

Laborpraktikum des Moduls Faserverbund- und Hybridwerkstoffe der Privaten Hochschule für Wirtschaft und Technik Vechta/Diepholz (PHWT)

-Herstellung eines Kanus durch Handlaminieren-

1. Vorwort

Im Rahmen des dualen Studiums an der PHWT besteht für Studierende der Ingenieurwissenschaften die Möglichkeit, das Wahlfach "Faserverbund- und Hybridwerkstoffe" zu belegen. Teil der Praxisorientierten Ausbildung ist hierbei das Laborpraktikum. In den vergangenen Jahren wurden lediglich kleine Probekörper wie Platten, Winkel oder Kleinstmodelle gefertigt. Im Sommersemester 2024 wurde erstmals der Versuch unternommen, einen 4-Personen-Canadier zu fertigen. Nachdem diese Änderung im Ablauf bekannt gegeben wurde gab es ein ungewöhnlich großes Interesse an dem Modul, sodass letzten Endes 6 Gruppen gebildet wurden, die jeweils ein Kanu gefertigt haben.

Als Vorlage diente ein "Original"-Vier-Personen-Canadier. Von diesem wurde von den Betreuern zunächst eine Form abgeformt. Dies erfolgte mittels des Vakuum-Infusionsverfahrens, welches in Kapitel Formbau näher erläutert wird. Die eigentlichen Kanus sind dann mittels Handlaminieren mit anschließendem Vakuumpressen hergestellt worden.

2. Arbeitssicherheit und allgemeiner Umgang mit Epoxid-Harz-Systemen

Während des gesamten Herstellungsprozesses haben sich die Teilnehmer umsichtig zu verhalten und die folgenden Sicherheitsvorschriften zu berücksichtigen:

Allgemeine Sicherheitsvorkehrungen:

- GHS-Sätze beachten
- Vermeiden Sie den Hautkontakt sowie das Einatmen von Dämpfen.
- Der Konsum von Lebensmitteln oder Getränken am Arbeitsplatz ist untersagt.
- Legen Sie regelmäßig Pausen ein und waschen Sie sich gründlich die Hände.

Schutzausrüstung:

- Schutzbrille tragen.
- Atemschutzmaske verwenden (geeignet für Dämpfe, Stäube je nach Arbeitsschritt).
- Chemikalienbeständige Handschuhe anlegen.
- Lange (enganliegende) Kleidung tragen.

- Bei Verwendung von Lautem Gerät (z.B. Schleif und Sägearbeiten) ist Gehörschutz zu tragen

Arbeitsumgebung:

- Arbeitsbereich großflächig abdecken
- Arbeiten Sie in einem gut belüfteten Bereich (vorzugsweise in einem Raum mit Abluftsystem oder im Freien).
- Halten Sie den Arbeitsplatz sauber und trocken.
- Stäube umgehend absaugen

Umgang mit Materialien:

- Herstellerangaben zum Umgang und Verwendung (z.B. Mischverhältnisse) der Materialien sind vor Verwendung zu Prüfen
- Verschüttetes Material ist unverzüglich aufzuwischen und ordnungsgemäß zu entsorgen.

Lagerung:

- Bewahren Sie Chemikalien in ihren originalen, fest verschlossenen Behältern auf.
- Lagern Sie diese kühl und trocken, fern von Zündquellen und direkter Sonneneinstrahlung, vorzugsweise in einem hierfür vorgesehenen Gefahrstoffschrank

Entsorgung:

- Entsorgen Sie Reststoffe und Verpackungen entsprechend den lokalen Vorschriften. (zB. Werkstoffhoff bei Gefahrstoffen)
- Geben Sie Chemikalien weder ins Abwasser noch in den Hausmüll.

Erste-Hilfe-Maßnahmen:

- Bei Hautkontakt gründlich mit Wasser und hierfür vorgesehene Seife abwaschen.
 - o Keine Lösungsmittel verwenden!!! Dies kann zusätzliche Hautirritationen auslösen.
- Bei Augenkontakt die Augen sofort mit reichlich Wasser ausspülen (Augendusche verwenden) und ärztlichen Rat einholen.

