

Glasfaser-Polyester- Kunststoffe

**Die Verarbeitung in
Theorie und Praxis**



GFK

VOSSCHEMIE
Kalthärtende Kunststoffe

Plaschke

Glasfaser-Polyester-Kunststoffe

Unsere Druckschriften sollen nach bestem Wissen beraten, der Inhalt ist jedoch ohne Rechtsverbindlichkeit.

Verlag: Klaus-W. Voss, 2082 Uetersen
Esinger Steinweg 50, Tel.: (0 41 22) 7 17-0, Fernschreiber 2 18 526
2. Auflage 1979

Druck: Brunsdruck, Grafischer Betrieb, 2082 Uetersen

Dipl.-Ing. F.-P. PLASCHKE

Glasfaser – Polyester Kunststoffe

Die Verarbeitung von faserverstärkten
Polyesterharzen in Theorie und Praxis

Ein Fachbuch der  VOSSCHEMIE

Einleitung

Verstärkte Kunststoffe bilden einen wesentlichen Teil der Chemiebaustoffe, die den klassischen Werkstoffen auf vielen Gebieten ihren angestammten Platz erfolgreich streitig gemacht haben. Neben der Möglichkeit, die synthetischen Baustoffe ihrem Verwendungszweck optimal anzupassen, sind es vor allem die einfachen Verarbeitungsmöglichkeiten, die wesentlich zur Verbreitung beigetragen haben. Handwerker verschiedener Gewerbe und auch Laien mit Sachverstand bilden immer noch die größte Gruppe von GFK-Verarbeitern. Sie entwickeln aus eigenen Praxiserfahrungen – oft in mehreren Versuchen – Problemlösungen. Dabei fehlt es teilweise an Grundkenntnissen über die Möglichkeiten und das Verhalten des Werkstoffs. Hier will das Buch über eine Vervollständigung des Wissenstandes und seinen ausführlichen praktischen Teil zu besseren Lösungen verhelfen. Alle, die zum ersten Mal mit dem Werkstoff arbeiten, finden konkrete Arbeitsbeschreibungen und Rezepte für die Herstellung von Formteilen, wie z. B. eines Bootes im Selbstbau. In seiner Gesamtheit und der Aufteilung des Stoffs wendet sich das Buch aber ebenso an Studierende und Konstrukteure, die für Einzelprobleme auf weiterführende Literatur hingewiesen werden.

Als Beispiel für Problemlösungen ist bewußt der Bootsbau gewählt worden, weil dort in Leichtbauweise Werkstücke gefertigt werden, die vielen vorkommenden Belastungen zugleich ausgesetzt sind. Es scheint nicht übertrieben, den modernen Bootsbau als die „Hohe Schule“ für die verstärkten Kunststoffe zu bezeichnen, soweit es sich um glasfaserverstärktes Polyesterharz handelt und dessen konstruktive und werkstoff-technische Auslegung.

Wer ein optimales Bauteil aus GFK herstellen will, muß sich einen Überblick verschaffen über die zur Zeit bestehenden Möglichkeiten der Harz-, Verstärkungs- und Verarbeitungstechnik. Das Anliegen dieses Buches ist es, entsprechende Unterlagen zusammenzustellen unter besonderer Berücksichtigung der kalthärtenden Verfahren.

1. Polyester und Glasfaser - der moderne Chemiewerkstoff

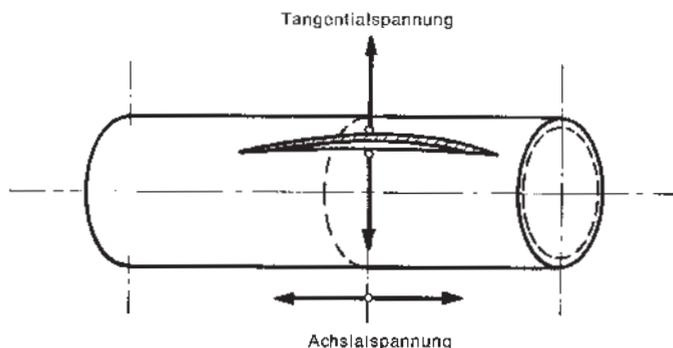
1. 1. 1. Grundsätzliches

Die klassischen Konstruktionsbaustoffe Metall und Holz werden als Halbzeug angeliefert und durch den Verarbeiter lediglich zugepaßt. Mit dem Rohling liegen also auch seine mechanischen Eigenschaften fest.

Im Gegensatz dazu wird der glasfaserverstärkte Kunststoff durch den Verarbeiter selbst erst geschaffen. Damit ist die Möglichkeit gegeben, insbesondere die mechanischen Eigenschaften des Fertigteils seinem Verwendungszweck optimal anzupassen.

Ein gutes Beispiel dafür ist ein Behälter unter Innendruck (siehe Abb. 1). Wird er unter Druck gesetzt, so ist seine Tangentialspannung genau doppelt so groß wie die Spannung in axialer Richtung.

Abb. 1



Geplatzter Druckbehälter

Im Mantel von Behältern mit Innendruck herrscht in tangentialer Richtung eine doppelt so große Spannung wie in axialer Richtung, z. B. platzen Würstchen stets in Längsrichtung. GFK-Behälter können durch richtungsorientierte Verstärkungen den erforderlichen Festigkeiten besser angepaßt werden als das mit Werkstoffen ohne Vorzugsrichtungen, wie z. B. Metallen, möglich ist.

Beweis: Zu lange gekochte Würstchen platzen in Längsrichtung und zerfallen nicht in zwei Hälften. Will man den Druckbehälter in Stahl bauen, wird man also die Wandstärke nach der Tangentialspannung auslegen. In axialer Richtung ist er dann jedoch zu dick gewählt, weil die Axialspannung nur halb so groß ist. Bedingt durch die gleiche Festigkeit des Stahls in beiden Richtungen, wird er zu schwer.

Derselbe Behälter in verstärktem Kunststoff kann vom Hersteller durch gezielte Anordnung der Verstärkungen in die Hauptbelastungsrichtung genau den Festigkeitsforderungen angepaßt werden.

Die Möglichkeit, verstärkte Kunststoffe nach den Festigkeitsforderungen in jeder Richtung auszulegen, macht ihre Vorzüge deutlich.

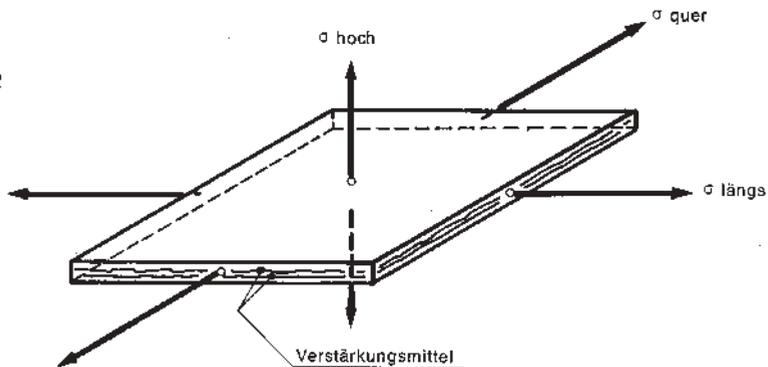
1. 1. 2. Der Verbundwerkstoff

Zusammengesetzte Stoffe bestehen aus mindestens zwei Teilstoffen, dem Bindemittel (Matrix, entsprechend Mutterstoff) und der Verstärkung (Armierung). Diese Kombination ist vom stahlarmierten Beton her bekannt. Innerhalb des Baustoffs findet eine Aufgabenteilung statt:

Beim glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) leitet das Matrix-Harz die äußeren Kräfte in die Glasverstärkung (Matten, Glasseidengewebe, Rovinggewebe) ein und schützt sie gegen chemische Angriffe.

Die Glasverstärkung gibt dem Baustoff die erforderliche Festigkeit. Je nach Anforderung und Typ der Verstärkung können dabei einzelne Richtungen bevorzugt werden. Höher beanspruchte Bereiche eines Bauteils erhalten gegebenenfalls größere Querschnitte. Bei der Herstellung des Verbundwerkstoffes werden die verschiedenen festen Verstärkungsmittel (z. B. Glasmatten) mit flüssigem Polyesterharz getränkt. Das geschieht beim Handauflegeverfahren oder Handverfahren einzeln für jede Schicht. Der Baustoff wird also aufgeschichtet, **laminiert**, und das Fertigprodukt als **Laminat** bezeichnet.

Abb. 2



Die verschiedenen Festigkeiten eines Laminats In Längs-, Quer- und Hochrichtung

Die Zugfestigkeiten in einem Schichtstoff sind in Längs- und Querrichtung durch die eingelegten Verstärkungen groß. In Hochrichtung hängen sie im wesentlichen von Harzfestigkeit ab und sind erheblich kleiner.

Aus dieser „Bauweise“ des Werkstoffs ergibt sich bereits ein unterschiedliches Festigkeitsverhalten. Während man bei einer Platte aus GFK die Festigkeit in Längs- und Querrichtung durch die Verstärkungsmittel beeinflussen kann, ist man in der Hochrichtung allein auf die Harzfestigkeit angewiesen. Aus dieser Tatsache ergeben sich wichtige konstruktive Regeln.

1. 1. 3. Der Aufbau einer Wand aus glasfaserverstärktem Polyester

Eine Massivwand aus GFK besteht aus drei fest miteinander verbundenen Schichten: Einer Deckschicht auf der Witterungs- oder Wasserseite, einem tragenden Wandteil in der Mitte und einer Deckschicht auf der Innenseite.

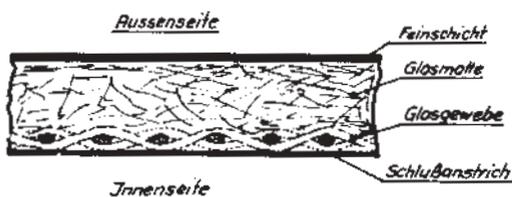


Abb. 3

GFK-Wände haben eine Feinschicht auf der Außenseite. Der tragende Wandteil ist aus Verstärkungen (Matte, Gewebe) und Harz hergestellt.

Der Schlußanstrich bildet die Rückseite des Bauteils.

Aufbau einer GFK-Wand

Die äußere Deckschicht besteht aus Feinschichtharz oder Gelcoat. Es handelt sich hier um ein elastisch eingestelltes Polyesterharz, das gleichzeitig der Farbträger ist, also die Pigmente enthält. Die Dicke der Feinschicht beträgt in der Regel 0,5 mm. Ihre Unversehrtheit ist bei wasserbelasteten Bauteilen die Bedingung für lange Lebensdauer.

Die tragende Wand besteht aus sogenanntem Laminierharz und einer Verstärkung, die aus Glasmatte und Gewebe aufgebaut sein kann. Zu den gängigen Mattensorten gehören Gewichte je Quadratmeter von 225, 300, 450 und 600 g, als gängige Gewebetypen können 580, 670, 800 und 900 g Rovingewebe bezeichnet werden. Für spezielle Bauteile werden Glasseidengewebe von 80 bis 500 g/m² eingesetzt.

Hinter der Feinschicht liegt bei Handauflege-Teilen aus fertigungstechnischen Gründen eine 300 g/m²-Matte, bei besonders leichten Teilen kann auch eine 225 g/m²-Matte verwendet werden. Es folgen abwechselnd Matten und Gewebe, meistens überwiegen zahlenmäßig die Matten. Die Gewebe sind im Schnittbild gut als Faserbüschel erkennbar, die Matten sind dabei praktisch nicht zu sehen. Zwei oder mehr Gewebe aufeinander findet man bei Bauteilen aus Epoxidharz häufiger als bei Teilen aus Polyesterharz.

Die Innenseite der GFK-Wand ist zwar meistens nicht so hoch witterungs- oder wasserbelastet wie die Feinschicht auf der Außenseite, bedarf jedoch auch eines Schutzes aus einer harzreichen Schicht, dem lufttrocknenden LT-Lack (Topcoat). Er versiegelt bei den drucklosen Fertigungsverfahren die Glas-Harz-Wand zur zweiten Seite hin.

2. Einteilung der Kunststoffe

Die Kunststoffe werden in zwei Gruppen eingeteilt:

Thermoplaste sind Stoffe, die bei Raumtemperatur fest sind. Erwärmt man sie, so werden sie zunächst weich und bei weiterer Wärmezufuhr schließlich flüssig, wie z.B. PVC. Ihre Moleküle sind im festen Zustand fadenförmig angeordnet.

Duroplaste wie ungesättigte Polyester- und Epoxidharze werden flüssig angeliefert und härten durch beigegebene Zusätze aus. Einmal fest, können diese Harze nicht mehr verflüssigt werden. Ihre Molekülgruppen sind in einem räumlich angeordneten Netzwerk miteinander verbunden.

Während die Thermoplaste, als Profile oder Platten angeliefert, durch den Verarbeiter lediglich zusammengefügt werden, bieten besonders die kalt-härtenden Duroplaste auf Polyester- und Epoxidbasis u. a. dem Verarbeiter die Möglichkeit, Bauteile mit relativ geringem Aufwand frei in einer Form zu gestalten.

2.1. Ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze)

Unter den duroplastischen Harzen nehmen von der Anwendung her die ungesättigten Polyesterharze mit Abstand den ersten Platz ein.

Die Veresterung von ungesättigten und zum Teil gesättigten Dicarbonsäuren mit mehrwertigen Alkoholen führt zum ungesättigten Polyester.

Mit ebenfalls ungesättigten Lösungsmitteln – in den meisten Fällen Styrol – gehen die ungesättigten Polyester bei der Härtung eine Verbindung ein, sog. Mischpolymerisation.

Beim Übergang der Harze vom flüssigen über den gelförmigen in den festen Zustand wird lediglich Wärme frei (Polymerisationswärme). Das Entweichen flüchtiger Bestandteile, in der Regel Styrol, ist zur Erhärtung der Harze nicht notwendig, sondern nur eine beim Handauflegeverfahren und beim Faserspritzverfahren unvermeidliche Nebenerscheinung. Auf der Seite des Luftzutritts bleiben die Laminier- und Eingießharze bei der Härtung klebrig. Der Luftsauerstoff verhindert (inhibiert) die Härtung. Die klebrige Fläche geht jedoch einen guten Verband mit der nachfolgenden Harzschicht ein.

Die Einteilung der Harze wird einmal nach ihrer Anordnung im Laminat vorgenommen. Danach unterscheidet man:

- | | |
|---|---|
| a) Feinschichten
(Gelcoat) | – witterungsbelastete Seite bei aus Formen gewonnenen Laminaten |
| b) Laminierharze
(Gießharze, Matrix) | – zum Einbetten der Verstärkungsmittel im tragenden Wandteil |

- c) Schlußlacke (LT-Lack, Topcoat) – Abschluß der Laminat-Rückseite und als Abschluß von Beschichtungen.

Außerdem unterscheidet man nach Anwendungsgebieten, z. B.:

- Eingießharze – Zum Einbetten von Gegenständen.
 Klebe- und Füllharze – Mit Füllstoffen versetzte Harze.

2. 1. 1. Einteilung von Laminier- und Eingießharzen

Die Einteilung der Harze wird nach verschiedenen Gesichtspunkten und Merkmalen vorgenommen:

A. Charakteristische Harz-Komponenten

1. Orthophthalsäure Basis für alle Standardharze, sie zeigen bei Freibewitterung gute Eigenschaften.
2. Isophthalsäure Harz mit guter Wasserbeständigkeit und guter Chemikalienbeständigkeit.
3. Terephthalsäure Harze mit verbesserter Beständigkeit.
4. Hetsäure Flammwidrige oder selbstverlöschende Harze.
5. Neopentylglykol Harze mit guter Chemikalienbeständigkeit und erhöhter Temperaturbeständigkeit.
6. Bisphenol-A Harze mit guter Beständigkeit gegen Laugen, Säuren und heißes Wasser.
7. Chlorparaffin Flammwidrige Harze.

B. Weitere Harz-Merkmale

1. Konfektionierung

- a) Nicht vorbeschleunigt Harz kann vom Verarbeiter mit dem Amin-Bp-System, dem Kobalt-MEKP- oder in einem anderen System ausgehärtet werden.
- b) Vorbeschleunigt Harz ist entweder mit einem Amin-, mit Kobalt- oder einem anderen Beschleuniger vom Hersteller versehen. Das Etikett sagt aus, welcher Härter verwendet werden muß.

2. Reaktivität

- a) Schwachreaktiv Harz mit sehr langsamer Durchhärtungsgeschwindigkeit
- b) Mittelreaktiv Harz mit gemäßiger Durchhärtungsgeschwindigkeit für größere und mittlere handgefertigte Teile
- c) Hochreaktiv Harz mit hoher Durchhärtungsgeschwindigkeit für kleine und mittlere Teile.

3. Wärmestandfestigkeit

- a) Martensgrad 50–65 °C Standardharze
- b) Martensgrad 70–90 °C Harz mit erhöhter Wärmestandfestigkeit
- c) Martensgrad 100 °C und mehr Hochwärmestandfeste Harztypen.

4. Kennzeichnung der Zähflüssigkeit (Viskosität)

- a) Unthixotropiert Harz ohne Verdickungszusätze mit einer bestimmten Viskosität
- b) Thixotropiert Künstlich verdicktes Harz für die Arbeit an senkrechten Flächen (strukturviskos).

5. Lichtstabilisierung

- a) Nicht lichtstabilisiert Harz vergilbt unter der ultravioletten Strahlung der Sonne im Laufe der Zeit
- b) Lichtstabilisiert Die Lichtdurchlässigkeit des Harzes bleibt über mehrere Jahre erhalten.

6. Flammwidrigkeit

- a) Normalharz Ausgehärtetes Harz ist brennbar
- b) Flammwidriges oder selbstverlöschendes Harz Sonderqualitäten für das Bauwesen und für Karosserieteile nach DIN 4102 oder DIN 53438.

7. Elastizität

- a) Normalharz Harz mit Bruchdehnung bis zu 2 %
- b) Elastisches Harz Harz mit hoher Bruchdehnung; evtl. nur zum Abmischen mit Normalharzen geeignet.

8. Chemikalienbeständigkeit

- a) Normalharz Gute Säurebeständigkeit
- b) Chemikalienbeständiges Harz Säuren-, laugen- und lösungsmittelbeständig, siehe Einzelspezifikation.

9. Oberflächenverhalten

- a) Normalharz Die Oberfläche des an der Luft härtenden Harzes bleibt klebrig, z. B. Laminierharze.
- b) Oberflächen-trocknendes Harz Auch bei Luftkontakt härtet das Harz klebfrei aus, z. B. LT-Lack.

10. Lösungsmittel-Abdampfung

- | | |
|----------------------------|---|
| a) Normalharz | Bei der Verarbeitung im Handverfahren dampft das Lösungsmittel (meistens Styrol) ungehindert ab |
| b) Umweltfreundliches Harz | Durch Zusätze (z. B. Paraffin) wird die Lösemittelverdampfung gebremst. |

11. Farbindikator

- | | |
|----------------------------|---|
| a) Normalharze | Harze, die auch nach der Härtung noch die meistens schwache Färbung wie im Lieferzustand beibehalten |
| b) Harze mit Farbindikator | Harze mit einer Indikator-(Anzeige-)Farbe, die sich im Laufe der Topfzeit verliert. So kann der Verarbeiter kontrollieren, ob Härter beigegeben wurde, ob der Härter gleichmäßig eingerührt ist und wann die Topfzeit etwa abläuft. |

Jedes Harz kann durch Begriffe aus der Gruppe A und der Gruppe B beschrieben werden.

2. 1. 2. Zusätze für UP-Harze, die auch der Verarbeiter zugeben kann

Polyesterharze können mit Zusätzen versehen werden. Eingesetzt werden:

- a) Füllmittel, um den normalerweise auftretenden Schrumpf von 7 bis 9 Vol.% des reinen Harzes herabzusetzen und zur Verbesserung der Druckfestigkeit.
- b) Verdickungsmittel, um die Viskosität des Harzes zu verändern; sog. strukturviskose Harze, meistens gekennzeichnet durch ein „T“ hinter der Bezeichnung.
- c) Pigmente, zum Einfärben der Harze.
- d) Faserförmige Stoffe, zur Erhöhung der Festigkeit, zur Verringerung des Schrumpfs und zur Verbesserung der Wärmestandfestigkeit.
Außer bei Spezialanwendungen, wie sie in der Luft- und Raumfahrt auftreten, werden fast ausschließlich E-Glasfasern in Matten und Gewebeform zur Verstärkung eingesetzt. Den Oberflächenschutz übernehmen zuweilen synthetische oder Glasvliese (Heißpreßteile).
- e) Monomere Lösungsmittel, meistens Styrol, zur Benetzungs-Verbesserung der Glasfasern.
- f) Additive wie Haftverbesserer, Lichtstabilisatoren, Inhibitoren etc.

Harzbezeichnung	Kennzeichnende Eigenschaften	Andere Eigenschaften	Verarbeitungsverfahren	Hauptverwendungsgebiete	Bemerkungen
VISCOVOSS® AZUR	beschleunigtes Standardharz mit Farbindikator	hochreaktiv, umweltfreundlich	Hand-, Faserspritzverfahren	Abdeckhauben, Gartenteiche, offene Boote, Gartmöbel, Behälter	Universalharz mit guten Tränkeigenschaften, einfach zu handhaben s. o.
VISCOVOSS® AZUR Super	beschleunigtes Standardharz mit Farbindikator und Wärmestabilität während der Härtung	hochreaktiv, umweltfreundlich	Hand-, Faserspritzverfahren	s. o.	s. o.
VISCOVOSS® BE/U	unbeschleunigtes Standardharz	hochreaktiv	Hand-, Faserspritzverfahren	s. o.	Universalharz mit guten Tränkeigenschaften
VISCOVOSS® GTS	beschleunigtes Eingießharz	lichtstabil, hochtransparent	Gießverfahren	Eingießtechnik, für Lehranstalten, Souvenir-Industrie, Hobbybedarf	Universalharz mit guten Tränkeigenschaften härtet spannungsarm aus
VISCOVOSS® I 25 B	beschleunigtes Harz mit verbesserter Wasserbeständigkeit, Basis: Isophthalsäure	hochreaktiv	Hand-, Faserspritzverfahren	größere Boote und beheizte Schwimmbecken	wasserbelastete Lamine bei erhöhten Anforderungen
VISCOVOSS® T 40 B	beschleunigtes Laminierharz, wasserbeständig	mittelreaktiv	Hand-, Faserspritzverfahren	Bau und Beschichtung von Warmwasserbecken, Chemieanlagen	Spezialharz für warmwasserbelastete Lamine, Lagerbehälter
LEGUVAL® N 30	Standardharz mit erhöhter Bruchdehnung (4%)	mittelreaktiv, hohe Viskosität	Warmpreßtechnik, z. T. für handwerkliche Verfahren	im Warmpreßverfahren gefertigte Wickelteile, industrielle Formteile	ausgezeichnete mechanische Eigenschaften

Die wichtigsten Laminier- und Eingießharze der VOSSCHEMIE

Harzbezeichnung	Kennzeichnende Eigenschaften	Andere Eigenschaften	Verarbeitungsverfahren	Hauptverwendungsgebiete	Bemerkungen
LEGUVAL® N 50	Standardharz, niedrige Viskosität	mittelreaktiv	Hand- und Faserspritzverfahren, kontinuierliche Fertigung	große Formteile aller Art, Tanks u. Behälter f. Lebensmittel	sehr gute Tränkeigenschaften
LEGUVAL® N 50 S	lichtstabiles Harz	mittelreaktiv	s. o.	Lichtkuppeln, Lichtplatten, Fensterbänke	sehr gute Transparenz
LEGUVAL® N 50 T	thixotropisiertes Standardharz	mittelreaktiv	Hand- und Faserspritzverfahren	große Formteile aller Art, Tanks u. Behälter f. Lebensmittel, Lichtkuppeln, Lichtplatten, Fensterbänke	N 50-Einstellung mit geringer Abblaufneigung
LEGUVAL® N 50 TU	s. o.	umweltfreundlich	s. o.	s. o.	geringe Styrolabdampfung
LEGUVAL® W 16	Standardharz mit erhöhter Wärmebeständigkeit	hochreaktiv	Hand-, Faserspritzverfahren, Wickeltechnik	kleine und mittlere Formteile, Lebensmittel-Behälter, Heizöltanks	besonders geeignet bei leicht erhöhter Einsatztemperatur
LEGUVAL® W 35	Harz mit verbesserter Chemikalienbeständigkeit, Basis: Neopentylglykol	hochreaktiv	Hand- und Faserspritzverfahren, Wärmepressen, Wickeln	Getränkentanks, Chemieanlagen	gute Chemikalienbeständigkeit, hohe Wärmebeständigkeit
LEGUVAL® W 41	Harz mit guter Chemikalienbeständigkeit, Basis: Bisphenol-A	schwachreaktiv	Hand-, Faserspritzverfahren, Wickeltechnik	Chemieanlagen	chemisch und mechanisch hoch belastbar bei hohen Temperaturen
LEGUVAL® W 45	Harz mit sehr guter Chemikalienbeständigkeit, Basis: Bisphenol-A	schwachreaktiv	Hand-, Faserspritzverfahren, Wickeltechnik	Chemieanlagen	übertrifft die Eigenschaften von W 41 gegenüber anorganischen Chemikalien

Fortsetzung: Laminier- und Eingießharze der VOSSCHEMIE

Harzbezeichnung	Kennzeichnende Eigenschaften	Andere Eigenschaften	Verarbeitungsverfahren	Hauptverwendungsgebiete	Bemerkungen
VISCOVOSS® KR	aminbeschleunigtes Harz	hochreaktiv	Handverfahren	Reparaturen an Blech und GFK	schnelle Anhärtung, Zusatz für Standardharze bei niedrigen Temperaturen
LEGUVAL® K 27	aminbeschleunigtes Harz	hochreaktiv	Kaltpressen	Gehäuse, Hauben u. a.	auch als Zusatz für Standardharze bei niedrigen Temperaturen
LEGUVAL® F 30	flamwidriges Harz, Basis Hetsäure	mittelreaktiv	Hand-, Faserspritzverfahren, Warmpressen	Formteile, Fahrzeug-Karosserien	mit Antimontrioxid schwer entflammbar nach DIN 4102
LEGUVAL® F 30 S	flamwidriges Harz, lichtstabil, Basis: Hetsäure	mittelreaktiv	Hand- und Faserspritzverfahren	transparente Formteile und Platten	auch ohne Zusatz von Antimontrioxid selbstverlöschend
LEGUVAL® F 35	flamwidriges Harz mit Chlorparaffin	hochreaktiv	Handverfahren	flamwidrige Formteile, Fahrzeug-Karosserien	durch Zusatz von 7 % Antimontrioxid beständig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme. Vergilbt unter UV-Strahlung
LEGUVAL® E 81	Weichharz	schwachreaktiv		zum Elastifizieren anderer Harze	in reiner Form wird E 81 praktisch nicht verwendet

Fortsetzung: Laminier- und Eingießharze der VOSSCHEMIE

2.1.3. Laminier- und Eingießharze der VOSSCHEMIE

In der vorstehenden Tabelle wird ein Teil der Harze vorgestellt, die die VOSSCHEMIE anbietet. Es handelt sich um die üblicherweise verwendeten Typen. VISCOVOSS® ist das Warenzeichen der VOSSCHEMIE-Harze. Leguval® ist der Markenname für die Harze der Bayer A.G. (1).

2.2. Feinschichten (Gelcoats) und ihre Einteilung

Feinschichten bilden bei Formteilen nach dem Handauflegeverfahren und dem Faserspritzverfahren die der Witterung zugewandte Deckschicht des Laminats. Bei der Herstellung von Teilen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) wird die Feinschicht im ersten Arbeitsgang in die mit Trennmitteln behandelte Form eingebracht.

Die Feinschicht besteht (je nach Typ) aus leicht elastifizierten Basisharzen mit

- Farbzusätzen
- Verdickungsmitteln
- Verlaufmitteln
- Entlüftungsmitteln
- UV-Stabilisatoren
- Zusätzen zur Erhöhung der Kratzfestigkeit
- Flammschutzmitteln
- monomerem Lösungsmittel je nach Erfordernis

Feinschichten können aufgestrichen, gerollt oder gespritzt werden.

Sie werden je nach Wunsch unbeschleunigt oder kobaltbeschleunigt geliefert.

Alle Feinschichten bleiben an der der Luft zugekehrten Seite (Luftseite) nach der Erhärtung zunächst klebrig, so daß nur die der Form zugekehrte Seite klebefrei ist.

Sie sollen bei mindestens 18 °C verarbeitet werden und eine Topfzeit von 15 bis 20 Minuten aufweisen. Diese Temperatur gilt für den Harzansatz **und** die Formenoberfläche.

Die einzelnen Feinschichten können nach folgenden Merkmalen eingeteilt werden:

- | | |
|--------------------------|--|
| a) chemisch | entsprechend den Laminierharzen (siehe 2.1.1. A 1 bis 6) |
| b) mechanisch | nach Bruchdehnung, Kratzfestigkeit |
| c) Hauptanwendungsgebiet | industrielle Formteile, Boote, Formenbau |
| d) Auftragsart | Pinsel, Rolle, Spritzpistole |

Feinschicht-Bezeichnung	Kennzeichnende Eigenschaften	Andere Eigenschaften	Lieferbar in der Einstellung	Auftragsmittel	Verwendungsgebiet	Bemerkungen
VISCOVOSS® G 300	Standardfeinschicht	gute chemische Beständigkeit	S, B, farbige	Pinself, ggf. Spritzpistole	industrielle Formteile aller Art	sehr gute Witterungsbeständigkeit
VISCOVOSS® G 301	besonders elastische Feinschicht	hohe Bruchdehnung	S, B, farbige	Pinself, ggf. Spritzpistole	mechanisch hoch beanspruchte Formteile	besonders schlagzähe Einstellung
VISCOVOSS® G 327	Isophthal-säurefeinschicht	verbess. Chemikalien- und Wasserbeständigkeit	S, B, farbige	Pinself	Boote, beheizte Schwimmbecken	Feinschicht für wasserbelastete Laminate
VISCOVOSS® G 330 S	flamwidrige Feinschicht	lichtstabilisiert	S, B, farbige	Pinself, ggf. Spritzpistole	Lichtkuppeln, Lichtplatten, Rohre und Behälter	Feinschicht für das Bauwesen
VISCOVOSS® G 335	chemisch belastbare Feinschicht	thermisch und chemisch belastbar	S, B, farbige	Pinself	Lebensmittelbehälter, galvanische Bäder	Feinschicht für spezielle Probleme des Anlagen- und Behälterbaus
VISCOVOSS® G 340	chemisch belastbare Feinschicht	thermisch und chemisch belastbar	S, B, farbige	Pinself, ggf. Spritzpistole	Bau von beheizten Schwimmbecken	Feinschicht, speziell für den Bau von Schwimmbecken, Chemieanlagen
VISCOVOSS® G 341 B	chemisch hoch belastbare Feinschicht Bisphenol-A	gute Beständigkeit gegen Lösungsmittel	keine Sondereinstellung	Pinself	GFK-Formenbau, Anlagenbau	neben den außer-gewöhnlich guten chemischen Eigenschaften ist das Produkt auch besonders abriebfest

Feinschichtprogramm der VOSSCHEMIE

2. 2. 1. Feinschichtprogramm der VOSSCHEMIE

Um dem Verarbeiter eine optimale Verarbeitung zu ermöglichen, werden alle Feinschichten in pinselfähiger Konsistenz geliefert. Nach Zugabe von bis zu 10 % Styrol kann ein Teil der Gelcoats gespritzt werden. Auf Wunsch sind auch spritzbare Feinschichten lieferbar.

Die Feinschichten sind z. T. vorbeschleunigt (B), lichtstabilisiert (S) und eingefärbt (RAL-Töne) lieferbar (nebenstehende Tabelle gibt eine Übersicht).

2.3. Schlußlacke und ihre Einteilung

LT-Lack (Topcoat) wird im letzten Arbeitsgang auf die Glasharzschicht aufgetragen und härtet an der Luft klebfrei aus.

Bei in Negativformen erstellten GFK-Teilen bildet er den Abschluß auf der nicht witterungsbeaufschlagten Seite.

Bei Beschichtungen von Trägern aus Fremdmaterial mit GFK bildet er die der Witterung zugewandte Schicht.

LT-Lack wird grundsätzlich uneingefärbt geliefert.

Wichtig:

Die Verarbeitungstemperatur des Lacks (und die Temperatur des GFK-Untergrundes) soll zwischen 18 und 25 °C liegen. Direkte Sonneneinstrahlung bei der Verarbeitung muß unterbunden werden (Schattieren).

Die Klebfreiheit des LT-Lacks wird durch einen Paraffinzusatz erreicht. Das Paraffin tritt in der Flüssigkeitsphase an die Oberfläche der Lackschicht und schützt sie vor Luftereinwirkung und vor übermäßigem Styrolverlust. Auf diese Weise tritt eine vollständige Vernetzung auch an der Oberfläche und damit Klebfreiheit ein. Die Konsistenz des LT-Lacks ist so gehalten, daß er mit der Fellrolle aufgetragen werden kann. Wird LT-Lack als Abschluß einer Beschichtung auf der (wasser-) belasteten Seite eingesetzt, so ist ein zusätzliches **Verschlichten des Schlußlacks mit einem Feinschichtpinsel** quer zur Auftragsrichtung **erforderlich**.

LT-Lack ist durch Zugabe von 5 bis 20 % Polyester-Farbpaste einfärbbar.

Die LT-Lacke werden ähnlich den Feinschichten unterteilt. Hinzu kommt das Oberflächen-Aussehen, also: Seidenglänzend oder hochglänzend.

LT-Lack Bezeichnung	Kennzeichnende Eigenschaften	Andere Eigenschaften	Lieferbar in der Einstellung	Auftragsmittel	Verwendungsbereich	Bemerkungen
LT 30 SB	Standard-LT-Lack, Basis: Orthophthalsäure	vorbeschleunigt, mattglänzend, lichtstabilisiert	farblos	Rolle + Pinsel	Formteile aller Art	sehr gute Witterungsbeständigkeit
LT 35 SB	LT-Lack mit verbesserter Beständigkeit, Basis: Neopentylglykol	vorbeschleunigt, mattglänzend, mit Zusatzbeschleuniger auch bis + 10 °C verarbeitbar, lichtstabilisiert	farblos	Rolle + Pinsel	u. a. bei Schwimmbecken- und Bootsbeschichtungen	gute Wasser- und Chemikalienbeständigkeit
LT 40 SB	LT-Lack mit Warmwasserbeständigkeit, Basis: Terephthalsäure	vorbeschleunigt, mattglänzend	farblos	Rolle + Pinsel	u. a. bei Beschichtungen von Warmwasser-Schwimmbecken und Chemiebehältern	sehr gute Warmwasserbeständigkeit

Schlußlacke der VOSSCHEMIE

2.3.1. Schlußlacke der VOSSCHEMIE

Bei der Verarbeitung von LT-Lacken ist der Temperaturbereich von + 18 °C bis + 25 °C anzustreben. Nur LT 35 SB kann unter Beigabe eines Zusatzbeschleunigers bis zu + 10 °C eingesetzt werden.

2.4. Härungsablauf bei Polyesterharzen

Bei der Harzverarbeitung unterscheidet man drei Phasen, die durch das Schaubild verdeutlicht werden (2).

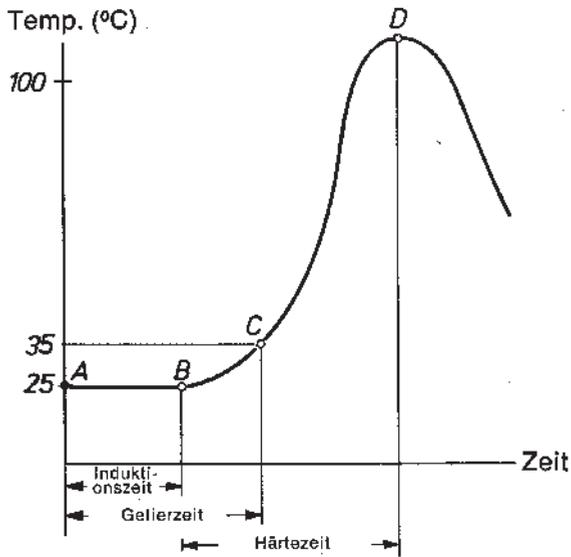


Abb. 4

Phasen der Kalthärtung von UP-Harzen

Das Tränken und Entlüften der eingelegten Verstärkungen wird während der Induktions- oder „Topfzeit“ vorgenommen. In dieser Zeit ist die Harzviskosität niedrig und sein Tränkvermögen am besten. Die Spitztemperatur bei Punkt D ist in starkem Maße abhängig von der Schichtdicke und der Wärmeleitfähigkeit der Form, außerdem vom Harztyp, seinem Härungssystem, dem Harzanteil im Laminat und der spezifischen Wärmeaufnahme der Verstärkungsmittel. Die Temperaturentwicklung entsteht durch die Polymerisation (Kettenbildung) des Harzes und hat Einfluß auf die Entformzeit.

Der Zeitpunkt A ist der Augenblick der Zugabe von Beschleuniger und Härter.

Der Zeitraum von A bis B wird als Induktionszeit oder **Topfzeit** bezeichnet. In diesem Zeitraum beginnt der Peroxidzerfall durch den Beschleuniger (bei der Kalthärtung) oder durch Temperatur-Einfluß (Heißhärtung). Die Zerfallsprodukte des Peroxids (sog. Radikale) werden aber von den in alle lagerstabilen Harze eingebauten Inhibitor-Molekülen zunächst abgefangen. Temperatur und Viskosität des Harzes steigen nicht an. In dieser Zeitspanne werden die Verstärkungen mit Harz getränkt.

Die Zeitspanne von A bis C wird als **Gelierzzeit** bezeichnet. Die Inhibitor-Moleküle sind abgesättigt und die Bildung von quer-vernetzten Polyesterketten setzt ein (sog. Polymerisation), Temperatur und Viskosität des Harzes steigen an. Das Harz geliert bereits (Temperatur ca. 35 °C).

Als **Härtezeit** wird der Zeitraum von B bis D bezeichnet. Das Harz gibt in dieser Phase Energie in Form von Wärme ab (Polymerisationswärme). Die dabei auftretende Spitztemperatur bei D ist abhängig von der Ansatzgröße, Reaktivität und der Ausgangstemperatur des Harzes, dem Härtungssystem, dessen Zugabemenge und dem Wärmeleitvermögen der Form.

Nach D klingt die Temperatur ab. Es existieren allerdings immer noch freie Doppelbindungen im Harz, die Härtung ist also noch nicht völlig abgeschlossen. Im Laufe der Zeit tritt auch bei Raumtemperatur noch eine Nachhärtung ein.

Diese Nachhärtung geht beim Kobalt-MEKP-Härtungssystem williger vonstatten als mit dem Amin-BP-System. Das Erreichen der Endhärte wird durch eine Temperung unterstützt.

Aminbeschleunigte Harze

- a) sind unempfindlicher in bezug auf die Verarbeitungstemperatur
- b) führen zu einer schnellen Härtung
- c) erreichen bei 20 °C keine volle Durchhärtung
- d) führen zu einer leichten Gelbfärbung, daher nicht geeignet für transparente Formteile.

Kobaltbeschleunigte Harze

- a) sind in der Temperaturführung anspruchsvoller
- b) lassen lange Topfzeiten zu
- c) härten bei 20 °C und darüber so gut nach, daß mit ihnen die Forderungen des Lebensmittelgesetzes (Rest-Styrotgehalt unter 0,5 %) erfüllt werden können.
- d) Kobalt in geringer Menge und MEKP-Zusätze verursachen keine Verfärbung des Laminats.

Beschleuniger	Härter	Einsatzgebiet	Temperatur-Bereich für die Verarbeitung	Kennzeichnung
Kobalt (Co)	Methyläthylketonperoxid (MEKP)	Laminierharze/ Feinschichten LT-Lack	12 °C/ 18–25 °C	Standard-Kalt- härtungs-System
Kobalt (Co)	Acetylacetonperoxid* (AAP)	Laminierharze/ Feinschichten LT-Lack	5 °C/ 18–25 °C	ausreichende Topfzeit und schnelle Durchhärtung
Kobalt (Co)	Cyclohexanonperoxid*	Laminier- und Gießharze	ab 12 °C	ausreichende Topfzeit und langsame Durchhärtung
Dimethylanilin (DMA)	Benzoylperoxid* (Bp)	Laminierharze	ab 5 °C	kurze Topfzeit mit schneller Durchhärtung
Dimethylparatol- uidin (DMPT)	Benzoylperoxid* (Bp)	Polyester- Spachtelmassen	ab 5 °C	sehr kurze Topfzeit
Diäthylanilin (DAA)		Zusatzbeschleuniger für LT 35 B	10–18 °C	erweitert den Verarbeitungsbereich von LT 35 B

Übliche Härtungssysteme für kalthärtende Polyesterharze

* Diese Härter sind sowohl flüssig als auch pastenförmig lieferbar

Wichtig: Teilweise sind die Polyesterharze, Feinschichten und der LT-Lack vom Werk mit Beschleuniger versehen. So z. B. unsere Typen:
VISCOVOSS® AZUR mit Kobalt-Beschleuniger
VISCOVOSS® GTS mit einem kombinierten Beschleunigungssystem
VISCOVOSS® KR mit Aminbeschleuniger und andere.

2. 4. 1. Härtungssysteme

Die Härtung der ungesättigten Polyesterharze wird durch sogenannte peroxidhaltige Härter (Initiatoren) ausgelöst. Die Härter entfalten ihre Wirkung entweder durch Wärmezufuhr bei der sogenannten **Heißhärtung** oder durch beigegebene Beschleuniger (Aktivatoren) bei Raumtemperatur. Das zuletzt genannte Verfahren wird als **Kalthärtung** bezeichnet.

Die Heißhärtung bleibt dem Preß- und den kontinuierlichen Fertigungsverfahren vorbehalten.

Die in der Tabelle aufgeführten Härtungssysteme werden überwiegend bei kalthärtenden Verfahren eingesetzt. Darüberhinaus sind noch andere Beschleuniger-Härterssysteme bekannt, die jedoch nur in der industriellen Fertigung eingesetzt werden (Tabelle, siehe S. 21).

2. 4. 2. Verzögerer – Inhibitoren

Sollen sehr lange offene (Verarbeitungs-, Topf-) Zeiten zur Verfügung stehen, werden sogenannte Inhibitoren eingesetzt. Dieses Verfahren ist einer Verringerung von Härter und Beschleunigermenge vorzuziehen.

Ein Gehalt von 1,5 % MEKP-Härter und 0,2 % Kobaltbeschleuniger darf in keinem Fall unterschritten werden (GTS-Harz ausgenommen).

Inhibitoren lagern die ersten bei der beginnenden Polymerisation entstehenden Radikale an, solange, bis sie abgesättigt sind. Dann verdickt sich das Harz in gewohnter Weise und wird schließlich fest.

Inhibitoren sollen also die Gelierzeit (siehe Abb. 4) lediglich hinausschieben. Die Länge des Zeitabschnitts B–D und der Temperaturverlauf während der Härtung soll unverändert bleiben. In der Praxis wird diese Forderung bei geringen Inhibitorzugaben verwirklicht.

Je nach Harztyp genügt bereits eine Zugabe von 0,5 bis 1 % eines 1 %igen Inhibitors zur Verdoppelung der Topfzeit.

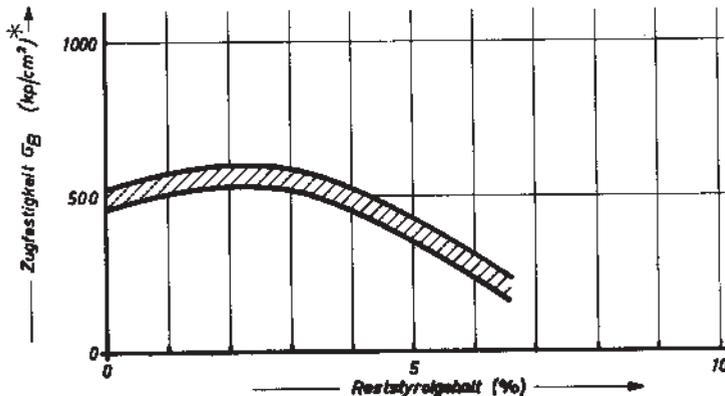
Die Inhibitoren werden in Konzentrationen von 1 % bis 10 % angeboten. **Wenn nicht anderes vermerkt ist, so gelten die Beschleuniger- und die Inhibitorangaben für 1 %ige Ware.**

2.5. Aushärtungsgrad von Polyesterharzen

Die mechanischen und chemischen Eigenschaften von Polyesterharzen und damit hergestellten Laminaten hängen vom Aushärtungsgrad der Harze ab. Ein Maß für die Aushärtung ist der Gehalt an noch ungebundenem Styrol. Er sollte bei mechanischer Beanspruchung unter 2% liegen (siehe nachstehende Diagramme). GFK-Teile, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen (Lebensmittelgesetz) und die chemischen Belastungen unterliegen, sollen maximal 0,5% Reststyrol aufweisen. Der Reststyrol-Anteil kann durch eine Nachhärtung (Temperung) z.T. in das Netzwerk eingebaut und dadurch verringert werden.

In den Abbildungen 5 und 6 ist der Einfluß des Reststyrolgehaltes auf die Zug- und Biegefestigkeit graphisch dargestellt.

Abb. 5



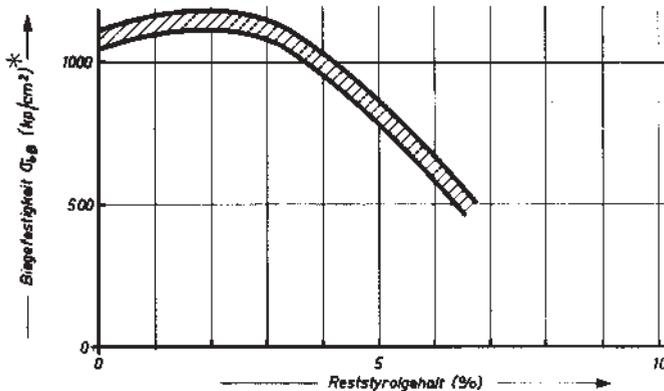
Einfluß des Reststyrolgehaltes auf die Zugfestigkeit von LEGUVAL® W 16 (3)

Der Aushärtungsgrad eines Harzes wird oft als Reststyrolgehalt angegeben. Bei etwa 2% Reststyrolgehalt besitzt das Harz die größte Zugfestigkeit. Zwischen 0 und 3% Reststyrolgehalt ändert sich die Zugfestigkeit nicht wesentlich.

Der Festigkeitsabfall bei höheren Reststyrolgehalten ist dagegen größer.

* Zur Umrechnung: $1 \text{ kp/cm}^2 = 0,103 \text{ N/mm}^2 = 0,103 \text{ M Pa}$

Abb. 6



Einfluß des Reststyrolgehaltes auf die Biegefestigkeit von LEGUVAL[®] W 16 (3)

Bei der Biegefestigkeit findet man ein ähnliches Verhalten wie bei der Zugfestigkeit. Der Festigkeitsabfall bei höherem Reststyrolgehalt ist jedoch größer.

Der Aushärtungsgrad ist von folgenden Einflüssen abhängig:

1. Härtungssystem

Das Kobalt-MEKP-System führt stets zu geringeren Reststyrol-Gehalten im Harz als das Amin-Bp-Härtungssystem bei 20 °C, siehe Abb. 7.

2. Reaktivität des Harzes

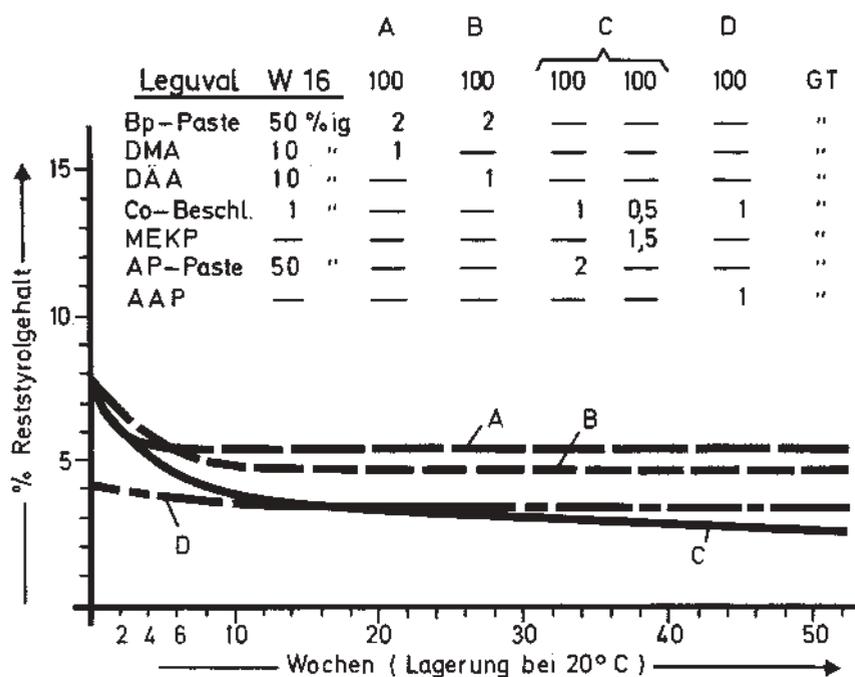
Hochreaktive Harze weisen bei gleicher Temperatur eine kürzere Härtingszeit nach Abb. 4 auf als weniger reaktive Harze.

3. Wärmestandfestigkeit des Harzes

Je höher der Martensgrad eines Harzes ist, desto höhere Nachhärtemperaturen benötigt das Harz zum Erreichen eines geringen Reststyrolgehalts, Abb. 8 ,9, 10.

Das Standardharz N 50 S mit 55 °C Martensgrad erreicht bei 60 °C bereits nach einer Stunde einen Reststyrolgehalt von 2 %, Abb. 8. Das Harz W 37 mit 85 °C Martensgrad hat den Reststyrolgehalt von 2 % nach 15 Stunden immer noch nicht erreicht (siehe Abb. 10). W 16 mit 70 °C Martensgrad (Abb. 9) liegt im Härtingsverlauf zwischen N 50 und W 37.

* Zur Umrechnung: 1 kp/cm² = 0,103 N/mm² = 0,103 M Pa



Nachhärtung von LEGUVAL® W 16 bei 20 °C (3)

Gezeigt werden die Reststyrolgehalte über der Zeit für verschiedene Härtungssysteme. Das System C – Kobalt + MEKP, bzw. Kobalt + AAP – weist im Laufe der Zeit den niedrigsten Reststyrolgehalt auf. Der abschüssige Kurvenverlauf läßt den Nachhärtungseffekt auch noch nach 50 Wochen deutlich werden im Gegensatz zu allen anderen Systemen, die praktisch nach 10 Wochen zu keiner weiteren Vernetzung im Harz führen. Liegen Harz- und Formentemperatur niedriger, so können die Systeme A und B vorteilhaft sein. Sie führen bei ungünstigen Temperaturen zu einem Härtungsverlauf, der mit C nicht erreichbar ist (aus diesem Schaubild nicht ersichtlich).

Reststyrolgehalt (%)

Abb. 8

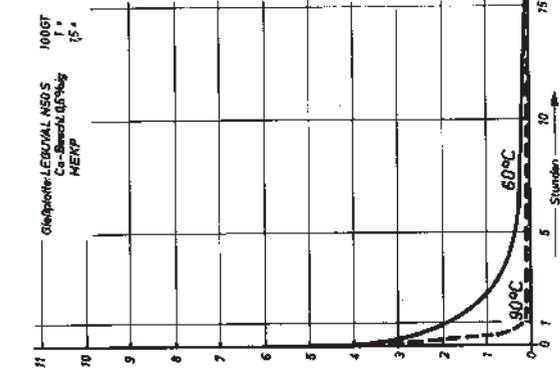


Abb. 9

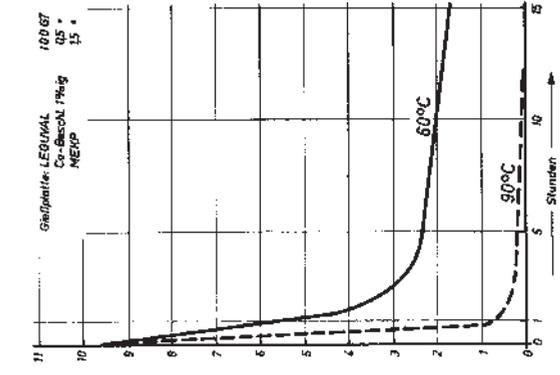
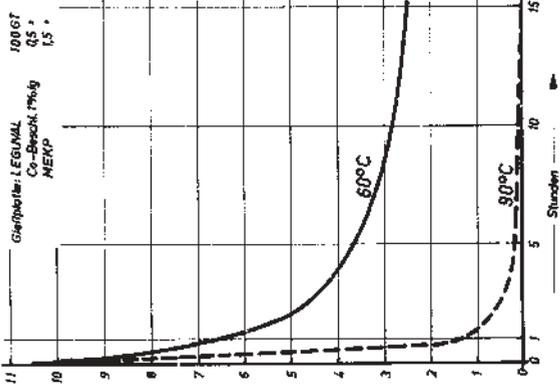


Abb. 10



Nachhärtung von N 50 S (3)

Nachhärtung von W 16 (3)

Nachhärtung von W 37 (3)

Reststyrolgehalt von Harzen mit unterschiedlicher Wärmestandfestigkeit bei 60 °C und bei 90 °C. Härtungstemperatur: N 50 S mit einem Martensgrad von 55 °C; W 16 mit einem Martensgrad von 70 °C; W 37 mit einem Martensgrad von 85 °C. Mit wachsendem Martensgrad steigt der Reststyrolgehalt eines Harzes. Der Aushärtungsgrad wird schlechter. Wärmestandfesteste Harze benötigen eine Nachhärtung bei erhöhter Temperatur. Ein gut durchgehärtetes Harz mit niedriger Wärmestandfestigkeit kann dem höher wärmestandfesten, aber mangelhaft gehärteten Harz überlegen sein.

