



Ein Werkstoffverbund als Holzgewebescharnier zur Herstellung von Flächentragwerken

*Dipl.-Ing. Wieland Becker
Doktorand
TU Wien-BBB / ITI
Wien, A*

Ein Werkstoffverbund als Holzgewebescharnier zur Herstellung von Flächentragwerken

1. Gegenstand

Einleitung

Das gegenwärtige Baugeschehen orientiert sich wieder an schalenartigen und biomorphen Strukturen, denen konventionelle Schalungs- und Bausysteme nur schwer gerecht werden können. Als jüngste Beispiele für schalenartige Großstrukturen können das Dach des Pavillons der deutschen Holz- und Forstwirtschaft auf der EXPO 2000 in Hannover, oder das geplante Projekt der neuen Münchner Fußballarena genannt werden. Abbildung 1 zeigt das EXPO-Dach, sowie die geplante Fußballarena. Bei allen genannten Beispielen handelt es sich jedoch nicht um monolithische Schalen mit isotropem Materialverhalten, sondern um Stabnetzkonstruktionen mit nichttragender Bedeckung.



Abbildung 1: EXPO-Dach Hannover und Fußballarena München [ALL-02]

An der TU Wien wurde ein Schalungssystem, sowie eine dazugehörige Vorrichtung aus einem neuen Werkstoffverbund zur Herstellung weit gespannter Flächentragwerke entwickelt. Es können räumlich gekrümmter Betonschalungen und Dach-, Decken-, oder Wandflächen für größere Spannweiten hergestellt werden. Vorteil der Konstruktion ist, dass eine im Endzustand räumlich gekrümmte Schalen-, Wand-, oder Membrankonstruktion flächeneben hergestellt werden kann. Durch eine erzielte Anfangssteifigkeit können Unterstützkonstruktionen vereinfacht werden oder sogar entfallen. Die Vorrichtung ist nach flächenebener Herstellung faltbar und kann in diesem Zustand transportiert und bedarfsweise durch Demontage und Neuaufbau wieder verwendet werden. Voraussetzung für die Funktion der Schalung ist in jedem Fall eine ein- oder zweiachsige räumliche Krümmung, die überwiegend durch Normalkraft (Druck und Zug) unter Ausschluss oder Minimierung von Biegekräften belastet wird. Die Fugen der flächigen Grundelemente werden durch ein gelenkiges und gleichzeitig zugbeanspruchbares Material, z.B. einem aufgeklebten Textilgewebe verbunden und übernehmen statische Funktion. Die biegesteifen, flächigen Grundelemente erhalten die Zuschnittsform eines Vielecks, vorzugsweise eines Drei- oder Vierecks. Die Kanten werden einem vordefinierten Winkel angepasst, so dass die vordefinierte Krümmung erzielt wird.

1.1 Einzelkomponenten und Aufbau des Werkstoffverbunds

Der Werkstoffverbund besteht aus den drei Komponenten Plattenwerkstoff, Klebstoff und textilem Gewebe und ist nach Abbildung 2 angeordnet.

Klebstoff auf Werkstoffplatte

Textiles Gewebe

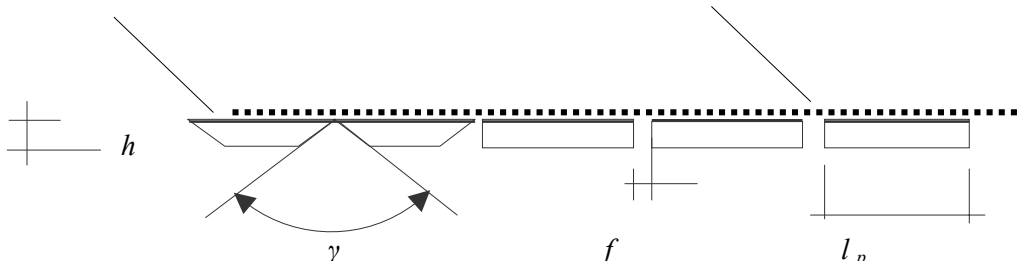


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Schalung (Vorrichtung) im flächenebenen ausgelegten Zustand

Die gewünschte geometrische Form kann durch die Plattenbreite l_p , Plattenhöhe h , Fugenbreite f oder Fugenwinkel γ eingestellt werden. Darüber hinaus wird durch die Plattenhöhe h Einfluss auf das innere Moment genommen. Bei überwiegend druckbeanspruchten Schalen-, oder Bogenkonstruktion übernimmt das Gewebe sowohl eine Scharnierfunktion an den Plattenfugen, als auch Zugkräfte aus dem zwischen den Auflagern angebrachten Spannglied. Abbildung 3 zeigt das Funktionsprinzip einer druckbeanspruchten Schale oder eines Bogens. Ebenso lassen sich Hängekonstruktionen nach Abbildung 4 herstellen.

