



*Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
TU Dresden, D*

Neue Technologien für das Bauen mit Holz

Neue Technologien für das Bauen mit Holz

Einführung

Der Bedeutung des Baustoffes Holz und den Beitrag, den er zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten kann, wird entscheidend davon abhängen, in welchem Umfang die gegenwärtigen technischen Aufgaben wirtschaftlich und qualitativ befriedigend gelöst werden können. Es genügt daher nicht, über einen nachwachsenden Rohstoff zu verfügen, er muss auch heutigen und künftigen Anforderungen gewachsen sein.

Materialentscheidungen für technische Anwendungen werden vorwiegend von Ingenieuren nach wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten getroffen. Sie kommen in ihrer akademischen Ausbildung mit einer reichen Palette von Bau- und Werkstoffen in Berührung, die sich in Zukunft noch weiter zu ihren Gunsten vergrößern wird. Im Gegensatz zum Handwerk sind Ingenieure nicht a priori auf ein bestimmtes Material festgelegt. Allerdings scheidet der Einsatz von Holz in vielen Bereichen der Technik von vorneherein aus, so dass Ingenieure seine Verwendung eigentlich nur noch im Bauwesen ernsthaft in Erwägung ziehen können, aber auch dort fristet dieser Baustoff ein Nischendasein. Eine Entscheidung für das Holz bedarf daher der Stärkung technischer und wirtschaftlicher Argumente.

Für die konstruktive Verwendung sind Steifigkeit und Festigkeit entscheidende technische Größen, im Falle des Holzes sind diese Eigenschaften modifizierbar und in hohem Maße richtungsabhängig. Während Festigkeit und Steifigkeit bei der Querschnittsdimensionierung in Längsrichtung sehr wirksam kompensiert werden können, stellen die weitaus kritischeren Schub- und Querbeanspruchungen selbst erfahrene Tragwerksplaner immer wieder vor Probleme, die mittlerweile eine Vielzahl verschiedener Lösungsansätze und Nachweise hervorgebracht und zu einem unübersichtlichen Spezialwissen geführt haben. Es ist daher wünschenswert, den in Zusammenhang mit der Anisotropie stehenden Problemen auch mit einer universellen Technologie zu begegnen.

Neben den mechanischen Eigenschaften erweist sich in der Konstruktion die geringe Dauerhaftigkeit organischer Baustoffe bei der Außenanwendung als entscheidender Nachteil, dem man auf baustofflicher oder konstruktiver Ebene begegnen kann. In beiden Fällen ist mit zusätzlichen Kosten zu rechnen.

Veränderung von stofflichen Eigenschaften

Unter den technischen Eigenschaften nehmen die mechanischen bei tragenden Anwendungen eine zentrale Stellung ein. Die Qualität von Holz hängt stark von der Rohdichte ab. Das Verdichten von Holz, vornehmlich Laubholz, unter Wärme und Druck ist in der Holztechnologie seit langem bekannt und auch heute werden kunstharzgebundene Furnierholzplatten nach diesem Verfahren hergestellt. Voraussetzung für das Verdichten ist die poröse Struktur des Holzgefüges, das nach Erreichen der Erweichungstemperatur des Lignins bei etwa 130 °C unter einer Presse verdichtet wird. Durch die thermomechanische Behandlung lassen sich Festigkeit und Steifigkeit proportional zur Verdichtung steigern. Die poröse Struktur wird im weiteren noch eine zentrale Rolle spielen.

Darüber hinaus werden Faserunregelmäßigkeiten und natürliche Dichteunterschiede bei der Verdichtung eingeebnet, was zu einer Homogenisierung führt. Letztendlich bewirkt ein weiteres Erhitzen auf etwa 180°C eine beträchtliche Erhöhung der biologischen Resistenz, die allerdings mit einer Versprödung des Materials einhergeht. Auf die thermische Vergütung zur Steigerung der biologischen Resistenz wird im weiteren nicht eingegangen.