2. 5. 1. Temperung von GFK-Teilen

Bereits im vorigen Kapitel sind die verschiedenen Einflüsse auf den Reststyrolgehalt des Harzes geklärt worden. Danach sind etwa 2 % Reststyrol bei mechanisch beanspruchten und 0,5 % Reststyrolgehalt bei zusätzlich chemisch beanspruchten Teilen anzustreben. Um diese Reststyrolgehalte durch eine Temperung zu erreichen, lassen sich folgende zwei Faustregeln aufstellen. Beide gehen von dem Martensgrad des Harzes als Nachhärtungstemperatur aus. 2 % Reststyrolgehalt werden durch Erwärmung des Harzes auf die Martenstemperatur für 3 Stunden erreicht.

0,5 % Reststyrolgehalt werden nach 20 Stunden Temperung bei der Martens-temperatur erreicht.

Diese Angaben gelten für das Härtingssystem Kobalt-MEKP.

Harztyp	Martensgrad °C	Reststyrol-gehalt von %	bei Tempe-rung mit °C	erreicht nach Stunden
N 50	55	2,0	60	1
		0,5	60	8
W 16	70	2,0	70	3
		0,5	70	20
W 37	85	2,0	90	1
		0,5	90	3
W 45	105	2,0	100	1
		0,5	100	5

Polymerisation in Höhe der Martensgrad-Temperatur (3). Härtingssystem Kobalt (0,5 %) und MEKP (1,5 %, bei W 45 2,5 %).

Im einzelnen können die angegebenen Reststyrolgehalte auch schon bei kürzeren Temperungszeiten oder bei anderen Temperaturen erreicht werden. Mit den oben genannten Faustregeln liegt man jedoch auf der sicheren Seite. Dennoch sind auch Nachhärtungen bei Temperaturen unterhalb des Martensgrads durchaus sinnvoll. Um keine zu großen Spannungen – bedingt durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungs-Koeffizienten – entstehen zu lassen, sollte eine Temperatur von + 60 °C für die Nachhärtung nicht überschritten werden. Nur wenn der besseren Aushärtung wegen eine höhere Temperatur notwendig ist, sollte man diesen Richtwert überschreiten.

In der Praxis ist eine Temperung großer Formteile mit langen Bauzeiten oft erst einige Tage nach Fertigstellung möglich. Praxisnahe Versuche der Firma BAYER, Uerdingen, an einem bei 15 °C gefertigten Bauteil mit Harz

von 75 °C Martensgrad (W 25) haben ergeben: Auch noch nach 28 Tagen Lagerung bei 15 °C verringerte eine Nachhärtung bei 50 °C über 12 Stunden den Reststyrolgehalt von 5,5 auf 3 %. Dieser Sachverhalt ist für die Nachbehandlung von z. B. großen Bootsrümpfen interessant.

2. 5. 2. Praxis des Nachhärtens

Kleinere Formteile werden am einfachsten mit der Warmluft eines Heizluftgebläses erwärmt. Größere Teile werden entweder in einer (Einbrenn-) Kabine oder unter einer Folie oder in der durch eine Folie abgedeckten Herstellungsform mit Warmluft nachgehärtet. Das Formteil darf mit offenem Feuer nicht in Verbindung kommen. Außerdem ist der Wärmefluß gleichmäßig über das Formteil zu leiten, damit keine Stelle überhitzt und jede Partie gleichmäßig gehärtet wird. Punktstrahler sind keinesfalls geeignet.

2. 6. Harz-Systeme

Die Aufgliederung einer GFK-Wandung in:

Feinschicht
tragende Wand aus Verstärkung + Laminierharz
Schlußanstrich mit LT-Lack

oder bei Beschichtungen in:

Verstärkung + Laminierharz und
Schlußanstrich mit LT-Lack

verleitet leicht zu einer Aufgabenteilung der Einzelschichten. Das gilt besonders für Formteile, die einer Wasser- und Chemikalienbelastung ausgesetzt sind. So liegt der Gedanke nahe, eine Bootswand mit der besonders für Wasserbelastung geeigneten Feinschicht G 327 auf Isophthalsäure-Basis auszurüsten, die tragende Glas-Harz-Wand aber mit dem Harz N 50 oder W 16 (beide auf Orthophthalsäure-Basis) aufzulaminieren.

Durch umfangreiche Versuche ist jedoch festgestellt worden, daß Feinschicht bzw. LT-Lack und Laminierharz eine Wechselwirkung aufeinander ausüben. Wird – wie beim Bootsbau – eine optimale Beständigkeit gegen Wasser gewünscht, so muß die

Isophthalsäure-Feinschicht G 327 mit dem
Isophthalsäure-Laminierharz W 25

kombiniert werden.

Bei Beschichtungen bilden

Laminierharz W 25 + Verstärkung und der
Schlußlack LT 35 B

eine vorteilhafte Kombination.

Diese Erkenntnisse wurden an Probe-Laminaten aus Feinschichten (0,250 mm dick), zwei Lagen 450 g/m²-Matte mit Laminierharz und einem Schlußlack auf Feinschicht-Basis gewonnen. Die Proben wurden fünf Stunden bei 60 °C nachgehärtet und dann in 60 °C warmem, destillierten Wasser einer künstlichen Alterung unterzogen. Sie galten als zerstört bei Schädigungen wie Blasen, Risse und Faserstruktur auf der Feinschichtseite. Hier ein Auszug aus den Versuchen der Bayer A.G. mit den Ergebnissen.

Versuchsergebnisse:

ERGEBNIS 1:

Standzeit eines seit Jahren bewährten Standardharzsystems aus:

Feinschicht Basis N 30, elastifiziert
2 Lagen 450 g Matte + N 50
Topcoat auf Feinschicht-Basis
Standzeit: 170 Std. (165–175 Std.)

ERGEBNIS 2:

Standzeitermittlung eines Laminats mit der Standardfeinschicht aus Versuch 1, aber verstärkt mit Glas + Isophthalsäureharz W 25:

Feinschicht, Basis N 30, elastifiziert
2 Lagen 450 g Matte + W 25
Topcoat auf Feinschicht-Basis
Standzeit: 462 Std. (455–470 Std.)

ERGEBNIS 3:

Standzeitermittlung des Standardharzlaminate von Versuch 1, jedoch mit Isophthalsäure-Deckschicht, Basis Leguval W 25:

Feinschicht, Basis W 25
2 Lagen 450 g Matte + N 50
Topcoat auf Feinschicht-Basis
Standzeit: 430 Std. (360–550 Std.)

ERGEBNIS 4:

Standzeitermittlung eines reinen Isophthalsäure-Harzsystems:

Feinschicht, Basis W 25
2 Lagen 450 g Matte + W 25
Topcoat auf Feinschicht-Basis
Standzeit: 936 Std. (840–984 Std.).



Beginn einer Blasenbildung in der Deckschicht

Die Deckschicht wurde bei 60 °C im Wasserbad künstlich gealtert. Sie zeigt den Beginn einer Blasenbildung, die von der Prüfdauer, dem Feinschichtharz und dem Laminierharz und der verwendeten Glasqualität der ersten Lage hinter der Feinschicht abhängt.



Fortgeschrittene Schädigung einer Deckschicht

Bei der Versuchsfortsetzung wachsen einige Blasen erheblich an. Teilweise zeichnet sich eine Reißbildung in der Deckschichtmembrane ab. Die Blasen sind mit Flüssigkeit gefüllt (Bildmaßstab 2 : 1).



Offene Deckschicht

Bei weiterer Lagerung im warmen Wasser brechen die Deckschicht-Membranen auf. Die Risse enden jedoch dort, wo Deckschicht und Glas-Harzschicht noch fest aneinander haften (Bildmaßstab 2:1).



Gänzlich zerstörte Deckschicht

Setzt man die künstliche Alterung noch weiter fort, so überziehen die Risse die gesamte Fläche und verbinden sich untereinander (Bildmaßstab 2 : 1).

Zusammenfassung der Versuche mit wechselnden Feinschicht- und Laminierharzen

1. Der Ersatz der Standardfeinschicht durch eine Isophthalsäure-Feinschicht bei einem Standard-Laminierharz (Versuch 2) kann die Lebenserwartung bereits verdoppeln. Dieser Sachverhalt kann als „Mindestforderung“ angesehen werden für alle Bauteile, die ständiger Kaltwasserbelastung standhalten müssen.
2. Eine weitere wesentliche Verbesserung der Lebenserwartung bringt die Verwendung eines reinen Isophthalsäure-Systems für Feinschicht- und Laminierharz (Versuch 4). Der Vorteil der fünffachen Standfestigkeit wird mit einem sehr geringen Rohstoffmehrpriß erkaufte.
3. Die Versuche spiegeln durch die in Klammern stehenden Ergebnisse der parallelgetesteten Prüfkörper auch die Schwankungsbreite wider. Sie ist bei den Isophthalsäure-Systemen größer als bei den klassischen Harzen. Man wird also davon ausgehen müssen, daß die Auswahl des Harzes für Deckschichten und Tränkharz (das Harzsystem) bei allen chemischen Belastungen wesentlichen Einfluß auf die Lebenserwartung des Bauteils hat. Die größere Schwankungsbreite der Versuche mit den Spezialharzen verpflichtet den Harzverarbeiter zu größerer Sorgfalt bei der Verarbeitung. Topfzeiten, Mischungsverhältnisse, Temperaturen usw. müssen sorgfältig gehandhabt werden.

Für den Bau von Booten ist nach den Versuchen am besten geeignet das Harzsystem:

Isophthalsäure-Feinschicht G 327 B
Isophthalsäure-Laminierharz W 25 B
Schlußlack LT 35 B

Schon die nur einseitige Beaufschlagung eines Prüflings verlängert die Standzeit bis zur ersten Blasenbildung bereits auf das Doppelte bei Standardharzen und bis auf das Zehnfache bei Spezialharzen. Man sieht also, daß diese Prüfzeiten bei 60 °C wirklich nur zu Vergleichswerten führen.

Ein Zeitverhältnis zwischen der Prüfdauer und der Lebenserwartung eines Bauteils bei z. B. 20 °C kann nicht angegeben werden.

Bei diesen Versuchen wurde stets die gleiche Mattenqualität eingesetzt, der Einfluß des Verstärkungsmittels – im Vergleich – also ausgeschaltet. Tatsächlich spielt die Grenzflächen-Ausrüstung der Glasfaser als Kontaktfläche zwischen Glas und Harz eine erhebliche Rolle für die Standzeit des Laminats bis zur ersten Schädigung.

3. Verstärkungsmittel für Kunstharze

Zum Verstärken von Kunstharzen bieten sich eine große Zahl von Werkstoffen an. Geeignet sind alle diejenigen, die:

- a) eine gute Verbindung mit dem Kunstharz eingehen
- b) verrottungsbeständig sind
- c) eine große Festigkeit und Steifigkeit (E-Modul) bezogen auf ihr spezifisches Gewicht besitzen.
- d) eine hohe Bruchdehnung haben.

Diese Forderungen erfüllt z. B. das preiswerte E-Glas in idealer Weise.

Nachstehend werden einige mechanische Eigenschaften von Stahl St 37 und E-Glas mit einem Faserdurchmesser von 10/1000 Millimeter verglichen:

Werkstoff Eigenschaft	St 37	E-Glas, Spinnfaden
Zugfestigkeit σ	285 M Pa	1.340 M Pa
Spez. Gewicht γ	7,87 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	2,55 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Spez. Zugfestigkeit $\frac{\sigma}{\gamma}$	4,73 km	51 km
E-Modul E	210 G Pa	73 G Pa
Spez. E-Modul E/γ	3.700 km	2.900 km

Festigkeiten von E-Glas (4) und von Stahl

Die Tabelle weist aus, daß sowohl die Zugfestigkeit auf das Gewicht bezogen wie auch der E-Modul (Steifigkeit) bei E-Glas günstiger liegen als bei Stahl. In der Praxis kann also das Kunstharz mit E-Glas bei weniger Gewicht verfestigt werden. Auch andere Fasern haben diese Eigenschaft, oft sogar noch besser als Glas. Diese Fasern sind aber meistens erheblich teurer. Sie sind bei der Verbesserung der Steifigkeit (E-Modul) dann notwendig, wenn der E-Modul von Glas nicht ausreicht und ein Mehrgewicht des Bauteils – z. B. durch eine Querschnittsvergrößerung bedingt – nicht zugelassen werden kann.

Die folgende Tabelle gibt Daten verschiedener Verstärkungsmittel.

Werkstoff	Faser- durchmesser	spez. Gewicht	Zugfestigkeit	E-Modul	Bemerkungen
E-Glas Spinnfaden	0,010 mm	$2,55 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	1.300 M Pa	73 G Pa	als Matte, Gewebe und Strang lieferbar
Polyesterfaser	0,022 mm	$1,38 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	1.000 M Pa	30–50 G Pa	hohe Arbeitsaufnahme, Schmelztemperatur 230 °C, Dehnung bis 12 %/ als Matte und Gewebe lieferbar
Aromatische Polyamidfaser	0,012 mm	$1,44 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	2.700 M Pa	63–130 G Pa	Gewebe mit hoher spezifischer Zugfestigkeit und Zugsteifigkeit
Kohlenstoff- faser	0,0075 mm	$1,7–1,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	1.400–2.300 M Pa	160–450 G Pa	als Vlies, Gewebe und Strang lieferbar; sehr hohe Steifigkeit

Daten verschiedener Verstärkungsmittel

3.1. Glasfasern als Verstärkungsmittel

Im Gegensatz zur nicht verspinnbaren Glasfaser (z. B. Isolierglas) wird für Kunstharzverstärkungen die textile Glasfaser, das sog. E-Glas verwendet. Seine Bezeichnung stammt von den Anwendungen auf dem Elektrosektor her. E-Glas besteht etwa zur Hälfte aus Siliziumoxid. Ein weiteres Drittel besteht aus Aluminium- und Calciumoxid. Der Gehalt an Alkalioxiden liegt jedoch unter einem Prozent. Das E-Glas wird deshalb als alkalifreies Glas bezeichnet und ist besonders wasser- und wärmebeständig.

Die Elementarfäden (Filamente) mit einem Durchmesser von 0,010 Millimeter (Nenndurchmesser von 0,004 bis 0,014 mm sind üblich) werden im Düsenziehverfahren hergestellt. Es werden dann z. B. 204 Filamente zu einem Spinnfaden zusammengefaßt. Die Feinheit des Spinnfadens wird in g/1000 m Fadenlänge (Tex) gemessen. So wiegen z. B. 204 Filamente mit 0,010 mm Durchmesser 40 g bei 1000 m Fadenlänge (40 tex). Man findet auch „spinngeteilte“ Fäden mit 102 Filamenten (20 tex) oder „doppelt spinngeteilte“ Fäden mit 51 Filamenten (10 tex).

Um eine feste Verankerung des Harzes am Glasfaden zu erreichen und um die Qualität des Fadens während der Herstellung nicht zu beeinträchtigen, muß der Glasfaden an seiner Oberfläche mit einer haftmittelhaltigen Schlichte (sog. Kunststoffschlichte) ausgerüstet werden.

Als Haftvermittler sind Erzeugnisse auf Chrom- und auf Silanbasis üblich. Der Haftvermittler muß auf das Laminierharz (Polyester- oder Epoxidharz) abgestimmt sein.

Schlichtetyp	Für Polyesterharz	Für Epoxidharz
Vinylsilan	× ×	
Methacrylsäure-Chrom Komplex	×	×
Aminosilan		× ×

Verschiedene Schichten für Polyester- und Epoxidharze

- × geeignet
- × × besonders geeignet

Bei hochwertigen Glasgeweben wird die Textil-Schlichte wieder entfernt und durch ein sog. Finish ersetzt (gefinishte Gewebe). Als Finish-Werkstoffe werden den Schichten ähnliche Substanzen aufgebracht.

Neben den Glaserzeugnissen aus gezogenen Fäden (Düsenziehverfahren) können die Fäden auch nach dem Düsenblasverfahren hergestellt werden. Man spricht dann von Stapelfasern. Auch daraus werden Verstärkungsmittel hergestellt.

Glaserzeugnisse sollen stets in Polybeuteln gelagert werden, damit sich auf der Glasoberfläche keine Feuchtigkeit niederschlagen kann. Anderenfalls würde die Haftung des Harzes am Verstärkungsmittel durch den Feuchtigkeitsfilm vermindert werden.

Aus E-Glas werden verschiedene Produktformen für die Kunststoffverstärkung angeboten.

3. 1. 1. Rovingstrang

Endloser Glasstrang auf einer Spule aus z. B. 60 Fäden mit je 204 Filamenten (= $60 \cdot 40 = 2.400 \text{ tex}$). Es werden Rovings von 600 bis 4.800 tex angeboten für

die Herstellung von Wickelkörpern (Wickelroving),
Faserspritzmaschinen (Schneidroving),
die Herstellung von Rovinggeweben (Webroving),
Profilziehverfahren,
Herstellung von Vorformlingen,
Unidirektional-Verstärkung.

Beim Roving liegen alle Fäden unverdreht parallel. Er dient dem Hersteller als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Glasmatten.

Lieferform: Spulen von 22 kg entsprechen 9.000 m bei 2.400 tex, Spulen von 10 kg entsprechen 4.100 m bei 2.400 tex.

Aus Schneidroving werden auch sog. **Vorformlinge** hergestellt. Dabei wird der Rovingstrang in Fadenabschnitte geteilt und ohne Harzzugabe auf eine Maske gesaugt. Sie besteht aus einem siebartigen Untergrund, der entsprechend dem Fertigteil geformt ist. Man sprüht dann einen Binder über die Fadenabschnitte aus Glasfasern und erhält eine exakt vorgeformte Verstärkungsmatte.

Durch folgende Angaben wird ein Roving-Material vollständig beschrieben (Beispiel: Schneidroving der Firma VETROTEX: EC 10–40–2.400–K923, 19 kg Spule):

Glasart:	E = E-Glas, alkalifrei
Faserform:	C = Glasfaser
Nenndurchmesser des Filaments:	10 = 0,010 mm ϕ
Gewicht des Einzelfadens:	40 = 40 tex $\left(\frac{\text{g}}{1000\text{m}}\right)$
Gewicht des Rovingstrangs:	2.400 = 60 Fäden mit 40 tex ($60 \cdot 40 = 2.400 \text{ tex}$)
Schlichte:	K923 = Schlichte auf Chrombasis
Gewicht:	19-kg-Spule

3. 1. 2. Glasmatten

Zur Mattenherstellung wird der 60fadige Rovingstrang in 52 oder 26 mm lange Einheiten zerschnitten (Schnittmatte) und auf ein Transportband gesaugt. Die Fadenabschnitte werden untereinander gebunden (Emulsionsbindung oder Pulverbindung), so daß der Werkstoff auf einer Papphülse aufgerollt werden kann.

Im Gegensatz zur Schnittmatte sind auch Matten mit endlosen Fäden im Handel (Glasseiden-Endlosmatte).

Je nach Anwendungsgebiet ist der Binder leicht löslich (z. B. für das Handverfahren), schwer oder sehr schwer löslich (Preßverfahren). Für das Preßverfahren gibt es auch Matten, deren Fäden auf einen Trägerwerkstoff (z. B. synthetisches Vlies) aufgenadelt sind (Steppmatten). Matten können aus Fäden mit

- 204 Filamenten (40 tex): nichtspinngeteilt
- 102 Filamenten (20 tex): spinngeteilt
- 61 Filamenten (10 tex): doppelt spinngeteilt

gefertigt sein.

Nicht spinngeteilte Matten sind am leichtesten mit Harz tränkbar. Spinngeteilte und doppelt spinngeteilte Matten ergeben eine ruhigere Fertigteil-Oberfläche und im allgemeinen eine bessere Festigkeit. Sie sind jedoch schwerer mit Harz zu tränken und ermöglichen keine hohen Glasgehalte. Die Matten unterscheiden sich in den Quadratmetergewichten.

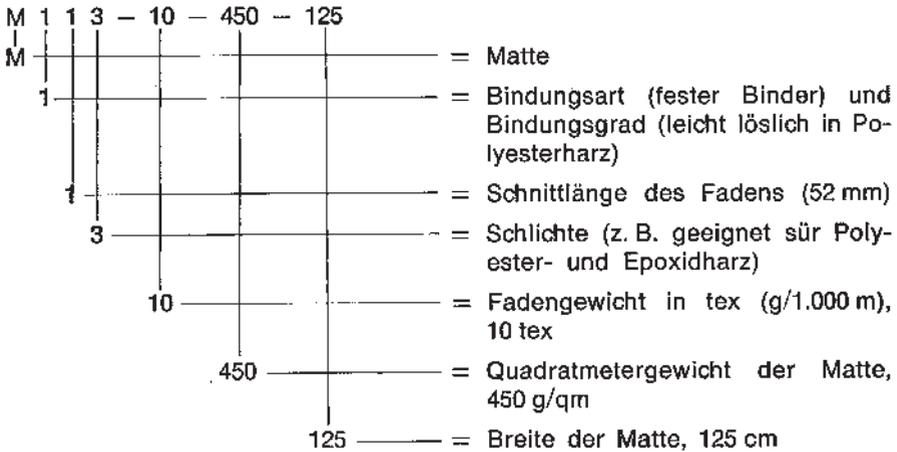
Folgende Werte sind üblich:

- | | | |
|----------------------|---|--|
| 150 g/m ² | – | sehr leichte Spezialmatte |
| 225 g/m ² | – | Matte für dünne Lamine und für die erste Lage hinter der Feinschicht |
| 300 g/m ² | – | Matte für die erste Lage hinter der Feinschicht und für leichte Bauteile |
| 450 g/m ² | – | Standardmatte |
| 600 g/m ² | – | für dickwandige Bauteile |
| 900 g/m ² | – | bei uns sehr selten verwendet. |

Übliche Breiten:

- 1,05 m, 1,15 m, 1,25 m, 1,27 m (Standardmaß), 1,30 m, 1,55 m, 1,85 m, 2,05 m, 2,55 m.

Die vollständige Bezeichnung einer Glasmatte wird anhand des folgenden Beispiels (4) erklärt:



3. 1. 3. Glasseidgewebe

Gewebe bestehen aus einer bestimmten Anzahl Kett- und Schlußfäden je cm Breite. Die Art des Fadens und die Zahl der Fäden je Zentimeter können – je nach Gewebetyp – gleich (symmetrische Gewebe) oder unterschiedlich sein (unsymmetrisch, z. B. 4 Schußfäden und 6 Kettfäden je Zentimeter). Die beiden Fadensysteme (aus Glasseidengarnen oder -zwirnen) liegen rechtwinklig zueinander in einer sogenannten Bindung. Am

Gewebe-Bezeichnung	Quadratmetergewicht	Bindungsart	Reißkraft je cm Breite Kette/Schuß
Leichtes Leinwandgewebe	80 g/qm	Leinwand	17 kp/17 kp
Leichtes Köpergewebe	163 g/qm	Köper 2/2	34 kp/34 kp
Schweres Köpergewebe	400 g/qm	Köper 2/2	84 kp/80 kp

Übersicht über die Glasseidgewebe der VOSSCHEMIE

häufigsten findet man die Leinwandbindung (der Schußfaden verläuft abwechselnd über bzw. unter dem nächsten Kettfaden). Gebräuchlich ist auch die Körperbindung, bei der der Schußfaden z. B. über drei Kettfäden hinwegläuft, dann unter einem Kettfaden durch und wieder über drei Kettfäden hinweg, usw. (sog. Kreuzkörper). Je weniger Kreuzungspunkte ein Gewebe aufweist, desto schmiegsamer ist es.

Glasseidengewebe werden in Flächengewichten von 80 bis 500 g je Quadratmeter angeboten.

3. 1. 4. Rovinggewebe

Bei diesen Geweben wurden Rovingstränge für Kette und Schuß benutzt, die ebenfalls in Leinwand- oder Körperbindung gehalten sind.

Rovinggewebe umfassen Quadratmetergewichte von 400 bis 1150 g/m². Sie können symmetrisch oder auch unsymmetrisch sein.

Flächengewicht	Bindung	Reißkraft Kette	je cm Schuß	Bemerkungen
580 g	Leinwand	120 kp /cm	110 kp /cm	symmetrisch
670 g	Leinwand	180 kp /cm	90 kp /cm	unsymmetrisch
820 g	Leinwand	190 kp /cm	130 kp /cm	unsymmetrisch
900 g	Körper	180 kp /cm	180 kp /cm	symmetrisch

Übersicht über die Rovinggewebe der VOSSCHEMIE

3. 1. 5. Andere Formen der Glasverstärkung

Unidirektionalgewebe

Band aus mehreren nebeneinander liegenden Roving- oder Glasseidensträngen. Diese gezielte Verstärkung wird in Bändern bis zu einem Meter Breite angeboten und ergibt zugbeanspruchte Bauteile mit einem sehr günstigen Festigkeits-Gewichtsverhältnis.

Glasgehalt	Zug- und Biegefestigkeit	E-Modul
65 %	1.000 M Pa	360 G Pa

Mechanische Werte von unidirektional-verstärktem Laminat

Oberflächenmatte

Oberflächenmatte oder Glasfaservliesstoff besteht aus regellos angeordneten E-Glas- oder C-Glas-Filamenten, durch einen Binder gehalten. Die Vliese verbessern die Oberfläche von Fertigteilen (Handverfahren) oder bilden harzangereicherte Deckschichten statt einer Feinschicht (beim Pressen, Wickeln). Ihre Gewichte liegen zwischen 25 und 120 g je Quadratmeter.

3.2. Andere Verstärkungsmittel für Kunstharze

In diese Aufstellung werden nur die Stoffe aufgenommen, die wenigstens in einem gewissen Umfang Bedeutung gewonnen haben. In der Regel ist der preisliche Abstand zum Textilglas so groß, daß diese Stoffe nur vereinzelt an hochbeanspruchten Stellen oder bei speziellen Konstruktionen verwendet werden. Nur Polyester-, aromatische Polyamid- und Kohlenstoffgewebe haben neben dem Glas auf dem Bootsbau- bzw. Flugzeug- und Raumfahrtsektor Eingang gefunden.

3.2.1. Thermoplastische Polyester

- Es werden Polyesterplatten (Diofen®) ab 100 g/m² angeboten und wegen ihrer Bruchdehnung von 12 % und mehr bei (Dach-)Beschichtungen eingesetzt.
- Polyestergewebe mit ihrem niedrigen spezifischen Gewicht von nur 1,39 g/cm³ und ihrer hohen Bruchdehnung waren fester Bestandteil der Wildwasserboote. Es gelang damit, das Gewicht eines Einers auf 8 kg bei sehr guter Gebrauchstüchtigkeit zu verringern (5).

3.2.2. Aromatische Polyamide

Mit dem Produktnamen „Kevlar®“ (8) füllt diese Faser von der Festigkeit her gesehen den Bereich zwischen E-Glas und der Kohlenstoff-Faser. Sie wird bereits im Flugzeugbau verwendet und ist im deutschen Rennruderboot- und Wildwasserboot-Bau zusammen mit der Kohlenstoff-Faser zu finden.

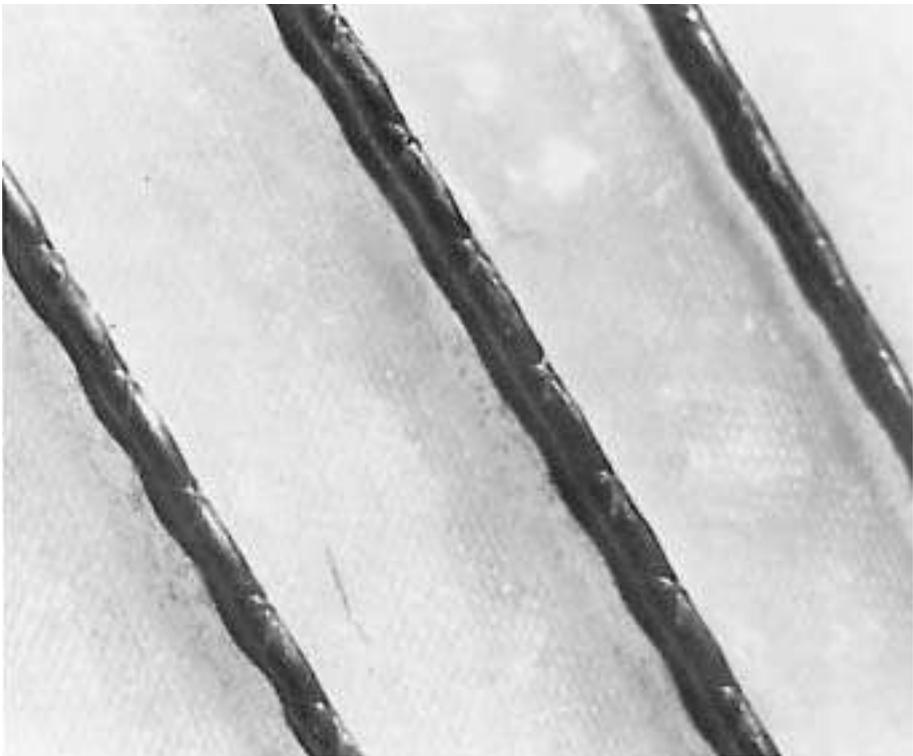
Kevlar hat neben den guten Zugeigenschaften auch eine gute Schlagfestigkeit. Die Druckfestigkeit des Werkstoffes ist jedoch gering.

Typ	Spez. Gewicht	Zugfestigkeit	E-Modul	Bruchdehnung
Kevlar® 49	1,45 g/cm ³	2.700 M Pa	130 G Pa	2 %
E-Glas	2,55 g/cm ³	1.300 M Pa	73 G Pa	2 %

Übersicht über die Eigenschaften von Kevlar® und von E-Glas

3. 2. 3. Kohlenstoff- und Graphitfasern

Kohlenstoff-Fasern werden u. a durch Pyrolyse bei etwa 2000 bis 3000 °C z. B. aus Polyacrylnitril-, Zellulose-Fasern, oder aus Pech gewonnen (6). Sie weisen, je nach Fertigungsart, eine hohe oder sehr hohe Steifigkeit auf. Der E-Modul von Kohlenstoff-Fasern liegt in der Größenordnung von Metallen bzw. kann die doppelten Werte von Stahl erreichen. Mit wachsendem E-Modul vermindert sich die Bruchdehnung von 1,0 auf 0,5 %.



Kohlenstoff-Stränge auf einem Glaslaminat

Kohlenstoff-Fäden besitzen eine hohe Steifigkeit (E-Modul). Sie werden daher für örtliche Versteifungen und für Bauteile mit großer Dimensionsstabilität verwendet (Bildmaßstab 2 : 1).

Die Faser wird geliefert als:

Strang mit 1000 tex (g/1000 m)

Unidirektional-Gewebe

(mehrere Stränge nebeneinander mit einem Binfaden gehalten)

Gewebe (100 bis 300 g) aus reiner Kohlenstoff-Faser

Mischgewebe aus Kohlenstoff- und Glasfasern

Plattenware, imprägniert mit Epoxidharz

Kohlenstoff-Fasern werden meistens in Epoxidharze eingebettet (Wickelverfahren). Eine Untersuchung über die Kombination von Aramid- und Kohlenstoff-Fasern und Epoxid-, Polyester- und Vinylesterharzen (20) und einige in der Praxis bewährte Beispiele wie Hochleistungsfahrzeuge haben ergeben, daß auch Polyesterharze mit diesen hochsteifen Fasern praktikabel und sinnvoll sind.

Eigenschaft	Kohlenstoff-Faser mit	
	hohem E-Modul	hoher Festigkeit
Zugfestigkeit	2.300 M Pa	2.700 M Pa
Elastizitätsmodul	350 G Pa	220 M Pa
Bruchdehnung	0,6 %	1,0 %
spezifisches Gewicht	1,9 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	1,8 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Faserdurchmesser	0,005–0,010 mm	0,005–0,010 mm

Übersicht über technische Eigenschaften von Kohlenstoff-Fasern*

Gewicht g/m ² (± 5)	Fäden je cm Kette x Schuß	Kette tex	Schuß tex	Dicke mm DIN 53 855	Bindung	Verhältnis der Faser- festigkeit im Laminat		Verhältnis der Faser- steifigkeit im Laminat	
						Kette	Schuß	Kette	Schuß
140	6 x 4,5	G 68	K 200	0,15	Leinwand	1	3,0	1	9,6
190	6 x 6,8	G 68	K 200	0,18	Leinwand	1	4,7	1	14,7
120	6 x 12	G 68	K 66	0,13	Leinwand	1	2,6	1	8,2
200	5 x 5	K 200	K 200	0,25	Leinwand	1	1	1	1
120	5 x 7	K 200	G 22	0,13	Leinwand	9	1	28	1
400	10 x 10	K 200	K 200	0,50	Leinwand	1	1	1	1
220	10 x 7	K 200	G 22	0,25	Leinwand	18	1	57	1

Auswahl von Kohlefaser- und Kohlefaser-Glas-Gewebe

Kohlefaser-E-Modul = 220 G Pa; Kohlefaser-Zugfestigkeit = 2.300 M Pa; G = Glasfaser!

K = Kohlefaser

* Herstellerangaben

4. Der Verbund aus Glas und Harz

Glasfaser-Kunststoff kann man in etwas vereinfachender Form folgendermaßen zerlegen:

- a) Art, Richtung und Menge der Glasverstärkungen bestimmen die mechanischen Eigenschaften.
- b) Der verwendete Harztyp hat Einfluß auf das chemische und thermische Verhalten eines Bauteils.
- c) Der Verarbeiter schließlich trägt durch seine sorgfältige Verarbeitung der Werkstoffe zum Erreichen optimaler Bauteileigenschaften bei.

In der Mehrzahl der Fälle hat der Hersteller eines Bauteils bei seiner Arbeit nur auf die Punkte a und c überhaupt Einfluß. Im folgenden soll nun zunächst der Einfluß der Verstärkungen geklärt werden.

4.0.1. Die richtungsabhängige Verstärkung

Die verschiedenen Glas-Verstärkungsmittel sind bereits vorgestellt worden. Dabei wurde zwischen Matten, Geweben und Unidirektional-Geweben unterteilt. Alle diese Verstärkungen sind Flächengebilde. Sie besitzen nur eine

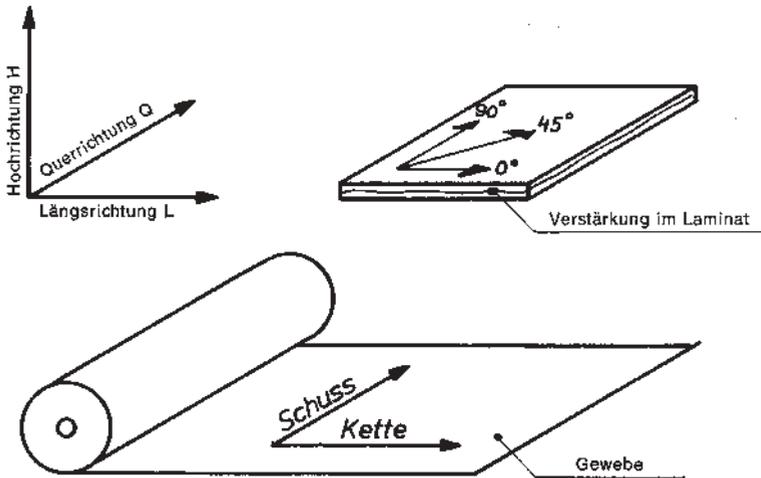


Abb. 11

Die Richtungsabhängigkeit von Verstärkungsmitteln

Die meisten Verstärkungsmittel sind Flächengebilde und haben deshalb hauptsächlich in der Ebene zwischen Längs- und Querrichtung ihre verstärkende Wirkung. In Hochrichtung ist ihr Einfluß gering. Während Matten innerhalb der Längs-Quer-Ebene in allen Richtungen gleichmäßig verstärken, haben Gewebe sog. Vorzugsrichtungen (Kettrichtung = 0° und Schußrichtung = 90°), in denen sie größere Kräfte aufnehmen können als z. B. unter 45° . Diese Eigenschaft kann man bei lose gewebtem Stoff beobachten. Zieht man an zwei gegenüberliegenden Ecken, so wird aus einem Viereck ein Parallelogramm.

geringe Höhe (maximal zwei Millimeter). Ihre Ausdehnungen in Länge und Breite sind dagegen wesentlich größer. Man spricht auch von Schichtstoffen (schichten = laminieren). Sie haben daher in den Flächenrichtungen Längs und Quer (L- und Q-Richtung) ihre verstärkende Wirkung. In der Höhenrichtung (H-Richtung) ist das Bauteil auf die Harzfestigkeit angewiesen. Die Zugfestigkeit des reinen Harzes liegt je nach Typ zwischen 30 und 60 MPa. Sie wird jedoch in der Hochrichtung eines armierten Bauteils teilweise nicht voll erreicht.

Auch in der Längs-Quer-Ebene kann die Wirkung der Verstärkung verschieden sein, sofern es sich um Gewebe handelt. In den Fadenrichtungen ist sie am größten. Unter 45 °C fällt sie dagegen deutlich ab. Bei Mattenlamina-ten findet man diese Erscheinungen nicht.

4. 0. 2. Glasgehalt – Glasgewicht

Die Aussage über den Glasgehalt wird dann wichtig, wenn es um die mechanische Beurteilung eines Bauteils mit einer vorgegebenen Dicke geht. Hat man ein Bauteil aus reinem Harz vor sich, so wird es auch die mechanischen Eigenschaften des reinen Harzes aufweisen. Je mehr Glasverstärkungen eingebaut sind, desto besser werden auch seine mechanischen Eigenschaften sein. Der Glasgehalt ψ (psi) ist der Anteil des Glasgewichts am Gesamtgewicht

$$\text{Glasgehalt } \psi = \frac{G_{\text{Glas}}}{G_{\text{Glas}} + G_{\text{Harz}}}$$

Dabei bedeuten

G_{Glas} = Glasgewicht (im folgenden Beispiel : 450 g)

G_{Harz} = Harzgewicht (im folgenden Beispiel : 1200 g)

Beispiel:

Eine Glasmatte von 450 g/m² wird mit 1200 g/m²-Harz getränkt

$$\text{Glasgehalt } \psi = \frac{450 \text{ g}}{450 \text{ g} + 1200 \text{ g}} = 0,27 = \frac{27}{100} = 27 \%$$

Zum Tränken von Geweben wird der dichteren Fadenpackung wegen weniger Harz benötigt als für gleichschwere Matten.

Beispiel mit einem 670 g/m² Gewebe, für das nur ca. 1000 g Harz benötigt wird

$$\text{Glasgehalt } \psi = \frac{670 \text{ g}}{670 \text{ g} + 1000 \text{ g}} = 0,40 = 40 \%$$

In Tabellen sind die Eigenschaften von verstärkten Kunststoffen stets an die Glasgehalte gekoppelt. Der Glasgehalt ist auch eine wichtige Größe für die Errechnung des Harzbedarfs.

Man kann für das Handauflegeverfahren folgende Richtwerte aufstellen:

Glasgehalt bei Matten ca. 25 %
notwendige Harzmenge ca. 75 % \rangle Faktor 3

also Harzgewicht = 3 · Glasgewicht

Glasgehalt bei Geweben ca. 40 %
notwendige Harzmenge ca. 60 % \rangle Faktor 1,5

also Harzgewicht = 1,5 · Glasgewicht.

Will man bei einem vorgegebenen Querschnitt hohe Festigkeiten erzielen, so wird man Gewebe in das Laminat mit einbringen.

Ein reines Gewebelaminat wird bei Polyesterbautellen nur selten verwirklicht. Zwischen den Fadenbündeln von zwei aufeinander liegenden Geweben entstehen an den Kreuzungspunkten Harzansammlungen. Die Nester reinen Harzes bringen über den Volumenschwund des Harzes von 8 % innere Spannungen. Die Spannungen führen zu geringeren Festigkeiten. Will man ein reines Gewebelaminat herstellen, so sollte das nur beim Laminieren „naß in naß“ geschehen. Mit einer Mattenlage zwischen zwei Gewebeschichten vermeidet man solche Spannungskonzentrationen in jedem Fall.

Bei den niedrigschrumpfenden Epoxidharzen (4 Vol. %) sind reine Gewebelamine üblich.

Da Glas mit einem spezifischen Gewicht von $\gamma = 2,5 \text{ g/cm}^3$ etwa doppelt so schwer ist wie Harz mit $\gamma = 1,22 \text{ g/cm}^3$ sind Lamine mit einem höheren Glasgehalt auch schwerer.

Hier eine Übersicht:

Glasgehalt %	Spez. Gewicht g/cm^3
25	1,35
35	1,45
45	1,55
55	1,65
65	1,80

Abhängigkeit des spezifischen Gewichts vom Glasgehalt bei Polyester-Laminen

Da die Festigkeit eines Laminats wesentlich von der verwendeten Glasmenge abhängt und die eingebrachte Glasmenge vom Verarbeiter auch leicht zu kontrollieren ist, findet man beim Hand- und Faserspritzverfahren oft nur Anweisungen über die notwendige Glasmenge. In den Laminierplänen heißt es z. B. für eine Bootswand:

Feinschicht G 327 B
 1 Lage 300 g/qm Matte
 2 Lagen 450 g/qm Matte
 1 Lage 670 g/qm Roving
 1 Lage 450 g/qm Matte
 Schlußlack LT 35 B

Dabei wird vorausgesetzt, daß der Verarbeiter alle Glasverstärkungen sorgfältig, jedoch nicht zu reichlich mit Harz tränkt. Ferner sind die Vorzugsrichtungen des Gewebes angegeben.

In dieser Weise sind z. B. auch die Anweisungen des Germanischen Lloyd in den Bauvorschriften für GFK-Yachten gehalten.

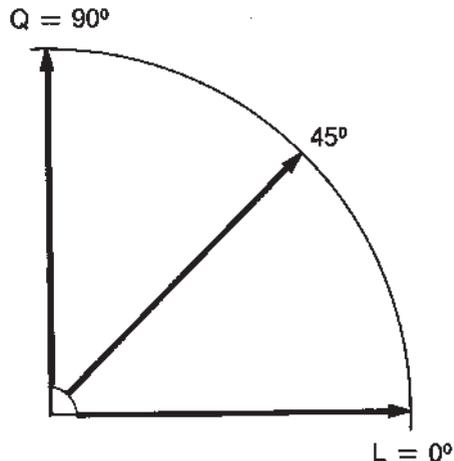
4. 1. 1. Zugfestigkeitsverfahren von Matten-Laminaten

Die Fadenabschnitte bei der Glasmatte liegen in der Fläche völlig regellos, sie sind nicht ausgerichtet. Man sagt: Die Glasmatte hat keine Vorzugsrichtungen. Die Laminatfestigkeit in allen Richtungen der Ebene ist gleich. Symbolisiert man die Festigkeit in einem Schaubild durch eine bestimmte Pfeillänge, so liegen die Spitzen aller Pfeile zwischen der L- und Q-Richtung auf einem Kreis mit dem Radius als Zugfestigkeit.

Abb. 12

Zugfestigkeit von Mattenlaminaten

In der Ebene zwischen Längsrichtung L und Querrichtung Q verstärken Matten das Kunstharz gleichmäßig, sie haben keine Vorzugsrichtung. Der Verarbeiter kann die Mattenbahnen deshalb in jeder beliebigen Richtung verlegen. Das für den Viertelkreis zwischen 0° und 90° dargestellte Verhalten gilt auch für die Richtungen von 90° bis 360° .



Die Zugfestigkeit ist als Pfeil gekennzeichnet. Die Pfeillage gibt die Richtung an, seine Länge stellt die Größe der Zugfestigkeit dar.

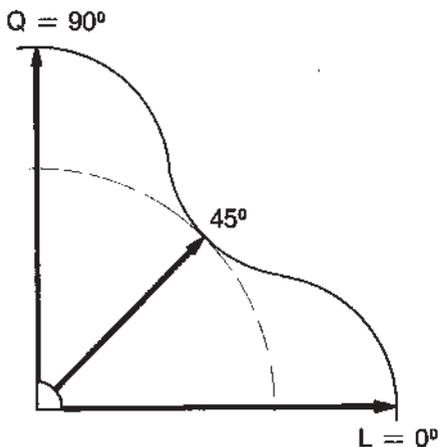
Anders gesagt: Beim Einbringen von Matten braucht der Verarbeiter nicht auf die Verlegerichtung zu achten, da die Mattenfestigkeit in jeder Richtung gleich groß ist. Ein Mattenlaminat verhält sich in der Ebene also wie andere sog. homogene (in sich gleichartige) Baustoffe, wie z. B. Eisen oder Glas. Zwischen zwei Mattenlagen (in der Höhenrichtung) herrscht nur die sog. „interlaminare Festigkeit“, der Festigkeit des reinen Harzes etwa vergleichbar.

Mattenlaminare sind also bei Bauteilen vorteilhaft, die nicht nur in einer Richtung belastet werden.

4. 1. 2. Zugfestigkeitsverhalten von Gewebe-Laminaten

Im Gegensatz zu den Matten haben die Gewebe zwei Vorzugsrichtungen, nämlich die Richtung des Kett- und des Schußfadens. Beide Fadenrichtungen bilden miteinander einen Winkel von 90° . Ein Gewebelaminat ist in den beiden Fadenrichtungen höher belastbar als in den Zwischenrichtungen. Unter 45° besitzt es etwa zwei Drittel der Festigkeit beider Vorzugsrichtungen. Dabei ist ein symmetrisches Gewebe vorausgesetzt.

Abb. 13



Die Zugfestigkeit des Gewebes ist wieder durch Pfeile in Richtung und Größe dargestellt.

Zugfestigkeit eines Gewebelaminates

Das Festigkeitsschaubild des Gewebelaminates spiegelt die beiden Vorzugsrichtungen 0° und 90° (Kett- und Schußrichtung) mit optimaler Verstärkungswirkung wieder. Unter 45° beträgt die Zugfestigkeit nur etwa zwei Drittel der maximalen Werte.

Legt der Verarbeiter die Kett- richtung des Gewebes in die Haupt- kraft- richtung, so wird die Verstär- kungswirkung am besten genutzt.

Es ist das Verhalten eines in Kette und Schuß symmetrischen Gewebes gezeichnet. Für ein unsymmetrisches Gewebe ist die Zugfestigkeit z. B. unter 90° geringer und die gesamte Kurve entsprechend verschoben.

Will der Verarbeiter also die Festigkeit eines Gewebes voll ausnutzen, so wird er die Kett- richtung des Gewebes in die Haupt- lastrichtung legen. Bei kleinen und mittleren Sportbooten liegen Gewebe deshalb parallel zur Kiel- linie, bei größeren werden Gewebe auch diagonal verlegt.

4. 1. 3. Zugfestigkeitsverhalten von Unidirektional-Geweben

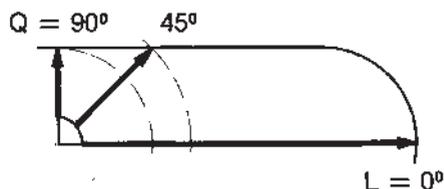
Die Bezeichnung „Unidirektional“-Gewebe heißt, daß nur eine Vorzugsrichtung vorhanden ist, weil die überwiegende Menge der Verstärkungsfäden in einer Richtung liegt – z. B. Liasil. In der Querrichtung sind nur Binfäden vorhanden.

Diese Gewebe finden nur in Zugrichtung Verwendung, meist als Zusatzverstärkungen an Flanschen, bei Rohren in tangentialer Richtung usw. Das Festigkeitsschaubild zeigt nur noch eine ausgeprägte Festigkeit in L-Richtung, also parallel zu den Glasfäden, wie auf der Skizze dargestellt.

Abb. 14

Zugfestigkeit eines Unidirektional-Gewebes

Dieses Gewebe hat in Kettrichtung 0° eine verstärkende Wirkung, die durch die geradlinige Lage der Fäden besonders wirksam ist. In Schußrichtung besitzt dieses Gewebe nur sogenannte Binfäden, die praktisch keine Verstärkungswirkung haben. Zum Teil liegen die Querfestigkeiten des Laminats unter der Festigkeit des reinen Harzes.



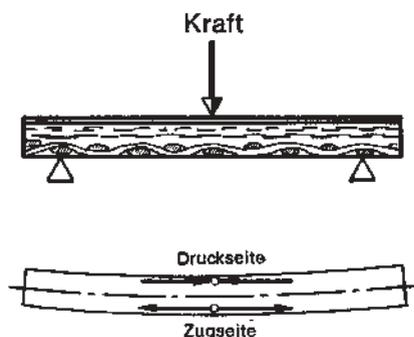
Die Zugfestigkeit ist jeweils als Pfeil in Richtung und Größe gezeichnet.

Alle gezeigten Diagramme sind symmetrisch zur Längs- und Querrichtung. Die Zugfestigkeit für die Matten für 360° aufgetragen ergibt also einen Vollkreis für die Endpunkte der Zugfestigkeitspfeile.

4. 1. 4. Druck- und Biegefestigkeit von GFK

Die Überlegenheit der Gewebe in Fadenrichtung bei der Zugbeanspruchung gilt nicht für Druckspannungen. Im Glasgehalt vergleichbare Laminats weisen für Mattenverstärkungen eine etwas höhere Druckfestigkeit auf. Die Druckfestigkeit steigt mit wachsendem Glasanteil und größerer Faserlänge. Die Faserlänge sollte stets über 20 mm liegen.

Bei der Biegefestigkeit ist die Verstärkungsart (Matten, Gewebe), die Verstärkungsrichtung und der Glasgehalt von Einfluß. Auf Biegung beanspruchte Laminats werden auf der Druckseite mit Matten, auf der Zugseite bevorzugt mit Geweben ausgerüstet.



Einbau von Verstärkungen bei Druck- und Biegefestigkeit

Auf der Druckseite eines Laminats werden bevorzugt Matten eingesetzt, hier also auf der Oberseite des Stabes. Auf der Unterseite finden Gewebe als zugbelastete Bauteile mit Matten als Zwischenlagen Verwendung.

Oben: Laminat aus Matten und Gewebe

Unten: Spannungsaufbau im gebogenen Stab

4.2. Übersicht über die Werkstoffeigenschaften von verstärktem Standard-Polyesterharz

Die Tabelle (9) bezieht sich auf verstärkte Standardharze (z. B. AZUR, N 50). Sie gibt eine Übersicht über mechanische, thermische und elektrische Werte. Für die Hand- und die Faserspritzmethode können die Werte unter 25 % Glasgehalt bei Matten-Laminaten und unter 45 % bei Gewebelaminaten als repräsentativ angesehen werden.

Kennwerte	Prüfvorschrift				Bemerkungen
Glasegehalt Gew. %		25	35	45	
Vol. %		15	20	28	
Dichte g/cm ³	DIN 53 479	1,35	1,45	1,55	
Mittlerer linearer Ausdehnungskoeffizient $\frac{l}{l_0} \cdot 10^4$	VDE 0304 Teil 1	36	27	22	Bei 10° bis 80°
Wärmeleitfähigkeit kcal/mh°C	DIN 52 812	0,15	0,2	0,25	
Zugfestigkeit mind. kp/cm ²	DIN 53 455	750	1 000	1 500	Probenform 2
Bruchdehnung mind. %	DIN 53 455	2	2	2	
E-Modul a. Zugversuch kp/cm ²	DIN 7705	70 000	80 000	100 000	
Biegefestigkeit mind. kp/cm ²	ASTM D 790—59 T entspr. DIN 53 452 l/d = 18	1 300	2 000	2 000	
E-Modul aus Biegung kp/cm ²	DIN 53 452	60 000	80 000	100 000	Vergleichb. m. Zug
G-Modul kp/cm ²	DIN 53 455	22 000	30 000	40 000	
Druckfestigkeit mind. kp/cm ²	Fed. Spec. L—P—406 b Methode 1021	1 200	1 500	1 800	
Schlagzähigkeit mind. cmkp/cm ²	DIN 53 453	35	60	90	Normkleinst. Schlagricht. senkr. z. Lagenebene
Logarith. Dekrement der mech. Dämpfung	DIN 53 445	0,15	0,15	0,15	bei 20 °C (temperaturabhängig)
Formbeständigkeit in der Wärme nach Martens	DIN 53 458 °C	80	100	160	bei Einsatz von Harzen mit einer Martensw. bis 55°
		100	> 200*	> 200*	über 55° bis 80°
		> 200*	> 200*	> 200*	über 80° bis 130°
Oberflächenwiderstand	DIN 53 482 VDE 0303 Teil 3	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²	
Durchschlagsfestigkeit KV/mm	DIN 53 481 VDE 0303 Teil 2	20	20	20	Mindestwerte trocken
Spez. Durchgangswiderstand trocken Ø · cm	DIN 53 482 VDE 0303 Teil 3	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹²	
Spez. Durchgangswiderstand naß Ø · cm	DIN 53 482 VDE 0303 Teil 3	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ¹⁰	
Kriechstromfestigkeit	DIN 53 480				

* Ende des Meßbereiches der Prüfeinrichtung.