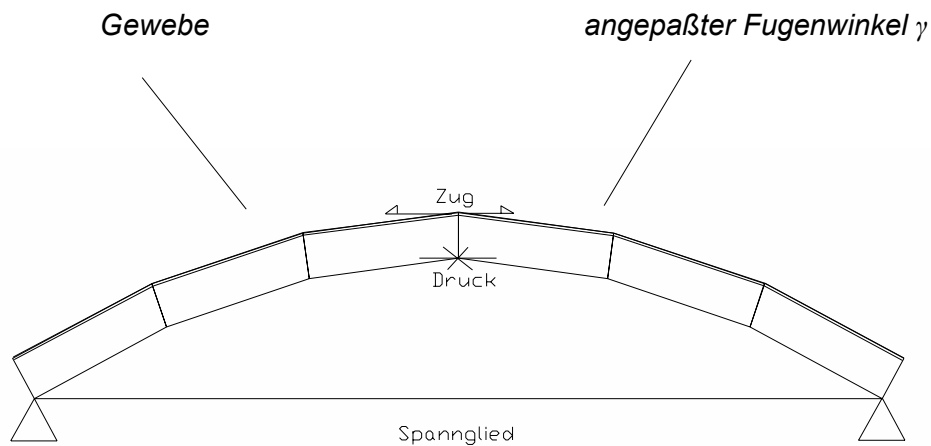


Abbildung 3: Funktionsprinzip der Schale oder des Bogens als druckbeanspruchte Konstruktion

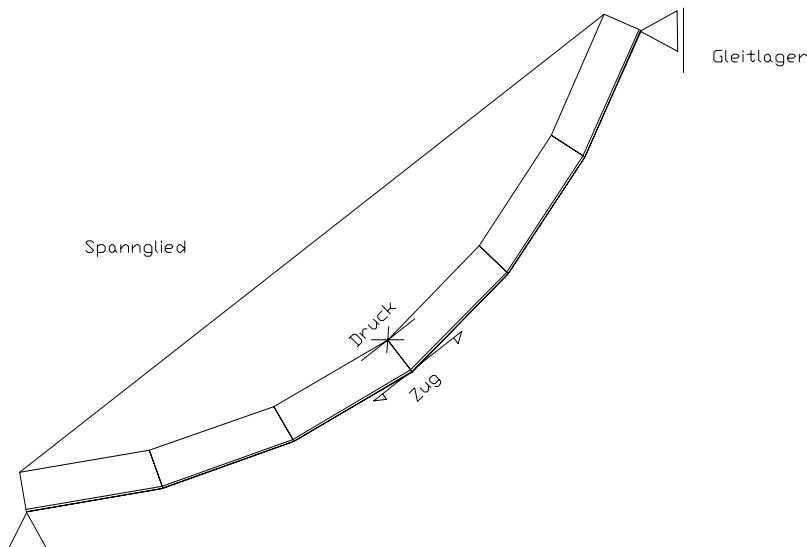


Abbildung 4: Funktionsprinzip als membranartige Hängekonstruktion mit aufapplizierten Platten

1.2 Zuschnitt

Der Zuschnitt ebener Werkstoffplatten zur Herstellung einer biaxial gekrümmten Schalung erfolgt analog zu den flächenebenen Zuschnitten der Textilindustrie und im Membranbau. Hierfür wird ein CAGD-Programm (Computer Aided Geometric Design) verwendet.

Abbildung 5 zeigt die flächenebenen Einzelstreifen aus Plattenelementen. Abbildung 6 zeigt die aus Einzelstreifen errichtete biaxial gekrümmte Schale.

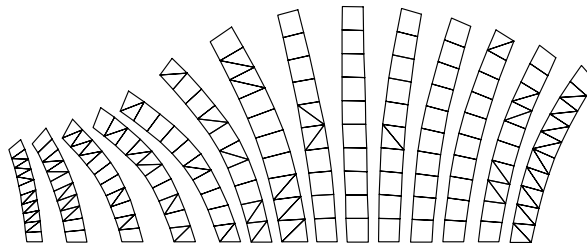


Abbildung 5: Flächenebene Einzelstreifen aus Plattenelementen

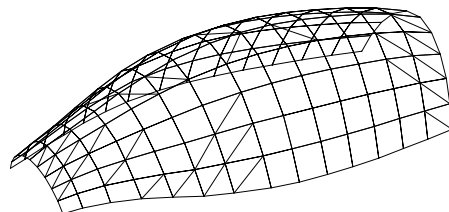


Abbildung 6: Aus Einzelstreifen errichtete, biaxial gekrümmte Schale

2. Aufgabenstellung des Holzgewebescharniers

Der Werkstoffverbund besteht aus den Einzelkomponenten Plattenwerkstoff, Klebstoff, textiles Gewebe. Die kraftschlüssige Verbindung der einzelnen Platten wird durch über den Fugen aufgeklebten textilen Gewebestreifen übernommen, die als Scharnier und zur Übertragung von Zugkräften genutzt werden. Ihre Aufbringung erfolgt flächenhaft in einem Kaltklebverfahren ohne Preßdruck. Abbildung 7 zeigt Funktionsweise und ein vereinfachtes Spannungsbild des Holzgewebescharniers (Kontaktstoß) unter Belastung und Vorspannung. Aus der Kenntnis des Kraft-Verformungsverhaltens der Randfaser, sowie dem gesamten Flächenquerschnitt ergibt sich die Aufgabenstellung. Der äußere Rand auf konkaver Seite wird durch den Holzwerkstoff, auf konvexer Seite durch den Textil-Klebstoff-Verbund dargestellt. Diese Seite unterliegt einer Zugscherbeanspruchung, der Holzwerkstoff unterliegt einer Druckbeanspruchung. Die Biegebeanspruchung aus Kräften normal zur Plattenfläche kann im Zusammenhang mit dem Kontaktproblem vernachlässigt werden, da die Plattenlängen gering sind. Ebenso tritt das Problem des Schubversatzes bei fugenparalleler Krafteinleitung auf. Ein geringes Öffnen der Kontaktfuge zwischen den Einzelplatten kann deshalb bereits zu einem Kontaktproblem führen.