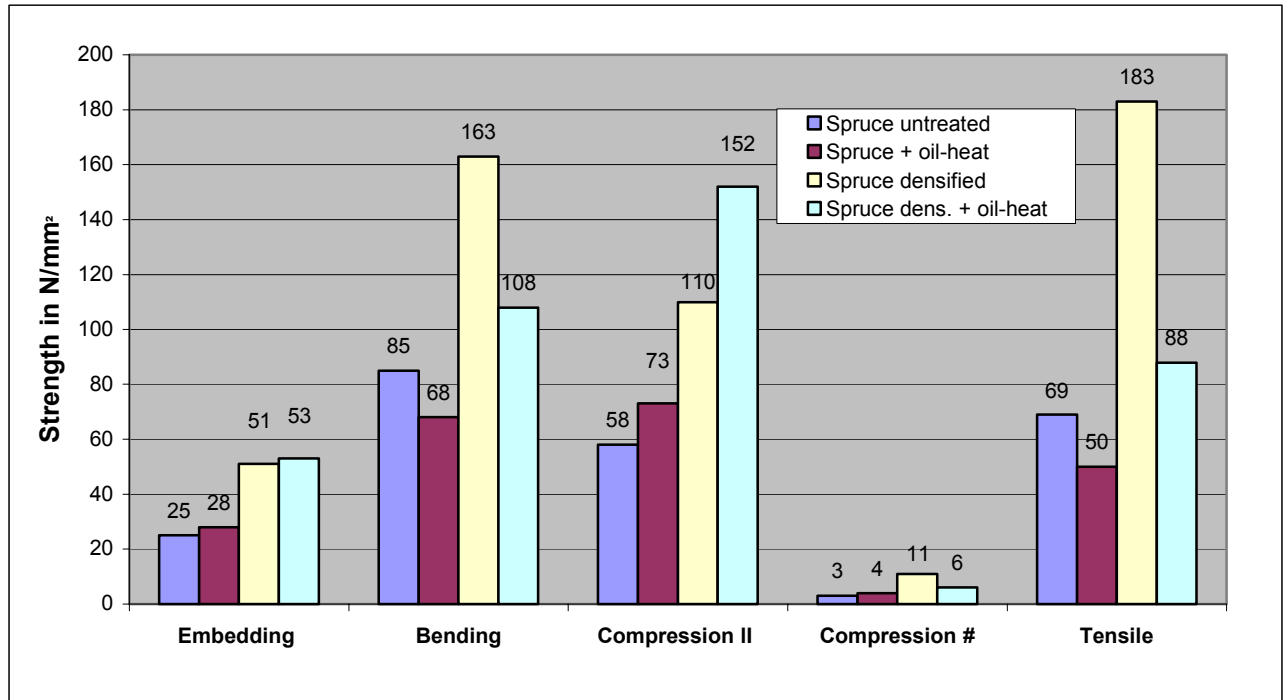


Abb. 1 zeigt eine Aufstellung technisch relevanter Festigkeiten unbehandelter und verdichteter Fichte mit und ohne Hitzevergütung (Haller, Rapp et al.).

Bei der Verdichtung quer zur Faser bleibt die Anisotropie erhalten bzw. erhöht sich sogar, da die Querzugfestigkeit nicht in gleichem Maße ansteigt wie die Längsfestigkeit. Die Querdruckfestigkeit wiederum profitiert von der Verdichtung am deutlichsten.

Querschnitte des Holz- und Metallbaus

Im Bauwesen müssen Kräfte und Momente unter Einhaltung von Verformungen übertragen werden. Man tut dies mit Hilfe eines Produktes zweier Faktoren: der Festigkeit, welche linear eingeht und einer geometrischen Größe. Während bei der Zugbeanspruchung allein die Querschnittsfläche zählt, ist bei Biegung das Flächenmoment 2. Ordnung entscheidend, in das der Abstand von der neutralen Faser quadratisch eingeht. Die Bedeutung dieser Tatsache wurde von der Technischen Mechanik früh erkannt und floss schließlich in die Herstellung genormter Querschnitte ein. Im Gegensatz hierzu wird deutlich wie wenig der rechteckige Vollquerschnitt die Vorstellungen von Ingenieuren widerspiegelt.