Erfahrungswert für die Gebrauchstauglichkeit ohne äußere Belastung: Kurzzeitig (einige Stunden) etwa 150 °C, dauernd (Monate bis Jahre) bis etwa 100 °C für obige Glasehaltanteile. Die angegebenen Werte sind in Kurzzeitprüfungen ermittelt worden und beziehen sich auf handelsübliches, styrolgelöstes Polyesterharz. Diagramme in Abhängigkeit von Einflußgrößen, z. B. Temperaturen, Belastung, Zeit, chemische Beständigkeit usw., und die aus Langzeitprüfungen (statisch und dynamisch) ermittelten Werte werden zu einem späteren Zeitpunkt nachgetragen.

Die Proben für die Prüfungen sind unter Bedingungen, wie sie für technische Teile angewendet werden, hergestellt worden.

Werkstoff-Leistungsblatt für Mattenverstärkung

Kennwerte	Prüfvorschrift				Bemerkungen
Glasgehalt Gew. %		45	55	65	
Vol. %		28	34	46	
Dichte g/cm ³	DIN 53 479	1,55	1,65	1,80	
Mittlerer linearer Ausdehnungskoeffizient $\frac{l}{l_0} \cdot 10^6$	VDE 0304 Teil 1	20	17	15	Bei 10° bis 80° Gemessen in Kettrichtung
Wärmeleitzahl kcal/mh°C	DIN 52 612	0,20	0,25	0,30	senkrecht zur Schichtebene
Zugfestigkeit kp/cm ²	DIN 53 455	2 200	2 500	2 800	Probenform 2
Bruchdehnung mind. %	DIN 53 455	2	2	2	
E-Modul a. Zugversuch kp/cm ²	DIN 7705	120 000	160 000	200 000	
Biegefestigkeit mind. kp/cm ²	ASTM D 790-69 T entspr. DIN 53 452 l/d = 16	2 400	2 800	3 500	
E-Modul aus Biegung kp/cm ²	DIN 53 452	120 000	160 000	200 000	Vergleichb. m. Zug
G-Modul kp/cm ²	DIN 53 445	20 000	30 000	40 000	
Druckfestigkeit mind. kp/cm ²	Fed. Spec. L-P-406 b Methode 1021	1 800	2 000	2 400	
Schlagzähigkeit mind. cmkp/cm ²	DIN 53 453	150	180	200	Normkleinst. Schlagricht. senkr. z. Lagenebene
Logarith. Dekrement der meh. Dämpfung	DIN 53 445	0,05	0,05	0,05	bei 20 °C tempe- raturabhängig
Formbeständigkeit in der Wärme nach Martens	DIN 53 458 °C	180	> 200*	> 200*	bei Einsatz von Harzen mit einer Martensw. bis 55°
		> 200*	> 200*	> 200*	über 55° bis 80°
Oberflächenwiderstand	DIN 53 482 VDE 0303 Teil 3	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²	
Durchschlagsfestigkeit KV/mm	DIN 53 481 VDE 0303 Teil 2	25	25	25	Mindestwerte trocken
Spez. Durchgangswiderstand trocken $\Omega \cdot \text{cm}$	DIN 53 482 VDE 0303 Teil 3	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	
Spez. Durchgangswiderstand naß $\Omega \cdot \text{cm}$	DIN 53 482 VDE 0303 Teil 3	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ¹⁰	
Kriechstromfestigkeit	DIN 53 480	KA3c (fr. T5)	KA3c (fr. T5)	KA3c (fr. T5)	

* Ende des Meßbereiches der Prüfeinrichtung.

Erfahrungswert für die Gebrauchsfähigkeit ohne äußere Belastung: Kurzzeitig (einige Stunden) etwa 150 °C, dauernd (Monate bis Jahre) bis etwa 100 °C für obige Glasgehaltanteile.

Die angegebenen Tabellenwerte sind in Kurzzeitprüfungen ermittelt worden und beziehen sich auf handelsübliche, styrolgelbete Polyesterharze ohne Füllstoffe, dessen Wichte im ausgehärteten Zustand, 1,2 p/cm³ beträgt. Die Werte, die aus Langzeitprüfungen ermittelt worden sind, wurden später nachgetragen.

Die Proben für die Prüfungen sind unter Bedingungen, wie sie für technische Teile angewendet werden, hergestellt worden.

Werkstoff-Leistungsblatt für Gewebeverstärkung

4.3. Dimensionierung von GFK-Bauteilen

4.3.1. Dimensionierungshinweise

Während z. B. bei Metallen mit zulässigen Spannungen bei der Bemessung eines Bauteils gerechnet wird, werden Kunststoffteile zweckmäßig nach der zulässigen Dehnung ausgelegt (10).

Diese Art der Dimensionierung ist auch bei anderen Werkstoffen möglich. Bei dieser Berechnungsweise wird eine maximale Dehnung des Bauteils vorgegeben, die während der vorgesehenen Lebenserwartung (natürlich unter Last) nicht überschritten werden darf. Bei Mattenlaminaten z. B. sollen 0,5 bis 0,3 % Dehnung nicht überschritten werden.

Für kurze Zeit kann man einem vorgegebenen Bauteil eine hohe Last zumuten, ohne daß die Dehnungsgrenze überschritten wird. Je länger die Last wirkt, desto kleiner muß sie jedoch gewählt werden, damit die zulässige Dehnung nicht überschritten wird. Der Grund dafür ist ein Kriechen des Laminats. Da die Tabellenwerte meistens Kurzzeit-Festigkeiten oder -Steifigkeiten ausweisen, müssen diese Werte für Dauerbelastungen verringert werden.

So rechnet man für eine Belastung eines Mattenlaminats

von 10.000 Std. (= 14 Monate) 65 % und

von 100.000 Std. (etwa 10 Jahre) 59 %.

des im Kurzzeitversuch gemessenen E-Moduls (Steifigkeit $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ [M Pa], σ = Spannung in M Pa, ϵ = Dehnung in %).

Einen ähnlichen Abfall der Steifigkeit haben auch höhere Temperaturen zur Folge. Für 20 °C höhere Temperatur (also 40 °C statt der Meßtemperatur 20 °C) fällt der E-Modul bei 40 °C auf 85 % des Wertes, der bei der üblichen Meßtemperatur von 20 °C ermittelt wurde. Es gilt also

$$E_{40\text{ °C}} = 0,85 \cdot E_{20\text{ °C}} \text{ und weiter}$$

$$E_{60\text{ °C}} = 0,85^2 \cdot E_{20\text{ °C}} = 0,72 \cdot E_{20\text{ °C}}$$

Die zulässigen Spannungen kann man auch aus der Kurzzeitfestigkeit herleiten, wenn man entsprechende Abminderungen berücksichtigt (11).

Neben den üblichen Sicherheitsfaktoren für zulassungspflichtige Bauteile werden in Festigkeitsrechnungen, die von den Kurzzeitfestigkeiten ausgehen, vier Minderungsfaktoren eingesetzt (1):

1. Abminderungsfaktor A1 für zeitabhängige Minderung der Bruchfestigkeiten und zur Berücksichtigung der Proportionalitätsgrenze oder der Dehnungsspannungen.

(A1 = 1,4 bis 3,4 für verschiedene GFK-Lamine)

2. Abminderungsfaktor A₂ für Korrosion und Alterung
(A₂ = 1,1 bis 1,6, Einfluß der Gelcoatschicht-Güte)
3. Abminderungsfaktor A₃ für Einflüsse der Fertigung
(A₃ = 1,1 bis 1,8, Einfluß des verwendeten Harzes)
4. Abminderungsfaktor A₄ für sonstige Einflüsse, z. B. Wasserlagerung o. ä.
(A₄ = 1,1 bis 1,5)

Die Grundformel, in die der Sicherheitsfaktor und die Abminderungsfaktoren A₁ bis A₄ eingesetzt werden, lautet:

$$\sigma_{\text{zul.}} = \frac{\sigma}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot S}$$

dabei ist $\sigma_{\text{zul.}}$ = zulässige Spannung,
 = ermittelte Kurzzeitspannung
 A₁ bis A₄ = Abminderungsfaktoren (s. o.)
 S = Sicherheitsfaktor, wie er auch für Bauteile üblich ist.

Das Festlegen von zulässigen Spannungen, die in unregelmäßigen Abständen und dann für verschieden lange Zeit auftreten, ist äußerst schwierig. Kommen auch noch verschiedene Lastrichtungen und Belastungsarten dabei vor, so bleiben schließlich nur noch Erfahrungswerte übrig. Ein typisches Beispiel dafür sind Sportboote.

4.3.2. Dimensionierung vom Minimum her

Bei Bauteilen, deren Versagen keine Gefahr heraufbeschwört, wird gern „vom Minimum her“ dimensioniert.

Es wird zunächst ein Muster mit gerade noch vertretbaren Wandstärken gebaut. Versagt das Bauteil, so wird es zunächst an der Bruchstelle verstärkt. Tritt dann ein Bruch unmittelbar neben der Verstärkung auf, wird die gesamte Bauteilpartie dicker ausgeführt.

Dieses Verfahren erscheint sicherlich recht urwüchsig, bietet jedoch in der Durchführung beim Hand- und Faserspritzverfahren (mit Hohlformen) keine Schwierigkeiten.

Darüber hinaus hat man – einiges Geschick in dieser Art der Dimensionierung vorausgesetzt – die Gewähr für eine optimale Anpassung an die Erfordernisse. Eine Überdimensionierung inklusive des damit vermehrten Werkstoffbedarfs ist zumindest bei einfachen Bauteilen so gut wie ausgeschlossen.

4.3.3. Hinweise zum Dehnungsverhalten

Die Merkblätter für Harze und Glasverstärkungen weisen übereinstimmend für die beiden Werkstoffe eine Bruchdehnung von 2% aus. In diesem Dehnungsbereich ist die Glasverstärkung annähernd elastisch, hat also keinen Fließbereich – wie bei den Metallen –, sondern bricht bei Überschreiten der 2%-Grenze.

Aus diesem Verhalten (keine plastische Verformung) ist klar abzuleiten, daß GFK nicht verformt, wie z. B. tiefgezogen oder abgekantet werden kann. Eine örtliche Überbelastung kann nicht durch einen Fließvorgang abgebaut werden.

Darüber hinaus kann die Dehnung von 2% nur bei Zugstäben mit gerichteten Glassträngen genau in der Zugrichtung annähernd genutzt werden. Bei so einem Stab werden nämlich Glas und Harz gleichmäßig unter der Last verformt. Bei allen anderen Verstärkungsmitteln (Gewebe, Matte), auch bei Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung ist die ausgewiesene Dehnung nicht mehr ohne das Entstehen von Mikrorissen möglich. „Schuld daran“ sind die z. T. quer oder in einem anderen Winkel liegenden Glasfäden. Ihren Einfluß klärt die folgende Skizze, bei der einige querliegende Filamente in einer Harzmatrix einer Zugbelastung ausgesetzt werden.

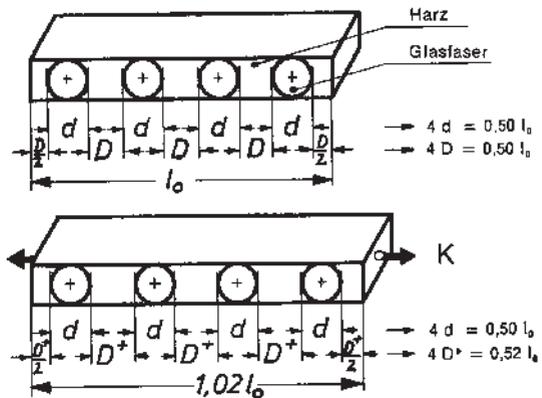
Abb. 16

Dehnungsüberhöhung im Laminat mit querliegenden Glasfasern

Die vier Glasfilamente mit dem Durchmesser d und die vier Harzzwischenräume D bilden zusammen die Stablänge l_0 (ob. Skizze).

Unter der Zugkraft K (unteres Bild) wird der Stab insgesamt um 2% länger ($1,02 l_0$). Wegen der unterschiedlichen Steifigkeit wird näherungsweise angenommen, daß die Filamentdurchmesser $4d = 0,5 l_0$ unverändert bleiben. Die Mehrlänge von $0,02 l_0$ wird also allein aus $4D^* = 0,52 l_0$ bezogen. Es ergibt sich:

$$\frac{\text{Mehrlänge}}{\text{Ausgangslänge}} = \frac{0,02 l_0}{0,5 l_0} = 4\%$$



Bei einer äußeren Längenänderung von 2% hat im vereinfachten Beispiel das Harz im Laminat eine Längung von 4% erfahren, ist also zerstört.

Der Stab hat ohne Last (Abb. oben) die Länge l_0 . Diese Länge l_0 setzt sich in dem gedachten Stab aus den vier Harzlängen D und den vier Fadedurchmessern d zusammen.

$$l_0 = 4d + 4D$$

Der Einfachheit halber wird angenommen, daß im Ruhestand der Fadedurchmesser d gleich der freien Harzlänge D sei. Man kann dann sagen, daß die vier Fadedurchmesser d gleich der halben Stablänge $l_0/2$ und die vier Harzlängen D gleich der zweiten halben Stablänge $l_0/2$ sind.

$$4d = l_0/2 \text{ und } 4D = l_0/2$$

Wird nun der Stab unter die Zuglast (Abb. unten) gesetzt, so dehnen sich die Harzanteile etwa 20mal stärker als die Glasanteile. Man kann die Glaslänge $4 \cdot d$ in diesem Beispiel als starr annehmen. Anders gesagt:

Die Verlängerung, die auf die äußere Stablänge l_0 berechnet 2% ausmacht, wird allein aus den Harzanteilen $4 \cdot D = l_0/2$ bezogen, also aus der halben Stablänge. Die Harzanteile sind damit um 4% gedehnt worden – aus D wurde D^+ .

Besitzt das Harz nur eine Bruchdehnung von 2%, so haben sich im Laminat bereits Mikrorisse gebildet; es ist teilweise zerstört.

Wie bereits im vorigen Kapitel gesagt, wird deshalb die Grenzdehnung für Mattenlaminat für Kurzzeitbelastung mit 0,5% und für Langzeitbelastung mit 0,3% angesetzt.

Das Überschreiten der Harzdehnung (der Mikroriß) macht sich als Knistern bemerkbar. Man spricht deshalb auch von der „Knistergrenze“.

4.3.4. Laminat bei Dauerschwing-Beanspruchung

Es können nur einige allgemeine Aussagen über das Verhalten von Laminaten bei wechselnder Beanspruchung gemacht werden.

Den Metallen ähnlich verringern sich bei Laminaten die ertragbaren Spannungsausschläge mit wachsender Lastspielzahl. Im Gegensatz zu den Metallen haben aber Laminat auch nach 10 Mio. Lastwechseln noch keine Dauer-Schwingfestigkeit aufzuweisen. Epoxid-Laminat erweisen sich gegenüber den Polyester-Laminaten im Bereich bis zu 10 Mio. Lastwechseln als überlegen (10). Bei entsprechenden Versuchen spielen die Versuchsbedingungen eine erhebliche Rolle.

Je öfter ein Bauteil belastet wird, desto kleiner muß die Last, bzw. desto größer der Bauteilquerschnitt gewählt werden.

4. 4. Alterung von Bauteilen aus verstärktem Polyesterharz

Beurteilungsmerkmale

Die Alterung von GFK ist im Vergleich mit anderen Werkstoffen schwieriger festzulegen. Da meistens eine sichtbare Korrosion fehlt, ist man auf andere Beurteilungsmerkmale angewiesen, die meistens nur über Meßapparaturen ermittelt werden können. Zur Beurteilung werden herangezogen:

- a) Änderung der Biegefestigkeit
- b) Optische Beurteilung der (Feinschicht-) Oberfläche
- c) Änderung des E-Moduls
- d) Änderung der Schlagzähigkeit
- e) Vergilbung des Harzes.

Die Änderung der Biegefestigkeit wird am häufigsten zur Beurteilung gemessen.

Verschiedene Formen der Alterung

Ohne Zweifel besitzt die natürliche Alterung die größte Aussagekraft. Auf dem Bootssektor sind drei Boote der US-Coast-Guard nach 10 Jahren Dienstzeit bzw. bis zu 7500 Betriebsstunden bereits 1962 auf ihre Alterung hin untersucht worden. Dabei wurden mechanisch und optisch keine nennenswerten Veränderungen festgestellt.

Weit problematischer ist das Gebiet der künstlichen Alterung, besonders dann, wenn es um die Relation zwischen der Prüfdauer und der wirklichen Zeit geht. Hier sind Überraschungen durchaus an der Tagesordnung.

Als künstliche Alterung können die folgenden Belastungsarten einzeln oder in Kombination miteinander angewendet werden:

- a) Bewitterung im Klimaschrank
- b) Lagerung in künstlicher Industriemotmosphäre
- c) Alterung bei verschiedenen Temperaturen
- d) Lagerung in Flüssigkeiten: Säuren, Laugen, destilliertes Wasser, Heizöl
- e) mechanische Belastung

Für die künstliche Alterung steht eine Reihe von entsprechenden Geräten zur Verfügung.

Ergebnisse

Entsprechende Prüfungen sind auf Veranlassung der Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe eingeleitet worden (12). Ein Auszug der Prüfergebnisse ist bei (13) wiedergegeben. Danach zeigten die Proben bei natürlicher Bewitterung nur einen geringen Festigkeitsabfall. Bei der thermischen Alterung wurde eine gute Beständigkeit bis zu 100°C festgestellt. Bei Wasserlagerung über 60°C tritt bei Gewebe-Laminaten beschleunigtes Versagen ein (siehe 2.6.).

5. Produktionsverfahren für Teile aus glasfaserverstärktem Kunststoff

Die Formteilgröße und die Stückzahl sind die wichtigsten Größen für die Wahl des Fertigungsverfahrens. Formteile mit mehr als 5 m^2 Oberfläche in Serien bis 100 Stück werden in jedem Fall handwerklich, also im Hand- oder Faserspritzverfahren, hergestellt. Serien über 100 Stück mit Formteilgrößen unter 5 m^2 können als Preßteil ausgeführt werden. Wachsen die Stückzahlen über 1000 bei Teilgrößen unter 5 m^2 , so wird stets gepreßt. Diese Regeln erübrigen jedoch nicht eine Kalkulation. Sie dienen nur als Anhalt. Die Grenzstückzahlen können durch bestimmte Anforderungen an das Fertigteil (z. B. beidseitig glatt) verschoben oder außer Kraft gesetzt werden. So kann zum Beispiel das Vakuum-Injektionsverfahren, das die Herstellung großer Teile bei geringer Styroldampfbelastung der Umwelt ermöglicht, besonders bei dickwandigen Teilen für gewerbliche Verarbeiter sehr interessant sein.

5.0.1. Übersicht über einige Herstellungsverfahren für verstärkte Polyester Teile

Die folgende Tabelle (14) gibt eine Übersicht über die gängigen Verarbeitungsverfahren für verstärkte Polyester Teile. Die für die einzelnen Verfahren genannten Stückzahlen sind Richtwerte. Das Herstellungsverfahren kann außerdem von dem gewünschten Glasgehalt bestimmt werden (Abb. 17).

5.1. Handwerkliche Verfahren

Man versteht darunter drucklose Verfahren, bei denen die Verstärkungsmittel im bereits getränkten Zustand oder trocken in die Form gelegt und dort erst mit Harz getränkt werden, maschinell oder per Hand. Das geschieht beim Handverfahren (auch Handauflege- oder Kontakt-Verfahren) und beim Faserspritzverfahren.

Das Faserspritzen und die vorimprägnierten Verstärkungsmittel stellen im Grunde nur Folgeentwicklungen der Handmethode dar, gewinnen der steigenden Lohnkosten wegen jedoch stetig an Bedeutung.

5.1.1. Handverfahren (Handauflege-, Kontaktverfahren)

a) Als die für Großteile und kleine Serien kostengünstigste Herstellungsweise ist sie üblich für den Serien-Sportbootsbau, für Maschinenabdeckhauben, Fassadenelemente, Behälter für aggressive Medien, Sonderaufbauten für LKW's, Kleintransporter, Verkaufswagen, Wohnwagen, Kunststoff-Flugzeuge, drucklose Tanks für Chemie, Landwirtschaft usw.

Das Handverfahren findet auch auf dem Beschichtungssektor Anwendung bei Schwimmbecken, Teichen, zur Auskleidung von Stahlbehältern u.s.f. Die Herstellung von Prototypen (z. B. Automobilbau) wird ebenfalls im Handverfahren sehr kostengünstig.

Verfahren	Benötigte Geräte und Maschinen	Einbringen in Formen bzw. Werkzeuge	Möglichkeiten des Verfahrens				Verarbeitung		
			Stückzahl	Teilgröße, m ²	min. Innenradius, mm	Wanddicken: a) Übergänge 1: x b) min. - max. (mm)	Temp., °C	Druck, kp/cm ²	
Handauflegen			1-1000	1-10	5	1:3 1-∞	15-25	ja	
			10-1000	1-10	5	1:3 2-∞	15-25	ja	
Faser-Harz Spritzen			10000-100000	0,25-3	5	 1-8	100-130	nein	
			100-1000	0,25-5	5	 2-5	20-50	ja	
Pressen			10000-100000	0,01-1	1	1:3 1-20	130-160	nein	
			Preßmasse	10000-100000	0,01-0,25	1	1:3 2-30	130-160	nein

Verarbeitungsverfahren für glasfaserverstärktes Polyesterharz (14)

Es sind einseitig glatte Bauteile mit nahezu beliebiger Formgebung möglich. Die mit einer Feinschicht versehenen Teile sind besonders gut gegen den Angriff von Flüssigkeiten geschützt. Bedingt durch die Handarbeit ist die Herstellung lohnintensiv, die Taktzeit lang.

b) Die **Taktzeit** setzt sich aus folgenden Teilzeiten zusammen:

Trennmittel	auftragen, trocknen lassen, polieren – diesen Vorgang evtl. wiederholen (entfällt bei Mehrmal-Trennmitteln).
Feinschicht	auftragen (evtl. 2mal), anhärten lassen.
Schnellversiegelung	aufrollen und anhärten lassen.
Laminieren	der tragenden Glas-Harzwand jeweils mit Zwischenhärtungen nach der dritten Lage.
Härtungszeit	des fertigen Teils, bis genügend Festigkeit vorhanden ist für die Entformung. Diese Zeitspanne kann u. U. benutzt werden zur Nacharbeit an den Formenrändern und für den Schlußanstrich mit LT-Lack.
Entformen	des Fertigteils.
Reinigen	der Negativform von Staub und evtl. Harzresten, bei Einmal-Trennmitteln von Resten der Trennschicht.

Die **Arbeitszeit** je Quadratmeter kann nur näherungsweise angegeben werden. Besonders gilt das für stark verformte Flächen mit Sicken, Flanschen usw., siehe Tabelle auf der nächsten Seite.

- c) Die **Formseite** des Werkstücks von Handauflege-Teilen ist mit einer Feinschicht versehen, die pigmentiert sein kann. Eine nachträgliche Lackierung ist unnötig. Kratzer in der Oberfläche führen nicht zu einer Farbveränderung, denn: die Feinschichtdicke beträgt etwa 0,5 mm.
- d) **Bautellstärken** liegen für GFK-Vollwandungen meistens zwischen 2 und 10 mm, im Kielansatz einer Segelyacht werden durch Überlappung bis zu 50 mm erreicht.
- e) **Wandstärkenänderungen** sollen weiche Übergänge erhalten. Die einzelnen Verstärkungslagen laufen versetzt (getrept) aus.
- f) **Verstärkungen** werden erst eingebracht, wenn ein Aushärtungsgrad erreicht ist, der eine Entformung bereits erlauben würde. Der Einbau der Verstärkungen sollte in das noch nicht entformte Werkstück erfolgen, damit ein Verziehen des gesamten Formteils vermieden wird.

Einbringen und Entlüften von	plane Fläche im Durchschnitt Minuten	stark verformte Fläche bis zu Minuten
Feinschicht	6	12
Schnellversiegelung	2	3
Mattenlage 300 g	9,5	20
Mattenlage 450 g	11,5	20
Gewebelage 900 g	16	25
LT-Lack	3	5
Zuschneiden von		
Matte	0,5	2
Gewebe	0,5	2,5
Faserspritzen, 250 g	6	10

Anhaltswerte für Arbeitszeit-Bedarf in Minuten je Quadratmeter.

Die Werte können sich bei großflächigen Teilen um 25 bis 30% vermindern. Bei kleinflächigen Teilen (z. B. bei einem Stuhl) können sie auf das Doppelte anwachsen.

- g) Der **Fertigungsaufwand** beim Handverfahren ist gering. Je kleiner der Produktionsraum ist, desto mehr ist darauf zu achten, daß nicht zu hohe Styrol-Konzentrationen auftreten. Gegebenenfalls müssen Absauganlagen für Werkraum und nahe der Form (Arbeitsplatz) installiert werden.

Die Formen müssen von allen Seiten gut zugänglich sein und bewegt (gekippt und transportiert) werden können. Das Fertigteil muß in der Werkstatt entformt und zur Vervollständigung gelagert werden können. Ein Tisch zum Zuschneiden der Verstärkungen mit einem Ständer für Matten und Gewebe an einem Ende genügt als feste Einrichtung.

- h) Als **Mindestplatz-Bedarf** muß die Herstellung eines Formteils von $9 \cdot 3$ m an Platzbedarf gerechnet werden:

Platz für	Länge	Breite
Form mit dem Außenmaß $9,5 \times 3,5$ m dazu Bewegungsraum von 1 m umlaufend	$9,5 + 2,5$ m	$3,5 + 2,5$ m
Zusatzbreite für das ausgeformte Bauteil mit 1 m Bewegungsraum		$3,5 + 1$ m
Zusatzbreite für Glas-Zuschneide-Tisch		2 m
Platzbedarf	12 m	× 12,5 m

Mindest-Platzbedarf für die Handfertigung mit einer Negativform

Die Raumhöhe muß bei Verwendung einteiliger Formen mindestens die 2,5fache Formenhöhe betragen. Ferner werden zwei Nebenräume für die Lagerung von Glas, Harz und Lösungsmitteln und (ein kleinerer) für die getrennte Lagerung von Peroxyden benötigt. Dazu kommt der Stellraum für Decksform, Zubehörlager usw. Der Lagerraum für die GFK-Teile soll temperierbar sein (ca. 25°C), wenn nicht getempert wurde. Beim Kobalt-MEKP-System findet dann noch eine merkliche Nachhärtung statt.

- i) Die **Temperatur des Arbeitsraums** soll 20°C betragen und kann im Bereich von 15 bis 25°C schwanken. Der untere Wert ist als Grenze für einen ordnungsgemäßen Beginn der Härtung zu betrachten.

Feinschicht und LT-Lack benötigen mindestens 18°C . Ferner soll eine Warmluftquelle vorhanden sein, die eine Temperung des Formteils – z. B. mit einer Folie abgedeckt – bei 50°C zuläßt.

- k) An **Werkzeugen** sind für die GFK-Fertigung notwendig:

Lammfellroller, Scheibenroller, Pinsel, Anrührreimer, Pappbecher, Meßgläser, eine Waage bis 1 kg (Kleinansätze) und bis zu 20 kg für Laminieransätze, ein Thermometer – einen halben Meter von der Wand weg aufgehängt – Mischpropeller und Bohrmaschine für die Harzansätze, Widia-Bohrer, Stichsägeblätter, Diamant-Trennscheiben.

- l) **Formen** für das Handverfahren sind für vollwandige GFK-Teile meistens als Negative gestaltet. Für Boote werden Hohlformen, für Behälter Formkerne verwendet. Einteiligen Formen ist der Vorzug zu geben bis zu einfachen Formteilen von etwa 8 m Länge und einem Fertigteilgewicht von etwa 500 kg.

Ist das Fertigteil länger, schwerer, hinterschnitten oder an einigen Stellen schlecht zugänglich – z. B. am Kiel einer Segelyacht – so muß eine geteilte Negativform verwendet werden.

Wird über eine Kernform gebaut – Sandwichbau, Behälterbau – kann eine Teilung auch bei großen Einheiten vermieden werden.

Neben der Herstellung von GFK-Teilen in vollflächigen Formen sind auch einige andere Bauweisen möglich, die später besprochen werden. Beheizte Formen für das Handverfahren haben sich nicht durchgesetzt.

Werkstoffe für Formen sind von der Gestalt des Fertigteils und von der gewünschten Standzeit (Zahl der möglichen Fertigteile aus einer Form) abhängig. Beim Handverfahren sind für drei bis fünf Entformungen Negativformen aus Hartfaser-, Sperrholz- oder Sichtbetonplatten, gehalten von einem Gerippe aus Holzspanten und -stringern, mit gutem Erfolg verwendet worden (VOSS-METHODE). Für bis zu 500 Einheiten haben sich Negativformen aus GFK eingebürgert.

- m) **Trennmittel** vermeiden das Verkleben von Form und Fertigteil und bewahren die Form vor Beschädigungen. Sie sind sorgfältig aufzutragen, abzulüften und – wenn notwendig – zu polieren (siehe entsprechendes Kapitel).

Trennhilfen sind beim Handverfahren vereinzelt in Gestalt von Wasseranschlüssen anzutreffen. Der Leitungsdruck wird in diesem Fall über Schläuche zwischen Form und Formteil aufgebaut und erleichtert das Ablösen. Vereinzelt wird beim Handverfahren auch mit Preßluft über Anschlüsse an die Form entformt. Meistens jedoch wird mit einem beweglichen Preßluftschlauch gearbeitet, der nach dem Ablösen des Fertigteils vom Formenrand zwischen Form und Formteil Preßluft einbläst. Diese Methode hat der Wasserentformung gegenüber den Vorteil, daß das Formteil nicht örtlich einbeult. Allerdings ist die Luft nicht ganz so wirkungsvoll. Die Formenfläche wird aber auch nicht durch die Anschlüsse unterbrochen.

Bei einteiligen Hohlformen kann man das Formteil in der Form auch aufschwimmen lassen. Das ist besonders bei wasserlöslichem Trennlack wirkungsvoll.

- n) Die **Entformzeit** kann – ohne Temperung in der Form – für kleine Bauteile (bis 2 m²) mit geringem Eigengewicht etwa als die dreifache Topfzeit des Harzes angesetzt werden. Wurde das Teil aus einem durch Kobalt und MEK gehärteten, hochreaktiven Harz mit 45 Minuten Topfzeit hergestellt, kann es frühestens nach 135 Minuten seit Fertigungsbeginn

abgehoben werden. Ist das Bauteil größer und hat es wenig Eigensteifigkeit, wird es etwa für die achtfache Topfzeit in der Form belassen werden, ehe man es entformt.

Große Teile härten in den ersten Schichten schon während der Bauzeit nach. Ein entsprechender Richtwert ist nicht anzugeben. Als Taktzeit für ein 10-m-Boot in geteilter Form gebaut (Bauzeit inklusive einer 24stündigen Temperung bei etwa 50 °C) können drei bis vier Tage gerechnet werden.

- o) **Nacharbeiten** an handlaminieren Teilen sind längs der Formenränder nicht vermeidbar. Sie sollten nach Möglichkeit bereits während des Baues vorgenommen werden.

Bei einem Harz mit 45 Minuten Topfzeit hat das Laminat etwa eine halbe Stunde nach dem Gelieren lederartigen Charakter. Diese Phase dauert etwa über eine weitere halbe Stunde an und macht ein Besäumen mit einem scharfen Messer in einfacher Weise möglich. Dabei dient der Formenrand zur Messerführung. Wird das ausgehärtete Laminat bearbeitet, sind Widia- oder diamantbesetzte Werkzeuge notwendig (Stichsäge, Bohrer, Trennscheiben).

- p) Eine **Nachhärtung** ist für alle Behälter notwendig, die später mit Lebensmitteln direkt oder indirekt in Berührung kommen (Reststyrolgehalt unter 0,5 ‰). Sie sollen zusätzlich ausgedämpft werden.

Handgebaute Teile, die eine gute Witterungs-, Wasser- oder Chemikalienbeständigkeit aufweisen sollen, müssen ebenfalls getempert werden. Schwere Bauteile ermöglichen oft erst nach der Temperung das Entformen ohne Überdehnung formschwacher Stellen. Es besteht die Gefahr der Delamination von einzelnen Schichten untereinander, sog. Weißbruch. Die überdehnte Stelle wird weiß.

- q) Als **Baustoffe** für handgefertigte Teile werden für den Verwendungszweck geeignete **Feinschichten** (siehe 2.2) mit Topfzeiten zwischen 10 und maximal 20 Minuten eingesetzt. Außer bei transparenten Bauteilen (z. B. Lichtkuppeln oder Karosserien) sind sie stets pigmentiert. Lediglich Zierstreifen werden nachträglich aufgespritzt (Haftprimer und 1- oder 2-Komponenten-Lacke, meist auf DD-Basis). Bei größeren Teilflächen wird auch mit verschiedenfarbigen Deckschichten gearbeitet.

Als **Schnellversiegelung** wird ein geeignetes Harz durch zusätzlichen Beschleuniger auf etwa 20 Minuten Topfzeit eingestellt. Dadurch ist die Einwirkzeit auf die noch junge Feinschicht kurz.

Als **Laminierharze** werden geeignete Qualitäten (siehe 2.1.) mit Martensgraden von 55 bis 70 °C für normale Bauteile verwendet. Bei chemisch und thermisch besonders belasteten Teilen kommen Sonderqualitäten zum Einsatz, die stets einer intensiven Temperung bedürfen. Die Topfzeiten der Laminierharze liegen zwischen 30 und 50 Minuten. Topfzeiten von mehreren Stunden sind möglich. Sie werden aber nicht durch verminderte

Beschleunigermenge, sondern durch Zugabe eines Inhibitors eingestellt. Kleine Bauteile mit dünnen Wandstärken werden meist mit hochreaktiven, große Bauteile mit mittelreaktiven Harzen gefertigt. Zur besseren Fertigungskontrolle werden die Laminierharze nicht eingefärbt. Eine Ausnahme davon wird lediglich für die letzte Lage von Beschichtungen bei routinierten Verarbeitern gemacht (bis 5 % Farbpastenzugabe).

Als **Farbversiegelung** bei Beschichtungen wird eine auf den Schlußlack abgestimmte Harz mit 20 Minuten Topfzeit (Kobaltbeschleuniger zusetzen) verwendet, dem bis zu 20 % Farbpaste beigegeben wird.

Der **Schlußlack** sorgt für eine klebfreie Harzoberfläche. Er hat zwischen 10 und 20 Minuten Topfzeit und muß bei einer Untergrund-Temperatur von 18 bis 25 °C (keine starke Sonneneinstrahlung) aufgetragen und gehärtet werden. Bei niedrigerer Temperatur härtet nur LT-35 B mit Zusatzbeschleuniger DAA ordnungsgemäß aus.

Zur Erhaltung der Qualität ist die Farbpastenzugabe auf 5 % begrenzt. Bei Beschichtungen kommt dem LT-Lack als der (z. B. wasser-) belasteten Fläche besondere Bedeutung zu.

Als **Verstärkungsmittel** sind beim Handverfahren **Matten** von 300 g/m² und 450 g/m² mit leicht löslichem Binder üblich (evtl. auch 225 und 600 g/m²). Als erste Lage hinter der Feinschicht und für transparente Bauteile werden Spinn- oder doppelt spinngeteilte Matten verwendet. Bei gesickten Bauteilen sind Matten mit gemischten Fadenlängen (50 mm und 25 mm) leichter einzuarbeiten. Für wasserbelastete Teile werden pulvergebundene Qualitäten empfohlen. Bei anderen Bauteilen sind emulsionsgebundene Matten beliebt.

Für hochwertige Modelle und im Werkzeugbau werden auch Epoxidharze als Feinschichten und zum Tränken von Glasgeweben und -matten verwendet.

Gewebe aus Glasgarnen bis zu 500 g/m² werden bei Leichtbauten (z. B. Modellrumpfen) sowohl mit Epoxid- als auch mit Polyesterharzen eingesetzt. Rovinggewebe von 580 bis 900 g/m² sind übliche Verstärkungsmittel beim Bau mittlerer und großer Teile (Boote ab vier Meter Länge). **Unidirektional-Gewebe** dienen der örtlichen Verstärkung an hochbeanspruchten Stellen, wie z. B. der offenen Seite eines Behälters, und werden bei Leichtbauten eingesetzt.

Rovingstränge dienen zur Krafteinleitung. Damit werden u. a. die Püttingeisen auf einem Bootsrumpf innenseitig verankert. Ferner sind sie als Unidirektional-Lage in Bootslängsrichtung zwischen zwei Mattenlagen verwendet worden, nachdem sie in einer Wanne mit Harz getränkt waren. Diese Bauweise hat allerdings nur dort eine Berechtigung, wo die Arbeitszeit keine und der Materialpreis eine große Rolle spielen (Musterbeispiel: Boots-Selbstbau).

Hochwertigere Verstärkungen (z. B. Kohlenstoff und Aramid) sind bisher per Hand in begrenzten Mengen (mit steigender Tendenz) verarbeitet worden. Polyesterwebstoffe (Diolen[®]) mit seiner hohen Bruchdehnung von 12 % dagegen war das Standard-Verstärkungsmittel für die leichtgewichtigen und hochstapazierbaren Wildwasserboote.

Oberflächen-Vliese in bedruckter Form (z. B. als Schriftträger bei Autobahnschildern, als Holzdekor usw.) haben beim Handverfahren nur für spezielle Anwendungsbereiche Bedeutung.

5. 1. 2. Faserspritzverfahren

- a) Das **Faserspritzverfahren** ist ein teilweise mechanisiertes Handverfahren. Es ersetzt das Zuschneiden der Glasmatte und das Imprägnieren der Fasern. Wird die Glaszufuhr abgeschaltet, fungiert das Aggregat als Harzmisch- und Auftragmaschine.

Von der Formteilgröße und ihrer Stückzahl her überschneiden sich Spritz- und Handverfahren daher fast vollständig. Es gelten die entsprechenden Hinweise wie unter 5.1.1. a. Es werden zu den Lohneinsparungen auch die Materialkosten (Rovingstrang statt Matte) gesenkt. Für die Anschaffung einer Faserspritzmaschine ist das Gewicht der produzierten GFK-Menge, die Größe und die Formgebung der Bauteile maßgebend. Ab einem Produktionsvolumen von 20 t/Jahr GFK kann die Anschaffung einer Faserspritzanlage lohnend sein.

- b) Was die **Arbeitszeiten** betrifft, so weist die Tabelle über den Arbeitszeitbedarf unter 5.1.1. b für verformte „Matten“-Flächen den größten Vorteil gegenüber dem Handverfahren aus. Zusätzlich bleibt der Vorteil der fehlenden Harzansatz-Zeiten, Rührreimer etc., abzüglich der Rüstzeit für die Maschine. Das aufgespritzte Faserharzgemisch muß wie beim Handverfahren mit der Scheibenrolle per Hand lagenweise entlüftet werden. Bei guter Benetzung der Glasfaser mit dem Harz durch die Maschine kann der Aufwand dabei jedoch erheblich geringer sein.

- c-i Für die Formseite, Bauteilstärke, die Wandstärkenänderung und die Versteifungen gelten die Aussagen, die in den entsprechenden Abschnitten unter 5.1.1. gemacht wurden.

Bei den Positionen Fertigungsaufwand, Platzbedarf und Temperatur des Arbeitsraumes ergeben sich praktisch keine Veränderungen. Die empfohlene Absauganlage wird hier Bedingung.

- k) Zu den Werkzeugen kommt die Spritzmaschine mit zehn- bis fünfzehntausend Deutsche Mark hinzu. Die Maschinen mit Innenmischung und Luftzerstäubung sind teurer als die Anlagen mit Außenmischung.

Bei Faserspritzmaschinen werden Harz und Glasfasern gleichzeitig in die Form gespritzt. Die Spritzpistole ist mit zwei oder drei Köpfen für die Flüssigkeiten (Harz, Härter) und mit einem Kopf für den Glasausstoß bestückt. Die verschiedenen Möglichkeiten der Harz- und Härterabgabe sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Bei den einzelnen Maschinentypen sind folgende Unterschiede zu finden:

	Möglichkeit I	Möglichkeit II
Zerstäubung	mit Druckluft	im Aerless-Verfahren
Harz- und Härterentnahme aus	maschineneigenem Behälter	Liefergebinde z. B. Faß
Härterzugabe	wird einer Harzkomponente vorher vom Verarbeiter zugemischt	wird in reiner Form zudosiert, zwangsgesteuert oder separat gesteuert
Mischort	in der Pistole	außerhalb der Pistole
Köpfezahl der Pistole	zwei a) für beschleunigtes und b) für katalysiertes Harz	drei a + c) für beschleunigtes Harz b) für den Härter
Reinigungsmittel bei jeder Unterbrechung	notwendig	nicht notwendig
Faserausstoß	mit Druckluft	durch Zentrifugalkraft
Harztransport	mit Druckgefäß	mit luftgetriebener Förderpumpe

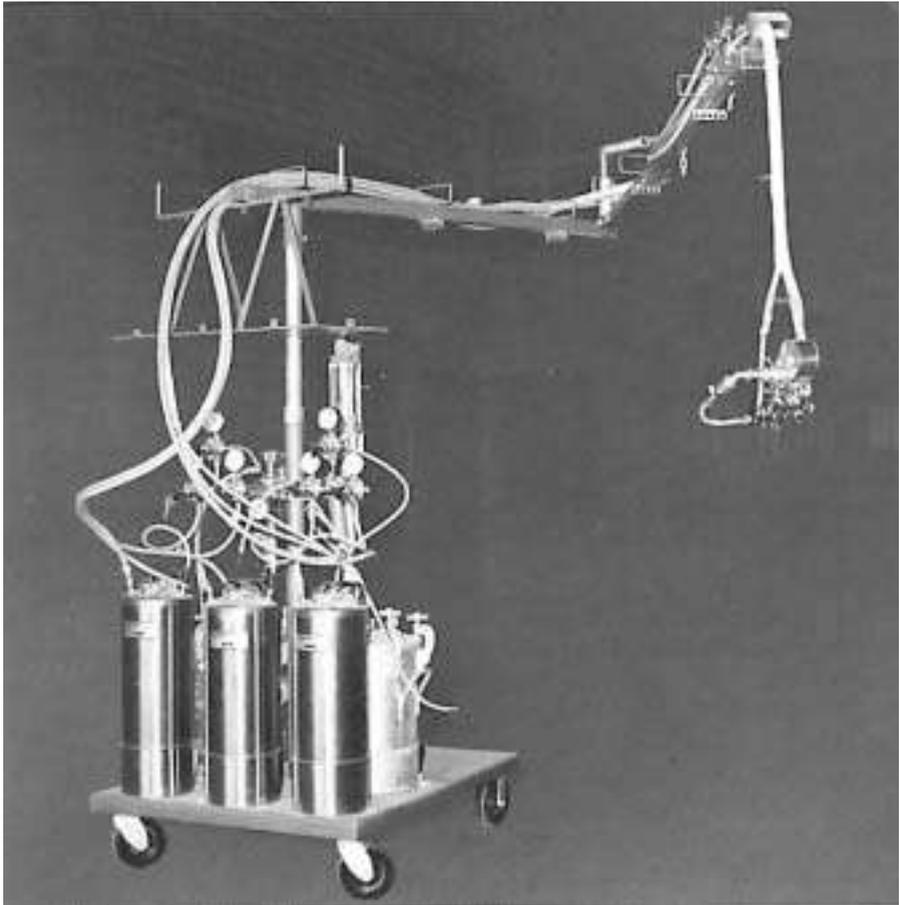
Bauvariationen bei Faserharzanlagen

Neben preßluftbetriebenen Anlagen (meist 6 atü) gibt es luftlose Hochdruckanlagen mit 80 bis 200 atü. Die zugeführten Rovingstränge (3 bis 5 Stück) werden meistens im Schneidwerk der Pistole (dem Cutter) auf 25 bis 50 mm Länge geschnitten und mit dem Harzstrahl auf die Formoberfläche gefördert. Bei großen Anlagen ist der Cutter aus Gewichtsgründen von der Pistole getrennt. Das Glas wird dann durch einen Schlauch zugeführt.

Das Spritzrovingmaterial ist auf gute Schneidbarkeit, geringe elektrostatische Aufladung und schnelle Tränkbarkeit ausgelegt. Die Anlagen fördern drei bis sechs, z. T. neun kg Faserharzgemisch je Minute.

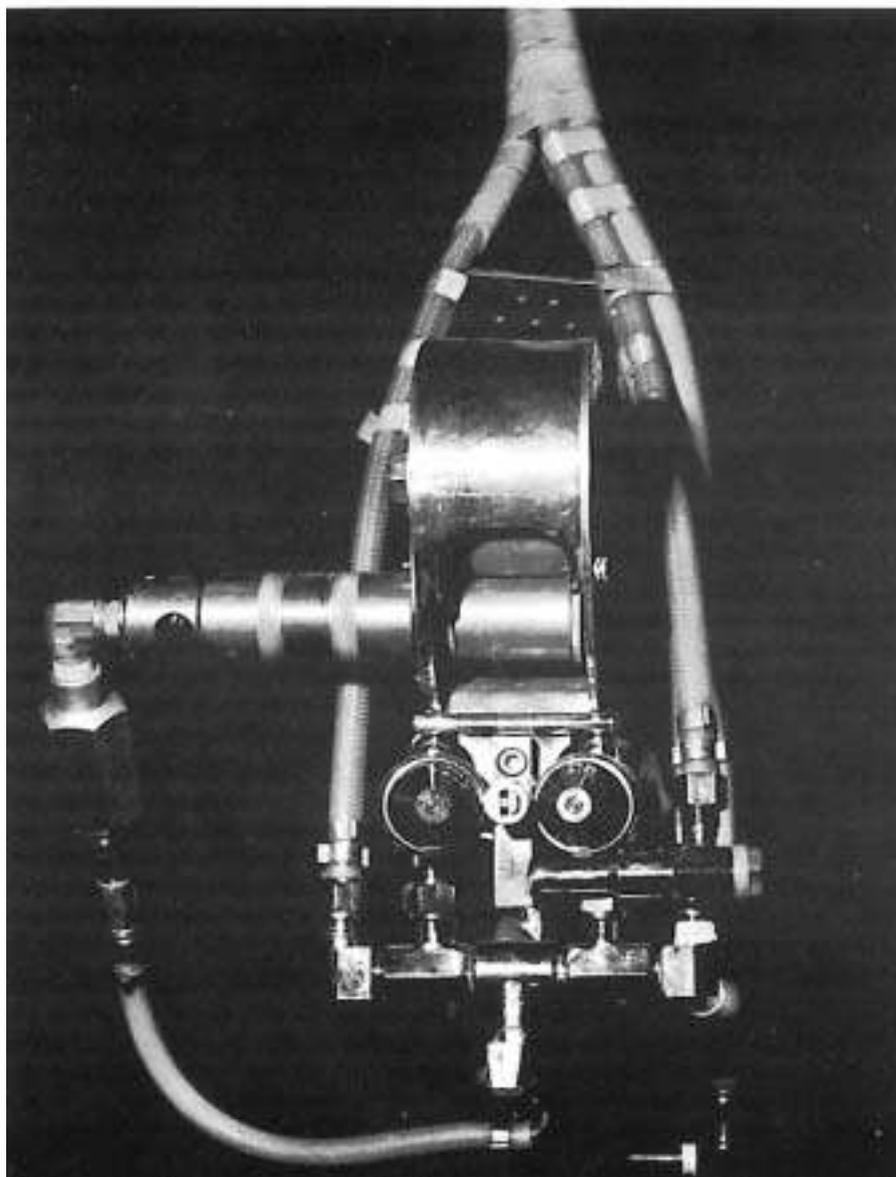
l-n)Die **Formen** und ihre **Werkstoffe** bei der Formteilproduktion mit Faserharzanlagen, ebenso die **Trennmittel** und **Trennhilfen** unterscheiden sich nicht vom Handverfahren.

Die **Entformzeit** kann u. U. kürzer sein, da auch mit kürzeren Topfzeiten gearbeitet werden kann. Die Topfzeit muß jedoch immer noch so lang sein, daß das Laminat entlüftet werden kann.



Faserspritzeanlage

Diese Anlagen sind mit einem Galgen ausgerüstet, so daß der Verarbeiter die Pistole nur zu führen braucht (Werkfoto Firma Ransburg GmbH).



Faserspritz-Pistole

Deutlich sind die beiden Harzdüsen außen und die Härterdüse in der Mitte sichtbar. Das Schneidwerk liegt direkt über den drei Spritzköpfen. Es schneidet die Rovingstränge in Fadenlängen von 25 bis 50 mm (Werkfoto Ransburg GmbH).

o-p **Nacharbeit** und **Nachhärtung** entsprechen dem Handverfahren (siehe 5.1.1. o-p).

Die **Baustoffe** für das Fertigteil unterscheiden sich beim Faserspritzverfahren in ihren Einstellungen.

Ob die **Feinschicht** gespritzt werden soll oder nicht, ist unter den Fachleuten ein heißes Thema. Diese Frage sollte stets anhand eines Versuches mit dem ins Auge gefaßten (Aerless-)Aggregat jedenfalls für nicht wasserbelastete Lamine erörtert werden.

GFK-Teile, die nachträglich einbrennlackiert werden (Karosserieteile), müssen mit absolut luftfreien Deckschichten ausgerüstet sein, wenn die Oberfläche nicht zur Kraterlandschaft werden soll.

Spritzfeinschichten müssen in ihrer Viskosität (Fließverhalten) dünner eingestellt sein als Pinsel- oder Rollenfeinschichten, sie können daher – bei zu geringer Filmdicke – auch zu einer schlechteren Durchhärtung neigen.

Verdünnt wird mit bis zu 10 % Styrol, daß z. T. bereits auf dem Weg zwischen Pistole und Formenoberfläche verdunstet und abgesaugt wird (exgeschützte Absauganlage), falls nicht eine Spritzfeinschicht bezogen wurde.

Laminierharz für das Faserspritzen kann eine Topfzeit von 15 bis 25 Minuten haben, um ein zügiges Aufbringen größerer Schichtstärken zu ermöglichen. Die kürzere Topfzeit fordert eine schnelle Benetzung der Glasfaser. Das wird durch eine geringere Viskosität (Styrolzusatz) gefördert. Man wählt bereits ein im Lieferzustand niedrigviskoses Harz. Die Spritzkonsistenz kann bei 400 m Pa.s (= 400 cP) liegen.

Schlußlacke sind in ihrem Verhalten mindestens ebenso anfällig wie Feinschichten, soll es doch zu einem vorschriftsmäßigen Ausschwitzen der Paraffinschicht kommen, die erst die Klebfreiheit durch ihren Schutzfilm gegen den Luftzutritt bewirkt. Es gelten die bei der Feinschicht gegebenen Hinweise. Epoxidharze können nur dann auf Spritzmaschinen verarbeitet werden, wenn eine Zwangsmischung im Spritzkopf vorhanden ist (Innenmischung).

Als **Verstärkungsmittel** ist letztlich der geschnittene Rovingstrang an die Stelle der Glasmatte getreten. Es werden überwiegend harte, chromgeschlichtete, jedoch auch silangeschlichtete Rovings eingesetzt, die sich gut schneiden lassen. Der Schneidrovings wird als Spule mit Innenabzug von z. B. 17 kg geliefert. Sonst gilt das für das Handverfahren Gesagte.

5. 1. 3. Verfahren mit geringem Gegendruck

Solche Verfahren, wie z. B. das reine Vakuum- und insbesondere das Vakuum-Injektionsverfahren, gewinnen im Zuge des Sandwichbaus, wo das ordnungsgemäße Verkleben von äußerer Deckschicht und Kern problematisch sein kann, an Gewicht. Darauf wird beim Sandwichbau näher eingegangen.

Das **Vakuum-Injektionsverfahren** arbeitet mit einer Matrize und einer Patrize als Gegenform. Wie beim Handverfahren wird eine Feinschicht eingebracht und angehärtet, dann evtl. ein bis zwei Glaslagen per Hand einlaminiert und angehärtet, bevor dann schwerlösliche Matten und Gewebe – also alle noch fehlenden Verstärkungsanlagen – trocken in die Form gelegt werden.

Dann wird die Gegenform aufgelegt und mittels Vakuum auf die Matrize gezogen. Über verschiedene Zuführungen wird dann ein sehr dünnflüssiges Harz von 200 bis 400 m Pa.s unter leichtem Druck zwischen die Formen geleitet und gleichzeitig ein Unterdruck von etwa 800 mbar während der gesamten Härtezeit (oft von mehreren Stunden) aufrechterhalten.

Man erhält so, zum Teil mit Verstärkungen ausgerüstet, Bauteile mit beidseitig glatten Oberflächen, deren Fertigungskosten, bedingt durch die niedrigen Investitionen (keine Presse, nur eine Vakuumpumpe notwendig), vergleichsweise niedrig liegen. Im Rahmen der verschärften Schutzvorschriften am Arbeitsplatz gewinnt dieses Verfahren immer mehr an Bedeutung.

Das **Vakuumverfahren** hatte stets einen festen Platz beim Sandwichbau, um eine ordnungsgemäße Verklebung des Kerns sicherzustellen.

Andere Verfahren, wie z. B. die **Drucksack-Methode** und die Arbeit mit flexibler Gegenform, werden nur vereinzelt bei kleinen Einheiten praktiziert. Sie sind aber ohne Bedeutung.

5.2. Preßverfahren zur Herstellung von GFK-Teilen

Wirtschaftlich ab 10.000 Stück (Kaltpreß-Verfahren bereits ab 100 Stück), sind Taktzeiten unter zehn Minuten möglich. Schaltschränke, Verteilerkästen, Abdeckhauben, Stoßstangen, Notrufsäulen, Maschinenverkleidungen, Lüfterflügel, Lagertank-Böden, Briefkästen usw. sind Preßteile, die sich einen festen Platz erobert haben.