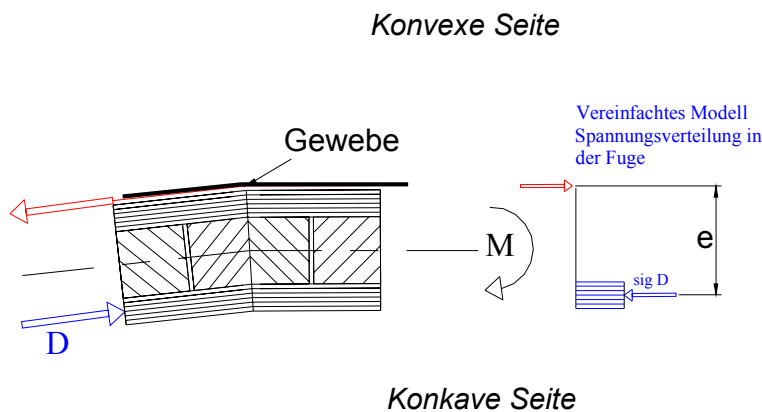


Abbildung 7: Spannungsbild der Fuge unter Belastung und Vorspannung

3. Versuche

3.1 Vorbemerkungen

Zur Auswahl geeigneter Einzelmaterialien eines optimalen Werkstoffverbunds (Compound) werden Versuchsreihen ausgeführt. Abbildung 8 zeigt Ausgangsmaterialien (Einzelkomponenten), Prüfmethode und Versuchsziele.

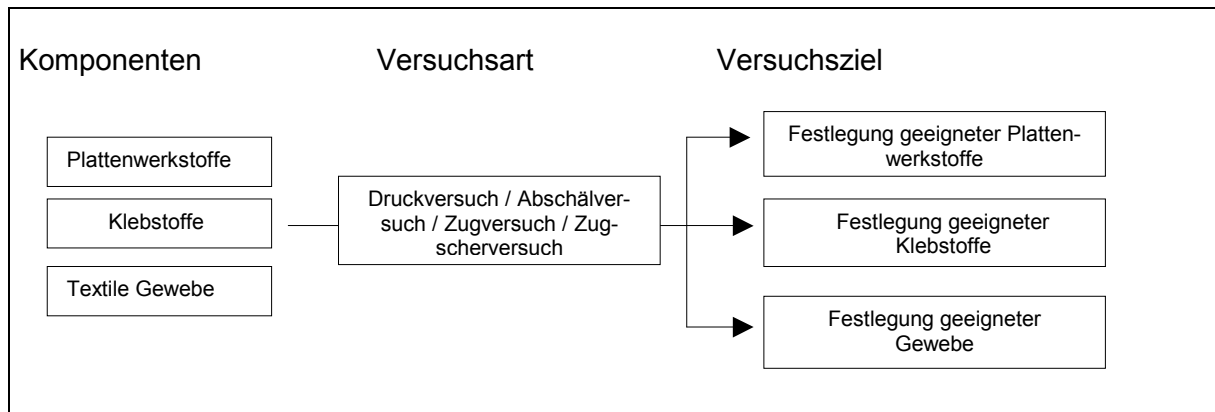


Abbildung 8: Ausgangsmaterialien, Prüfmethode und Versuchsziel

3.2 Einflüsse auf die Festigkeit einer Klebverbindung

Adhäsion und Kohäsion

Eine Klebstoffverbindung wird als starrer Verbund bezeichnet. Ihre Qualität ergibt sich aus der physikalischen Adhäsion zwischen Fügeglied und Klebstoff auf Basis zwischenmolekularer Anziehungskräfte bzw. von Restvalenzkräften (Van der Waalsche-Kräfte). Hierbei üben die Benetzung und Benetzbarkeit der Fügegliedflächen einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Adhäsionsverbundes aus [HUB-94]. Ein wesentliches Einflußkriterium ist die Viskosität eines Klebstoffs, bzw. sein Penetrationsverhalten in den Fügegliedoberflächen. Adhäsionskräfte wirken überwiegend in der Interphase (Grenzfläche). Für Holzoberflächen stellt die Rauigkeit einer Oberflächenstruktur einen zusätzlichen Aspekt der physikalischen Adhäsion dar, da sich der Klebstoff in der Holzoberfläche verhakt. Ein Kriterium für das Bruchverhalten einer Klebstoffverbindung ist die Sichtprüfung. Es liegt ein reiner Adhäsionsbruch dann vor, wenn weder auf dem Fügeglied Klebschichtreste, noch an der Klebschicht Fügegliedreste vorhanden sind [HAB-97]. Diese Prüfung kann bei einer einschnittig überlappenden Verbindung zweier Fügeglieder mit ähnlichen mechanischen Eigenschaften leicht vorgenommen werden. Abbildung 9 zeigt dieses Modell.