3. Verwendete Materialien

Harz-Härter-System:

- Epoxidharz L
- Härter GL1

- Härter GL2
- Formenharz P
- Härter P-25
- EP-Gelcoat farblos

Trennmittel:

- Folientrennmittel PVA,

Farben:

- Universal-Epoxid-Farbpaste reinweiß (RAL 9010)
- Universal-Epoxid-Farbpaste signalblau (RAL 5005)
- Universal-Epoxid-Farbpaste smaragdgrün (RAL 6001)
- Universal-Epoxid-Farbpaste zinkgelb (RAL 1018)
- Universal-Epoxid-Farbpaste silbergrau (RAL 7001)
- Universal-Epoxid-Farbpaste tiefschwarz (RAL 9005)

Fasern:

- Triaxiales Gelege (-30/0/30)

Vakuum-Infusions-Aufbau:

- Drehschieber-Vakuumpumpe VT 4.10
- Vakuumfolie PO120, 200 cm, Rolle
- Abreißgewebe 64 g/m²
- Spiralschlauch (9/12 mm,HDPE)
- Pumpenschlauch (Ø 6/8 mm,LD-PE) transparent
- Fließhilfe Dianet 135, Breite 200cm
- Verbinde
- Schlauchklemmen
- Sprühkleber INFUTAC Grün
- Harzfalle
- Vakuum-Dichtband GRAU, 3 x 12 mm

Formenbau:

- Div. Schrauben
- Kantholz
- Doppelseitiges Klebeband
- Mdf-Platten
- Pappe

Weitere Verbrauchsmaterialien-Werkzeuge:

- Persönliche Schutzausrüstung
- Thixotropiermittel TM 100
- Flashtape

- Styrodur
- Winkelbleche
- Gurtband
- Waage
- Uhr
- Rührstab
- Pinsel
- Farbrollen
- Becher
- Putztücher
- Handschleifer
- Stemmeisen
- Messer
- Scheren
- Hammer
- Entformungskeile
- Dremel
- Handkreissäge
- Winkelschleifer
- Akkuschauber
- Staubsauger (mit geeignetem Staubfilter)
- Kreppband

4. Fertigung

4.1 Formenbau

Im Rahmen dieses Arbeitsschritts ist das Ziel, anhand eines Urmodells eine zweigeteilte Form abzuformen, in die anschließend das Bootsmodell laminiert werden kann. Die Notwendigkeit einer zweiteiligen Formgebung ergibt sich aus der Geometrie des Originalboots (Urmodell), welche zu Hinterschnitten führt. Diese Hinterschnitte verhindern ein problemloses Ausformen bei einer ungeteilten Form.

Um zwei separate Formhälften fertigen zu können, welche im späteren Verlauf miteinander verbunden werden können, ist es notwendig, beide Hälften mit einer Krempe zu konstruieren. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Steg längs des Urmodells aufgebracht, der als Stütze dient, um die Krempe anzulaminieren. Des Weiteren wird an der späteren Oberseite der Form eine Kante benötigt, um hier den Vakuumfolienaufbau zu befestigen. Hierzu wird ebenfalls eine Krempe am Dollbord des Urmodells befestigt.



Abbildung 1 Urmodell mit Krempe am Kiel (Pappe) und Dollbord (MDF-Platte)

Aufgrund der unebenen Oberfläche des Urmodells sowie der unbekanntenen Materialverträglichkeit hinsichtlich Trennmittel und Harz-Härter System wäre selbst bei einer direkten Abformung mittels Formbauharz eine Nachbearbeitung der Oberfläche erforderlich. Um eine Schädigung des Urmodells zu vermeiden, wird auf die Verwendung von Trennmittel verzichtet. Daher erfolgt ein vollständiges Verpacken in Vakuumfolie.



Abbildung 2 In Vakuumfolie eingepacktes Urmodell mit vorpräpariertem Vakuumdichtband

Im Rahmen der Vorbereitung für den späteren Vakuumaufbau erfolgt im nächsten Schritt die Verklebung des rundumlaufenden Vakuumdichtbands. Wird dieser Schritt vor dem (trockenen) Legen der Fasern durchgeführt, kann gewährleistet werden, dass zumindest auf einer Seite der Klebeverbindung keine Fasern als luftführende Brücken fungieren.

Im Anschluss erfolgt die Drapierung der Fasern unter Zuhilfenahme von Sprühkleber. Auf die drei Triax-Lagen des Gewebes folgt ein Aufbau aus Abreißgewebe, Lochfolie, Fließhilfe sowie der oberen Lage Vakuumfolie.