Je nach dem Material, mit dem man die Form beschickt, werden die Preßverfahren in drei Gruppen unterteilt.

Beim **Naßpreßverfahren** wird die Form wie beim Handverfahren getrennt mit Verstärkungsmitteln (Matten mit schwerlöslichem Binder, Geweben, Oberflächenmatte) und dem flüssigen (eben nassen) Harz beschickt.

Wird dabei mit unbeheizten Formen gearbeitet, so spricht man vom Kaltpreß-Verfahren. Dabei beträgt der Schließdruck 3 bis 10 kg/cm², die Formtemperatur 50 °C. Die Arbeit in beheizten Formen wird als **Heißpreßverfahren** bezeichnet. Der Druck liegt hier zwischen 10 und 30 kg/cm².

Die zweite Hauptgruppe ist das **Pressen mit Harzmatte**. Hier ist das Glas mit einem stark eingedickten Harz imprägniert. Der Härter ist dem Harz bereits beigegeben, wird aber erst oberhalb von z. B. 80 °C aktiv. Der Preßvorgang findet deshalb in Formen statt, die auf 130 bis 150 °C temperiert sind, der Druck beträgt 50 bis 150 kp/cm².

Das **Pressen mit Preßmasse** bedient sich einer sauerkrautähnlichen Mischung aus angedicktem und mit Härter versetztem Harz + Glasfasern. Auch hier wird der Härtungsvorgang bei Temperaturen von 130 bis 160 °C und einem Druck von 50 bis 250 kp/cm² vollzogen.

Im folgenden wird nur das Kaltpreß-Verfahren besprochen. Für die anderen Preßverfahren wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

5. 2. 1. Kaltpreß-Verfahren

- a) Das Kaltpreß-Verfahren erfordert bereits größere Investitionen, die sich auch erst bei größeren Stückzahlen rentieren. Die Teilgröße kann 0,25 bis maximal 5 m² betragen.
- b) Die Zykluszeit beträgt etwa vier bis acht Minuten, sobald die Form ihre Arbeitstemperatur von 50 °C erreicht hat. Die ersten Teile zu Schichtbeginn werden bis zu 15 Minuten benötigen (kaltes Werkzeug). Die Form wird dann aber durch die Polymerisationswärme jedes Preßteils weiter aufgeheizt, und die Zykluszeit verkürzt sich, günstigstenfalls auf zwei bis sechs Minuten.
- c) Es werden **beidseitig glatte Teile** erzeugt. Das Bauteil kann mit einer Feinschicht ausgerüstet werden, die allerdings den Preßzyklus auf das Drei- bis Vierfache verlängert. Vliese zur Harzanreicherung an der Außenseite sind daher gebräuchlicher, lassen aber die (Matten-)Struktur der Verstärkungsmittel schwach erkennen. Gefüllte Harze verbessern die Oberfläche. Es werden Glasgehalte von 25 bis 45 % erreicht. Entweder die Feinschicht oder das gesamte Bauteil sind eingefärbt.
- d) Die **Bauteilstärken** liegen zwischen 1 und 8 Millimetern. Bei Formteilen unter 2 Millimetern erzeugt das Fertigteil so wenig Wärme, daß sich die Form nicht aufheizen kann. Sie muß von außen her temperiert werden. Die dickwandigen Bauteile müssen mit einer reduzierten Beschleunigung angesetzt werden, damit sie keine zu hohe Temperatur in der Wandmitte erreichen (Delaminierung).
- e) **Wandstärkenunterschiede** sind so gering wie möglich zu halten, da die dickeren Bauteilpartien einen niedrigeren Glasgehalt besitzen.
- f) **Versteifungen** werden als Sicken mit der Wanddicke des übrigen Bauteils ausgeführt. Rippen ergeben Einfallstellen an der gegenüberliegenden Formteillfläche.
- g-i Der **Fertigungsaufwand** und der Platz können in ähnlicher Weise ermittelt werden wie bei den Handverfahren. Dem Platzbedarf für Rohstoffe und Fertigteile unmittelbar neben der Presse ist Rechnung zu tragen. Die **Temperatur des Arbeitsraumes** hat für das Gelingen des Fertigteils keine wesentliche Bedeutung.

- k) Als **Werkzeug** dient die eine meist hydraulisch betriebene Oberkolbenpresse mit einem Schließdruck bis zu 10 kp/cm^2 (projizierte Fläche), deren Schließgeschwindigkeit gegen Wegende auf 2 mm/sec verlangsamt werden kann, um ein Ausschwimmen der Verstärkung mit Orientierungseffekt durch hohe Harzströmgeschwindigkeit zu vermeiden. Bei einer Fläche von $3 \text{ m}^2 = 30.000 \text{ cm}^2$ und einem Preßdruck von 10 kp/cm^2 muß die Presse auf eine Schließkraft von $30.000 \text{ cm}^2 \cdot 10 \text{ kp/cm}^2 = 300.000 \text{ kp}$, also 300 t , ausgelegt sein. Die Harzzuschnitte werden zweckmäßig ausgestanzt, die Harzansätze mit Waage, Meßbecher und Meßglas vorbereitet.
- l) Die **zweiteiligen Formen** bestehen aus einer Polyester-Schale, druckfest mit einem Harz-Sand-Gemisch hinterfüllt und in einen stählernen Aufspannrahmen eingefast. Eine Quetschkante bildet den Werkzeugverschluß. Geteilte Formen (Hinterschneidungen) und Auswerfer sind nicht üblich. Die Werkzeugkosten belaufen sich auf maximal 20% eines gleichartigen Stahlwerkzeugs.
- m) Es werden grundsätzlich **Mehrfach-Trennmittel** eingesetzt, die bis zu 50 Entformungen erlauben.
- n) Die **Entformzeit** entspricht praktisch der Zykluszeit.
- o) Die **Nacharbeit** bezieht sich auf den Überstand, der abgetrennt werden muß. Je kleiner das Fertigteil ist, desto größer ist sein prozentualer Materialverlust.
- p) Eine **Nachhärtung** wird zweckmäßig in der Form durch eine verlängerte Zykluszeit vorgenommen. Das kann besonders bei Teilen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen, notwendig werden.
- q) An **Werkstoffen** werden auf der Harzseite vorzugsweise hochreaktive, aminbeschleunigte Systeme bevorzugt. Sie leiten die Härtung schnell ein und härten schnell durch. Damit werden die kürzesten Zykluszeiten erreicht. Bei hellen Farbtönen kann die Eigenfarbe des Aminbeschleunigers als leichter Gelbstich im Fertigteil erscheinen.

Unlöslich gebundene Matten, bei stark tiefgezogenen Teilen auch Endlosmatten, werden üblicherweise als Verstärkungen eingesetzt. Zusätzliche Gewebe sind möglich. Harzreiche Oberflächen als Feinschicht-Ersatz werden durch Vliese erzeugt.

5.3. Andere Fertigungsverfahren

5.3.1. Wickelverfahren

Mit dieser Fertigungsweise ist die Herstellung nahtloser Hohlkörper bzw. von Rohren, konischen Bauteilen oder Tanks mit hohem Glasgehalt und glatter Innenfläche möglich. Dabei werden Rovingstränge (Wickelroving) oder Unidirektional-Gewebe und ein- oder mehrteilige Kerne verwendet.

Das Wickelmaterial wird in einem Tränkbad mit Harz imprägniert und zwischen einem Druckwalzenpaar von überschüssigem Harz befreit. Der Glasgehalt wird bei 75 % gehalten, da sonst nicht mehr genügend Harz zur Einbettung der Faser vorhanden wäre.

Neben teilbaren oder konischen Stahlkernen zur Wiederverwendung sind verlorene Kerne aus niedrig-schmelzenden Metall-Legierungen, löslichen Stoffen der Modellmassen zur einmaligen Verwendung möglich. Geschlossene Körper werden nach dem Planeten-System hergestellt. Offene Zylinder (Rohre, Tanks) entstehen nach dem Drehbank-System. Dabei übernimmt der Support die Faden- oder Bandführung. Nach diesem sog. Parallel-Wickelverfahren werden u. a. Heizöltanks gebaut. Sie erhalten auf der Innenseite eine Feinschicht oder eine Vliesschicht zur Harzanreicherung, damit das tragende Laminat gegen das Lagergut geschützt ist. Die Böden werden separat gepreßt und in die Zylinder eingebaut. Mannlöcher usw. werden ebenfalls getrennt gefertigt und anlamiert. Da das Parallel-Wickelverfahren nur Umfangswicklungen erlaubt, werden Matten oder Gewebebänder in axialer Richtung ins Laminat eingefügt. Auf diese Weise entsteht die erforderliche axiale Festigkeit.

5. 3. 2. Schleuderverfahren

Im Schleuderverfahren werden hauptsächlich Maste und Rohre bis zu 8 m Länge mit glatter Außenhaut und Glasgehalten zwischen 40 und 60 % hergestellt. Auf der Innenseite ist eine harzreiche Schicht durch Harzüberschuß, auf der Außenseite durch eingelegte Vliese herstellbar.

Als Werkzeuge dienen gut ausgewuchtete Stahlrohre von 50 bis 2000 mm ϕ . Die erzeugte Beschleunigung entspricht der 1000fachen Erdbeschleunigung. Entsprechend hoch liegen die Umfangsgeschwindigkeiten. Zur Verstärkung werden geklöppelte Strümpfe (50 mm ϕ), Gewebe (bis 500 mm ϕ) und Matten (bis 2000 mm ϕ) eingelegt. Das Harz wird entweder durch Kippen einer harzangefüllten Rinne oder über eine durch das Schleuderrohr wandernde Düse eingegeben. Stege am Schleuderrohre verhindern das Auslaufen (2).

6. Gestalten von GFK-Teilen

Die Gestaltung von GFK-Teilen muß den folgenden Materialeigenschaften des GFK Rechnung tragen:

- a) **Wärmeausdehnung.** Sie ist abhängig vom Glasgehalt und von der Verstärkungsrichtung. Für Polyesterlamine mit 25 % Glasgehalt kann man

$$\alpha = 25 \text{ bis } 30 \frac{1}{10^6 \text{ grad}} \text{ rechnen.}$$

Beispiel: Eine Kinderrutsche aus GFK mit einer Länge $l_0 = 10 \text{ m}$ und 25 % Glasanteil wird um $\Delta t = 1^\circ \text{C}$ erwärmt. Sie verlängert sich um den Betrag $l_{\text{zus.}} = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot 10.000$

$$l_{\text{zus.}} = \frac{28 \cdot 10.000}{1.000.000} \cdot 1 = 0,28 \text{ mm}$$

Mit größeren Glasgehalten werden die Wärmedehnungen kleiner (siehe 4.2.). Wärmestandfeste Harze dehnen sich weniger aus als Standardharze.

Zum Vergleich die Werte für

$$\text{Stahl } \alpha_{\text{St}} = 12 \frac{1}{10^6 \text{ grad}}$$

$$\text{Aluminium } \alpha_{\text{Al}} = 24 \frac{1}{10^6 \text{ grad}}$$

Die verhältnismäßig hohe Wärmedehnung führt bei planen GFK-Flächen, die am Rand fest eingespannt sind, zu Verwerfungen. Die Bauteilform muß also eine Wärmebewegung ohne den Aufbau von Spannungen im Bauteil zulassen.

- b) Die Steifigkeit (**E-Modul**) von GFK ist mit $E_{\text{GFK}} = 7.000 \text{ M Pa}$ bei 25 % nur etwa ein Dreißigstel des Moduls von Stahl ($E_{\text{St}} = 210.000 \text{ M Pa}$):

Um also eine plane GFK-Platte im Beulverhalten einer Stahlplatte mit $S_{\text{St}} = 1 \text{ mm}$ Dicke gleichzumachen, ist folgende Dicke S_{GFK} notwendig:

$$S_{\text{GFK}} = \sqrt[3]{\frac{E_{\text{st}} \cdot S_{\text{st}}^3}{E_{\text{GFK}}}} = \sqrt[3]{\frac{210.000 \cdot 1^3}{7.000}} = 3,1 \text{ mm}$$

Die GFK-Platte mit 3,1 mm entspricht also der Stahlplatte von 1 mm in der Beulsteifigkeit. Um die Wandstärken und damit Materialkosten und Gewicht niedrig zu halten, wird man GFK-Platten durch Profilierung, Bombierung, Falten und Randversteifungen von der Konstruktion her

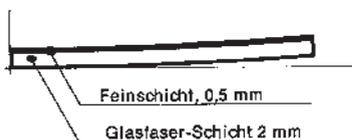
mit einer besseren Gestaltfestigkeit versehen. Wo diese Maßnahme nicht ausreicht oder nicht möglich ist, werden Einzelversteifungen (Rippen) oder vollflächige Versteifungen (Sandwich-Prinzip) angewendet.

- c) **Der Harzschumpf** bei der Härtung führt ebenfalls zu Verwerfungen des Fertigteils, die über die Bauteil-Gestaltung aufgefangen werden müssen. Das reine Polyesterharz hat einen Volumenschumpf von 8 %; in einer Richtung gemessen einen linearen Schumpf von etwa 2 %, also 2 mm je Meter Länge.

Verstärktes Harz mindert den Längenschumpf auf etwa 0,1 % bei 30 % Glasgehalt. Dabei soll die Richtungsabhängigkeit nicht berücksichtigt werden. Ein planes Laminat aus 0,5 mm Feinschicht (reines Harz, also 0 % Glasgehalt) und bis zu 2 mm Mattenlaminat (Glasgehalt 30 %) verzieht sich daher – dem Bimetalleffekt vergleichbar – zur Feinschicht-seite hin.

Abb. 18

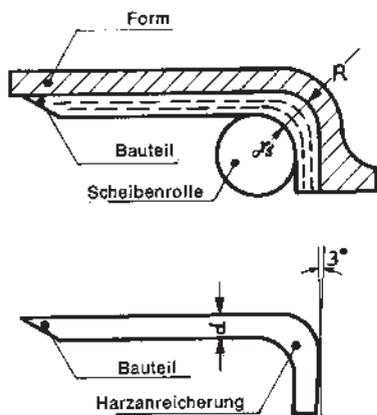
Verwerfung eines dünnen Laminates durch den Härtungsschumpf



Der lineare Schumpf des reinen Harzes (Feinschicht) ist größer als der Schumpf der verstärkten Schichten. Dünne Laminare müssen deswegen formsteif gestaltet werden.

Die gleiche Erscheinung in gemilderter Form tritt in dünnen Bauteilen auch bei anderen unterschiedlichen Glasgehalten auf, wie sie z. B. in einer Mattenlage (25 % Glasgehalt) auf einer Gewebelage (Glasgehalt 50 %) entstehen. Gefährdet sind darum auch Innenwinkel mit sehr klei-

Abb. 19



Zuziehen einer rechteckigen Kante durch zu kleinen Formenradius

Werden Formen mit zu kleinen Radien versehen, so führt das zu einer sehr losen Schichtung der Verstärkungen in der Kante. Damit steigen der Harzanteil und der Schumpf an dieser Stelle. Der Radius der Form R für das Handverfahren errechnet sich aus: $R = r + d$. Dabei ist r mindestens 5 mm (oder Radius der Scheibenrolle) und d die Bauteildicke.

nen Radien. Hier sinkt der Glasgehalt durch zu lose Schichtung der Mattenlagen im Innenwinkel (siehe Abb. 19), der Schrumpf steigt und der Winkel zieht sich zu.

6.1. Aussteifung von Platten

6.1.1. Randversteifung

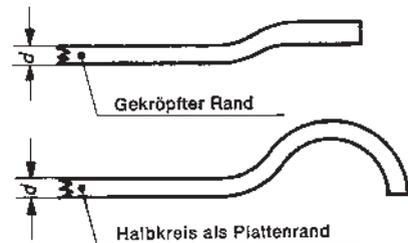
Ebene Platten werden, wenn es die Funktion erlaubt, mit einer Randversteifung ausgerüstet. Die einfachste Form ist ein 90° Winkel mit nicht zu kleinem Radius (Abb. 19). Der Formenradius R soll mindestens betragen: $R = 5 \text{ mm} + d$. $d =$ Dicke des Bauteils in Millimetern. Bei kleinen Wandstärken und Radien des Bauteils muß für einen 90° Winkel am Bauteil der Formenwinkel etwa 92 bis 95° betragen (Vorversuch).

Andere Möglichkeiten der Randaussteifung beim Handverfahren sind in der Abb. 20 gezeigt.

Abb. 20

Randversteifung von ebenen Platten

Um kleinen GFK-Teilen genügend Steifigkeit zu geben, ist eine entsprechende Gestaltung des Randes vorzunehmen. Kröpfungen und Halbkreise über oder unter der Tafelfläche sind konstruktive Möglichkeiten, die eine Versteifung bei gleichbleibender Schalendicke d ergeben.



6.1.2. Flächenversteifung

Die Aussteifung in der Fläche wird stets durch ein Anwachsen der Plattenhöhe H gegenüber der Plattendicke d erreicht (Abb. 21).

Abb. 21

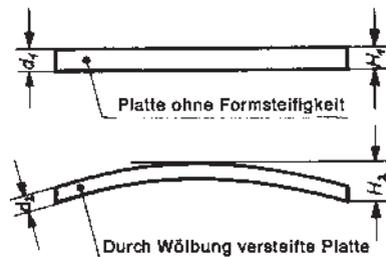
Aussteifung von Platten

Platten, deren Dicke d der Bauteilhöhe H entspricht, sind beuschwach.

$$H_1 = d_1$$

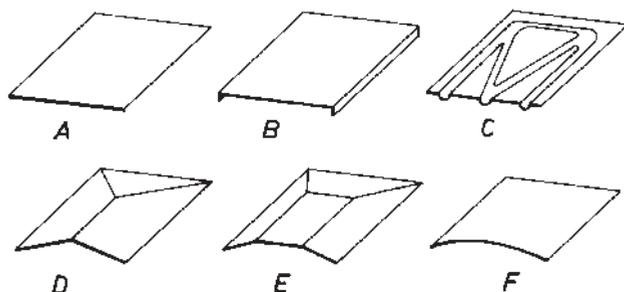
Bombierte oder gesickte Bauteile besitzen zusätzlich Formsteifigkeit bei gleichmäßiger Wanddicke. $H_2 > d_2$.

Ihre Dicke d_2 kann deshalb kleiner gewählt werden als d_1 .



Als Formversteifungsmöglichkeiten der Abdeckhaube A werden die Variationen B bis F der Abb. 22 angegeben (15).

Abb. 22



Verstifeln einer Platte durch Wölbung (15)

Die Platte A wird durch Konturänderung bei gleicher Wanddicke ausgesteift. Form B ergibt nur eine Randversteifung. Die Sicken in C steifen die gesamte Fläche aus. D und E sind wirksame und im Modellbau preiswerte Verbesserungen. Form F ist im Modell am teuersten, bringt aber das beste Ergebnis.

Während rundspantige Boote der Version F (zweiachsigte Krümmung) entsprechen, bestehen Knickspanter im einfachsten Fall aus ebenen Platten, die nur in einer Richtung gebogen sind (einachsigte Krümmung).

Sie sind weniger beultsteif und werden daher im Bodenbereich und auch in der Seitenwand durch Sicken ausgesteift, die gleichzeitig die Richtungsstabilität des Bootes beim Geradeauslauf verbessern.

Die Bodensicken müssen parallel zur Kiellinie gehalten sein. Bei diesen Formen der Versteifung bleibt im wesentlichen also die Wanddicke des Formteils gleich. Die Wand wird nur mit einem sehr geringen Mehraufwand an Werkstoff anders gestaltet. Diese Versteifungsmöglichkeit verteuert den Modellbau u. U. erheblich und ist auch wegen der Bauteilfunktion teilweise gar nicht oder mit nicht ausreichender Wirkung durchführbar. Man greift dann zu aufgesetzten Verstärkungen.

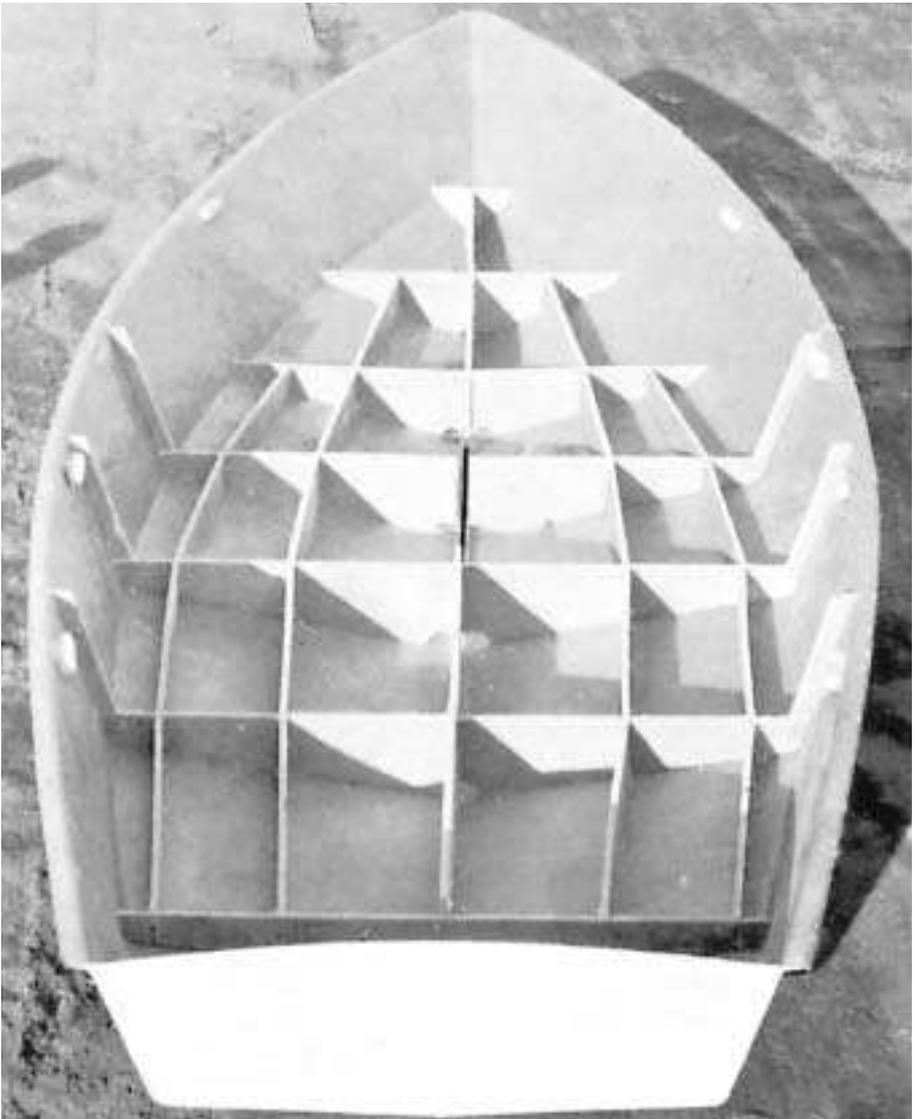
6. 1. 3. Aufgesetzte Versteifung

Sie finden bei handlamierten Teilen oft Verwendung. Ihr Aufbau und ihre Gestaltung sind materialgerecht auszuführen. Üblicherweise werden die verwendeten Versteifungen auf das gehärtete Wandlaminat auflaminiert. Der Untergrund muß (z. B. nach einer Temperung besonders) gründlich auf-



Funktionsgerechte Versteifungen

Die Sicken im Bootsboden versteifen das Bauteil und verleihen ihm gute Geradeauslauf-Eigenschaften. Das Verlegen von Geweben ist in den scharfkantigen Sicken schwierig.

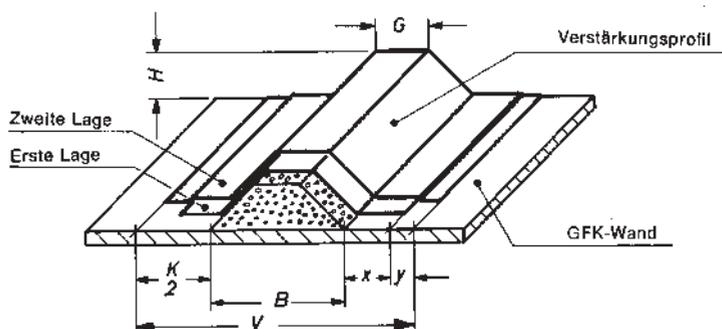


Aufgesetzte Versteifungen

Ein Bauteil mit glatter Außenseite kann nur durch aufgesetzte Rippen versteift werden. Hier sind PVC-Schaumplatten von 10 mm Dicke als Kern mit einer Lage Glasmatte übertapeziert und damit auch gleich am Bauteil befestigt worden.

geraut und gereinigt sein. Zu achten ist auf eine genügend große Kontaktfläche zwischen Verstärkung und Wand. Besteht die Verstärkung nur aus GFK oder aus GFK mit einem druck- und biegeweichen Kern, so kann die Größe der Kontaktfläche anhand einer Faustformel angegeben werden.

Abb. 23



Aufbau einer Trapez-Verstärkung

Der Aufbau und die Verankerung von Verstärkungen sollten zueinander in einem ausgewogenen Verhältnis stehen, damit die Beulsteifigkeit der Wand stufenförmig ansteigt. Das wird durch die vorgeschlagenen Überlappungsbreite x für die erste und y für alle weiteren Lagen erreicht. Dabei wird grundsätzlich von einem hohlen oder druck- und biegeweichen Kern ausgegangen.

Die Kleblänge soll ebensolang wie das Verstärkungsprofil sein. Die Klebbreite $K/2$ auf jeder Profelseite ergibt sich aus der Gurtbreite des Verstärkungsprofils, seiner Höhe und der Zahl der Mattenlagen, aus denen es aufgebaut ist.

Für ein Trapezprofil, dessen Höhe H gleich der Gurtbreite G ist, und dessen Basisbreite B doppelt so breit ist wie sein Gurt (siehe Abb. 22) ergibt sich:

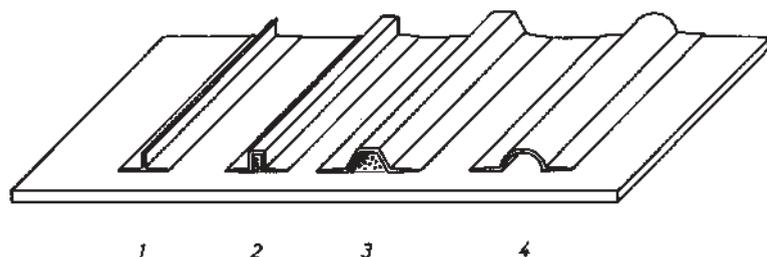
Höhe	$H = \text{Gurtbreite } G$
Basisbreite	$B = 2 \cdot G$
Klebbreite für die erste Lage	$x = H$
Überlappungsbreite für jede folgende Lage	$y = B/4$, mindestens 2 cm
Kontaktstreifenbreite	$K = 2x + 2y_1 + 2y_2 + \dots$
Verstärkungsbreite	$V = K + B$

Rechenbeispiel für ein Trapezprofil mit der Höhe $H = 8 \text{ cm}$, also $B = 16 \text{ cm}$:
 Klebbreite $K = 2 \cdot (X + Y_1 + Y_2) = 2 \cdot (8 + 2 + 2) = 2 \cdot 12 = 24 \text{ cm}$ und Ver-
 stärkungsbreite $V = K + B = 16 + 24 = 40 \text{ cm}$.

Die einfachste Form der Flächenversteifung ist ein auflaminierter GFK-Winkel (Abb. 24, 1). Es wird zunächst eine Mattenlage gegen ein mit Trennmitteln behandeltes Formbrett laminiert und gehärtet. Das Formbrett wird entfernt und eine zweite Matte gegen die Rückseite tapeziert. In gleicher Weise werden zusätzliche Mattenlagen eingebracht.

Die geringe Dicke der aufrechtstehenden Rippe ergibt nur eine begrenzte Verstärkungswirkung. Besser ist die Ausbildung von Kastenprofilen mit folgenden Querschnitten:

Abb. 24



Einige Profilformen zur Verstärkung von GFK-Flächen

Profil 1 ist für kleine Flächenlasten ausreichend. Seine Rippe weicht jedoch bei größerer Durchbiegung zur Seite aus. Profil 2 kann durch die Kastenform höher belastet werden. Als verlorene Form benutzt man einen Schaumstreifen. Profil 3 entspricht dem Vorschlag des Germanischen Lloyd. Seine Aufstandsbreite entspricht der doppelten Gurtbreite. Der Kern wird zweckmäßig aus Schaum hergestellt. Profil 4 erhält als Kern ein flexibles Halbrohr (Deco-Rohr), das sich auch gekrümmten Flächen anpaßt.

Zum Bau der Kastenprofile sind grundsätzlich biege- und druckweiche Werkstoffe wie Schaumstreifen hochkant, Schaumstreifen (PVC- oder PUR-Schaum) im üblichen Trapezprofil oder flexible Halbrohre zu verwenden (Abb. 24 2, 3 u. 4).

Man erhält mit diesen Kernwerkstoffen als verlorenem Kern reine GFK-Profile, die durch den treppenförmigen Anstieg der Verstärkung eine materialgerechte Konstruktion darstellen.

Im Gegensatz dazu würde ein langes einlaminiertes Flacheisen (womöglich noch hochkant, entsprechend dem Schaumstreifen Nr. 2 in Abb. 24) durch seine hohe Eigensteifigkeit beim Biegen der Wand samt den Befestigungsstreifen abplatzen.

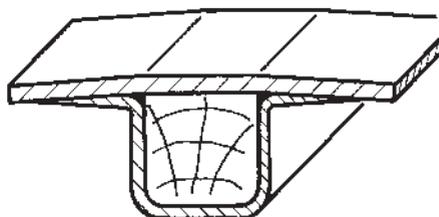
Der verlorene Kern kann auch aus einem ein- oder zweilagigen Mattenlaminat bestehen, das auf das zu verstärkende Formteil aufgesetzt und in der beschriebenen Weise befestigt wird. Vollholz als Kern ist ungeeignet, da es quillt. Sperrholz ist ebenfalls nicht biegeweich genug.

Druckfeste Werkstoffe haben bei der Verwendung als verlorener Kern noch einen zweiten Nachteil, der im Schrumpfen des Polyesterlaminats begründet ist. Besonders bei dünnen Wänden kann der Schrumpf der Befestigungstreifen bereits zu einer Verformung der Wand führen (siehe Abb. 25).

Abb. 25

Verwendung ungeeigneter Werkstoffe für Versteifungen

Druckfeste und biegestarre Werkstoffe sind als Material für Kerne nicht geeignet. Hohe Druckfestigkeit des Kerns verhindert einen Ausgleich des Schrumpfes im aufgetapezierten Laminat. Die Wandteile unter dem Kontaktstreifen werden heruntergezogen und der Kern bildet sich auf der Gegenseite ab. Vor allem lange, biegestarre Kerne führen beim Durchbiegen der Wand zum Abplatzen des GFK-Profiles.



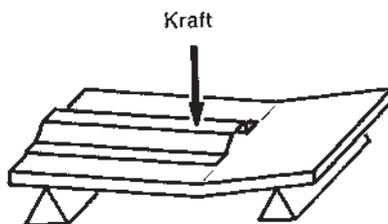
Die beiden Mattenstreifen ziehen die Wand um den harten Kern herum, weil sie beim Aushärten kürzer werden (Schrumpf). Die Versteifung bildet sich deutlich ab. Der gleiche Effekt tritt bei einem quellenden Kernwerkstoff auf (nasses Vollholz). Ein druckweicher Kern vermeidet diesen Fehler.

Als Kontaktlage der Verstärkung zur Wand hin (erste Lage) wird stets eine Mattenlage verwendet. Bei mehr als drei Matten können Gewebe mit eingesetzt werden.

Abb. 26

Falscher Abschluß einer Versteifung

Versteifungen müssen an ihren Enden sanft auslaufen. Das wird am besten durch eine Verringerung des Profilquerschnitts erreicht (siehe Abb. 43). Sonst entsteht eine Stelle hoher Beanspruchung, die besonders bruchgefährdet ist. An den Profilenden wird die Fläche grundsätzlich um ein bis zwei Mattenlagen verstärkt.



Dem Auslauf von Versteifungen ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken. So dürfen Versteifungen (wie die Stringer zur Motorlagerung im Boot z. B.) nicht wie abgeschnitten enden. Biegt sich ein Formteil, so ist die Partie unter der Verstärkung steif, die Wand aber biegsam. Am Übergang kommt es unter Wechselbelastung unweigerlich zu Schäden.



Aufgesetzte Versteifungen mit Trapezprofil

Die Kerne werden aus zwei 40 Millimeter hohen, gegeneinander geneigten Schaumstoffstreifen gebildet. Sie sind mit Spachtelmasse befestigt und zum Deck hin abgerundet. Die Versteifung selbst besteht aus drei verschieden breiten Mattenstreifen.

Alle Versteifungen müssen vielmehr sanft auslaufen, sich auf einer druckverteilenden Querversteifung oder einem durch Glaslagen zusätzlich verstärkten Wandteil abstützen. Alle Bauteile mit abrupten Steifigkeitsunterschieden sind viel zerstörungsanfälliger als gleichmäßig durchgebildete Teile.

Diese Gesetzmäßigkeit gilt auch bei richtig durchgebildeten Verstärkungen. Mehrere kleine Versteifungen sind einer einzigen, wenn auch entsprechend größeren vorzuziehen. Dieser Optimierung setzt der Arbeitsaufwand allerdings Grenzen.

6.2. Sandwich-Konstruktionen

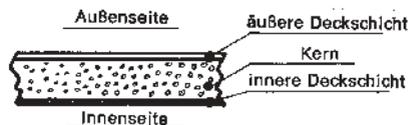
Sie sind eigentlich die Konsequenz der am Ende des vorigen Kapitels formulierten Forderung. Eine maßgebliche Rolle für die Verbesserung der Wandsteifigkeit durch aufgesetzte Hohlprofile ist der Querschnitt und der Abstand des oberen Gurtes. Je weiter der Gurt von der Wand entfernt (Pro-

filhöhe) und je dicker er ist, desto größer ist seine Wirkung. Die Profillanken tragen zur Wandversteifung relativ wenig bei. Bei der Sandwich-Konstruktion werden sie daher durch einen leichteren, fremden Baustoff ersetzt, und die Obergurte sind zu einer geschlossenen zweiten Fläche zusammengewachsen.

Abb. 27

Schnitt durch eine Sandwichwand mit GFK-Deckschichten und Schaumkern

Die Sandwich-Bauweise führt zu besonders biegesteifen Bauteilen, so daß sehr oft aufgesetzte Versteifungen völlig entfallen. Man erhält beidseitig plane Flächen. Die Decks von gedeckten Sportbooten werden deshalb gern als Sandwich ausgebildet. Die äußere Deckschicht wird meistens um 10 bis 15 % dicker als die innere ausgeführt (16).



Der Sandwichbau verhilft zu besonders biegesteifen Bauteilen. So entfallen z. B. bei Booten im wesentlichen die Versteifungen. Die Konstruktion wird also erheblich leichter, wenn es sich um größere Einheiten handelt. Bei Biegebelastung übernimmt die eine Deckschicht die Zug-, die andere die Druckbelastung.

Verwendet man als Kernmaterial (auch Träger genannt) einen schlechten Wärmeleiter, so erfüllen Sandwichwände gleichzeitig Isolationsaufgaben. Das ist im Bootsbau für Kajütboote interessant. Bei geschickter Kombination von Kern- und Deckschichtstärken übernehmen Sandwichwände wirkungsvoll die Funktion von Auftriebskörpern.

Große Biegefestigkeit bei niedrigem Gewicht, Isolationswirkung und Schwimmfähigkeit sind Vorteile, die dem Sandwich im Bootsbau eine immer größere Bedeutung zukommen lassen.

Als Deckschichten werden im Polyester-Bootsbau natürlich Polyester-Lamine verwendet. Als Kern wird Plattenware aus Schaumstoff, speziell PVC-Schaum (Conticell®), seltener Polyurethan, von 6 mm bis maximal 40 mm Dicke verwendet. Vereinzelt werden Tubusmatten (aufrechtstehende Halme aus PVAC) oder Waben (sog. honey-combs) eingesetzt. Besonders aber Balsa-Hirnholz ist ein beliebtes Kernmaterial, weil es beim Verkleben auf der äußeren, z. B. im Handverfahren gefertigten Deckschicht, willig klebt (Kapillarwirkung der Holzporen).

Es sei auch hingewiesen auf die Saran-Schaummatten, die als Kernschicht in bekannter Weise mit UP-Harz ähnlich einer Glasverstärkung einlamiert werden und keinen Verklebungsdruck benötigen. Die Schaum-Matte ist in 2 mm Mindestschichtdicke lieferbar. Mit diesem Werkstoff ist eine neue, sehr einfache Herstellungsweise von Sandwichteilen möglich.

Zu den Wandstärken von Sandwichbauten im Bootsbau gibt der Germanische Lloyd folgende Richtlinien (16):

1. Grundsätzlich soll die äußere Deckschicht dicker sein als die innere. Der Germanische Lloyd (GL) gibt als Vorschrift eine um 15 bis 20 % verstärkte Außenschicht gegenüber der inneren Deckschicht an. Besteht die innere Deckschicht aus 4 Lagen, so erhält die äußere also 5 Lagen Glas.
2. Die Reißlast der äußeren und inneren Deckschicht zusammen soll 90 % des Reißlastwertes von einem Voll-Laminat betragen.
In bezug auf das Gewicht liegt der Vorteil des Sandwichs nach dem GL praktisch allein im Wegfall der Innenversteifungen.
3. Als Schaumkerndicke wählt man das Dreifache der beiden Polyester-Deckschichten zusammen.

Es liegt auf der Hand, daß die gleichen Deckschichten innen und außen, auf verschieden dicke Schaumkerne aufgetapeziert, ein sehr unterschiedliches Biegemoment aufnehmen können. Wird z. B. eine 10 mm dicke Schaumplatte mit einer Lage Standardmatte auf jeder Seite beschichtet, so kann sie ein elastisches Biegemoment von 1060 cm kp aufnehmen. Eine 20-mm-Schaumplatte mit der gleichen Beschichtung, also auch der gleichen Reißlast, hat 1520 cm kp als elastisches Biegemoment.

Hat man also die Reißlast in Abhängigkeit von den Bootsmaßen nach der Anweisung des GL errechnet und davon 10 % abgezogen, so ist noch die Kerndicke auszuwählen. Nach dem GL soll der Kern ca. dreimal so dick sein wie die Laminatdicke. Wird aber der Kern dicker gewählt, steigt bei gleicher Reißlast das Biegemoment, so daß, zumindest bei „freien“ Bauten, mit der Reißlast heruntergegangen werden kann.

Die Versuchsberichte über CONTICELL® zeigen nun übereinstimmend, daß eine Kerndicke von 40 mm das günstigste Verhältnis zwischen Biegefestigkeit und Gewicht darstellt. Es lohnt sich also nicht, mit der Kerndicke heraufzugehen, falls eine größere Steifigkeit gewünscht ist. Es müßte in diesem Fall die Deckschichtstärke erhöht werden.

6.3. Verbindungen

6.3.1. Eckverbindungen

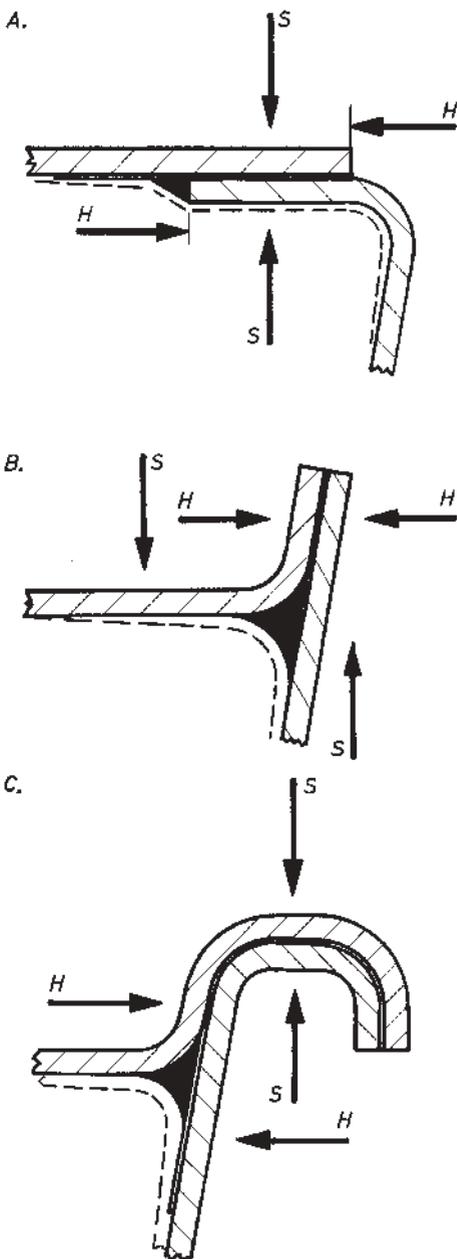
Sollen GFK-Teile miteinander verbunden werden, so wird man sich zunächst einen (zeichnerischen) Überblick über die Richtungen der Kräfte vermitteln, die die Verbindung übertragen soll. Man läßt dann im Geiste die Kräfte auf

Auswählen einer Verbindung nach dem Gesichtspunkt der Formschlüssigkeit

Bei Belastung durch das Kräftepaar H ist die Verbindung B höher belastbar als beim Einwirken des Kräftepaars S . Toleranzausgleich ist bedingt möglich.

Bei Belastungen durch das Kräftepaar H kann die Verbindung A nur geringe Kräfte übertragen. Die Klebfläche wird auf Schub beansprucht. Es ist möglich, Bauteiltoleranzen auszugleichen. Gegenüber dem Kräftepaar S ist diese Lösung bei Drucklasten gut.

Lösung C hat beim Einwirken von beiden Kräften gleichermaßen einen Formschluß. Sie besitzt eine große Klebfläche. Ein Toleranzausgleich ist nicht mehr möglich.



die Verbindung wirken und sucht nach Randformen, die bereits ohne Verklebung die Kräfte übertragen würden (siehe Abb. 28). Auf diese Weise kommt man zu einer sog. kraftschlüssigen Verbindung.

Der zweite Gesichtspunkt bei Verbindungen gilt der Möglichkeit, Fertigungstoleranzen an der Verbindungsstelle auszugleichen.

Alle Verbindungen werden durch auflaminierte Mattenstreifen von der Innenseite her verbessert (siehe gestrichelte Linien).

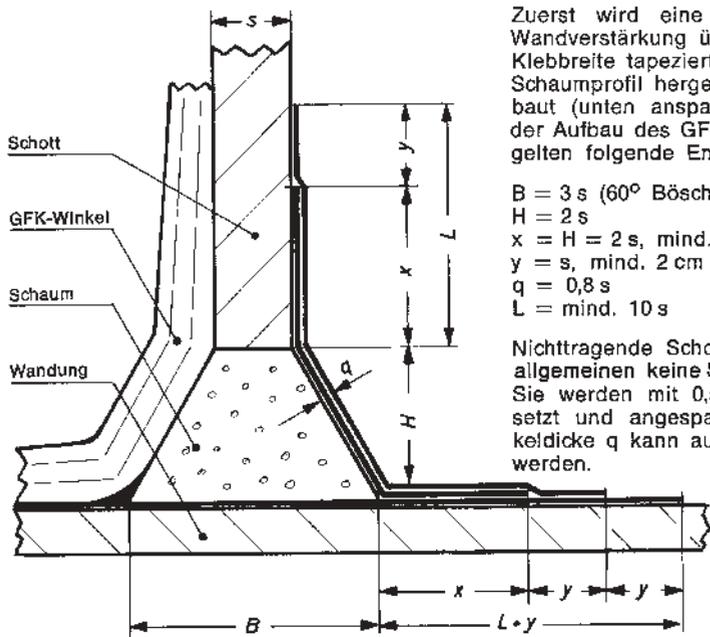
Durch das Zwischenlegen von ein oder zwei harzgetränkten Mattenstreifen werden Verklebungen besonders mit unebenen Kontaktflächen wesentlich verbessert. Als Klebharze werden Polyester (mit oder ohne Haftverbesserer), zuweilen auch Epoxidharze eingesetzt.

6.3.2. T-förmige Verbindungen

Sie treten z. B. zwischen Bootswand und Schotten auf und haben ebenfalls eine versteifende Wirkung auf die Wand, gegen die sie stoßen. Hier gilt die Forderung, „harte Stellen“ zu vermeiden, ganz besonders. Solche Quer-

Einbauvorschlag für ein tragendes Schott

Abb. 29



Zuerst wird eine Mattenlage als Wandverstärkung über die gesamte Klebbreite tapeziert. Dann wird das Schaumprofil hergestellt und eingebaut (unten anspachteln). Es folgt der Aufbau des GFK-Winkels. Dabei gelten folgende Empfehlungen:

- $B = 3s$ (60° Böschungswinkel)
- $H = 2s$
- $x = H = 2s$, mind. 5 cm
- $y = s$, mind. 2 cm
- $q = 0,8s$
- $L = \text{mind. } 10s$

Nichttragende Schotten erhalten im allgemeinen keine Schaumunterlage. Sie werden mit 0,5 cm Luft eingesetzt und angespachtelt. Die Winkeldicke q kann auf 0,6 s verringert werden.

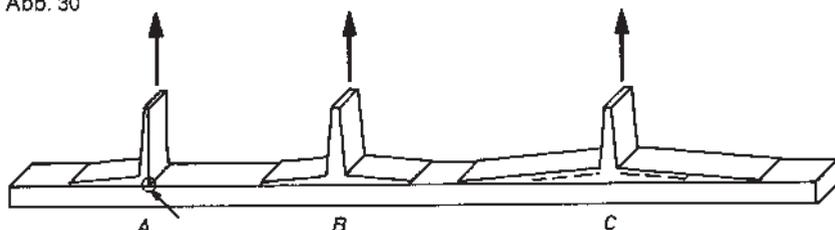
steifen werden deshalb nicht stumpf gegen eine Wand gesetzt, sondern mit einem elastischen Zwischenglied eingebaut. Während nichttragende Schotten auf Luft installiert werden, bettet man tragende Schotten (z. B. Mastschott) und alle anderen Schotten innerhalb der Wasserlinie als Hauptlastbereich) in trapezförmigen Streifen aus PVC-Schaum (CONTICELL®)

6.3.3. Kraffteinleitungen

Große Kräfte werden bei GFK stets auf große Flächen übertragen, um eine örtliche Überbeanspruchung zu vermeiden.

Auf **Zug** beanspruchte Befestigungen sind besonders auszubilden, damit nicht eine zusätzliche Schälbeanspruchung zur schrittweisen Ablösung führt (siehe Abb. 30). Da das Laminat bei dieser Beanspruchungsrichtung unverstärkt ist, sind Zugkraffteinleitungen sehr sorgfältig zu gestalten..

Abb. 30



Einleiten einer Zugkraft senkrecht in eine Wand

Bei diesem Problem ist man allein auf die Klebfestigkeit angewiesen. Deshalb wird zunächst eine möglichst große Kontaktfläche angestrebt. Der unter A gezeigte Winkel wird sich unter der Kraffteinwirkung strecken und vom Pfeil aus abgeschält. Die Lösung B vermeidet diesen Fehler. Bei C sind die Kontaktfläche und die Steifigkeit im Klebflansch am größten.

Druckkräfte sind im Kapitel 6.1.4. in Gestalt von aufgesetzten Versteifungen behandelt worden.

Schubkräfte treten parallel zum Laminat auf. Bei der Gestaltung der Verbindungsstelle ist darauf zu achten, daß möglichst keine Biegekräfte zusätzlich entstehen. Die zu verbindenden Lamine sollen eine Linie bilden, sonst bleibt es nicht allein bei der Schubbeanspruchung (Abb. 31).

Das zeigt die Darstellung A. Hier liegen die Kräfte erst auf einer Linie, wenn sich die Klebestelle verdreht hat (A_2). In der Verklebung herrschen Schub- und Zugkräfte. Vor und hinter der Klebstelle ist das Laminat auf Biegung beansprucht.

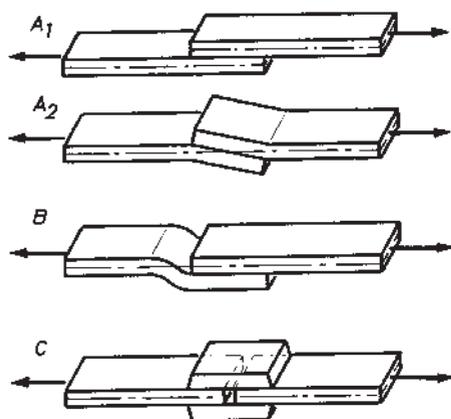


Abb. 31

Zugkraftübertragung zwischen zwei ebenen Bauteilen

Lösung A₁ ist wegen ihrer Gestaltung nicht hoch belastbar. Erst wenn sie sich in die Stellung A₂ verdreht hat, liegen die Zugkräfte auf einer Linie. In der gedrehten Stellung entstehen in der Klebnaht Schub- und Zugkräfte.

Anordnung B vermeidet das Verdrehen. Die Zugkräfte liegen von vornherein auf einer Linie. Die Klebstelle hat eine plane Seite.

Anordnung C besitzt die doppelte Kontaktfläche, hat jedoch keine plane Fläche mehr und ist daher nicht immer anwendbar. Erst wenn man einseitig klebt, ist wieder eine glatte Fläche vorhanden.

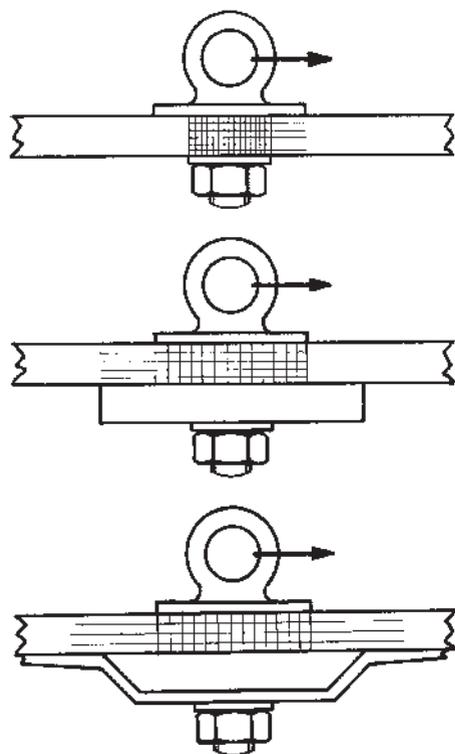


Abb. 32

Biegebeanspruchung mit zusätzlichem Schub

Die nach rechts angreifende Kraft versucht das Auge und den darunterliegenden Laminatbereich im Uhrzeigersinn zu drehen (Biegebeanspruchung durch eine Seitenkraft). Die festgezogene Mutter preßt das Laminat zusammen (Druckbeanspruchung).

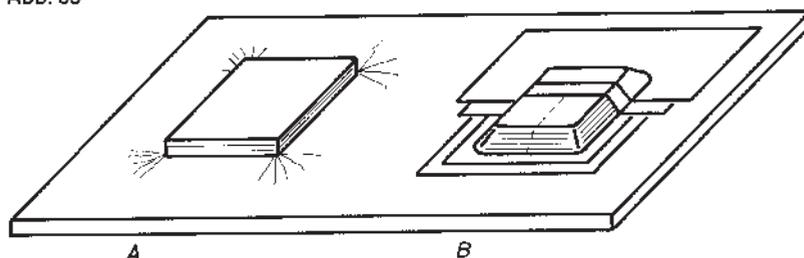
Bei Lösung A liegen der Druckbereich (senkrecht schraffiert) und der Biegebereich (waagrecht angelegt) fast genau aufeinander. Es können nur kleine Kräfte übertragen werden.

Bei B ist eine Sperrholzplatte lose untergelegt. Sie vergrößert den bei der Biegung tragenden Wandteil und verteilt auch die Druckkräfte besser. In C ist das Sperrholz zusätzlich überlaminieret. Die Biegelast wird durch das Zusatzlaminat auf eine noch größere Fläche verteilt. Diese Lösung ist werkstoffgerecht.

Häufig treten **Biegekräfte** – meist in Verbindung mit Schubbeanspruchungen – auf. Sie erfordern große Aufmerksamkeit bei der Gestaltung. Dabei wird Sperrholz gerne zur Kräfteverteilung herangezogen. Die Abb. 32 zeigt eine Lösung, die immer weiter verbessert wird. Das Problem tritt u. a. auch bei Klampen, Relingstützen usw. auf.

Befestigungsklötze für Einrichtungsgegenstände werden auf zwei zusätzliche Mattenlagen aufgesetzt und mit zwei Mattenlagen befestigt (siehe Abb. 33). Alle Hohlkehlen werden mit Spachtelmasse (Radius mindestens 10 mm) ausgerüstet, damit in der Kehle fachgerecht laminiert werden kann und bei Beanspruchung die Spannungen im Winkellaminat nicht zu groß werden.

Abb. 33



Falsch und richtig ausgeführte Befestigungspunkte

Holzteile werden am Laminat zweckmäßig mit Sperrholzklötzen befestigt. Sie erhalten wie unter B gezeigt allseitig Schrägungen zum ordnungsgemäßen Anlaminierten. Die abgerundeten Ecken vermeiden die Ausbildung sogenannter harter Stellen. Unter dem Sperrholz wird die Wand grundsätzlich mit zwei Mattenlagen verstärkt. Auf diese Weise erreicht man einen allmählichen Anstieg der Wandsteifigkeit um die Befestigungsstelle herum.