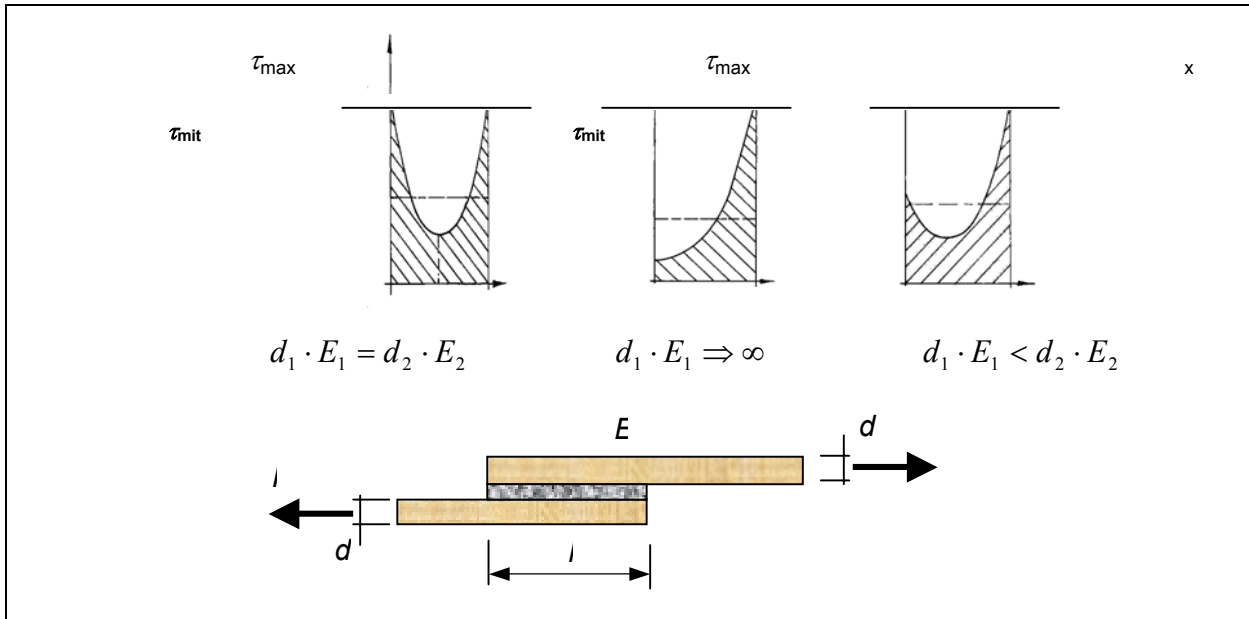


Abbildung 9: Einschnittige Verbindung. Spannungsverlauf bei unterschiedlichem E-Modul [BIL-02]

Der vorliegende Werkstoffverbund unterscheidet sich von dieser Verbindung durch einen anderen Aufbau. Hierbei soll der Klebstoff zusätzlich zur Verhinderung einer Füge teilverschiebung eine Füge teildehnung des Gewebes verhindern. Abbildung 10 zeigt dieses Modell. Abbildung 11 zeigt das auftretende Spannungs-Dehnungsverhalten unterschiedlicher Klebstoffe im Vergleich zu einem Glasfasergewebe.

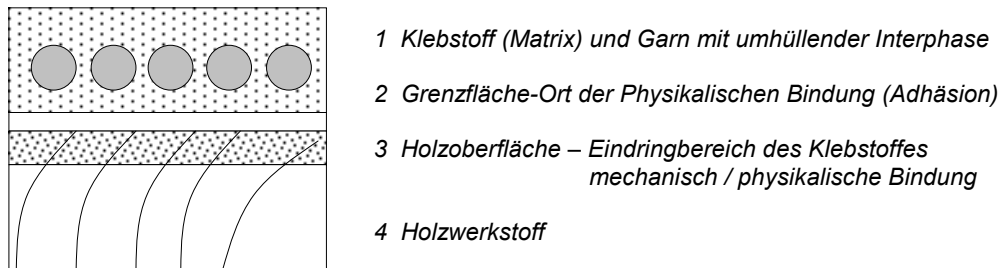


Abbildung 10: Aufbau des Werkstoffverbunds. Klebstoff als einbettende Matrix des Gewebes

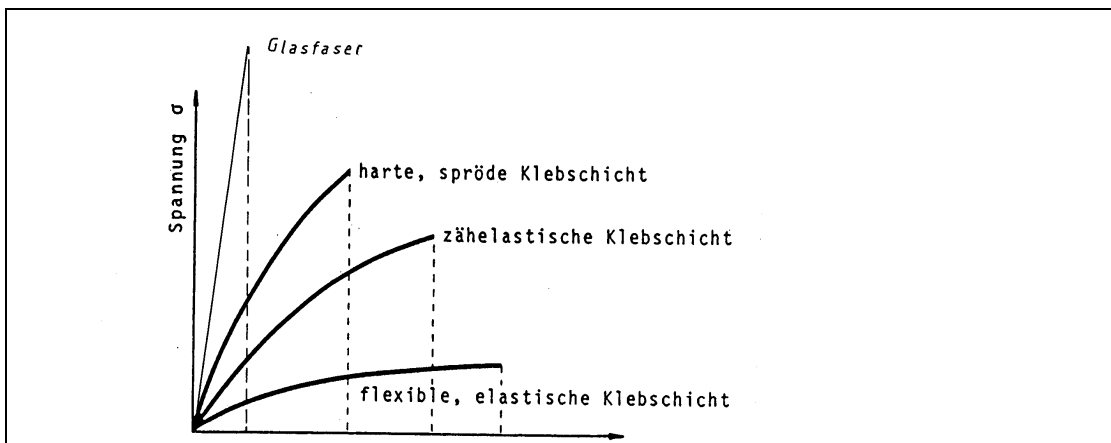


Abbildung 11: Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Glasfasergewebes, sowie verschiedener Klebstoffe