Das Wachstum der Bäume und deren Auftrennung im Sägewerk führen einerseits zu hohen Verlusten, andererseits zu Vollquerschnitten, welche, verglichen mit technischen Profilen, bei gegebener Querschnittsfläche geringe Flächenmomente erzielen. Während der Stoffproduzent Wald zu den preiswürdigsten Materialanbietern zählt, so dass heute selbst die thermische Verwertung noch in Betracht gezogen wird, geht die Wettbewerbsfähigkeit bei der Transformation des Rohholzes in Querschnitte verloren. Es scheint daher unverzichtbar, die Möglichkeiten der Materialeinsparung bei der Querschnittsbildung auszuloten.

Holz gilt als ein leicht zu bearbeitendes Material. Das Gegenteil trifft jedoch zu! Zwar lässt es sich mit geringem Energieaufwand spanend bearbeiten, also leicht sägen, hobeln, fräsen oder schleifen, jedoch sind die kostengünstigen spanlosen Massenverfahren wie Walzen, Strangpressen, Tiefziehen etc. infolge der geringen plastischen Formbarkeit nicht anwendbar.

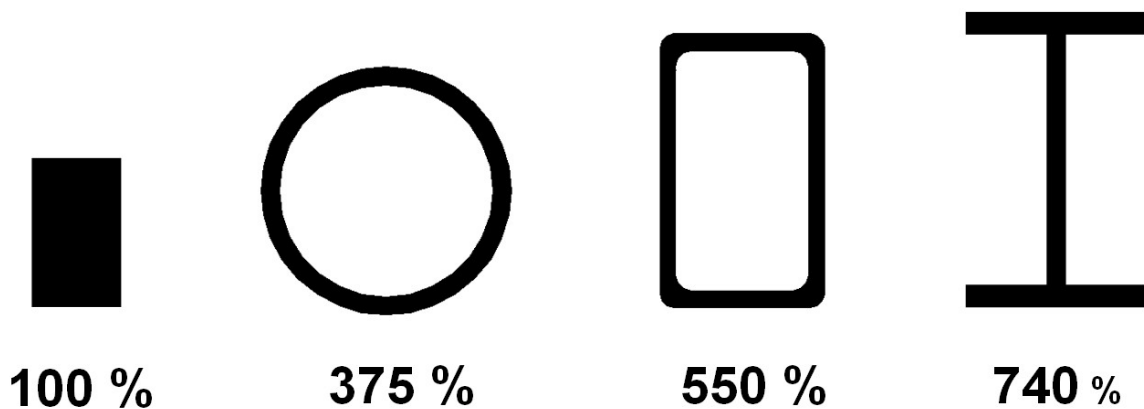


Abb. 2 Vergleich der Flächenmomente 2. Ordnung (Trägheitsmoment) bei gleicher Querschnittsfläche

Wie bereits bemerkt, lässt sich Holz wegen seines hohen Porengehaltes quer zur Faserrichtung verdichten. Dabei wird in der Regel ein Stauchgrad von etwa 50 % erzielt, der Querschnitt also auf die Hälfte seiner ursprünglichen Höhe zusammengedrückt, wobei sich die Zellwände plastisch zusammenfallen. Bezieht man sich nun auf das querverdichtete Holz, so ließe sich bei vollständigem Auseinanderziehen der Zellstruktur die Bruchdehnung um zwei Größenordnungen auf 100 % steigern. Und dies ist in der Tat möglich.