Die richtige Verstärkung hat abgerundete Ecken, die im Laminat keine Spannungsspitzen bilden. Die schrägen Flanken erleichtern das saubere Laminierten der beiden Mattenlagen zur Befestigung. Die erste Befestigungslage ist kleiner als die zweite. So sind beide für sich mit der Wandung verbunden.

Die Gestaltung von GFK-Teilen, besonders die der Kräfteinleitungen, wird in dem Moment verständlich, wenn man davon ausgeht, wie sich ein Bauteil unter der Last verformen wird. Man zeichnet es sich leicht verformt auf und erkennt sofort, wo die Stellen starker Biegung, starken Zugs und Drucks sein müssen. Man findet dann schnell heraus, welche Maßnahmen Verbesserungen schaffen.

6.3.4. Krafteinleitungselemente

Sie werden ihres Aussehens wegen auch Spinnen genannt und bestehen aus V2A, also nichtrostendem Material.

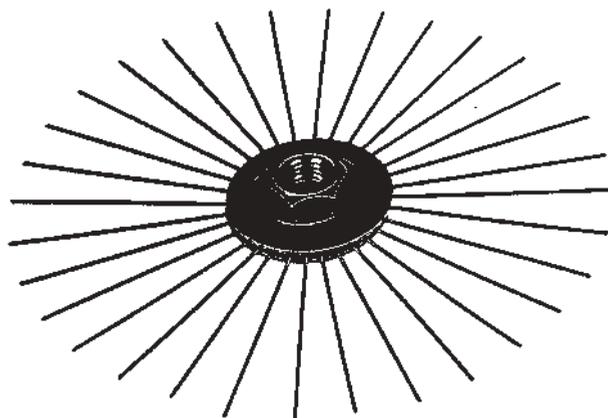
Universell verwendbar sind Elemente mit Anschweißmutter und folgenden Daten:

Gewinde der Mutter	Höhe der Mutter	Außendurchmesser
M 6	7,5 mm	140 mm
M 8	10,0 mm	180 mm

Nichtrostende Kraftunterteilungselemente mit angeschweißter Mutter

Durch die Kraftverteilung auf eine große Fläche des verstärkten Kunststoffs über die strahlenförmig angeordneten Drähte sind große Kräfte auch in dünne Lamine einleitbar.

Abb. 34



Krafteinleitungselement zum direkten Einbau in das Laminat

Solche „Spinnen“ werden während der Bauteilherstellung eingefügt und führen zu keiner nennenswerten Querschnittvergrößerung der Wand. Durch die strahlenförmig angeordneten VA-Drähte wird die eingeleitete Kraft auf eine große Angriffsfläche verteilt. Das Element trägt eine Mutter als direkten Anschluß für Verschraubungen.

7. Formenbau

Der Aufwand beim Formenbau wird sich nach der Seriengröße richten. Danach wird die Formenart und der Formenwerkstoff festgelegt. Auch die Formteilgröße und die Formteilstalt (einseitig- oder zweiseitig gekrümmt) spielt dabei eine Rolle.

Während bei den beiden handwerklichen Verfahren mit offenen, also zugänglichen Formen gearbeitet wird, sind für die Preßverfahren geschlossene, zweiteilige Formen aus einer hohlen Matrize und einer gewölbten Patrize notwendig.

Für den Serienbau beim Handverfahren werden vollflächige Negativformen verwendet. Nur für Einzelbauten werden Leistenkern-Formen mit offener Oberfläche (z. B. Stableisten-Formen im Sandwich- oder beim C-Flex-Bau) eingesetzt.

Beim Vakuum-Injektionsverfahren wird mit Matrize und Patrize gefertigt.



Offene Formen

Sie sind Voraussetzung für die handwerkliche Fertigung von GFK-Teilen. Der Verarbeiter vereinigt Verstärkungsmittel per Hand oder maschinell auf der Formoberfläche. Hier das Entlüften des Laminats mit der Scheibenrolle.

Formenart	Formenoberfläche	Formenwerkstoff	Modell	Verfahren	Glatte Seite beim Fertigteil	Bauteilgröße bis	Stückzahl	Bemerkung
offene Negativ-Hohlform, allseitig gekrümmt	vollflächig	GFK (Beton)	notwendig	Hand- und Faserspritzverfahren	außen	ca. 22 m	Serie (Einzelbau)	für Boote, Hauben, Karosserieteile
wie oben, aber mit einseitig gekrümmten Flächen nach „VOSS-METHODE“	vollflächig	GFK; Stahl; Holzmassen mit Hartfaser-Sperholz- u. Sichtbetonplatten	nicht notwendig	Hand- und Faserspritzverfahren	außen	ca. 15 m	GFK; Serie Malleform: bis 10 Stück	Knicksprantboote, Karosserieteile
offene Negativ-Kernform	vollflächig	GFK; Holz; lackiert oder GFK-überzogen; Holzmassen mit Platten (s.o.) oder mit Holzleisten, GFK-überzogen	nicht notwendig	Hand- und Faserspritzverfahren	innen	ca. 10 m	Serie	Behälter, Wannen, Schwimmbecken
Leistenkern	offen	Holzmassen evtl. mit Strakleisten	nein	Sandwichbau oder vorgefertigte Profile	keine	ca. 15 m	Einzelbauten, Kleine Serien	Boote, Wohnwagen
geschlossene Form	beide vollflächig	GFK, evtl. hinterfütert/ Alu, Stahl	notwendig	Vakuum-Injektion/ Kaltpreßverfahren, andere Preßverfahren	beide	40 m ² / 5/3 m ²	Kleine Serien/ Serien bis 10 000 (100 000)	Boote, Silos, Wohnwagen/ Bauelemente/ Gehäuse, Kästen

Formenarten zur Herstellung von GFK-Teilen

7.1. Negativ-Hohlform für den Serienbau im handwerklichen Verfahren

Diese Formen ergeben Fertigteile mit glatter Außenseite, wie z. B. Boote. Eine Seite ist dabei offen, so daß im Handverfahren Harz und Glasverstärkung eingebracht werden können.

Sie sind das übliche Werkzeug für Serienboote und werden ebenfalls aus Glas und Harz hergestellt. Gewonnen wird dieses Werkzeug für allseitig gekrümmte Formkörper durch Abformen eines Kernmodells. Günstigstenfalls kann ein vorhandenes Fertigteil als Modell verwendet werden. Seine Oberfläche muß lediglich lösungsmittelfest sein (z. B. mit DD-Lack versiegelt), damit sie den Lösungsmitteln von Trennwachs (z. B. Per) und vom Polyesterharz (Styrol) gewachsen ist.



Serienteile aus Negativ-Hohlformen

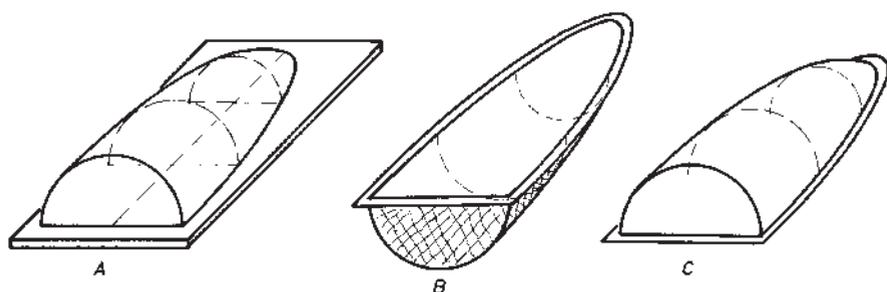
Serien-Boote werden meistens in Negativ-Hohlformen hergestellt. Das Boot weist eine glatte Außenseite auf. Entsprechend muß die Form die glatten Flächen auf der Innenseite haben.

Oft muß ein Kernmodell (Positiv) anhand einer Zeichnung gefertigt werden. Der Verfahrensablauf dabei wird später als Herstellung einer offenen Positiv-Kernform beschrieben (7.3.).

Es sind also folgende Arbeiten notwendig:

1. Bau oder Vorbereiten eines Positivkerns mit lösungsmittelbeständiger Oberfläche (glatte Seite außen).
2. Abzug einer hohlen Negativform mit glatter Seite innen.
3. Bau des Formteils (glatte Seite außen).

Abb. 35



Herstellung eines allseitig gekrümmten Fertigteils mit Hilfe einer Negativ-Hohlform

Der Urkern A erhält die gewünschte Fertigteil-Gestalt und eine glatte Außenseite. Er ist auf eine Grundplatte montiert. Auf diese Weise bekommt die Form ringsum einen Flansch.

Die Negativ-Hohlform B wird abgeformt. Sie hat eine glatte Innenseite. Der Rand ist umlaufend auf gleichmäßige Breite geschnitten. Er versteift die Form und dient als Führung zum Besäumen des Fertigteils während der Herstellung.

Das Fertigteil C hat seine glatte Seite außen. Es kann mit oder ohne Rand in der Form B gefertigt werden. Seine Gestalt und die Oberflächenqualität sind bereits durch den Kern A festgelegt.

7. 1. 1. Herstellung einer allseitig gekrümmten Negativ-Hohlform

Als Werkstoffe für die Form hat sich bei mittleren und großen Teilen GFK einen festen Platz erobert. Bei kleinen Formteilen finden auch andere Werkstoffe Verwendung.

Eine Übersicht gibt die Tabelle auf der nächsten Seite:

Werkstoff	Teilgröße ca.-Werte	Kennzeichnende Eigenschaft	Zur Herstellung von
GFK	bis 22,0 m	preiswert für Serien- bau, gute Formen- standzeit	Booten, Behältern, Hauben, Bauelementen usw.
Silikonkautschuk- Gießmasse	bis 0,5 m	Hinterscheidungen bei einteiliger Form möglich, besonders feine Abformung bei rauen Flächen, da für GFK kein Trennmittel notwendig	Reliefs, Werbe- und Dekorationsartikel
FLEXOVOSS-K 5- Gießmasse	bis 1,0 m	wie unter 2, jedoch mit Trennmitteln	wie unter 2. Das Trennmittel kann jedoch feinste Poren abdecken
FLEXOVOSS-K 6- Gießmasse	bis 1,0 m	keine Hinterscheidung möglich, mit Trennmitteln	wie unter 3.
Gips	bis 5,0 m	starre Form, lange Trocknungszeit bei großen Wandstärken. Oberfläche muß nachträglich versiegelt werden.	Reliefs, Skulpturen

Werkstoffe für offene Negativ-Hohlformen

Formenstandzeit = Zahl der Fertigteile aus einer Form

Andere Werkstoffe haben sich als Formbaumaterial nicht durchsetzen können. Bei der Herstellung einer GFK-Form verfährt man folgendermaßen:

1. Modell auf eine Platte spannen, so erhält die Form einen Rand als Führung beim Besäumen des Fertigteils. Die Modelloberfläche wird auf Lösungsmittelbeständigkeit geprüft, ggf. mit DD-Lack versiegelt. Fünf bis sieben verschiedenfarbige Aufträge (zur Kontrolle) mit Zwischenschleifen ergeben einwandfrei glänzende Oberflächen. DD-Lack acht Tage aushärten lassen oder tempnen.



Motorrad- verkleidung

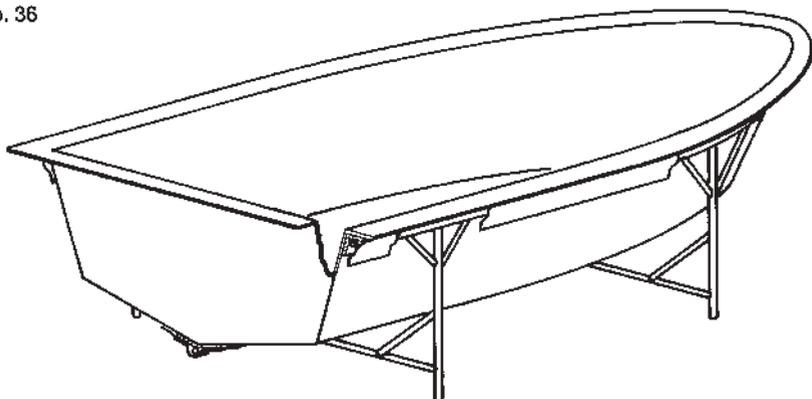
Zunächst ist ein Holzkern hergestellt worden. Davon wurde die Negativ-Hohlform abgenommen und darin die Verkleidung gefertigt.

2. Zwei bis dreimal Trennwachs auftragen und jedesmal gründlich auspolieren, zusätzlich Trennlackauftrag (nicht polieren!).
3. Herstellung der GFK-Form aus chemikalienbeständiger Formbau-Feinschicht G 341 B einer Lage spinngeteilter Glasmatte 300 g/m^2 + Harz W 35 B zwei Lagen normaler Glasmatte 450 g/m^2 + Harz W 35 B oder AZUR als vierte Glaslage Rovinggewebe 670 g/m^2 + Harz W 35 oder AZUR Matten und Gewebe im Wechsel, bis Sollstärke erreicht ist Schlußanstrich mit LT- oder DD-Lack

Bevor die Formenaußenseite mit LT-Lack oder DD-Lack klebfrei gemacht wird, sind bei größeren Formen die Verstärkungen und Aufhängungen anzubauen. Die offene Formenseite muß bei Formen ab 4 m Länge sorgfältig abgestützt werden, meistens durch einen Stahlrohrrahmen. Die Form selbst erhält stets einen Flansch als Bezugskante beim Besäumen. Bei allseitig gekrümmten Formen (z. B. für Rundspantboote) ab 5 m Länge wird zusätzlich ein Stahlrohr längs des Kiels antapeziert. Kiel- und Randverstärkung werden mit Spanten (Abstand 2 bis 4 m) untereinander verbunden, die unten als Füße ausgebildet sind. Für schwere Formen wird man in Abständen von etwa 0,6 m zusätzliche Längsversteifungen vorsehen, die sich auf den Spanten abstützen.

Um das Versteifungsrohr nicht als „harten Kern“ einer Verstärkung, gemäß Abb. 2.5. wirken zu lassen, werden zwischen Formenaußenseite und anliegenden Rohren Schaumstoffstreifen gelegt, ehe die Mattenbahnen zur Befestigung auftapeziert werden.

Abb. 36



Verstärken einer GFK-Form mit Metallrohren

Die offene Seite von Formen ab 4 m Länge wird mit einem Stahlrohrrahmen versteift. Größere Formen erhalten ein Rohr zusätzlich längs der Mittellinie. Eventuell werden auch zusätzliche Längsversteifungen unter dem Formenboden angebaut. Die Formsantennen werden nicht direkt an der Form, sondern nur an den Stringern befestigt und gleichzeitig als Füße ausgebildet.

Geteilte Formen für Bauteile über 500 kg Gewicht, 8 m Länge oder mit mehr als 4 m abgewickelter Breite, müssen besonders gut ausgesteift werden. Sie erhalten Fußformen, die sie aufrecht und in Arbeitslagen sicher halten. Beide Formhälften müssen für den Zusammenbau des GFK-Körpers genau fixierbar sein durch Stifte und Führungen.

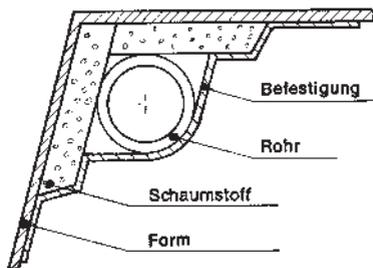
Im geteilten und im montierten Zustand muß die Form genau ausgefluchtet werden. Für diese Arbeit sind Markierungspunkte vorzusehen.

Sehr große und schwere Bauteile werden wieder in einem Stück, jedoch in einer teilbaren Form gebaut. Hier ermöglicht die Teilung ein leichteres Entformen. Eine solche Form kann z. B. auch durch eine zu geringe Werkstatthöhe notwendig werden. Große Formteile in einem Stück müssen in fest-

Abb. 37

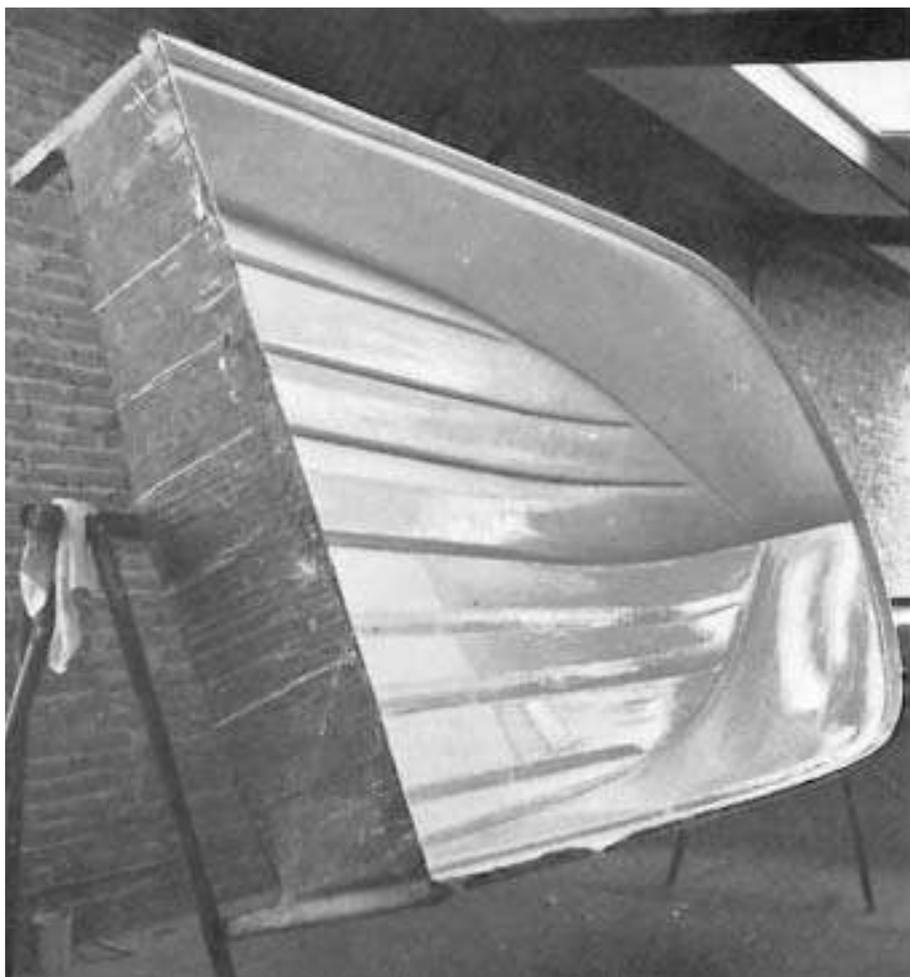
Befestigen von Verstärkungsrohren in einer Form

Um einen „harten Kern“ zu vermeiden, werden die starren Röhre nicht direkt gegen die Form tapeziert. Man baut vielmehr Schaumstoffstreifen zwischen Formwand und Verstärkung. Der S-förmige Querschnitt der Befestigung aus zwei Lagen Glasmatte ist beabsichtigt. Schrumpft dieses Laminat, so verändert es den Formwinkel nicht.



stehenden (nicht drehbaren) Formen von einer Stellage aus gefertigt werden. Diese Stellage wird in die Form eingehängt.

Einteilige Formen bis zu 5,5 m Länge werden zur Arbeitserleichterung drehbar gelagert durch Zapfen an den Enden. Große Formen werden mit kreisförmigen Mallen ausgerüstet und sind dann ebenfalls drehbar (17).



Drehbare GFK-Negativform

Zur Arbeitserleichterung ist die Form an den Enden mit Rohrstummeln versehen, die auf Böcken gelagert werden. Die Form ist dann schwenkbar, so daß aufrechtstehend daran gearbeitet werden kann. Außerdem fließen die Styroidämpfe aus der Form ab und beeinträchtigen die Aushärtung der Feinschicht nicht.

7.2. Negativ-Hohlformen mit planen oder einseitig gekrümmten Flächen für handwerkliche Verfahren

Diese Hohlformen für GFK-Teile mit glatter Außenseite können ohne Kernmodell gebaut werden und vermindern dadurch die Vorkosten so erheblich, daß der Bau nur eines Fertigteils bereits rentabel sein kann. Die Tabelle unter 7.1. nennt die möglichen Baustoffe für diese Formenart. Kleine Formen mit planen Flächen werden zweckmäßig aus beschichteten Platten (Resopal, Sichtbetonschalung) oder Blechen zusammengesetzt.

Einseitig gekrümmte und größere plane Formen werden mit sog. (Außen-) Mallen hergestellt. Die Mallen werden auf dem Hellingbrett montiert und innen mit einigen Strak-Leisten ausgerüstet, an denen die Auskleidungsplatten befestigt sind (VOSS-Methode). Bei pfleglicher Behandlung können bis zu 10 Boote aus einer Form mit Sichtbeton-Schalung gezogen werden.

Beschichtete Platten, wie z. B. Sichtbeton-Schalung, haben den Vorteil, daß ihre Oberfläche schon recht glatt ist. Man arbeitet sie in der Regel nicht nach. Statt dessen wird besser das Fertigteil (Boot) nachpoliert.

Saugfähige Platten wie z. B. Hartfaser oder Sperrholz müssen mit DD-Lack geschlossen werden. Es führen nur mehrere Farbaufträge mit Zwischenschleifen zum Ziel. Metallplatten als Form werden poliert, ggf. verchromt. Sie ergeben die besten Oberflächen und sehr hohe Formenstandzeiten.



Einzelbauten aus einer Negativ-Plattenform

Die Rohschale des 9,25 m langen Motorkreuzers V 910 ist in einer Negativ-Form mit Sichtbeton-Schalungsplatten hergestellt worden. Bei pfleglicher Behandlung können in einer solchen Form bis zu 10 Boote gefertigt werden. Durch die Platten bedingt, besitzen diese Bootstypen nur in einer Richtung gekrümmte Flächen (Knicksant-Boote).



Katamaran aus einer Negativ-Plattenform

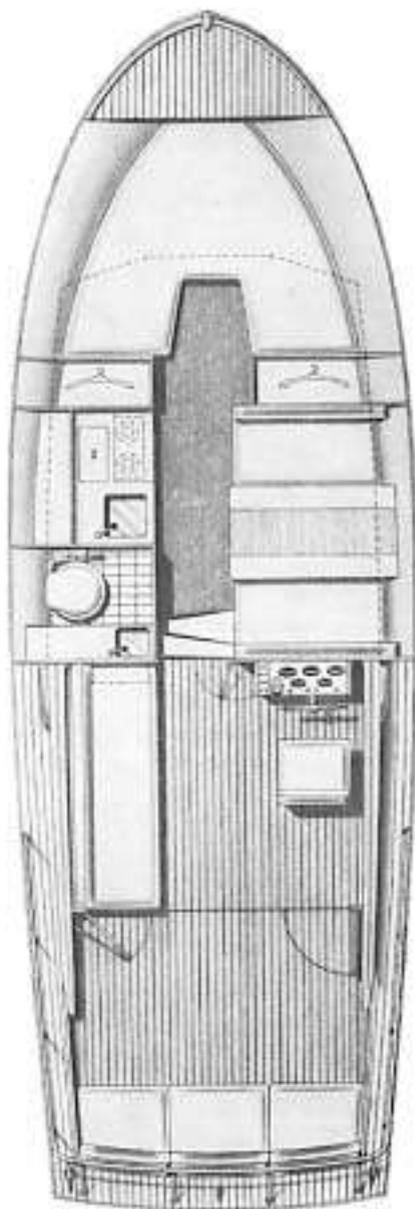
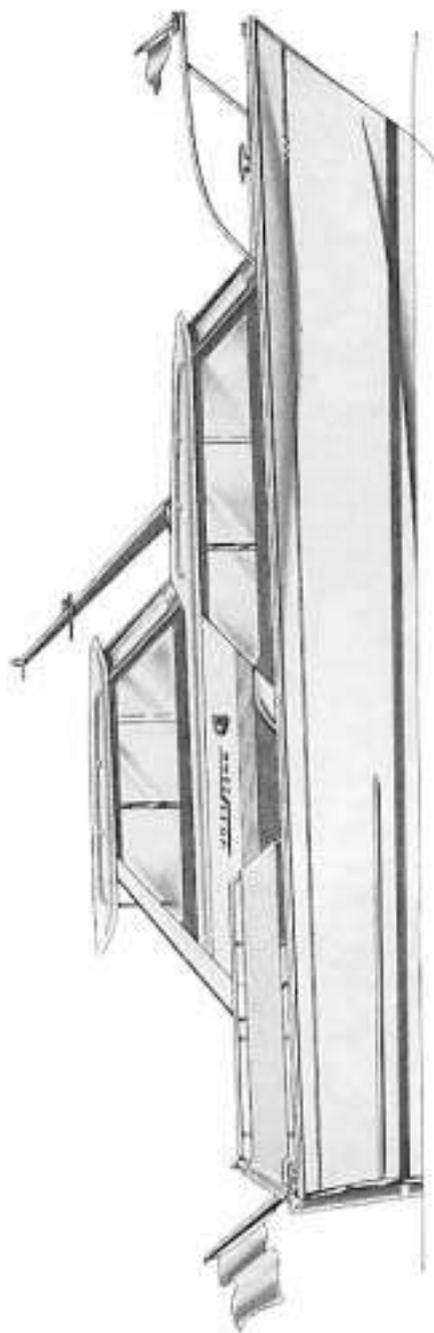
Das Beispiel eines 16 m langen und 7 m breiten Katamarans aus GFK beweist, daß auch große Einzelteile mit den kostengünstigen Plattenformen herstellbar sind. Das Fahrzeug wurde von zwei Selbstbauern in 2.500 Arbeitsstunden gefertigt. Beide Schwimmer entstammen derselben Form.

Boote aus Negativ-Plattenformen

Mit dieser Formenbauart sind auch Einzelteile rentabel herstellbar. Selbstbau „NAUTICUS 2“ u. „V 910“ (siehe nächstes Bild).



„Motorkreuzer V 910“



7. 2. 1. Bau einer Plattenform (VOSS-Methode)

Es wird der Verfahrensablauf beim Bau einer Negativ-Hohlform für einen Rumpf (glatte Seite innen) beschrieben, die sich für Knickspant-Boote im Selbstbau bis zu 10 m Länge bewährt hat. Die Mallen für verschiedene Bootstypen sind von der VOSSCHEMIE lieferbar.

Als Helling dient ein Brett von 10 cm · 2 cm Querschnitt, auf das die Abstände der Spanten laut Bauplan und ihre Dicke von 2 cm aufgezeichnet werden. An jeder Markierung wird ein Holzklötz aufgelegt und vernagelt, der das Mall hält. Das vorgefertigte Stevenholz wird direkt auf der Helling befestigt.

Zunächst werden nur je eine Kimmleiste aufgeheftet. Dann werden die Mallen mit Lot und Wasserwaage senkrecht gestellt und mit einem Winkel auf ihre rechtwinklige Stellung zur Helling hin kontrolliert. Die übrigen Längsleisten werden unter ständiger Kontrolle der Mallen eingehaftet und aufgenagelt. Die Leisten müssen astfrei sein, damit sie eine knickfreie (strakende) Kurve ergeben. Der Strak wird dann durch Unterfüttern der Leiste oder eine Ausnehmung am Mall korrigiert. Bei starken Rundungen (z. B. im vorderen Bereich) halten Schraubzwingen die Leisten bis zur endgültigen Befestigung. Nach einer Schlußkontrolle werden zunächst die beiden Bodenplatten aus Hartfaser- oder Sichtbetonplatten in die Form eingelegt und durch 2 cm lange gestauchte Stifte alle 10 cm befestigt. Die Bodenplatten werden auf dem letzten Mall auf jeder Hälfte zusätzlich befestigt. Der Hohlraum zwischen Platte und Mall wird dabei mit einem Stück Strakleiste aufgefüllt. Dann folgen die Seiten- und die Spiegelplatte.

Offenstehende Fugen werden später durch die Ausrundung mit Spachtelmasse verschlossen. Im Vorschiff stehen die beiden oberen Leisten etwas über das Mall hinaus. Dieser Überstand wird abgehobelt. Dann wird für den Verbindungsflansch ein Randstreifen auf die oberen Leisten und die Mall-Oberseiten aufgenagelt. Alle Platten müssen gut befestigt und alle Nagelköpfe versenkt sein. Dann werden im Kimm- und Kielbereich die Plattenstöße mit Polyesterspachtelmasse ausgerundet. Dabei sollte ein Radius von 4 cm nicht unterschritten werden (Bierflasche). Nur die Spiegelunterkante bleibt möglichst scharf (besserer Wasserablauf beim Boot). Die gespachtelten Flächen (auch über den Nagelköpfen) werden sorgfältig durchgeschliffen. Dann folgen bei Hartfaser- und Sperrholzplatten die DD-Lack-schichten. Betonschalungsplatten können unlackiert bleiben. Dem Ausrichten der Form ist größte Aufmerksamkeit zu schenken. Steht die Form schief, so erhält man auch kein ordnungsgemäßes Werkstück.

Baukasten für ein Motorboot

Der Baukasten für das Boot Cursor 3,5 m · 1,5 m der VOSSCHEMIE umfaßt die Mallenform mit Hartfaserplatten und das Kunststoff-Baumaterial einschließlich aller Werkzeuge.



Mallensatz

Die Mallen für den Bootstyp „NAUTICUS 1“ einschließlich des Stévenholzes sind versandfertig zusammengeheftet.

Hellingbrett mit Distanzkittzen

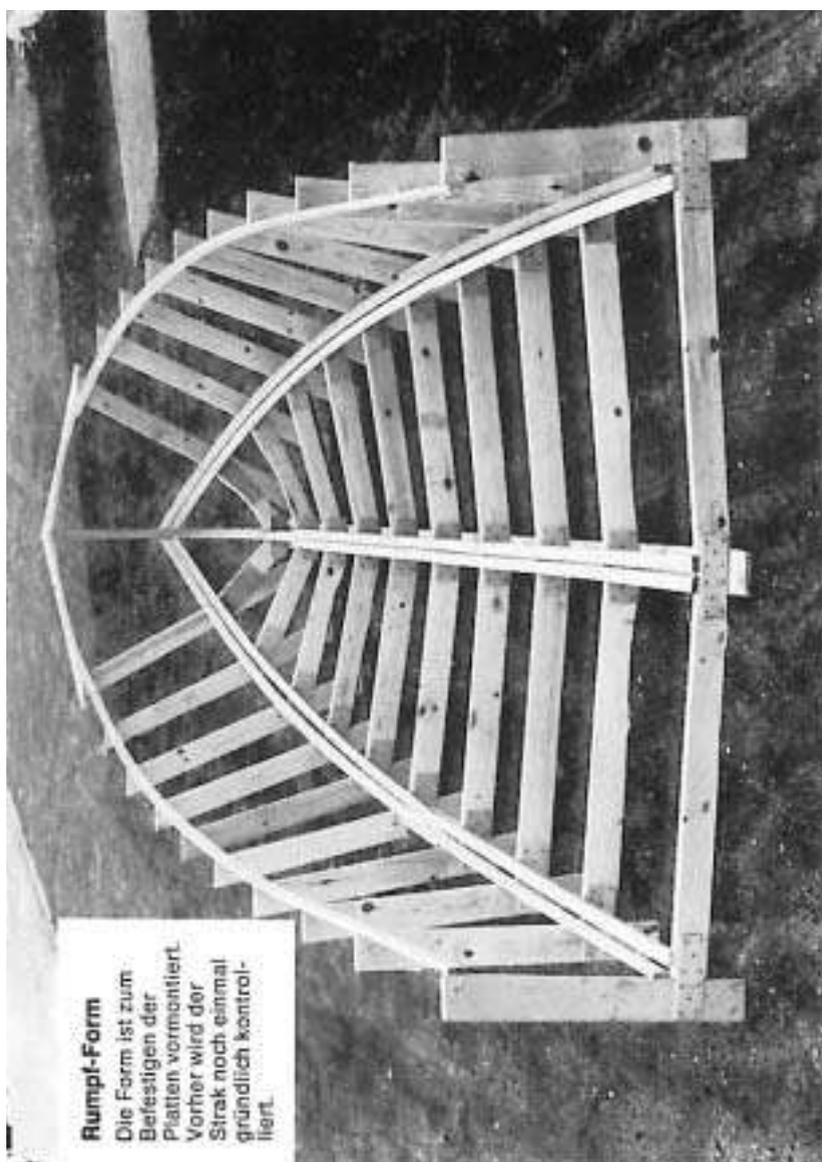
Hier wird das Fundament für eine Mauerform gegelgt. Das Hellingbrett wird mit den Kittzen zur Befestigung der Malleu ausgerüstet.





Montage der Strakleisten in der Mallenform

Die Strakleisten der Negativform für „NAUTICUS 2“ werden ausgerichtet und aufgeschraubt. Im mittleren und hinteren Bootsbereich mit weniger Krümmung können die Leisten genagelt werden. Der erste Spant im Vordergrund ist ausgenommen, damit die Bodenplatte nicht aufstößt. An dieser Stelle krümmt sich die Platte allseitig. Das Stevenholz ist beim Ausrichten unterfüttert worden.



Einlegen der Bodenplatte

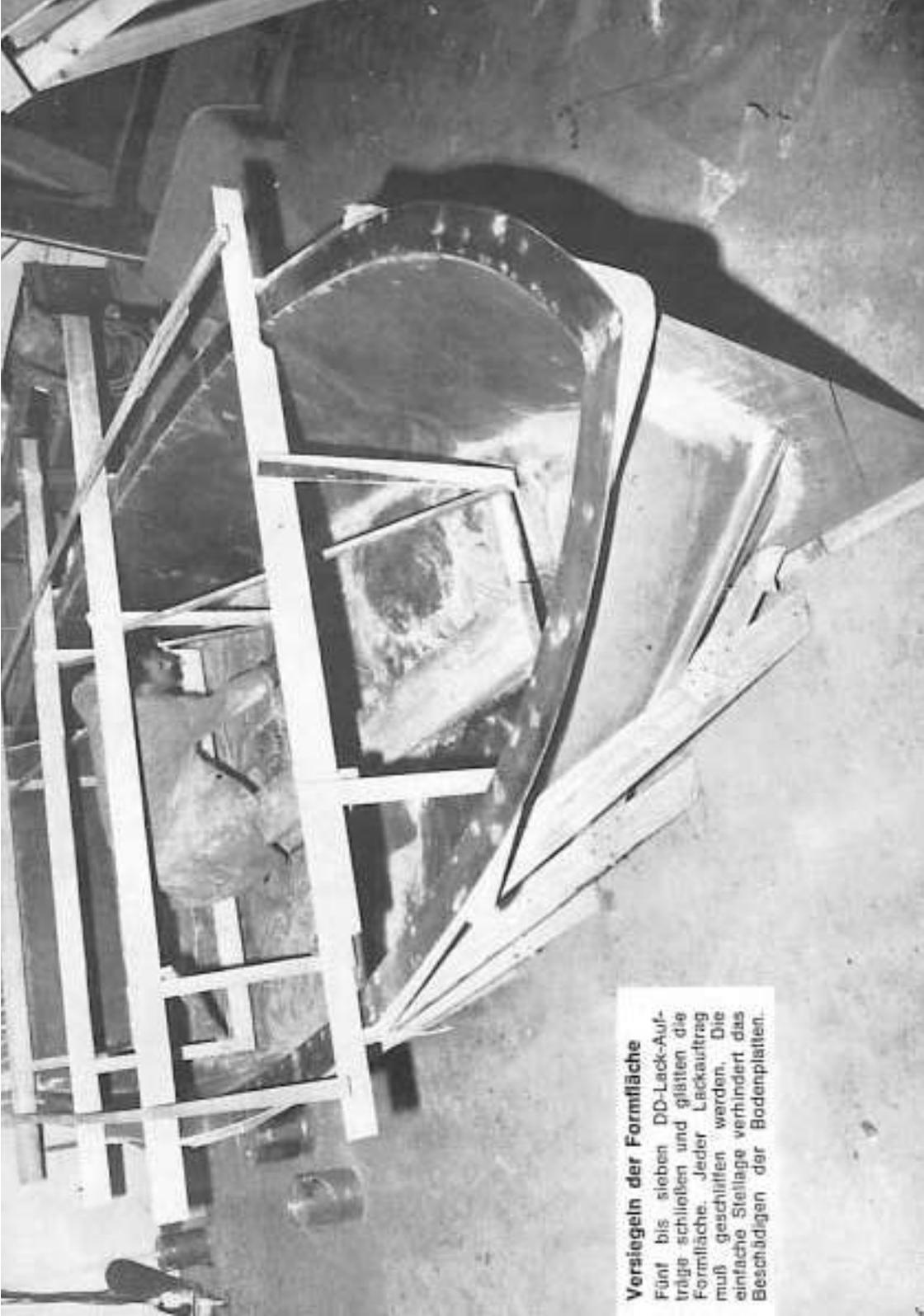
Die Platte wird mit Nägeln an den Strakleisten befestigt. Stöße und Kanten werden mit Polyester-Spachtelmasse gefüllt und gerundet. Man verwendet einfache oder ölgehartete Hartfaserplatten, Sperrholz oder Sichtbeton-Schalungsplatten sind ebenfalls geeignet.





Auspachteln einer Plattenform

Polyesterspachtelmasse wird zum Füllen und Ausrunden der Plattenstöße und Kanten eingesetzt. Je größer die Radien ausgebildet werden, desto leichter wird das Trennen der Verstärkungen mit Harz.

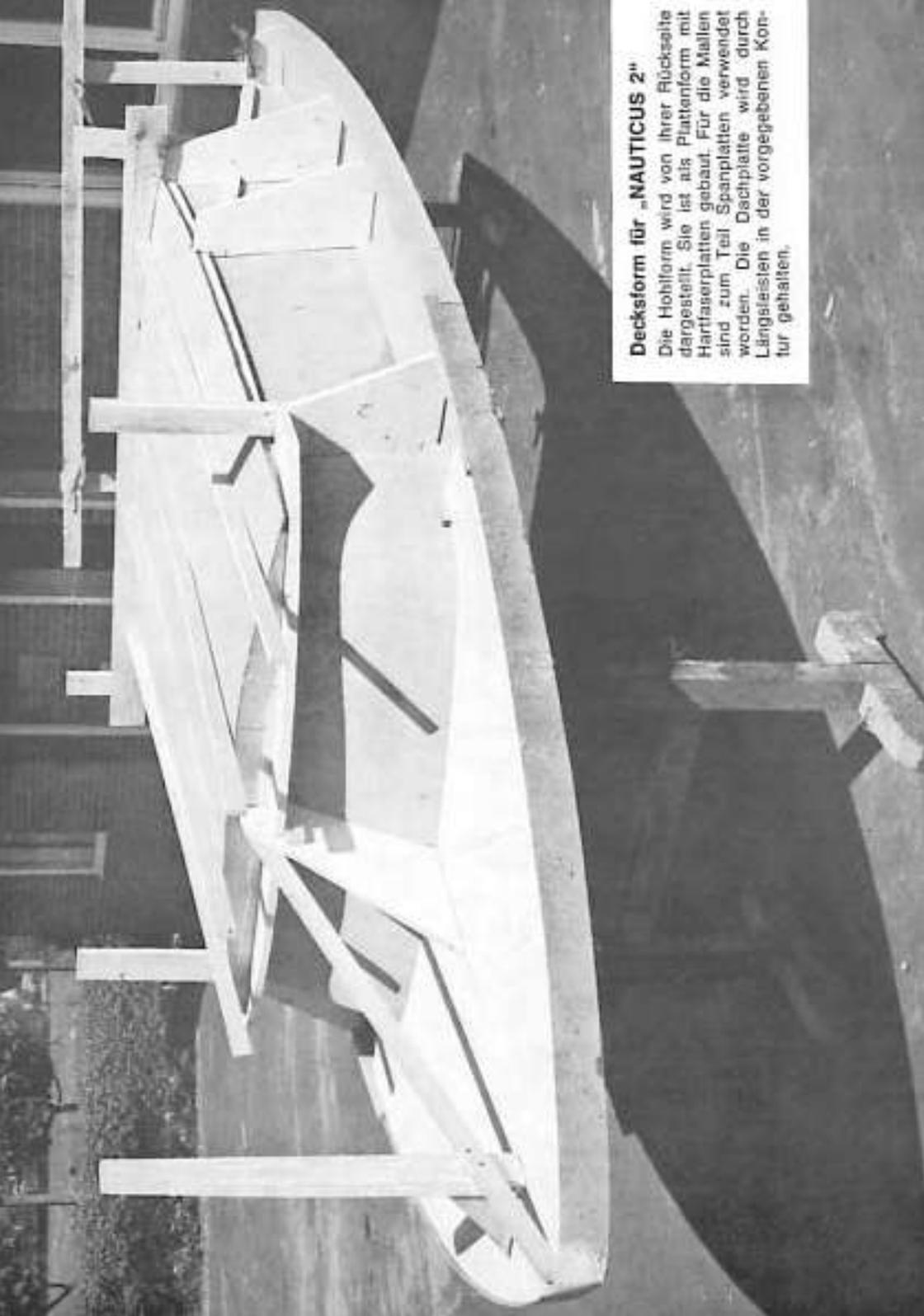


Versiegeln der Formfläche

Fünf bis sieben DD-Lack-Auflagen schließen und glätten die Formfläche. Jeder Lackauftrag muß geschliffen werden. Die einfache Stellege verhindert das Beschädigen der Bodenplatten.

Decksform für „NAUTICUS 2“

Die Hohlform wird von ihrer Rückseite dargestellt. Sie ist als Plattenform mit Hartfaserplatten gebaut. Für die Miallen sind zum Teil Spanplatten verwendet worden. Die Dichtplatte wird durch Längsleisten in der vorgegebenen Kon-
tur gehalten.



7.3. Negativ-Kernformen für handwerkliche Verfahren

Behälter, Wannen und Schwimmbecken z. B. haben eine glatte Innenseite. Sie werden auf einer Kernform hergestellt, die außen glatt ist. Für Kernformen mit planen und einseitig gekrümmten Flächen gelten die Hinweise unter 7.2. Für Kerne von Hohlformen nach 7.1. und für vollflächige Kernformen zur Produktion kleiner Fertigungsstückzahlen sind folgende Werkstoffe geeignet:

Vollholz, wobei die Weichhölzer wegen der schnelleren Bearbeitbarkeit vorgezogen werden. Auf Balsaholz wird wegen der geringen Quellung unter Feuchtigkeitseinfluß besonders hingewiesen. Größere Modellkerne und Kernformen werden durch eine Beschichtung mit ein oder zwei Lagen Glasmatte Polyesterharz „ruhig gestellt“. Das Laminat wird mit Polyesterspachtel egalisiert und dann mit DD-Lack auf die gewünschte Oberflächengüte gebracht. Holzkerne müssen auch auf der Innenseite mit einem Kunstharzlack versiegelt werden, um eine Bewegung durch wechselnde Luftfeuchtigkeit so gut wie möglich zu verhindern.

Folgende Arbeiten sind bei der Kernherstellung durchzuführen:

1. Herstellen der Mallen aus gelaschten Brettern nach den vorgegebenen Maßen,
2. Montage und Ausrichten der Mallen auf einer Helling (z. Brett oder Grundplatte),
3. Bepflanzen der Mallen mit astfreien Leisten, möglichst ohne Stöße,
4. Hobeln des Kerns,
5. Auftragen des Haftvermittlers G 4,
6. Auftrag von AZUR-Harz innerhalb von 4 Stunden,
7. Auflaminieren von ein oder zwei Lagen 300-g-Matte, spinngeteilt, mit AZUR-Harz,
8. Egalisieren mit Polyesterspachtel FERRO-FIX, evtl. zweimal,
9. Auftragen von DD-Lack, fünf bis sieben Gänge mit Zwischenschleifen.

Schäume auf Polyurethan-Basis mit Raumgewichten ab 40 kg/m^3 für kleine Einheiten sind besonders leicht zu bearbeiten. Ihre Oberflächenhärte und -struktur wird ebenfalls mit Polyesterspachtelmasse und DD-Lack so verbessert, daß brauchbare Musterstücke hergestellt werden können.

Gips, Zellulose- oder Polyesterspachtel. Gips ist billig, Zellulosespachtel leichter schleifbar als Gips. Am schnellsten kann Polyesterspachtel nachgearbeitet werden (Wartezeit nur 20 Minuten). Alle Füllmassen werden zweckmäßig mit DD-Lack versiegelt. Große Gipskerne werden ebenfalls mit

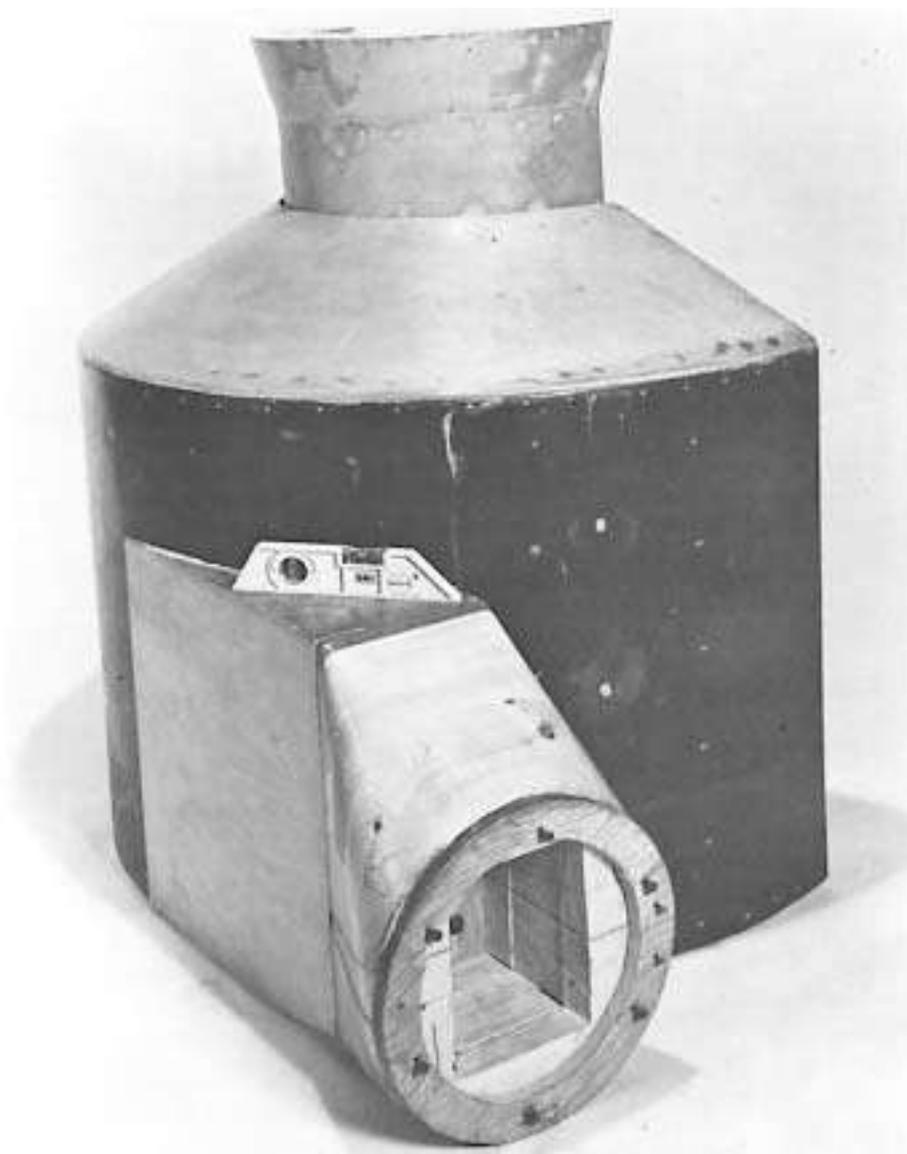
Hilfe eines Mallensystems hergestellt. Dabei kann folgende Arbeitsmethode gewählt werden:

1. Auf die ausgerichteten Mallen wird Jutegewebe aufgenagelt.
2. Darüber werden Leisten geheftet. Bis 5 m Kernlänge genügen als Leistungsquerschnitt $2\text{ cm} \cdot 2\text{ cm}$, bei längeren Kernen $2\text{ cm} \cdot 3\text{ cm}$.
Die Leisten haben untereinander maximal 20 cm Abstand, in Rundungen weniger. Sie dienen als Führung beim Aufziehen des Gipses.
3. Der Gips wird aufgezogen.
4. Die Leisten werden entfernt, und ihre Fugen werden ebenfalls vergipst.
5. Feinspachteln mit Zellulose-Spachtel. Er läßt sich leichter schleifen als die Gipsoberfläche.



Formteil von einer Negativ-Kernform

Der Behälter wurde in zwei Hälften hergestellt, dann zusammengebaut und mit den beiden Versteifungsringen versehen. Die beiden Flanschen wurden mit anlaminiert. Der obere Einlauf ist separat gefertigt und nachträglich antapeziert worden.



Kernform für einen Behälter

Die Form ist als Halbmodell mit abnehmbaren Kernen für die Anschlußstutzen gefertigt. So konnten Vorder- und Rückseite auf einem Modell hergestellt werden. Der Anschlußstutzen wird zur Entformung am Kreisübergang zerlegt.

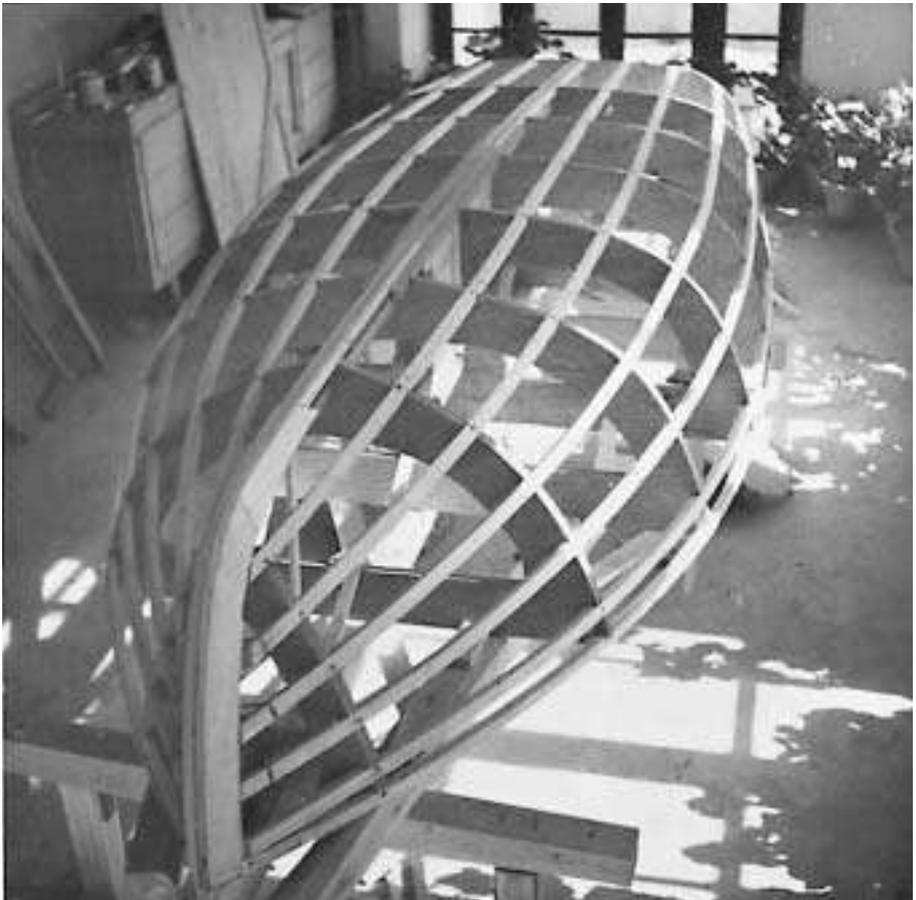


Rückseite der Kernform

Das Kerngerüst besteht aus Leisten und Füllstücken aus Vollholz. Der trichterförmige Teil oben ist in Sperrholz, Mantel und Bogen sind in Hartfaserplatten ausgeführt.

7. 4. Leistenkern für handwerkliche Verfahren

Es handelt sich dabei um die Mollenbauweise, jedoch nicht vollflächig, sondern nur mit einzelnen Strakleisten aus Holz (ähnlich der Vorarbeit beim Gipskern) oder aus polyestergehärteten Rovingstrangstäben beplankt. Auf den ersten Blick erscheint diese Formenart lediglich für Einzelbauten ge-



Leistenkern für ein Boot

Leistenkerne sind für Sandwichbauten mit Schaumplatten üblich. Die Schaumplatten werden auf dem Kern befestigt und mit der äußeren Deckschicht aus Glas und Harz versehen. Dann wird die Form umgedreht und herausgeschoben. Anschließend werden die Schaumplatten mit der inneren Deckschicht versehen.

eignet. Tatsächlich werden auch kleine Serien größerer Boote auf diese Weise hergestellt. Die Vorteile dieser Bauweise sind:

- a) Geringe Kernkosten,
- b) leichte Fertigteile durch Sandwichbau,
- c) schnelle und preisgünstige Änderungen an der Form.

Pos. c) spielt bei häufigem Modellwechsel eine ausschlaggebende Rolle: Man denke an Regatta-Schiffe, Versuchsbauten, Prototypen.

Die Kernform mit hölzernen Strakleisten wird meistens in Verbindung mit der Sandwichbauweise gewählt. Den (evtl. bei 90 °C vorgebogenen) PVC-Schaumplatten dient der Kern als Heftunterlage, bis die Platten-Außenseite mit der äußeren Deckschicht aus Glas + Harz hergestellt ist. Dann wird der halbfertige Formkörper gedreht, der Kern herausgelöst und die Platteninnenseite mit Glas + Harz beschichtet (innere Deckschicht). Die Außenhaut wird mit Spachtel usw. nachgearbeitet. Ist keine Sandwich-Konstruktion geplant, so kann man mit polyestergehärteten Rovingstäben als Strakleisten auch einen vollwandigen GFK-Körper herstellen.

