen Harzeinlass bzw. Absaugstutzens verwendet werden. In Ecken, oder Kanten kann durch das Verlegen von Materialien mit höherer Permeabilität eine bessere Durchtränkung erreicht werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die ständig wachsende Nachfrage von FVK in verschiedensten Branchen zur Herstellung von leistungsfähigeren Bauteilen, welche zur Effizienzsteigerung dienen sollen benötigt ein kostengünstiges und einfaches Herstellungsverfahren. Besonders für den schnellen Aufbau von Prototypen, oder Mock-ups sind Methoden, welche mit relativ geringem Aufwand zu qualitativ hochwertigen Resultaten führen von hohem Interesse.

Das in dieser Arbeit behandelte RIFT-Verfahren stellt, neben dem Handlaminierverfahren, genau jene gewünschten Aspekte zur Verfügung. Der wesentliche Vorteil gegenüber dem Handlaminierverfahren besteht in der teilautomatisierter Funktionsweise und dem erhöhten gesundheitlichen Aspekt, da ein direkter Kontakt mit den meist toxischen Harzsystemen vermieden werden kann. Dies ist vor allem bei großen und flächigen Bauteilen von Nutzen, da z.B. bei der Konstruktion eines Segelyachtrumpfes die Laminierer dauerhaft den entweichenden Gasen direkt ausgesetzt sind und auf dem Laminat herumlaufen müssen.

Die Anwendung des RIFT-Verfahrens setzt genaue Kenntnisse bezüglich Harzfließverhalten und eingesetzten Materialien für eine erfolgreiche und vollständige Matriceinbringung voraus. Besonders komplexe Bauteile benötigen hohes Fachwissen, welches mit dem Gebrauch von Simulationssoftware ergänzt werden kann.

In Abhängigkeit der Fluidität des Matrixwerkstoffes steht dessen Infusionsgeschwindigkeit bei einem definiert herrschenden Differentialdrucks. Da das Harz sich am schnellsten über die Fließhilfe über das Bauteil verteilt, gefolgt von einer vertikalen Laminatstränkung, muss das angelegte Vakuum an die Abmessungen des Laminats angepasst werden um eine oberflächliche Harzverteilung, gefolgt von vermehrten Ansammlungen in der Harzfalle zu vermeiden. Das RIFT-Verfahren eignet sich auch insbesondere zur Erstellung von Sandwichbauteilen, vorausgesetzt ein geeigneter, geringfügig aufsaugender Kernwerkstoff

wie z.B. Depron wird hierbei verwendet. Hierbei muss auf Materialeigenschaften geachtet werden, um eine beschädigungsfreie Verformung zu erhalten.

Literatur

- [1] Williams, C., Summerscalest, J. and Grove, S., “Resin Infusion under Flexible Tooling (RIFT)”, Elsevier Science Ltd., Composites Part A 27A, S1359-835X(96)00008-5 , 1996, pp. 517-524.
- [2] Brouwer, W., Herpt, E.C.F.C. and Labordus, M., “Vacuum injection moulding for large structural applications”, Elsevier Science Ltd., Composites Part A 34, S1359-835X(03)00060-5, 2003, pp. 551-558
- [3] Bode, R., Grasser, S., Gruber, U., Hocheegger, G. and Pfitzmaier, E., Europäisches Patentamt, Patent zu “Verfahren zur Herstellung eines auf einem flächigen Carbonfaser-Gewebe basierenden Reibmaterials für Nassreibelemente und nach dem Verfahren hergestelltes Reibmaterial“, EP 1 505 310 A2, filed 09 Feb. 2005.
- [4] Cichosz, J., “Kunst- und Verbundstofftechnik”, Skriptum, FH JOANNEUM – University of Applied Sciences, Graz, Österreich, 2011/2012.
- [5] Reiprich, M., “Fertigungstechnik in der Luftfahrt, Faserverbund”, Skriptum, FH JOANNEUM – University of Applied Sciences, Graz, Österreich, 2011/2012.
- [6] Machinek, A.,K., “Leichtbau”, Skriptum, FH JOANNEUM – University of Applied Sciences, Graz, Österreich, 2012/2013.
- [7] Afendi, M., Banks, W.M. and Kirkwood, D., “Bubble free resin for infusion process”, Elsevier Science Ltd., Composite Part A 36, Glasgow, UK, 2005, 739-746.
- [8] Ehrenstein, W.G., “Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften”, Hanser, 2006.