Damit liegt ein grundlegend neues Materialverständnis vor, das Holz als zellulären Festkörper auffasst, der sich schaumstoffartig komprimieren und zu prismatischen Querschnitten rückverformen lässt. Dieses Prinzip wurde vom Autor mit Erfolg an Querschnitten mit tragwerksnahen Abmessungen angewandt. Dabei wurden zunächst massive Platten aus Preßholz verleimt, die damit über genügend Verformungsreserven verfügten und anschließend zu Rohren gerollt werden konnten.



Abb. 3 Beispiel einer Röhre aus gerolltem Massivholz

Textile Strukturen

Textile Gebilde unterscheiden sich erheblich hinsichtlich ihrer Struktur, welche aus gerade verlaufenden Fäden oder Maschen bestehen kann. Bei Geweben und Gelegen zum Beispiel werden die Fäden zur Erzielung hoher Steifigkeiten in mehr oder weniger gestreckter Form verarbeitet, wobei der Zusammenhalt der Fäden untereinander entweder durch Verweben oder Vernähen mit einem dünnen Hilfsfaden erfolgt.

Durch Aufsticken können Fäden in der Ebene mit nahezu beliebigem Verlauf auf ein Trägervlies aufgebracht werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit beanspruchungsgerechter Bewehrungen mit denen besonders Verbindungen wirkungsvoll verstärkt werden können.

Gestricke oder Geflechte sind ebene oder räumliche Strukturen mit geringer Steifigkeit, jedoch sehr guter Drapierbarkeit. Diese Techniken sind für formgerechte Bewehrungen oder Beschichtungen geeignet. Durch Einstricken gestreckter Hochleistungsfäden lassen sich Drapierbarkeit und Steifigkeit kombinieren. Beispiele form- und beanspruchungsgerechter textiler Bewehrungen werden an Hand zweier Verbindungsarten im folgenden gezeigt.

Verbindungen

Das Tragverhalten von Strukturen ist in vielen Fällen vom Tragverhalten der Verbindungen gekennzeichnet, die durch die Begriffe Steifigkeit, Tragvermögen, Schlupf und Verformungsvermögen oder Duktilität charakterisiert sind. Wirtschaftlichkeit in der Ausführung, Ausnutzung der Querschnitte und gestalterische Belange sind eng mit der Verbindungstechnologie verknüpft.

Im heutigen Holzbau herrschen stiftförmige Verbindungsmittel vor. Beim Anschluss von Holz mit diesen Verbindungsmitteln treten jedoch wegen der geringen Schub- und Querkzugfestigkeit auch Schwierigkeiten auf. Die Folge sind geringes Tragvermögen und ein sprödes Spaltversagen, sofern die metallischen Verbindungsmittel vor dem Versagen keine plastischen Gelenke ausbilden konnten.

Die bisherigen Bemühungen zur Verbesserung des Tragverhaltens beruhen darauf, die Verbindungsmittel in großen Anschlussflächen unter Einhaltung genormter Abstände zum Rand und untereinander besser anzuordnen, oder die besagten geringeren Festigkeiten durch eine Bewehrung, meist mit Holzwerkstoffen oder eingeleimten Gewindestangen, zu kompensieren.

Eine Alternative zu diesen Maßnahmen stellt die Bewehrung mit Hilfe technischer Textilien dar, die jedoch für viele andere auf die Anisotropie zurückführbare Probleme anwendbar ist.

Untersuchungen am einzelnen Verbindungsmittel

Beim Tragverhalten von Verbindungen spielt das einzelne Verbindungsmittel eine zentrale Rolle, wenngleich bei deren Zusammenspiel in der Verbindungsmittelgruppe neue Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind.

Die Beurteilung eines stabförmigen Verbindungsmittels längs und quer zur Faser erfolgt in einer Prüfung gemäß DIN EN 383. Die Ergebnisse des Versuches sind die Bettungssteifigkeit und die Lochleibungsfestigkeit. Beide Größen sind in weiten Bereichen durch die textile Bewehrungen beeinflussbar, wobei die stofflichen Eigenschaften des Holzes und die textile Bewehrung unterschiedliche Beiträge zu diesen Größen liefern.