In Gestalt des Materials „C-Flex“ wird ein für diese Bauweise geeigneter Werkstoff angeboten. Auf dem deutschen Markt ist dieser Werkstoff neu. C-Flex ist lieferbar als 30 cm breite Bahn aus 25 vorgetränkten, als Flachstab von 2 mm · 4 mm geformten Rovingstäben, zwischen zwei leichten Glasgeweben eingebunden. Die Räume zwischen benachbarten Stäben von etwa 8 mm sind mit ungetränktem Rovingstrang ausgefüllt.

Die Mallen werden mit C-Flex-Bändern bespannt. Dabei sorgen die vorgetränkten Rovingstäbe für eine strakende Kontur. Die Vervollständigung der Bauteilwandung wird mit Matten und Geweben in üblicher Weise vorgenommen. Der kleinste Biegeradius beträgt etwa 60 cm, das Bahnenmaß 76 m Länge und 0,30 m Breite. Das C-Flex-Band wird nach dem Auflegen auf die Form mit Fell- und Scheibenrolle mit Harz imprägniert und entlüftet.

Ähnlich der Bauweise mit C-Flex als strakendem Bauelement können auch PVC-Rohre benutzt werden (RFK-Technologie).

7.5. Formen für das Kaltpreßverfahren

Im Gegensatz zu den Formen für Handverfahren, die lediglich das Eigen- und das Fertigteilgewicht tragen müssen, werden Kaltpreßformen mit Drücken bis zu 10 kp/cm² beaufschlagt. Die Kunststoff-Schalen müssen deshalb entsprechend hinterfütert werden und außerdem mit einem Spannrahmen und mit Führungsstiften ausgerüstet sein. Die Preßformen bestehen aus Matrize (hohler Teil) und Patrizen (gewölbter Teil). Preßteile erhalten also beidseitig glatte Oberflächen. Trotzdem spricht man auch hier von der Sichtseite, die von einem Modell abgenommen wird.

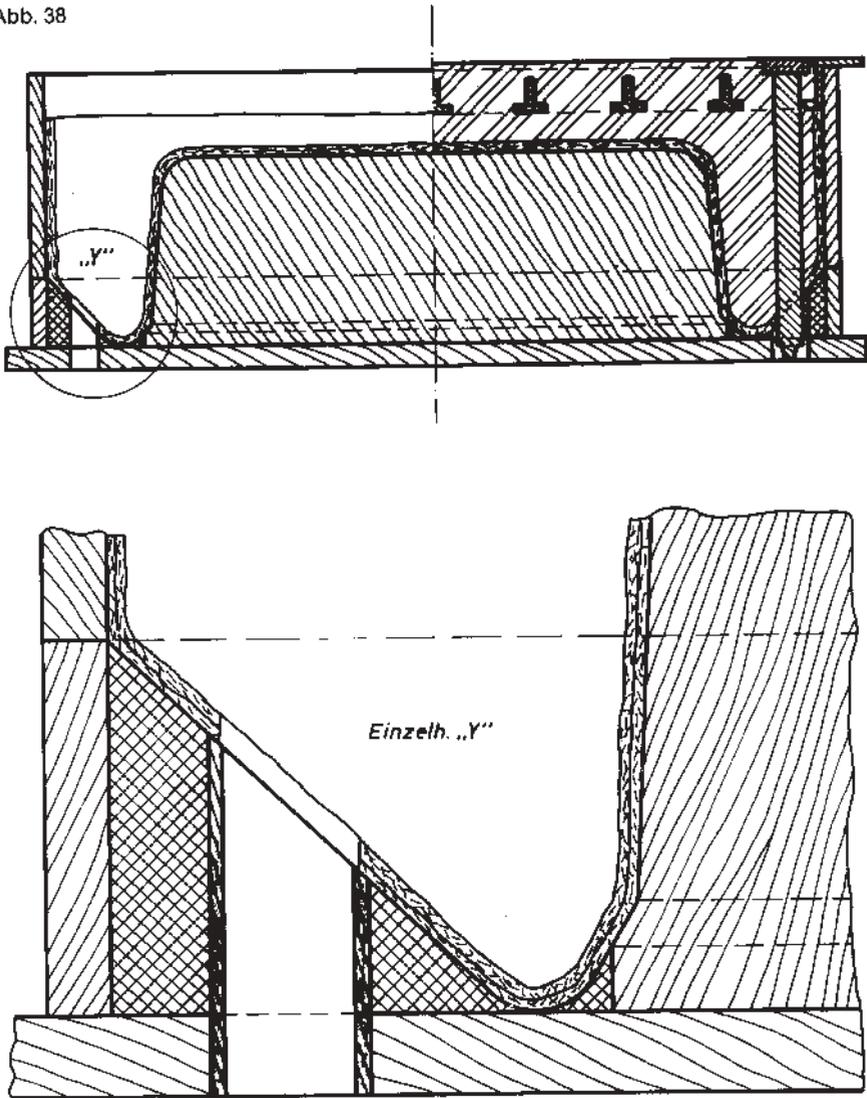
Geringe Werkzeugkosten und das gute Isolationsvermögen machen Kunststoffe zu einem idealen Material für Formen zum Kaltpressen von GFK, für Formkörper aus Polyurethan-Schäumen und – in einteiliger Ausführung – als Werkzeug für das Tiefziehen unter Vakuum von Thermoplasten.

7.5.1. Bau einer Kaltpreß-Form (18)

Als Modell kann ein Positiv (billiger in der Herstellung) oder ein Negativ (genauer in der Abformung) benutzt werden.

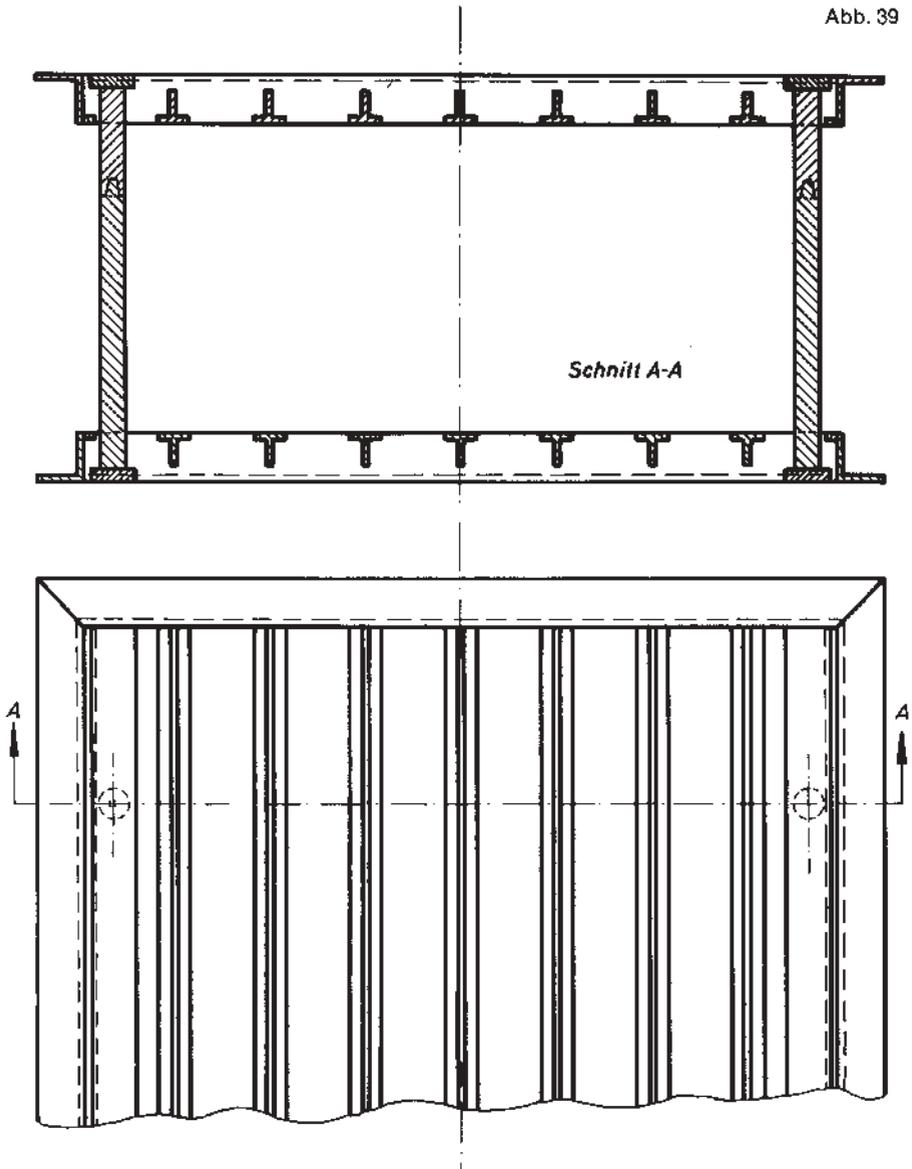
- a) Das Positiv-Modell wird auf einer Grundplatte fixiert. Darauf wird ein Hilfsrahmen gesetzt, dessen Höhe auch die Matrizen-Höhe festlegt. Die Innenkante zwischen Modellplatte und Hilfsrahmen wird mit Spachtelmasse so aufgefüttert, daß das Werkzeug eine Quetschkante erhält (siehe Einzelheit Y der Abb. 38).
- b) Dann wird ein Profilrahmen mit Längsprofilen innen und Distanzstiften vorbereitet (siehe Abb. 39), der in den Hilfsrahmen, zur Montage eingehängt wird.
- c) Auf das Modell, die Spachtelung und die Hilfsschalung – alle mit Trennmitteln behandelt – wird als erstes eine hoch chemikalienbeständige Feinschicht (z. B. G 341 der VOSSCHEMIE) aufgetragen. Auf die angehärtete erste Schicht wird eine zweite aufgetragen, so daß die Feinschichtdecke insgesamt 1 mm beträgt.
- d) Etwa eine Stunde später folgen dann zwei Lagen spinneteilter 300-g-Matte mit thixotropem Standardharz, dem 20 Gewichtsteile K 26 zuge-mischt wurden (Aushärtung mit Bp-Härter). Ist die Harzfläche klebfrei, so werden die Öffnungen für die Distanzstifte eingelassen.
- e) Dann folgt eine Spachtelmasse, die drei bis fünf Millimeter dick aufgetragen wird.
Diese Spachtelmasse kann durch Auffüllen von Epoxid- oder Polyesterharzen mit feinem Quarzsand, unter Verwendung von wenig Thixotrophiepulver, selbst hergestellt werden.
- f) Danach wird die erste Stahlrahmenhälfte in den Hilfskasten eingesetzt. Sind große Rückzugskräfte zu erwarten, so werden an den Enden umgebogene Thorstähle über die Verstrebungen des Rahmens gehängt.
- g) Als Hinterfütterung dient eine Mischung aus Epoxid- oder Polyesterharz mit großen Anteilen an Quarzmehl und -sand sowie Glaskurzfasern zur Verstärkung.
Zunächst werden die Flüssigkeiten sorgfältig untereinander gemischt, dann werden die Feststoffe zugegeben. Eingefärbtes Harz erleichtert die Kontrolle der einwandfreien Harzverteilung.

Abb. 38



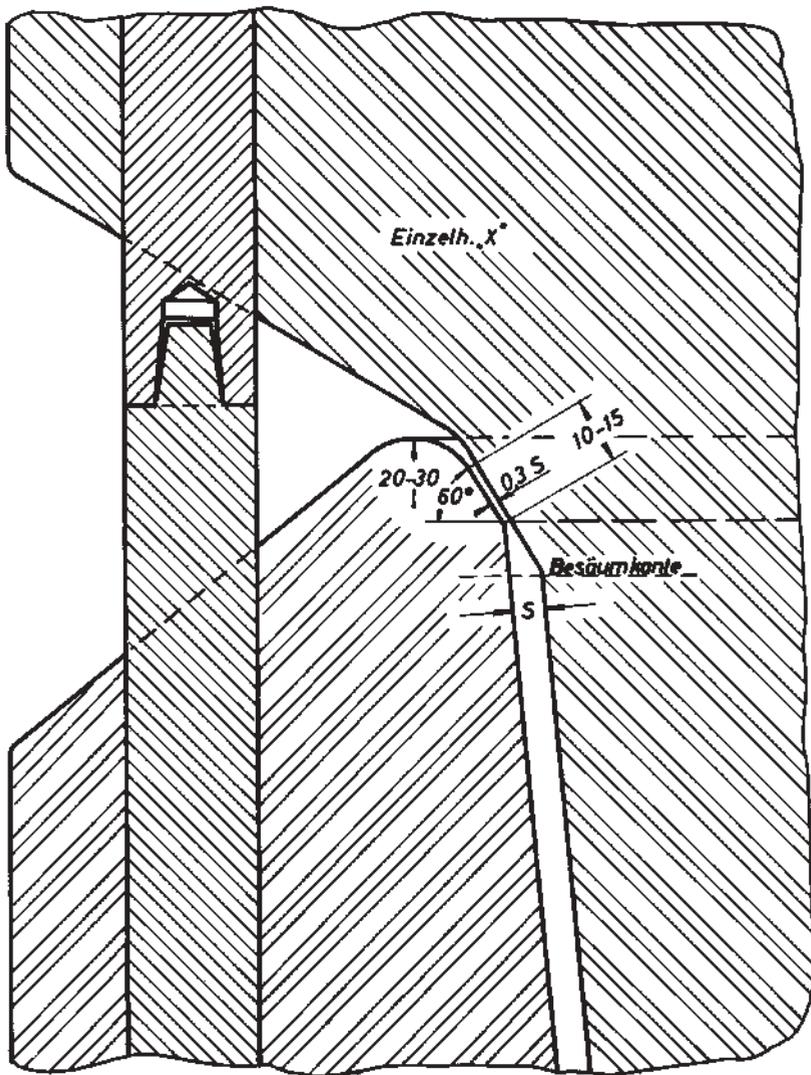
Kaltpreß-Werkzeug, Herstellung der Matrize (18)

Das Modell ist auf eine Platte gespannt und mit einem Hilfsrahmen versehen (oben links). Die Einzelheit „Y“ wird die Quetschkante des Werkzeugs. Sie wird mit Plastilin zwischen Modellrand und dem aufgesetzten Hilfsrahmen gestaltet und bei der Matrizen-Herstellung mit abgeformt.



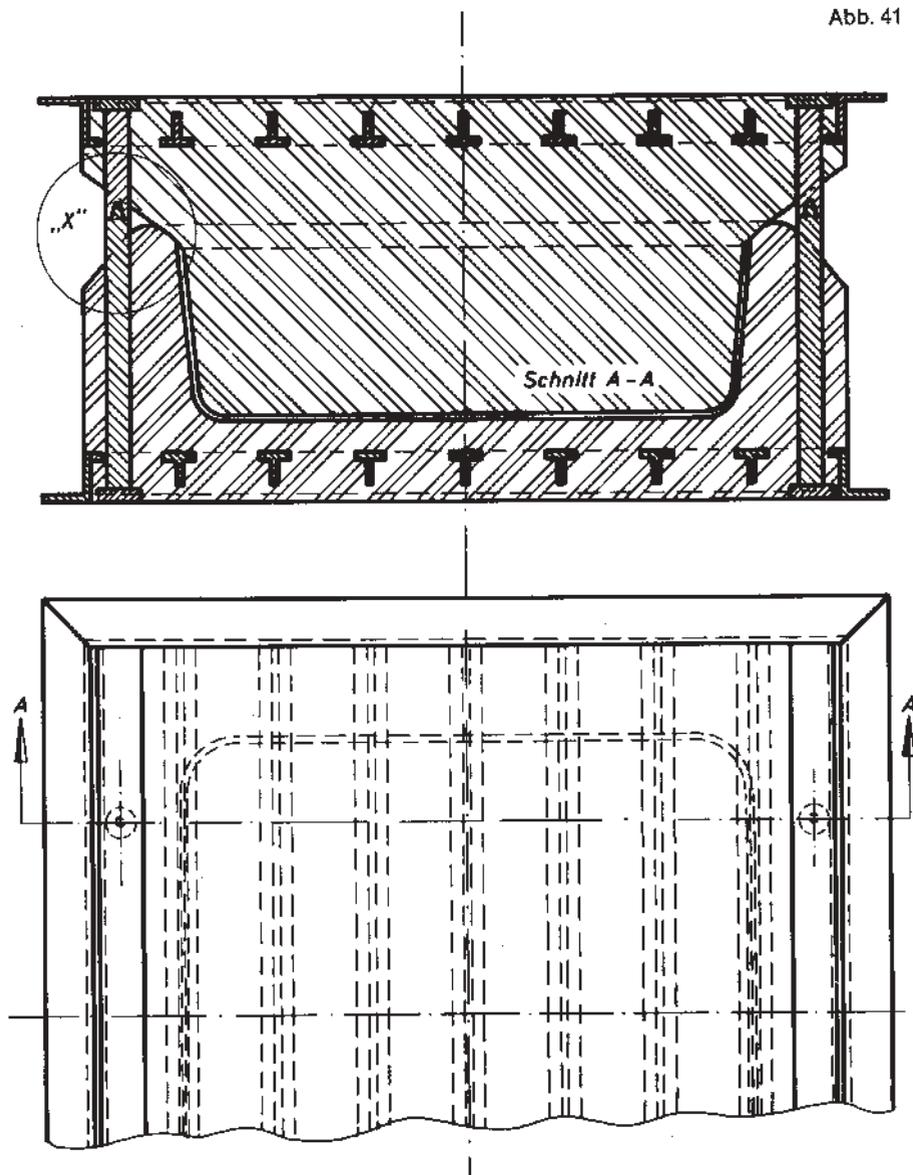
Kaltpreß-Werkzeug, Profilrahmen und Distanzstifte (18)

Der Rahmen erhält Längsprofile und Distanzstifte. Werden große Rückzugskräfte erwartet, hängt man Rundeisen über die Längsprofile. Diese Eisen greifen in die Füllmasse und geben den Formteilen in sich mehr Festigkeit (nicht gezeichnet).



Kaltpreß-Werkzeug, Gestaltung der Quetschkante (18)

Die Quetschkante ist so ausgelegt, daß die Luft entweichen und das Harz im Werkzeug Druck aufbauen kann.



Kaltpreß-Werkzeug im fertigen Zustand (18)

Werkzeug zur Herstellung von eckigen Schalen.
Deutlich sind die eingebetteten Längsprofile und die Distanzstifte erkennbar.

- h) Der Ansatz wird in zwei bis drei Zentimeter dicken Schichten in den Füllraum eingebracht und mit einem Stampfer gut verdichtet.
- i) Nach 48 Stunden wird entformt, und auf die gesäuberte Matrize wird eine Abstandshalter-Folie geklebt. Ihre Schichtdicke bestimmt die Dicke des Fertigteils. Als Folien haben sich Rhepanol BA- oder ORG-Folie bewährt. Bei starken Verformungen wird die Folie vor dem Auflegen auf 60 °C erwärmt, oder man greift zu Wachsfolien, die allerdings zu ungleichmäßigen Wanddicken neigen. Als Kleber dient Pattex ohne Härter. Folienstöße werden mit Plastilin ausgefüllt. An der Quetschkante wird die Foliendicke auf ein Drittel der Fertigteilstärke reduziert (Abb. 40 u. 41).
- k) Es wird ein Trennfilm aufgebracht, und die Matrize wird gebaut. Dabei muß der Gegenrahmen mit den Distanzstiften sorgfältig eingesetzt und während des Stampfens mit Zwingen fixiert sein.
- l) Die Aufspannflächen der noch ungeöffneten Form sind durch Abpressen mit einem Harzansatz planparallel zu machen.

Richtrezeptur: 80 Gewichtsteile Standardharz
 250 Gewichtsteile Quarzsand
 20 Gewichtsteile aminvorbeschleunigtes Harz
 10 Gewichtsteile Thixotropiepulver
 20 Gewichtsteile Desmodur SL
 3 Gewichtsteile Bp-Härter

Evtl. werden in die Matrize (Aufschrumpfen des Fertigteils) Luftauswerfer zur leichteren Entformung eingebaut. Sie werden nach dem Einbringen der ersten Feinschicht eingesetzt und erfordern große Sorgfalt beim Auffüttern. Als Anschlüsse werden T-Stücke gewählt, aus denen Harzreste ohne Beschädigung der Leitung ausgebohrt werden können .

7. 6. Trennmittel

Um eine Haftung des Fertigteils auf der Formoberfläche zu verhindern, werden Trennmittel verwendet. Man unterscheidet: Trennfolie, Trennwachs, Trennlack, teflonhaltige Trennmittel und eingebaute Trennmittel.

Trennfolien werden in Gestalt von Hostaphan®- oder Mylar®-Folie (nicht dehnbar) bei der Abformung planer oder einseitig gekrümmter Flächen bei Zylindern, Lichtbahnen usw. eingesetzt. Sie können wieder verwendet werden. Der Basiswerkstoff, gesättigte Polyester (Terephthalsäure), ist lösungsmittelbeständig, im Gegensatz zu Triacetat- und PVC-Folien, die vom Styrol angelöst werden und dem Formteil zu einer gerunzelten Oberfläche verhelfen. Folie auf Basis von Polyvinylalkohol mit ihrer hohen Dehnfähigkeit können zur Herstellung bombierter Teile (z. B. Lichtkuppeln) verwendet werden.

Trennwachs wird als Paste oder Flüssigkeit auf die Formenoberfläche aufgetragen. Nach wenigen Minuten sind die Lösungsmittel abgedampft, und der Wachsfilm wird nachpoliert. Wachse verschließen Poren und können – besonders bei neuen Formen oder Kernen – mehrmals eingebracht werden. Nach wieviel Entformungen der Wachsauftrag wiederholt werden muß, hängt von der Gestalt und Größe des Formteils und von der Trennmittel-Qualität ab. Da die Trennfilmdicke mit jedem Auftrag ungleichmäßig anwächst, wird in bestimmten Abständen eine Reinigung der Form notwendig. Obwohl Trennwachs auch für Kaltpreß- und Warmpreßformen eingesetzt werden, sind nicht alle Wachse temperungsfest.

Trennwachs ist in Lösungsmitteln gelöst, was bei der Arbeit eine gute Belüftung bedingt. Bei großen Formen, in denen man sozusagen „unter Deck“ arbeitet, sollte eine Absaugung für die abdampfenden Lösungsmittel benutzt werden. Trennwachs wird mit einem weichen Woll-Lappen aufgetragen, mit dem man das Material gleichmäßig verteilt. Nach etwa fünf Minuten bringt man es durch Nachpolieren auf Hochglanz. Dann erfolgt das einmalige Auftragen von Trennlack.

Die folgende Zusammenstellung soll eine Übersicht über die gebräuchlichsten Trennmittel und ihre Daten geben.

Mittel	Im Lieferzustand	Abformungen	Bemerkungen
Hostaphan®-Folie	fest	mehrere	nur für einseitig gekrümmte Flächen
Standard-Trennwachs	flüssig	wenige	vornehmlich für Einzelbauten in Verbindung mit Trennlack
hochwertige Trennwachse	pastös	mehrere	gute Trennwirkung und gute Oberfläche
teflon-haltige Trennmittel	flüssig, auch als Spray	mehrere	sehr gute Trennwirkung und Oberfläche, z. T. lange Abluftzeit
Trennlack	flüssig	eine	im Handverfahren als Zusatz zum Trennwachsfilm

Trennmittel

Trennlacke werden als Flüssigkeit mit einem Viskose-Schwamm oder durch Aufspritzen in die Form gebracht. Sie bestehen aus einer Lösung von Polyvinylalkohol in Wasser. Das Abdampfen des Wassers dauert etwa eine halbe Stunde. Trennlack wird nicht nachpoliert. Trennlacke bilden einen geschlossenen Film zwischen Form und Fertigteil, der bei der Entformung z. T. am Bauteil, zum anderen Teil an der Form haftet. Form und GFK-Teil werden daher nach jeder Entformung mit warmem Wasser abgewaschen. Die lange Wartezeit beim Trocknen und das Auswaschen verlängern die Fertigungszeit erheblich. Trennlack wird beim Handverfahren zum Teil zusätzlich zum Wachsfilm aufgebracht.

Für wasserbelastete und chemikalienbeaufschlagte Bauteile wird Trennlack nicht eingesetzt. Versuche haben gezeigt, daß mit Trennlack gefertigte Bauteile chemisch weniger widerstandsfähig sind.

Teflon-haltige Trennmittel ermöglichen durch ihre gute Trennwirkung viele Entformungen mit sehr guten Oberflächen. Ein Nachteil liegt im aufwendigen Auspolieren und in der oft langen Wartezeit, bis alle Lösungsmittel abgedampft sind (24 Stunden). Es sind fünf bis zehn Entformungen von handgefertigten Teilen mit 30 bis 40 Quadratmetern Oberfläche möglich, ehe Trennmittel nachgetragen werden muß.

Eingebaute Trennmittel sind der Formenfeinschicht und teilweise der Feinschicht des Fertigteils beigegeben und sollen ein Auftragen von zusätzlichen Trennmitteln von außen her unnötig machen. Sie haben sich jedoch nicht recht durchsetzen können.

8. Praktische Arbeit mit verstärktem Polyesterharz im Handverfahren

Das ideale Team zur Herstellung großer Formteile bilden drei Mann: Ein „Zupfleger“, der Harz anrührt, Mattenstücke vorbereitet, Werkzeuge säubert usw., der zweite Mann tränkt das Verstärkungsmittel mit Harz, der dritte rollt mit dem Scheibenroller die Luftblasen aus dem Laminat.

Der Arbeitsplatz wird in der Regel eine Werkstatt sein. Wird jedoch unter freiem Himmel gearbeitet, so sollten 15 bis 20 °C herrschen. Für alle Fälle sollte man eine genügend große Plastikfolie zur Hand haben, um das Werkstück und das Material bei Regen abdecken zu können. Man mache sich auch Gedanken darüber, wie die Folien im Ernstfall an ihrem Platz gehalten werden, wenn Wind aufkommt! Ein paar Latten und einige Steine sollte man bereitlegen.

Die Befestigung der Folie nur am Rand ist ein kurzes Vergnügen. Sie hängt in der Mitte durch und wirkt als Wassersammler, bis sie schließlich reißt und das gespeicherte Wasser sich über das Werkstück ergießt. Folien oder Planen bieten nur dann Schutz, wenn sie wie ein Dachfirst durch ein Holzuntergestell unterfangen werden, damit das Wasser gleich nach den Seiten ablaufen kann. Als Mindestausrüstung genügt ein Mattentisch aus zwei Böcken und darübergelegten Brettern oder eine Platte. Werkzeug und Reinigungsmittel werden vorhanden sein oder können vom Werkstofflieferanten bezogen werden.

Ein elektrischer Anschluß erlaubt es, die Harzansätze mit einer Bohrmaschine und Rührflügel anzumischen. Ein Rührstab reicht aber für das Mischen der Harzansätze auch aus, nur muß man mit dem Holzstab etwas länger rühren.

Viele chemische Prozesse verlaufen bei niedrigen Temperaturen nur langsam oder gar nicht, sie „frieren ein“. Dies trifft auch auf Polyesterharze zu. Es müssen daher Mindesttemperaturen bei vorgegebener Rezeptur oder auf eine bestimmte Temperatur zugeschnittene Rezepturen eingehalten werden.

Wichtig: Die Bezugstemperatur zeigt nicht ein Thermometer auf dem Balkon, sondern das Thermometer am Tatort, also auf der Schattenseite, z. B. einer Beckenoberfläche, an. Beim LT-Lack-Auftrag ist unter Umständen auch die Sonnenseite zu messen.

Die **Arbeit in der Werkstatt** oder überhaupt in geschlossenen Räumen ist wetterunabhängig. Hier muß jedoch für Frischluftzufuhr bzw. für eine explosionsgeschützte Absaugung der Styroldämpfe am Boden gesorgt werden. Styroldämpfe sind schwerer als Luft, lagern sich also zuerst am Boden des Raumes ab und schichten sich von dort auf.

Es gibt bei den Dräger-Werken (2400 Lübeck) und Auer (1000 Berlin) Schutzmasken, die für gewerbliche Verarbeiter empfohlen werden. Bei Außenarbeiten tritt dieses Problem kaum auf. Bevor die Styroldämpfe kritisch oder schädlich werden, tränen die Augen heftig. Alle Polyesterharze enthalten etwa 30 % Styrol. Der starke Eigengeruch des Styrols ergibt einen gewissen Schutz gegen Einatmung von zu großen Dosierungen. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration des Styrols im Arbeitsraum soll 100 ppm oder 420 mg per Kubikmeter nicht überschreiten.

Für die Arbeit mit Glas und Harz wird man **alte Kleidung oder Arbeitszeug** anziehen, der ein paar Flecken mehr nichts tun. Das gleiche gilt für die Schuhe, die man bei dieser Arbeit trägt.

Polyesterharz ruft auf der Haut meistens keinerlei Schädigungen hervor. Nur wenige Menschen sind dagegen allergisch. Harzspritzer werden mit Waschpasten (siehe auch Kap. 9.4.) entfernt.

8. 1. Formen-Vorbereitung

8. 1. 1. Versiegeln und Schleifen einer Form

Sperrholz-, Hartfaserplatten und Gips haben eine poröse Oberfläche, die in der Qualität zur Herstellung glänzender und glatter Teile nicht ausreicht. Daher müssen diese Werkstoffe durch Oberflächenbehandlung auf die erforderliche Qualität gebracht werden, um nachher makellose Abdruckteile zu erhalten. Hartfaserplatten behandelt man am besten mit DD-Lack. Nach ein- oder zweimaligem Auftrag wird die Oberfläche zunächst rauher als vorher, weil durch die Lösungsmittel Faserteilchen, die im Anquellverhalten unterschiedlich sind, aufstehen. Mit DD-Lack fixiert, können sie durch Schleifpapier abgeschliffen werden. Dann erfolgt ein weiterer Anstrich mit DD-Lack.

Für den ersten Schleifvorgang benutzt man noch Schleifpapier der Körnung 150. Der zweite Schleifvorgang wird dann mit Körnung 250 ausgeführt. Dann wird wiederum mit DD-Lack lackiert und mit der Körnung 400 geschliffen. Eine absolut ebene Fläche erreicht man, wenn mehrmals lackiert und zwischendurch mit 400er Wasserschleifpapier naß mit einem Gummiklotz geschliffen wird. Eine optische Kontrolle beim Lackieren und Schleifen läßt sich durch unterschiedliche Einfärbung des farblosen DD-Lackes mit 3 bis 5 % Moltopren-Farbpaste für jede Lackschicht erreichen.

Für plane Flächen kann man auch einen Vibrations-Rutscher benutzen. Alle Rundungen müssen aber von Hand geschliffen werden. Ein rotierender Schleifer wäre völlig ungeeignet, weil dieser wieder durch die verschieden hohe Umfangsgeschwindigkeit des Tellers Rillen verursachen und die mühsam aufgebaute ebene Fläche zerkratzen würden. Oft zeigt sich beim Schleifen, daß man nachspachteln muß. Das kann auf DD-Lack nur mit Polyester-spachtelmasse geschehen. Die Ecken in einer Negativform für einen Bootsrumpf kann man vor dem DD-Lack-Anstrich entweder mit Gips, Moltofill oder

Polyesterspachtelmasse abrunden. Polyesterspachtelmasse läßt sich leichter und schneller schleifen als Gips und hat den Vorteil, daß sie bei der Entformung des fertigen Rumpfes nicht abplatzt, so daß sofort wieder mit der Aufschichtung eines zweiten Rumpfes begonnen werden kann.

Auch die Oberfläche einer Gipsform läßt sich am besten durch 3 bis 7maliges Lackieren mit DD-Lack versiegeln. Zwischen den einzelnen Lackiergängen wird dann auch mit Wasserschleifpapier mit zum Schluß immer feiner werdenden Körnungen geschliffen.

8. 1. 2. Einbringen von Trennmitteln

Je nach geplanter Stückzahl und Formenwerkstoff wird ein geeignetes Trennmittel ausgewählt. Bei Einzelbauten wird Trennwachs und Trennlack verwendet. Bei **Polyester-Negativformen** ist wegen der qualitativ hochwertigen Oberfläche der Form nur ein einmaliger Auftrag von Trennwachs und gegebenenfalls ein einmaliger Auftrag von Trennlack notwendig. Lediglich bei neuen Formen werden zwei bis drei Wachsfilme eingebracht und getrennt poliert.

Bei **Platten-Negativformen** ist es empfehlenswert, zwei- bis dreimal Trennwachs aufzutragen. Der Trennlack soll jedoch in jedem Falle nur einmal aufgebraucht werden, da ein zweiter Trennlackauftrag den ersten Trennlackfilm wieder aufreißen würde.

Es empfiehlt sich auch, überstehende Teile der Form, die später nicht mit Polyester überzogen werden, einmal mit Trennwachs einzureiben, damit Tropfen und Reste von Harz leicht zu entfernen sind, wenn die Form das nächste Mal verwendet wird.

8. 2. Bau eines Formkörpers (Boot) in einer Negativform

Wichtige Hinweise:

Bei der Arbeit mit Kunststoffen und Lösungsmitteln ist darauf zu achten, daß einige von ihnen brennbar sind. Dazu gehören alle in Styrol gelösten Harze und einige Lösungsmittel (siehe 8.2.1.). Rauchen und offenes Feuer ist also streng zu unterlassen. Einige Lösungsmittel sind außerdem giftig. Zu hohe Konzentrationen in der Atemluft sind also zu vermeiden.

Die Augen sind beim Anmischen vor Spritzern zu schützen (Brille). Besonders gilt das für den Umgang mit Peroxiden (MEKP- und Bp-Härter).

Es wird auf die „Regeln für die Verarbeitung von Polyester- und Epoxidharzen“ der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie hingewiesen, die in Kapitel 9.4. abgedruckt sind.

Vorsicht im Umgang mit MEKP-Härter

Der flüssige Härter ist augenätzend. Darum darf verschütteter Härter nicht mit dem Taschentuch abgewischt werden. Spritzer auf der Haut sind schnell und sorgfältig mit Wasser und Seife oder 5%iger Sodalösung abzuwaschen.

Sollte durch unglückliche Umstände Härter ins Auge gekommen sein, so muß sofort das Auge unter der Wasserleitung mit fließendem Wasser ausgespült werden und anschließend nach Möglichkeit in der nächsten Minute eine Augenspülung mit einer Lösung von 10%iger Ascorbinsäure in Wasser oder mit vorrätig zu haltender 2%iger, wäßriger Natriumbicarbonat-Lösung durchgeführt werden. Der Härter enthält Peroxid, das durch die Ascorbinsäure neutralisiert wird. Bei einer Augenverletzung ist **auf jeden Fall** nach der sehr gründlichen Augenspülung **ein Arzt** aufzusuchen. Bis zu einer halben Minute nützen die Spülungen mit Wasser, später wirken nur die genannten Lösungen. Keine öligen Lösungen oder Emulsionen verwenden, sie verstärken die Wirkung des Peroxides.

Hat jemand Peroxid getrunken, so soll möglichst schnell Erbrechen herbeigeführt und eine reichliche Menge Natriumascorbat-Lösung getrunken werden. Danach ist unverzüglich ein Arzt aufzusuchen.

Härter sind bereits phlegmatisiert, daher in bezug auf das Brandverhalten und die Lagerung relativ ungefährlich. Trotzdem möchten wir auf die Sicherheitsvorschriften hinweisen, damit Sie sorgfältig mit dem Härter umgehen.

MEKP und Kobalt nie direkt miteinander vermischen!

Härter darf unter keinen Umständen in reiner Form mit Beschleuniger zusammenkommen. Die Folge könnte eine Explosion sein, wenn zufällig die Temperatur und kritische Mischung erreicht wird.

Beim Zugeben zum Polyesterharz muß entweder **zuerst der Beschleuniger und dann – nach dem Umrühren – der Härter** zugegeben werden oder auch umgekehrt. Eine Reihenfolge ist also nicht einzuhalten. MEKP-Härter kann auch durch Metallpulver wie z. B. Rost oder Aluminiumpulver zum schnelleren Zersetzen gebracht werden. Dieser Zersetzungsprozeß kann im ungünstigen Fall so schnell vor sich gehen, daß eine Wärmereaktion mit einer Verpuffung auftreten kann. Nicht verbrauchter Härter soll nicht in das Originalgebinde zurückgeschüttet werden (Anreicherung von Schmutzstoffen).

8. 2. 1. Werkzeuge und Reinigungsmittel

Beim Handverfahren werden nur wenige Werkzeuge benötigt.

Der Feinschichtpinsel, 10 cm breit, ist zum Einbringen und Entlüften der Feinschicht und des LT-Lacks geeignet.

Fellroller (mit Nylonfell oder mit richtigem Lammfell für besonders hohe Harzaufnahme) in verschiedenen Qualitäten, mit kurzem und langem Stiel (für große Formen) dienen zum Tränken und Ausrollen von Glasmatten und Geweben mit Polyesterharz.

Plüschroller gestatten durch ihr kurzes Haarfell einen guten Transport überschüssiger Harzmengen an harzarme Stellen.

Scheibenroller sind Werkzeuge zum Entlüften des Laminats.

Beim Tränken der Glasverstärkungen mit Harz werden unvermeidlich Luftblasen mit eingeschlossen, die sorgfältig entfernt werden müssen. Der Scheibenroller preßt das Glasgewebe oder die Glasmatte zusammen, dabei fließt das Harz an den Faserbüscheln entlang. Die Luftbläschen geraten in Bewegung, und ihr natürlicher Auftrieb läßt sie nach oben steigen und platzen.

Mit Fellrollern kann wegen der großen Auflagefläche kein genügender Preßdruck erzeugt werden.

Rillenroller. Sie erfüllen die gleiche Aufgabe wie Scheibenroller, sind jedoch mit kleinerem Durchmesser lieferbar.

Flexibler Metallroller. Während sich bei geraden Flächen Metallscheibenroller bewährt haben, besteht die Federwalze aus einer Spiralfeder, die sich jeder gekrümmten Fläche anpaßt. Es können damit sowohl Laminare in Hohlräumen als auch auf Wölbungen in kurzer Zeit blasenfrei ausgerollt werden.

Die Reinigung dieses Werkzeuges ist einfach, weil hartgewordenes Harz beim Biegen der Feder abspringt. Auf diese Weise bleibt das Werkzeug stets gebrauchsfähig.

Zur **Reinigung** von Werkzeugen werden drei Eimer zum Vorspülen, Nachspülen und Klarspülen verwendet. Erst dann werden sie in einen Behälter zur Aufbewahrung gestellt.

Als Reinigungsmittel sind möglich:

Aceton: Es ist nicht giftig, aber feuergefährlich, so daß es aus Sicherheitsgründen in geschlossenen Räumen (Werkstatt) nicht verwendet werden sollte. Es ist leichter als Wasser (spez. Gewicht 0,98 kg/l) und besitzt sehr gutes Lösevermögen. Es kann, falls keine Handwaschlösung vorhanden ist, ersatzweise zum Reinigen der Hände benutzt werden.

Methylenchlorid: Es ist unbrennbar und wird daher von gewerblichen Verarbeitern und Selbstbauern bevorzugt für die Reinigung der Werkzeuge verwendet. Da es schwerer als Wasser ist (spez. Gewicht 1,4 kg/l), kann Wasser als flüssiger Deckel gegen Verdunsten aufgegossen werden. Seine Dämpfe sind jedoch schwach giftig.

Trichloräthan: Dieses Lösungsmittel ist ebenfalls unbrennbar. Die Dämpfe und der Hautkontakt sind relativ ungefährlich. Dieses Mittel ist gewerblichen Verarbeitern, die ständig mit Reinigungsmitteln in Kontakt kommen, zu empfehlen, sein Lösevermögen ist allerdings begrenzt.

Zur Reinigung der Hände werden am besten Handwaschlösungen verwendet (Stockhausen, Krefeld). Anschließend wird mit warmem Wasser und Seife gründlich nachgewaschen.

8. 2. 2. Feinschicht-Auftrag

Die Feinschicht wird auf die mit Trennmitteln versehene Form aufgebracht und bildet damit die belastete Bauteilseite. Da dieses Harz in der Form an senkrechten Wänden stehen muß, ist es mit Hilfe von einem Verdickungsmittel nicht-tropfend (thixotrop) eingestellt. Es hat etwa die Konsistenz (Dickflüssigkeit) von frischer Zahnpasta. Feinschichtharz wird ohne Glasfaserarmierung verarbeitet. Die Feinschicht kann farblos oder in verschiedenen Farbtönen eingefärbt werden. Soll Feinschicht pigmentiert werden, so geschieht das mit einer 20%igen Zugabe der gewünschten Farbpaste durch einfaches Einrühren. Sie können jedoch Feinschichten in RAL-Farben fertig beziehen. Entsprechende Farbpasten stehen zur Verfügung.

Zum Auftragen des Feinschichtharzes auf die Formoberfläche wird der 10 cm breite Feinschichtpinsel benutzt. Der Verbrauch an Feinschichtharz beträgt auf glatten Formoberflächen ca. 0,6 kg je m², auf gesickten Flächen 0,75 kg je m². Die Auftragsdicke liegt bei ca. 0,5 mm.

Soll die Feinschicht gleichmäßig dick werden, so wird sie in zwei Arbeitsgängen im Abstand von etwa ein bis drei Stunden aufgestrichen.

Das Feinschichtharz erfordert bei der Verarbeitung eine Mindest-Temperatur von 18 °C.

Von jeder Harzcharge ist beim Anbrechen eines neuen Gebindes zunächst ein Topfzeit-Test zu machen.

Feinschichten, die vom Hersteller vorbeschleunigt geliefert werden, haben eine Topfzeit von 15 bis 20 Minuten bei 20 °C und einer Zugabe von 3 % MEKP-Härter, wenn sie mit Kobalt vorbeschleunigt sind. **Bitte die Etiketten beachten!**

Unbeschleunigte Ware ist ebenfalls auf diese Topfzeit einzustellen (ca. 1 % Kobalt zugeben, Topfzeit kontrollieren).

Feinschichtharz soll gut angehärtet sein und beim weiteren Laminieren mit möglichst wenig Harz in Berührung kommen, da es sonst vom Styrol im Harz aufgelöst wird.

Bei richtiger Topfzeit der Feinschicht (ca. 15 Min.) und richtiger Temperatur der Formoberfläche kann eine Versiegelung aus zusätzlich beschleunigtem Laminierharz (s. u.) oder einem zweiten Feinschicht-Auftrag bereits nach einer bis zwei Stunden vorgenommen werden. Wird hinter der Feinschicht



Aufbringen der Feinschicht

Eingefärbtes Feinschichtharz wird mit dem Feinschichtpinsel aufgetragen. Das Verfahren erscheint primitiv, entlüftet die Feinschicht jedoch noch am besten. Je Quadratmeter Formfläche werden etwa 600 g Feinschichtharz benötigt. Die Filmdicke beträgt dann 0,5 mm.

mit einer 300-g-Matte und einem Laminierharz mit 45 Minuten weitergearbeitet, so sind zumindest zwei Stunden Härungszeit für den Gelcoat einzuhalten. Die Oberfläche soll noch leicht klebrig sein.

Dieser Zeitablauf ist gegebenenfalls in einem Vorversuch festzulegen, da die einzelnen Feinschichten unterschiedlich schnell härten. Die oben genannten Werte beziehen sich auf Standard-Feinschichten. Die Feinschicht sollte nach Möglichkeit innerhalb weniger Stunden nach dem Auftrag von Trennwachs in Angriff genommen werden, damit sich nicht erst wieder Staubteile auf der Form absetzen können.

Man füllt je Ansatz eine Menge von zwei kg vorbeschleunigter Feinschicht ab und versetzt sie mit 3% = 60 g MEKP-Härter. Der Härter wird durch langsames Rühren gleichmäßig im Feinschichtharz verteilt. Ein zu schnelles Rühren kann sehr leicht Luftblasen einbringen, die bei diesem sehr dickflüssigen Harz nicht mehr von selbst an die Oberfläche steigen würden. Beim Rühren ist darauf zu achten, daß man mit dem Holzstab auch scharf an die Dosenwandung gelangt. Zum Anrühren werden grundsätzlich runde Behälter verwendet. Der Einrührvorgang dauert etwa eine Minute.

Danach gießt man zuerst einmal einen Teil des Topfinhaltes wie einen Strich auf die Form und verteilt die Masse mit dem Feinschichtpinsel. Das Verteilen der Feinschicht muß gleichmäßig erfolgen, denn eine zu dünne Stelle ergibt keine genügende Deckkraft und härtet nicht ausreichend.

Man darf nicht nachträglich mit dem Pinsel noch einmal über die bereits aufgelegte Feinschicht streichen. Dabei könnte man mit den Pinselborsten die Trennlackschicht stellenweise auf die Seite schieben, so daß an dieser Stelle das Fertigteil mit der Formfläche verklebt. Läufer soll man deshalb lieber belassen. Sie sind später nach außen nicht sichtbar.

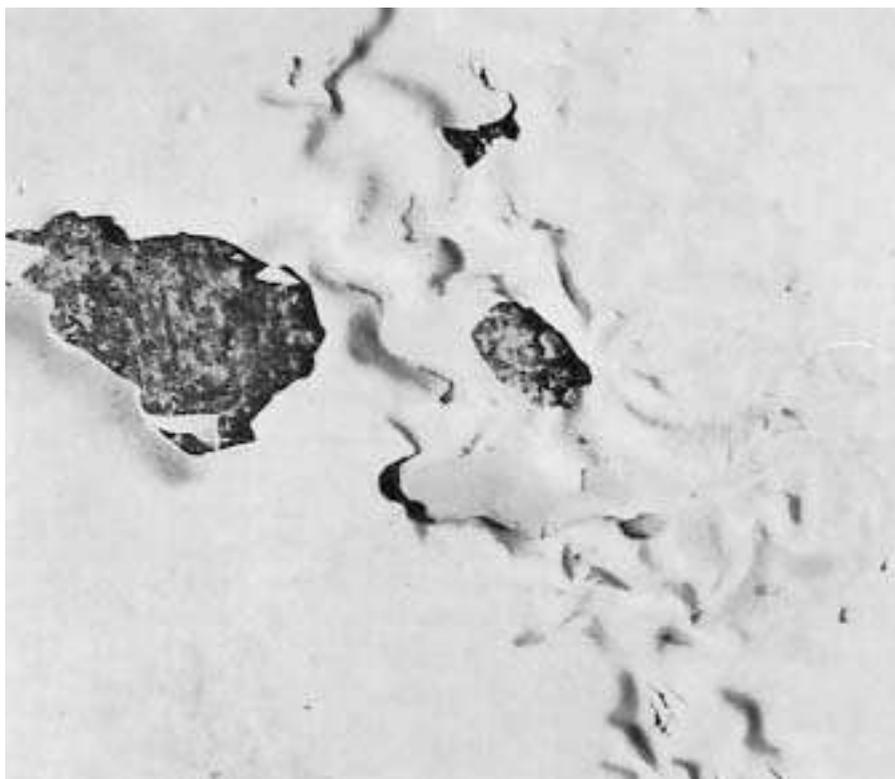
Das Aufbringen erfolgt am besten planquadratweise, so daß nach Verbrauch des ersten Ansatzes mit der nächsten Partie so gearbeitet werden kann, daß man nur ganz schwach, etwa 2–3 mm, über die zuerst aufgebrauchte Fläche herübergeht. Man geht am besten so vor, daß man nicht wieder auf bereits angelierte Flächen trifft, weil diese im Stoßbereich Anquellerscheinungen zeigen können. Die Feinschicht muß absolut **luftblasenfrei** auf der Formenoberfläche ausgestrichen werden. Hohlräume im Feinschichtfilm führen erfahrungsgemäß zu einer mangelhaften Härtung des angrenzenden Harzfilms. Mangelnde Wasser- und Chemikalienbeständigkeit sind die Folge (Bläschenbildung bei Wasserbelastung oder Gasblasen bei einer Einbrennlackierung mit 90 °C).

Feinschichtfilme von weniger als 0,25 mm weisen ebenfalls mangelnde Beständigkeiten auf. Bei zu geringer Schichtstärke entfällt praktisch die Wärmetönung bei der Gelierung (Polymerisationswärme), die sonst die Aushärtung wesentlich unterstützt. An dünnen Stellen steigt daher die

Topfzeit auf der Form an und die Feinschicht verliert einen Teil des Styrols, das zur ordnungsgemäßen Vernetzung notwendig ist (Unterhärtung).

Hat man so gleichmäßig von vorne bis hinten oder umgekehrt über das ganze Formteil gearbeitet, dann muß die Feinschicht anschließend bei 20 °C gut anhärtet. Ihre Fläche soll sich gerade noch klebrig anfühlen, wenn weitergearbeitet werden kann.

Bei großen einteiligen Formen muß die Feinschicht von einer Stellage aus eingebracht werden. Der Trennmittelfilm darf auf keinen Fall betreten werden. Er würde dabei beschädigt werden.



Angequollene Feinschicht

Diese sogenannte Elefantenhaut kann beim Anlösen der Deckschicht durch den nachfolgenden Harzauftrag eintreten. Die Feinschicht muß also genügend angehärtet sein, bevor man weiterarbeitet. Um die noch junge Feinschicht nicht unnötig zu belasten, beschleunigt man das Laminierharz für die erste Glaslage, so daß seine Topfzeit von sonst 40 Minuten verkürzt wird.

Mehrfarbige Flächen aus einem Formteil

Die mehrfarbige Gestaltung der Oberfläche eines Formteiles ist ohne größere Schwierigkeiten möglich. Als Beispiel soll das Auftragen einer braunen Feinschicht und einer weiß eingefärbten Feinschicht mit scharfer Trennung an einem Bootsrumpf beschrieben werden.

Es wird die Begrenzungslinie der Farbfläche mit Tesafilm abgeklebt (Tesa-film überall gut anreiben). Ein farbiger, breiter Klebstreifen ist hierfür besonders günstig. Danach wird das erste Feinschichtharz aufgetragen. Etwa 5 bis 10 Minuten nach dem Auftragen wird der Tesafilm-Streifen abgezogen, und zwar noch vor dem Gelieren der Feinschicht. Man zieht vorsichtig, senkrecht zur Fläche und erhält dadurch eine scharfe, schnurgerade Trennlinie der Feinschicht. Die jetzt vorhandene Farbfläche muß erst gut aushärten. Dann wird die zweite Feinschicht eingebracht.

Eine Vorbehandlung der Form mit Trennlack ist bei dieser Arbeitsweise nicht möglich, da der Trennfilm beim Entfernen des Klebestreifens zerstört werden würde. Wachsen ist jedoch unerlässlich.

8. 2. 3. Schnellversiegelung

Statt eines zweiten Feinschicht-Auftrages kann auch eine sog. „Schnellversiegelung“ nach der ersten Feinschicht eingebracht werden.

Die Schnellversiegelung wird auf die gut ausgehärtete Feinschicht nach frühestens einer Stunde aufgebracht. Je nach verwendetem Feinschichttyp wird ein passendes Harz für diese Schicht gewählt.

Rezepte für Schnellversiegelungen mit ca. 15 Minuten Topfzeit bei 20 °C und 3 % MEKP-Härter-Zugabe.

Für Bauteile aus Standardharzen:

AZUR-Harz	+ 0,3 % Kobalt-Beschleuniger
BE/U-Harz	+ 0,5 % Kobalt-Beschleuniger
N 50	+ 0,5 % Kobalt-Beschleuniger
W 16	+ 0,5 % Kobalt-Beschleuniger

Für wasserbelastete Lamine:

i 25 B	+ 0,3 % Kobalt-Beschleuniger
W 25	+ 0,5 % Kobalt-Beschleuniger

Für wasserbelastete Lamine und farbiger Schnellversiegelung:

N 35 B	+ 20 % Farbpaste + 0,3 % Kobalt-Beschleuniger
W 35	+ 20 % Farbpaste + 0,5 % Kobalt-Beschleuniger
Polyester-Schnellversiegelung N 35 BT	+ 20 % Farbpaste

Nach dem gründlichen Einrühren des zusätzlichen Kobalt-Beschleunigers (3 bzw. 5 g je kg Harz) werden die vorgeschriebenen 3 % MEKP (= 30 g oder cm^3 je kg Harz) eingemischt.

Die Versiegelung wird mit dem Fellroller aufgetragen, wobei das Werkzeug stets in einer Richtung bewegt wird, z. B. senkrecht zur Werkstückmittellachse (Kiel bei einem Boot).

Ausgestrichen wird die Versiegelung mit dem Feinschichtpinsel. Er wird quer zur Richtung des Fellrollenauftrags bewegt. Auf diese Weise erreicht man einen blasenfreien Auftrag und eine gleichmäßige Verteilung. In der Praxis wird 1 kg Versiegelung + 30 g MEKP-Härter für 5 m² Oberfläche angesetzt. Etwa nach einer Stunde kann weitergearbeitet werden. In die Schnellversiegelung kann eine Oberflächenmatte eingearbeitet werden. Sie verbessert das Verhalten der Feinschicht bei Schlagbeanspruchung und ergibt eine „ruhigere“ Bauteiloberfläche.

Farbpasten. Zum Einfärben von Feinschichten, Schnellversiegelungen, Laminierharzen und LT-Lacken werden Polyester-Farbpasten verwendet. Der Farbpastenzusatz beträgt bei den dunklen Farben bis zu 10 % und bei den hellen Farben bis zu 25 %. In der Regel wird ca. 20 % Farbpastenzusatz angenommen.