Abbildung 3 Drapierte Faserschicht

Die Positionierung des Harzeinlaufs erfolgt entlang des Kiels, während die Absaugung mittels mehrerer einzeln schließbarer Ausgänge entlang der Unterseite realisiert wird.

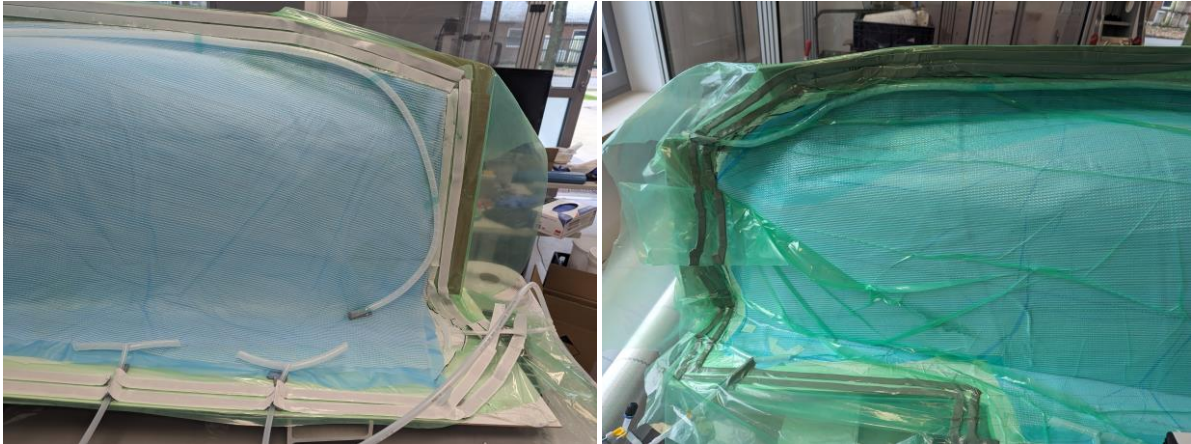


Abbildung 4 Links: Infusionsaufbau Harzeinlauf/-auslauf; Recht: abgedeckt mit Vakuumfolie und Vakuum gezogen

Es wird empfohlen, vor der Vakuumpumpe eine Harzfalle zu installieren, um diese vor Beschädigungen zu schützen. Im Anschluss erfolgt die Infusion mit dem gemäß Anleitung angemischtem Harz (Harz L mit Härter GL2). Nach der Aushärtungszeit, welche mindestens 24 Stunden beträgt, erfolgt das Ausformen. Der zuvor beschriebene Aufbau wird für die zweite Formhälfte in identischer Weise wiederholt.



Abbildung 5 Drehschieber-Vakuumpumpe VT 4.10 mit vorgeschalteter Harzfalle, Manometer und Belüftungsventil

Nach Herstellung der beiden Formhälften muss ein Untergestell gebaut werden. Hierzu wird einfaches Kantholz verwendet. Die Verbindung der beiden Formhälften erfolgt durch Verschrauben der jeweiligen Rahmen.



Abbildung 6 miteinander verschraubte Formhälften mit Holzunterbau

Im nächsten Schritt ist eine Aufarbeitung der Form von innen erforderlich. Zu diesem Zweck müssen zunächst zu große Unregelmäßigkeiten, welche durch die Ursprungsform sowie die darauf befestigte Vakuumfolie entstanden sind, ausgeglichen bzw. teilweise abgeschliffen werden. Auch passen beide Formhälften durch die Verwendung der wenig steifen Pappkrempe nicht besonders gut aneinander.

Das Auffüllen erfolgt mit stark angedicktem Harz L, wobei die Verwendung von Thixotropiermittel TM 100 das Wegfließen verhindert. Die manuelle Verarbeitung erlaubt zudem die Verwendung von Härter GL1. An besonders tiefen Beulen erfolgt eine Stabilisierung durch Fasern. An der Verbindungsstelle der Formhälften wird zunächst Vakuumfolie als Trennschicht auf die eine Hälfte geklebt und die andere an gespachtelt. Anschließend (nach Aushärten) erfolgt ein Wechsel der Aufbauposition, sodass die zunächst angespachtelte Seite abgeklebt wird und die zunächst abgeklebte Seite an gespachtelt wird.

Um eine möglichst ebene Oberfläche zu erhalten, werden die Arbeitsschritte Laminieren und Schleifen mehrfach durchgeführt.