Betrachten wir zunächst den klassischen Fall eines Nadelholzes, zum Beispiel Fichte, und ein etwas dichteres Laubholz, sagen wir Eiche. Die daran ermittelten Bettungsmodule mögen als

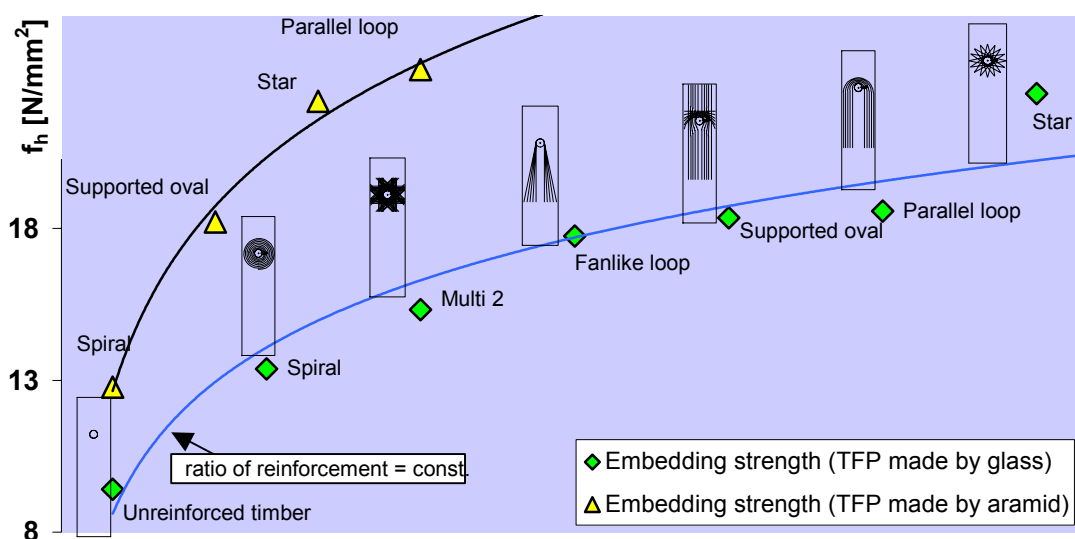


Abb. 4 Lochleibungsfestigkeit verschiedener textiler Strukturen

Bezugsgrößen für die Bewehrung gelten. Diese kann aus verdichtetem Holz mit und ohne textile Verstärkungen, Glasfasergewebe und oder Spezialtextilien aus unterschiedlichen Faserarten bestehen. Die Prüfergebnisse wurden sowohl an von Hand als auch an maschinell hergestellten Bewehrungen ermittelt [Haller et al.].

Fichte zeigt ein sprödes Verhalten bei relativ geringer Traglast, Eiche ist bedingt durch seine höhere Dichte bettungssteifer, jedoch ergeben sich hinsichtlich des Tragvermögens keine signifikanten Unterschiede zur Fichte.

Die Verstärkung der Fichte mit Glasfasergewebe ergibt eine geringfügige Erhöhung der Bettungssteifigkeit und eine deutliche Steigerung der Lochleibungsfestigkeit. Die Probekörper verhalten sich jetzt auch sehr zäh, da die Schussfäden des Gewebes erst nach und nach versagen und die Last über lange Wege auf konstantem Niveau halten können.

Bei der Verdichtung in Kombination mit der Gewebeverstärkung ergänzen sich die Wirkungsweisen. Die höhere Dichte des Holzes erbringt deutlich bessere Bettungseigenschaften, die textile Bewehrung begegnet dem Aufspalten und der Sprödigkeit. Mit dieser Kombination lassen sich für das einzelne Verbindungsmittel Verbesserungen hinsichtlich des Tragvermögens um das Drei- bis Vierfache erzielen.