Da die Verschiebungen unter Last für Gewebe und Klebstoff praktisch identisch sind, übernimmt der Werkstoff mit dem höherem E-Modul die größeren Spannungen. Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass das Gewebe einen wesentlich höheren E-Modul besitzt als der Klebstoff. Glasfasern besitzen eine nahezu lineare Arbeitslinie, während diese bei Polyesterfasern S-förmig verläuft. Für eine gleichgroße Verteilung der Spannungen auf Klebstoff und Gewebe wäre somit ein E-Modul gleicher Größe, bzw. eine größere Fläche des Werkstoffes mit geringerem E-Modul erforderlich, da sich die Dehnsteifigkeit k aus:

$$k = \frac{EA}{l_0}$$

ergibt.

Somit werden die Anforderungen an den Werkstoffverbund deutlich. Diese sind:

- Herstellung eines starren Verbundes zwischen HWS-Oberfläche und Klebstoff
- Herstellung eines starren Verbundes zwischen Garn-Oberfläche und Klebstoff
- Herstellung eines starren Matrixgefüges zwischen den Garnen

4. Versuchsprogramm Einzelkomponenten

4.1 Druckversuche an Dreischichtplatten \parallel zur Faserrichtung der Decklagen

Die ermittelte mittlere Bruchspannung $\sigma_{D_{Bruch}}$ für das Plattenelement beträgt \parallel zur Richtung der Decklagen $69,40 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert liegt über den üblichen Werten der Bruchspannung σ_{Bruch} für *NH S10/MS10*. Dies wird mit der geringen Länge des Probekörpers begründet. Der Versuch zeigt eine überproportional große Spannungsaufnahme durch die Decklagen \parallel zur Faserrichtung und führt somit zu einer Betrachtung, bei der die Mittellage vernachlässigt werden kann. Der Mittelwert des Druck-Sekantenmoduls der Decklagen \parallel beträgt 2082 N/mm^2 . Dieser Wert wurde in einem Bereich von $8328,86 \text{ N}$ bis $33315,47 \text{ N}$ gemessen und liegt somit unter dem Wert für Vollholz *NH S10/MS10*. Es wurde kein Wegnehmer nach *EN 408* im Mittelbereich des Probekörpers mit einem Messabstand von $15 \text{ mm} = l_1$ angebracht, sondern lediglich ein Kraft-Weg Verhalten innerhalb eines definierten Bereichs dokumentiert. Somit ist davon auszugehen, dass im Bereich der Schnittkanten des Probekörpers ein anderer Verformungsmodul vorliegt (Volumeneffekt). Abbildung 12 zeigt ein Modell der Einzelplatte mit dem Gesamt-Verformungsmodul V_G , der sich aus den unterschiedlichen Verformungsgrößen ϵ_1 und ϵ_2 zusammensetzt, wobei im Bereich des Kontaktstoßes der im Druckversuch ermittelte Sekantenmodul S_1 , im Bereich der Plattenmitte der E-Modul E_2 für Vollholz *NH S10* angesetzt wurde.

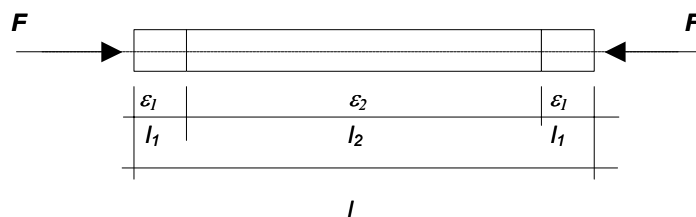


Abbildung 12: Modell der Einzelplatte mit unterschiedlichem Verformungsanteilen ϵ_1 und ϵ_2

4.2 Abschälversuche und Vorauswahl Gewebe

In der Versuchsreihe Abschälversuche wurde ein breites Spektrum an Klebstoffen und Füge- teilen in 113 Einzelversuchen untersucht. Hierbei konnte ein Ausschluss eines PVAc- Dispersionsklebstoffs aufgrund zu geringer Adhäsion an den Geweben und eines Zweikom- ponenten-Epoxidklebstoffs mit mineralischen Zuschlägen aufgrund seines gewebezerstören- den Verhaltens vorgenommen werden. Ebenso konnten die Gittergewebe eindeutig für weite- re Versuche ausgeschlossen werden, da sie einen kontrollierten Klebstoffauftrag nicht zulie- ßen und eine numerische Simulation unmöglich erscheint. Die aus dieser Versuchsreihe her- vorgehende Festlegung auf einen Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff hat sich als richtig und wirtschaftlich erwiesen, obwohl seine Festigkeitswerte durch einen in der Endphase hin- zugekommenen Zweikomponenten-Epoxidklebstoff ohne mineralische Zuschläge übertroffen wurden.