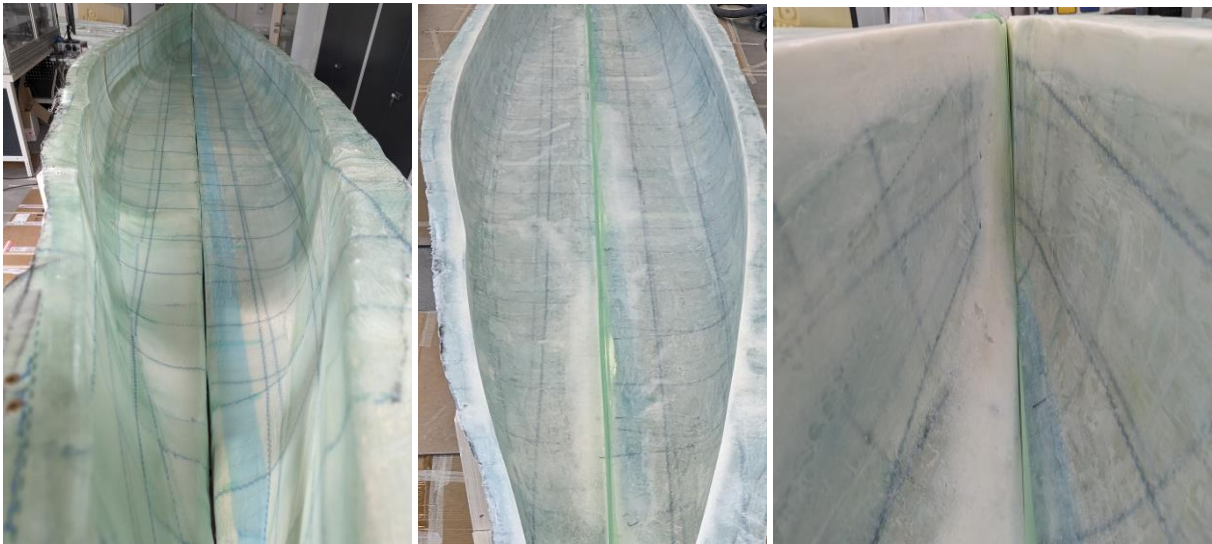


Abbildung 7 Links: unausgebesserte Form; Mitte: ausgebesserte Form mit Vakuumfolie als Trennebene; Rechts: Detailansicht des Ausgebesserten Buck Bereichs, ebenfalls mit Trennebene, in weiß gut erkennbar die ausgebesserten Bereiche

Es folgt das Aufbringen des Formbauharzes (Formenharz P + Härter P-25). Auch hier wird im Anschluss geschliffen und beide Schritte ggf. mehrfach wiederholt. Das Vorgehen an der Verbindungskante der Formhälften erfolgt hierbei analog zu der vorangegangenen Ausbesserung.



Abbildung 8 Mit Formbauharz beschichtete und abgeschliffene Form. Mit stellenweise aufgebracht zweiter Formbauharzschicht



Abbildung 9 obere Hälfte: „fertig“ gespachtelt und geschliffene Oberfläche; unten: noch unebene Oberfläche durch die sogar noch der Formunterbau durch scheint

4.2 Handlaminieren und Vakuumverpressen

Vor Beginn des Laminierprozesses ist eine luftdichte Verbindung der Formhälften erforderlich. Zu diesem Zweck wird Vakuumdichtband zwischen die Formhälften geklebt und im Anschluss von oben mit Flashtape verklebt, um die Fuge luftdicht abzudichten. Im Anschluss wird an der oberen Randfläche

Kreppband angebracht. Analog zum Formbau um zu gewährleisten das später keine Fasern die Luftdichtigkeit negativ beeinflussen. Im nächsten Schritt wird die zu laminierende Fläche nach zugehöriger Verarbeitungsinformation mit Trennmittel ein getrennt.



Abbildung 10 Zum laminieren vorbereitete Form, links: Kreppband zum abkleben der Fläche, auf der später das Vakuumdichtband aufgeklebt werden soll; Mitte: der mit Vakuumdichtband und Flashtape abgedichtete Verbindungspalt

Im Anschluss an die vorbereitenden Maßnahmen erfolgt die Aufbringung einer Schicht Gelcoat (EP-Gelcoat + GL 1). Der Mischvorgang hat gemäß den Angaben im Datenblatt zu erfolgen; zudem ist eine zusätzliche Farbzugabe (Universal-Epoxid-Farbpaste, 10 % der Gesamtmasse von Harz und Härter) vorzunehmen. Des Weiteren ist es empfehlenswert, eine Testplatte mit dem Gelcoat zu bestreichen, um die Aushärtung zu überwachen (Fingerprobe). Es ist darauf zu achten, dass die Form vollständig in ausreichend großer Dicke mit Gelcoat bedeckt ist, sodass keine freien Stellen mehr sichtbar sind. Im Anschluss ist ein antrocknen der Gelcoat-Schicht erforderlich, bevor mit dem Laminieren begonnen werden kann.