Die beanspruchungsgerechten Textilien zeigen, dass in Abhängigkeit von Faserart und Anordnung das Bettungsverhalten in weiten Grenzen maßgeschneidert werden kann. Bei der Gegenüberstellung der Bettungseigenschaften haben sich Stern, Scheibe und Schlaufe als besonders günstig erwiesen, so dass sie mit der multiaxial-, Strick- und Kettversatztechnik maschinell umgesetzt wurden.

Alle Bewehrungen wurden von Hand mit Hilfe eines Epoxydharzes aufgebracht. Die Art der Applikation ist wichtig für die Verbundfestigkeit Holz-Textil. Grundsätzlich stehen alle im Kompositbau bekannten Verfahren zur Verfügung. Die Aufbringung mit dem Vakuumverfahren führt zu deutlichen Verbesserungen.

Neue Verbindungen mit Profilquerschnitten – Ein Ausblick

Die Verbindungstechnik hängt entscheidend von den zu verbindenden Querschnitten ab und der Technologie des Verbindens. Der Anschluss rechteckiger Vollquerschnitte gestaltet sich schwierig, da für die Querschnittsfläche nur wenig Oberfläche vorhanden ist und diese zunächst, etwa durch Einschlitzern, vergrößert werden muß. Da diese Verbindungstechniken vornehmlich für den Hallen- und Industriebau entwickelt wurden, sind sie nicht immer von hoher gestalterischer Qualität.

Völlig neue Verbindungsmöglichkeiten ergeben sich bei Verwendung von Profilen. Das wesentlich größere Verhältnis Oberfläche zu Querschnittsfläche macht zusätzliche Bearbeitungsschritte überflüssig wie das folgende Beispiel zeigt.

Nach dem Vorbild der Natur wird eine Astverbindung mit diesen Querschnitten gebaut. Betrachtet man den Ast als Verbindung, werden äußerlich und gefügemorphologisch interessante Prinzipien deutlich. Zunächst weist die organische Wuchsform keine scharfen, einspringenden Ecken auf, welche infolge der Spannungskonzentrationen lokal zu einer Überschreitung der Festigkeit führen. Weiterhin wird deutlich, daß der Querschnittsverlauf nicht konstant ist, sondern sich in einem Optimierungsprozess an die äußere Beanspruchung anpasst.

So ist der auskragende Ast an der Einspannstelle dicker und sich verjüngt in Wuchsrichtung. Schließlich sind der an die Beanspruchung angepasste Faserverlauf und der gefügemorphologische Aufbau bei der Übertragung der Kräfte natürliche Entwurfsprinzipien.

Die massive Gabel aus Buche bzw. gestauchter Buche dient als Zwischenstück für die Aufnahme dreier Holzröhren. Da die Umlenkkräfte infolge einer Momentenbeanspruchung Querspannungen im Sattel erzeugen, ist eine Bewehrung mit Hilfe eines räumlichen Gestrickes vorgesehen. Der geringen Steifigkeit der Maschenstruktur kann durch Recken oder Einziehen gestreckter Verstärkungsfäden entgegengewirkt werden. Dadurch entstehen vollflächig bewehrte Tragwerksteile, welche mit den im Leichtbau bekannten Beschichtungen versehen eine gute Dauerhaftigkeit in der Außenanwendung aufweisen. Die Herstellung solcher Textilien ist in Vorbereitung.