Farbpasten können auf die Topfzeit von Feinschicht, Harz und LT-Lack eine **verkürzende oder verlängernde** Wirkung haben, obwohl die Hersteller bemüht sind, derartige Einflüsse auszuschalten. Bezieht der Verarbeiter z.B. beschleunigte, klare Feinschicht und gibt die Farbpaste selbst hinzu, so muß der **Topfzeit-Test stets am eingefärbten Harz** durchgeführt werden. Korrekturen, wie die zusätzliche Beschleunigung mit Kobalt, können dann noch vorgenommen werden. Das gilt ebenso für LT-Lacke. Laminierharze werden üblicherweise nur mit 3 bis 5 % Farbpaste versehen, so daß eine spürbare Topfzeit-Veränderung kaum eintritt.

8. 2. 4. Auftapezieren von Glasverstärkungen mit Laminierharz

Die tragende Wand besteht aus den Verstärkungen (Matten und Gewebe) und dem Laminierharz. Die im Handverfahren üblichen Verstärkungsstoffe sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt (S. 140 oben).

Die Tabelle gebräuchlicher Laminierharze ist in das System für witterungsbelastete und das System für wasserbelastete Lamine aufgeteilt. Der Vollständigkeit halber sind die Feinschichten und Schlußlacke mit einbezogen (S. 141).

Für die Arbeitsbeschreibung wurde ein bereits mit 0,2 % Kobalt vorbeschleunigtes Harz gewählt (AZUR). Für das Harz I 25 B gelten die gleichen Daten. Die Konsistenz dieses Laminierharzes ist so eingestellt, daß sich die Glasmatte und Gewebe schnell damit tränken lassen. Es wird – mit Ausnahme der Einstellung als Schnell-Versiegelung – stets mit der Glaseinlage verwendet. Der Verarbeiter muß also, um das Harz zur Aushärtung zu bringen, nur noch 3 % MEKP-Härter in das Harz eingeben. Das sind 30 g = 30 cm³ MEKP-Härter auf 1 kg AZUR-Harz.

Verstärkung	Lage in der Wand	Harzverbrauch	Schichtdicke
300 g/m ² -Matte	erste Lage hinter der Feinschicht	ca. 0,9 kg/m ²	ca. 0,9 mm
450 g/m ² -Matte	zweite, dritte Lage und zwischen Geweben	ca. 1,2 kg/m ²	ca. 1,2 mm
Roving-Gewebe 580 g/m ²	im zugbelasteten Bereich	ca. 0,7 kg/m ²	ca. 0,7 mm
Roving-Gewebe 670 g/m ²	im zugbelasteten Bereich	ca. 0,8 kg/m ²	ca. 0,8 mm
Roving-Gewebe 820 g/m ²	im zugbelasteten Bereich	ca. 1,0 kg/m ²	ca. 1,0 mm
Roving-Gewebe 900 g/m ²	im zugbelasteten Bereich	ca. 1,1 kg/m ²	ca. 1,1 mm

Übliche Verstärkungsmittel beim Handverfahren

Als Übersicht über die Abhängigkeit der Topfzeit von der Temperatur soll die nachfolgende Tabelle dienen. Dabei wurde stets eine Härter-Zugabe von 3 % zugrunde gelegt.

Temperatur	Topfzeit im Lieferzustand mit 0,2 % Kobalt-Beschleuniger	Topfzeit mit 0,2 % Kobalt-Beschleuniger zusätzlich
25 °C	30 min	15 min
20 °C	45 min	20 min
18 °C	60 min	30 min
17 °C	100 min	40 min
16 °C	150 min	60 min
15 °C	200 min	100 min

Topfzeit von Standardharz mit 0,2 % und mit 0,4 % Kobalt-Beschleuniger

Belastungsart	Feinschicht	Basis der Feinschicht	Laminierharz	Basisharz der Farbversiegelung bei Beschichtungen	Schlußlack bei Beschichtungen	Anwendungsbeispiele
Witterung	G 300 B und G 301 B	Orthophthalsäure	AZUR N 50 W 16	AZUR N 50 W 16 oder N 35 BT	LT 30 B oder LT 35 B	Karosserie, Hochbau, Behälter, Anhänger-Boote, Industrieteile, Gartenteiche usw.
Wasser bis 27 °C	G 327 B	Isophthalsäure	i 25 B	N 35 BT	LT 35 B	Boote, Brausetassen, Fertigschwimmbecken bis 27 °C Wassertemperatur
Wasser bis 30 °C	G 340 B	Terephthalsäure	T 40 B	T 40 BT	LT 40 B	Beheizte Innenschwimmbecken bis 30 °C Wassertemperatur
Anmerkungen	Topfzeitstellung bei Farbpastenzugabe muß vom Verarbeiter vorgenommen werden		Nur AZUR und i 25 B sind im Lieferzustand vorbeschleunigt		Topfzeitstellung bei Farbpastenzugabe muß vom Verarbeiter vorgenommen werden	

Harzsysteme für witterungs- und wasserbelastete GFK-Teile

Die Topfzeit bei 20 °C beträgt also 45 Minuten. Das Harz ist in seiner Viskosität auf den Temperaturbereich von 15 bis 25 °C eingestellt. Sollte es noch wärmer sein, so kann man das Harz thixotropieren (verdicken), damit es nicht aus Matten und Geweben abläuft (Luftblasenbildung). Zur Thixotropierung wird zweckmäßig leicht einrührbare Paste statt des Pulvers verwendet. Die Paste enthält 7 % Thixotropie-Pulver. 6 Teile Harz + 1 Teil Paste (7%ig) ergibt eine Zugabe von 1 %.

Das Polyesterharz AZUR wird auf die Glasmatten mit Hilfe einer Lammfellrolle aufgetragen. Bei der Härtung unter Lufteinfluß härtet das Harz an der der Luft zugekehrten Oberfläche nicht klebefrei aus. Diese Erscheinung hat den Vorteil, daß sich die Oberfläche einwandfrei mit einem neuen Harzauftrag verbindet, weil die Grenzschicht des ausgehärteten Polyesterharzes wieder angelöst wird und damit eine chemische Reaktion eingeht.

Dieser Klebe-Effekt hat den Nachteil, daß die Oberfläche des Harzes sehr stark zur Verschmutzung neigt. Das wird behoben durch die Versiegelung mit LT-Lack oder durch die Verwendung von Hostaphan®-Folie. Bevor das Harz angesetzt wird, werden auf dem Mattentisch genügend Mattenstücke für einen Arbeitsgang zugerissen. Geschnittene Mattenränder werden sorgfältig ausgezupft, so daß am Bauteil keine Kanten und Ränder sichtbar werden. Ausgezupft wird der Rand mit der Hand, mit einer Bürste, einem Metallkamm oder einem Nagelbrett. Die so vorbereiteten Mattenstücke werden fein säuberlich aufeinandergestapelt. Entsprechend werden auch Gewebbahnen vorbereitet.

Beim **Tränken der Glasfaserverstärkung** mit AZUR-Harz geht man etappenweise vor. Ein Drei-Mann-Team wählt bei 20 °C Teilflächen von etwa 4 m² (z. B. bei Booten ohne Sicken). Dazu wird folgender Harzansatz gemacht:

5 kg AZUR-Harz
+ 100 g MEKP-Härter (= 2 %) für 40 Minuten Topfzeit

Genau diese Harzmenge wird zum Tränken von 4 m² Standardmatte (450 g/m²) benötigt. Dieses Teilstück ist in einer halben Stunde fertiggestellt.

Den ersten Ansatz wählt man sicherheitshalber nur halb so groß, damit man ein wenig „üben“ kann. Es sei angemerkt, daß sich die Temperaturen im Freien sehr schnell ändern können. Damit wachsen oder verkürzen sich die Topfzeiten. Also nach der Zigarettenpause hin und wieder das Thermometer kontrollieren. Das Harz wird in Polyäthylen-(Plastik-)Eimern angesetzt. An ihrer Oberfläche haftet Polyesterharz nicht, so daß die ausgehärteten Reste später einfach herausgeschlagen werden können. Der 18 cm breite Fellroller kann in diese Gefäße gut eingetaucht werden.

Der Härter wird etwa eine Minute lang mit einem Holzstab in das Harz gut eingerührt oder mit der regelbaren Bohrmaschine und einem Mischpropeller etwa 20 Sekunden möglichst luftblasenfrei gemischt. Von nun an bleiben etwa 40 Minuten Zeit für die Harzverarbeitung.

Tränken von Glasmatten

Das Harz wird beim Handverfahren mit der Fellrolle aus dem Harzeimer auf die Glasfläche transportiert und dort verteilt. Dunkle Formoberflächen lassen die Mangelhaftigkeiten deutlich sichtbar werden.



Faserspritz-Verfahren

Harz und Glasschnitzel werden von der Maschine gleichzeitig auf die Form aufgetragen. Die Verteilung des Werkstoffs auf der Oberfläche hängt von dem handwerklichen Geschick des Spritzers ab. Die Entlüftung des Laminates wird von Hand mit der Scheibenrolle vorgenommen.



Die Fläche, die mit der Glasmatte beschichtet werden soll, wird zunächst mit Harz + Härter vorgerollt, dann erst wird die Matte aufgelegt und mit Harz + Härter von oben her getränkt. Dieser Arbeitsgang kann auch mit einer Faserspritzmaschine durchgeführt werden. So wird die Matte sowohl von der Unter- als auch von der Oberseite schnell durchfeuchtet.

Die im trockenen Zustand weiße Matte wird beim Tränken mit Harz nach kurzer Zeit dunkel und durchsichtig. Nur an harzarmen Stellen bleibt sie hell. Dort muß Harz nachgetragen werden.

Über die **Qualität** der Beschichtung entscheidet die Arbeit mit der Scheibenrolle. Gibt man das Harz von oben auf die Matte, so schließt man verständlicherweise Luft in die Matte mit ein.

Die Fäden der Glasmatte sind mit einem schwachen Bindemittel zusammengehalten, damit man die Matte überhaupt herstellen, wickeln und transportieren kann. Der hierzu verwendete Binder ist so eingestellt, daß er beim Durchtränken von dem im Polyesterharz enthaltenen Styrol vollständig aufgelöst wird, so daß die Glasfäden jetzt nur noch im flüssigen Polyesterharz schwimmen. Das ist etwa nach zwei Minuten Harz-Einwirkzeit der Fall.

Dann werden die Luftblasen durch Rollen mit dem Scheibenroller ausgequetscht. Die Scheibenrolle wird langsam hin und her bewegt.

Speziell die erste Glasmatte hinter der Feinschicht muß sehr sorgfältig entlüftet werden. Schlecht entlüftete Lamine haben besonders bei wasserbelasteten Teilen einen negativen Einfluß auf die Lebenserwartung. Über die wasserdampfdurchlässige Feinschicht können sie sich mit Wasser füllen und so zu einem langsamen Abfall der Festigkeit führen.

Angrenzende Matten- und Gewebestücke werden am Stoß etwa zwei Zentimeter überlappt. Die ausgedünnten Ränder ergeben dabei keine Verdickung.

Soll die Laminat-Rückseite in der Oberflächen-Qualität verbessert werden, so wird nach dem Anhärten der letzten Lage mit Polyesterspachtel egalisiert. Für wasserbelastete Lamine wird dabei der UP-Spachtel **NAUTOVOSS®** verwendet. Im Gegensatz zu Karosserie-Spachtelmassen besitzt dieses Produkt eine sehr gute Wasserbeständigkeit.

8. 2. 5. Hinweise zur Arbeit mit Glas und Harz

Falten und Stöße können bei Matten nach der Auflösung des Binders (ca. zwei Minuten) durch Verschieben der Glasfäden glattgewalzt werden. Ist die Falte sehr groß und hartnäckig, so wird sie aufgerissen, anschließend werden die beiden Ränder übereinandergelegt und ausgewalzt. Gewebe müssen stets faltenfrei verlegt werden. Es ist auch darauf zu achten, daß die Fäden keine Schlangenlinien bilden. Geradlinig verlegte Fäden werden ihrer Aufgabe als Zuelement besser gerecht.

Entlüften der Matte mit der Scheibenrolle

Die Glasmatte wird unter der Scheibenrolle wie ein Schwamm zusammengedrückt und gibt die an den Fäden angelegte Luft frei.



Bei geschickter Verlegung wächst so die Schichtdicke auch bei den Überlappungen kaum an. Sind trotzdem störende Unebenheiten vorhanden, lassen sie sich nachträglich durch Schleifen und Spachteln beseitigen.

Unterbrechen der Lamnierarbeiten

Polyesterharz härtet an der Fläche, die der Luft zugekehrt ist, nicht vollkommen aus. Diese Eigenschaft bringt den Vorteil, daß sich selbst nach mehreren Tagen Pause die nächste Schicht Polyesterharz durch chemische Vernetzung mit der alten Schicht verbindet. Untersuchungen haben ergeben, daß mit einer Arbeitsunterbrechung von 18 Stunden zwischen Feinschicht und erster Glaslage eine deutliche Verschlechterung der Wasserfestigkeit verbunden war. Es wird empfohlen, die **Fehlschicht und mindestens die erste Glaslage an einem Arbeitstag einzubringen**.

Dafür sprechen außerdem auch Erfahrungen, die in schwach gewölbten Formen mit sehr guten Trennmitteln gemacht wurden. Am nächsten Morgen hatten sich die Feinschichten durch den Schrumpf von der Form gelöst. Sie mußten entfernt werden. Wird die Arbeit innerhalb der verstärkten Schichten unterbrochen, so soll stets am nächsten Tag mit einer Glasmatte begonnen werden (kein Gewebe).

Man achte vor Unterbrechungen unbedingt darauf, daß alle auftapezierten Glasstücke vollständig getränkt und entlüftet sind. Halbgetränktes Glasmaterial „steht auf“ und muß abgeschliffen werden.

„Naß in naß“ auftapezieren

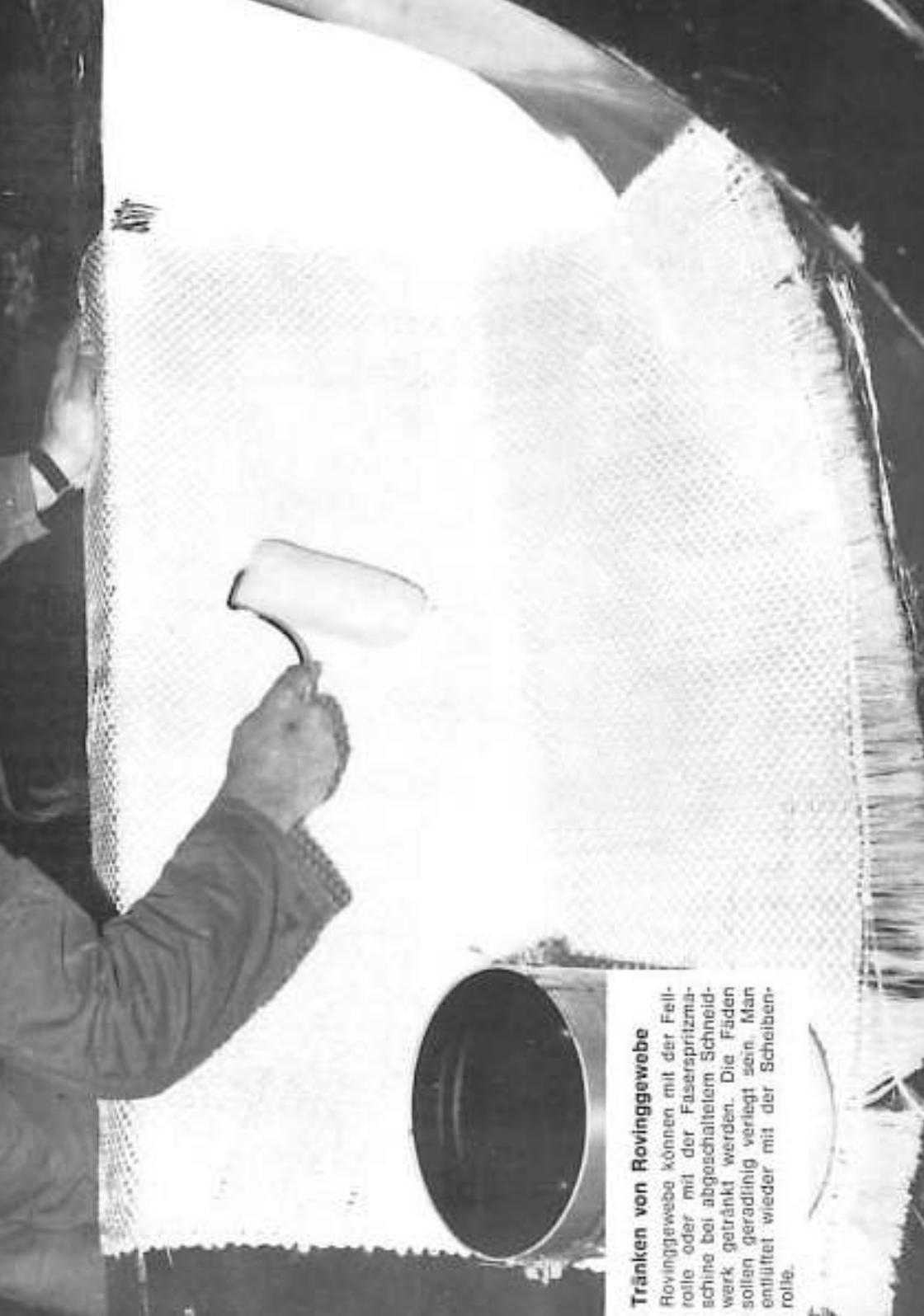
Diese Arbeitsweise erspart Harz und erhöht damit den Glasgehalt. Dabei wird Lage 2 auf die frischgetränkte d. h. noch „nasse“ Lage 1 auftapeziert. Daher die Bezeichnung.

An der Senkrechten ist das flüssige Harz nicht fähig, mehr als eine Glaslage auf dem Untergrund festzuhalten. Tapeziert man (naß-in-naß) zwei oder mehr Lagen auf, gerät die Haut ins Rutschen oder fällt ab. Auf senkrechten und auf Überkopfflächen (Schwappkante) muß daher jede Lage für sich anhärten, ehe man die nächste Schicht auflegt. Hier sind geteilte oder drehbare Formen, die geneigt werden können, vorteilhaft.

Beseitigung von Unebenheiten und Luftblasen

Ist die letzte Glaslage vollständig angehärtet, so wird mit einem Schleifklotz und grobkörnigem Papier die Fläche einmal übergeschliffen. Dabei brechen aufrechtstehende Glashaare ab.

Unebenheiten in der Oberfläche werden mechanisch mit grobem Schleifpapier (Körnung 60) oder mit dem Stemmeisen entfernt. Findet man solche Fehlstellen schon nach der ersten oder zweiten Glaslage, so werden sie gleich entfernt. Sie würden mit der nächsten Lage nur größer. Luftblasen bis zu 0,5 mm ϕ schleichen sich beim Handauflegeverfahren leicht ein, sind jedoch keine Gefahr, solange sie vereinzelt auftauchen. Häufungen



Tränken von Rovinggewebe

Rovinggewebe können mit der Fellrolle oder mit der Faserspritzmaschine bei abgeschaltetem Schneidwerk getränkt werden. Die Fäden sollen geradlinig verlegt sein. Man entlüftet wieder mit der Scheibenrolle.

feiner Luftblasen lassen sich mit sorgfältigem Entlüften (Scheibenroller) vermeiden. Größere Luftblasen werden aufgestochen und mit Harz + 3% Härter oder Spachtelmasse verfüllt.

Wann und womit die Ränder besäumen?

Diese Arbeit wird z. B. am Formenrand notwendig. Die Wahl des geeigneten Werkzeuges hängt allein davon ab, wann dieser Arbeitsgang durchgeführt wird. Bei einer Topfzeit von 40 Minuten kann etwa 20 Minuten nach dem Gelieren der Glas-Harzrand einfach mit einem Messer besäumt werden. Das Laminat hat dann noch lederartigen Charakter. Schneidet man früher, so löst sich die Matte noch aus dem Harz, die Stelle wird weiß. Man muß noch warten.

Aus dieser Zeitabhängigkeit geht hervor, daß jede Lage für sich besäumt werden muß, da ja die Harzansätze zu verschiedenen Zeiten mit Härter versetzt wurden. Ist die lederartige Phase überschritten, müssen Holzwerkzeuge (werden schneller stumpf) oder Hartmetallwerkzeuge (Widia, diamantbesetzte Trennscheiben) verwendet werden.

8. 2. 6. Farbversiegelung + Topcoat als Deckschicht

Um die Deckkraft zu erhöhen, die Deckschichtdicke zu vergrößern und die LT-Lack-Qualität möglichst wenig zu beeinträchtigen, sollte speziell bei Beschichtungslaminaten aus GFK eine sog. **Farbversiegelung** als erster Farbauftrag aufgebracht werden.

Die **Farbversiegelung** besteht aus:

- AZUR-Harz + 0,3% Kobalt-Beschleuniger zusätzlich oder N 35 BT
- + 20,0% Farbpaste
- + 3,0% MEKP zur Aushärtung.

Unbeschleunigten Harzen wird 0,5% Kobalt-Beschleuniger hinzugefügt. Für wasserbelastete Lamine wird N 35 BT gewählt.

Wird die Farbversiegelung mit 20% Farbpaste versetzt, so reichen 5% Farbpaste für den Schlußlack aus.

Erst der **Schlußanstrich mit lufttrocknendem LT-Lack** macht die Farbversiegelung oder das Laminierharz an der Luftseite klebfrei.

Für die Rückseite witterungsbelasteter Teile wird Standard-Schlußlack (LT 30 B der VOSSCHEMIE) eingesetzt. Bei wasserbelasteten Laminaten und bei Auftragstemperaturen von weniger als 18 °C wird LT 35 B (ggf. mit Zusatzbeschleuniger) eingesetzt.

LT-Lack enthält üblicherweise Paraffin, das aus dem noch flüssigen Lack ausschwimmt und ihn gegen Luftzutritt schützt. Wird dieser Vorgang gestört, so entsteht über den daraus resultierenden Styrolverlust eine mangelhaft vernetzte Schicht mit bekannten Nachteilen. Im folgenden wird der Arbeitsablauf und die Ansatzrezeptur für LT 35 B beschrieben.

Wird diese Temperatur auf der Bauteiloberfläche nicht erreicht, so muß er zusätzlich beschleunigt werden. LT 35 B ist im Anlieferungszustand farblos und wird mit Polyester-Farbpasten eingefärbt (Zugabe jeweils 5 % bis 20 %, das sind 50 g bis 200 g Farbpaste auf 1 kg LT-Lack).

Der LT-Lack ist so dünnflüssig, daß ein gleichmäßiges Unterrühren von Farbpasten leicht möglich ist.

Achtung:

Die Farbzugabe zum gesamten LT-Lack geschieht in einem Arbeitsgang, damit ein gleichmäßiger Farbton erreicht wird. MEKP-Härter (und Zusatzbeschleuniger) werden wiederum partieweise (der jeweils innerhalb der Topfzeit verarbeitbaren Menge) zugesetzt.

Bei einer Zugabe von 3 % MEKP-Härter beträgt die **Topfzeit des LT-Lacks** ca. 15 Minuten, so daß jeweils nur die Lackmenge mit Härter versehen werden soll, die mit Sicherheit in diesem Zeitraum verarbeitet wird. Die Topfzeitangabe bezieht sich auf eine Temperatur von 20 °C.

Ist die Formoberfläche kälter, so kann die einwandfreie Aushärtung von LT 35 B durch den Zusatzbeschleuniger DAA (Diäthylanilin) erreicht werden.

Es gelten folgende Rezepturen:

Temperatur am Bauteil	Lack	Farbpasten-Zugabe	Zusatz-Beschleuniger	Härter
18–25 °C	LT 35 B	5–20 %	0 % DAA	3 % MEKP
15 °C	LT 35 B	5–20 %	1 % DAA	3 % MEKP
10 °C	LT 35 B	5–20 %	3 % DAA	3 % MEKP

Rezepturen für Schlußlack LT 35 B

Die Rezepturen in Abhängigkeit von der Temperatur müssen streng eingehalten werden, da sonst die zur klebfreien Aushärtung benötigte kurze Topfzeit überschritten würde. Andererseits darf die Oberfläche beim LT-Lackauftrag nicht wärmer als 25 °C und bei Außenarbeiten auch nicht direkt von der prallen Sonne beschienen sein. Der Verbrauch von LT-Lack beträgt ca. 250 g pro m².

Als Auftragswerkzeug für die Schlußlacke (z. B. LT 35 B) wird meistens ein Fellroller benutzt. Eine bessere Oberfläche erzielt man durch anschließendes Ausstreichen mit einem Feinschichtpinsel quer zur Auftragsrichtung (Kreuzstrich). Ein Mann trägt mit der Rolle den Lack vor und der zweite Mann

streicht unmittelbar hinterher mit dem Pinsel quer zur Auftragsrichtung aus. Auf diese Weise wird der Schlußlack am besten entlüftet. Das ist besonders bei wasserbelasteten Beschichtungen notwendig.

Eine nachträgliche Ausbesserung des noch flüssigen Lacks (Beseitigung von Läufern z. B.), führt mit Sicherheit zu einem Oberflächenfehler. Der Lack kann dann nämlich den für die sachgemäße Aushärtung notwendigen Paraffinfilm an seiner Oberfläche nicht bilden. Dieser Film wird durch jede Nacharbeit zerstört. Die reparierte Stelle wird später von Flüssigkeiten angegriffen. Der LT-Lack muß 8 Tage durchgehärtet sein, bevor er chemisch belastet wird.

Schlußlack-Ansatz für ca. 6 qm Oberfläche:

1,5 kg =	1500 g LT 35 B
+ 20 % = $1500 : 100 \cdot 20$	300 g Farbpaste
<hr/>	
zusammen	1800 g LT 35 B, farbig
+ 3 % = $1800 : 100 \cdot 3 =$	ca. 55 g MEKP-Härter
<hr/>	
ergibt	ca. 1850 g Fertigmateriale

Muß wegen der niedrigen Temperatur mit dem Zusatzbeschleuniger DAA gearbeitet werden, sieht das Rezept folgendermaßen aus.

Beispiel für 10 °C auf der Beckenwand, also LT 35 B mit 3 % Zusatzbeschleuniger:

1,5 kg =	1500 g LT 35 B
+ 20 % = $1500 : 100 \cdot 20 =$	300 g Farbpaste
<hr/>	
zusammen	1800 g LT 35 B, farbig
+ 3 % = $1850 : 100 \cdot 3$	ca. 55 g Zusatzbeschleuniger DAA
zusammen	ca. 1850 g LT-Lack farbig, mit DAA
<hr/>	
+ 3 % = $1800 : 100 \cdot 3 =$	ca. 50 g MEKP-Härter
ergibt	ca. 1900 g Fertigmateriale

Häufige Fehler beim Auftragen des LT-Lacks

Zu niedrige Temperatur des Untergrundes läßt LT-Lack nicht einwandfrei härten. Beim LT-Lack-Auftrag **muß** die Untergrund-Temperatur bekannt sein. Das „Temperaturfühlen“ mit der Hand täuscht häufig sehr.

Eine einfache Methode, die Temperatur der Oberfläche zu messen:

Legen Sie ein Thermometer umgedreht auf den Untergrund und decken Sie es mit einem Stück Alu-Folie ab. Nach 10–15 Minuten können Sie dann die wirkliche Oberflächentemperatur ablesen bzw. Thermostreifen verwenden.

Nacharbeiten des LT-Lack-Auftrags zerstört die Paraffinschicht, die der Lack während der Topfzeit bildet. Das führt zu mangelhaft gehärteten Stellen.

8. 2. 7. Entformung

Bis zur Entformung sollen mindestens 8 Stunden seit den Laminierarbeiten vergangen sein. Kleine und mittlere Formteile (z. B. Boote bis zu 5 m) lassen sich bei sorgfältig aufgebrachtem Trennmittelfilm meist von Hand entformen. Bei der Entformung ist grundsätzlich zu beachten, daß jegliche Gewaltanwendung unterbleiben muß, denn sowohl die Negativform als auch der Kunststoffkörper können leicht beschädigt werden.

Nach der Aufschichtung z. B. eines Bootsrumpfes in voller Wanddicke empfiehlt es sich, etwa 10–30 cm unterhalb der Rumpfoberkante einen Holzklötz in die Bugspitze einzusetzen. Dieser Klötz wird mit 2 bis 3 Lagen Standardmatte übertapeziert, so daß er fest mit dem Rumpf verbunden ist. Er dient zur Aufnahme einer Schlüssel- oder Holzschraube. An dieser Schraube wird der Bootsrumpf aufgehängt, so daß die Form etwa 5 cm über dem Fußboden hängt. Dann beginnt man, die noch am Rumpf haftende Negativform vorsichtig zu lösen.

Bei der Entformung eines Bootes aus einer Polyester-Negativform treten bei der ausgezeichneten Formoberfläche und mit einem guten Trennmittel in der Regel kaum Schwierigkeiten auf. Normalerweise werden zunächst die Seitenwände des Bootes von der Form abgedrückt. Löst sich dabei das Boot nicht vollständig von der Form, so kann zwischen Bootswand und Formwand Wasser eingefüllt werden. Das Boot wird auf diese Weise zum Schwimmen in der Form gezwungen. Falls diese Wasserentformung nicht auf Antrieb erfolgreich ist, so soll man das Wasser einige Zeit einwirken lassen. Das Boot wird sich dann später leicht aus der Form lösen lassen.

Bei einer gewerblichen Polyester-Negativform sind meistens an 2 bis 3 Stellen Wasseranschlußstutzen installiert. Durch diese Stutzen drückt man Leitungswasser zwischen die Wandungen der Negativform und des aufgetapezierten Bootes. So bildet sich eine Wasserblase, die schließlich den ganzen Rumpf mit Wasser benetzt und dadurch Auftrieb zur Entformung erzeugt. Diese Auftriebskraft greift gleichmäßig am gesamten Bootskörper an und richtet am Fertigteil keinen Schaden an. Lediglich sehr flache Formteilpartien (Boden eines Bootes) ohne aufgesetzte Verstärkungen können dabei stärker verformt werden. Verwendet man Druckluft anstelle des Wassers, so vermeidet man diesen Nachteil und behält eine trockene Form.

Beim Ablösen der Bootswand von der Form wird als Werkzeug am besten ein Polyäthylenspachtel benutzt. Dieses flache Instrument wird etwa zur Hälfte zwischen Boot und Form eingeschoben und dann wie ein rollendes Rad entlang dem gesamten umlaufenden Rand geführt. Durchziehen des Spachtels entlang der Formoberfläche verursacht Beschädigungen an der Form und am Boot.

Das Lösen des Formteiles macht sich akustisch durch ein Knistern bemerkbar. Durch leichtes Klopfen mit der geballten Faust oder einem Gummihammer auf die Innenseite der Bootsschale kann der Ablösevorgang beschleunigt werden. Starke Schläge und ein Eisenhammer beschädigen Fertigteile und Form mit Sicherheit.

Beim Bootsbau in einer **Plattenform** werden die Bootsrümpfe in der Regel mit einem horizontalen Klebeflansch versehen. An diesem Klebeflansch kann eine Schraubzwinde angesetzt werden, mit der durch eine Abkantbewegung das Boot aus der Form gelöst wird. Beim Abkanten der Schraubzwinde dient entweder das vordere Stevenholz oder ein Spant der Negativform als Auflage. Bei größeren Booten wird man auf jeden Fall in die Bugpartie des Bootes einen Holzklötzchen mit einlaminiert, der später zur Aufnahme eines Augbolzens dient. Bei der Entformung wird er als Kraftangriffspunkt verwendet.

Manche Boote (wie Nauticus 2 und Cursor) weisen in der hinteren Bootshälfte eine Hinterschneidung auf, so daß ihre Rümpfe nicht nach oben sondern über den Bug aus ihrer Form gezogen werden.

Mit Moltofill ausgespachtelte Stellen lösen sich bei der Entformung und müssen beim Bau des nächsten Bootes neu ausgearbeitet werden. Bei Verwendung von Polyester-Spachtelmasse treten diese Schwierigkeiten nicht auf. Die Entformung mit Hilfe von Wasser ist bei Hartfaserplattenform nicht durchführbar, weil sich das Wasser an den Plattenstößen einen Austrittsweg suchen wird.

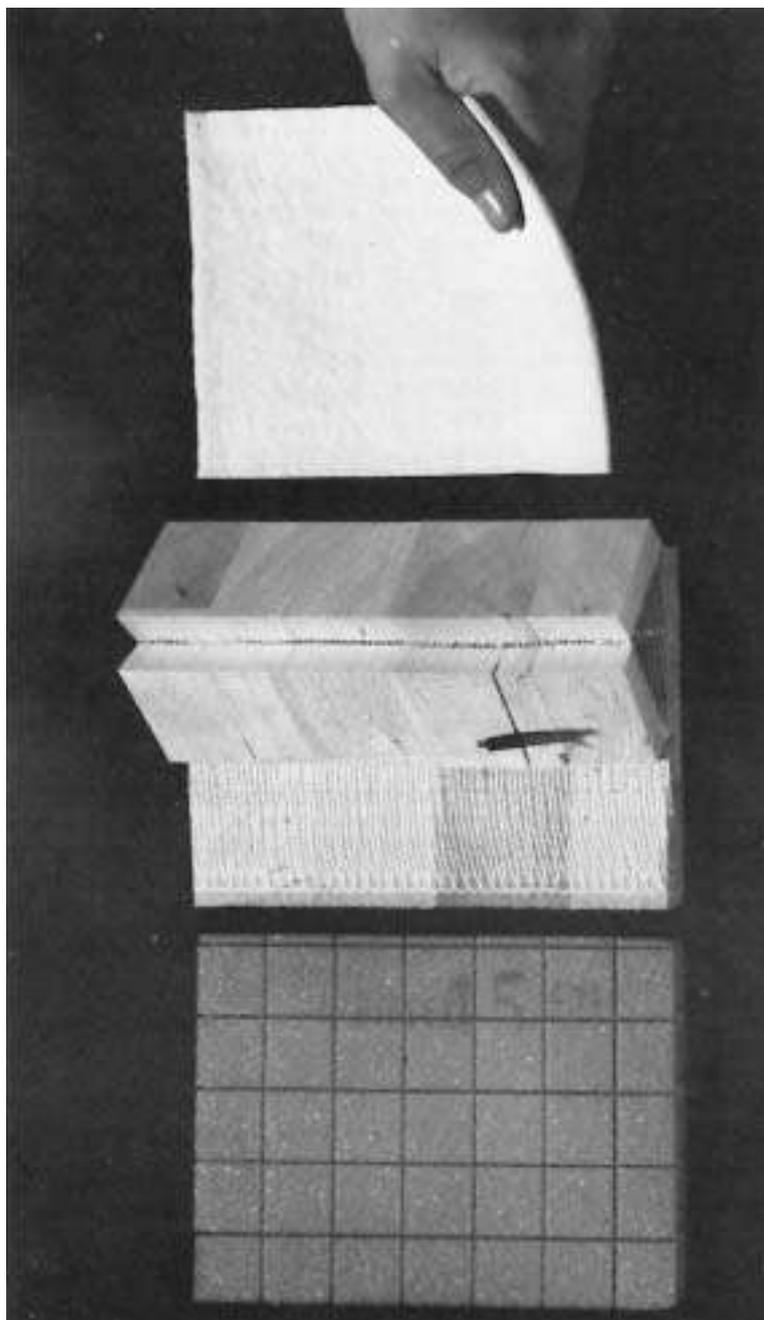
Wenn alle beschriebenen Versuche scheitern, wird nichts anderes übrig bleiben, als die Form von außen abzubauen. Gegenüber einer Polyester-Negativform ist das natürlich eine Mehrarbeit, die sich aber manchmal nicht vermeiden läßt. Auch bei Plattenformen kann mit Luft entformt werden.

8.3. Praktische Hinweise für den Sandwichbau

Unter den verschiedenen Kernwerkstoffen werden Tubuskerne oder Waben mit Epoxidharz-Laminaten im Flugzeugbau verwendet. Deckschichten aus Polyester-Laminaten können durch den Styroldampf in den offenen Hohlräumen des Kernwerkstoffs in der ordnungsgemäßen Aushärtung beeinträchtigt werden. Leicht paraffinierte Harze sind in diesem Fall vorteilhaft.

Für andere Anwendungsbereiche, einschließlich des Bootsbaus, sind in Verbindung mit Polyester nur PVC-Schaumstoffplatten und Matten aus Balsahirnholz von Bedeutung. Neu auf dem Markt sind Saran-Schaumvliese aus dreidimensional gerichteten Synthetik-Fasern mit 50 % Mikro-Zellen.

Sie sind im Hand-, Wickel- und Preßverfahren einsetzbar und sollen die Biegefestigkeit eines Matten-Laminats bei gleichen Kosten auf das Doppelte steigern, bzw. bei vorgegebener Biegefestigkeit gegenüber einer GFK-Voll-



Lieferform von Kernwerkstoffen

Schaumvlies (rechts) ist ein maximal vier Millimeter dicker und schwerer Kernwerkstoff, weil es sich mit Harz vollsaugt. PVC-Schaum (links) und Balsaholz (Mitte) werden zur besseren Anpassung an die gekrümmte Bootsrand in Quaderform geliefert.

wand billiger und leichter sein. Im Gegensatz zu allen anderen Kernwerkstoffen werden sie nicht eingeklebt sondern ohne spezielle Vorbereitung wie Matten und Gewebe auflaminiert.

Da PVC-Schaumplatten als Kernschichten am häufigsten Verwendung finden, werden sie am Beispiel von Conticell®-Platten näher beschrieben.

Allgemeine Merkmale für CONTICELL 60*

Raumgewicht	60 kg/m ³
Farbe	naturfarben
Struktur	zäh-hart
geschlossene Zellen	100 %
Zellengröße	1,0 bis 1,5 mm

Mechanische Werte:

Druckfestigkeit	0,8 M Pa	DIN 53 421
Biegefestigkeit	1,2 M Pa	DIN 53 423
Scherfestigkeit	2,8 M Pa	DIN 53 422
Zugfestigkeit	1,6 M Pa	DIN 53 571

Thermische Eigenschaften:

Wärmeleitzahl	0,035 W/mk	DIN 52 612 bei 10 °C
spezifische Wärme	0,31 Wh/kg · K	
Temperatur-Anwendungsbereich	– 200 bis + 80 °C	
Brennbarkeit	schwer brennbar und selbstlöschend	

Beständigkeits-Eigenschaften:

Wasseraufnahme	0,2 Vol. %	DIN 53 248 bei 20 °C
Wasserdampf-Durchlässigkeit	2,4 g/m ² d	nach 28 Tagen in Anlehnung an DIN 53 122 bei 40 mm Dicke
Diffusion-Widerstands- faktor	328	
Witterungsbeständigkeit	beständig (dunkelt leicht nach)	

CONTICELL wird mit Holzwerkzeugen bearbeitet. Es kann bei Erwärmung ab 90 °C aufwärts zylindrisch und sphärisch verformt werden.

Die Herstellung von **Sandwich-Teilen mit glatter Außenhaut** wird in einer Negativ-Form vorgenommen. Die äußere Deckschicht wird gefertigt und der Kernwerkstoff aufgeklebt. Der dabei notwendige Druck wird mit Vakuum (Wasserstrahl-Pumpe) unter einer Folienabdeckung in der Form vorgenommen. Ohne Vakuum können nur kleine Schaumplatten von 20 cm · 20 cm eingeklebt werden.

Besonders preisgünstig ist das Sandwich-Verfahren bei der Bauweise mit einem **Leistenkern** (Stableisten-Form). Dabei erhält man beidseitig raue Oberflächen (Nacharbeit auf der Sichtseite).

* Herstellerangaben

Die Stableistenform wird um die Wandungsstärke des Sandwichs kleiner als das Fertigteil (Boot) gebaut. Auf diese Form werden die Sandwich-Schaumkernstreifen aufgelegt und mit kleinen Nägeln oder Klammern festgeheftet. Der Schaumkörper wird dann auf seiner Außenseite mit Polyester + Glasseide überzogen. Die Stableistenform auf der Innenseite wird dann entfernt und die Innenseite der Kernschicht mit Polyester + Glasseide auf laminiert.

Eine interessante Abwandlung dieses Verfahren ist die Benutzung z. B. eines alten und bewährten Bootes als Form, auf die dann die Kernschicht geheftet wird. Das Sandwich-Boot wird lediglich um Sandwichplattenstärke größer als das Vorbild. Es ist auf diese einfache Weise möglich, das Abbild eines bewährten Bootes in modernster Bauweise zu erhalten. Außerdem sind Veränderungen beim Sandwichboot gegenüber dem Vorbild zu verwirklichen (z. B. Vergrößerung des Freibords, Vergrößerung der Kajüte usw).

8. 3. 1. Einbau von PVC-Schaumplatten, Balsamatten und Schaumvlies

Da die Poren an der Schaumstoff-Oberfläche beim Schneiden in Plattenform geöffnet werden, bilden sich kleine Vertiefungen, die für eine feste Verankerung des Schaumes auf der äußeren Deckschicht sorgen. Andererseits saugen diese Vertiefungen (Porenhohlräume) Harz aus der Verstärkung ab. Sie werden deshalb mit Polyesterspachtelmasse oder einem Schnellversiegelungsharz vorbehandelt, ehe sie verlegt werden.

Das Anpassen der Schaumstoffplatten ist bei kleinen Platteneinheiten – besser noch bei Streifen – leichter als bei großen Abmessungen. CONTI-CELL[®]-Platten können im Temperaturbereich von 90 bis 110 °C verformt werden. Zur Erwärmung sind Infrarotstrahler oder ein Trockenofen geeignet. Einer Verformung per Hand setzt der PVC-Schaum nur geringen Widerstand entgegen. Am günstigsten werden die Schaumplatten an die Form angepaßt. Man hat so die Gewähr, daß sie mit der Bootskontur gut übereinstimmen. Dünne Schaumplatten sind verständlicherweise leichter zu verformen als dickere.

Für eine einwandfreie Verklebung ist ein möglichst gleichmäßiger Kontaktdruck nötig. Dieser Druck ist gering (etwa 1 kp/m²), soll jedoch an allen Stellen wirksam sein. Gewerbliche Hersteller bedienen sich deshalb meistens der Vakuum-Methode.

Zur Abdeckung können im Handel befindliche Folien benutzt werden, die mit Hilfe von Tesa-Band so aneinander geklebt werden, daß sie das Formteil reichlich überdecken. Die eingelegte Folie muß am Formrand luftdicht aufgeklebt werden. Bei selbstgefertigten Formen kann man auch eine mit einer ca. 1 cm tiefen Nut versehenen Leiste anbringen, in die dieser Folienrand mit einem unter Zug stehenden Gummiband hineingedrückt wird.

Der Raum zwischen Folie und Form wird über einen Schlauch mit der Vakuum-Pumpe verbunden, die dann in Tätigkeit gesetzt wird. Die undichten Stellen können sehr schnell durch ihr saugendes Geräusch aufgespürt werden. Die zu reichlich bemessene Folie wird sich dann in Falten über die Schaumplatten legen. Da die Falten durch den Unterdruck gezogen werden, spielen sie keine Rolle.



Einbau von PVC-Schaum mit Vakuum

Der Rumpf ist zwischen der Negativform außen und der Polyäthylen-Folie innen luftdicht eingeschlossen. Der erforderliche Unterdruck von mindestens 600 g/m^2 wird durch Absaugen der Luft über eine Pumpe erzeugt. (Werkbild: Continental)

Die explosionsgeschützte Vakuum-Pumpe sollte etwa über die zweifache Topfzeit laufen, um eine sichere Verklebung zu produzieren. Dann geht es mit einer Mattenlage auf der harzversiegelten Schaumoberseite weiter.

Balsa-Matten werden bei Serienbooten aus einer Negativform kurz vor dem Auflegen auf der Kontaktseite (meistens die Seite ohne das Gewebe) satt mit Harz + Härter imprägniert. So werden sie auf die noch oder wieder harzfeuchte Matte gelegt und mit der Fellrolle sorgfältig festgedrückt. Ist



Sandwich-Rumpf mit Balsa-Holz

Die Balsa-Quader sind durch ein Gewebe in Mattenform zusammengehalten und auf diese Weise schnell und einfach zu verlegen. An sehr hoch beanspruchten Stellen, wie im Kielbereich, wird das Sandwich-Laminat in eine einschalige Wand überführt (Werkfoto: Copencraft).

genügend Harz im Untergrund, so tritt es beim Festdrücken bereits oben aus der Holzfläche aus (Fläche wird dunkler).

Dann wird von oben her Harz nachgetragen und das Gewebe, das sich inzwischen durch die Harzeinwirkung gelöst hat, abgetrennt. Man läßt die Balsa-Schicht anhärteln (Ablauf der Topfzeit abwarten) und legt dann wieder als erste Lage eine Matte auf.

Beim Einzelbau über den Leistenkern werden die mit der Gewebeseite zum Kern hin aufgehängten Balsa-Matten in den Nuten abgespachtelt, wenn die Klötzchen mehr als etwa drei Millimeter große Zwischenräume bilden. Dann werden sie mit Abstand von fünf Minuten zweimal auf der ersten Teilfläche satt mit Harz getränkt, ehe die erste Mattenlage auftapeziert wird. Die nächste Lage kann naß in naß aufgelegt werden. Es wird bis zur vollen Laminat-Dicke auflaminiert und das Finish hergestellt. Ist der Kern gedreht, wird auf der Rückseite genauso verfahren.

Schaumvlies P 2424 wird auf die satt mit Harz + Härter vorgerollte oder noch nasse, also harzfeuchte, letzte Lage gelegt und zusätzlich von oben her mit Harz + Härter durchtränkt. Je Millimeter Schaumvlies sind etwa 500 g/m² Harz notwendig, die vor Auflegen des Vlieses auf dem Untergrund verteilt werden. Dann wird das Vlies erst aufgelegt.

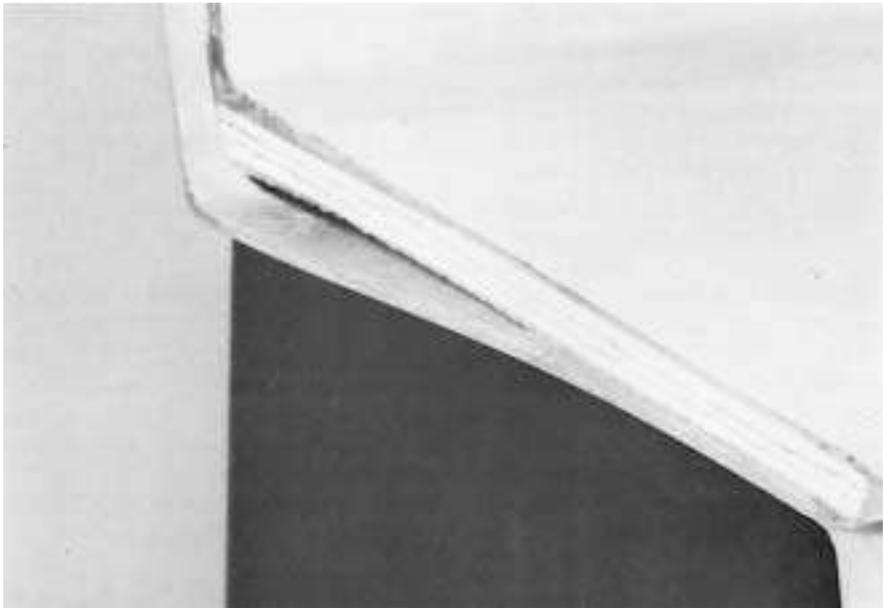
Um keine zu hohen Temperaturen im Laminat zu erhalten, läßt man nicht mehr als fünf Millimeter Laminat auf einmal aushärten. Das kann z. B. eine 4-mm-Schaumvlies-Schicht und 1 Lage 450 g/m²-Matte sein oder eine Lage 450 g/m² auf der Unterseite, eine 3-mm-Schicht P 2424 und eine Lage 450 g/m² auf der Oberseite. Ist die Oberfläche dieser Schicht wieder kühl, so wird die nächste Lage auftapeziert.

8. 3. 2. Kraffteinleitung und Wanddickenänderungen im Sandwich

Alle Kräfte, die in eine Sandwichwandung eingeleitet werden, müssen stets auf beide Deckschichten und so übertragen werden, daß ein Verschieben beider Deckschichten am Kraftangriffspunkt nicht möglich ist. Bei Belastungen in Richtung der Wand und senkrecht dazu werden am einfachsten Sperrholzbrettchen von Kernschichtdicke eingeklebt, die zuvor mit G 4 grundiert wurden. Die Brettchen sollen großflächig sein und abgerundete Ecken haben. Etwas aufwendiger ist das Ersetzen der Kernschicht am Kraftangriffspunkt durch das Polyester-Laminat.

Werden Schrauben in die Sandwichwand eingebracht, sollen sie in Metall- oder Plastikhiüsen geführt sein.

Die sicherste Lösung, um eingeleitete Kräfte gleichmäßig auf beide Deckschichten zu verteilen, wird durch das Zusammenführen der beiden Deckschichten im Kraftangriffspunkt erreicht. Bei dieser Lösung muß jedoch dem durch Wegfall der Kernschicht verringerten Widerstandsmoment Rechnung getragen werden, um ein Ein- oder Ausbeulen der Wand zu verhindern.



Deck mit Schaumvlies P 2424

Durch Einbau von 3 vier Millimeter dicken P 2424-Vliesen konnte das Laminatgewicht im Laufdeck bei dieser Sturgeon von 15,6 auf 12,5, also um $3,1 \text{ kg/m}^2$, gesenkt werden. (Werkfoto: Firet)

Übergänge von einer dicken zu einer dünnen Kernschicht oder vom Sandwich- zum Voll-Laminat sollen in der Art einer Schäftung durchgeführt werden. Dabei beträgt die Länge der abgeschrägten Kernfläche etwa das 7 bis 10fache der Kerndicke. Ein plötzliches Ansteigen oder Vermindern von Wandungsstärken stört den Kraftlinienverlauf und ergibt Spannungsspitzen und ist strikt zu vermeiden.

Die Verbindung zweier Sandwichplatten miteinander ist um so besser, je weiter die Verklebungsstellen der beiden äußeren Deckschichten, beider Kernschichten und der inneren Deckschichten voneinander entfernt sind.

8. 3. 3. Hochbeanspruchte Sandwich-Bauteile

Soll in einer Negativ-Form eine Sandwich-Konstruktion gebaut werden, die so hoch beansprucht ist, daß die Festigkeit von PVC-Schäumen mit Sicherheit überschritten wird, so kann das neuartige Sandwich-Verfahren mit einlamierten GFK-(glasfaserverstärkten Kunststoff-)Stegen angewendet werden. Diese Bauart empfiehlt sich außerdem in der Nähe von Kraftangriffspunkten, um eine gleichmäßige Krafteinleitung in beide Deckschichten bzw. einen erhöhten Biege widerstand in dieser stark gefährdeten Zone zu erreichen.

Es handelt sich bildlich gesprochen um eine Sandwich-Konstruktion mit einem schachbrettartigen Waffelmuster, wobei erst nur die „schwarzen Felder“ beschichtet werden und im Anschluß die „weißen Felder“ eingelegt werden.

Zunächst wird, wie bei einem normalen Sandwich, die äußere Deckschicht in die Negativ-Form eingebracht. Im Gegensatz zu dem bekannten Sandwich-Verfahren werden bei dieser Variation nicht geschlossene Platten oder Streifen, sondern Schaumstoffabschnitte in Tafelform eingebracht. Die Tafeln können Formate zwischen 200 mm · 200 mm und 50 mm · 50 mm aufweisen.

Bei der Vorbereitung soll zwischen jeder Tafel ein Abstand von 2,5 mm offen gelassen werden. Um das Einlaminiere zu vereinfachen, ist es von Vorteil, wenn die zuerst eingelegten „schwarzen Felder“ auf der der Luft zugekehrten Plattenfläche kleiner gehalten werden als die Auflagefläche auf der äußeren Deckschicht. Die schmalen Seiten der Platten können mit einem Winkel von 45° gegen die Senkrechte geneigt werden. Die Gegenplatten müssen dann aber entsprechend geschnitten sein, so daß die Seitenwände untereinander wieder parallel verlaufen. Auf diese Weise kann die erste Plattengarnitur einfacher übertapeziert werden.

Zunächst werden nur die „schwarzen Felder“ mit Schaumplatten besetzt. Man erhält also ein schachbrettartiges Muster, das abwechselnd durch die äußere Deckschicht und eingelegte Schaumplatten gebildet wird. Dieses Schachbrett wird jetzt mit 2 Lagen Standardmatte übertapeziert, so daß sich eine Berg- und Tal-Kontur ergibt.

Im nächsten Arbeitsgang werden die Täler mit den restlichen Schaumstoffplatten ausgelegt, so daß sich jetzt wieder eine geschlossene Fläche ergibt. Auf einen Anschluß der eingelegten Schaumstoffplatten ist zu achten (evtl. spachteln). Höhenunterschiede sollen mit getränkten Glasmatten geebnet werden, sobald sie 1 mm überschreiten. Bei kleineren Höhenunterschieden reicht Polyester-Spachtelmasse zur Egalisierung.

Als letzter Arbeitsgang wird auf den planen (wichtig!) Sandwichkern mit Stegen in bekannter Weise die innere Deckschicht eingebracht. Ist die Kernschicht nicht plan, besteht die Gefahr des Knitterns der inneren Deckschicht unter Belastung.

Als Schaumplatten werden auch bei dieser Ausführung Conticell-Schäume verwendet.

Durch diese Konstruktion wird ein äußerst verschiebungsstarker Verbund zwischen den beiden Deckschichten erreicht. Das Material wird dann am besten genutzt, wenn die Stege entlang der Hauptspannungsrichtungen, also jeweils zum Kraftangriffspunkt hin, verlegt werden.