Die Verteilung des Gelcoats erfolgt mittels Pinsel oder Farbrolle. Ist das Harz für die senkrechten Bereiche der Form zu dünnflüssig, kann auch hier mit TM100 angedickt werden.



Abbildung 11 Aufgetragener Gelcoat

Im Folgenden soll ein Laminat aus vier Lagen triaxialer Glasfasern erstellt werden, welches im Wechsel laminiert werden soll: zwei Lagen in 0 Grad sowie zwei Lagen in 90 Grad zur Fahrtrichtung des Bootes. Zunächst ist das Epoxidharz mit dem Härter (Harz L + GL2, wegen der Größe wird ausreichend Verarbeitungszeit benötigt) gemäß den Anweisungen des Herstellers exakt zu abzuwiegen und gründlich zu mischen. Das Harz kann für eine einheitlichere Optik ebenfalls durchfärbt werden. Tut man dies nicht, lassen sich im späteren Laminat eingefärbte Markierungsfäden, sowie selbst gesetzte Schnittmarkierungen erkennen.

Im Anschluss wird eine Schicht Harz auf die vorbereitete Form aufgetragen, um eine gleichmäßige Basis zu schaffen. Im Anschluss werden die Glasfasermatten in Schichten mit Überlappung auf die mit Harz angefeuchtete Gelcoatschicht aufgelegt. Im Anschluss erfolgt die gleichmäßige Einarbeitung des Harzes in die Glasfasermatten mit einem Pinsel, einer Farbrolle oder einer Walze, bis eine vollständige

Durchtränkung der Fasern erreicht ist. Zur Beseitigung von Luftblasen wird ein vorsichtiger, gleichförmiger Druck mit einer Entlüftungsrolle auf die Oberfläche ausgeübt.

Bei den nachfolgenden Lagen ist sicherzustellen, dass eine ausreichende Menge an Harz auf der Oberfläche der vorherigen Schicht aufgebracht wird. Es ist zu beachten, dass sich in Radien und Ecken keine Spannungen im Gewebe bilden, da dies ansonsten zu Hohlräumen führt. Zusätzlich ist das Glasfasergewebe ca. 15 cm über den Saum hinaus zu drapieren (trocken). Dieser Überhang wird später benötigt um GFK-Stäbe einzulaminieren. Diese Stangen dienen als Stabilisierung der Bordwand, also als Dollbord.