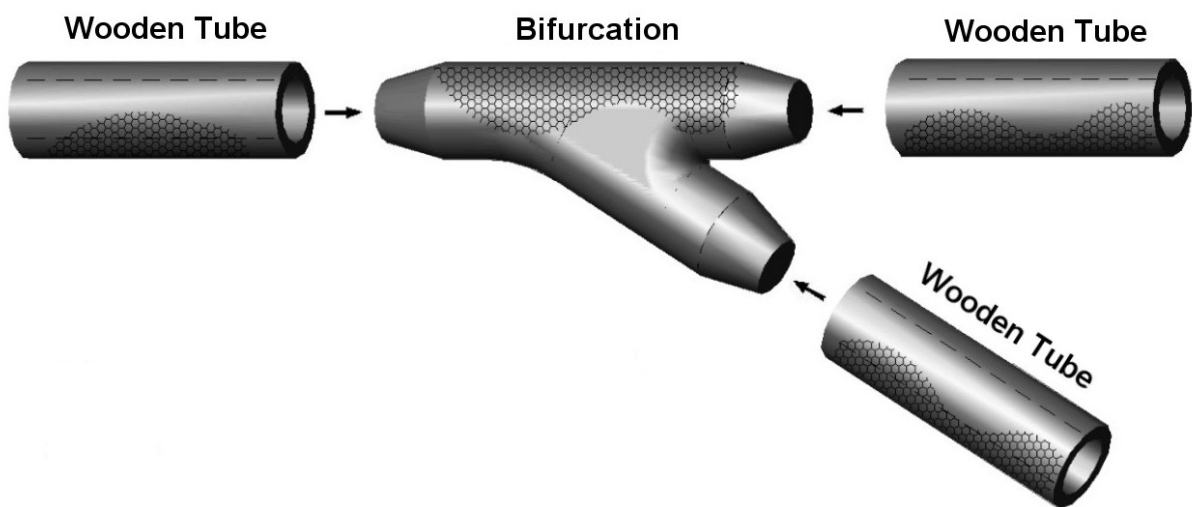


Abb. 5 Schematischer Aufbau einer Holzverbindung mit Rohrprofilen und massivem Verbindungsstück



Abb. 6 Verkleinertes Modell eines Massiven Verbindungsstückes aus Buche und gestauchter Buche in der Sattelfläche; die Form wurde auf einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine hergestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Für die tragende Verwendung von Holz ist neben den mechanischen und biotischen Eigenschaften, die Anisotropie von großer Bedeutung. Während sich erstere durch Sortierung sowie thermische bzw. thermomechanische Verfahren verbessern lassen, ist der Umgang mit der Richtungsabhängigkeit mechanischer Größen uneinheitlich gelöst.

Textile Flächengebilde ermöglichen eine systematische Herangehensweise im Bereich der Bauteilverstärkung, der Verbindungstechnik und des Holzschutzes. Damit werden entscheidende Nachteile des Baustoffes Holz von dieser Technologie tangiert.

Die Ressourceneffizienz von Rohholz ist bezüglich der Tragfähigkeit im Vergleich zu technischen Materialien unbefriedigend. Sie ist im wesentlichen das Ergebnis eingeschränkter Fertigungsverfahren, die sich bislang auf die Zerspanung konzentrieren. Die poröse Struktur des Holzes und deren plastische Formbarkeit unter Wärme führen zu einem neuen Materialverständnis, das Holz nicht mehr als spröden Stoff sondern als verformungsfähigen zellulären Festkörper begreift. Die Machbarkeit geformter Querschnitte lassen die wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Potentiale dieser Technologie zu Gunsten der Forst- und Holzwirtschaft erkennen.

Literatur

Offermann, P.; Abdkader, A.; Engler, Th.; Schierz, M.; Grundlagen textiler Bewehrungsstrukturen zur Verstärkung bestehender Bauwerke; Research Report of SFB 528 „Textile reinforcement in civil engineering“; Faculty of Civil Engineering; Dresden University; 2002, pp. 25-74

Haller, P.; Birk, T.; Putzger, R.; Physikalische und mechanische Untersuchungen an textilbewehrtem Holz und Holzbauteilen; Research Report of SFB 528 „Textile reinforcement in civil engineering“; Faculty of Civil Engineering; Dresden University; 2002, pp. 283-322

Haller, P.; Chen, C.J.; Textile reinforced timber joints and structures; Structural Engineering International; 4/99

[Haller] Haller, P.; Design and Optimization in Wood Construction, Proceedings, Workshop on Optimal Design, Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique Palaiseau, November 25-27, 2002