4.3 Zugversuche Gewebe

Versuchziel war Bestimmung des Kraft-Dehnungsverhaltens und des Sekantenmoduls der Gewebearten Polyester und Glasfaser in einem Bereich zwischen 500 N und 2500 N. Für die Anwendung im Werkstoffverbund spielt das Spannungs-Dehnungsverhalten des Gewebes in einaxialer Richtung eine wesentliche Rolle. Hierbei ist die Zugdehnung eines einaxial bean- spruchten Gewebes im Bereich von Anfangsverformungen relevant. Da die Bruchdehnung beispielsweise bei Polyesterfasern bei 15-40% liegt, ist dieser Wert bei der Gewebeauswahl nicht maßgebend. Auswahlkriterien basieren somit auf der Kenntnis von elastischer und blei- bender Dehnung unter hoher Anfangsspannung. Weitere Kriterien für die Auswahl des texti- len Gewebes sind:

- Starke Adhäsionsbindung zum Klebstoff (mechanisch und physikalisch)
- Hohe Zugfestigkeit im elastischen Bereich
- Minimale Anfangsdehnung
- Widerstand gegen Spröbruch nach Falten oder Knicken im beleimten Zustand

Die Dehnsteifigkeit eines Gewebes hängt wesentlich von der gewählten Webart ab. *Blum* [BLU-90] hat den mechanischen Zusammenhang von Webart und Dehnverhalten in einem einfachen Strukturmodell verdeutlicht. Hier zeigt sich, dass das Spannungs- Dehnungsverhalten stark von der Konvergenz des Kett- und Schussfadens unter Last abhän- gig ist. Der einzelne Kett-, oder Schussfaden verfolgt die Tendenz, sich unter Last zu längen und verändert somit das Spannungs-Dehnungsverhalten in orthogonaler Richtung. Abbildung 13 zeigt das Strukturmodell eines Gewebes (Leinwandbindung).

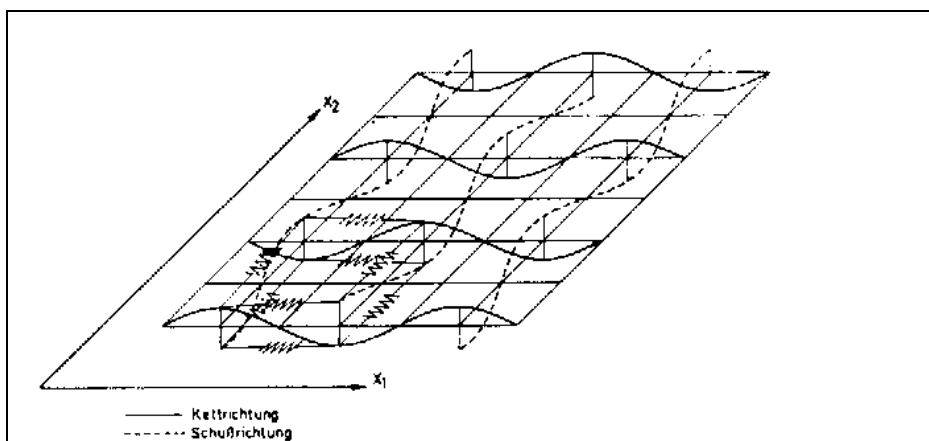


Abbildung 13: Strukturmodell eines Gewebes (Leinwandbindung) nach *Blum* [BLU-90]

Für den speziellen Werkstoffverbund ist eine unidirektionale Orientierung wünschenswert, wie sie beispielsweise durch die Panamabindung oder eine Leinwandbindung erzeugt werden. Abbildung 14 zeigt die Spannungs-Dehnungsverläufe der beiden geprüften Gewebearten Polyester und Glasfasergewebe in Panamabindung bis zum Bruch bei einer Probenbreite von 3 cm.

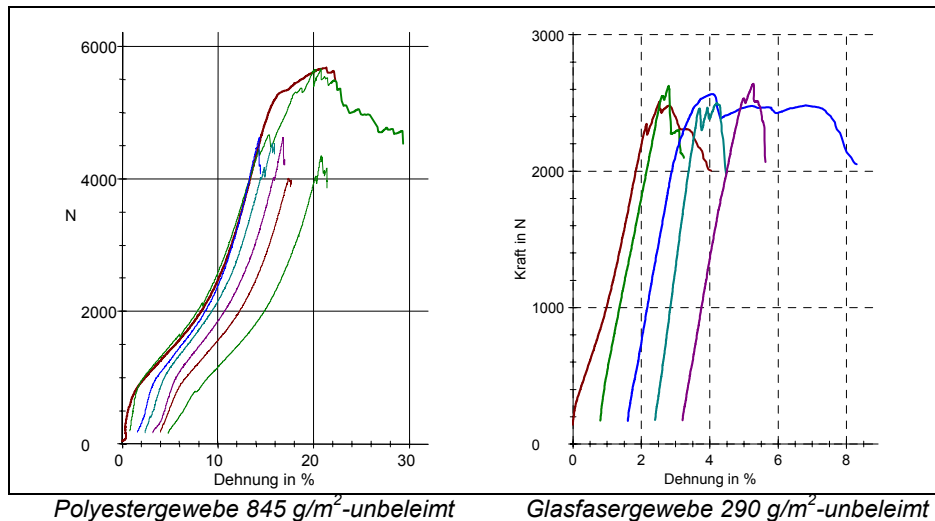


Abbildung 14: Spannungs-Dehnungsverläufe der Gewebeart Polyester und Glasfasergewebe