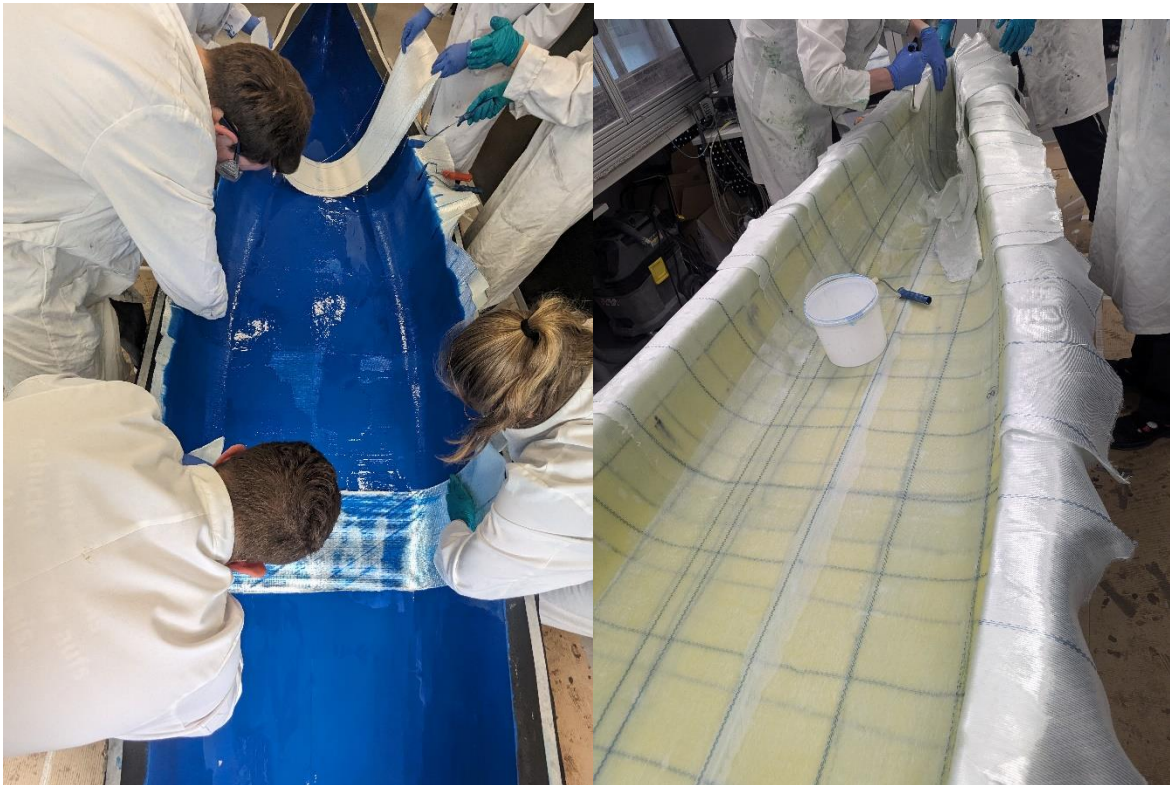


Abbildung 12 links: Legen der ersten Lage (quer) auf den Gelcoat; rechts: ungefärbte dritte Lage(quer) mit deutlich zu erkennenden Markierungsfäden der ersten beiden Lagen (quer, längs)

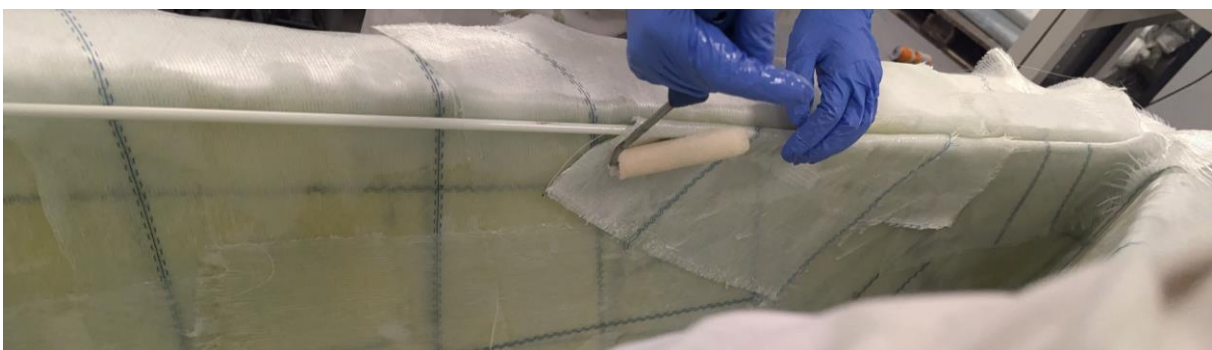


Abbildung 13 Einlamieren des Verstärkungsstabs unter den Überhang

Im Anschluss erfolgt der Aufbau für das Vakuumverpressen in analoger Weise zum Aufbau des Vakuuminfusionsverfahrens. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass die Fließhilfe durch ein

Vlies ersetzt wird. Es ist zu beachten, dass das Abreißgewebe möglichst eben aufliegt. Eine Faltenbildung kann zu einem Überlappen der Faserverstärkung über das Abreißgewebe führen, was eine spätere vollständige Entfernung des Abreißgewebes erschwert. Es ist darauf zu achten, dass das Abreißgewebe, die Lochfolie, das Vlies und die Vakuumfolie möglichst rutschfrei und spannungsfrei drapiert werden. Eine "Brückenbildung" führt zu einer mangelhaften Verdichtung des GFK an dieser Stelle.