Liegt der Kraftangriffspunkt genau fest, so empfiehlt es sich, die Stege strahlenförmig zu diesem Punkt hinlaufen zu lassen. Durch die kleine Plattengröße wird außerdem das Einkleben der Kernschicht sehr erleichtert. Die einzelnen Platten brauchen durchaus nicht rechteckig zu sein.

8.4. Verbindungen

Große Kräfte sollen in GFK-Teile großflächig und nicht als Punktlast eingeleitet werden. Blindnieten oder Schrauben (mit großen Unterlegscheiben) wird man also nur bei niedriger Beanspruchung zulassen. Will man Kräfte übertragen, wird man also möglichst eine Klebverbindung wählen. Sie ist die gleichmäßigste Kräfteinleitung zwischen Bauteilen und die wasserdichteste. Dabei können freilich Blindnieten oder Schrauben als Montagehilfe dienen und für den notwendigen Anpreßdruck sorgen.

8.4.1. G 4 – Haftvermittler für GFK auf anderen Werkstoffen

Polyesterharz hat auf den meisten Werkstoffen keine ausreichende Klebkraft. Eine wesentliche Verbesserung wird mit dem Haftvermittler G 4 der VOSSCHEMIE erreicht. Dieses Material besitzt ausgezeichnete Haftung auf Holz, Beton und Metall.

Der Einkomponenten-Werkstoff auf Polyurethan-Basis enthält brennbare Lösungsmittel. Nachdem sie verdunstet sind, erfolgt die Härtung mit Hilfe von Luftfeuchtigkeit oder Wasser, das in Holz oder Beton usw. zur Genüge vorhanden ist. Es handelt sich hier also eigentlich um ein Zweikomponenten-System, wobei die zweite Komponente nicht hinzugegeben werden muß.

Bei der Verwendung als Haftgrund für Holz wird G 4 satt aufgerollt. Es zieht tief in die Holzporen ein, wobei die Eigenfestigkeit des Holzes in der Grenzschicht verstärkt wird. Auf diesem Haftgrund hat wiederum Polyesterharz eine ausgezeichnete Haftung, wenn man die Kontaktzeit von 0,5 bis 4 Stunden nicht überschreitet.

Früher wurde als Haftgrundierung eine Harz-Styrol-Kombination eingesetzt. Obwohl die Erfolge hiermit gut sind, hat sich herausgestellt, daß G 4 besser haftet und auch bei etwas feuchteren Hölzern einwandfrei aushärtet. Die Haftfestigkeit auf gesandstrahltem Stahlblech liegt bei 150 kg/cm².

Die Polyester-Beschichtung muß innerhalb von vier Stunden nach Aufbringen der Haftgrundierung beendet sein, denn das Polyesterharz muß noch mit der Oberfläche der Haftgrundierung reagieren, damit zwischen diesen beiden Stoffen eine chemisch einwandfreie Verbindung eintritt.

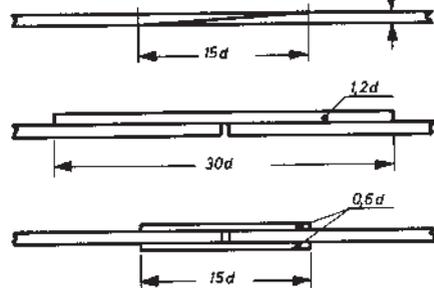
8.4.2. Kleben von GFK auf GFK

Als Zugscherfestigkeit können etwa 80 kg/cm² bei 20 °C für ein UP-Klebarharz mit höherer Wärmebeständigkeit (evtl. mit 8 bis 10 % Polyisocyanat-Zusatz) eingesetzt werden, kurzzeitig 120 kg/cm². Da die Klebschichtdicke unter 0,2 Millimetern liegen sollte, wird bei nicht planem Klebflächen stets ein Mattenstreifen zum „Niveau“-Ausgleich mit eingelegt. Wie bei einer Schraube nur die ersten drei Gänge tragen, so trägt eine Verklebung auf dem ersten Zentimeter Breite am Rand, auf den Quadratzentimeter bezogen, am meisten.

Verklebung von zwei GFK-Teilen

Die Klebbreite auf jedem Einzelteil soll etwa $15d$ betragen.

Eine Schäftung (obere Skizze) ist bei dünnen Bauteilen praktisch nicht durchführbar.



Geht man davon aus, daß die Klebflächen uneben sind, kann man etwa folgende Reihenfolge für Verklebungen mit besserer Haltbarkeit aufstellen:

1. Leicht gefülltes Standardharz.
2. Mechanisch höherwertiges Harz (N 30, I 25 B, I 26 B, N 35 BT, N 36 BT) mit Kurzfasern.
3. Mechanisch höherwertiges Harz + Mattestreifen.
4. Mechanisch höherwertiges Harz mit Kurzfasern + Mattestreifen.

Der Zusatz von Polyisocyanat hat bei Standardharzen seine Berechtigung, bei höherwertigen UP-Harzen bringt er keine Vorteile mehr.

Epoxi-Harze als Kleber ergeben höhere Zugscherfestigkeiten. Sie müssen dann jedoch warm ausgehärtet und später vor Nässe geschützt werden.

Die Klebbreiten sollen etwa $15d$ betragen, wobei d jeweils die größere Wanddicke ist. Werden zwei Bauteile stumpf gestoßen, werden eine Lasche $2 \times 15d = 30d$ und zwei Laschen mit je einer Dicke von $0,6d$ $15d$ lang (siehe Zeichnung).

Die Klebflächen müssen sorgfältig vorbereitet sein und die folgenden sechs Eigenschaften besitzen:

1. plan aufeinanderliegen,
2. möglichst rau sein (Körnung 16),
3. während der Verklebung unter Druck zu setzen sein,
4. fettfrei sein,
5. sauber, also frei von losen Teilen wie Schleifstaub und
6. trocken sein.

Zum Entstauben verwendet man am besten Styrol, dann wird der sechste Punkt wenigstens nicht vom Reinigungsmittel her unterlaufen. Styrolreste sind Bestandteil der UP-Klebharze und daher in kleinen Mengen unschädlich.

8.4.3. Nieten und Schrauben

Als Montagehilfe und bei kleineren Booten werden gern Blindnieten verwendet, wenn die Verbindung nur von einer Seite her zugänglich ist. Durch Unterlegen von Scheiben auf beiden Seiten wird eine Zerstörung des Laminats durch den aufgestauchten Niet vermieden. Der Abstand der Nieten vom Rand und untereinander sollte, wie in der Skizze gezeigt, mindestens der

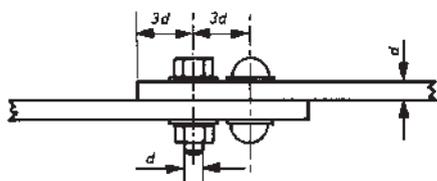


Abb. 43

Nieten oder Schrauben von GFK-Teilen

Der Abstand von Nieten und Schrauben untereinander soll mindestens gleich dem dreifachen Schaftdurchmesser und seitlich versetzt sein. Stets Unterlegscheiben mitverwenden!

dreifache Niet-Durchmesser sein. Das gilt für eine GFK-GFK- wie für eine Alu-Verbindung. Bei zwei GFK-Teilen wird man stets – schon der Dichtigkeit wegen – einen harzgetränkten Mattestreifen in die Nietfläche einlegen. Dieser Rat gilt auch für Schraubverbindungen. Um Beschädigungen im GFK zu vermeiden, werden nur Schrauben mit Muttern und zwei (ruhig eine Nummer zu große) Unterlegscheiben verwendet. Die Abstände der Muttern und Nieten untereinander und vom Rand wird gleich gehandhabt (siehe Skizze).

8.5. Fehler und ihre Beseitigung

Handverfahren

In diesem Zusammenhang wird auch auf Kapitel 9 verwiesen.

Fehler	Ursache	Abhilfe
Harz, LT-Lack oder Feinschicht werden nicht hart	Härter oder Beschleuniger wurden vergessen	Die nicht gelierte Schicht muß mit Reinigungsmitteln wieder abgewaschen werden
einige Harzstellen werden nicht hart	MEKP-Härter schlecht verrührt	Die Stellen mit einem Heizlüfter erwärmen, notfalls entfernen
Kobalt-beschleunigtes Harz geliert trotz Härterzugabe nicht	1. Über 5 % MEKP-Härter eingerührt 2. Harz hat länger als 6 Monate gelagert	Formteil mit einem Heizlüfter tempern, dem restlichen Harzansatz reines Harz zumischen sog. Kobalt-Drift, Beschleuniger zusetzen

Harz geliert zu schnell	Temperatur zu hoch, zu viel MEKP-Härter oder zu viel Kobalt-Beschleuniger	Nur 1 oder 2 % (20 g oder 10 g) MEKP-Härter zugeben, Gelzeit-Test machen, Harzansatz mit reiner Ware verdünnen
Luftblasen im flüssigen Laminat	Luft wurde zwischen den Glasfäden eingeschlossen	Austupfen mit einem Pinsel, Auswalzen mit einem Scheibenroller
Harz schäumt	zu viel MEKP-Härter	Nur 3 % MEKP-Härter verwenden, das sind 30 g MEKP-Härter je beschleunigtes kg Feinschicht, Harz oder LT-Lack
Runzelbildung (Elefantenhaut) in der Feinschicht	1. Temperatur zu niedrig, dadurch zu lange Topfzeit	Temperatur erhöhen
	2. Frühzeitige Harzeinwirkung auf nicht vollausgehärtete Feinschicht	Länger warten oder Schnellversiegelung durchführen
	3. Zu wenig Beschleuniger, dadurch Topfzeit zu lang	Mehr Beschleuniger einsetzen, Topfzeit kontrollieren
Luftblasen im ausgehärteten Laminat	Ungenügende Entlüftung des Laminats	Größere Hohlräume öffnen und mit beschleunigtem Harz oder Polyesterspachtelmasse auffüllen
Formteil löst sich schwer von der Form	Trennmittel vergessen oder schlecht verteilt	2 × Trennwachs, 1 × Trennlack in die Form einbringen
Stellenweise Weißfärbung im Laminat	1. Einfluß von Lösungsmitteln oder Wasser	Werkzeuge nach dem Reinigen gut ausschlagen bzw. trocknen
	2. Verstärkungsmittel waren feucht	Trockene Verstärkungsmittel einsetzen, sorgfältiger lagern

Faserspritzverfahren

Fehler	Ursache	Abhilfe
Mangelhafte oder fehlende Härtung des Laminats	Zu geringe Härtemenge	Verstopfte Leitungen oder Düsen, reinigen, Dosierung kontrollieren
Starke Wanddickenunterschiede	Ungleichmäßiger Material-Auftrag	Pistole besser führen, anderen Roving wählen
Zu geringe Laminat-Festigkeit	1. Glasgehalt zu niedrig 2. Faserlänge zu gering	Weniger Harz verwenden Größere Faserlänge
Statische Aufladung des Rovingstranges	Ungeeigneter Schneid-Roving oder zu großer Anpreßdruck der Walzen im Schneidwerk	Roving wechseln, Luftfeuchtigkeit im Arbeitsraum erhöhen, Anpreßdruck im Schneidwerk verringern
Laminat sinkt an der Senkrechten ab	1. Zu wenig Harzanteil (19) 2. Schlechte Faserbenetzung (19) 3. Zu großer Harzanteil	Zu 1. und 2.: Harzviskosität senken (500–600 cP), dadurch wird mehr Harz gefördert und die Faser besser benetzt Harz thixotropieren od. Glasanteil erhöhen

KALT-PRESSVERFAHREN

Fehler	Ursache	Abhilfe
Matte Oberfläche	1. Werkzeugoberfläche stumpf 2. Einfluß des Trennmittels 3. Werkzeug wird nicht ausgefüllt	Nachpolieren Weniger oder anderes Trennmittel verwenden Mehr Harz oder dickere Verstärkung verwenden
Formling haftet auf der Patrize	Schrumpf des Formstücks	Konizität der Patrize vergrößern
Fertigkeitsunterschiede im Werkstück	Ausrichtung der Glasfäden im Harzstrom	Presse langsamer schließen, Matte mit unlöslichem Binder oder Endlosmatte verwenden

9. Erfolgreiche gewerbliche Verarbeitung mit speziellen Hinweisen für die Herstellung wasserbelasteter Lamine

9. 1. 1. Allgemeine Hinweise

Für die Einrichtung einer GFK-Produktion, der Lagerung der Grundstoffe und die Sicherheitsvorschriften bei der Verarbeitung verweise ich auf das „Merkblatt für die Verarbeitung von Polyester- und Epoxidharzen“ der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Verlag CHEMIE GMBH, Weinheim/Bergstraße, Bestell-Nr. A 6. „Regeln für die Verarbeitung von Polyester- und Epoxidharzen“ der Berufsgenossenschaft sind diesem Kapitel angefügt.

Besonders auf die getrennte Lagerung von Beschleunigern und Peroxiden und von Lösungsmitteln außerhalb des Arbeitsraums wird hingewiesen, um möglichen Gefahren bei der GFK-Verarbeitung vorzubeugen. Dazu gehört auch die sorgfältige Handhabung der Flüssigkeiten, um gesundheitliche Schäden zu vermeiden.

Um eine Fertigung mit gesicherter Qualität aufzuziehen, sind neben qualitativ festgelegten Grundstoffen erfahrungsgemäß vor allem konstante Bedingungen bei der Fertigung von größter Wichtigkeit. Allein gleichbleibende Fertigungsbedingungen erlauben es, eventuellen Fehlern auf die Spur zu kommen. Dabei ist den folgenden Voraussetzungen Aufmerksamkeit zu schenken:

- a) Es ist darauf zu achten, daß die **Temperatur** der einzelnen Harzansätze vor der Verarbeitung **gleich** ist, möglichst zwischen 18 ° und 20 °C, um die Topfzeiten sicher einstellen zu können. Diese Forderung bedingt, das wenigstens die zur Verarbeitung gelangenden Harze in einem entsprechend temperierten Raum aufbewahrt werden.

Die Temperatur in der Fertigungshalle wird stets als eine Schlüsselgröße bei der Herstellung qualitativ hochwertiger Fertigteile hervorgehoben. Das ist im Prinzip richtig. Gemeint (und wichtig) ist folgendes: Die Formoberfläche bzw. das zum Teil aufgebrachte Laminat braucht gewisse Mindesttemperaturen für eine ordnungsgemäße Aushärtung. So hat z. B. eine Form, die die Nacht über draußen bei + 5 °C gelagert hat, auch in der Halle mit 20 °C nach 2 Stunden Lagerung erst 12 °C, ist also nicht betriebsbereit. Um sicher zu sein, daß Form- und Raumtemperatur übereinstimmen, sollte eine Großform 24 Stunden lang bei Solltemperatur gelagert werden.

Empfohlene Temperaturen für die Verarbeitung einiger Harze

Harz:	Formtemperatur bzw. Untergrundtemperatur:
G 327 B, G 340 B	mindestens 20 °C (max. 25 °C)
i 25 B, T 40 B	mindestens 15 °C (max. 25 °C)
N 50 oder AZUR	mindestens 12 °C (max. 25 °C)
N 35 BT, T 40 BT	mindestens 18 °C (max. 25 °C)
LT 30/35/40 (B)	mindestens 18 °C (max. 25 °C)

Die Feinschicht G 327 B, das Laminierharz i 25 B und das chemikalienbeständige Harz T 40 sind also in der Temperaturführung anspruchsvoller als Standardharze. Dieser Tatsache kann am einfachsten mit einer temperierten Form Rechnung getragen werden.

Wird bei zu niedrigen Temperaturen gearbeitet, so steigen bei festen Rezepten die Topfzeiten und damit die Styrolverluste der Harze (besonders der Feinschicht) an. Das führt zu Untervernetzung und damit schlechter Chemikalienbeständigkeit.

- b) Insbesondere die **Topfzeit** der Feinschicht, aber auch des Laminierharzes ist in Abstimmung mit der herrschenden Temperatur möglichst gleichmäßig lang zu halten. Die Einstellung der Topfzeit ist mit Hilfe einer angemessenen Beschleunigerzugabe entsprechend zu regulieren.

Feinschichten müssen mindestens mit 1 ‰, Laminierharze mindestens mit 0,2 ‰ Kobaltbeschleuniger versehen werden, wenn sie nicht schon vom Hersteller vorbeschleunigt sind.

Wird bei gleichbleibenden Temperaturen gearbeitet, so brauchen Beschleuniger- und Härterzugaben nicht verändert werden. Das enthebt den Verarbeiter jedoch nicht der Verpflichtung, beim Anbrechen neuer Gebinde eine **Topfzeit-Kontrolle** durchzuführen.

Für die Feinschicht wird eine Topfzeit von 10 bis maximal 20 Minuten vorgeschrieben.

Die Topfzeit von Laminierharzen sollte in einer Größenordnung von 45 Minuten liegen. Wird eine längere Topfzeit für Laminierharze gewünscht, so muß mit Inhibitor gearbeitet werden. Alle **Topfzeitangaben** beziehen sich auf die Temperatur von 20 °C und gelten für den Becherversuch mit einem 100-g-Ansatz. Die Topfzeit von 15 Minuten im 100-g-Becher wächst auf einer schlechtleitenden Formenoberfläche etwa um 3 Minuten an, sofern sie auf 20 °C temperiert ist. Bei Metallformen kann sich die Topfzeit jedoch erheblich verlängern. Die Topfzeit im Becher muß dann z. B. auf 10 Minuten verkürzt werden. Die Harzansätze werden entsprechend kleiner gewählt.

- c) Das **Herstellen aller Mischungen** sollte in der Hand eines Mitarbeiters bleiben. Man hat festgestellt, daß ein Wechsel dieser Aufgaben oft zu Unregelmäßigkeiten in der Fertigung führt.

Große Aufmerksamkeit ist ebenfalls dem **Rührorgan** zu widmen. Hier bietet die VOSSCHEMIE in ihrem Werkzeugsortiment geeignete Mischer an, die das Mischgut stark verwirbeln. Mischorgane, wie sie die Lackindustrie verwendet (Lochscheiben), sind zu verwerfen. Das Vermischen sollte idealerweise stets von demselben Mann mit demselben Rührer und mit derselben Antriebsmaschine über eine festgelegte Zeit (Kontrolle mit der Uhr) erfolgen, um Mischfehler so weit wie möglich auszuschalten.

Mischfehler sind eine häufige Fehlerart bei Harzansätzen.

- d) Das **Absaugen von Styroldunst**, wie er beim Laminieren frei wird, ist nicht nur für die dort Arbeitenden notwendig, sondern auch für ein Gelingen des Fertigteils von großem Einfluß. Gerade im Großbauteil ist nicht selten eine stark styroldampfbeladene Atmosphäre anzutreffen, die so stark sein kann, daß das Werkstück vom Styroldampf wieder angelöst wird. Das gilt besonders bei Auftragen der Feinschicht, die im Falle einer Nichtbeachtung Schädigungen in Gestalt von Elefantenhaut aufweisen kann. Es sei auch erwähnt, daß eine styrolbeladene Atmosphäre die Verpuffungsgefahr steigert.

Für den Arbeitsraum ist mindestens ein dreimaliger Luftwechsel je Stunde notwendig. Dieser Luftwechsel reicht nur dann, wenn zusätzlich Styroldampf an jedem Arbeitsplatz abgesaugt wird.

9. 1. 2. Baubuch und Werkstückmuster

Es wird empfohlen, zumindest **bei der Herstellung großer Bauteile**, ein Baubuch zu führen und jeweils entsprechend dem Werkstück eine Laminatprobe aus den gleichen Werkstoffen mitzufertigen. Diese Probe gilt einmal der **Eigenkontrolle** und kann außerdem für den Fall eines vom Abnehmer geltend gemachten Anspruchs als **Qualitätsbeweis** oder als Prüfmuster verwendet werden. Solche Muster sind außerdem in der **Werbung** äußerst dienlich.

Das Baubuch sollte ebenfalls unter dem Gesichtspunkt des Qualitätsnachweises, aber ebenso als **Kontrollbuch der Fertigung** betrachtet werden.

Im Baubuch muß enthalten sein:

Die Bau-Nr.	(Fortlaufende Numerierung),
die Objekt-Nr.	(z. B. Boot, Typ A, Nr. 1)
Fertigungsstelle	(Betrieb in _____, Form Nr. _____),
Mischungen hergestellt von	
Vorarbeiter:	
Arbeiter:	

Die einzelnen Fertigungsabschnitte wiederholen sich dann etwa wie folgt:

Datum:
Arbeitsgang: (Auftrag der Feinschicht)
von Uhr bis Uhr
Raumtemperatur: °C
Formentemperatur: °C
Verwendete Werkstoffe: kg Feinschichharz, Typ Liefer-Nr.
vom:
kg Kobaltbeschleuniger, Typ Liefer-Nr.
vom:
kg MEKP-Härter usw.
Probezeit im 100-g-Becher-Ansatz: Minuten
Verstärkungsmaterial: m² g-Matte, pulver-/emulsionsgebunden,
Liefer-Nr. vom:

Das Baubuch schließt für jedes Werkstück mit den Eintragungen:

Temperung des Werkstücks von bis bei
Entformt am: Nacharbeiten:

Das Baubuch ist eine wertvolle Unterlage für die Kalkulation bzw. Nachkalkulation eines Werkstücks. Es kann auch einer Akkordentlohnung zugrunde gelegt werden.

9. 1. 3. Kontrolle von Fertigteilen

Während für Festigkeitsprüfungen entsprechende Maschinen erforderlich sind, kann eine Überprüfung des Aushärtungszustands mit gutem Erfolg durch einfache Mittel erfolgen.

Ein Bauteil, das nach dem Abwischen mit Aceton klebt, ist mangelhaft gehärtet.

Das Anschleifen mit Naßschleifpapier ist bereits eine strenge Prüfungsstufe. Riecht das Laminat dabei nach bitteren Mandeln (Benzaldehyd), liegt ebenfalls keine vollständige Härtung vor. Diese Prüfmethode kann aber bei Amin-Benzoylperoxid-Härtung versagen.

Hier ist eine Prüfung mit dem Barcol-Impressor notwendig (Typ 934-1). Gut durchgehärtete Feinschichten ergeben Meßwerte von 40 und mehr Skalenteilen. Feinschichten mit sehr großer Bruchdehnung können etwas niedriger liegen. Lamine erbringen in der Prüfung etwa 50 Skalenteile. Es sind stets mindestens 3 Prüfungen auf engem Bereich durchzuführen. Können die Einstiche der Prüfnadel am Bauteil nicht zugelassen werden, so sind sie auf dem angefertigten Kontrollstück auszuführen. Das Kontrollstück muß also ebenso wie das Werkstück selbst behandelt (z. B. getempert) werden.

9.2. Laminataufbau für wasserbelastete Lamine

Das System G 327 B / I 25 B / N 35 BT / LT 35 B wird für warmwasserbeaufschlagte Bauteile bis 30 °C durch die Kombination G 340 B / T 40 B / T 40 BT / LT 40 B (jeweils in Klammern) ersetzt.

- a) Feinschicht G 327 B auf Isophthalsäurebasis (G 340 B auf Terephthalsäurebasis), fertig eingefärbt, Härtungssystem: Kobalt-MEKP
Auftragen: mit einem Feinschichtpinsel oder mit einer Rolle und zusätzlich mit einem Feinschichtpinsel entlüften bzw. spritzen.
Auftragsmenge: 500 bis 600 g/m²
Topfzeit: 10 bis 15 Minuten (im Becher)
Temperatur der Formoberfläche: 18 bis 20 °C,
Ruhezeit: 1 bis 3 Stunden.
- b) Zweiter Feinschichtauftrag oder Schnellversiegelung mit N 35 BT (T 40 BT),
Härtungssystem: Kobalt-MEKP
Auftragen mit der Rolle, entlüften mit einem Feinschichtpinsel bzw. spritzen.
Verbrauch: 200 g/m²
Topfzeit: 15 bis 20 Minuten
Temperatur des Untergrundes: 15 bis 25 °C
Ruhezeit: 1 bis 4 Stunden.
- c) Eine Lage 300 g/m²-Matte Typ EPS mit I 25 B (LT 40 B)
Härtungssystem: Kobalt-MEKP
Werkzeuge: Fellrolle und Scheibenrolle
Verbrauch: ca. 900 g/m² Harz, also Glasgehalt: 25 %
Topfzeit: ca. 45 Minuten
Temperatur des Untergrundes: 15 bis 25 °C
Hinweis: Diese Lage muß besonders sorgfältig verarbeitet werden (luftblasenfrei), da sie einen starken Einfluß auf die Chemikalienbeständigkeit des Bauteils ausübt.
Ruhezeit: 0 bis 12 Stunden, d. h., es kann „Naß in Naß“ weitergearbeitet werden. Diese Arbeitsweise sollte jedoch an der senkrechten Wand nur bis zu 3 Lagen fortgesetzt werden, dann ist eine Ruhezeit von 2 bis 12 Stunden vorgesehen.
- d) x-Lagen 450-g-Matte (evtl. abwechselnd Gewebe verwenden) mit I 25 B (T 40 B).
Härtungssystem: Kobalt-MEKP
Werkzeuge: wie Pos. C.
Verbrauch: 1 bis 1,2 kg Harz für einen Quadratmeter 450-g-Matte oder 700 g bis 1000 g für einen Quadratmeter Roving mit 670 g/m² Gewicht.
Topfzeit: ca. 45 Minuten
Temperatur des Untergrundes: 15 bis 25 °C.
Ruhezeit: 1 bis 12 Stunden.

- e) Farbversiegelung mit N 35 BT (N 40 BT) + 20 % Farbpaste
 Härtungssystem: Kobalt-MEKP
 Auftrag mit Fellroller, Entlüftung mit Feinschichtpinsel.
 Verbrauch: 200 g/m²
 Topfzeit: 10 bis 20 Minuten, um ein Abfließen und damit eine ungleichmäßige Pigmentverteilung auf der Werkstückoberfläche und einen zu großen Styrolverlust (Unterhärtung) zu vermeiden.
 Temperatur des Untergrundes: 15 bis 25 °C
 Ruhezeit: 1 bis 12 Stunden.
- f) Laminatabschluß durch Topcoat LT 30 B, LT 35 B (LT 40 B) mit 5 bis 8 % Farbpaste
 Härtungssystem: Kobalt-MEKP
 Werkzeuge: Fellroller + Feinschichtpinsel zum Entlüften
 Verbrauch: 200 bis 250 g/m²
 Topfzeit: 15 bis 20 Minuten,
 Temperatur der Formoberfläche: 18 bis 25 °C, dabei direkte Sonneneinstrahlung vermeiden. Bei weniger als 18 °C kann nur LT 35 B mit Zusatzbeschleuniger DAA verwendet werden.
 Ruhezeit: 3 bis 8 Tage, bis eine Wasserbelastung auftreten darf.

9. 2. 1. Hinweise zum Wandungsaufbau

- a) Die Kombination Feinschicht G 327 B + 300-g-Matte mit I 25 B als Laminierharz ergibt eine **optimale Wasserfestigkeit**. G 340 B und T 40 ergeben eine gute Warmwasser- und Chemikalienbeständigkeit. Von diesen Schichtkombinationen sollte auf keinen Fall abgewichen werden, wenn die Qualität bei den gefertigten Teilen nicht spürbar beeinträchtigt werden soll. Versuche haben ergeben, daß der Austausch des speziellen Laminierharzes in der ersten Glasharzlage gegen ein normales Harz für Orthophthalsäurebasis die Warmwasserfestigkeit auf ca. 45 % des Ausgangswertes herabsetzt.
- b) Will man sich diese Verbesserung erhalten, so sollte zum **Ausstreichen** der Feinschicht auf der Formenoberfläche ein **Feinschichtpinsel** verwendet werden. Zum Harztransport vom Topf auf die Form kann eine Rolle eingesetzt werden.
 Die Auftragsmenge von 500 bis 600 g Feinschicht je m² im Handauftrag hat ebenfalls wesentlichen Einfluß auf die Qualität. So konnte nachgewiesen werden, daß eine Menge von weniger als 300 g Feinschicht je m², gleichmäßig gerakelt, zu einer Verschlechterung der Standzeiten führt.
- d) Ebenso ist die Temperierung der Form bzw. des Arbeitsraumes und damit auch die Topfzeit der Feinschicht von großem Einfluß. Die **Raumtemperatur** sollte bei G 327 B, G 340 B, I 25 B und T 40 B nicht unter 18 °C liegen, um eine ordnungsgemäße Aushärtung dieser qualifizierten Harze sicherzustellen.

- e) Die oben beschriebene Qualität kann nur erreicht werden, wenn die ersten drei Arbeitsgänge unter Einhaltung der vorgeschriebenen Ruhezeiten durchgeführt werden. Für die Praxis heißt das: **Die Feinschicht und die erste Glaslage mit I 25 B (T 40 B) müssen an einem Tag gefertigt werden.** Längere Ruhezeiten beeinträchtigen die Laminatqualität. Eine Unterbrechung von 18 Stunden ergibt eine Verschlechterung der Warmwasserfestigkeit um 30 %.
- f) Es sei auch hingewiesen auf die Empfehlung, **die erste Lage mit 300-g-Matte** Typ EPS herzustellen. Versuche haben ergeben, daß die Verwendung einer 225-g-Matte bereits eine Verkürzung der Werkstückstandzeit von etwa 20 % nach sich zieht. Soweit bis heute bekannt ist, können die weiteren Glasharzlagen auch mit Normalharzen gefertigt werden, ohne daß mit Einfluß für das Werkstück gerechnet werden muß.
- EPS ist eine speziell für Wasserlagerung geeignete Ausrüstung der Glasfaser.
- g) Im Zusammenhang mit der Verwendung von Isophthal- und Terephthal-säureharzen wird das **Härtungssystem Kobalt-MEKP** empfohlen. Dieses System hat sich vor allem im Zusammenhang mit dem oben genannten Harz als äußerst zuverlässig erwiesen. Die Vorteile, die für Normalfeinschichten mit Acetyl-Aceton-Peroxyden genannt werden, konnten bei dem oben genannten System nicht eindeutig nachgewiesen werden.
- h) Es sei noch einmal auf die **Temperung** hingewiesen. Die Harze G 327 B, G 340 B, I 25 B und T 40 sind chemikalienbeständiger als Standardharze und daher bei der Aushärtung und der Verarbeitung temperaturanfälliger. Es wurde bereits ausgeführt, daß die Temperatur des Arbeitsraumes etwa 20 °C betragen sollte. Für die Endaushärtung – besonders der Feinschicht – ist eine Temperung (evtl. noch auf der Form) empfehlenswert. Diese thermische Nachhärtung sollte in einem Zeitraum von 5 Tagen nach der Entformung durchgeführt werden. Empfohlen wird eine **Mindesttemperzeit von 15 Stunden bei 50 bis 60 °C. Ersatzweise** eine Temperung von **24 Stunden** (eine Nacht) **bei 35 bis 40 °C.** Diese Nachhärtung hat auf die Chemikalienbeständigkeit einen wesentlichen Einfluß.
- i) Die **Entformung** großer Teile wird zur Schonung der Form mit Hilfe von Wasser oder Luft durchgeführt. Wasser hat eine gewisse Schmierwirkung beim Abheben des Fertigteils, stellt andererseits für die Feinschicht eine Chemikalienbelastung dar. Der Nachteil entfällt bei der Entformung mit Luft, dort fällt jedoch die Schmierwirkung weg.

9.3. Luftaustausch im Werkstattraum (Absaugung)

Wie besprochen, muß dafür gesorgt werden, daß insbesondere bei der Feinschichtverarbeitung keine zu hohe Styrol-Dampfkonzentration im Arbeitsraum auftritt. Die explosionsgeschützte Absaugung soll möglichst dicht über dem Boden an einer Schmalseite und die Zufuhr möglichst auf der Gegenseite des Raumes unter der Decke installiert sein (Arbeitsraum-Entlüftung). Es werden drei bis vier Luftwechsel je Stunde empfohlen.

Sehr effektiv ist die Absaugung direkt am Laminierort über einen mitwandernden Rüssel (sogenannte Arbeitsplatz-Absaugung) evtl. unterstützt durch eine Bodenabsaugung unterhalb der Formränder bei Großformen. Für diese beiden Aufgaben kann in kleinen Werkräumen durchaus ein Exhauster mit einer stufenlosen Luftweiche eingesetzt werden.

Überprüft wird die Styroldampf-Konzentration mit Prüfröhrchen für Styrol der Draeger-Werke in 24 Lübeck (siehe auch 1.3. „Gesundheitsschutz“, Merkblatt für die Verarbeitung von Polyester- und Epoxydharzen der BG-Chemie).

Für eine Saugleistung von ca. 2.500 m³/Std. bei 10 m Schlauchanschluß ist ein Lüfter von 0,55 kW mit 3.000 Upm ausreichend. Es dürfen nur ex-geschützte Fabrikate verwendet werden. Die Vorschriften des Emissionsschutzgesetzes sind zu beachten.

Zusammenfassung:

Die beste Gewähr für eine Produktion mit niedriger Ausschußquote und wenig Nacharbeit bzw. Reklamationen bieten in der GFK-Fertigung gleichbleibende Fertigungsbedingungen. Dazu gehören:

Definierte Werkstoffe

Ausführung wichtiger Fertigungsgänge stets durch die gleiche Mannschaft

Ein Fertigungsablauf nach Programm

Sorgfältige Temperaturführung aller Fertigungsmittel

Kontrolle bzw. Korrektur der Styroldampf-Konzentration

9.4. Regeln für die Verarbeitung von Polyester- und Epoxidharzen*

1. Ordnung und Sauberkeit

1.1 Größte Sauberkeit am Arbeitsplatz ist unbedingt notwendig.

1.2 Nur die unbedingt erforderlichen Mengen an Harzen, Härtern, Beschleunigern, Löse-, Verdünnungs- und Reinigungsmittel dürfen sich im Arbeitsraum befinden. Die nicht gebrauchten Stoffe sind wieder in die Lagerräume zu bringen und in der von der Betriebsleitung vorgeschriebenen Weise aufzubewahren.

* Mit freundlicher Erlaubnis der BG d. chem. Industrie

- 1.3 Verschüttete Härterlösungen sind sofort zu beseitigen. Dabei sind die von der Betriebsleitung vorgeschriebenen Reinigungs- und Aufnahmemittel zu benutzen.
- 1.4 Harzreste, verunreinigte Lappen, Papier usw. sind in die besonderen Abfallkübel zu werfen, die verschlossen gehalten werden müssen und regelmäßig zu leeren sind.

2. Verhütung von Feuer- und Explosionsgefahren

- 2.1 Das Rauchen und der Umgang mit offenem Feuer oder Licht ist streng verboten.
- 2.2 Organische Peroxyde (Härter, Katalysatoren) und Beschleuniger dürfen nicht direkt zusammengebracht werden (heftige Zersetzung, unter ungünstigen Voraussetzungen sogar Explosionsgefahr). Erst nach sorgfältiger Mischung eines der beiden Zusatzstoffe mit dem flüssigen Harz darf der andere zugegeben werden.
- 2.3. Der Aufstellungsort und der Gebrauch von Feuerlöschern muß jedem bekannt sein.

3. Verhütung von Gesundheitsgefahren

- 3.1 Es ist darauf zu achten, daß die Absauganlagen immer wirksam sind.
- 3.2 Beim Umgang mit Härtern sind die vom Betrieb bereitgestellten Schutzbrillen zu benutzen. Einige Härter (organische Peroxyde) können, wenn sie ins Auge gelangen, zu Erblindungen führen!
- 3.3 Ein Hautkontakt mit organischen Aminen ist wegen der Gefahr akuter und allergischer Hautschädigungen tunlichst zu vermeiden, da bei einmal empfindlich gewordenen Personen schon ein geringer Kontakt zur Auslösung von Körperreaktionen genügt.
- 3.4 Die zur Verfügung gestellten Schutzmittel wie Handschuhe, Schutzbrillen, Schürzen usw. sind zu gebrauchen.
- 3.5 Die Haut soll nur mit geeigneten Schutz- oder Pflegesalben eingerieben werden, die möglichst vom Arzt im Einvernehmen mit der Betriebsleitung zu bestimmen sind.
- 3.6 Man soll sich gründlich und nur mit den bereitgestellten milden Reinigungsmitteln, besonders vor dem Essen, vor und nach dem Aufsuchen der Toiletten, sowie nach Arbeitsschluß waschen. Die Arbeitskleidung sollte mindestens wöchentlich gewechselt werden.

3.7 Wenn die fertiggestellten Kunststoffteile nicht naß bearbeitet werden (z. B. beim Schleifen, Bohren, Fräsen usw.) muß auf die Wirksamkeit der Absaugung am Arbeitsplatz geachtet werden oder es sind die bereitgestellten Feinstaubfiltermasken zu benutzen.

4. Erste Hilfe

4.1 Ist Härter (organische Peroxyde) ins Auge gelangt, so muß das Auge sofort mit viel Leitungswasser oder mit den bereitgestellten besonderen Spülmitteln (2%ige wäßrige Natriumcarbonat- oder 10%ige Ascorbinsäure-Lösung) ca. 15 Minuten gespült werden. Stets ist mit großen Mengen Wasser nachzuspülen. Spülungen mit viel Wasser allein sind oft nur innerhalb der ersten halben Minute wirksam. Wenn Härter für Epoxydharze ins Auge gelangt sind, muß das Auge ohne Zeitverlust – mindestens 15 Minuten lang – mit fließendem Wasser ausgiebig gespült werden.

Anschließend muß immer sofort ein Augenarzt aufgesucht werden, der über Art und Wirkung des Härters und über die Hinweise im Merkblatt zu unterrichten ist.

4.2 Ist die Haut mit flüssigen Polyester- oder Epoxydharzen und ihren Monomeren und Hilfsstoffen beschmutzt worden, so muß ohne stark zu reiben mit einem Stück sauberen Zellstoffes getupft werden, bis die Verunreinigung entfernt ist. Danach ist die Haut mit reichlich Wasser und einem milden Reinigungsmittel zu waschen.

Alle Sicherheitsanweisungen der Betriebsleitung müssen sorgfältig beachtet werden.

9.5. Fachausdrücke und ihre Bedeutung

Armieren	Verstärken eines Werkstoffs (z. B. Polyesterharz) durch festere Stoffe, wie z. B. E-Glas.
Barcol-Härte	Amerikanischer Härteprüftest. Geeignet zur Kontrolle von Fertigteilen.
Beschleuniger	Substanzen, die den Zerfall des Härters beschleunigen oder – bei Raumtemperatur – überhaupt erst auslösen.
Brandverhalten	Das Brandverhalten der Kunststoffe wird nach verschiedenen Normen (DIN, ASTM) klassifiziert. Das kann für Teile im Bauwesen und für Karosserieteile vorgeschrieben sein.

Duroplast	Chemiestoffe, die nach der Härtung nicht mehr durch Wärmezufuhr schmelzbar sind (z. B. ungesättigte Polyester- und Epoxidharze).
E-Glas	Elektroglass mit besonders geringem Alkali-Anteil und daher guter Wasserbeständigkeit.
E-Modul	Steifigkeit eines Werkstoffs. Die Maßzahl gibt an, bei welcher Spannung ein Körper seine Länge um 1 % ändert. (Einheit: $1 \text{ kp/m}^2 = 98,11 \text{ N/m}^2$; $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$)
EP	Epoxidharze
Farbversiegelung	Eingefärbtes Harz als Anstrich vor dem Schlußlack, zur Verbesserung der Deckkraft und Vergrößerung der Schutzfilmdicke.
Faserspritzverfahren	Druckloses Verarbeitungsverfahren, bei dem Verstärkung und Harz maschinell auf die Formoberfläche gespritzt werden.
Feinschicht	Harzschicht (evtl. mit Pigmenten) zum Schutz der tragenden Wand aus Harz + Verstärkungsmittel.
Finish	Oberflächenausrüstung zur besseren Haftung von Harz auf E-Glas.
Gelcoat	Siehe Feinschicht.
GFK	Glasfaser-Kunststoff
Glasgehalt	Glasgewicht in Prozent bezogen auf das Gewicht von Glas + Harz.
Glasmatte und Glasgewebe	Verstärkungsmittel für Harz aus E-Glas.
Härter	Zusätze, die die Kettenbildung im Harz herbeiführen (besser: Initiator). Für Polyesterharze werden dazu Peroxide verwendet.
Handverfahren	Druckloses Verarbeitungsverfahren, bei dem Harz und Verstärkungsmittel getrennt transportiert und erst auf der Formfläche vereinigt werden (Handauflege- oder Kontaktverfahren).
Inhibitor	Verzögerer, sie werden zur Verlängerung der Topfzeit eingesetzt.
Initiatoren	Siehe Härter.

Katalysatoren	Siehe Härter.
kalthärtende Kunststoffe	Stoffe, bei deren Aushärtung keine Wärme zugeführt werden muß.
Laminat	„Schichtstoff“ aus Harz und Verstärkungen.
Laminieren	„Aufschichten“ der einzelnen harzgetränkten Verstärkungslagen auf den Untergrund oder die Form.
LT-Lack	Siehe Schlußlack.
Martensgrad	Physikalische Prüfung über das Stoffverhalten bei höheren Temperaturen.
Matrize	Hohler Teil einer geschlossenen, zweiteiligen (z. B. Preß-) Form.
Matrix	„Mutterstoff“, z. B. Polyesterharz, in den die Verstärkungen eingebettet sind.
Patrize	Erhabener Teil einer geschlossenen, zweiteiligen (z. B. Preß-) Form.
Peroxid	Siehe Härter.
Pigment	Farbgebender Füllstoff.
Polyaddition	Bei E-Harzen findet die Erhärtung durch Verbindung verschiedenartiger Moleküle statt.
Polymerisation	Erhärtung z. B. von UP-Harzen durch Verbindung gleichartiger Moleküle untereinander.
Polymerisations-Wärme	Bei der Härtung freiwerdende Wärme.
Reaktivität	Verhalten von Harzen bei der Härtung.
Roving	Glasfaserstränge.
Sandwichbau	Siehe Verbundbau.
Schlichte	Oberflächen-Ausrüstung des (Glas-) Fadens für die Herstellung und als (Kunststoff-Schlichte) zur Verbesserung der Harzhaftung.
Schlußlack	Letzte klebfrei-trocknende Harzschicht (evtl. eingefärbt) auf Laminaten.
Schnellversiegelung	Harz mit etwa 20 min Topfzeit zum Schutz der Feinschicht-Rückseite gegen Anquellen.

Schrumpf	Volumenänderung bei der Härtung von Kunststoffen, damit also Änderung der Dichte und des spezifischen Gewichts.
Styrol	in Polyesterharzen zu ca. 30 % enthalten. Monomeres Lösungsmittel.
Temperung	Wärmebehandlung eines gefertigten GFK-Teils, um seinen Aushärtungsgrad zu verbessern.
Thermoplast	Durch Wärmezufuhr schmelzbare Chemiestoffe (PVC u. a.), die bei Abkühlung wieder erhärten.
Thixotropiemittel	Zusätze zum Vermindern der Abfließneigung von z. B. Harzen an senkrechten Flächen.
Topcoat	Siehe Schlußlack.
Topfzeit	Zeitraum von der Härterzugabe bis zum ersten Temperatur-Anstieg im Harz, sog. offene Zeit.
Trennmittel	Verhindern ein Verkleben von Formteil und Form.
UP	Ungesättigte Polyester.
Verbund-Bauweise	Bauweise mit verschiedenen Baustoffen, z. B. GFK-Deckschichten auf einem Schaumkern.
Verbundwerkstoff	Werkstoff aus verschiedenen Teilstoffen (z. B. Glas und Harz), die fest miteinander vereinigt sind.
Verzögerer	Siehe Inhibitor.
Viskosität	Fließverhalten einer Flüssigkeit (1 cP = 1 m Pa s)
Wärmedehnzahl (linear)	Maß für den Längenzuwachs eines Körpers bei 1 °C Temperatur-Erhöhung.
Weichmacher	Stoffe zur Plastifizierung. Bei Härtern werden Weichmacher zur Herabsetzung der Brandgefahr beigegeben.
Zykluszeit	Die Zeitspanne, die für die Herstellung eines Werkstücks und für die Herrichtung der Form (Rüstzeit) benötigt wird.

LITERATUR-VERZEICHNIS

- | | |
|--|--|
| (1) BAYER AG | Technische Merkblätter über LEGUVAL®-Harze |
| (2) P. H. SELDEN | Glasfaserverstärkte Kunststoffe
Springer-Verlag Berlin—Heidelberg-New York |
| (3) BAYER AG | Einfluß des Reststyrolgehaltes auf LEGUVAL®-
Formstoffe |
| (4) VETROTEX, GEVETEX
TEXTILGLAS GMBH | Informationen |
| (5) ENKA GLANZSTOFF | CFK. Chemiefaserverstärkte Kunststoffe |
| (6) SIGRI
ELEKTROGRAPHIT | Technische Merkblätter |
| (7) WACKER-CHEMIE
GMBH, MÜNCHEN | Wacker Borfaden |
| (8) DU PONT DE
MEMOURS
INTERNATIONAL S.A. | Kevlar® 29, Kevlar® 49 |
| (9) STUDIENGESELL-
SCHAFT „LEICHTBAU
DER VERKEHRS-
FAHRZEUGE“ | Leistungsblatt, Glasfaserverstärkte Kunststoffe
für den Fahrzeugbau |
| (10) K. H. BOLLER | Modern Plastics 41, Juni 1964 |
| (11) RAINER TAPROGGE | Konstruieren mit Kunststoff, VDI-Verlag |
| (12) H. HAFERKAMP | Zum Alterungsverhalten glasfaserverstärkter
Kunststoffe, Diss. TU Hannover |
| (13) H. HAFERKAMP | Glasfaserverstärkte Kunststoffe, VDI-Verlag |
| (14) BAYER AG | Verarbeitungsverfahren zur Herstellung von
Formteilen aus glasfaserverstärktem LEGUVAL® |
| (15) BAYER AG | Gestalten und Konstruieren mit glasfaserver-
stärktem LEGUVAL® |
| (16) GERMANISCHER
LLOYD | Vorschriften zum Bau und zur Klassifikation
von Yachten aus glasfaserverstärktem Kunst-
stoff |
| (17) WILLY EMPACHER | Der Bau von Kunststoff-Booten
Delius, Klasing + Co., Bielefeld—Berlin |
| (18) BAYER AG | Arbeitsanleitung für den Bau eines unbeheizten
Kunststoff-Preßwerkzeuges |
| (19) Dr.-Ing.
R. KLEINHOLZ | Verarbeitungstechnische Untersuchungen zum
Faser-Harz-Spritzverfahren |
| (20) F. P. PLASCHKE | Ist die Kombination von hochsteifen Fasern mit
UP-Harz sinnvoll? Kunststoffe im Bootsbau,
VDI-Verlag, Düsseldorf |

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Polyester und Glesside — der moderne Chemie-Werkstoff	5
1. 1. 1. Grundsätzliches	5
1. 1. 2. Der Verbundstoff	6
1. 1. 3. Der Aufbau einer Wand aus glasfaserverstärktem Polyester	7
2. Einteilung der Kunststoffe	8
2. 1. Ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze)	8
2. 1. 1. Einteilung von Laminier- und Eingießharzen	9
2. 1. 2. Zusätze für UP-Harze	11
2. 1. 3. Laminier- und Eingießharze der VOSSCHEMIE	12
2. 2. Feinschichten (Gelcoats) und ihre Einteilung	15
2. 2. 1. Feinschichtprogramm der VOSSCHEMIE	16
2. 3. Schlußlacke und ihre Einteilung	17
2. 3. 1. Schlußlacke der VOSSCHEMIE	18
2. 4. Härtingsablauf bei Polyesterharzen	19
2. 4. 1. Härtingssysteme	22
2. 4. 2. Verzögerer — Inhibitoren	22
2. 5. Aushärtungsgrad von Polyesterharzen	23
2. 5. 1. Temperung von GFK-Teilen	27
2. 5. 2. Praxis des Nachhärtens	28
2. 6. Harz-Systeme	28
3. Verstärkungsmittel für Kunstharze	35
3. 1. Glasfasern als Verstärkungsmittel	37
3. 1. 1. Rovingstrang	38
3. 1. 2. Glasmatten	39
3. 1. 3. Glessidengewebe	40
3. 1. 4. Rovinggewebe	41
3. 1. 5. Andere Formen der Glasverstärkung	41

3. 2.	Andere Verstärkungsmittel für Kunstharze	42
3. 2. 1.	Thermoplastische Polyester	42
3. 2. 2.	Aromatische Polyamide	42
3. 2. 3.	Kohlenstoff- und Graphit-Fasern	43
4.	Der Verbund aus Glas und Harz	45
4. 0. 1.	Die richtungsabhängige Verstärkung	45
4. 0. 2.	Glasgehalt – Glasgewicht	46
4. 1. 1.	Zugfestigkeitsverhalten von Matten-Laminaten	48
4. 1. 2.	Zugfestigkeitsverhalten von Gewebe-Laminaten	49
4. 1. 3.	Zugfestigkeitsverhalten von Unidirektional-Geweben	50
4. 1. 4.	Druck- und Biegefestigkeit von GFK	50
4. 2.	Übersicht über die Werkstoffeigenschaften von verstärktem Standard-Polyesterharz	51
4. 3.	Dimensionierung von GFK-Bauteilen	54
4. 3. 1.	Dimensionierungshinweise	54
4. 3. 2.	Dimensionierung vom Minimum her	55
4. 3. 3.	Hinweise zum Dehnungsverhalten	56
4. 3. 4.	Lamine bei Dauerschwing-Beanspruchung	57
4. 4.	Alterung von Bauteilen aus verstärktem Polyesterharz	58
5.	Produktionsverfahren für Teile aus glasfaserverstärktem Kunststoff	59
5. 0. 1.	Übersicht über einige Herstellungsverfahren für verstärkte Polyesterteile	59
5. 1.	Handwerkliche Verfahren	59
5. 1. 1.	Handverfahren (Handauflege-, Kontaktverfahren)	59
5. 1. 2.	Faserspritzverfahren	67
5. 1. 3.	Verfahren mit geringem Gegendruck	71
5. 2.	Preßverfahren zur Herstellung von GFK-Teilen	72
5. 2. 1.	Kaltpreß-Verfahren	72
5. 3.	Andere Fertigungsverfahren	74
5. 3. 1.	Wickelverfahren	74
5. 3. 2.	Schleuderverfahren	75

	Seite
6. Gestalten von GFK-Teilen	76
6.1. Aussteifung von Platten	78
6.1.1. Randversteifung	78
6.1.2. Flächenversteifung	78
6.1.3. Aufgesetzte Versteifungen	79
6.2. Sandwich-Konstruktionen	85
6.3. Verbindungen	87
6.3.1. Eckverbindungen	87
6.3.2. T-förmige Verbindungen	89
6.3.3. Krafteinleitungen	90
6.3.4. Krafteinleitungselemente	93
7. Formenbau	94
7.1. Negativ-Hohlform für den Serienbau im handwerklichen Verfahren	96
7.1.1. Herstellung einer allseitig gekrümmten Negativ-Hohlform	97
7.2. Negativ-Hohlform mit planen- oder einseitig gekrümmten Flächen für handwerkliche Verfahren	102
7.2.1. Bau einer Plattenform (VOSS-Methode)	106
7.3. Negativ-Kernformen für handwerkliche Verfahren	115
7.4. Leistenkern für handwerkliche Verfahren	119
7.5. Formen für das Kaltpreßverfahren	120
7.5.1. Bau einer Kaltpreß-Form	121
7.6. Trennmittel	126
8. Praktische Arbeit mit verstärktem Polyesterharz im Handverfahren	129
8.1. Formenvorbereitung	130
8.1.1. Versiegeln und Schleifen einer Form	130
8.1.2. Einbringen von Trennmitteln	131
8.2. Bau eines Formkörpers (Boot) in einer Negativform	131
8.2.1. Werkzeuge und Reinigungsmittel	132
8.2.2. Feinschicht-Auftrag	134
8.2.3. Schnellversiegelung	138

8. 2. 4. Auftapezieren von Glasfaserverstärkungen mit Laminierharz	139
8. 2. 5. Hinweise zur Arbeit mit Glas und Harz	145
8. 2. 6. Farbversiegelung und Schlußanstrich	149
8. 2. 7. Entformung	152
8. 3. Praktische Hinweise für den Sandwichbau	153
8. 3. 1. Einbau von PVC-Schaumplatten, Balsamatten und Schaumvlies	156
8. 3. 2. Krafteinleitung und Wanddickenänderung im Sandwich	159
8. 3. 3. Hochbeanspruchte Sandwich-Bauteile	160
8. 4. Verbindungen	162
8. 4. 1. Haftvermittler für Polyesterharz auf anderen Werkstoffen	162
8. 4. 2. Kleben von GFK auf GFK	162
8. 4. 3. Nieten und Schrauben	164
8. 5. Fehler und ihre Beseitigung	164
9. Erfolgreiche gewerbliche Verarbeitung mit speziellen Hinweisen für die Herstellung wasserbelasteter Laminat	167
9. 1. 1. Allgemeine Hinweise	167
9. 1. 2. Baubuch und Werkstückmuster	169
9. 1. 3. Kontrolle von Fertigteilen	170
9. 2. Laminataufbau für wasserbelastete Laminat	171
9. 2. 1. Hinweise zum Wandungsaufbau	172
9. 3. Luftaustausch im Werkstatttraum	174
9. 4. Regeln für die Verarbeitung von Polyester- und Epoxidharzen	174
9. 5. Fachausdrücke und ihre Bedeutung	176
Literatur-Verzeichnis	180