5. Versuchsprogramm Werkstoffverbund

Zur Untersuchung des Werkstoffverbunds wurden 45 Zugscherversuche durchgeführt. Von besonderem Interesse ist der Einfluß des Klebstoffs auf die Behinderung der Fügeiteildehnung im textilen Gewebe und der Fügeiteilverchiebung der einschnittigen Verbindung zwischen textilem Gewebe und Plattenwerkstoffoberfläche. Ziel der Versuche war die Bestimmung des Verformungsverhaltens am Werkstoffverbund in einem exakt definierten Verformungsbereich. Es wurden folgende Werkstoffkombinationen untersucht:

- Glasfasergewebe-PU Klebstoff- DOKA Platte
- Polyestergerewebe-PU Klebstoff- DOKA Platte (BU)
- Polyestergerewebe-Epoxidklebstoff-Dreischichtplatte Platte (BU)

Der Vergleich zeigt, dass die großen Unterschiede im Kraft-Dehnungsverhalten zwischen Polyester- und Glasfasergewebe beim Zugversuch nach Abbildung 14 im Werkstoffverbund innerhalb eines Bereiches bis 1000 N angeglichen werden. Die S-förmige Verlaufskurve des Polyestergerewebes wird im Compound nach Abbildung 15 ausgeglichen und zeigt bis ca. 1500 N einen nahezu linearen Verlauf. Weiter zeigt sich ein positiver Einfluß des Epoxidklebstoffs auf den Bereich zwischen 2000 N und 2500 N durch Reduzierung der Fügeiteildehnung des Gewebes. Gleichzeitig wird deutlich das lediglich das Glasfasergewebe einer guten Spannungsausnutzung unterzogen werden kann, da auch hier die Bruchgrenze von ~2500 N erreicht wird, während das Polyestergerewebe durch Fügeiteildehnung versagt.

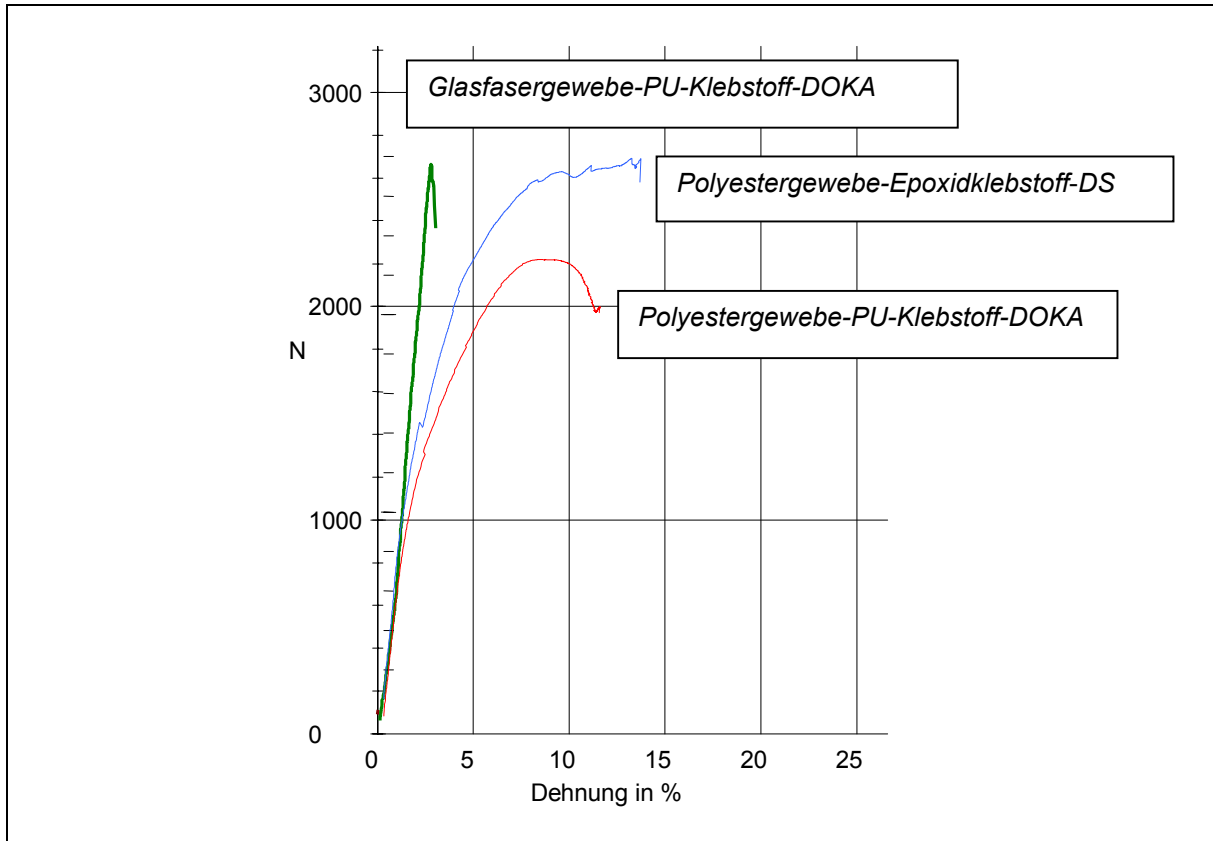


Abbildung 15: Zugscherprüfung Werkstoffverbund-Mittelwertkurven des Kraft-Dehnungsverlaufs