Abbildung 14 Fehlerbild: Wegen überlappen von Faserverstärkung über das Abreißgewebe nicht vollständig entfernbares Abreißgewebe, sowie vom Saum heruntergerutschte GFK-Stabverstärkung. Es wurde beim Vakuumziehen nicht ausreichend darauf geachtet, dass sich das Gewebe nicht verschiebt

Bei der unvorteilhaften Form des Kanus kann die Verdichtung des GFK durch das Einbringen kleiner Entlastungslaschen und großer Taschen in der Vakuumfolie verbessert werden. Die Taschen an Bug und Heck werden dann in die Form hinein gefaltet. Im Anschluss wird die Vakuumfolie mit Flashtape

an den zuvor durch das Kreppband geschützten Bereichen der Form abgedichtet.



Abbildung 15 Links: Entlastungsschlaufen; Rechts: Ins Boot gefaltete Tasche

Vakuumziehen erfolgt über 4 Anschlüsse unter denen jeweils ein ca. 10 cm x 10cm großes Stück Fließhilfe positioniert wird. Die Vakuumstutzen werden entlang der Längsachse des Kanus positioniert. Im Anschluss werden die Luftanschlüsse mit Schläuchen verbunden und zur Vakuumpumpe geführt. Zwischen dem Kanu und der Vakuumpumpe wird eine Harzfalle installiert, um ein Eindringen von Harz in die Pumpe zu verhindern.

Das Vakuum wird für die Dauer des Aushärtens gehalten.



Abbildung 16 Anschluss

4.3 Entformen und Nacharbeiten

Im Anschluss an den Laminierprozess sowie das Aushärten im Vakuum erfolgt die Entfernung der Vakuumschläuche, der Luftanschlüsse sowie der Vakuumfolie. Im darauffolgenden Schritt wird die Lochfolie gemeinsam mit dem Vlies vom Rest des Kanus abgelöst, wobei das Abreißgewebe zum Einsatz kommt.

Das eigentliche Entformen erfolgt unter zu Hilfenahme von Keilen und Druckluft. Hierzu werden die Beiden Formhälften voneinander gelöst (alle Schrauben entfernen). Keile vorsichtig an der Oberkante der Form zwischen Boot und Form getrieben und anschließend mit Druckluft versucht das Boot anzuheben.



Abbildung 17 Entformungskeile zwischen Form und Bootswand

Die Form ist im Anschluss mechanisch von Gelcoatresten sowie Flashtape und Vakuumdichtband zu säubern.



Abbildung 18 Entformtes Boot mit gereinigter Form

Nach dem Ausformen lassen sich Fehlerbilder erkennen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn das Gewebe zu stark gespannt wurde. In der Folge bildet sich eine Luftblase zwischen dem Gewebe und dem Gelcoat. An diesen Stellen ist die Haftung nicht gegeben, sodass es zu einer Ablösung des Materials kommt. Eine nachträgliche Bearbeitung ist erforderlich. Hierzu ist das gesamte brüchige und lose Material zu entfernen. Im Anschluss kann das Aufbringen des Gelcoats erfolgen. Nach dem Aushärten kann eine einheitliche Oberfläche durch Schleifen und Polieren des Boots erzielt werden.



Abbildung 19 Gelcoat-Abplatzer am Ausgeformten Boot

4.4 Bootsausbau

In Anlehnung an das Originalkanu erfolgt zunächst die Fertigung der vier Sitze. In einem ersten Schritt ist der entsprechende Rahmen zu konstruieren, welcher im Anschluss mit Gurtband bespannt wird. Anschließend werden die verwobenen Gurte fest getackert und die Schnittenden verschmolzen, um ein Ausfransen der Materialien zu verhindern.

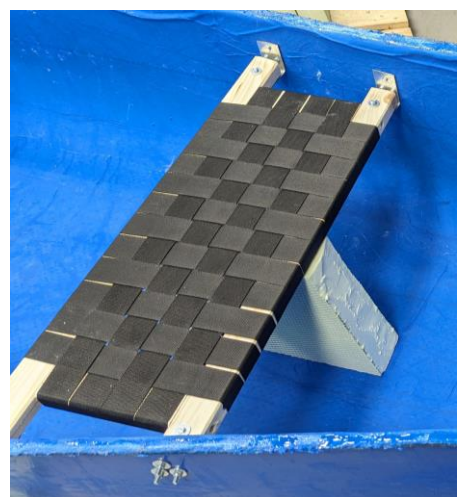


Abbildung 20 unbespannte und bespannte Sitzgestelle

Die Montage erfolgt mit Winkeln an der Bootswand. Zusätzlich können die Sitze mittig abgestützt werden.