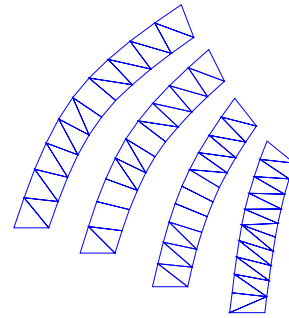
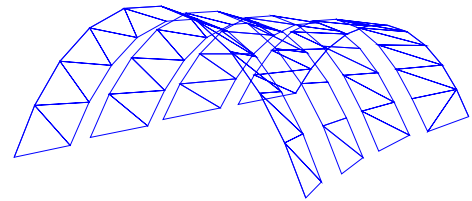
6. Herstellung und Montage von Prototyp 4

6.1 Der Werkstoffverbund als Holzgewebescharnier

Zum Bau des Prototypen 1 bis 4 wurde der Werkstoffverbund Glasfasergewebe-PU-Klebstoff-DOKA insbesondere wegen seiner toxikologischen Unbedenklichkeit, beim Prototyp 4 zusätzlich der Werkstoffverbund Polyestergewebe-Epoxidklebstoff-DS eingesetzt. Hierbei zeigt sich, dass Glasfasergewebe ein hart-sprödes Materialverhalten mit Bruchgefahr bei starkem Knicken aufweisen, während Polyestergewebe für diese Beanspruchung gut geeignet sind.

6.2 Herstellung und Montage

Der Werkstoffverbund wird zunächst auf der Baustelle flächig ausgelegt. Die Aufstellung und Montage erfolgt durch punktuelle oder lineare Anhebung bzw. Unterstützung der Einzelstreifen, bis sich die vorläufige, gewünschte räumliche Form des Wand-, Boden- oder Deckenelementes einstellt. In dieser Form stabilisiert sich der Werkstoffverbund durch Fugenschluss und überträgt auftretende Normalkräfte (Druck und Zug) in axialer Plattenrichtung, so dass ein ausreichend standsicherer Montagezustand erreicht wird. Nach erfolgter Formgebung wird die Gesamtsteifigkeit des Tragsystems unter Ausnutzung geeigneter Vorspannverfahren erhöht. Die Abbildungen 16 bis 21 zeigen den gesamten Herstellprozess vom Plattenzuschnitt bis zum fertigen Ergebnis eines Schalensegments von $\sim 18,50 \text{ m}^2$ Grundfläche und 24 m^2 abgewickelter Fläche als freitragende Konstruktion aus 27 mm starken Holzwerkstoffplatten. Die Montage wurde mittels Hallenkran im Wesentlichen von einer Person durchgeführt, die Montagezeit betrug 820 min .



Abbildungen 16 bis 21: Herstellprozeß vom Plattenzuschnitt bis zum fertigen Ergebnis und Zuschnittsplan

Literatur

- [BIL-02] Billensteiner, W.: *Untersuchung der Verbundwirkung von kohlefaserverstärkten Holzleimbindern*. Diplomarb. TU Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2002
- [BLU-90] Blum, R.; Brinkmann, G. (Hrsg): *Leicht und Weit-Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke*, DFG, Weinheim: Vch Verlagsgesellschaft, 1990
- [GAI-02] Gaisberger, A.: *Theoretische und Experimentelle Untersuchungen zur Abschätzung des Tragverhaltens diskontinuierlicher Holz-Gewebe-Verbund-Tragwerke*. Diplomarb. TU Wien-Institut für Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau, 2002
- [HAB-97] Habenicht, G.: *Kleben-Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. 3.Aufl., Berlin: Springer, 1997
- [HAL-01] Haller, P.; Wehsener, J.: *Taglastverhalten von textilibewehrten und verdichteten Holzverbindungen*. In: Rosenheimer Fenstertage. Rosenheim: Lehrinstitut der Holzwirtschaft und Kunststofftechnik e.V, 2001
- [HFA-01] Holzforschung Austria: *Prüfung der Abschälfestigkeit unterschiedlicher Gewebe und Klebstoffe-Prüfbericht.*, Wien: 2001
- [HÖN-02] Hönig, K.: *Untersuchungen der Materialeigenschaften für einen Holz-Gewebe-Verbundquerschnitt unter besonderer Berücksichtigung der Abscherkräfte des Klebers und der Kräfte normal zur Plattenschnittfläche*. Diplomarb. TU Wien-Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2002
- [HUB-94] Huber, H.F.: *Dauerhaft kleben-Eine Einführung für den Praktiker.*, Hannover: Vincentz Verlag, 1994
- [MÜL-02] Müller, U.: *Festigkeitsuntersuchungen für eine Knotenverbindung eines Systems zur Herstellung weit gespannter Holzflächentragwerke für das Bauwesen*. Forschungsbericht. Universität f. Bodenkultur Wien-Institut für Holzforschung, Wien: 2002
- [NEU-94] Neuhaus, H.: *Lehrbuch des Ingenieurholzbaus.*, Stuttgart: B.G.Teubner, 1994
- [ZEP-91] Zeppenfeld, G.: *Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie.*, 1.Aufl., Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig, 1991